



**SEKİZİNCİ ULUSAL SAVUNMA UYGULAMALARI  
MODELLEME VE SİMÜLASYON KONFERANSI**

**19-20 Kasım 2019**

**ODTÜ Kültür ve Kongre Merkezi, Ankara**

**BİLDİRİ KİTABI**

**EDİTÖRLER**

Pınar Karagöz

Aysu Betin Can

S. Vedat Karaarslan

Esmâ İpekoğlu

Ceylan Dalgıç

ISBN: 978-975-429-395-1

©ODTÜ-TSK MODSİMMER (2019)

Bildirilerin içeriğinden yazarları sorumludur.



## ÖNSÖZ

Bu yıl 8. Ulusal Savunma Uygulamaları Modelleme ve Simülasyon (USMOS) Konferansı'nı düzenliyoruz. Modelleme ve simülasyon (MODSİM) alanındaki gelişmelerin paylaşıldığı tek ulusal konferans olma özelliğini taşıyan konferansımız, konferans başlığının da vurguladığı savunma uygulamalarının yanı sıra sivil alandaki modelleme ve simülasyon gelişmelerinin de paylaşıldığı bir ortam sunmaktadır.

Günümüzde büyük veri ve yapay zekâ teknolojileri pek çok alanda olduğu gibi MODSİM alanında da yeniliklere ve yeni yeteneklerin geliştirilmesine imkân vermektedir. MODSİM çalışmaları sırasında elde edilen büyük miktarda verinin verimli olarak işlenebilmesi, yapay zekâ teknolojileri ile faydalı örüntülerin elde edilmesi daha etkin kazanımlar için potansiyel sunmaktadır. Güncel gelişmelerden hareketle bu senenin ana teması "Büyük Veri Çağında Modelleme ve Simülasyon" olarak belirlendi. Büyük veri ile MODSİM arasındaki etkileşim, bildirili oturumların yanı sıra, davetli konuşmacımız Prof. Dr. Erdal Çayırıcı tarafından yapılacak konuşmada ve düzenlenecek panelde de irdelenecek.

MODSİM alanındaki gelişmelerin paylaşılacağı, akademik değerlendirme sonucu kabul edilen 45 bildiri "Büyük Veri", "Artırılmış Gerçeklik", "Analiz ve Karar Destek", "Havacılık Uygulamaları", "MODSİM Geliştirme Süreçleri ve Birlikte Çalışabilirlik", "Mühendislik Ar-Ge ve Test", "Simülasyon Altyapıları", "Coğrafi Bilgi Sistemleri", "Etkinlik Değerlendirme" ve "Kavramsal Modelleme" başlıkları altında 13 oturumda dinleyicilerle ve bildiri kitabı olarak okurlarla buluşacak. Bildirili oturumların yanı sıra konferansın ilk gününde davetli konuşma ve panel de yer alacaktır. Konferansın ikinci gününde ise "NATO Modelling and Simulation Group (NMSG)" çalışmaları kapsamındaki deneyimler paylaşılacak. Büyük veri ve yapay zekâ ile yakından ilgili iki konu olan "Artırılmış Gerçeklik" ve "Derin Öğrenme" teknolojileri ve bu teknolojilerin savunma alanında kullanımı üzerine iki eğitim semineri konferans kapsamında yer almaktadır.

USMOS Konferansı'nın devamını mümkün kılan pek çok paydaşın katkısı ve desteği bulunmaktadır. Geçmiş konferanslarda olduğu gibi USMOS 2019 da Genelkurmay Başkanlığı, Millî Savunma Bakanlığı, Savunma Sanayii Başkanlığı, Savunma ve Havacılık Sanayii İmalatçılar Derneği (SASAD), Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) ve ODTÜ-TSK MODSİMMER tarafından düzenlenmiştir. Konferansın düzenleme, koordinasyon ve akademik kurulunda yer alan değerli üyeleri ve bildiri değerlendirmelerini yapan hakemler özverili çalışmaları ile konferansa katkıda bulunmuşlardır. Her birine ayrı ayrı teşekkürlerimizi sunuyoruz. Ana davetli konuşmacımız Prof. Dr. Erdal Çayırıcı, NMSG oturumunda yer alacak konuşmacılarımız Sn. Dr. Murat Eren, Sn. Aylin Öztürk ve Ütğm. Ömür Çakatay'a, eğitim oturumlarında konuşmacı olarak yer alan Prof. Dr. Veysi İşler ve Dr. Öğr. Üyesi Gökberk Cinbiş'e, panel moderatörümüz ve panelistlerimize, konferansa katılım ve paylaşımları için şükranlarımızı sunarız. USMOS 2019'un temel taşlarını oluşturan bildirileri gönderen yazarlara teşekkürü bir borç biliriz. Ayrıca oturumları yöneten oturum başkanlarına, sergi alanında yer alan kurumlara, sponsor olan sanayi kuruluşlarına ve 2224-B programı kapsamında konferansımıza sağladığı destek için TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

MODSİM alanındaki gelişmelerin, askeri ve sivil alanlarda başarılı uygulamaların ve paylaşımların gelecek USMOS Konferansları'nda artarak devam etmesi dileğiyle...

Prof. Dr. Pınar Karagöz  
USMOS 2019 Konferans Başkanı

## DÜZENLEYEN KURULUŞLAR



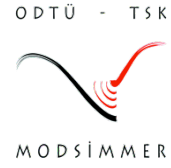
Mill Savunma Bakanlığı



ODTÜ



Genelkurmay Başkanlığı



ODTÜ-TSK MODSİMMER



Savunma Sanayii Başkanlığı



SaSaD

## DESTEKLEYEN KURULUŞLAR

-- Ana Sponsor --



-- Oturum Sponsorları --



-- Basın Sponsoru --



## **KOORDİNASYON KURULU**

Aylin ÖZTÜRK (MSB)

Aysu BETİN CAN (Akademik Kurul Başkanı, ODTÜ)

Hüseyin BAYSAK (SASAD)

Hüseyin Buğra Han AYYILDIZ (SSB)

Pınar KARAGÖZ (Konferans Başkanı, ODTÜ)

Poyraz Alper ÖNER (Gnkur Bşk.lığı)

Yasemin YARDIMCI ÇETİN (ODTÜ-TSK MODSİMMER)

Yılmaz KÜÇÜKSEYHAN (SASAD)

## **DÜZENLEME KURULU**

Ceylan DALGIÇ (ODTÜ-TSK MODSİMMER)

Esmâ İPEKOĞLU (ODTÜ-TSK MODSİMMER)

Müge Akkar ERCAN (ODTÜ)

Nevra YALDIZ (SSB)

Ömür ÇAKATAY (Gnkur Bşk.lığı)

Pınar KARAGÖZ (Konferans Başkanı, ODTÜ)

Salih İLASLAN (Gnkur Bşk.lığı)

S. Vedat KARAARSLAN (ODTÜ-TSK MODSİMMER)

## **AKADEMİK KURUL**

Aysu BETİN CAN (Akademik Kurul Başkanı, ODTÜ)

Halit OĞUZTÜZÜN (ODTÜ)

Hakan TÜZÜN (Hacettepe Ü.)

Murat Paşa UYSAL (Başkent Ü.)

Mustafa Kemal TURAL (ODTÜ)

## BİLİM KURULU

A.Ziya AKTAŞ (Başkent Ü.)

Ahmet PAKFİLİZ (Başkent Ü.)

Ali DOĞRU (ODTÜ)

Alpay KARAGÖZ (ODTÜ)

Alptekin TEMİZEL (ODTÜ)

Altan ÖZKİL (Atılım Ü.)

Altan KAYRAN (ODTÜ)

Aydın OKUTANOĞLU (SİMSOFT)

Aysu Betin CAN (ODTÜ)

Berna DENGİZ (Başkent Ü.)

Bilge Kaan GÖRÜR (ROKETSAN)

Bilgin KAFTANOĞLU (Atılım Ü.)

Bülent Mehmet ADAK (ASELSAN)

Canan SEPİL (ODTÜ)

Cengiz ACARTÜRK (ODTÜ)

Cevat ŞENER (ODTÜ)

Deniz ÇETİNKAYA (Bournemouth U.)

Dilek Funda KURTULUŞ (ODTÜ)

Emre KIYAK (Eskişehir Teknik Ü.)

Ercan GÜRSES (ODTÜ)

Ercan ÖZTEMEL (Marmara Ü.)

Erol ŞAHİN (ODTÜ)

Ertan ONUR (ODTÜ)

Fatih NAR (Konya Gıda ve Tarım Ü.)

Filiz ERSÖZ (Karabük Ü.)

Hakan TÜZÜN (Hacettepe Ü.)

Halit OĞUZTÜZÜN (ODTÜ)

Harun ARTUNER (Hacettepe Ü.)

H.Hakan MARAŞ (Çankaya Ü.)

Hürkan Orkun ZORBA (CEY Savunma)

İbrahim AKGÜN (Abdullah Gül Ü.)

İnci BATMAZ (ODTÜ)

İsmail Hakkı TOROSLU (ODTÜ)

İsmail Hakkı TUNCER (ODTÜ)

Kadir SARIKAYA (Tokat Gaziosmanpaşa Ü.)

Kayhan İMRE (Hacettepe Ü.)

## BİLİM KURULU (devam)

Kemal ÖZGÖREN (ODTÜ)

Mehmet Ali AKÇAYOL (Gazi Ü.)

M.Kemal LEBLEBİCİOĞLU (ODTÜ )

Mehmet Fatih HOCAOĞLU (İstanbul Medeniyet Ü.)

Mehmet KABAK (Gazi Üniversitesi)

Mehmet TEKEREK (Kahramanmaraş Sütçü İmam Ü.)

Murat Caner TESTİK (Hacettepe Ü.)

Murat Kaya YAPICI (Sabancı Ü.)

Murat Paşa UYSAL (Ufuk Ü.)

Murat YILMAZ (Çankaya Ü.)

Mustafa Kemal TURAL (ODTÜ)

Nedim ALPDEMİR (TÜBİTAK)

Nergiz ÇAĞILTAY (Atılım Ü.)

Okan TOPÇU (ODTÜ)

Orhan YILDIRIM (ODTÜ, Emekli)

Özgür ÖZPEYNİRCİ (İzmir Ekonomi Ü.)

Pınar KARAGÖZ (ODTÜ)

Selim Saffet BALCISOY (Sabancı Ü.)

Semih BİLGİN (Okan Ü.)

Serhat BURMAOĞLU (İzmir Kâtip Çelebi Ü.)

Tansel DÖKEROĞLU (TED Ü.)

Ufuk TÜREN (TSK)

Uğur GÜDÜKBAY (Bilkent Ü.)

Uluç SARANLI (ODTÜ)

Yakup ÖZKAZANÇ (Hacettepe Ü.)

Yasemin YARDIMCI ÇETİN (ODTÜ)

Zafer YILMAZ (TED Ü.)

Zuhal AKYÜREK (ODTÜ)





## İÇİNDEKİLER

DARBE İNDÜKSİYONLU METAL DEDEKTÖRLERİNİN MODELLENMESİ.....	4
DÖRT BACAKLI AVCI ROBOT (DÖBAR) SİMÜLYONU .....	16
SU ALTI PATLAMA FENOMENİNİN MEKANİK YAPILAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN DENEYSEL VE HESAPLAMALI YÖNTEMLER İLE İNCELENMESİ. ....	31
SU ALTINDAN HAVAYA ATILAN BİR FÜZENİN SU ALTI HAREKETİ BOYUNCA ENERJİ-OPTİMAL KONTROLÜ .....	43
ZIRHLI KARA ARAÇLARINI TEHDİT EDEN ASİMETRİK SALDIRILARIN SAYISAL YÖNTEMLER İLE BENZETİMİ .....	55
SIMEMSSIS: ASEL SAN TELSİZ ÇEVİRİMLERİ BENZETİM VE ÖYKÜMLENDİRME ORTAMI .....	65
MODEL ROKET FIRLATMA RAMPASI YAPISAL TASARIM VE ANALİZLERİ .....	75
HAVADAN KARAYA TAKTİK GÖREV PLANLAMA EN İYİLEME ARACI GELİŞTİRİLMESİ .....	84
28VDC ASKERİ BARADAN BESLENEN YÜKSEK KAZANÇLI 700VDC ÇIKIŞLI VE ÇIKIŞI ENDÜKTÖRSÜZ TAM KÖPRÜ KONDANSATÖR ŞARJÖRÜNÜN MODELLENMESİ VE BENZETİMİ .....	95
BENZETİMDE DENEY TASARIMININ ÖNEMİ.....	106
BOMBAATAR MÜHİMMATLARININ PATLAMA SONRASI PARÇACIK SAÇILIM DEĞERLENDİRMESİ: SAYISAL VE DENEYSEL YAKLAŞIMLAR .....	118
KESİK ZAMANLI DAĞITIK SİMÜLYONLAR İÇİN MODEL DİLİ TANIMLAMA ÇALIŞMASI.....	129
SİMÜLYON KAYITLARININ VERİMLİ SAKLANMASI VE İŞLENMESİ.....	140
ÇEKİLEBİLİR SAHTE HEDEF ETKİNLİĞİNİN MODELLEME VE SİMÜLYON İLE ANALİZİ .....	152
GERÇEK ZAMANLI ARAMA VE TAKİP RADARI SİMÜLATÖRÜ.....	162
ÜÇ BOYUTLU, WEB TABANLI, DIS PROTOKOLU KULLANAN AĞ SİMÜLYONU ÖRNEĞİ. ....	172
UZAKTAN KOMUTALI SİLAH SİSTEMİNDE KULLANILAN ATEŞLEME SOLENOİDİNİN ELEKTROMANYETİK BENZETİMİ .....	183
MEMS DÖNÜÖLÇER STOKASTİK HATA PARAMETRELERİNİN KESTİRİMİ ve MATEMATİKSEL MODELLENMESİ. ....	193
SABİT KANAT BİR HAVA ARACININ YAKIT YÖNETİM SİSTEMİ BENZETİM MODELİ. ....	204
ASKERİ BİR JET EĞİTİM UÇAĞI HİDROLİK GÜÇ SİSTEMİNE AİT SOĞUTMA İHTİYACININ BENZETİM MODELİ İLE BELİRLENMESİ. ....	215
ANALİZ SİMÜLYONU UYGULAMALARINDA DOĞRUSAL SÖZDE RASSAL SAYI ÜRETEÇLERİNİN KULLANIMI ÜZERİNE BİR LİTERATÜR ARAŞTIRMASI. ....	226
ETKİNLİK DEĞERLENDİRME AMAÇLI ASKERİ ANALİZ SİMÜLYONLARI İÇİN BİR SİSTEM AKIŞ ÖRÜNTÜSÜ ÖNERİSİ .....	237
KIZİLÖTESİ SAHNE SİMÜLYONUNDA İZ MODELLEME YAKLAŞIMLARI .....	247
YER ETKİSİNİ KULLANAN BİR ARAÇ İÇİN OTOPİLOT TASARIMI. ....	260
YER ETKİSİNİ KULLANAN İNSANSIZ ARAÇ TASARIMI VE YER ETKİSİ MODELİ .....	272

İKİ EKSENLİ GİMBAL SİSTEMLERİ İÇİN SÜRÜŞ HATTI MODELLEMESİ .	284
BİRLİKTE ÇALIŞABİLİRLİK SORUNLARI VE ARTI ÜRÜNÜ İLE ÇÖZÜM YAKLAŞIMI .	293
MOTOR BRAKETİ CIVATA BAĞLANTISININ TUTUNMA YETERLİLİĞİNİN SONLU ELEMANLAR METODU İLE İNCELENMESİ .	303
ERİŞİLEBİLİR ÇEVİRİMİÇİ KAYNAKLARDAN 3B ŞEHİR MODELLEME	315
SINIRLI SAYIDA VERİ İLE GÜVENİLİRLİK TAHMİNİ: SARP MODELİ .	327
GÜDÜMSÜZ BİR MÜHİMMATA GÜDÜM YETENEĞİ KAZANDIRILMASI VE MONTE CARLO BENZETİMLERLE SAÇILIM VE HASSASİYET ANALİZİ .	339
YAKIN HAVA SAVUNMA SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR OTOMATİK HEDEF TESPİT ALGORİTMASI..	351
HAVACILIK VE UZAY BENZETİMLERİNİN ETMEN TABANLI YAKLAŞIM KULLANILARAK TASARLANMASI VE GELİŞTİRİLMESİNE YÖNELİK BİR SÜREÇ ÖNERİSİ .	363
KOŞUT VE DAĞITILMIŞ ETMEN TABANLI BENZETİMLERDE ZAMAN YÖNETİM MEKANİZMALARININ BAŞARIMINI ETKİLEYEN ETKENLER	375
ARTIRILMIŞ GERÇEKLIK TABANLI VERİ ANALİZ SİSTEMLERİNİN H-ARF ALTYAPISI İLE ASKERİ ALANDA KULLANIMI.....	387
İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDAN ELDE EDİLEN GÖRÜNTÜLERİN ÜÇ BOYUTLU MESKÛN MAHAL SİMÜLASYONU VE ANALİZLERİNDE KULLANILMASI: ŞEREFLİKOÇHİSAR ÖRNEĞİ	399
SIGMOTE: SAYISAL SİNYAL İŞLEME SENSÖR PLATFORMU .	411
OTOMATİK TESTLERİN YAZILIM SİMÜLASYONLARI İLE ENTEGRE BİÇİMDE ETKİN KULLANIMI..	421
VÜCUT HAREKET ANALİZ SİSTEMİ .	432
İÇ ORTAM KONUMLANDIRMA İÇİN HİBRİT RSSI VE PARMAK İZİ YÖNTEMİ	444
COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMİ ÜRÜN AİLESİ İÇİN ÖLÇEKLENEBİLİR, MİKROSERVİS TABANLI YAZILIM MİMARİSİ VE YAZILIM ÜRÜN HATTI GELİŞTİRİLMESİ .	456
SİNÜZOİDAL HAREKET EDEN HEDEF İÇİN HEDEF TAKİP ÇALIŞMASI .	466
ZAYIAT ESASLARI ÇERÇEVESİNDE İNSAN GÜCÜ PLANLAMASI VE BÜYÜK VERİ: ASKERİ SAĞLIK HİZMETLERİ AÇISINDAN KAVRAMSAL BİR DEĞERLENDİRME .	476
ELEKTRON HIZLANDIRICILAR İÇİN PARAMETRİK DÖRT KUTUPLU ELEKTROMANYETİK LENS MODELİ VE MANYETİK ALAN DAĞILIMI SİMÜLASYONU.....	490
HİYERARŞİK HAVA MUHAREBESİ MODELLERİNDE HATA YAYILIMIN ANALİZİ	499
<b>Yazar Dizini.....</b>	<b>514</b>

# **BİLDİRİLER**

# DARBE İNDÜKSİYONLU METAL DEDEKTÖRLERİNİN MODELLENMESİ

Talha Saydam <sup>(a)</sup>, Serkan Aksoy <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Gebze Teknik Üniversitesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü,  
{tsaydam,saksoy}@gtu.edu.tr

## ÖZ

Bu çalışmada darbe indüksiyonlu bir metal dedektörünün düşük iletkenlikli bir toprakta gömülü iyi iletken bir metal cismi tespit ve teşhis yeteneğini incelemek amacıyla, Maxwell denklemleri tabanlı Kuvazi-Statik Zaman Uzayı Sonlu Farklar (KS-ZUSF) yöntemi ile üç boyutlu Kartezyen koordinatlarda tam dalga çözümü yapılmıştır. KS-ZUSF yöntemi, ZUSF yönteminin kuvazi-statik şartının geçerli olduğu düşük kaynak frekanslı ve kayıplı ortamlar için geliştirilmiş özel bir halidir. İncelenen problem uzayı hava, toprak ve gömülü iletken cisim olmak üzere üç farklı ortamdan meydana gelmekte olup, bu uzayı sonlandırmak için modifiye edilmiş Mur tipi soğurucu sınır koşulu kullanılmıştır. Benzetimlerde verici halka anten bir manyetik dipol olarak modellenmiş ve dikdörtgen darbe benzeri bir işareti ile uyarılmıştır. Gömülü hedef cisim ise alüminyum malzemedeki ve küp şeklinde ele alınmıştır. Alıcı ve verici antenler aynı konumda yerleştirilerek (monostatik yapı) toprak yüzeyinden sabit bir yükseklikte yatay konum tek bir yönde değiştirilerek saçılan alanlar hesaplanmıştır. Farklı gömülü hedef derinlikleri ve/veya anten yükseklikleri için senaryoları genişletilmiştir. Böylece toprakta gömülü iletken cisimlerin tespiti ve teşhisi için alıcıda indüklenen işaretler elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Darbe indüksiyonlu metal dedektörleri, Düşük frekanslar, Elektromanyetik indüksiyon, Kuvazi-Statik alanlar, Zaman Uzayı Sonlu Farklar yöntemi.

## MODELING OF PULSE INDUCTION METAL DETECTORS

### ABSTRACT

In this study, a full-wave solution is constructed in three-dimensional Cartesian coordinates with Maxwell's equations based Quasi-Static Finite Difference Time Domain (QS-FDTD) method in order to investigate the ability of a pulse induction metal detector to detect and discriminate a good conductive metal object buried in a low conductivity soil. The QS-FDTD method is a special version developed for low-source frequency sources at lossy environments where the quasi-static condition of the FDTD method applies. The investigated problem space consists of three different environments: air, soil and buried conductive material. The modified Mur type absorber boundary condition is used to terminate this space. In the simulations, the transmitter loop antenna is modeled as a magnetic dipole and is excited by a rectangular pulse-like sign. The buried target is constructed as a cube-shaped aluminum material. The transmitting and receiving antennas are placed in the same position (mono-static structure) and the scattered fields are calculated by changing the antenna horizontal position in a single direction at a constant height from the soil surface. The scenarios for different buried target depths and/or antenna heights have been extended. In this way, signals are detected in the receiver for the detection and identification of a conductive object buried in the soil.

**Keywords:** Pulse induction metal detectors, Low frequencies, Electromagnetic induction, Quasi-static fields, Finite Difference Time Domain method.

## 1. GİRİŞ

Metal dedektörleri, 100 Hz ile 100 kHz arasında düşük frekanslarda çalışan elektromanyetik indüksiyon teknolojisi tabanlı sistemlerdir. Kullanım amaçları, tehlikeli ya da değerli gömülü metal içerikli cisimleri tespit ve teşhis etmektir. Metal dedektörleri toprakta gömülü mayın ve patlamamış mühimmatların (Unexploded Ordnance, UXO) tespiti vb. çeşitli amaçlar için oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

Elektromanyetik indüksiyon teknolojisi tabanlı metal dedektörlerinin sürekli dalga (Continuous Wave, CW) ve darbe İndüksiyonlu (Pulse Induction, PI) metal dedektörleri olmak üzere temelde iki türü mevcuttur. Sürekli dalga metal dedektörlerinde kaynak işareti olarak tek frekanslı ve dar bantlı sürekli sinüs işareti kullanılır. Darbe indüksiyonlu metal dedektörlerinde ise kaynak işareti olarak dikdörtgen darbe benzeri bir işaret kullanılır. Darbe indüksiyonlu metal dedektörlerinin tek seferde daha geniş bantlı yanıt vermesi, menzil analizlerin yapılması, düşük güç tüketimi vb. özellikleri sürekli dalga metal dedektörlerine göre temel avantajlarından [1], [2].

Metal dedektörlerinde özellikle düşük metal içeriğe sahip mayın ve UXO tespitinde yanlış alarm problemi ile sıkça karşılaşılmaktadır [3]-[5]. Ayrıca, metal dedektörleri mineralli ve manyetik özelliğe sahip topraklarda gömülü cisimlerin tespitinde de zorlanmaktadır. Bu tür problemlerin aşılabilmesi için modelleme ve benzetim yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır [6], [7].

Metal dedektörlerinin modellenmesi için analitik veya nümerik yöntemler kullanılabilir [8], [9]. Ancak problemin çok karmaşık olmasından dolayı bir metal dedektörü problemini analitik olarak tam anlamıyla çözebilmek neredeyse imkânsızdır. Bu nedenle metal dedektörlerinin modellenmesi için nümerik yöntemlere başvurulmalıdır. Bu çalışmada darbe indüksiyonlu metal dedektörlerinin modellenmesi için nümerik yöntem olarak Zaman Uzayı Sonlu Farklar (ZUSF) yönteminin kuvazi-statik şartının sağlandığı, düşük kaynak frekanslı ve kayıplı ortamlar için geliştirilmiş özel bir hali olan Kuvazi-Statik ZUSF (KS-ZUSF) yöntemi ile üç boyutlu Kartezyen koordinatlarda Maxwell denklemlerinin çözümü yapılmıştır. İncelenen problem uzayı hava, toprak ve gömülü cisim olmak üzere üç farklı ortamdaki meydana gelmektedir. Problem uzayının dış sınırları modifiye edilmiş Mur tipi Soğurucu Sınır Koşulu (SSK) ile sonlandırılmıştır. Benzetimlerde dedektörde kullanılan verici halka anten yerine eşdeğer manyetik dipol modeli kullanılmıştır. Alıcı ve verici antenler aynı konumda yerleştirilerek (mono-statik yapı) toprak yüzeyinden sabit bir yükseklikte yatay konum tek bir yönde ilerletilerek saçılan alanlar hesaplanmıştır. Farklı gömülü hedef derinlikleri ve/veya anten yükseklikleri için senaryoları genişletilmiştir.

Sonuç olarak bu çalışma ile darbe indüksiyonlu metal dedektörlerinin tespit ve teşhis yetenekleri kapsamında geliştirilebilmesi için temel bilgiler elde edilmiştir.

## 2. ZAMAN UZAYI SONLU FARKLAR YÖNTEMİ

Zaman Uzayı Sonlu Farklar (ZUSF) yöntemi, konum ve zaman türevlerinin Taylor serisi açılımı kullanılarak merkezi farklar, ileri farklar ya da geri farklar yaklaşımı altında konum ve zaman eksenleri ayrıklaştırılarak sayısal olarak zamanda iteratif bir şekilde çözülmesi prensibine dayanır [10]. Yüksek doğrulukla sonuçlar sunması sebebiyle merkezi farklar yaklaşımı genelde tercih edilir. ZUSF yönteminin avantajlarından bazıları aşağıda listelenmiştir:

- Lineer cebir kullanmaması: Matris tersi alma işlemleri içermez.
- Doğruluğu kontrol edilebilir sonuçlar sunar.
- Darbe cevabını direkt olarak verir: Tek bir çalıştırmada geniş bantlı çözüm sunar.
- Rastgele geometriye ve malzeme özelliğine sahip cisimlerin kullanılabilmesi açısından geniş yelpazede çözümler sunar.
- Tam-dalga (full-wave) çözüm sunar.
- Gerçek zamanlı görüntüleme mümkündür.

Bu ve benzeri avantajlarından dolayı ZUSF yöntemi elektromanyetik problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [10]. Bu yöntemin temel dezavantajı ise büyük ölçekli problemler için yüksek bilgisayar kaynaklarına ihtiyaç duymasıdır.

### 2.1. Zaman Uzayı Sonlu Farklar Yöntemi ve Maxwell Denklemleri

Zaman uzayında Maxwell denklemleri

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B}(\vec{r}, t) \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t) = \frac{\partial}{\partial t} \vec{D}(\vec{r}, t) + \sigma \vec{E}(\vec{r}, t) + \vec{J}(\vec{r}, t) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D}(\vec{r}, t) = \rho(\vec{r}, t) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) = 0 \quad (4)$$

olarak verilir. Burada  $\nabla$  Nabla operatörü,  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  [V/m],  $\vec{B}(\vec{r}, t)$  [Wb/m<sup>2</sup>],  $\vec{H}(\vec{r}, t)$  [A/m],  $\vec{D}(\vec{r}, t)$  [C/m<sup>2</sup>],  $\vec{J}(\vec{r}, t)$  [A/m<sup>2</sup>] ve  $\rho(\vec{r}, t)$  [C/m<sup>3</sup>] sırasıyla elektrik alan vektörünü, manyetik indüksiyon alanı vektörünü, manyetik alan vektörünü, yer değiştirme alan vektörünü, akım yoğunluk vektörünü ve yük yoğunluğunu gösterir.

Denklem (1) ve (2)'deki elektrik ve manyetik alanların üç boyutlu Kartezyen koordinatlardaki tüm bileşenleri için ZUSF güncelleme denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$H_x \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = H_x \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\mu_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}} \left[ -\frac{E_z \Big|_{i,j+1,k+\frac{1}{2}}^n - E_z \Big|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n}{\Delta y} + \frac{E_y \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k+1}^n - E_y \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k}^n}{\Delta z} \right] \quad (5)$$

$$H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\mu_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}} \left[ -\frac{E_z \Big|_{i+1,j,k+\frac{1}{2}}^n - E_z \Big|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n}{\Delta x} + \frac{E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+1}^n - E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta z} \right] \quad (6)$$

$$H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} = H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\mu_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}} \left[ -\frac{E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j+1,k}^n - E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta y} + \frac{E_y \Big|_{i+1,j+\frac{1}{2},k}^n - E_y \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k}^n}{\Delta x} \right] \quad (7)$$

$$E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} = \left( \frac{2\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k} - \Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}}{2\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k} + \Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}} \right) E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n + \left( \frac{2\Delta t}{2\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k} + \Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}} \right) \left[ \frac{H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} - \frac{H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} - J_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+\frac{1}{2}} \right] \quad (8)$$

$$E_y \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} = \left( \frac{2\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2},k} - \Delta t \sigma_{i,j+\frac{1}{2},k}}{2\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2},k} + \Delta t \sigma_{i,j+\frac{1}{2},k}} \right) E_y \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k}^n + \left( \frac{2\Delta t}{2\varepsilon_{i,j+\frac{1}{2},k} + \Delta t \sigma_{i,j+\frac{1}{2},k}} \right) \left[ \frac{H_x \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_x \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} - \frac{H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z \Big|_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} - J_y \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} \right] \quad (9)$$

$$E_z \Big|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} = \left( \frac{2\varepsilon_{i,j,k+\frac{1}{2}} - \Delta t \sigma_{i,j,k+\frac{1}{2}}}{2\varepsilon_{i,j,k+\frac{1}{2}} + \Delta t \sigma_{i,j,k+\frac{1}{2}}} \right) E_z \Big|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n + \left( \frac{2\Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k+\frac{1}{2}} + \Delta t \sigma_{i,j,k+\frac{1}{2}}} \right) \left[ \frac{H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_y \Big|_{i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} - \frac{H_x \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_x \Big|_{i,j-\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} - J_z \Big|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right] \quad (10)$$

burada  $\Delta t$  zamanda adım aralığı,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  ve  $\Delta z$  sırasıyla  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenlerindeki birim hücre uzunlukları,  $n$ ,  $i$ ,  $j$  ve  $k$  ise sırasıyla ayırık zaman ve konum indisleridir. ZUSF çözümünün kararlı olması için Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) kararlılık koşulunu

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}} \quad (11)$$

olarak sağlaması gerekir. Burada  $c$  [m/sn] elektromanyetik dalganın yayılma hızıdır.



## 2.2. Kuvazi-Statik Zaman Uzayı Sonlu Farklar yöntemi

Düşük frekanslı metal dedektörü probleminde dalga boyu hedef cisim boyutlarına göre çok büyüktür. Bu durum ZUSF hücre boyutlarının dalga boyuna göre son derece küçük seçilmesi gereğini doğurur. CFL kararlılık koşulu kapsamında küçük seçilen hücre boyu birim zaman adımının da oldukça küçük seçilmesi gerekir. Bu durum sonuç olarak klasik ZUSF yöntemi ile bir tam periyotta kodun çalıştırılabilmesi için gereken hesap süresinin günümüz bilgisayar teknolojisi ile aylar ve hatta yıllar seviyesinde olması anlamına gelir. Bu sorunu ortadan kaldırmak amacıyla kuvazi-statik yaklaşımının geçerli olduğu durumlar için Kuvazi-Statik ZUSF yöntemi geliştirilmiştir.

Manyeto-Kuvazi-Statik (MKS) ve Elektro-Kuvazi-Statik (EKS) olmak üzere iki tür kuvazi-statik yaklaşımı vardır. MKS yaklaşımında yer değiştirme akımları, EKS yaklaşımında ise manyetik indüksiyon akımları ihmal edilebilir düzeydedir. Metal dedektörü probleminde iletkenlik akımları yer değiştirme akımlarına göre çok yüksek olduğu için MKS yaklaşımı

$$\frac{\partial \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t} \ll \sigma \vec{E}(\vec{r}, t) \quad (12)$$

olmak üzere geçerlidir. Eğer bu koşul altında yer değiştirme akımları tümüyle ihmal edilirse Maxwell denklemleri difüzyon denklemine dönüşür. Ancak KS-ZUSF yönteminde MKS yaklaşımı altında yer değiştirme akımları ihmal edilmeden  $\epsilon$  değeri bir  $\alpha$  katsayısı ile çarpılarak artırılır ve böylece ZUSF zaman adım aralığı  $\Delta t$  büyütülmüş olur. Bu sayede klasik ZUSF yöntemi ile çözümü mümkün olmayan düşük frekanslı metal dedektörü problemi KS-ZUSF yöntemi ile çözülebilir. Ölçekleme katsayısı  $\alpha$ 'nın değeri belirlenirken sırasıyla Nyquist kriteri, dalga yayılma sabitine etkisi, MKS koşulunun sağlanması ve zaman sabitlerine etkisi ayrı ayrı hesaba katılmalıdır [11], [12].

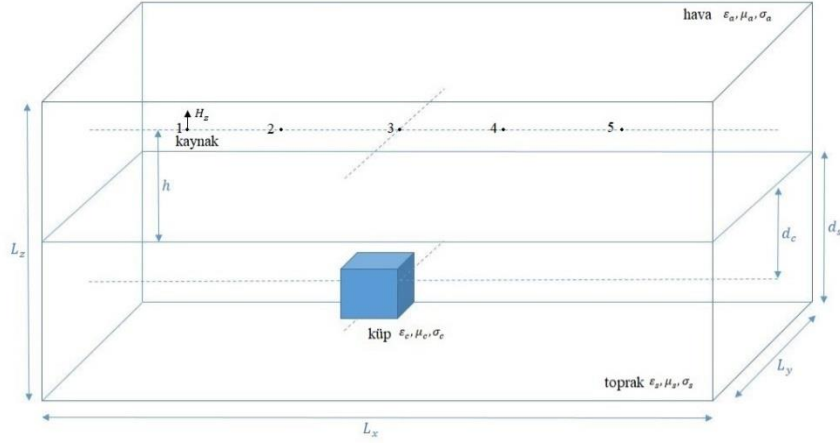
Literatürde KS-ZUSF yönteminin tek ve çok frekanslı sürekli dalga türünde metal dedektörlerine yönelik uygulamaları mevcuttur [13], [14]. Ancak darbe indüksiyonlu metal dedektörlerine yönelik herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada darbe indüksiyonlu metal dedektörlerinin modellenmesi ele alınmıştır.

## 3. GÖMÜLÜ CİSİM İÇİN SAÇILAN ALAN HESAPLAMALARI

### 3.1. Problem uzayının oluşturulması

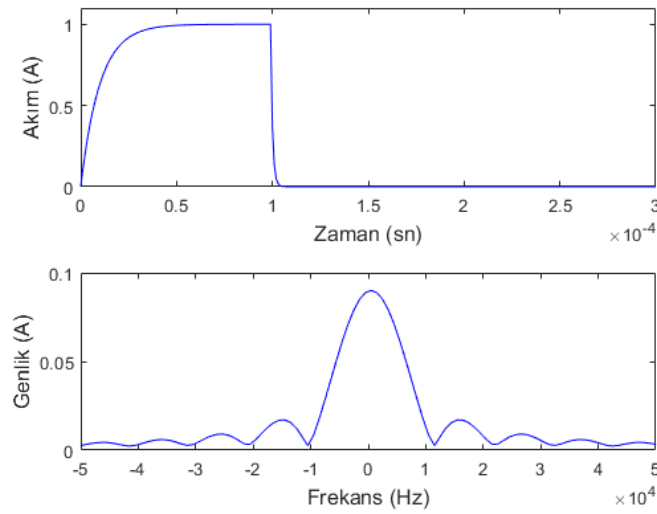
Şekil 1'de gösterilen üç boyutlu Kartezyen koordinatlardaki problem uzayı alıcı/verici antenler, gömülü cisim, hava ve toprak ortamlarından meydana gelmektedir. Burada  $L_x = 1.40$  m,  $L_y = 0.30$  m ve  $L_z = 0.75$  m olmak üzere problem uzayının boyutlarını,  $h$  antenin toprak yüzeyinden yüksekliğini,  $d_s = 0.50$  m toprak katmanının kalınlığını ve  $d_c$  gömülü cismin derinliğini vermektedir. ZUSF hücre boyutları  $\Delta x = \Delta y = \Delta z =$

0.01 m seçilmiş ve sonuç olarak  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenlerindeki hücre sayıları  $N_x = 140$ ,  $N_y = 30$  ve  $N_z = 75$  değerlerini almıştır. Problem uzayının dış sınırları ise modifiye edilmiş MUR türü soğurucu sınır koşulu ile sonlandırılmıştır [15].



Şekil 1. Problem uzayı geometrisi

Problem uzayında hava ortamının dielektrik sabiti, manyetik geçirgenliği ve iletkenlik değeri sırasıyla  $\epsilon_a = \epsilon_0$ ,  $\mu_a = \mu_0$  ve  $\sigma_a = 5.56 \times 10^{-3}$  S/m olarak alınmıştır. Toprak ortamı için bu değerler  $\epsilon_s = 1.5 \times \epsilon_0$ ,  $\mu_s = \mu_0$  ve  $\sigma_s = 8.86 \times 10^{-3}$  S/m olup cisim için aynı değerler  $\epsilon_c = 2.5 \times \epsilon_0$ ,  $\mu_c = \mu_0$  ve  $\sigma_c = 1 \times 10^6$  S/m şeklindedir. Bu kapsamda KS ölçekleme katsayısı  $\alpha = 5 \times 10^8$  olarak hesaplanmış ve ölçeklenmiş ZUSF zaman adım aralığı  $\Delta t^{KS} = 4.3053 \times 10^{-10}$  ve toplam iterasyon sayısı  $T = 696824$  değerlerini almıştır. Uygulanan darbe türü kaynak işareti ve frekans cevabı Şekil 2’te gösterilmiştir. Kaynak işaretinin bant genişliği yaklaşık 10 kHz değerindedir.



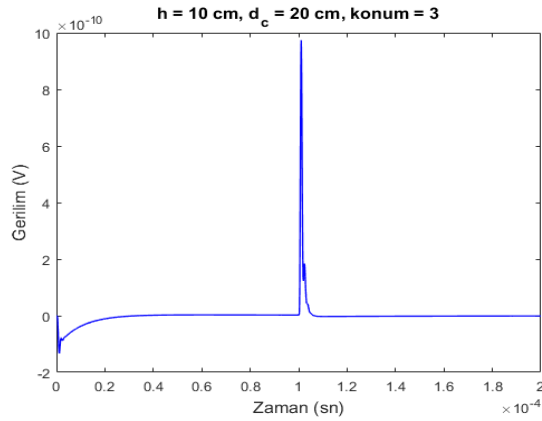
Şekil 2. Uygulanan kaynak işareti ve frekans cevabı

### 3.2. Sayısal sonuçlar

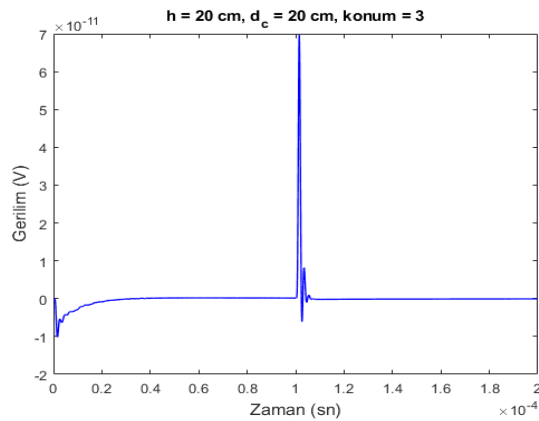
Verici/Alıcı antenler Şekil 1’de gösterilen  $x$  eksenindeki eşit aralıklı beş farklı noktada yerleştirilerek farklı anten yükseklikleri ve farklı cisim derinlikleri için ayrı ayrı alıcıdaki  $+z$  yönlü manyetik alan bileşeni hesaplanmıştır. Her bir senaryo için hesap süresi Intel Core i7-7700k işlemci ile yaklaşık 15.4 saat civarındadır. Faraday kanunu ile hesaplanan manyetik alan şiddetinden alıcıda indüklenen gerilim değerleri hesaplanmıştır. Ancak KS-ZUSF çözümlerinde işaretin çok erken zamanlarında çok hızlı değişimler gözlemlenmiştir. Bu nedenle uyarlamalı gelişmiş bir filtre türü olan Butterworth filtresi kullanılarak, bu sorun azaltılmaya çalışılmıştır.

#### 3.2.1. Anten yüksekliğinin etkisi

Anten yüksekliğinin etkisini araştırmak amacıyla anten 3 numaralı konumda yerleştirilip gömülü cisim derinliği  $d_c = 20$  cm’de sabitlenmiştir ve anten yüksekliği  $h = 10$  cm ve  $h = 20$  cm iken ayrı ayrı ölçümler alınmıştır ve alıcıda indüklenen gerilimler Şekil 3’te gösterilmiştir.



(a)

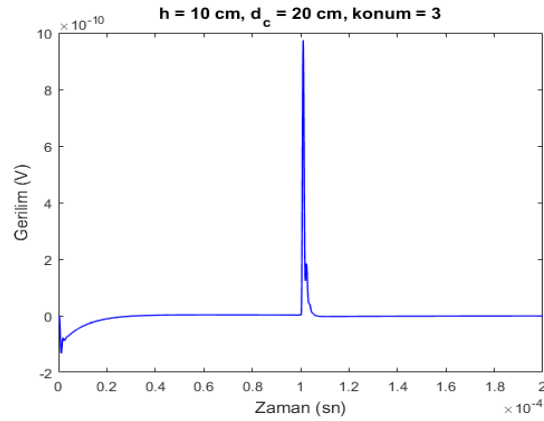
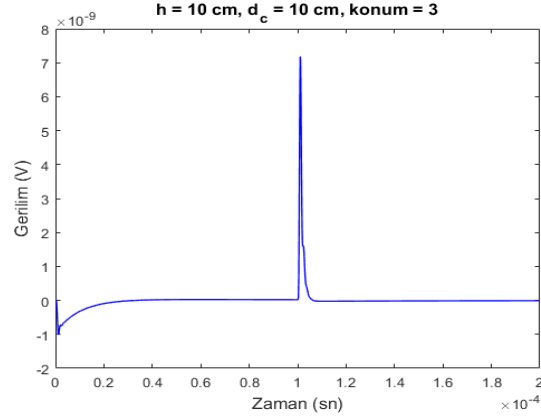


(b)

Şekil 3. a)  $h = 10$  cm ve b)  $h = 20$  cm için alıcıda indüklenen gerilimler

### 3.2.2. Gömülü cisim derinliğinin etkisi

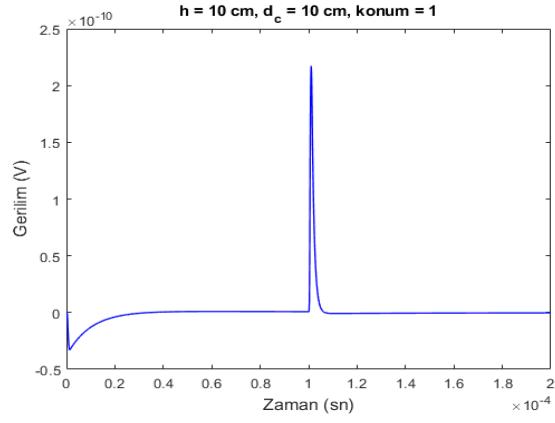
Gömülü cisim derinliğinin etkisini araştırmak amacıyla anten 3 numaralı konumda yerleştirilip anten yüksekliği  $h = 10$  cm'de sabitlenmiştir ve cisim derinliği  $d_c = 10$  cm ve  $d_c = 20$  cm iken ayrı ayrı ölçümler alınmıştır ve alıcıda indüklenen gerilimler Şekil 4'te gösterilmiştir.



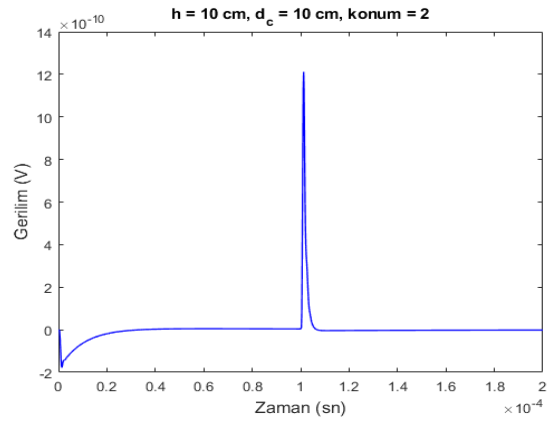
Şekil 4. a)  $d_c = 10$  cm ve b)  $d_c = 20$  cm için alıcıda indüklenen gerilimler

### 3.2.3. Kaynağın yatay konumunun etkisi

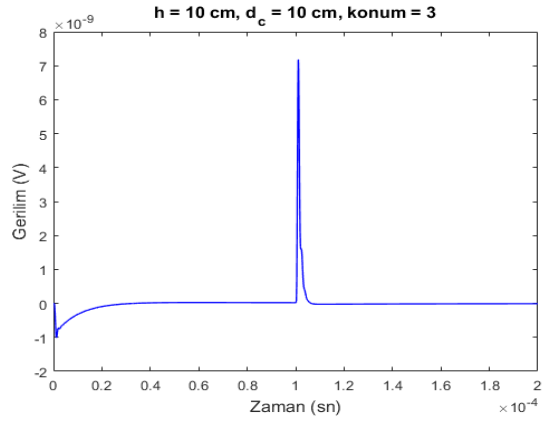
Kaynağın yatay konumunun etkisini araştırmak amacıyla anten yüksekliği  $h = 10$  cm'de ve cisim derinliği  $d_c = 10$  cm'de sabitlenerek beş Şekil 1'de gösterilen beş konumda hesaplama yapılmıştır ve alıcıda indüklenen gerilimler Şekil 5'da gösterilmiştir.



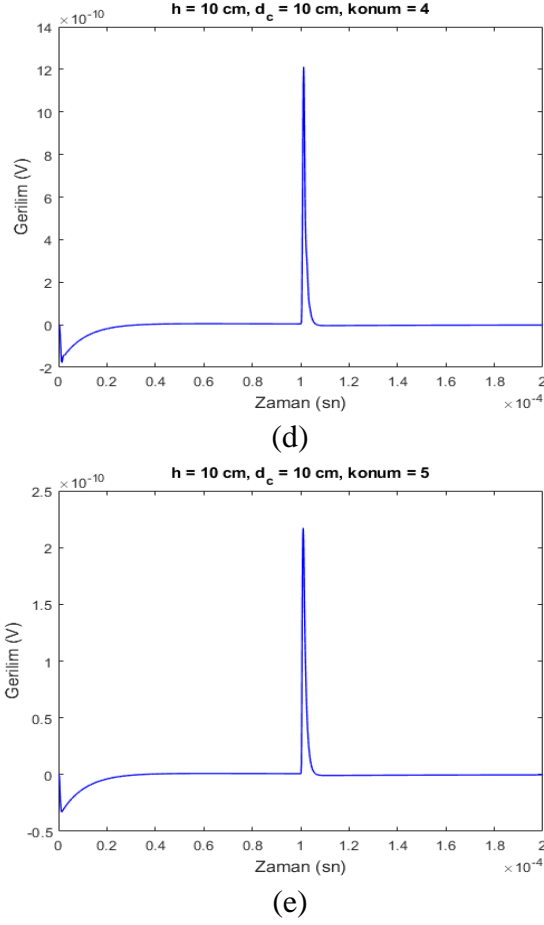
(a)



(b)



(c)



Şekil 5. Kaynağın yatay eksenindeki beş farklı konumu için indüklenen gerilimler

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada darbe indüksiyonlu bir metal dedektörünün üç boyutlu Kartezyen koordinatlarda KS-ZUSF yöntemi ile benzetimi gerçekleştirilmiştir. Verici halka anten olarak manyetik dipol eşdeğeri kullanılarak, mono-statik durum (verici ve alıcı anten aynı yerde) ele alınmıştır. Farklı senaryolar için alıcıda indüklenen gerilimler zaman uzayında hesaplanarak, toprakta gömülü iletken cisimlerin tespiti ve teşhisi için alıcıda indüklenen zaman uzayı işaretleri elde edilmiştir. Ayrıca anten yüksekliğinin, gömülü cisim derinliğinin ve antenin yatay eksenindeki konumunun alıcıda indüklenen gerilimlere etkisi araştırılmıştır. Sonuçlara göre incelenen bu parametrelerin alıcıdaki işaretin genliği üzerinde dominant etkisi olduğu gözlenmiştir. Böylece gömülü metal cisimlerin tespiti gerçekleştirilmiştir. Teşhis ve sınıflandırma yapılabilmesi için ayrıca ek işaret işleme çalışmaları gerekmektedir.

Bu kapsamda alıcıdaki işaretler üzerindeki farklı etkileri araştırmak amacıyla, farklı toprak türlerinin zaman imzalarının hesaplanması, gömülü cismin şeklinin, doğrultusunun ve malzeme türünün (manyetik ve manyetik olmayan vb.) cismin zaman

imzası üzerine etkisi, manyetik dispersif toprakların alıcısındaki işarete etkisi vb. konularda geleceğe yönelik çalışmalar yapılması hedeflenmektedir. Yine genlik değerlerinin genel olarak düşük seviyede olması konusunda araştırmalar yapılması planlanmaktadır.

## 5. KAYNAKÇA

- [1] Aksoy, S. (2018), *Advanced Metal Detectors*, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.
- [2] Ripka, P., Lewis, A. (2006), Eddy current metal detectors – Pulse vs. CW, *Journal of Electrical Engineering*, 57(8), 175-177.
- [3] Fernandez, J.P., Shubitidze, F., Shmatava, I., Barrowes, B.E., O'Neill, K. (2010), Realistic subsurface anomaly discrimination using electromagnetic induction and an SWM classifier, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 305890.
- [4] Grzegorzcyk, T.M., Barrowes, B.E., Shubitidze, F., Fernandez, J.P., O'Neill, K. (2011), Simultaneous identification of multiple unexploded ordnance using electromagnetic induction sensor, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(7), 2507-2517.
- [5] Ambrus, D., Vasic, D., Bilas, V. (2016), Robust estimation of metal target shape using time-domain electromagnetic induction data, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, 65(4), 795-807.
- [6] Ripka, P., Vcelak, J., Kaspar, P., Lewis, A. (2006), Bomb detection in magnetic soils: AC versus DC methods, *IEEE Sensors*, 1389-1391.
- [7] Das, Y. (2008), Study of the influence of the plastic casing on the electromagnetic induction response of a buried landmine, *Proc. of SPIE*, 6953, 695302.
- [8] Moss, C.D., Grzegorzcyk, T.M., O'Neill, K., Kong, J.A. (2006), A Hybrid time-domain model of electromagnetic induction from conducting permeable targets, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(10), 2916-2926.
- [9] Song, L.P., Shubitidze, F., Pasion, L.R., Oldenburg, D.W., Billings, S.D. (2008), Computing transient electromagnetic response of a metallic object using spheroidal excitation approach, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(3), 359-363.
- [10] Aksoy, S. (2018), *Zaman Uzayı Sonlu Farklar Yöntemi*, Elektronik Mühendisliği, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.
- [11] Özakın, M.B., Aksoy, S. (2016), Application of magneto-quasi-static approximation in the finite difference time domain method, *IEEE Transaction on Magnetics*, 52(8), 7209809.
- [12] Özakın, M.B., Aksoy, S. (2017), Numerical calculation of magnetic dipole fields by three-dimensional QS-FDTD method, *Progress in Electromagnetic Symposium 2017*, 3293-3296.
- [13] Özakın, M.B., Aksoy, B. (2018), Numerical modeling of a single frequency metal detector, *International Conference on Engineering Technologies (ICENTE) 2018*, 70.
- [14] Keser, M., Saydam, T., Aksoy, S. (2018), Toprakta gömülü iletken cisimlerin düşük frekanslarda frekans imzalarının hesaplanması, *GTÜ FBE Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu 2018*.
- [15] Arabi, A.R., Mitra, R. (1995), An alternate form of the MUR second-order absorbing boundary condition, *Microwave and Optical Technology Letters*, 9(6), 336-338.

## DÖRT BACAKLI AVCI ROBOT (DÖBAR) SİMÜLASYONU

**Ahmet Burak Tatar<sup>(a)</sup>, Oğuz Yakut<sup>(a)</sup>**

<sup>(a)</sup> Fırat Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü,  
{atatar,oyakut}@firat.edu.tr

Dört bacaklı robot teknolojileri günümüzde savunma sanayisine uyarlanarak hızlı bir gelişme kaydetmektedir. Bu amaçla geliştirilmiş dört bacaklı robotlar zorlu arazi koşullarında hızlı ve yüksek manevra kabiliyetlerine sahiptirler. Bu çalışmada ele alınan dört bacaklı bir robot üzerine iki eksenli hareketli bir silah sistemi yerleştirilmiştir. Robotun her bir bacağı 3 eksenli ve döner eklemlere sahiptir. Matlab programı ile robotun Simscape Multibody 3 boyutlu dinamik modeli oluşturulmuş ve uygulamalar simülasyonlarla gerçekleştirilmiştir. Silah sistemi üzerinde gerçekleştirilen namlu stabilizasyonu sayesinde, namlunun önceden belirlenmiş hedeflere yönelimi sağlanmıştır. Eklemlerin kontrolü için klasik PID kontrol yöntemi kullanılmıştır. Simülasyonlarda robota yürüme hareketi tanımlanmış ve robot hareketli haldeyken atışlar yapılmıştır. Robot gövdesinde ortaya çıkan mekanik salınımlar silah sistemine bozucu etki olarak yansıtılmıştır. Uygulamalarda, robot ile yapılan atışlardan elde edilen sonuçlar tablo olarak sunulmuştur. Böylece elde edilen sonuçlara göre dört bacaklı bir robotun savunma sanayisine yönelik kullanılabilirliği ortaya konulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Dört Bacaklı Robot, PID Kontrol, Silah Kulesi, Simscape Multibody Model, Yürüme Dizisi.

### PAPER TITLE

### ABSTRACT

Four-legged robot technologies are currently being developed and adapted to the defense industry. The four-legged robots, which are produced for this purpose, have fast and high maneuverability in difficult terrain. In this study, a two-axis movable weapon system is placed on a four-legged robot. Each leg of the robot has 3-axis and rotational joints. Simscape Multibody 3D dynamic model of the robot has been created with the Matlab program and applications have been realized with simulations. Thanks to the gun barrel stabilization, which is performed on the weapon system, the orientation of the gun barrel was provided towards the predetermined targets. The classical PID control method was used to control the joints. In the simulations, a walking motion is defined to the robot and the gun shots were made while the robot was walking.



Mechanical oscillations in the robot body were applied as a disruptive effect on the weapon system. In the applications, the obtained results from gun shots, which are made with the robot, are presented as a table. Thus, it is revealed that a four-legged robot can be used for the defence industry.

**Keywords:** Four-Legged Robot, Simscape Multibody Model, Walking pattern, PID Control, Gun Turret

## 1. GİRİŞ

Zorlu arazi ve parkurları aşabilen, savunma amaçlı üretilmiş birçok paletli ve tekerlekli savaş araçları, günümüzde operasyonel uygulamalarda aktif bir biçimde kullanılmaktadır. Bu araçların üzerine, taarruz gücü kazandırmak amacıyla çeşitli silah sistemleri eklenmiştir. Eklenen silah sistemlerinin performansını ve etkin kullanımını arttırmaya yönelik, literatürde rastlanılmış, namlu stabilizasyon çalışmaları bulunmaktadır. Böylece silah kulesinin mekanik hareketini sağlayan eksenlerin pozisyon kontrolü ve hedef takip sistemleri ile namlunun hedeflere yönelimleri otomatik olarak gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayede operasyonlarda oldukça etkili bir silah olarak kullanılabilirler. Ancak bu araçlar arazide hareket halindeyken hantal ve kısıtlı manevra kabiliyetleri gibi dezavantajlara sahip olabilmektedirler. Dolayısıyla girilemeyen ve ulaşılamayan bölgelerde etkisiz kalabilmektedirler.

Eklem bacaklı robotlar zorlu arazi koşullarında manevra kabiliyeti ile birçok uygulamaya uyarlanabilirler. Bir çok avantaja sahip eklem bacaklı robotlar, özellikle savunma sanayisine yönelik keşif ve arazi tarama uygulamalarında, üzerlerine yerleştirilen çeşitli algılayıcılar ve detektörler sayesinde, günümüzde arama, tarama ve keşif uygulamalarında kullanılabilirler. Literatürde buna yönelik birçok çalışmaya rastlamak mümkündür. Ancak indeksli saygın dergilerde, hareketli eklem bacaklı bir robot üzerine yerleştirilmiş silah sistemine yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

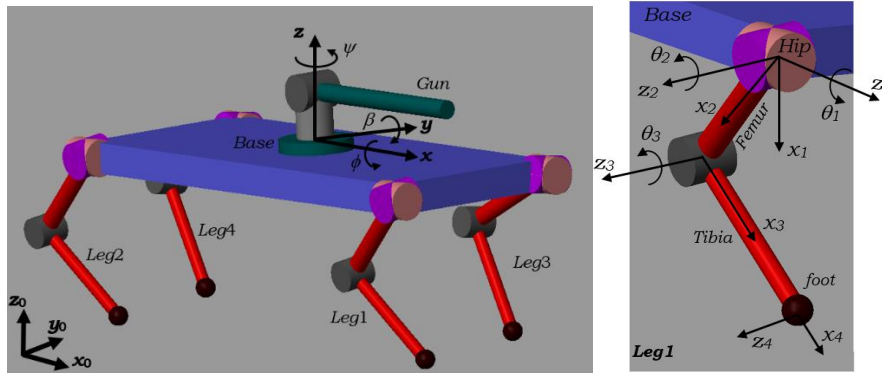
Dünyada savunma sanayisine katkılar sağlayan robot teknolojisinin eklem bacaklı robotlar alanında, çok önemli ilerlemeler sağlanmıştır. Bacaklı robotlar, tekerlekli mobil robotlara göre zorlu arazi koşullarında manevra kabiliyeti açısından daha çok tercih edilmektedir [1]. Dört bacaklı robotlar diğer bacaklı robotlara göre daha kararlı ve daha çok yük taşıma kapasitesine sahiptir [2]. Ayrıca engebeli arazilerde ve aşırı pürüzlü yüzeylerde yürüyebilme gibi önemli avantajlara sahiptirler [3]. Günümüz savunma sanayi teknolojisi ile geliştirilen yeni nesil silah sistemlerinin temel amacı, her türlü bozucu etki karşısında belirlenen hedefin başarılı bir şekilde vurulmasını sağlamaktır. Aynı zamanda, yaşadığımız dönem içerisindeki harp koşullarında, daha hareketli ve daha hızlı tepki verebilen silah sistemleri tercih edilmektedir. Araçlarda kullanılan silah sistemleri, araçlar hareket halindeyken bozucu etkilere maruz kalırsa, silahı veya nişan

alma ünitesini hedefte sabit tutmak için başka önlemler alınması gerekir. Bu önlemlere “stabilizasyon” denir [4]. Namlu stabilizasyonunun yapılmasıyla, sistemin maruz kalacağı tüm bozucu etkilere rağmen başarılı bir hedef takibi sağlanır. Bir savaş aracındaki silah taretinin kontrol edilebilmesi, savunma sanayi teknolojisinin gelişimi için kritik bir önem arz etmektedir. İki eksenli bir silah taret sisteminin kontrolü, aracın hareketinden kaynaklanan bozulmaları telafi edecek azimut (azimuth) ve yükseklik (elevation) açılarının uygun bir şekilde çalıştırılmasıyla sağlanır [5].

Bu çalışmada dört bacaklı robot üzerine 2 eksen silah kontrol sistemi yerleştirilmiştir. Dört bacaklı avcı robot(DÖBAR)’un dinamik modeli Matlab programı Simscape Multibody araç kutusu ortamında oluşturulmuştur. Düz zeminde yürütülen robotun zemin ile bacakları arasındaki reaksiyon kuvvetleri dikkate alınmıştır. DÖBAR’ın yürürken, üzerindeki atış kontrol sistemi ile, sabit ve hareketli hedeflere yönelik atışları simülasyonlarla gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar tablo halinde sunulmuştur.

## 2. FİZİKSEL MODEL

Bu çalışmada ele alınan DÖBAR’ın her bir bacağı 3 serbestlik dereceli ve döner eklemlere sahiptir. Bacakların ileri kinematik ifadeleri için Şekil 1.’de görüldüğü gibi eklemlere eksen takımları yerleştirilmiştir. DÖBAR’ın bacakları birinci uzuv Femur ( $L_1$ ) ve ikinci uzuv Tibia ( $L_2$ )’dan oluşmaktadır. Bacak uzuv uzunlukları  $L_1=L_2=0.4$  m olarak alınmıştır. Robot gövde uzunluğu 0.8 m ve genişliği de 0.3 m birimindedir. DÖBAR’ın uzuvlarına ait kütlelerin sayısal değerleri ise Tablo 1.’de verilmiştir.



Şekil 1. DÖBAR fiziksel modeli, tek bacağın koordinat düzlemi ve kinematiki

**Tablo 1.** DÖBAR'ın uzuv kütleleri

Parametre	Değer
$M_{base}$	17.4 kg
$M_{femur}$	1.6 kg
$M_{tibia}$	0.3 kg
$M_1^G$	1 kg
$M_2^G$	1 kg
$M_{bullet}$	.008 kg

Robotik sistemlerde (i). uzuv ile (i-1).uzvu arasındaki homojen dönüşüm matrisinin en genel ifadesi Denavit Hartenberg parametreleri ile tanımlanmıştır [6]. Bir bacak için ayak ucunun(foot), gövdeye(base) göre dönüşüm matrisi (1) deki gibi üç homojen dönüşüm matrisinin çarpımından elde edilmiştir.

$$T_{base}^{tibia} = T_{base}^{hip} \cdot T_{hip}^{femur} \cdot T_{femur}^{tibia} \quad (1)$$

Robot gövdesinin geometrik merkezine  $base(x,y,z)$  eksen takımı yerleştirilmiştir. Robotun bacak uçlarının,  $base(x,y,z)$  eksen takımına göre koordinatları (2) ifadesi ile hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} foot_x^i &= x_i + (L_1 \sin \theta_2^i + L_2 \sin(\theta_2^i + \theta_3^i)) \\ foot_y^i &= y_i + \sin \theta_1^i (L_1 \cos \theta_2^i + L_2 \cos(\theta_2^i + \theta_3^i)) \\ foot_z^i &= z_i - \cos \theta_1^i (L_1 \cos \theta_2^i + L_2 \cos(\theta_2^i + \theta_3^i)) \end{aligned} \quad (2)$$

Burada  $(x_i, y_i, z_i)$  koordinatları; her bir *Hip* eksen takımının, merkez  $base(x,y,z)$  eksen takımına göre omuzdaki konumlarıdır. Uzaysal koordinatlara sahip  $base(x,y,z)$  eksen takımının, uzayda sabit bir nokta olan  $ground(x_0,y_0,z_0)$  eksen takımına göre dönüşümü (3) ifadesi ile elde edilmiştir.

$$T_{ground}^{base} = Trans(x).Trans(y).Trans(z).Rot(z,\varphi).Rot(y,\beta).Rot(x,\emptyset)$$

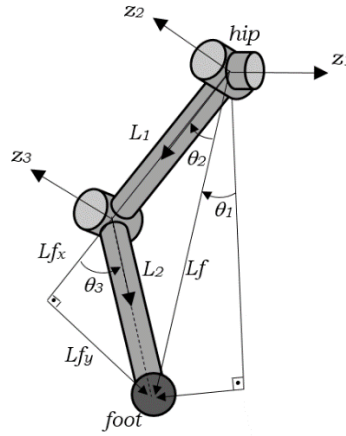
$$T_{ground}^{base}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \varphi & \cos \varphi \sin \emptyset \sin \beta - \cos \emptyset \sin \varphi & \sin \emptyset \sin \varphi + \cos \emptyset \cos \varphi \sin \beta & x \\ \cos \beta \sin \varphi & \cos \emptyset \cos \varphi + \sin \emptyset \sin \beta \sin \varphi & \cos \emptyset \sin \beta \sin \varphi - \cos \varphi \sin \emptyset & y \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \emptyset & \cos \emptyset \cos \beta & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Buna göre robotun her bir ayak ucunun(foot), uzayda sabit bir nokta olan ground( $x_0, y_0, z_0$ ) eksen takımına göre koordinatları (4) ifadesi ile hesaplanmıştır.

$$\begin{bmatrix} foot_{x0}^i \\ foot_{y0}^i \\ foot_{z0}^i \end{bmatrix} = T_{ground}^{base} \begin{bmatrix} foot_x^i \\ foot_y^i \\ foot_z^i \end{bmatrix} \quad (4)$$

DÖBAR'ın yürüyüş analizinde robotun ayak ucunun izlemesi gereken eğriler yörünge planlaması ile ortaya konulmuştur. Buna göre bacak eklem açılarının ters kinematik analiz yöntemi ile hesaplanması gerekmektedir. Bunun için, Şekil 2.'te gösterilen bir bacağına ait kinematik diyagramdan faydalanılmıştır. Böylelikle bacağın eklem  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  ve  $\theta_3$  açıları istenen ayak ucu koordinatlarına karşılık formüle edilmiştir.



**Şekil 2.** Ters kinematik çözüm için bacağın görseli

Ayakucunun *Hip* eksen takımına göre koordinatları, robot gövde merkezine yerleştirilen *base*( $x, y, z$ ) eksen takımını göz önünde bulundurularak (5) ifadesi ile hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} Leg_x^i &= foot_x^i - x_i \\ Leg_y^i &= foot_y^i - y_i \\ Leg_z^i &= z_i \end{aligned} \quad (5)$$

Elde edilen bu değerler (6) ifadesinde yerine yazılarak *Hip* eklemine ait  $\theta_1$  değişkeni elde edilmiştir.

$$\theta_1^i = atan2(Leg_y^i, Leg_z^i) \quad (6)$$

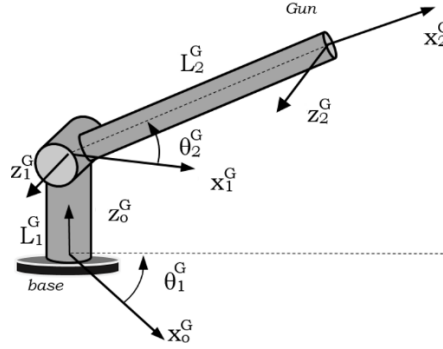
Daha sonra (7) ile  $\theta_2$  değişkeni, (8) ile  $\theta_3$  değişkeni hesaplanmıştır.

$$Lf^i = \sqrt{Lf_x^{i2} + Lf_y^{i2}} = \sqrt{Leg_z^{i2} + Leg_y^{i2}}$$

$$\theta_3^i = \text{atan2}\left(\sqrt{1 - \left(\frac{Lf_x^i + Lf_y^i - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2}\right)^2}, \left(\frac{Lf_x^i + Lf_y^i - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2}\right)\right) \quad (7)$$

$$\theta_2^i = \text{atan2}(Lf_y^i, Lf_x^i) - \text{atan2}(L_2 \sin \theta_2^i, L_1 + L_2 \cos \theta_2^i) \quad (8)$$

DÖBAR'ın üzerine, gövdenin geometrik merkez noktasına, 2 eksenli ve döner eklemlere sahip bir namlu taret sistemi yerleştirilmiştir. Namlu taret sisteminin fiziksel modeli ve kinematik diyagramı Şekil 3.'te gösterilmiştir.



Şekil 3. DÖBAR üzerine yerleştirilmiş 2 eksen namlu taret sisteminin kinematik diyagramı

Namlu taret sisteminin gövdeye(base) göre dönüşüm matrisi kullanılarak düz kinematiği (9) daki gibi hesaplanmıştır. Burada  $L_1^G=0.12$  m,  $L_2^G=0.3$  m uzunluğuna sahiptir.

$$\begin{aligned} gun_x^{base} &= \cos \theta_1^G (L_2^G \cos \theta_2^G) \\ gun_y^{base} &= \sin \theta_1^G (L_2^G \cos \theta_2^G) \\ gun_z^{base} &= L_1^G + (L_2^G \sin \theta_2^G) \end{aligned} \quad (9)$$

Şekil 4'te DÖBAR üzerinde yer alan namlu taret sisteminin hedefe doğru yönelim açılarının tespiti için çizilmiş kinematik diyagram yer almaktadır. Hedefin koordinatlarını temsil eden vektör zeminde sabit bir noktaya göre belirlenmektedir. Sürekli hareket halindeki DÖBAR'ın zeminde sabit olan bu noktaya göre konumu ve yönelimleri (3) ifadesi ile hesaplanabilmektedir. Buna göre DÖBAR'ın konum vektörü ile hedef konum vektörü arasında fark anlık olarak (10) ifadesi ile hesaplanmıştır. Namlunun hedefe yönelim vektörü (11) ifadesi ile bulunmuştur.

$$\nabla \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{Target} \\ y_{Target} \\ z_{Target} \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \varphi & \cos \varphi \sin \theta \sin \beta - \cos \theta \sin \varphi & \sin \theta \sin \varphi + \cos \theta \cos \varphi \sin \beta & x_{Döbar} \\ \cos \beta \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi + \sin \theta \sin \beta \sin \varphi & \cos \theta \sin \beta \sin \varphi - \cos \varphi \sin \theta & y_{Döbar} \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \theta & \cos \theta \cos \beta & z_{Döbar} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L_1^G \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

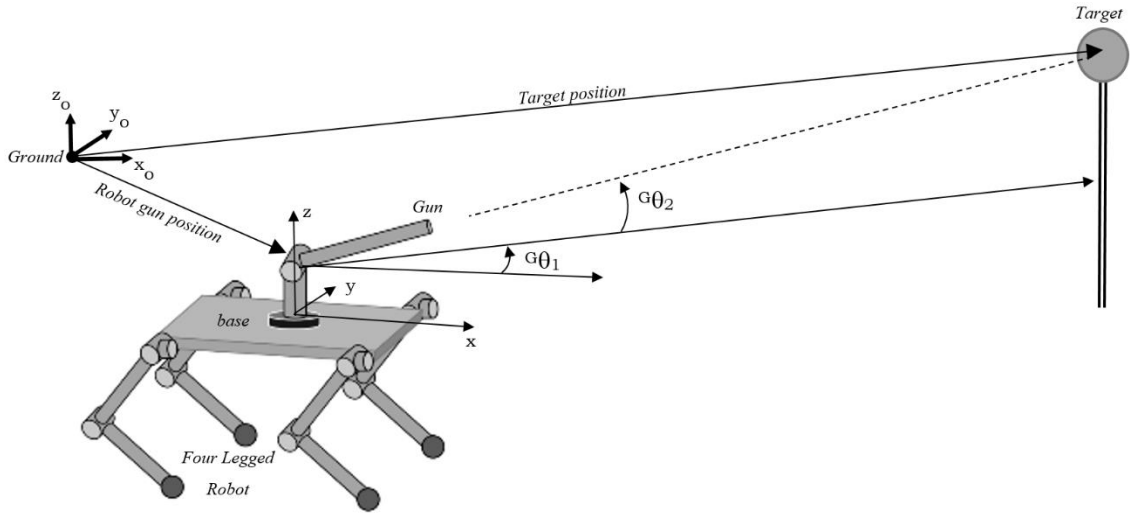
$$\begin{bmatrix} x_{Gun} \\ y_{Gun} \\ z_{Gun} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\varphi & \cos\varphi\sin\theta\sin\beta - \cos\theta\sin\varphi & \sin\theta\sin\varphi + \cos\theta\cos\varphi\sin\beta \\ \sin\beta\sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi + \sin\theta\sin\beta\sin\varphi & \cos\theta\sin\beta\sin\varphi - \cos\varphi\sin\theta \\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\theta & \cos\theta\cos\beta \end{bmatrix}^{-1} \nabla \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (11)$$

DÖBAR üzerine yerleştirilmiş namlu taret sisteminin merkezini esas alarak, ters kinematik için (12), (13) ve (14) ifadeleri kullanılmıştır.

$$\theta_1^G = \text{atan2}(y_{Gun}, x_{Gun}) \quad (12)$$

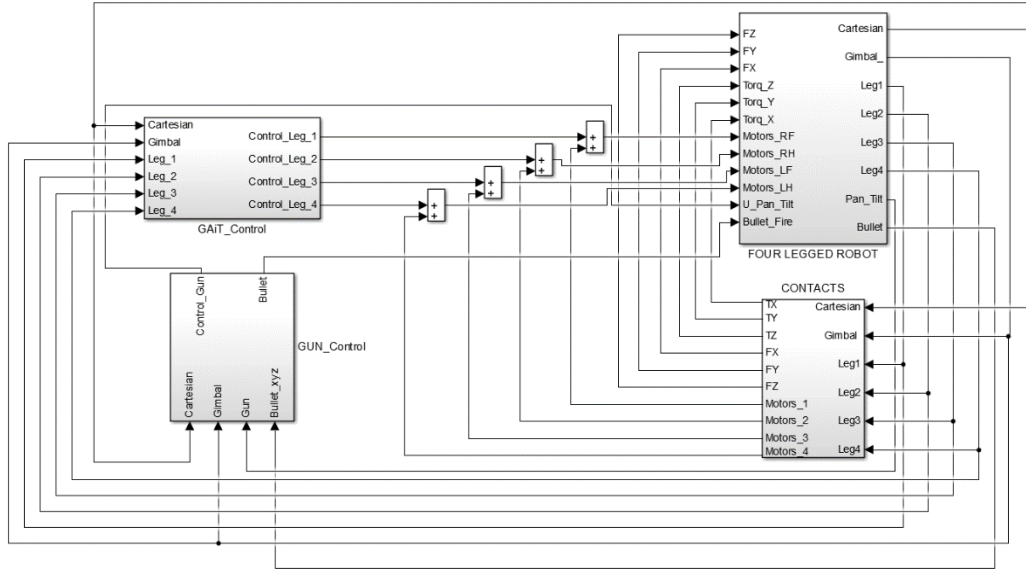
$$L^G = \sqrt{(x_{Gun})^2 + (y_{Gun})^2} \quad (13)$$

$$\theta_2^G = \text{atan2}(z_{Gun}, L^G) \quad (14)$$



**Şekil 4.** Namlu taret sisteminin hedefe doğru yönelim açılarının tespiti için çizilmiş kinematik diyagram

Robot modeli *MATLAB simscape multibody* ile Şekil 5.'teki gibi oluşturulmuştur. Modelde *CONTACTS*, *Gait\_Control*, *GUN\_Control* ve *FOUR LEGGED ROBOT* isimlerinde alt sistemler yer almaktadır. *CONTACTS* alt sisteminde robotun zemin ile teması sonucunda zemin reaksiyon kuvvetleri hesaplanmaktadır. Bu reaksiyon kuvvetlerinin robotun hareketli eklemlerinde yol açtığı tepkiler (13) ifadesi yardımıyla bulunmakta ve *FOUR LEGGED ROBOT* alt sistemine iletilmektedir. *Gait\_Control* isimli alt sistemde ise robotun yürüyüşünü sağlayan referans yörüngeler oluşturulmaktadır. Robotun yürüyüşünden sorumlu olan bu alt sistem aynı zamanda bacakların hareket kontrolünü gerçekleştirmektedir. *GUN\_Control* alt sistemi robotun üzerine yerleştirilmiş namlu taret sisteminin hareket kontrolünü sağlamaktadır.



Şekil 5. DÖBAR'ın MATLAB Simscape Multibody ile oluşturulmuş modeli

### 3. KONTROL SİSTEMİ

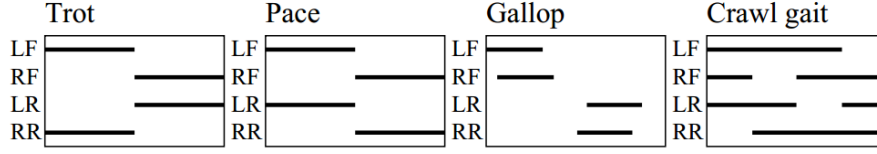
Yaygın olarak kullanılan klasik PID kontrol yöntemi kapalı çevrim kontrol yapısına sahiptir. PID kontrolünün geniş kullanımının nedenleri; basit yapısı, sağlamlığı ve kolay uygulanmasıdır. PID kontrolünün optimal parametreleri, kontrolün uygulandığı sistem üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir [7]. PID kontrol yöntemine göre kontrol işaret sinyali,

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{d e(t)}{d t} + K_i \int_0^t e(t) d t \quad (15)$$

ifadesi ile hesaplanabilmektedir. Burada,  $e(t)$  hata değerini ifade etmektedir. Robotun bacak eklemlerine uygulanmak üzere, oransal kazanç katsayısı  $K_p=8000$ , türevsel kazanç  $K_d= 450$ , integral kazanç katsayısı  $K_i=7$  olarak, deneme yanılma tekniği ile bulunmuştur. Kontrol sinyalinin limiti 30 Nm ile sınırlandırılmıştır.

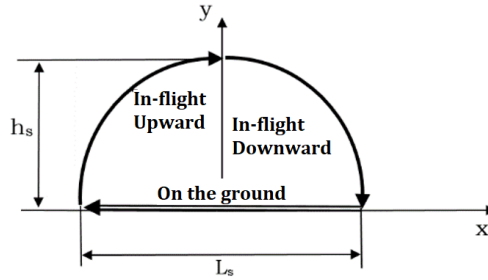
Robota ait her bir bacak eklemine izlemesi gereken açısal referanslar, bir yürüyüş dizisinin yörünge planlaması ile belirlenmiştir. Daha sonra eklemler PID kontrol ile bu referans konumlara götürülmek üzere kontrol edilmiştir.

Bu çalışmada simülasyonlar için Şekil 6'da gösterilen trot yürüyüş dizisi [8] kullanılmıştır. Bu yürüyüş dizisinin robot gövdesinde yol açtığı salınımlar namlu stabilizasyonuna bozucu etki olarak yansımaktadır.



**Şekil 6.** Dört bacaklı robot için yürüyüş dizileri

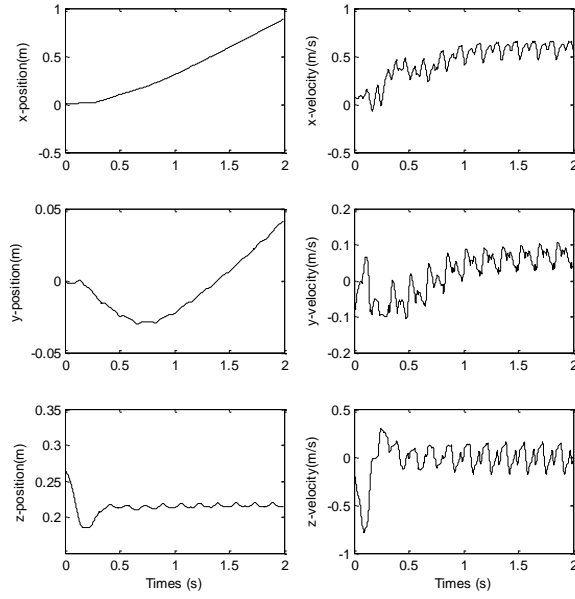
Robotun yürüyüşü esnasında bir bacak adım atarken ayakucu Şekil 7.'de x-y düzleminde gösterilen eğri yolunu takip etmektedir. Her bir adım havada ve yerde olan aşamalardan oluşmaktadır. Bacaklar, hareketlerini havadayken sinüzoidal olarak gerçekleştirmektedir. Yerdeki aşamada bacak yere sürekli temas etmektedir ve ayakucu zemine paralel olarak düz doğrusal hareket ettirilmektedir. Bu sayede yerdeki aşamada robot gövdesi bacak tarafından yere paralel biçimde itilmektedir. Dört bacaklı robot, trot yürüyüş periyodu boyunca daima 2 bacak üzerinde taşınmaktadır.



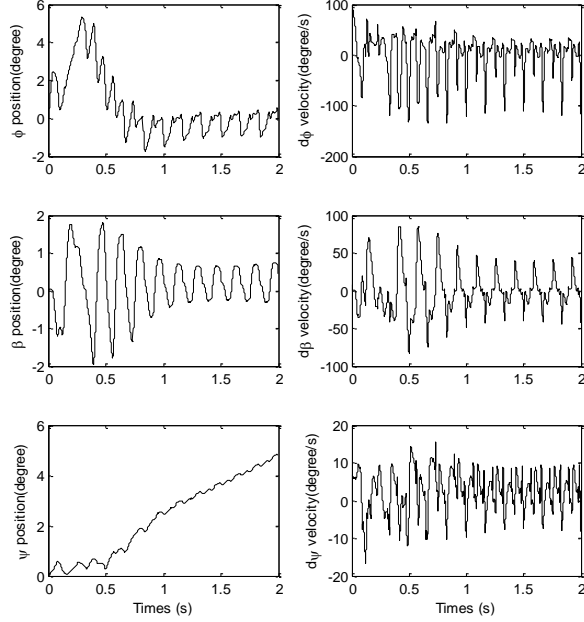
**Şekil 7.** Robot bacağının bir adımında izleyeceği yörünge

Simülasyon süresince robot gövde merkezinin doğrusal hareketlerinin zamana göre değişimleri Şekil 8.'de gösterilmiştir. Robot gövdesinin açısal konum değişimleri ise Şekil 9.'da verilmiştir. Elde edilen grafiklerden robot gövde merkezinin düşey doğrultuda salınım yaptığı ve yaklaşık 2 cm kadar genliğe sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca robot gövdesi yaklaşık 2 derecelik bir genlikle yalpalama hareketini de gerçekleştirmektedir. Simülasyon 2 saniye kadar sürdürülmüş ve robot bu süre içerisinde yaklaşık 0.9 metre kadar ilerleyebilmiştir. Bu sürenin sonunda yaklaşık 0.6 m/s ilerleme hızına ulaşmıştır. Oluşturulan yürüyüş dizisi ile robot kararlı bir yürüyüş sergilemiştir. Böylece robot, ilerlemede sürekliliği sağlayarak ve devrilmeden yürüyüş dizisini tamamlayabilmiştir.





**Şekil 8.** Dört bacaklı robotun trot yürüyüş simülasyonundan elde edilen gövdeye ait *doğrusal* konum ve hız grafikleri



**Şekil 9.** Dört bacaklı robotun trot yürüyüş simülasyonundan elde edilen gövdeye ait *açısal* konum ve hız grafikleri

#### 4. ATIŞ SİMÜLASYONLARI

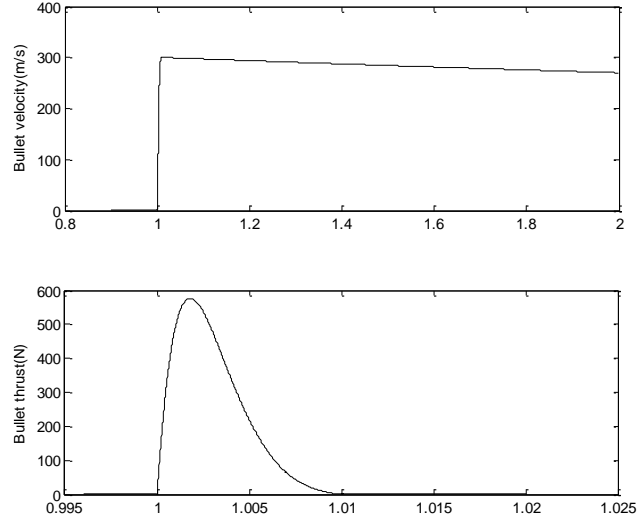
Atış için kullanılan mermi çekirdeğinin dinamik modeli de simülasyonlara eklenmiştir. Merminin dinamik hareketinde, çevre koşulları, merminin namluyu terk etme hızı, atış esnasında oluşan iç basınç ve merminin fiziksel parametreleri de göz önünde bulundurulmuştur. Namlu içi mermi balistiği için [9]'de yapılan çalışmalardan yararlanılmıştır.

Simülasyonlarda 9 mm'lik parabellum mermi çekirdeği kullanılmıştır ve mermi çekirdeğine ait teknik özellikler Tablo 2.'de verilmiştir [10]. Kovan haricindeki mermi çekirdeği  $m_{bullet}=8$  gram ağırlığındadır.

**Tablo 2.** Parabellum tabanca 9 mm fişek özellikleri

<u>Şartname</u>	Stanag 4090, AEP-97 Edition A (Multi Calibre)
<u>Fişek Boyu</u>	MOPI)
<u>Fişek Ağırlığı</u>	29,69 – 0,3 mm
<u>Hız</u>	~12,15 g
<u>Hız Standart</u>	370 $\pm$ 10 m/s (in 16 m)
<u>Sapması</u>	max. 9 m/s
<u>Ortalama Kovan</u>	max. 2850 bar
<u>Ağız Basıncı</u>	
<u>Dağılım</u>	Ort. Dağılım Yarıçapı max.
<u>Mermi İrtibat</u>	7,6 cm (in 46 m)
<u>Kuvveti</u>	min. 20,4 kgf
<u>Kovan Model</u>	
<u>Numarası</u>	9 mmx19 parabellum kovan
<u>Mermi Tipi</u>	FMJ, mermi gömlek yüksüğü pirinç (CuZn36), mermi çekirdeği kurşun- antimon alaşımı
<u>Mermi Ağırlığı</u>	8 $\pm$ 0,075 g
<u>Kovan Malzemesi</u>	
<u>Kapsül</u>	Pirinç (CuZn30) 9 mm kapsül, boxer

Simülasyonlarda, tetiklenme anından namluyu terk edene kadar geçen sürede, mermi çekirdeğine etki eden itki kuvvetleri ve mermi hızları anlık olarak hesaplanmıştır. Robot yürüme hareketine başladıktan yaklaşık 1 sn sonra atış gerçekleştirilmiştir. Mermi çekirdeğinin iç balistik cevabının zamana göre değişim eğrileri Şekil 10.'da gösterilmiştir. Buna göre merminin namluyu terk etme hızı yaklaşık 300 m/s olarak elde edilmiştir.



**Şekil 10.** Mermi çekirdeğinin balistiği

Bu çalışmada robottan 25 metre uzaktaki hedefler göz önünde bulundurulmuş ve iki farklı durum için atışlar gerçekleştirilmiştir. Birinci durumda, rastgele koordinatlara yerleştirilmiş, sabit hedeflere yönelik atışlar yapılmıştır. İkinci durumda ise hedefler hareketli tutulmuştur. Atışlar robot yürürken bozucu etkiler altında yapılmış ve namlu PID kontrol yöntemi ile kontrol edilmiştir. Atış kontrol sistemine uygulanmak üzere, oransal kazanç katsayısı  $K_p=2000$ , türevsel kazanç katsayısı  $K_d=2.2$ , integral kazanç katsayısı  $K_i=0.01$  olarak, deneme yanılma tekniği ile bulunmuştur. Namlu eklemlerine uygulanan kontrol sinyalinin limiti ise 100 Nm ile sınırlandırılmıştır.

Pratikte 9 mm'lik atışlar için atış poligonlarında hedefler 25 metre uzağa yerleştirilirler. Yerleştirilen hedefler ise genellikle Şekil 11.'de gösterilen boy hedefi olmaktadır. Atışların bu hedef üzerinde gösterilen beyaz çizgiler arasında bir noktaya isabet etmesi başarılı olarak değerlendirilmektedir. Kabaca bu bölge 15-20 cm arasında değişen bir genişliğe sahip olmaktadır. Eğitimlerde bu bölgeye yapılan her isabete 10 puan verilmektedir. Bu bölgenin dışına, yani kol ve bacak bölgelerine olan isabetler 5 puan, bunun dışında olanlar ise puansız olarak değerlendirilmektedir [11].



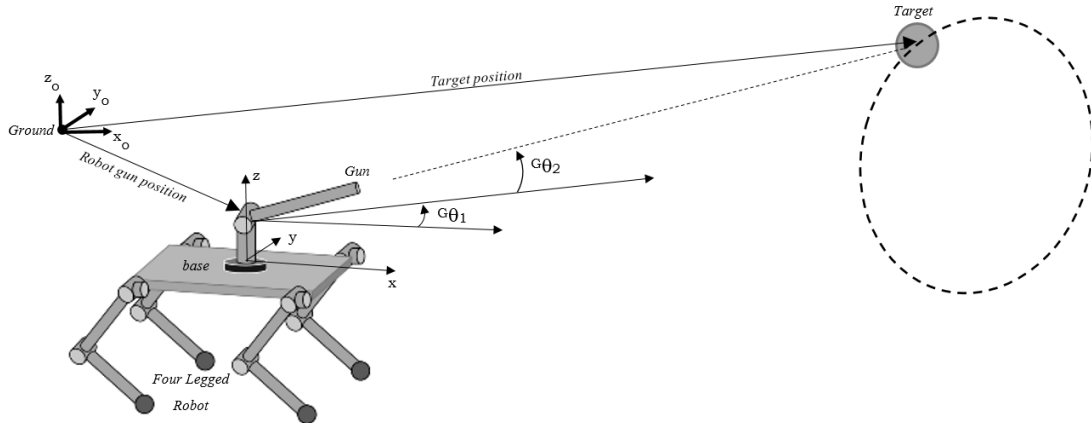
**Şekil 11.** Atış için kullanılan boy hedefi

Bu çalışmada ele alınan birinci durum için koordinatları rastgele belirlenen 10 sabit hedefe yönelik, DÖBAR üzerinden yapılan atışlar simülasyonlarla gerçekleştirilmiştir. Robot sıfır noktasından harekete başlayarak x-ekseni doğrultusunda hedefe doğru yürütülmüş ve hareketin ilk 1 saniyesinde atışlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda atışların isabet başarısı Tablo 3.'te sunulmuştur. Buna göre en fazla 3.3 cm'lik bir hata ile tüm hedeflere isabetin sağlandığı görülmüştür. Elde edilen hata değerleri göz önünde bulundurulduğunda, yapılan atışların tümünün yukarıda belirtilen başarı sınırları içerisinde yer aldığı görülmektedir.

**Tablo 3.** Rastgele belirlenmiş sabit hedef koordinatları ve isabet hataları

<i>Hedef No.</i>	$x_{hedef} (m)$	$y_{hedef} (m)$	$z_{hedef} (m)$	<i>Hata (m)</i>
1	25	0.4	1.52	0.032
2	25	0.73	1.47	0.030
3	25	-0.23	1.3	0.031
4	25	1.2	0.81	0.033
5	25	-1.1	0.92	0.035
6	25	-0.82	1.14	0.035
7	25	0.46	1.48	0.033
8	25	-0.66	1.25	0.033
9	25	0.11	0.79	0.033
10	25	-0.55	1.76	0.030

Çalışmamızın ikinci durumu için hedef hareketli tutulmuş ve bunun için bir hareket fonksiyonu tanımlanmıştır. Hedefe Şekil 12.'deki gibi havada 5 metre yarıçaplı dairesel bir yörünge çizdirilmiştir. Dairesel yörünge y-z düzleminde tanımlanmış ve yörünge merkezi yerden 5 metre yükseklikte alınmıştır. Farklı 10 açısal hıza sahip hedefler için atışlar simülasyonlarla tekrarlanmıştır.



**Şekil 12.** Dairesel harekete sahip hedef için robot ve namlu yönelimi

Bu atışların isabet başarısı Tablo 4.'te sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre ilk 5 atışın başarı sınırı içerisinde yer aldığı görülmektedir. Tanımlanan hareket için 0.5 r/s değeri ve üzerindeki açısal hızlara sahip hedeflere yönelik yapılan atışların isabet başarısı düşmektedir.

**Tablo 4.** Hareketli hedefe ait açısal hızlar ve isabet hataları

<i>Hedef No.</i>	<i>w<sub>hedef</sub> (r/s)</i>	<i>Error (m)</i>
1	0.1	0.077
2	0.2	0.115
3	0.3	0.154
4	0.4	0.192
5	0.5	0.234
6	0.6	0.273
7	0.7	0.310
8	0.8	0.349
9	0.9	0.387
10	1.0	0.427

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada dört bacaklı bir robot gövdesine 2 eksenli silah kontrol sistemi yerleştirilerek Simechanics Multibody modeli oluşturulmuştur. Dört bacaklı robotlar için tanımlanmış trot yürüme örüntüsü kullanılarak robotun yürütülmesi sağlanmıştır. Bunun için robot eklemleri klasik PID kontrol yöntemi ile kontrol edilmiştir. Robot üzerine yerleştirilmiş atış kontrol sisteminin başarısını ortaya koymak için sabit ve hareketli hedeflere yönelik atış simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Hedeflere ait koordinatlar robotun 25 metre uzağında olacak biçimde belirlenmiştir. Atışlar sonucunda elde edilen isabet hataları tablo halinde sunulmuştur. Buna göre sabit hedeflere yönelik yapılan atışlarda oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte 0.4 r/s değeri ile daha düşük açısal hızlara sahip hareketli hedefler için oldukça başarılı sonuçlar elde edilirken, daha yüksek hızlarda bu başarı düşmüştür. Elde edilen bu sonuçlara göre dört bacaklı bir robot üzerinden yapılan atışlar sonucunda hedefler büyük oranda başarıyla isabet ettirilebilmiştir. Buna göre üzerine atış kontrol sistemi yerleştirilmiş dört bacaklı avcı robot(DÖBAR)'un savunma sanayisinde kullanılabilirliği açıkça gösterilmiştir. Bir sonraki çalışmalarda farklı kontrol yöntemlerinin bu başarıya olan etkisi araştırılacaktır.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] Gor, M.M., Pathak, P.M., Samantaray, A.K., Yang, J.M., Kwak, S.W. (2015), Control oriented model-based simulation and experimental studies on a compliant legged quadruped robot, *Robotics and Autonomous Systems*, 72, 217-234.
- [2] Ganesh, K.K., Pathak, P.M. (2013). Dynamic Modelling & Simulation of a Four Legged Jumping Robot with Compliant Legs, *Robotics and Autonomous Systems*, 61, 221-228.
- [3] Atique, M.U., Sarker, R.I., Ahad, A.R. (2018), Development of an 8DOF quadruped robot and implementation of inverse kinematics using Denavit-Hartenberg convention, *Heliyon*, 01053, 1-19.
- [4] Germershausen, R. et. al. (1982), Handbook on Weaponry, *Rheinmetall GmbH, Düsseldorf*. pp. 257.
- [5] Gomes, M. Dos S., Ferreira, A.M. (2006), Gun-turret modelling and control, *18th International Congress of Mechanical Engineering*, 18, pp. 60-67.
- [6] Denavit, J., Hartenberg R.S. (1955), A kinematic notation for Lower-pair mechanisms based on matrices, *ASME Japnl. Mechan.* pp. 215-221.
- [7] Feng, H., Yin, C.B., Weng, W.W., Ma, W., Zhou, J.J., Jia, W.H., Zhang, Z. (2018), Robotic excavator trajectory control using an improved GA based PID controller, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 105, 153-168.
- [8] Cristina P. S., Vítor Matos. Gait transition and modulation in a quadruped robot: A brainstem-like modulation approach, *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* 59 (2011) 620–634.
- [9] Yıldırım, F. (2013), The effect of geometric changes of propellants which used in large caliber weapons on barrel pressure and muzzle velocity, *Master Thesis – Ankara University, Ankara, Turkey*, pp. 5-6.
- [10] <http://www.millisavunma.com/mkek-hafif-ve-agir-muhimmat-ailesi/>, (last update) 21.01.2017, 18:48.
- [11] Başbüyük, G.Ö., Acar, S., Doğan, M. (2017), Antropometrik ölçümlerin polis adaylarının silah atış performansları üstünde etkisi, *Hitit Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi-* Yıl 10, Sayı 2. 757-773.

# SU ALTI PATLAMA FENOMENİNİN MEKANİK YAPILAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN DENEYSEL VE HESAPLAMALI YÖNTEMLER İLE İNCELENMESİ

**Tolga Köktürk<sup>(a)</sup>, Baran Yıldırım<sup>(a)</sup>**

<sup>(a)</sup> ASELSAN A.Ş., Mehmet Akif Ersoy Mahallesi, 296.Cadde No:16, 06370

Yenimahalle Ankara, {tkokturk, byildirim}@aselsan.com.tr

## ÖZ

Su altı ve su üstü platformların tasarım aşamalarında su altı patlamalarının mekanik yapılar üzerindeki etkilerinin tahmin edilmesi ve tasarımlarda bu etkilerin göz önünde bulundurulması önem arz etmektedir. Gerçek boyutlara sahip platformlar üzerinde yapılacak testlerin hem zaman hem de maddi maliyetlerinin yüksek olması, sistem geliştirme süreçlerinde sonlu eleman analiz (SEA) yöntemlerinin kullanılmasını elzem hale getirmiştir.

Su altı patlamalarının çözümlerinde kullanılacak SEA yöntemlerinin doğru uygulanması için, patlama sonrasında oluşan zamana ve mesafeye bağlı basınç değişiminin doğru tespit edilmesi ilk aşamadır. Bu girdinin doğru tespit edilmesi sayesinde gerçekleştirilecek analizlerin testler ile kıyaslanması, SEA yönteminin güvenilir bir mühendislik aracı olarak kullanılmasına olanak sağlayacaktır.

Bu çalışmada, su altı patlamalarının mekanik yapılar üzerindeki etkinliğinin tespitinde kullanılan analiz yönteminin doğruluğunu belirlemek için bir test-analiz kampanyası düzenlenmiştir. 1 gram ve 3 gram ağırlığında RDX patlayıcısı barındıran silindirik tapalar kontrollü bir biçimde patlatılmış ve şahit numune borular üzerinde oluşan deformasyonlar tespit edilmiştir. Test patlamaları esnasında, patlayıcı merkezinden çeşitli uzaklıklara yerleştirilmiş özel sensörler vasıtasıyla basınç-zaman verisi toplanmış ve sonlu eleman analizlerine girdi olacak şekilde işlenmiştir. Testlerde ölçülen basınç-zaman verisinin teorik beklentiler ile uyumluluk içerisinde olduğu gözlenmiştir.

Testlerde elde edilen basınç profilleri kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucunda numune borularda oluşan deformasyonlar test sonuçları ile karşılaştırılmış, genel olarak uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Eksplisit analiz, patlama basıncı, sonlu elemanlar analizi, su altı patlama testi, yapısal deformasyon.

## **EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF UNDERWATER EXPLOSION PHENOMENA ON MECHANICAL STRUCTURES**

### **ABSTRACT**

During the design phase of naval based equipment and systems, it is important to estimate and consider the effects of underwater explosions (UNDEX) on the structural integrity. Due to high cost of large scale tests conducted on real prototypes, it is beneficial to utilize finite element analysis (FEA) methods in the development process.

In the solution of UNDEX problems with FEA methods, the first step is to determine the pressure-time profile as a function of distance after the explosion. Correct identification of this input and validation of FEA with test results will allow the FEA method to be used as a reliable engineering tool in further design iterations.

In this study, a test-analysis campaign was conducted to determine the accuracy of the analysis method used to determine the effects of underwater explosion on mechanical structures. Cylindrical fuzes containing 1 gram and 3 gram weight of RDX explosive were detonated and deformations on the sample tubes were measured. During test bursts, pressure-time data were collected by means of pressure sensors located at various distances from the center of the explosive and used as input to the FE model. The pressure-time data measured in the tests were consistent with the theoretical expectations.

The deformations in the sample tubes calculated by FEA were compared with the test results. Overall shapes and deformation levels were found to be similar.

**Keywords:** Explicit analysis, finite element analysis, structural deformation, underwater explosion pressure, underwater explosion test.



## 1. GİRİŞ

Su altında meydana gelen patlamaların su altı/üstü platformların mekanik yapılarının üzerinde oluşturacağı etkileri bilmek ve platform tasarımlarını bu etkiler ışığında şekillendirmek kritik bir tasarım aşamasıdır. Askeri uygulamalarda bu patlamalar; ağır veya hafif torpidolar, karşı tedbir torpidoları, su altı mayınları vb. kaynaklı olabilmekte beraber etkileri; denizaltılar, su üstü gemiler, su üstü platformlar gibi stratejik öneme sahip yapıların hayatta kalabilme yeteneklerini yakından ilgilendirmektedir. Patlamaların, istenen amaç doğrultusunda etkinliğinin bilinmesi ve tasarım fazında süreçlere yön verilmesi için modelleme ve simülasyon araçlarının gerçeğe en yakın sonuç verecek şekilde kullanılması çok önemlidir. Bir torpido örneği için, harp başlığının hedef üzerindeki etkinliğinin doğru modelleme ve simülasyon yaklaşımları sayesinde öngörülmesi, hedefe yaklaşma mesafesi/açısı, harp başlığı patlayıcı miktarı gibi torpidonun mekanik ve kontrol yazılımı tasarımlarını öncelikli olarak etkilerken, patlamaya maruz kalan hedef platformlarında ise kullanılması gereken metal et kalınlıklarının seçimi gibi birincil tasarım kararlarını etkileyebilmektedir.

Su altı patlamalarının modelleme ve simülasyonu aşamasında sonlu eleman analiz (SEA) yöntemleri ve araçları sıklıkla kullanılmaktadır. Silva ve Netto, silindirik boruların hidrostatik ve patlama basıncı altında deformasyonunu deneysel ve sayısal yöntemler ile incelemiştir [1]. Kalavalapally ve diğerleri, iki ayrı çalışma kapsamında, hafif kategorideki torpidoların gövde yapılarının su altı patlamasına karşı dayanımını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiş ve en hafif gövde tasarımı için gerekli tasarım parametrelerini belirlemiştir [2] [3]. Lee ve diğerleri, bir denizaltı mukavim gövdesinin su altı mayın veya torpido patlamalarına karşı dayanımını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştir [4].

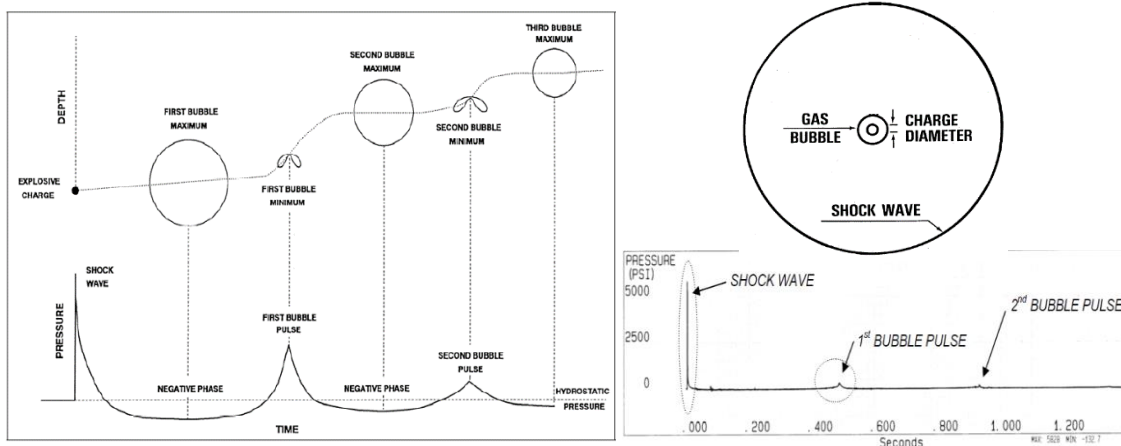
Doğru modellemenin yapılabilmesi için sonlu elemanlar analizinde kullanılan sınır şartlarının gerçeğe en yakın şekilde belirlenmesi ve analiz sonuçlarının ne kadar doğru olduğunun tespiti için de gerçek numuneler üzerinden bir karşılaştırma yapılması gerekmektedir. Su altı patlamalarında ortaya çıkan basınç-zaman davranışı, miktarı ve cinsi bilinen patlayıcılar için deneysel olarak çalışılmış ve birçok patlayıcı özelinde karakterize edilmiştir [5]. Ancak standart olmayan patlayıcılar kullanıldığında veya patlayıcının kapsüllenmesinden kaynaklı olarak basınç-zaman eğrileri değişiklik gösterilebilmekte ve tasarımcılar kendi özel tasarımlarının ölçümlerini almak zorunda kalabilmektedirler.

Bu çalışmada, çoğunlukla yurt dışı kaynaklardan edinilen patlayıcı karakteristiklerinin ülke sınırları içerisinde belirlenmesi için bir ölçüm metodu uygulanmış ve alınan ölçümler teorik beklentiler ile karşılaştırılmıştır. Ağırlığı ve cinsi bilinen patlayıcıların patladıkları zaman etraflarında oluşturacağı basıncın zamana ve mesafeye karşı nasıl değiştiği kontrollü ortamda ölçülmüş, şahit numune borulardaki deformasyon etkileri

gözlenmiştir. Tespit edilen basınç-zaman grafikleri sonlu elemanlar analizlerine girdi olarak kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde su ve şahit numune borular modellenmiş ve patlama basıncının yapı üzerindeki etkileri çözülmüştür. Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme ve simülasyon yapılarak sonuçların güvenilirliği irdelenmiştir.

## 2. SU ALTI PATLAMA FENOMENİ

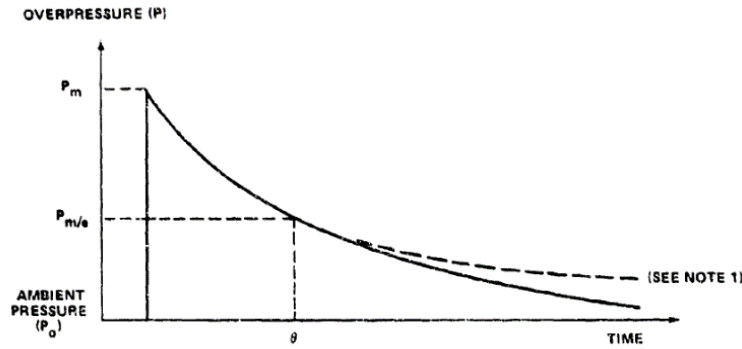
Su altında meydana gelen bir patlamada, patlama bölgesi ve etrafına ilk olarak *şok dalgası* adı verilen basınç dalgası etki eder (Şekil 1.). Bu dalganın sebebi patlama sonrasında açığa çıkan yüksek basınç ve sıcaklıktaki gaz kütesinin sıvı ortam ile arayüzünün ses üstü seviye ile ilerlemesinden kaynaklı olarak sıvı ortamında oluşturduğu sıkışma dalgalarıdır (*ing., compression wave*). Yüksek basınç ve sıcaklıktaki gaz kütesinin içerisinde bulunduğu baloncunun sıvı ile oluşturduğu arayüz, baloncuk içi basınç ile hidrostatik basıncın eşitlenme eğilimi göstermesinden kaynaklı olarak genişlemeye başlar. Arayüz, hidrostatik basınç ile gaz basıncı eşitlendikten sonra bile yüksek momentumlu hareketine devam eder ve baloncuk içerisindeki basınç bu sayede negatif düşer. Arayüzün hareketi durduktan sonra baloncuk, hidrostatik basınç etkisi ile çökmeye başlar ve gaz kütesi tekrar sıkışmaya başlar. Hidrostatik basınç ile denge noktası hızla geçilir, gaz sıkıştırılmayacak noktaya geldiğinde arayüz hareketi durur ve yüksek iç basınca sahip baloncunun gaz-sıvı arayüzü tekrar genişlemeye başlar. Bu noktada Şekil 1’de görülen ilk baloncuk dalgası (*ing., first bubble pulse*) etrafa yayılmaya başlar. Bu süreç, tekrar eden genişleme-daralma hareketi sırasında baloncuk içerisindeki enerjinin etrafındaki sıvının viskozitesi ile tamamen sönmülmesine ya da baloncunun serbest su yüzeyinden açığa çıkmasına kadar devam eder. Tipik bir su altı patlamasında patlama noktası etrafındaki bir noktada ölçülen basınç-zaman değişiminin bir örneği Şekil 1.’de verilmiştir.



Şekil 1. Baloncuk dinamiği ve tipik bir su altı patlama basınç-zaman değişimi [6]

İlk şok dalgası basınç davranışının zamanda genişletilmiş görüntüsü Şekil 2’de verilmiştir. Su altı patlama olayında basıncın en yüksek değerinin ( $P_m$ ) %37’sine düşmesi için geçen süreye zaman sabiti ( $\theta$ ) adı verilir. Basınç dalgasının en yüksek değere kavuştuğu andan  $t=\theta$  anına kadar basınç verisi bir eksponansiyel ile ifade edilir. İlk zaman sabitinden sonra basıncın değişimi eksponansiyel değişimden farklılık göstermektedir.

Referans bir patlayıcı olan TNT’nin küresel patlaması için geliştirilen ampirik basınç-zaman değişimleri Denklem 1,2 ve 3’te verilmiştir [7]. Literatürde verilen TNT-eşdeğerleri kullanılarak farklı cins patlayıcılar için de bu denklemler kullanılabilir.



Şekil 2. Şok basıncının zaman ile değişimi [7]

$$P(t) = P_m e^{(-t/\theta)} \quad (1)$$

$$P_m = 52.4 \times \left[ \frac{W^{1/3}}{R} \right]^{1.13} \quad (2)$$

$$\theta = 0.084 \times \left[ \frac{W^{1/3}}{R} \right]^{-0.23} W^{1/3} \quad (3)$$

- $W$  : Patlayıcı ağırlığı [kg]  
 $R$  : Patlayıcı-ölçüm noktası arası mesafe [m]  
 $P_m$  : En yüksek basınç [MPa]  
 $\theta$  : Zaman sabiti [ms]

Patlamadan sonra oluşan şok basınç dalgası ile ilk baloncuk dalgası arasında geçen süreye ilk baloncuk periyodu ( $T$ ) adı verilir. Bu süre, TNT için aşağıdaki 4 numaralı denklem ile hesaplanmaktadır [8].

$$T = 0.3 \times \frac{W^{1/3}}{(1+0.1H)^{5/6}} \quad (4)$$

- $T$ : İlk baloncuk periyodu [s]  
 $H$ : Patlama derinliği [m]

Yukarıda verilen ampirik ilişkiler, bu çalışmada gerçekleştirilen testlerde ölçülen basınç-zaman davranışlarının literatür ile ne kadar uyumlu olduğunun kıyaslanmasında kullanılacaktır. Basınç-zaman arasındaki ampirik ilişki, ilk zaman sabitine kadar geçerli olduğu için, kıyaslama sadece bu aralıkta yapılacaktır.

### 3. TEST FAALİYETİ

#### 3.1. Kapsam

Testler; 1 ve 3 gramlık RDX içeren tapaların su altında patlamasıyla oluşacak şok dalgalarının basınç büyüklüğünün ve baloncuk etkilerinin ölçülmesini, numune borular üzerindeki deformasyonların gözlenmesini kapsamaktadır. Testlerde kullanılan numune borular Al-6063-T5 malzemesinden üretilmiş olup 1 m uzunluğa, 30 mm dış çapa ve 1 mm et kalınlığına sahiptir.

Patlayıcıların özellikleri Tablo 1’de, test senaryosu ise Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Patlayıcı özellikleri

Patlayıcı Türü: RDX	Patlayıcı Çapı: 12mm (1 gram) ve 18mm (3 gram)
Patlayıcı Ağırlığı: 1 ve 3 gram	Patlayıcı Boyu: 6mm (1 gram) ve 9mm (3 gram)
Patlayıcı Şekli: Silindirik	TNT Eşdeğeri: 1.22
Patlama Derinliği: 0.59 m	Toplam Derinlik: 1.37 m

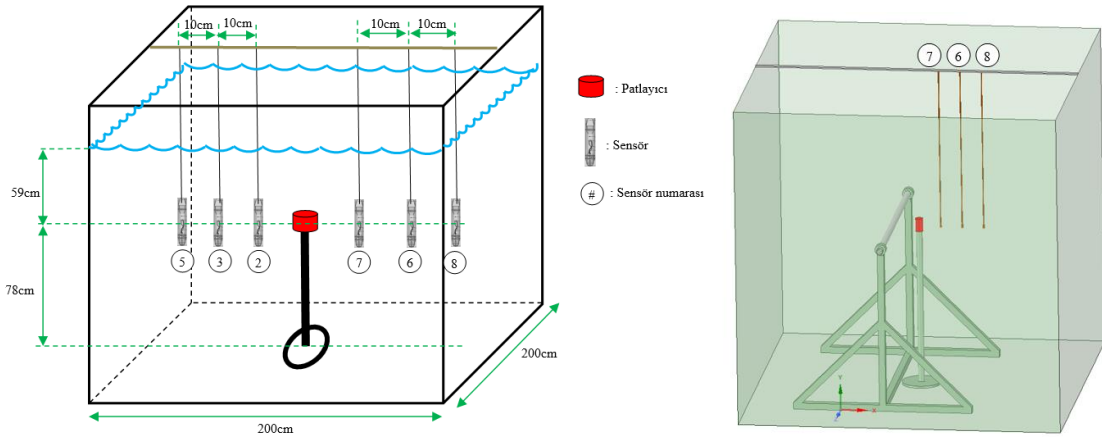
**Tablo 2.** Test senaryosu

Test Numarası	Patlayıcı ağırlığı (TNT eşleniği)	Basınç Ölçüm Mesafeleri [cm]	Hedef Boru Mesafesi [cm]
1	1gr (1.22 gr)	10, 20, 30	Hedef boru yok
2	3gr (3.66 gr)	10, 20, 30	Hedef boru yok
3	3gr (3.66 gr)	10, 20, 30	Hedef boru yok
4	1gr (1.22 gr)	10, 20, 30	Hedef boru yok
5	3gr (3.66 gr)	10, 20, 30	10
6	3gr (3.66 gr)	10, 20, 30	10
7	3gr (3.66 gr)	10, 20, 30	10
8	3gr (3.66 gr)	10, 20, 30	30
9	3gr (3.66 gr)	10, 20, 30	20
10	1gr (1.22 gr)	10, 20, 30	10
11	1gr (1.22 gr)	10, 20, 30	10
12	3gr (3.66 gr)	15, 25, 35	15
13	3gr (3.66 gr)	15, 25, 35	15
14	3gr (3.66 gr)	12.5, 22.5	12.5
15	3gr (3.66 gr)	12.5, 22.5	12.5

#### 3.2. Testin İcrası

Testte oluşturulan düzenek aşağıdaki şematik ile özetlenmektedir (Şekil 3). 1,2,3 ve 4 numaralı testlerde, patlayıcının iki tarafına yerleştirilen iki sensör dizini mevcuttur. Diğer

bir deyişle patlayıcı merkezine 10,20 ve 30 cm uzaklıkta bulunan ikişer sensörden veri toplanmıştır. İlk 4 testten sonraki diğer testlerin hepsinde patlayıcının bir tarafındaki sensör dizini kaldırılmış, kaldırılan tarafa şahit numune borular patlayıcı merkezinden istenilen uzaklıklara konumlandırılmıştır. Borunun patlayıcıya en yakın noktasından patlayıcı merkezine olan mesafe Tablo 2’de verilen değerlere göre ayarlanmıştır.

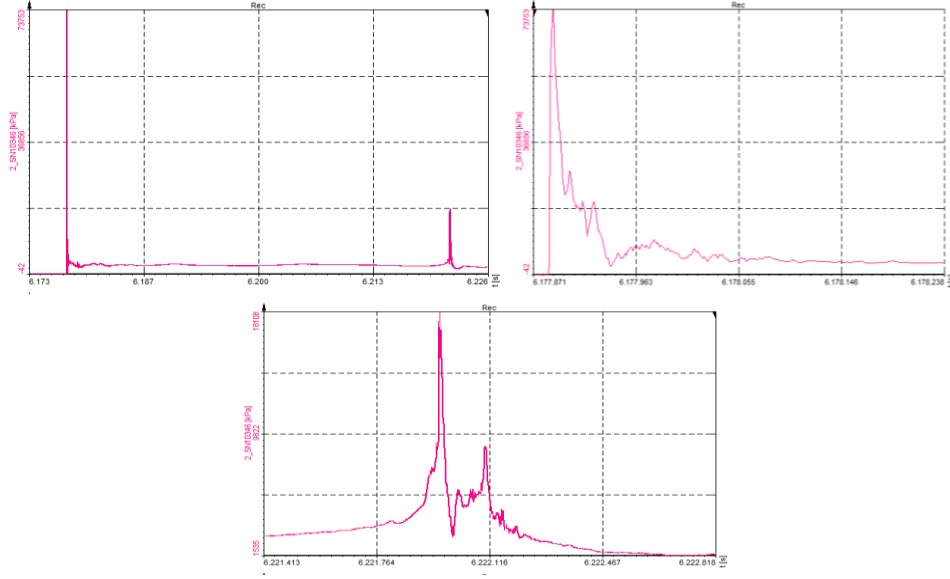


Şekil 3. Test düzenekleri: sol şematik-Test 1..4, sağ şematik-Test 5..15

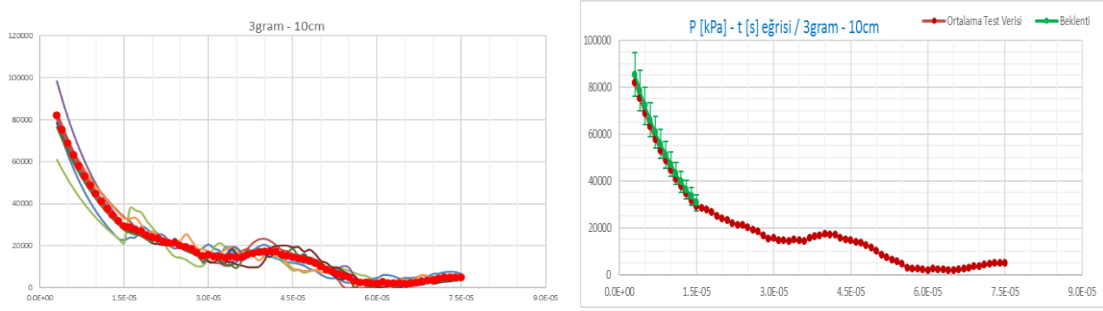
### 3.3. Toplanan Veri

Patlama esnasında bütün sensörlerden basınç-zaman verisi toplanmıştır. Ölçülen basınç-zaman verisi, örnek olması adına Test 2’ye ait Sensör 2 için Şekil 4’te verilmiştir. Bu şekil içerisinde; bütün süreç verisi, ilk şok dalgası verisinin yakınlaştırılmış hali ve ilk baloncuk dalgası verisinin yakınlaştırılmış hali gösterilmektedir. Bütün test senaryosu içerisinde aynı “Patlayıcı ağırlığı ve mesafe ikilisi” için sensör verileri gruplanmış, ortalamaları alınarak o patlayıcı ağırlığına ve mesafeye ait tek bir “basınç-zaman” eğrisi elde edilmiştir (Şekil 5). Basınç-zaman eğrisinin Bölüm 2’de verilen denklemler aracılığı ile hesaplanan beklenti eğrisi ile karşılaştırması yine Şekil 5’te verilmiştir. Şekildeki beklenti eğrisine ait hata payları, numune boruların test havuzunda konumlamasında tecrübe edilen  $\pm 1\text{cm}$ ’lik belirsizlik sebebi ile oluşturulmuştur. Ölçülen veri beklenti ile büyük uyumluluk göstermektedir.

Tablo 3’te 10cm mesafe için iki farklı ağırlıktaki patlayıcılar için ölçülen ve beklenen en yüksek basınç ve ilk baloncuk periyotları özetlenmiştir. Tablodan görüleceği üzere ölçülen ve beklenen değerlerin uyumu çok yüksektir. Testi yapılan diğer patlayıcı ağırlığı ve mesafe ikililerinin sonuçları bu çalışmada sunulmamakla birlikte, benzer uyumluluk diğer bütün ikililer için de gözlenmiştir.



**Şekil 4.** Sensörlerin örnek basınç-zaman verisi (Test 2) Sol üst: bütün süreç, Sağ üst: ilk şok dalgası, Alt: ilk baloncuk dalgası



**Şekil 5.** Ortak bir “patlayıcı ağırlığı-mesafe ikilisi” için verilerin gruplanarak ortalama tek bir basınç-zaman davranışı elde edilmesi ve beklenti ile karşılaştırılması

**Tablo 3.** Beklenen ve ölçülen en yüksek basınç değeri ve ilk baloncuk periyodu

Mesafe [cm]	1 gram patlayıcı			3 gram patlayıcı		
	$P_{max}$ Tahmin [MPa] (±belirsizlik)	$P_{max}$ Ölçülen [MPa]	İlk baloncuk periyodu [ms] Beklenti / Ölçülen	$P_{max}$ Tahmin [MPa] (±belirsizlik)	$P_{max}$ Ölçülen [MPa]	İlk baloncuk periyodu [ms] Beklenti / Ölçülen
10	56.5 (50.7-63.6)	60.7	30.6 / 32	85.4 (76.7-96.2)	81.9	44.1 / 44.4

## 4. SONLU ELEMANLAR ANALİZ VE DOĞRULAMA

### 4.1. Analiz Modeli

#### 4.1.1. Modelleme ve Sınır Koşulları

Analizler ABAQUS v2018 sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [9]. Oluşturulan analiz modeli genel hatları ile Şekil 6’da gösterilmiştir. Model, numune boru

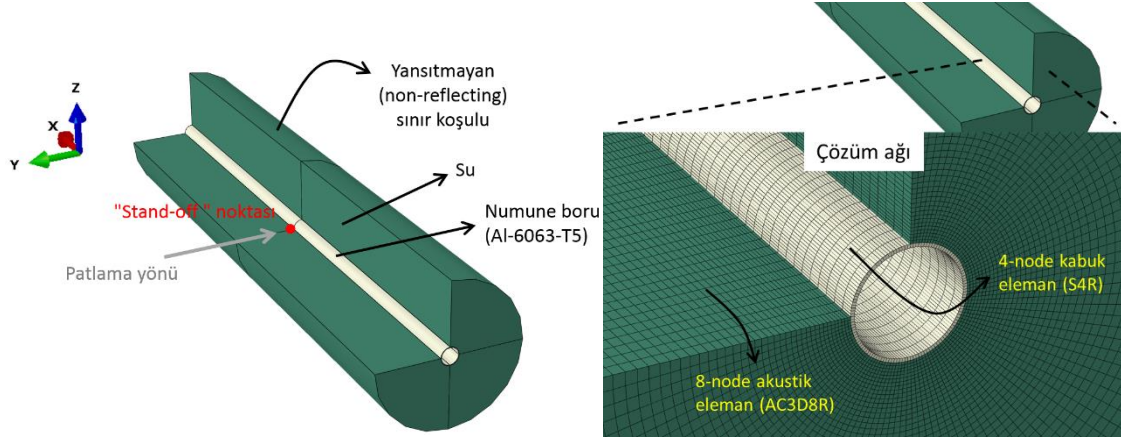
ve etrafındaki su kütlesinden oluşmaktadır. Numune boru, testlere uygun olarak, 1 m uzunlukta, 30 mm dış çapta ve 1 mm et kalınlığında olacak şekilde modellenmiştir. Analizlerde “explicit” yöntem kullanılmıştır.

Numune boru, testlerdeki duruma en yakın sınır koşullarını elde edebilmek adına, iki ucunda tanımlanan referans noktalarından Y ve Z yönlerinde sabitlenmiş; iki ucun X yönü ve dönme yönlerindeki hareketleri ise serbest bırakılmıştır.

Modelde hesaba katılan su kütlesi sınırlı olduğundan dolayı, dış yüzeylerden geri yansıyabilecek yapay basınç dalgalarını önlemek amacı ile su kütlesinin dış yüzeylerine yansıtmayan (“non-reflecting”) sınır koşulu tanımlanmıştır.

Numune boru 4 çözüm noktasına sahip 34048 adet kabuk eleman (SR4), su kütlesi 8 çözüm noktasına sahip 1600256 adet akustik eleman (AC3D8R) ile modellenmiştir. Numune boruda kullanılan kabuk elemanlar yaklaşık 0.75x3.8 mm boyuta sahiptir.

Analizler 10 ve 20 cm mesafede 3 gram patlayıcı ile 10 cm mesafede 1 gram patlayıcı olmak üzere toplamda üç ayrı senaryo için gerçekleştirilmiştir. Analizlerde ilk şok basınç dalgası ile baloncığa ait basınç dalgası hesaba katılmıştır. Analizlerde, testlerde elde edilen basınç-zaman ham verilerinin ortalamaları kullanılmıştır.



**Şekil 6.** Sonlu elemanlar analiz modeli. Su kütlesinin dörtte biri gösterim amacı ile gizlenmiştir. Sol: sınır koşulları. Sağ: çözüm ağı

#### 4.1.2. Malzeme Özellikleri

Numune boruyu çevreleyen su “bulk modulus” ve yoğunluk özellikleri ile tanımlanmıştır. Al-6063-T5 malzemesinden imal edilmiş numune boru elastik ve plastik özellikleri ile modele dahil edilmiştir.

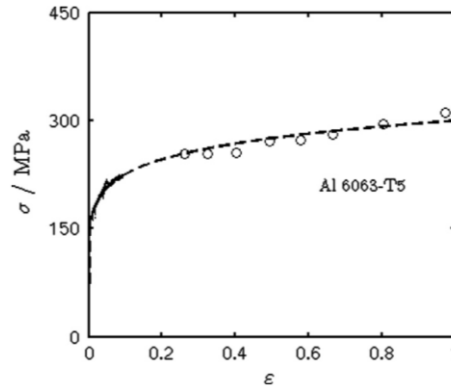
Su ve Al-6063-T5 malzemelerine ait özellikler **Tablo 4** ve **Tablo 5**'te verilmiştir. Al-6063-T5 malzemesinin gerinim-gerilim davranışı Ref. [10]'dan alınmış olup, Şekil 7'de gösterilmiştir.

**Tablo 4.** Malzeme özellikleri: Su

Malzeme	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	“Bulk Modulus” (GPa)
Su	1000	2.1404

**Tablo 5.** Malzeme özellikleri: Al-6063-T5

Malzeme	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Gerinim-gerilim
Al-6063-T5	2700	68.9	0.33	Şekil 7

**Şekil 7.** Al-6063-T5 boru gerçek gerinim-gerilim grafiği [10].

Numune boruyu çevreleyen su akustik elemanlar ile modellendiğinden suyun sürüklenme (“drag”) etkisi hesaba katılamamaktadır. Bu etkiyi simüle edebilmek amacıyla, ABAQUS kullanıcı kılavuzunda önerilen yonteme uygun olarak, alüminyum boru malzemesine alpha sönümlenme (“alpha damping”) tanımı yapılmıştır [9]. Gerçekleştirilen analizlerde, ABAQUS kullanıcı kılavuzunda verilen örnek problem baz alınarak, alpha damping değeri 750 1/s olarak kabul edilmiştir.

#### 4.2. Analiz Sonuçları

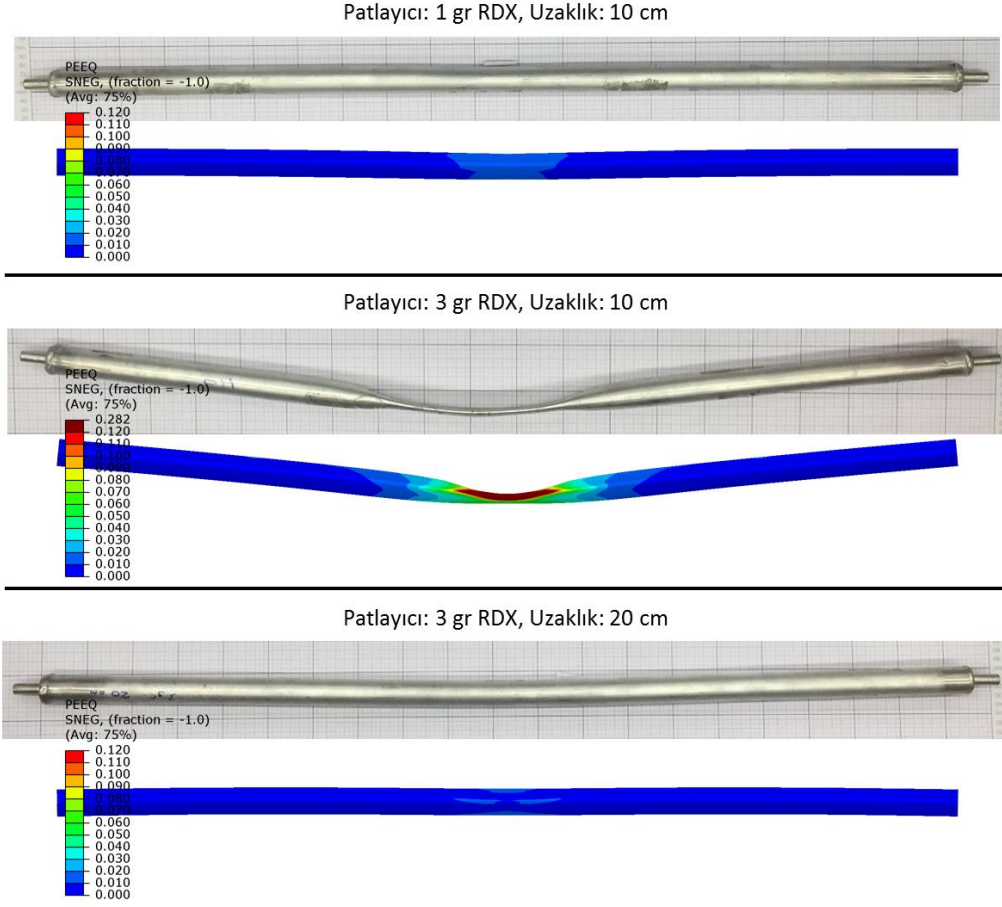
Her bir patlama senaryosunda hesaplanan numune boru deformasyonları testlerde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak Şekil 8’de gösterilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre, testler ile de uyumlu olarak, patlayıcı mesafesi arttıkça ve patlayıcı miktarı azaldıkça numune boruda daha az deformasyon oluşmuştur.

Testlerde 1 gram RDX 10 cm mesafe ve 3 gram RDX 20 cm mesafe durumları için önemli derecede deformasyon görülmemiştir. Bu sonuç ile uyumlu bir şekilde, analizlerde de numune boruda önemli miktarda deformasyon oluşmayacağı hesaplanmıştır.

Testlerde 3 gram RDX patlayıcı 10 cm mesafede patlama durumunda numune boruda önemli derecede çökme meydana gelmiştir. Bu patlama durumunda, analiz ile de numune boruda çökme oluştuğu görülmüştür.





**Şekil 8.** Farklı patlayıcı miktarları ve mesafeleri için analiz ve testlerde numune boruda elde edilen deformasyon ve plastik gerilim dağılımları.

## 5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Su altı patlama fenomenini bilgisayar ortamında simüle edebilmek amacıyla oluşturulan sonlu elemanlar modelleri birçok parametre içeren karmaşık modellerdir. Bu modellerin güvenilirlik seviyelerini arttırmak için model çıktılarının testler ile doğrulanması gerekmektedir. Bu amaçla, özel olarak üretilen bir test havuzunda farklı patlayıcı ağırlıkları için kontrollü patlamalar yapılmıştır. Testlerde farklı mesafelerde basınç-zaman verisi kayıt altına alınmış ve farklı mesafelere konuşlandırılan numune borular üzerindeki etkiler gözlenmiştir. Testlerde elde edilen basınç profilleri kullanılarak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir.

Test verisinin; şok dalgası basıncı, ilk zaman sabitine kadar basınç değişim eğilimi ve ilk baloncuk periyodu parametreleri üzerinden literatür ile uyumlu olması sayesinde ölçülen verinin güvenilirliği doğrulanmıştır. Literatürde bulunmayan ama yapısal etkileri çok önemli olan ilk zaman sabiti-ilk baloncuk periyodu içerisindeki basınç değişimleri elde edilmiştir.

Analizler sonucunda numune borularda oluşan deformasyonlar test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Testlerde patlayıcı miktarı azaldıkça ve patlama mesafesi arttıkça numune boruda oluşan deformasyonun azaldığı görülmüştür. Analizlerde de benzer bir eğilim elde edilmiştir. 3 gram RDX patlayıcı 10 cm mesafedeki patlama durumunda numune boruda meydana gelen çökme, benzer şekilde analizlerde de görülmüştür.

Bu çalışmada izlenen yöntem ile gerçek yapıların su altı patlamasına karşı dayanımının tahmini bilgisayar ortamında simüle edilebilecektir. Simülasyonlar, hem tasarım sürecinde farklı seçeneklerin hızlı şekilde değerlendirilebilmesi, hem de son ürüne etkin olabilecek patlama koşullarının hesaplanabilmesine imkan sağlamaktadır.

## 6. TEŞEKKÜR

Testin icrasında verdikleri destekten dolayı ASELSAN SST Malzeme Müh. Ekibi lideri Sayın Cemil Yılmaz'a ve Makina ve Kimya Endüstrisi Kurumu Kapsül Fabrikası Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

## 7. KAYNAKÇA

- [1] L. L. Silva, T. A. Netto (2010), On the Dynamic Collapse of Cylindrical Shells Under Hydrostatic and Impulsive Pressure Loadings, *Mecanica Computacional*, Vol XXIX, page 7787-7797
- [2] R. Kalavalapally, R. Penmetsa, R. Grandhi (2006), Multidisciplinary optimization of a lightweight torpedo structure subjected to an underwater explosion, *Finite Element in Analysis and Design*, vol. 43, page 103-111.
- [3] R. Kalavalapally, R. Penmetsa, R. Grandhi (2009), Configuration design of a lightweight torpedo subjected to an underwater explosion, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 36, page 343-351.
- [4] Ya-Jung Lee, Chia-Hao Hsu, Chien-Hua Huang (2006), Pressure hull analysis under shock loading, *Shock and Vibration*, vol 15, page 19-32.
- [5] Cole, R.H. (1948), *Underwater Explosions*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, ABD.
- [6] Press.Costanzo F.A. (2010), *Underwater Explosion Phenomena and Shock Physics*. Proceedings of the IMAC-XXVIII.
- [7] Swisdak, (1978), M.M., *Explosion Effects and Properties, Part II, Explosion Effects in Water*, Naval Surface Weapons Center, Report number NSWC/WOL/TR 76-116.
- [8] Costanzo, F.A., Gordon, J.D. (1980), *An Analysis of Bulk Cavitation in Deep Water*
- [9] ABAQUS, 2018, *ABAQUSTM 2018 User Manual*, Dassault Systemes, Providence, RI, USA.
- [10] I. Barsoum, F. Khan, A. Molki, A. Seibi (2014), Modeling of ductile crack propagation in expanded thin-walled 6063-T5 aluminum tubes, *International Journal of Mechanical Sciences*, volume 80, page 160-168.

## SU ALTINDAN HAVAYA ATILAN BİR FÜZENİN SU ALTI HAREKETİ BOYUNCA ENERJİ-OPTİMAL KONTROLÜ

Semih Köklücan <sup>(a)</sup>, M. Kemal Leblebicioğlu <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü,  
{semih.koklucan, kleb}@metu.edu.tr

### ÖZ

Su altından havaya atılan seyir füzelerinde, seyir fazı başlangıcına kadar olan harekette kullanılması hedeflenen menzil değerine ulaşmak veya bu menzil değerini artırmak için, füzeyi seyir başlangıç koşullarına taşıyacak mevcut enerjinin efektif bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Bu amaçla, bu çalışmada su altından havaya atılan bir seyir füzesinin su altındaki hareketi boyunca enerji-optimal kontrolü üzerine yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Bu yaklaşımda su altından belirli bir derinlikten yatay olarak fırlatılan bir füzenin, optimal enerji kullanılarak istenen hız ve yunuslama açısı ile sudan havaya çıkışı amaçlanmıştır. İfade edilen kontrol problemi ilk olarak bir minimum-efor optimal kontrol problemi olarak formüle edilmiştir. Formüle edilen sonsuz boyutlu optimal kontrol problemi, ayrıklaştırılarak sonlu boyutlu bir optimizasyon problemine dönüştürülmüş ve elde edilen optimizasyon problemine çözümler sağlanmıştır. Optimize edilen enerji, füzenin itki motoru tarafından üretilen itici kuvvetin bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Çalışmada ilk olarak, ele alınan füzenin 6 serbestlik dereceli (6-DOF) hareket denklemleri ve hidrodinamik modeli türetilmiştir. Ardından, tanımlanan kontrol problemi için elde edilen kontrol çözümleri, füze için 6 serbestlik dereceli, doğrusal olmayan bir simülasyon ortamında uygulanarak ortaya çıkan sonuçlar incelenmiştir. Çalışmada ayrıca sudan farklı yunuslama açıları ile çıkılan durumlar için kontrol gerçekleştirilmiş, bu senaryolarda ihtiyaç duyulan enerjiler karşılaştırılarak minimum enerji kullanımını sağlayan sudan çıkış açısı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Doğrusal olmayan 6-DOF simülasyon, Enerji-optimal kontrol, Füze hidrodinamik modeli, Su altından havaya füzeler, Yönelim açısı kontrolü

# ENERGY-OPTIMAL CONTROL OF AN UNDERWATER-TO-AIR MISSILE'S UNDERWATER MOTION

## ABSTRACT

For underwater-to-air cruise missiles, in order to achieve the desired range or increase the range of the phases before cruise phase, efficient usage of available energy, which carries the missile to the beginning of cruise phase, is necessary. For this aim, this study presents a new approach for energy-optimal control of an underwater-to-air missile's underwater motion. In this approach, for a missile which is horizontally launched at a depth in underwater, it is aimed that accomplishing water-to-air exit with a desired velocity and attitude, by using optimal energy. The explained control problem is modeled as a minimum-effort optimal control problem. The formulated infinite dimensional optimal control problem is transformed into a finite dimensional optimization problem by discretizing it, then the solutions are found for the obtained optimization problem. The optimized energy is defined as a function of the propulsive force generated by the booster motor. In this work, firstly six-degrees-of-freedom (6-DOF) motion equations and the hydrodynamic model of the missile are obtained. Then, the obtained control solutions for the defined control problem are applied in the nonlinear 6-DOF simulation environment of the missile, and the simulation results are analyzed. Moreover, control solutions are found for different scenarios in which the missile exits the water with different pitch angles. Then, by comparing the energy need of each case, the water-exit angle, which results with the minimum energy need, is determined.

**Keywords:** Attitude control, Energy-optimal control, Missile hydrodynamic model, Nonlinear 6-DOF simulation, Underwater-to-air missiles

## 1. GİRİŞ

Günümüz seyir füzeleri sahip oldukları teknolojiler ile ülkelerin savunma organizasyonlarının önemli bir parçası haline gelmiştir. Seyir füzelerinin su altından fırlatılması, kara, hava ve suüstü platformlardan fırlatılmasına göre bazı önemli avantajlar sağlamaktadır. Öncelikle, elektromanyetik dalga yayılımı deniz suyu içinde büyük ölçüde zayıfladığı için denizaltılar radar sistemleri tarafından etkin bir şekilde tespit edilememektedir. Ayrıca denizaltılar su altı görevleri sırasında görüntüleme uyduları veya hava araçları tarafından yürütülen askeri amaçlı gözlemlerden gizlenebilmektedir. Bu gibi sebeplerin getirdiği yüksek gizlenme kabiliyeti ve ani atak olanağı denizaltıdan fırlatılan füzelerin önemli özellikleridir [1]. Denizaltıdan fırlatılan bir seyir füzesinin, seyir fazından önce tipik olarak görülen fazları; sudaki hareketi kapsayan fırlatma fazı ve sudan çıktıktan sonra seyir fazına kadar olan hareketi kapsayan yükselme fazıdır. Fırlatma ve yükselme fazı sırasında hareket için gerekli itki kuvveti genellikle füzenin arkasında bulunan bir itki motoru vasıtasıyla sağlanmaktadır. Fırlatma ve yükselme fazları için arzu edilen menzil değerine ulaşmak veya bu menzil

değerini artırmak için, itki üretimi için depolanmış enerjinin verimli bir şekilde kullanılması önem arz etmektedir. Bu iki hareket fazının toplam enerji ihtiyacı, bu fazların başında ve sonundaki uçuş koşullarına göre ve fazların planlanan tamamlanma sürelerine göre değişebilmektedir. Dolayısıyla, hedeflenen menzile ulaşmak veya bu menzil değerini artırmak için bu fazlarda uygulanacak kontrol ve güdüm tasarımının bahsedilen faktörleri dikkate alması gerekmektedir.

Literatürde su altından havaya bir füzenin veya aracın hareketinin modellenmesi ve kontrolü üzerine bazı önemli çalışmalar bulunmaktadır [2-10]. Bu çalışmalarda uygulanan kontrol stratejilerinde, su altından havaya çıkan aracın enerji ihtiyacını dikkate alan bir tasarım unsuru bulunmamaktadır. Böyle bir kontrol stratejisinin uygulanması, daha önce belirtildiği gibi fırlatma ve yükselme fazları için istenen menzil değerini elde etmek veya mevcut menzil değerini artırabilmek açısından önemlidir. İstenen menzil değerine ulaşabilmenin önemi ise, örnek olarak sistem gereksinimlerinden dolayı yükselme fazı sonunda bazı uçuş değerlerine ulaşma ihtiyacı ve bu ihtiyacın en az belli bir menzilde hareket ile karşılanabilecek olmasıyla açıklanabilir.

Bahsedilen problemin çözümü için bu çalışmada önerilen yöntem, fırlatma fazı ve yükselme fazı kontrolü problemini, bir minimum-efor optimal kontrol problemi olarak modelleyip çözmektir. Bu çalışma kapsamında yalnızca fırlatma fazı için problem formülasyonları ve sudan farklı çıkış açıları için çözümler sağlanmıştır. Formüle edilen sonsuz boyutlu optimal kontrol problemi, ayrıklaştırılarak sonlu boyutlu bir optimizasyon problemine dönüştürülmüş ve bir optimizasyon problemi olarak çözülmüştür. Optimize edilen enerji, belli bir zaman boyunca füzenin itki motoru tarafından üretilen itici kuvvetin karesinin integrali olarak tanımlanmıştır.

Çalışmanın geri kalanında ilk olarak, ele alınan füze modeli tanımlanmış ve füzeye ait 6 serbestlik dereceli (6-DOF) hareket denklemleri ve hidrodinamik model sunulmuştur. Ardından, fırlatma fazı kontrolü problemini, bir minimum-efor optimal kontrol problem olarak formülize edilmiştir. Fırlatma fazı başlangıç koşulları ve sudan çıkış açısı dışındaki son koşullar sabit tutularak, sudan farklı çıkış açıları için kontrol çözümleri bulunmuştur. Elde edilen kontrol çözümleri, doğrusal olmayan 6-DOF simülasyon ortamında uygulanarak elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Sudan farklı çıkış açısı senaryoları için ihtiyaç duyulan enerji miktarları karşılaştırılarak fırlatma fazı boyunca minimum enerji kullanımına ihtiyaç duyacak sudan çıkış açısı tespit edilmiştir.

## 2. FÜZE MODELİ

Çalışmada kullanılmak üzere kavramsal olarak tasarlanan füzenin 2 boyutlu görünümü ile birlikte kaldırma kuvveti merkezi ve ağırlık merkezi Şekil 1’de gösterilmiştir.



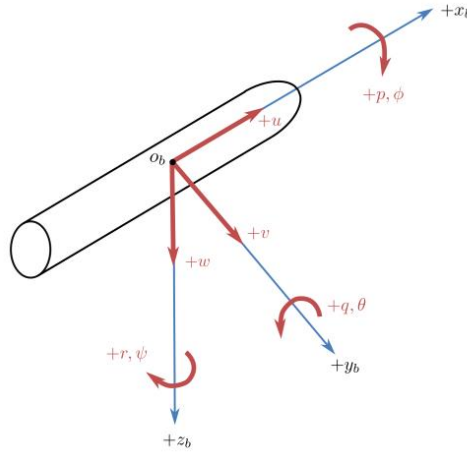
**Şekil 1.** Füze modeli 2-boyutlu görünümü

Füze ana gövdesi ve itki motoru silindirik, füze burnu elipsoid bir formdadır. Füze fiziksel modeline ait önemli bir özellik kaldırma kuvveti merkezinin füze burnuna ağırlık merkezinden daha yakın olmasıdır. Bu durum sonucu füze su altında yatay konumda serbest bırakıldığında oluşacak pozitif yunuslama momenti ile burnunu yukarı doğru kaldıracaktır. Bu sayede optimal-kontrol çözümleri sonucu bulunacak ve itki motoru tarafından füzeye uygulanacak itki profilleri ile füzenin sudan çıkış açısı kontrol edilebilecektir.

### 3. HAREKET MODELİ VE FÜZEYE ETKİYEN KUVVET VE MOMENTLER

#### 3.1. 6-DOF hareket denklemleri

Şekil 2’de füzenin gövde koordinat sistemi ve 6-DOF hareket modeline ait bazı değişkenler gösterilmiştir.



**Şekil 2.** Füze gövde koordinat sistemi ve 6-DOF hareket modeli değişkenleri

Burada  $(u, v, w)$  gövde koordinat sistemindeki ileri, sağa ve aşağı hızları,  $(\phi, \theta, \psi)$  referans bir eylemsizlik koordinat sistemine göre yönelim açıları olan yuvarlanma, yunuslama ve yana dönme açılarını,  $(p, q, r)$  gövde koordinat sistemi eksenleri etrafındaki yuvarlanma, yunuslama ve yana dönme açısal hızlarını göstermektedir.

Hareket modelini türetmek için bu çalışmada kullanılan eylemsizlik referans koordinat sistemi, merkezi Dünya üzerinde bir noktada sabit olan, x-ekseni kuzeyi, y-ekseni doğuyu, z-ekseni ise yeri gösteren Dünya'ya sabit bir koordinat sistemidir. Gövde koordinat sistemi merkezi olarak füze ağırlık merkezi kullanılmıştır.

Füzeye ait kinematik ve dinamik hareket denklemleri aşağıda verilmiş olup, denklemlerin türetilmesiyle ilgili detaylara [11]'den ulaşılabilir.

Gövde koordinat sistemindeki hız bileşenleri, Dünya'ya sabit koordinat sistemindeki hız bileşenlerine, yönelim açıları kullanılarak oluşturulan dönüşüm matrisiyle,  $s \cdot = \sin(\cdot), c \cdot = \cos(\cdot)$  olmak üzere, aşağıda belirtildiği gibi dönüştürülür:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi & c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi \\ c\theta s\psi & s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (1)$$

Burada geçen  $(x, y, z)$  füzenin Dünya'ya sabit koordinat sistemindeki pozisyon bileşenleridir. Dünya'ya sabit koordinat sisteminde ifade edilen füzenin yönelim açısı değişim hızları ile gövde koordinat sisteminde ifade edilen açısal hızları arasındaki ilişki,  $t \cdot = \tan(\cdot)$  olmak üzere, ise aşağıdaki gibidir:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi / c\theta & c\phi / c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2)$$

Newton'un ikinci hareket yasasını temel alan Newton-Euler formülasyonları kullanılarak kuvvet ve momentler ile ilişkili dinamik hareket denklemleri elde edilebilir. Çalışma kapsamındaki kavramsal füze tasarımının gövde xz-düzlemi ve xy-düzleminde sahip olduğu simetriden dolayı ve gövde koordinat sistemi merkezinin füzenin ağırlık merkezi olarak seçilmesiyle aşağıdaki dinamik hareket denklemlerine ulaşılır:

$$\begin{aligned} m(\dot{u} - vr + wq) &= X & m(\dot{v} - wp + ur) &= Y & m(\dot{w} - uq + vp) &= Z \\ I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr &= L & I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp &= M & I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq &= N \end{aligned} \quad (3)$$

Burada  $(X, Y, Z)$  ve  $(L, M, N)$  füzeye etkiyen ve gövde koordinat sisteminde ifade edilmiş toplam kuvvet ve momentler,  $m$  kütle,  $(I_x, I_y, I_z)$  ise eylemsizlik momentleridir. Füzeye etkiyen toplam kuvvet ve momentler  $\tau$  vektörü, hareket modeline ait aksenal ve açısal hızlar  $\mathbf{v}$  vektörü ile aşağıdaki gibi ifade edilirse,

$$\boldsymbol{\tau} = [X, Y, Z, L, M, N]^T \quad \mathbf{v} = [u, v, w, p, q, r]^T \quad (4)$$

Denklem (3)'te verilen hareket denklemleri vektörel formda aşağıdaki gibi yazılabilir [11]:

$$\mathbf{M}_{\text{RB}} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{\text{RB}}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} \quad (5)$$

Burada  $\mathbf{M}_{\text{RB}} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ , diyagonal katı gövde kütle matrisi,  $\mathbf{C}_{\text{RB}}(\mathbf{v}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  ise katı gövde Coriolis ve merkezci matrisi olup, kullanılan "RB" indisi katı gövde (*ing. rigid body*) kısaltmasını temsil etmektedir.

### 3.2. Kuvvet ve momentler

Füzeye etkiyen kuvvet ve moment kaynakları sudaki harekette oluşan ek kütle etkisi, hidrodinamik sönümlenme, yer çekimi ve kaldırma kuvveti ile itki motoru kaynaklı itki kuvveti olup [11], aşağıdaki alt başlıklarda açıklanmıştır.

#### 3.2.1. Ek kütle etkisi

Katı bir cismin akışkan bir ortam içindeki hareketi, cisimle birlikte cismin etrafını saran akışkanın da ivmelenmesine sebep olmaktadır. Bu durumun sonucu olarak akışkanın oluşturduğu karşı kuvvetler ek kütle katkısı olarak adlandırılmaktadır [12]. Ek kütle katkısına ait kütle matrisi  $\mathbf{M}_A$  ile Coriolis ve merkezci matris  $\mathbf{C}_A(\mathbf{v})$ , füzenin xz-düzlemi ve xy-düzlemindeki simetrisi ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir [13]:

$$\mathbf{M}_A = - \begin{bmatrix} X_{\ddot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\ddot{v}} & 0 & 0 & 0 & Y_{\ddot{r}} \\ 0 & 0 & Z_{\ddot{w}} & 0 & Z_{\ddot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\ddot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{\ddot{w}} & 0 & M_{\ddot{q}} & 0 \\ 0 & N_{\ddot{v}} & 0 & 0 & 0 & N_{\ddot{r}} \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}_A(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Coriolis ve merkezci matris elemanları ise şöyledir:

$$\begin{aligned} a_1 &= X_{\ddot{u}}u & a_2 &= Y_{\ddot{v}}v + Y_{\ddot{r}}r & a_3 &= Z_{\ddot{w}}w + Z_{\ddot{q}}q \\ b_1 &= K_{\ddot{p}}p & b_2 &= M_{\ddot{w}}w + M_{\ddot{q}}q & b_3 &= N_{\ddot{v}}v + N_{\ddot{r}}r \end{aligned} \quad (7)$$

#### 3.2.2. Hidrodinamik sönümlenme

Hidrodinamik sönümlenme kaynaklı kuvvet ve momentler vektörel formda şu şekilde ifade edilebilir:

$$\boldsymbol{\tau}_H = [QAC_x \quad QAC_y \quad QAC_z \quad QAdC_l \quad QAdC_m \quad QAdC_n]^T \quad (8)$$



Burada  $C_x, C_y, C_z$  kuvvet katsayıları,  $C_l, C_m, C_n$  moment katsayıları,  $Q$  dinamik basınç,  $A$  referans alan,  $d$  referans uzunluktur. Dinamik basınç,

$$Q = 0.5 \rho V^2 \quad (9)$$

olarak tanımlanır. Burada  $\rho$  deniz suyu yoğunluğu,  $V$  ise toplam hızdır ve

$$V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (10)$$

olarak ifade edilir. Kuvvet ve moment katsayıları bu çalışma kapsamında doğrusal formda aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$C_i = C_{i0} + C_{ip}p(d/2V) + C_{iq}q(d/2V) + C_{ir}r(d/2V) \quad | i = x, y, z, l, m, n \quad (11)$$

### 3.2.3. Yer çekimi ve kaldırma kuvveti

Füze gövdesine etkiyen yer çekimi ve kaldırma kuvveti kaynaklı kuvvet ve momentler, ağırlık ve kaldırma kuvveti merkezi, gövde eksen takımı x-ekseni üzerinde olduğu durumda, vektörel olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} \tau_R = & [(B - W) \sin \theta \quad (W - B) \cos \theta \sin \phi \quad (W - B) \cos \theta \cos \phi \\ & 0 \quad x_b B \cos \theta \cos \phi \quad -x_b B \cos \theta \sin \phi]^T \end{aligned} \quad (12)$$

Burada  $x_b$  kaldırma kuvveti merkezi ile ağırlık merkezi arasındaki uzaklık,  $W$  füzenin ağırlığı,  $B$  ise füzeye su tarafından uygulanan kaldırma kuvvetidir.

### 3.2.4. İtki kuvveti

İtki motoru tarafından sağlanan itki kuvveti, yalnızca gövde koordinat sistemi x-ekseni boyunca doğrusal olarak tanımlanmıştır. Bunun sonucu, itki kaynaklı olarak, gövde y ve z eksenlerinde herhangi bir kuvvet veya x, y, z dönme eksenlerinde herhangi bir moment katkısı oluşmamaktadır. İtki kuvvet ve momentleri vektörel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\tau_T = [T \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (13)$$

### 3.3. Sonuç

Önceki bölümlerde tanımlanan hidrodinamik sönümlenme kaynaklı, yer çekimi ve kaldırma kuvveti kaynaklı ve itki kaynaklı kuvvet ve momentler, Denklem (5)'teki eşitliğin sağ tarafında bulunan, füzeye etkiyen toplam kuvvet ve momentleri oluşturmaktadır. Ek kütle katkısına ait matrislerin de denklemin sol tarafına eklenmesi ile, füzeye ait hareket denklemlerinin nihai hali aşağıdaki gibi ortaya çıkmaktadır:

$$(\mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A)\dot{\mathbf{v}} + (\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) + \mathbf{C}_A(\mathbf{v}))\mathbf{v} = \tau_H + \tau_R + \tau_T \quad (14)$$

6-DOF hareketin bilgisayar ortamında simüle edilebilmesi için Denklem (14)'te verilen ifade kullanılacaktır.

## 4. HİDRODİNAMİK MODEL PARAMETRELERİ

### 4.1.1. Ek kütle parametreleri

Ek kütle parametrelerinin ( $X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}, Z_{\dot{w}}, Z_{\dot{q}}, K_{\dot{p}}, M_{\dot{w}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{v}}, N_{\dot{r}}$ ) bulunmasında [13]'te izlenen yöntemler kullanılmıştır. Eksenel ek kütle parametresi,  $X_{\dot{u}}$ , füze geometrisinin bir elipsoid olarak düşünüldüğü yaklaşımla bulunmuştur. Yuvarlanma ek kütle parametresi,  $X_{\dot{p}}$ , su altı konfigürasyonu üzerinde herhangi bir kontrol yüzeyi bulunmadığı için sıfır olarak alınmıştır. Geri kalan ek kütle parametrelerinin bulunmasında ise şerit teorisinden faydalanılmıştır [11].

### 4.1.2. Hidrodinamik kuvvet ve moment parametreleri

Hidrodinamik kuvvet ve moment parametreleri ( $C_{i0}, C_{ip}, C_{iq}, C_{ir} \mid i = x, y, z, l, m, n$ ) için sayısal değerler Missile DATCOM programı kullanılarak hücum açısı, yana kayma açısı ve hıza göre değişecek şekilde tablolar halinde elde edilmiştir. Simülasyonlar sırasında tablolanmış değerlerden uygun değerlerin seçilmesinde doğrusal interpolasyon yöntemi kullanılmıştır.

## 5. MİNİMUM-EFOR OPTİMAL KONTROL TASARIMI

### 5.1. Sadeleştirilmiş hareket denklemleri

Tanımlanacak sonsuz boyutlu minimum-efor optimal kontrol problemi, ayrıklaştırma işlemiyle sonlu boyutlu bir optimizasyon problemine dönüştürülüp çözüleceği için, hareket modelinin mümkün olduğunca sadeleştirilmesi, kullanılacak optimizasyon algoritmasının performansını artırmak adına önemlidir. Aşağıda sıralanmış varsayımlar kullanılarak su altındaki harekete ait boylamsal kanal hareket denklemleri, Denklem (15)'teki gibi yazılabilir:

- Boylamsal kanal dinamikleri, yanal kanal dinamiklerinden ayrılmıştır ve yanal kanala ait bir hareket oluşmamaktadır,
- Yuvarlanma açısal hızı, yana dönme açısal hızı ve yanal hız sıfırdır ( $p = r = v = 0$ ),
- Gövde eksen takımı hızları arasında, ileri hız bileşeni, dominant bileşendir ( $u \gg v, u \gg w$ )

$$\begin{aligned} \dot{u} &= (QAC_{x0} + QAC_{xq}(d/2u) + T - (W - B)\sin\theta - mwq + Z_{\dot{w}}wq + Z_{\dot{q}}q^2) / (m - X_{\dot{u}}) \\ \dot{w} &= (QAC_{z0} + QAC_{zq}(d/2u)q + (W - B)\cos\theta + mqu + Z_{\dot{q}}\dot{q} - X_{\dot{u}}qu) / (m - Z_{\dot{w}}) \\ \dot{q} &= (QAdC_{m0} + QAC_{mq}(d^2/2u)q + x_b B \cos\theta + M_{\dot{w}}\dot{w} - Z_{\dot{w}}wu - Z_{\dot{q}}qu + X_{\dot{u}}uw) / (I_y - M_{\dot{q}}) \\ \dot{\theta} &= q \\ \dot{z} &= -\sin(\theta)u + \cos(\theta)w \end{aligned} \quad (15)$$

Sonuç olarak, su altındaki harekete ait doğrusal olmayan model aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\dot{\mathbf{x}} = h(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (16)$$

Burada, durum vektörü  $\mathbf{x}$  ve kontrol vektörü  $\mathbf{u}$  ise,

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [u(t), w(t), q(t), \theta(t), z(t)]^T \\ \mathbf{u} &= [T(t)] \end{aligned} \quad (17)$$

olarak ifade edilir.

## 5.2. Minimum-efor optimal kontrol problemi formülasyonu

Fırlatma fazının kontrolü problemi aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{u}(t)} \quad & J(\mathbf{u}(t)) \\ \text{s.t} \quad & \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \mathbf{x}(t_f) = \mathbf{x}_f \\ & \mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}_{\max} \end{aligned} \quad (18)$$

Burada  $\mathbf{x}_0$  başlangıç anındaki ve  $\mathbf{x}_f$  son andaki durum vektörleri olup, “s.t.” (*ing. subject to*) kısıltması optimizasyonun tabi olduğu kısıtları göstermek için kullanılmıştır. Minimize edilecek maliyet fonksiyonu, hareket boyunca gerekli enerji ihtiyacını temsil edecek anlamda, uygulanan itki  $T(t)$ 'nin bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$J(\mathbf{u}) = \int_{t_0}^{t_f} T^2(t) dt \quad (19)$$

Uygulanabilecek itkinin minimum ve maksimum değerleri olan  $\mathbf{u}_{\min}$  ve  $\mathbf{u}_{\max}$  değerleri ise, 0 ve 30 kN olarak seçilmiştir. Matematiksel olarak ifade edilen problemin ayrıklaştırılarak sonlu boyutlu bir kısıtlı optimizasyon problemine dönüştürülmesiyle aşağıdaki problem tanımı elde edilmiştir:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{u}=[u_0 u_1 \dots u_{N-1} u_N]} \quad & J(\mathbf{u}) = \frac{\Delta t}{2} (T_0^2 + 2(T_1^2 + \dots + T_{N-1}^2) + T_N^2) \\ \text{s.t} \quad & \mathbf{x}(t=0) = \mathbf{x}_0, \mathbf{x}(t=N\Delta t) = \mathbf{x}_f \\ & \mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u}_i \leq \mathbf{u}_{\max} \quad | \mathbf{i} = 0, 1, \dots, N \end{aligned} \quad (20)$$

Burada  $\Delta t$  ayrıklaştırmada kullanılan örnekleme periyodu, N+1 ise toplam örnekleme sayısıdır. Formüle edilen kısıtlı optimizasyon probleminin çözümünde “MATLAB Optimization Toolbox” kullanılmıştır.

## 5.3. Fırlatma fazı minimum-efor optimal kontrol çözümleri ve sonuçları

Denizaltından ayrılma sonrası ortaya çıkan fırlatma fazı başlangıç koşulları, 10 m/s ileri hız, 0 derece yunuslama açısı, 0 derece/s yunuslama açısal hızı, 0 m/s aşağı hız ve 100 m derinlik olarak seçilmiştir. Sudan ayrılma esnasında hedeflenen fırlatma fazı son koşulları ise, 35 m/s ileri hız, 0 m derinlik ve {20, 35, 45, 55, 65, 75, 90} derece kümesinden bir yunuslama açısı olarak seçilmiş, yunuslama açısal hızı ve aşağı hız değerleri serbest bırakılmıştır. Hareket süresi 15 saniye olarak belirlenmiştir. Buna göre ortaya çıkan, kontrol edilecek sürece ait başlangıç ve son koşullar aşağıdaki gibi oluşur:

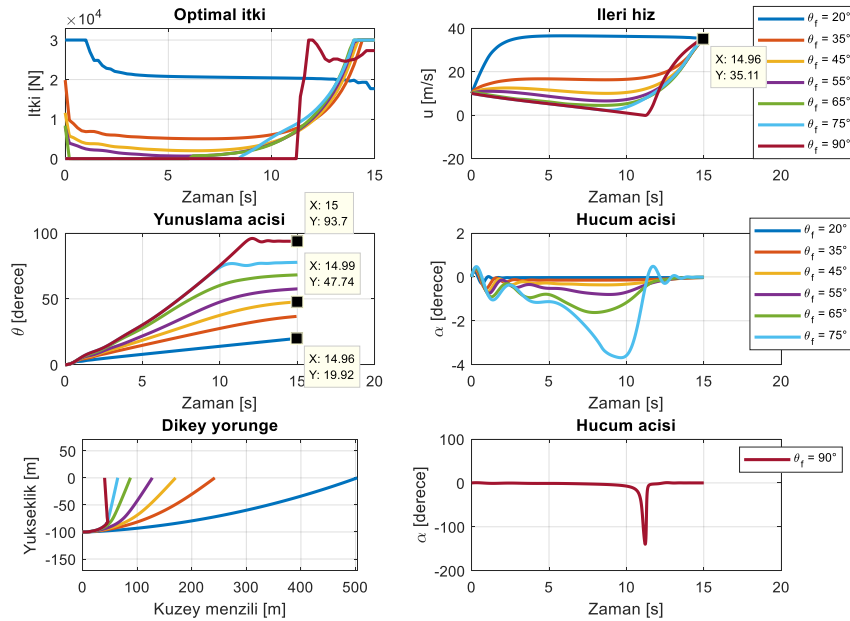
$$\mathbf{x}_0 = [10, 0, 0, 0, 100]^T$$

$$\mathbf{x}_f = [35, \text{serbest}, \text{serbest}, \theta_f, 0]^T \quad (21)$$

$\theta_f$  değeri, n'inci senaryo için, {20, 35, 45, 55, 65, 75, 90} kümesinin n'inci elemanı olarak seçilmiştir. Her senaryo için bulunan itki profilleri ve bulunan itki profillerinin, doğrusal olmayan 6-DOF hareket denklemleriyle oluşturulan ve sudan çıkış gerçekleşene kadar yürütülen simülasyonlarda ortaya çıkardığı sonuçlar Şekil 3'te gösterilmiştir. Sudan çıkış açısına göre oluşturulan 7 farklı senaryoda ortaya çıkan enerji ihtiyacını gösteren maliyet değerleri ise Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Sudan çıkış açısına göre farklı senaryolarda görülen maliyetler

Sudan çıkış açısı [der]	20	35	45	55	65	75	90
Maliyet [ $10^9 \times N^2 \cdot s$ ]	7.03	1.80	1.67	1.72	1.78	1.72	2.45



**Şekil 3.** Sudan farklı çıkış açısı senaryoları için bulunan optimal itki profilleri ve bu itkilerin uygulanmasıyla elde edilen simülasyon sonuçları

Sonuçlar incelendiğinde hedeflenen sudan çıkış koşullarını sağlayacak şekilde kontrol çözümlerinin bulunduğu görülmüştür. Hedeflenen hareket süresi, sudan çıkıştaki ileri hız ve sudan çıkış açıları tüm senaryolarda yaklaşık olarak elde edilmiştir. Hedeflenen ile gerçekleşen çıkış açısı arasındaki yüzdesel farkın en büyük olduğu senaryoda,  $45^\circ$  hedefi için %6.1'lik yüzdesel farka tekabül eden  $47.74^\circ$  sonucu elde edilmiştir. Bu durum, optimal kontrol tasarımı sırasında kullanılan sadeleştirilmiş model ile doğrusal olmayan referans model arasındaki yunuslama açısı sonucu farklarından kaynaklanmakta olup, simülasyon sonuçlarında görülmesi önceden beklenen bir durumdur. Tüm senaryolarda sudan çıkış anında hücum açısı  $0^\circ$  olup, bu durum toplam hızın tamamen ileri hız bileşeninden oluştuğu anlamına gelmektedir. Dikey yörünge sonuçları incelendiğinde, sudan çıkış açısı azaldıkça yatay düzlemde alınan yolun arttığı görülmektedir. Senaryoların enerji ihtiyaçları karşılaştırıldığında, en düşük enerji ihtiyacına sahip senaryonun,  $45^\circ$  çıkış açısı senaryosu olduğu görülmektedir.

## 6. SONUÇ

Bu çalışmada su altından havaya bir füzenin su altı hareketi boyunca optimal enerji ihtiyacına sebep olacak şekilde bir kontrol tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla ilk önce füze modeli açıklanarak 6-DOF hareket denklemleri sunulmuş, ardından füzeye etkiyen kuvvet ve momentler tanımlanmış ve hidrodinamik model parametreleri elde edilmiştir. Füzenin su altında bir başlangıç koşulundan hedeflenen sudan çıkış koşullarına optimal enerji harcanarak ulaşması problemine çözüm olarak; problemin bir minimum-efor optimal kontrol problemi olarak çözülmesi önerilmiştir. Matematiksel olarak formülize edilen probleme sudan farklı çıkış açısı senaryoları için kontrol çözümleri bulunmuş ve çözümler doğrusal olmayan 6-DOF simülasyon ortamında test edilerek, hedeflenen sudan çıkış koşullarına ulaşıldığı görülmüştür.

Sonuçlar incelendiğinde sudan  $45^\circ$  ile çıkış senaryosunun sudaki hareket için en düşük enerji ihtiyacına sahip senaryo olduğu görülmüştür. Sudan çıkış açısı azaldıkça, sudaki hareket boyunca alınan yatay mesafe artmıştır. Bu da daha küçük sudan çıkış açıları için fırlatma noktası etrafında daha geniş bir alan ihtiyacı anlamına gelmektedir. Su altında geçen fırlatma fazı ve havada geçen yükselme fazı birlikte düşünüldüğünde, toplamda en düşük enerji ihtiyacına sebep olacak çıkış açısının tespit edilebilmesi için havada gerçekleşen yükselme fazına ait incelemelerin de yapılması gerekmektedir. Ayrıca, tüm başlangıç ve son koşullar açısından en düşük enerji ihtiyacına sebep olacak görev profiline tespit edilebilmesi için, değerleri bu çalışmada sabit tutulan fırlatma derinliği, hedeflenen sudan çıkış hızı, sudaki hareketin süresi gibi parametrelerin enerji ihtiyacına olan etkileri incelenmelidir. Yapılan çalışmanın bu yönden anlamı, bu etkilerin incelenmesi ve farklı senaryolar etrafında enerji-optimal kontrol çözümlerinin elde edilmesi için yeni bir yöntem sunmuş olmasıdır.

## 7. KAYNAKÇA

- [1] L. Zhang, C. Wei, L. Jing, and N. Cui, “Fixed-time sliding mode attitude tracking control for a submarine-launched missile with multiple disturbances,” *Nonlinear Dynamics*, pp. 1–21, 2018.
- [2] M. Haochun, M. Qinghua, C. Yun, Z. Xiaofeng, and Y. Xianjun, “Guidance and control system design of submarine-to-air missile based on optimal control,” in *TENCON 2013-2013 IEEE Region 10 Conference (31194)*, pp. 1–4, IEEE, 2013.
- [3] N. Wen, Z. Liu, L. Chang, and Y. Ren, “Time optimal control of mini-submarine missile based on control variable parameterization with enhanced time-scaling method,” in *Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), 2016 IEEE Chinese*, pp. 640–642, IEEE, 2016.
- [4] M. Xiao, “Modeling and adaptive sliding mode control of the catastrophic course of a high-speed underwater vehicle,” *International Journal of Automation and Computing*, vol. 10, no. 3, pp. 210–216, 2013.
- [5] D. Qi, J. Feng, B. Xu, A. Liu, and Y. Li, “Water exit model and takeoff control for a morphing cross-media vehicle,” *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol. 40, no. 2, pp. 110–117, 2017.
- [6] J. Yang, J. Feng, Y. Li, A. Liu, J. Hu, and Z. Ma, “Water-exit process modeling and added-mass calculation of the submarine-launched missile,” *Polish Maritime Research*, vol. 24, no. SI, pp. 152–164, 2017.
- [7] Y. Q. Lian, B. Tian, and S. Z. Wang, “The simulation of submarine-launched missile out-water movement based on matlab/simulink,” in *Applied Mechanics and Materials*, vol. 182, pp. 1328–1332, Trans Tech Publ, 2012.
- [8] S. Z. Wang, H. P. Wang, M. Yang, L. P. Wang, and G. W. Wei, “Simulation on three dimensional water-exit trajectory of submarine launched missile,” in *Advanced Materials Research*, vol. 791, pp. 1069–1072, Trans Tech Publ, 2013.
- [9] K. Zhao, L.-Q. Sun, J.-L. Zhao, and X.-O. Cheng, “Simulation analysis of wave effect on exceeding water gesture and load of submarine launched missile,” *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 7, no. 6, pp. 1113–1119, 2014.
- [10] H. Dugoff, “Prediction of trajectories for an underwater missile,” tech. rep., Stevens Institute of Technology Hoboken NJ Davidson Lab, 1963.
- [11] T. I. Fossen, *Guidance and control of ocean vehicles*. John Wiley & Sons Inc, 1994.
- [12] G. Antonelli and G. Antonelli, *Underwater robots*, vol. 3. Springer, 2014.
- [13] M. E. Rentschler, *Dynamic simulation modeling and control of the Odyssey III autonomous underwater vehicle*. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2003.

## ZIRHLI KARA ARAÇLARINI TEHDİT EDEN ASİMETRİK SALDIRILARIN SAYISAL YÖNTEMLER İLE BENZETİMİ

Songül Köse<sup>(a)</sup>, Said Bedir<sup>(a)</sup>, Atıl ERDİK<sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Otokar Otomotiv ve Savunma Sanayi A.Ş., Atatürk Caddesi No: 6 54580 Arifiye  
Sakarya {skose,sbedir,aerdik}@otokar.com.tr

### ÖZ

Günümüzde giderek yaygınlaşan asimetrik saldırılar, askeri operasyonlarda mürettebatın ciddi bir şekilde yaralanmasına veya hayatını kaybetmesine neden olmaktadır. Kayıpların büyük çoğunluğu, kara mayını, el yapımı patlayıcılar, patlayıcıyla şekillendirilmiş deliciler ve parçacık tesirli patlayıcılar gibi tehditlerden kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada zırhlı araçların maruz kaldığı asimetrik tehditlerden kara mayınları ve patlamayla şekillendirilmiş deliciler ile ilgili literatür araştırmaları yapılarak sonlu elemanlarla modelleme teknikleri incelenmiştir. Bahsi geçen tehditlerin hedef yapılar üzerindeki farklı etkilerinin LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı ile benzetimi araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kara Mayını, Patlamayla Şekillendirilmiş Deliciler (PŞD), LS DYNA, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Patlama Simülasyonu

### NUMERICAL SIMULATIONS OF ASYMMETRIC THREATS ON ARMORED VEHICLES

#### ABSTRACT

Today, increasing asymmetric attacks result in serious injuries or deaths of occupant in military operations. Most of losses are caused by threats such as land mines, handmade bombs, explosively formed penetrators and fragmentation bombs. In this paper, literature research on the asymmetric threats such as land mines and explosively formed penetrators is conducted as well as the finite elements modelling techniques are discussed. Different effects of these threats on structures were investigated by using LS-DYNA finite element software.

**Keywords:** Blast Simulation, Explosively Formed Penetrators, Finite Elements Method, Land Mine, LS Dyna

## 1. GİRİŞ

Mayın patlamaları, el yapımı patlayıcılar, patlayıcıyla şekillendirilmiş deliciler ve parçacık tesirli patlayıcılar gibi tehditlerin zırhlı araçlar ve mürettebat üzerindeki etkileri ciddi bir risk oluşturmaktadır. Bu tehditlerden mürettebatı korumak için gerçekleştirilen zırhlı araçları tasarlama süreci, bir dizi fizik olayını göz önünde bulundurma gerekliliğinden dolayı karmaşıklaşmaktadır. Bahsedilen fiziksel oluşumlar; patlatma kimyası, şok fiziği, katı mekaniği, yapısal dinamikler, doğrusal olmayan malzeme davranışı, insan fizyolojisi ve yaralanma mekaniği gibi pek çok farklı disiplini içerir. Bu farklı disiplinlerin yarattığı etkilerin saha testleri ile incelenmesi ve sonuçların doğrulanması hem zaman alıcı hem de maliyetlidir [1].

Zırhlı araç tasarımı sırasında zaman ve maliyet kaybını asgariye düşürmek için sayısal benzetim yöntemlerinden faydalanılmaktadır. Nonlineer sonlu elemanlar kodu olan LS-DYNA yazılımı ile patlama simülasyonları yapılabilmektedir [2].

## 2. KARA ARAÇLARINI TEHDİT EDEN FAKTÖRLER

Kara mayınları, el yapımı patlayıcılar (EYP), patlayıcıyla şekillendirilmiş deliciler (PŞD) ve parçacık tesirli patlayıcılar (PTP) gibi tehditler zırhlı araca ve mürettebatına zarar verebilmek üzere tasarlanmıştır.

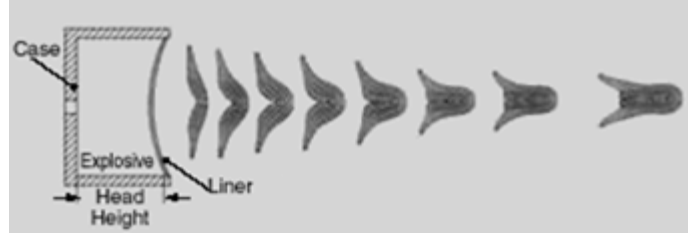
Zırhlı araçlar için yaygın tehditlerden biri toprak altına yerleştirilen kara mayınları olup, muharebe araçlarını ve içindeki mürettebatı etkisiz kılmak için sıklıkla kullanılmaktadır. Mayının patlama olayı sadece birkaç milisaniye sürer ve çok yüksek sıcaklık ve basınçların üretilmesine neden olur. Patlama sırasında ortaya çıkan şok dalgası, hedef yapılar üzerinde asıl etkiye sebep olup, bu dalgaya direkt maruz kalan yüzeylerde hasar daha yüksektir. Son yıllarda kabiliyetleri gelişen sonlu elemanlar yazılımları ile zırhlı araç altında mayın patlama sayısal benzetimleri yapılarak testler ile doğrulanmıştır. Buna yönelik yapılan bir çalışmada zırhlı bir aracın ön sol tekeri altında mayın patlama simülasyonları yapılarak testler ile uyumlu sonuç elde edilmiştir [3].

Bir başka tehdit unsuru olarak EYP'ler zırhlı araçlar ve mürettebatı için risk oluşturmaktadır. EYP'ler, çeşitli kimyasal maddelerin bir araya getirilerek oluşturulan patlayıcılar olabileceği gibi savaş başlıkları kullanılarak da hazırlanabilmektedir [4].

Zırhlı araçlarda, özellikle zırhını delerek içerideki personele zarar vermek üzere tasarlanmış olan bir başka tehdit unsuru patlayıcı ile şekillendirilmiş delicilerdir (PŞD). PŞD'ler genel olarak konik bir astara sahiptir. Şekil 2.1'de [5] örnek olarak gösterilen



PŞD patlatıldığında yüksek basınç ve ısı etkisiyle konik astar yapısı plastik deformasyona uğrar ve bir mermiye dönüşerek hedef yapı içerisine nüfuz eder [6].



Şekil 2.1 : PŞD'de astarın zamana bağlı formasyonu [5]

Öte yandan, parçacık tesirli patlayıcılar ise zırhlı araçtan ziyade mürettebata yönelik bir tehdit oluşturmaktadır. Tarihi 14. yüzyıla kadar uzanan bu patlayıcılara ilk olarak Ming Hanedanlığı'nda rastlanmıştır. Parçacık tesirli patlayıcılar, demir topaklar ve kırık porselen parçaları birleştirilerek oluşturulmuştur. Patlama sonrası ortaya çıkan şarapnel etkisi cildi delici ve düşman askerini körleştirebilme etkisine sahiptir [7].

Bu çalışmada, bahsedilen tehditlerden kara mayını ve patlayıcıyla şekillendirilmiş deliciler (PŞD) daha detaylı ele alınıp sayısal yöntemler ile modelleme tekniklerinden bahsedilmiştir.

### 3. SAYISAL YÖNTEMLER

Patlama simülasyonlarında gerçek test sonuçlarına yakın değerler elde etmek için doğru modelleme yöntemleri kullanılmalıdır. Analiz sonuçlarının gerçeğe daha yakın çıkması için akışkan ortamın ve hedef yapının detaylı bir şekilde ele alınması gerekmektedir. Bu durum, modelleme ve çözüm süresinin artmasına neden olmaktadır. Bu yüzden modelleme ve patlama yöntemine karar vermek oldukça hassas ve analiz sonuçlarına doğrudan etkiyen bir faktör olmaktadır.

#### 3.1. Patlama Yöntemleri

Patlama yükleri ile hedef yapı etkileşiminin sonlu elemanlar ile çözümünde çeşitli patlama yöntemleri mevcuttur. Bunlar CONWEP yöntemi, ALE yöntemi ve Birleşik CONWEP-ALE yöntemi olarak sınıflandırılabilir.

Patlama yöntemlerinden biri olan CONWEP yöntemi, Lagrange tekniğini kullanarak, patlama basıncını ampirik olarak hesaplamakta ve basınç hedef yüzeye direkt olarak uygulanmaktadır. TNT patlayıcısının hedef yapı üzerindeki etkileri, mesafeye ve

patlayıcı kütlelerine göre incelenmiş ve elde edilen parametreler eğri uydurma yöntemiyle doğrusal polinom denklemleri elde edilmiştir.

$$P(t) = P_{so} \left[ 1 - \frac{t - T_a}{T_0} \right] \exp \left[ \frac{-A \times (t - T_a)}{T_0} \right] \quad (1)$$

Literatürde Friedlander bağıntısı olarak bilinen (1) nolu denklemdeki parametreler Kingery ve Bulmash hesaplarından elde edilmiştir [8].

Burada; P(t) t anındaki basıncı (kPa), P<sub>so</sub> maksimum basıncı (kPa), T<sub>0</sub> basıncın pozitif olduğu süreyi(ms), T<sub>a</sub> basıncın varış zamanını, A P<sub>so</sub>'a bağlı birimsiz dalga şekli sayısını ifade etmektedir.

Gerçekleştirilen test sonuçlarından maksimum basınç, itki ve zaman değerleri elde edilerek, bu değerler yardımıyla birimsiz A katsayısı bulunmuş ve Friedlander bağıntısı ile zamana bağlı olarak patlama basınç eğrileri elde edilmiştir. CONWEP yöntemindeki tüm denklem ve eğriler, LS-DYNA'da içerisine \*LOAD\_BLAST kartı ile tanımlanmıştır [9].

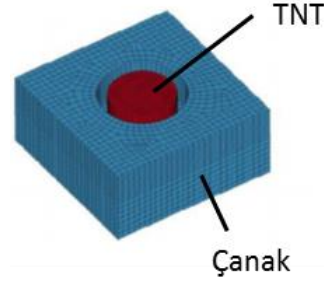
Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) yönteminde modelleme esnasında patlayıcı ve patlayıcıyı çevreleyen akışkan ortam için Euler elemanlar, hedef yapı için Lagrange tipi elemanlar kullanılmaktadır. Patlayıcı ve havanın etkileşimi LS DYNA'da temas algoritması (\*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID) tanımlanarak sağlanmaktadır. Patlama basıncının zamana bağlı olarak akışkan ortamdaki yayılımı, akışkan ortam ve patlayıcı modelleri için belirlenen hal denklemleri yardımıyla hesaplanmaktadır [10].

Birleşik CONWEP-ALE patlama modelinde ise hem doğruluğu artırmak hem de analiz süresini kısaltmak amacıyla hibrit bir çözüm uygulanmıştır. Bu hibrit yöntemde patlayıcı yerine CONWEP yöntemindeki gibi ampirik basınç verisi kullanılır ve elde edilen bu basınç, hedef yapıya yakın bir noktadan ALE ortamına sınır tabaka elemanları vasıtasıyla aktarılır. Bu yöntem LS-DYNA'da \*LOAD\_BLAST\_ENHANCED kartı kullanılarak oluşturulabilmektedir [11].

Patlama sonrası basıncın hava ortamı içerisindeki yayılımı ve yansıyan basınç etkilerinin incelenmesi amacıyla bu çalışmada ALE yönteminden faydalanılmıştır.

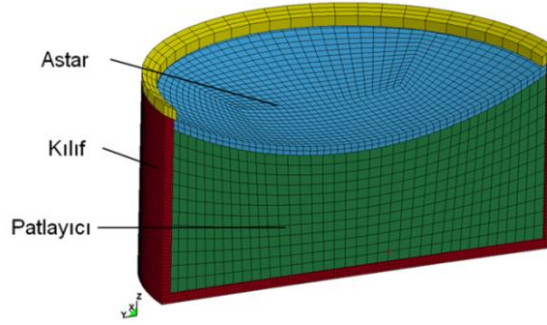
### 3.2. Patlayıcının Modellenmesi

Mayın patlama simülasyonu için sayısal modelleme genel olarak hava, patlayıcı, çanak ve bir hedef yapıdan oluşur. Hava ortamı ve yüksek patlayıcılar Eulerian mesh olarak tanımlanırken, çanak ve hedef yapı Lagrangian mesh olarak seçilmiştir. TNT, yüksek patlayıcı olarak tanımlanmış ve hegzahedral katı elementlerle modellenmiştir. Şekil 3.1'de TNT ve çanak için örnek bir model gösterilmiştir.



**Şekil 3.1:** Çanak ve patlayıcının modellenmesi [2]

Bir başka tehdit unsuru olan patlayıcıyla şekillendirilmiş deliciler (PŞD) patlayıcının önünde konik bir astara sahiptir. Patlayıcının infilakı sonucu ortaya çıkan yüksek miktarda ısı ve basınç, astarın şekil alıp hedefe yönelmesine neden olacaktır. Şekil 3.2’de PŞD sonlu elemanlar modeli gösterilmiştir.



**Şekil 3.2:** PŞD'nin sonlu eleman modeli

Patlama sonrası yüksek hızlardaki malzeme davranışını gözlemlemek için Johnson Cook malzeme modeli kullanılmıştır [12]. Bu modelin LS-DYNA'daki bağıntısı (2) no'lu eşitlikteki gibidir;

$$\sigma_Y = \left[ A + B \left( \varepsilon_{eff}^p \right)^N \right] \left[ 1 + C \ln \dot{\varepsilon} \right] \left[ 1 - (T_H)^M \right] \quad (2)$$

Burada;  $\varepsilon_{eff}^p$  etkin plastik gerinimi,  $\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{eff}^p}{\varepsilon_0}$   $\varepsilon_0$ , A,B ve N katsayılarını hesaplamak için kullanılan gerinim hızını,  $T_H = \frac{T_R}{T_M - T_R}$  deneyin yapıldığı sıcaklığı,  $T_M$  erime sıcaklığını,  $T_R$  oda sıcaklığını,  $\Delta T = \frac{1}{\rho C_p} \int \sigma. d. \varepsilon_{eff}^p$  sıcaklık değişimini,  $\rho$  kütle yoğunluğunu ve  $C_p$  özgül ısıyı ifade etmektedir.

TNT patlayıcı modelinin ortasından infilakı ise LS DYNA'da \*MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN kartı ile sağlanmıştır.

İnfilak sırasında meydana gelen patlama sonrası reaksiyon ürünleriyle ilgili basınç hacim ve enerji davranışını inceleyebilmek için ampirik Jones-Wilkins-Lee hal denklemi kullanılmıştır (\*EOS\_JWL) [10]:

$$P = A \left[ 1 - \frac{w}{R_1 V} \right] e^{-R_1 V} + B \left[ 1 - \frac{w}{R_2 V} \right] e^{-R_2 V} + \frac{wE}{V} \quad (3)$$

Burada;  $P=P(x,y,z,t)$  basıncı,  $V=P/V_i$  o andaki basınçta patlayıcı malzemenin hacmini,  $V_i$  tepkimeye girmemiş patlayıcı malzemenin ilk hacmini,  $E$  özgül ilk enerjiyi,  $A$ ,  $B$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  ve  $w$  değişkenleri ifade etmektedir.

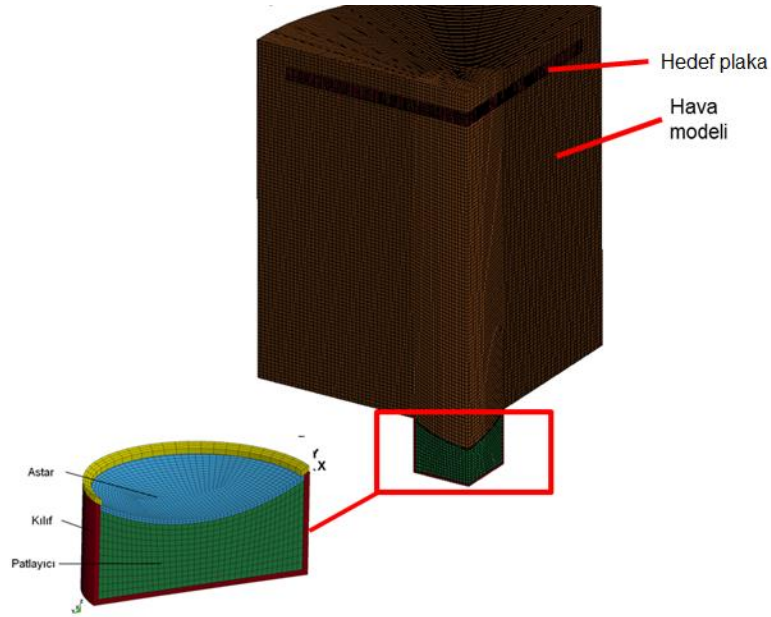
Dobratz (1981) tarafından tanımlanan TNT'ye ait JWL denklem değişkenleri Çizelge 3.1'de belirtilmiştir [13].

**Çizelge 3.1.** TNT için JWL parametreleri [13]

<b>A</b>	<b>B</b>	<b>R<sub>1</sub></b>	<b>R<sub>2</sub></b>	<b>w</b>	<b>E<sub>0</sub></b>	<b>V<sub>0</sub></b>
3.71	3.23E-02	4.15	0.95	0.3	7.0E-02	1.0

### 3.3. Hava Ortamının Modellenmesi

Patlama sonucu oluşan basınç dalgalarının akışkan ortam içindeki hareketinin gerçekleşmesi için ortam akışkanı olan hava, küp elemanlarla modellenmiştir. Örnek olarak PŞD ve hedef plaka etrafında bir kontrol hacmi olarak oluşturulan hava modeli Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Patlama basıncının zamana bağlı olarak akışkan ortamdaki yayılımı, akışkan ortam ve patlayıcı modelleri için belirlenen hal denklemleri yardımıyla hesaplanmaktadır. Patlayıcı ve havanın etkileşimi LS DYNA'da temas algoritması (\*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID) tanımlanarak sağlanmıştır.



**Şekil 3.3:** PŞD için oluşturulan örnek hava modeli

Havanın hal denklemi için LS DYNA'da doğrusal polinom hal denklemi (\*EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL) ve \*MAT\_NULL malzeme modeli tanımlanmıştır. Hava modeli için kullanılan parametreler Çizelge 3.2'de belirtilmiştir.

Doğrusal polinom hal denklemi şu şekilde ifade edilmektedir:

$$P = C_0 + C_1 m + C_2 m^2 + C_3 m^3 + (C_4 + C_5 m + C_6 m^2) E \quad (4)$$

Burada;  $m = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ 'dir.  $\frac{\rho}{\rho_0}$ , o anki yoğunluğun ilk yoğunluğa oranı,  $C_x$ , sabittir. Gazlar için  $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$ ,  $C_4 = C_5 = \gamma - 1$ 'dir. ( $\gamma$ ), özgül ısı oranıdır.

(4) nolu denklem düzenlemeler yapıldıktan sonra aşağıdaki denkleme dönüşür:

$$P = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} - E \quad (5)$$

Havaya ait hal denklemi ve malzeme modeli parametreleri Çizelge 3.2'de özetlenmiştir.

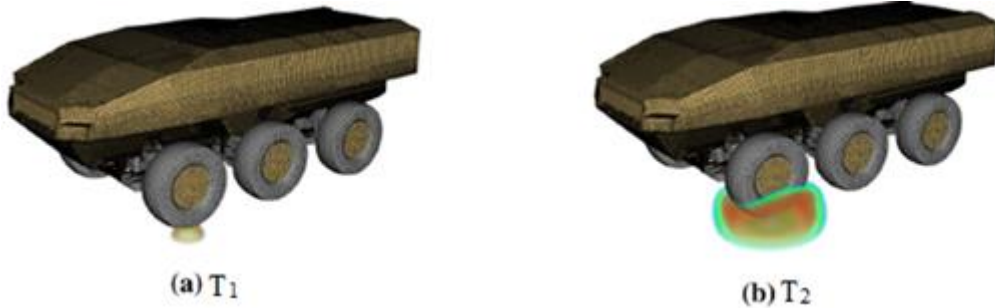
**Çizelge 3.2.** Hava modeli için kullanılan parametreler

<b>*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL</b>						
<b>C<sub>0</sub></b>	<b>C<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>2</sub></b>	<b>C<sub>3</sub></b>	<b>C<sub>4</sub></b>	<b>C<sub>5</sub></b>	<b>C<sub>6</sub></b>
0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.0
<b>E<sub>0</sub></b>	<b>V<sub>0</sub></b>					
2.58E-06	1.0					
<b>*MAT_NULL</b>						
<b>Ro</b>	<b>PC</b>	<b>MU</b>				
1.29E-03						

#### 4. SONUÇ

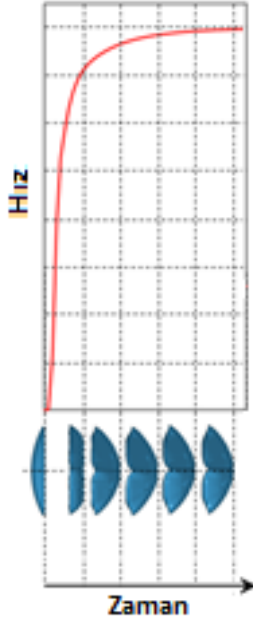
Bu çalışmada, zırhlı araçları tehdit eden patlayıcılar modellenerek hedef yapıyla olan etkileşimi LS DYNA yazılımıyla gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın birinci kısmında zırhlı araç altında mayın patlama analizi gerçekleştirilerek patlama dalgasının akışkan ortamı içerisinde yayılımı zamana bağlı olarak incelenmiştir. Patlama esnasında şok dalgasının zamana bağlı yayılımı Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

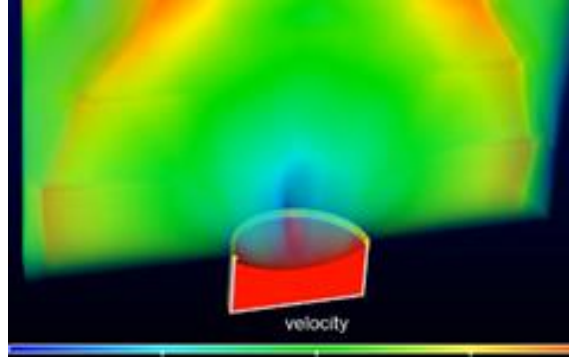


**Şekil 4.1:** Şok dalgasının yayılımı

Çalışmanın ikinci kısmında PŞD tehdidinin patlama enasındaki durumu incelenmiştir. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’te PŞD’nin patlaması sonrasında astarın hız profili ve basıncın hava ortamı içerisindeki yayılımı gösterilmiştir.



Şekil 4.3:PŞD'nin hız grafiği ve astar formu



Şekil 4.4: Basıncın hava ortamı içerisinde yayılımı

Yapılan iki çalışmada, kara mayını ve PŞD tehditlerinin sayısal benzetim teknikleri anlatılmıştır. LS DYNA yazılımı ile gerçekleştirilen analizler sonucunda bu tehditlerde etkin rol oynayan farklı parametreler olduğu görülmüştür. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda doğru parametre ve sınır koşullarının tanımlanması durumunda zırhlı araçları tehdit eden faktörlerin sayısal olarak benzetilebildiği anlaşılmıştır.

## 5. KAYNAKÇA

- [1] Bocchieri R.T., Kirkpatrick S.W., Peterson B. "Simulation-based design of vehicles exposed to blast threats for improved occupant survivability", Applied Research Associates. Inc.,USA, 2009
- [2] Erdik A., Kılıç N., Kibaroglu K. (2008, June). *Improving protection level of light weight armored vehicles against landmines using numerical simulation techniques*. Paper presented at the SAVTEK, Odtü, Ankara.
- [3] Erdik A., Kılıç N. (2015). Finite element and experimental analyses of an armoured vehicle subjected to landmine blast. *Defence Science Journal*, 65(6), pp. 477-482, doi:10.14429/dsj.65.8594
- [4] <https://www.britannica.com/technology/improvised-explosive-device> 14.09.2018 tarihinde alınmıştır.
- [5] U.S. Air Force Research Laboratory description of an EFP
- [6] Yangjun Li, Weiping Guo., Gao Wang., Su-jie Lian. (2013). *Study on Explosively Formed Projectiles Test System: Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering*, North University of China. Paris: Atlantic Press.

[7] *Joseph Needham (1986). Military Technology: The Gunpowder Epic. Cambridge University Press. pp. 180–181. ISBN 978-0-521-30358-3*

[8] C.N. King, G.Bulmash, (1984), “Airblast parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst”, Report ARBL-TR-02555, U.S. BRL, Aberdeen Proving Ground MD.

[9] J.O. Hallquist, (2007), "LS-DYNA Keyword User's Manual Vol 1", *Livermore Software Technology Corporation*, California, USA.

[10] J.O. Hallquist, (2006), "LS-DYNA Theory Manual", *Livermore Software Technology Corporation*, California, USA.

[11] LSTC, (2012), LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume I.

[12] G.R. Johnson, W.H. Cook, (1983), "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected To Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures", *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, The Hague, the Netherlands

[13] B.M. Dobratz, (1981), *LLNL explosives handbook: properties of chemical explosives and explosives and explosive simulants*, in, *Lawrence Livermore National Laboratory*, California, U.S.A.



## **SIMEMSSIS: ASELSAN TELSİZ ÇEVİRİMLERİ BENZETİM VE ÖYKÜMLENDİRME ORTAMI**

**Ahmet Utku Yargıçoğlu <sup>(a)</sup>, Alper Sinan Akyürek <sup>(a)</sup>**

<sup>(a)</sup> Haberleşme ve Bilgi Teknolojileri Sektör Başkanlığı, ASELSAN AŞ.,  
uyargicoglu@aselsan.com.tr

### **ÖZ**

SIMEMSSIS karmaşık dalga şekli tasarımlarının geliştirilmesi, doğrulanması ve iyileştirilmesi amacıyla kullanılan ölçeklendirilebilen, temeli öykünüm ve benzetime dayanan bir yazılım sistemidir. Gerçek dünyada kurulamayacak kadar maliyetli ve karmaşık telsiz şebekelerini sanal ortamda kurulabilmektedir. Kurulan sanal telsiz şebekeleriyle dalga şekli etkin bir şekilde test edilebilmekte, dalga şekli tasarımcıları ve yazılım geliştiricilere yapılan dönüşler sayesinde tasarım ve yazılım iyileştirilebilmektedir. SIMEMSSIS yazılım tasarım sürecini kısaltmaktayken, hata tespitini ve senaryo testlerini gerçek telsizlerden oluşan sistemlere göreyse oldukça kolaylaştırmaktadır, diğer bir deyişle tasarım maliyetlerinin düşmesini sağlamaktadır. Üzerinde çalışılan yazılımların başka işletim sistemlerine aktarılabilmesini mümkün kılarken, telsiz sisteminde aktarılan trafiğin ayrıntılı bir şekilde kaydını tuttuğundan istenilen çözünürlükte performans analizi yeteneği sunmaktadır. SIMEMSSIS'te benzetim hava arayüzü ve kullanıcı arayüzleri benzetim modüllerinden, öykünüm ise dalga şekli yazılımları, sanal kart destek paketi, VxWorks API, ve Windows gerçek zaman öykünüm modüllerinden oluşmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Benzetim, Dalga Şekli Testi, Öykünüm, Telsiz Sistemi, Yazılım Geliştirme

## **SIMEMMSIS: ASELSAN EMULATION AND SIMULATION MEDIUM FOR RADIO NETWORKS**

### **ABSTRACT**

SIMEMMSIS is a scalable emulation and simulation software solution aimed for the verification and enhancement of the design of complicated waveforms. Complex radio networks that are costly to be installed in the real world, can easily be established virtually. Using virtual radio networks, the waveform can be effectively verified and tested, whilst design and software can be continuously improved by waveform designers and software developers. SIMEMMSIS shortens the software design process and reduces design costs through error detection and scenario testing instead of full systems' testing through the actual deployment of real radios. While enabling the software to be transferred to other operating systems, it also provides detailed traffic analysis within the radio system and provides performance analysis at the desired resolution. Simulation subsystem consists of air interface and user interface simulations, while the emulation subsystem consists of the actual waveform software, virtual card support package, VxWorks API, and Windows real time emulation modules.

**Keywords:** Emulation, Radio System, Simulation, Software Development, Waveform Testing

### **1. GİRİŞ**

Gelişen teknolojiye bağlı olarak, günümüz kullanıcıları yeni nesil telsiz sistemlerinden daha yüksek hızlar, daha düşük gecikmeler, daha fazla dayanıklılık ve daha fazla güvenlik talep etmektedirler. Her kullanıcı kendi sistemi ve senaryolarına uygun haberleşebilmek istediğinden, farklı performans metriklerine göre optimize edilmiş farklı haberleşme servisleri gerçekleşmesi gerekli olmaktadır. Çok sayıda değişik özellikli servisin aynı telsiz sistemi bünyesinde yer alması ve hatta aynı anda hizmet verebilmesi için eski nesil dalga şekillerine nazaran daha karmaşık, daha yetenekli dalga şekilleri geliştirilmektedir. ASELSAN Haberleşme ve Bilgi Teknolojileri Sektör Başkanlığı Mühendislik Grup Başkanlığı tarafından geliştirilen Telsiz Çevrimleri Benzetim ve Öykünüm Ortamı, diğer bir deyişle SIMEMMSIS (Simülasyon ve Emülasyon Sistemi) karmaşık dalga şekillerinin fiziksel ortama gereksinim duyulmaksızın bilgisayar ortamında geliştirilmesini, test edilmesini, hatalarından arındırılmasını sağlayan özgün bir yazılım sistemidir. Burada özgünlüğüne ayrı bir parantez açmak gerekirse, literatürde zengin bir içeriğe sahip

benzetim çalışmalarından farklı olarak telsiz veya telsiz sistem öykünümü konularında dünyada yayınlanmış herhangi çalışma bulunmamaktadır. Bu yüzden bu çalışma kendi alanında benzersiz bir nitelik taşımaktadır. Yazılım geliştirme alanında ise çeşitli platformlar (donanım platformları + işletim sistemleri) için hazırlanmış pek çok öykünüm ortamı bulunmaktadır: Android öykünüm ortamları, oyun bilgisayarı öykünüm ortamları (Amiga, Atari, Play Station), Windows üzerinde VxWorks simülatörü ...vb.

Tasarlanan dalga şekilleri karmaşıklıkça ve artan karmaşıklığa ilaveten yazılımların boyutu büyüdükçe telsiz çevrimlerinin test edilmesi de aynı ölçüde zorlaşmaktadır. Test sistemlerinde farklı senaryolar oluşturulması hem zor, hem maliyetli ve hem de çok fazla iş yüküne neden olmakta, feda edilen büyük çaplı emek ve harcamaya rağmen yine de kapsamlı testlerin yapılabilmesi çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Bu yüzden de modern bir telsiz tasarımının en ağırlıklı kısmını oluşturan dalga şekli tasarımı, tasarımın en ağırlıklı kısmını oluşturan gerçek zamanlı gömülü yazılımlar ve bahse konu yazılımlar dahilinde koşan algoritmaların ve protokollerin tam anlamıyla test edilmesi çok meşakkatli olabilmektedir. Üstelik fiziksel ortamda karmaşık bir dalga şeklinin test edilebilmesi için onlarca kişiden oluşan test ekiplerinin kurulması, test ekiplerinin yüzlerce kilometrekarelik alanlara yayılmaları, bazı telsizlerin erişimi zor bölgelere kadar taşınmalarının gerektiği durumlar olabilmektedir; finansal açıdan sistem test maliyetleri, sistem tedarik maliyetini anlamlı oranlarda arttırmaktadır. Başka bir deyişle telsiz sistemlerinin karmaşıklığı arttıkça “alışlageldik metotlara dayanan test” maliyetleri büyük artışlar göstermektedir.

SIMEMESIS, dalga şekli tasarımının en önemli kısmını oluşturan yazılımları bilgisayar ortamına aktararak, günümüz bilgisayarlarının yüksek hesaplama güçlerinden azami ölçüde faydalanmak suretiyle, gerçek saha ortamındaki gibi test edilebilmesini sağlamaktadır. Ayrıca SIMEMESIS dalga şekli yazılımlarının hatalarının tespitinde yazılım tasarım mühendislerine yardımcı olmakta, sahada yaratılamayacak derecede karmaşık test senaryolarının oluşturulmasına imkân vermektedir; en özet ifadeyle üretim maliyetlerinin düşürülmesine ve ürün kalitesinin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır.

## 2. SİSTEM MİMARİSİ

SIMEMESIS mimarisi esas olarak fiziksel telsiz içyapısıyla benzerlik arz etmektedir. Bir telsiz cihazı ele alındığında, bahse konu cihazda iki tür arayüz bulunduğu kabul edilebilir: Hava arayüzü ve kullanıcı arayüzü. Şekil 1’de gösterildiği üzere telsiz cihazı bu arayüzler arasında yer alır ve sırasıyla kırmızı dalga şekli yazılımları, kripto, siyah dalga şekli yazılımları, sinyal işleme, RF modüllerinden oluşmaktadır. Telsiz modüllerini kısaca tanıtmak gerekirse RF modülünde sayısal ve analog alt modüller yer almakta olup, esas olarak frekans bandına taşıma, modülasyon, yükseltme gibi yüksek güç harcanan görevler yerine getirilmektedir. Sinyal işleme modülü sayısal süzgeçleme, TDMA oluşturma,

eşzamanlama, hata kodlama gibi hem RF modülünü yöneten, hem de yüksek işlem gücü gerektiren gerçek zamanlı görevleri yerine getirir. Son olarak kırmızı ve siyah dalga şekli yazılımları modüllerinde dalga şeklinin gerektirdiği haberleşme protokolleri (parça taşıma, blok taşıma ve kablosuz IP), bazı hata kodlama işlemleri, çevrim yönetimi, kaynak yönetimi ve kullanıcı arayüz yazılımları VxWorks [1] işletim sistemi üzerinde koşturulur. Dalga şeklinin en büyük kısmı bu modülerde gerçekleşir. Dalga şekli yazılım modülleri aynı zamanda telsizlerin en zor test edilen, sistem çalışma performansının senaryoya en bağımlı olduğu modüllerdir.



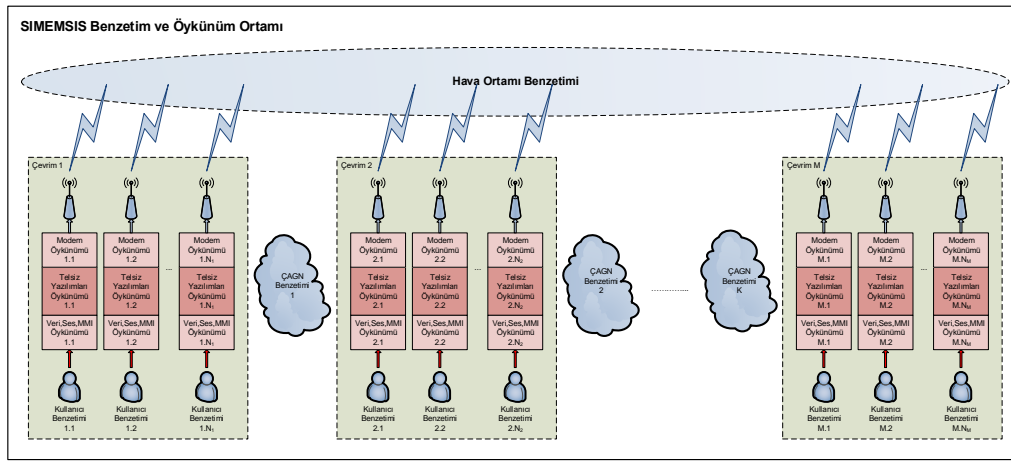
Şekil 1. SIMEMSIS açısından genel telsiz yapısı

Mevcut SIMEMSIS iki ana kısımdan oluşmaktadır: Benzetim ve öykünüm alt-sistemleri. Benzetim alt-sistemi aslen birbirlerinden bağımsız olan hava arayüzü benzetimi, kullanıcı arayüzleri benzetimi ve çevrimler arası geçiş benzetimi modüllerinden oluşur. Hava arayüzü benzetimi, sadece hava ortamını kapsamamakta olup, RF modülünün tamamını ve sinyal işleme modüllerinin bazı kısımlarını da içermektedir; kablosuz kanal modellemesi, telsiz hareket modellemesi, ideal olmayan donanım özelliklerinin modellenmesi faaliyetleri bu alt-sistemin sorumluluğundadır. Benzetimlerde OPNET [2] gibi gelişmiş yazılımlar kullanılabilirdiği gibi ASELSAN tarafından üretilmiş benzetim yazılım kütüphaneleri de bulunmaktadır. Kullanıcı arayüzü benzetimi ise terminal veri benzetimi, ÇGN benzetimi, ses ve MMI benzetimi kısımlarından oluşmaktadır.

Öykünüm alt-sistemi, uygulama modülü üzerindeki yazılımın tamamından ve mevzu bahis yazılımın çalışabilmesine mukabil altı modülden oluşmaktadır: Dalga şekli yazılımları öykünümü, modem öykünümü, kullanıcı arayüzleri (veri, ses ve MMI) öykünümü, sanal kart destek paketi, VxWorks API öykünümü ve Windows gerçek zaman öykünümü. Dalga şekli yazılımları öykünümü modülü en kapsamlı modül olup, telsiz dalga şekli yazılımlarının tamamını içermektedir. Bahse konu yazılımlar sanki gerçek bir telsizde çalışıyormuş gibi sanal telsiz üzerinde de çalışırlar. Yazılımların çok büyük bir kısmı sanallaştırılmış bir telsiz üzerinde çalıştıklarından habersizdirler. Modem öykünümü dalga şekli yazılımlarına gerçek telsizdeki modem arayüzünün ve davranışlarının aynısını sunar. Kullanıcı arayüzleri öykünümü kullanıcı arayüzleri ve

davranışlarını taklit eder. Her sanal telsiz için Windows'ta kullanıcı arayüzü formu gösterilir.

Sanal kart destek paketi (İng: virtual board support package, V-BSP) uygulama kartındaki tüm arayüzlerin ve donanımların öykünümünü yerine getirmektedir. Öykünüm kapsamında dalga şekli yazılımlarınca kullanılan tüm arayüzler telsizlerdeki gerçek arayüzlerle tamamen uyumludur, zamanlamaları aynıdır, bilgi alışverişinde takip edilen senaryolar aynıdır. Donanım soyutlama katmanı (İng: hardware abstraction layer) ve kesme bağlamında (İng: Interrupt context) çalışan tüm yazılım parçaları sanal kart destek paketi kapsamındadır.



Şekil 2. SIMEMESIS'i oluşturan öykünüm ve benzetim alt-sistemleri

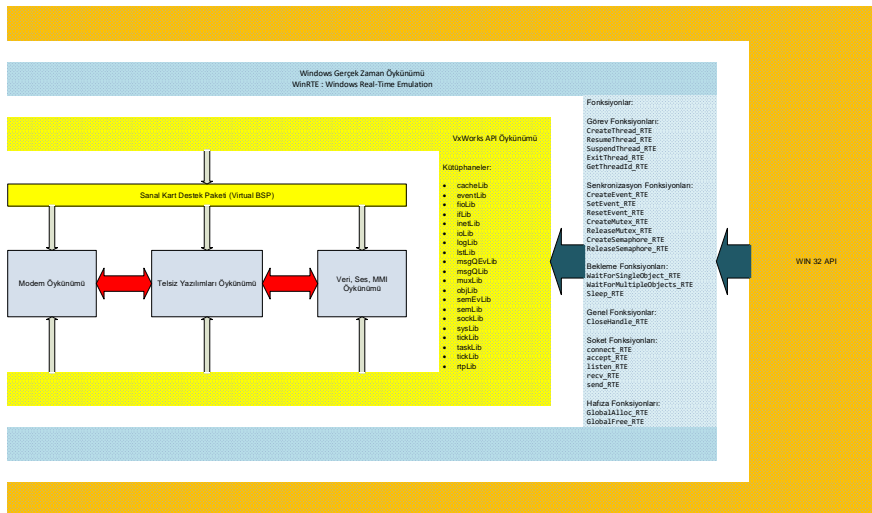
VxWorks API öykünümü (İng: emulation), telsiz uygulama yazılımları tarafından kullanılan VxWorks işletim sistemi arayüzlerini Windows işletim sistemi üzerinde öykünümlendirir. Telsiz yazılımlarınca kullanılan tüm VxWorks API fonksiyonları Windows API [3] fonksiyonlarına dönüştürülür. Telsiz tarafında kullanılan soket arayüzü gibi POSIX kütüphaneleri çok ufak tefek değişiklikler haricinde zaten Windows arayüzlerince desteklenmektedir. Aslen telsiz yazılımları dahilinde sadece VxWorks API'sinin iyi bilinen dar kapsamlı bir alt-kümesinin kullanılması tercih edildiğinden, Linux arayüzlerinin Windows'a taşındığı cygwin [4] kadar kapsamlı bir API adaptasyon çalışmasına gerek duyulmamıştır. Öte yandan, Windows API'sinden elde edilen VxWorks API fonksiyonları Windows'un görev planlaması ve önceliklendirmesine tabi olmaktadır.

Windows gerçek zaman öykünümü (İng: emulator) proje dahilindeki modüller arasında karmaşıklığı en yüksek olan modüllerdendir. Asıl işlevi VxWorks API öykünümü vasıtasıyla sağlanan VxWorks API fonksiyonlarının Windows görev planlaması ve öncelikleri yerine gerçek zamanlı VxWorks planlaması ve önceliklerine göre

çalıştırılmasıdır. Başka bir deyişle VxWorks API emülatörünün tamamlayıcısıdır. Windows API'sinde yer alan bazı Win32 API fonksiyonlarının (Şekil 3), görevlerinin ve task, semaphore, mutex, event gibi çekirdek nesnelerinin aynen VxWorks'teki sırada çalışmasını sağlar. Esasen çekirdek katmanında (Kernel layer, kernel mode) [5] gibi çalışan Windows için yazılmış bir gerçek zaman eklentisi olmayıp, kullanıcı katmanında çalışır. Kullanıcı modunda çalışan bir yazılım mevcut Windows API'sini gerçek zamanlı hale getiremeyeceğinden dolayı, gerçek zaman görev planlama ve sıralamalarına uyumluluk işletim sistemi görevlerinin (İng: OS tasks) kontrollü olarak yavaşlatılmasıyla sağlanır.

Windows gerçek zaman öykünümünün projeye katkılardan en önemlisi telsiz yazılımlarının gerçek zaman gereksinimlerinin ayrıntılı bir biçimde gözlemlenebilmesi ve takip edilebilmesi olmuştur. Bu modül sayesinde işletim sistemi görev anahtarlama sıralarının izlenip, kaydedilebilmekte (İng: OS task switching), kaynak ihtiyacı ve paylaşımları incelenebilmekte, hangi yazılım birimlerinin ne tip gerçek zaman gereksinimlerine (task preemption, synchronization, priority inversion ...vb.) ihtiyaç duyduğu belirlenebilmektedir. Sanal kart destek paketi, VxWorks API öykünümü ve Windows gerçek zaman öykünümü bir araya geldiklerinde, uygulama kartındaki yazılımlar telsizler üzerinde nasıl koşuyorlarsa Windows işletim sisteminde de aynı şekilde, aynı senaryoları takip ederek ve aynı davranışları göstererek koşarlar.

Öte yandan, Windows gerçek zaman öykünümü proje başlangıcında sıklıkla kullanılmışsa da, proje ilerledikçe dalga şekli yazılımlarının platformdan ve görev zamanlamadan bağımsız hale getirilmesiyle kullanımından vazgeçilmiştir. Bu sayede benzetim ve öykünüm sisteminin çalışma hızı iyileştirilmiştir. En son gelinen noktada telsiz dalga şekli yazılımları gerek Windows gerekse VxWorks'te platformdan bağımsız koşabilecek hale gelmişlerdir.



Şekil 3. Öykünüm altyapı modülleri

### 3. BENZETİM - ÖYKÜNÜM ORTAMININ SAĞLADIĞI YARARLAR

SIMEMMSIS'in en önemli özelliklerinden birisi sistemin ölçeklenebilir olmasıdır. Sistemi oluşturan bilgisayar sayısı arttırıldıkça öykünümü yapılan telsiz sayısı arttırılabilir. Şu anki SIMEMMSIS'te bir bilgisayarın her bir çekirdeğinde birden fazla telsiz yazılımı koşturulabilmektedir. İki işlemcili, her bir işlemcisinde 8 fiziksel 16 mantıksal çekirdek, toplamda 32 mantıksal çekirdeği bulunan bir iş istasyonunda rahatlıkla 50 telsizden oluşan büyüklükteki bir çevrimin öykümü yapılabilmektedir. Çok sayıda iş istasyonu kullanılarak pek çok çevrimden oluşan telsiz şebekeleri inşa edilebilir. Buradaki en önemli sorun hava arayüzü benzetiminin tüm sistemin darboğazı haline gelmesidir; hava arayüzü benzetim hızı tüm sistemin hızını belirlemektedir.

SIMEMMSIS'i oluşturan bazı modüller takılıp çıkartılabilen lego parçaları gibidir; tasarımcı ihtiyaçları doğrultusunda alt-modüller değiştirilebilmektedir. Örnek vermek gerekirse hava arayüzü benzetimi, OPNET [1] üzerinde yapılabileceği gibi, OPNET kullanılmadan da yapılabilir. İki benzetim seçeneği arasındaki en önemli farklar benzetim gerçekçiliği ve SIMEMMSIS'in konuşlandırılması (İng: deployment) için gereksinim duyulan bilgisayar altyapısının büyüklüğüdür. Sistem mühendisliği çalışmaları için daha uygun olan OPNET'li sistemde, gerçekçi coğrafya koşulları dikkate alınarak benzetim yapılır, ancak OPNET sunucu bilgisayarına ihtiyaç duyulmaktadır; bu sebeple aynı anda yapılabilecek benzetim sayısının OPNET lisans sayısıyla sınırlandırılmış olmaktadır. Yazılım geliştirici ve test mühendisleri için daha uygun olan daha az gerçekçi OPNET'siz benzetim seçeneğinde ise OPNET lisansına ihtiyaç duyulmaz, hatta tüm SIMEMMSIS tek bir bilgisayar üzerinde koşturulabilir, yazılım ve dalga şeklinin performansı yazılım tasarımcısı tarafından kolaylıkla gözlemlenebilir, hata ayıklaması yapılabilir.

### 4. SIMEMMSIS'TE ÖLÇEKLENDİRME VE PERFORMANS

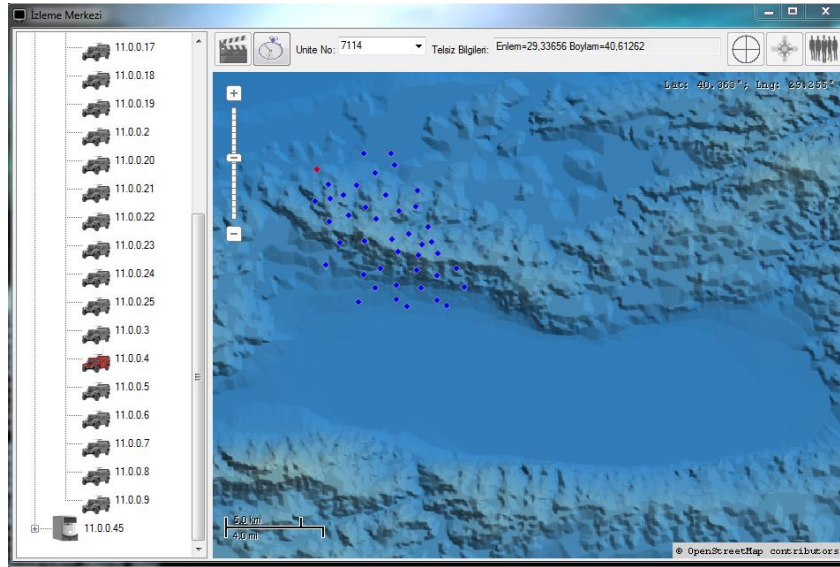
SIMEMMSIS kapsamında benzetimi ve öykünümü yapılan telsiz şebekelerinde, haberleşme servislerinin performansı alternatif çözümlüklerde ölçülebilir. Tüm sistem, tek çevrim, tek cihaz, tek trafik modeli (Telsizlere birden fazla trafik modeli bağlanabilmektedir.), tek modelin belirli bir süre içindeki aktivitesi, hatta tek bir veri paketinin performansı ölçülebilir. SIMEMMSIS sisteminde önceden hazırlanmış olan senaryolar koşturulur; her bir senaryo telsizler için hazırlanmış trafik ve hareket modellerini içerir.

Her telsiz için trafik modelleri bir araya getirilerek kullanıcı verileri oluşturulur ve telsizlere verilir. Bu sırada telsizler buldukları coğrafyaya ve zamana göre değişen sinyal gürültü oranlarında alma – gönderme yaparlar. Telsizlerin koordinatları benzetim boyunca hareket modellerine göre güncellenir. Karşı uç veya uçlara ulaşan paketler

incelenerek sıralı paketler, sırasız paketler, kaybolan paketler, çok geç gelen paketler, paket içi veri bozulmaları tespit edilir ve aktarılan tüm paketler kaydedilir.

Sistemin performansının analizi ise SIMEMESIS dışında bulunan MATLAB [8], OCTAVE [9] gibi programlarca yerine getirilir. Kaydedilen veri miktarı çok fazla olduğundan, analizlerin yapılması yüksek işlem gücü gerektirir ve farklı yaklaşımlarla analizler yapılabilir. Bahse konu analizler ve bu analizlerin geliştirilmesi akademik çalışmalarla desteklenebilir.

Şekil 4'te verilen SIMEMESIS senaryosunda, İznik gölünün kuzey batısına konuşlandırılmış 43 telsiz içeren bir çevrim yer almaktadır. Şekil 5'te öykünümü yapılan sanal telsizlerin kullanıcı arayüzleri verilmiştir; telsizlerin yönetimi bahse konu bu kullanıcı arayüzleri vasıtasıyla yapılmaktadır. Şekil 6'da ise kurgulanmış performans sonuçlarına yer verilmiştir.



Şekil 4. Çevrimin Harita Üzerindeki Dağılımı





Şekil 5. Kullanıcı arayüzleri

Model No	Kaynak	Hedef	Min Pkt Uz	Max Pkt Uz	Mn Gen	Max Gen	Gönderici Portu	Alıcı Portu	Paket Sayısı	Durum
0	7116	7119	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16185.855 bayt/saniye Kayp Ven:0.000 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.115 saniye
1	7131	7125	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16185.380 bayt/saniye Kayp Ven:0.000 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.163 saniye
10	7114	7115	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16193.870 bayt/saniye Kayp Ven:10.767 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.151 saniye
11	7123	7113	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16184.778 bayt/saniye Kayp Ven:0.000 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.170 saniye
12	7112	7127	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16194.936 bayt/saniye Kayp Ven:0.000 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.141 saniye
12	7127	7129	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16189.445 bayt/saniye Kayp Ven:0.000 bayt/saniye Sıra# Ven:0.803 bayt/saniye Geckme:0.114 saniye
14	7129	7118	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16191.651 bayt/saniye Kayp Ven:0.000 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.172 saniye
15	7128	7123	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16190.405 bayt/saniye Kayp Ven:13.510 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.128 saniye
16	7111	7128	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16181.532 bayt/saniye Kayp Ven:0.000 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.120 saniye
17	7116	7129	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:15751.771 bayt/saniye Kayp Ven:435.661 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.181 saniye
18	7124	7125	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16177.290 bayt/saniye Kayp Ven:0.000 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.132 saniye
19	7130	7112	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16171.663 bayt/saniye Kayp Ven:0.000 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.112 saniye
2	7123	7124	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16192.273 bayt/saniye Kayp Ven:0.000 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.163 saniye
20	7131	7134	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16178.181 bayt/saniye Kayp Ven:0.746 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.142 saniye
21	7127	7112	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16175.204 bayt/saniye Kayp Ven:0.000 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.116 saniye
22	7133	7134	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16192.163 bayt/saniye Kayp Ven:0.000 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.173 saniye
23	7134	7124	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16145.971 bayt/saniye Kayp Ven:46.383 bayt/saniye Sıra# Ven:0.136 bayt/saniye Geckme:0.107 saniye
24	7114	7130	1024	1500	60	80	1001	1002	10000000	Sıra# Ven:30032.277 bayt/saniye Kayp Ven:0.000 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.167 saniye
25	7120	7139	1024	1500	60	80	1001	1002	10000000	Sıra# Ven:30026.363 bayt/saniye Kayp Ven:0.000 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.216 saniye
26	7146	7132	1024	1500	60	80	1001	1002	10000000	Sıra# Ven:30026.145 bayt/saniye Kayp Ven:0.000 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.096 saniye
27	7125	7111	1024	1500	60	80	1001	1002	10000000	Sıra# Ven:30020.124 bayt/saniye Kayp Ven:8.175 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.093 saniye
28	7149	7139	1024	1500	60	80	1001	1002	10000000	Sıra# Ven:30030.545 bayt/saniye Kayp Ven:0.000 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.081 saniye
29	7143	7126	1024	1500	60	80	1001	1002	10000000	Sıra# Ven:29975.906 bayt/saniye Kayp Ven:24.101 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.165 saniye
3	7126	7119	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16192.470 bayt/saniye Kayp Ven:0.046 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.165 saniye
30	7117	7152	1024	1500	60	80	1001	1002	10000000	Sıra# Ven:28349.182 bayt/saniye Kayp Ven:1631.240 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.084 saniye
31	7126	7145	1024	1500	60	80	1001	1002	10000000	Sıra# Ven:30029.343 bayt/saniye Kayp Ven:0.000 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:1.336 saniye
32	7151	7122	1024	1500	60	80	1001	1002	10000000	Sıra# Ven:30029.032 bayt/saniye Kayp Ven:0.000 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.080 saniye
33	7113	7143	1024	1500	60	80	1001	1002	10000000	Sıra# Ven:30030.701 bayt/saniye Kayp Ven:0.000 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.110 saniye
4	7111	7119	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16143.100 bayt/saniye Kayp Ven:42.289 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.109 saniye
5	7113	7126	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16184.399 bayt/saniye Kayp Ven:3.882 bayt/saniye Sıra# Ven:0.231 bayt/saniye Geckme:0.695 saniye
6	7133	7126	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16029.261 bayt/saniye Kayp Ven:150.540 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.669 saniye
7	7126	7127	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16204.290 bayt/saniye Kayp Ven:0.000 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.751 saniye
8	7119	7114	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16191.322 bayt/saniye Kayp Ven:0.000 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.141 saniye
9	7129	7125	64	1500	40	120	1001	1002	8000000	Sıra# Ven:16183.388 bayt/saniye Kayp Ven:8.452 bayt/saniye Sıra# Ven:0.000 bayt/saniye Geckme:0.161 saniye

Şekil 6. Kurgulanmış performans sonuçları

## 5. SONUÇ

Bu makalede ASELSAN Haberleşme ve Bilgi Teknolojileri Mühendislik Grup Başkanlığı tarafından geliştirilen SIMEMESIS Benzetim ve Öykünüm Ortamı anlatılmıştır. SIMEMESIS karmaşık dalga şekli tasarımlarının geliştirilmesi, doğrulanması ve iyileştirilmesi amacıyla kullanılan ölçeklendirilebilen bir yazılım sistemidir. SIMEMESIS'te dalga şekli gerçekleştirilmesinin en yüklü kısmını oluşturan protokoller ve algoritmaların yer aldığı dalga şekli yazılımları öykünümlendirilirken, hava ortamının ve kullanıcı arayüzlerinin ise benzetimi yapılmaktadır.

SIMEMESIS'te benzetim, iki modülden, hava arayüzü ve kullanıcı arayüzleri benzetiminden oluşmaktadır. Hava arayüzü benzetimi telsiz konum ve hareket gibi coğrafi bilgiler işlenerek yapılmaktadır. Kullanıcı arayüzü benzetimi ise telsizlere trafik modeli atanmasıyla yerine getirilmektedir. Her bir telsize çeşitli senaryolara göre trafik modelleri atanabilmektedir. Öykünüm dalga şekli yazılımları, modem öykünümü, kullanıcı arayüzleri öykünümü, sanal kart destek paketi, VxWorks API öykünümü ve Windows gerçek zaman öykünümü modüllerinden oluşmaktadır. Öykünümü yapılan dalga şekli yazılımları gerçek telsizdeki sıra, öncelik ve senaryolara sadık kalarak çalışmaktadırlar. Bu yüzden gerçek telsiz şebekeleri sahada nasıl çalışıyorlarsa, SIMEMESIS'teki sanal çevrimler aynı şekilde çalışmaktadırlar.

SIMEMESIS'in en önemli avantajı gerçek dünyada kurulamayacak kadar maliyetli ve karmaşık telsiz şebekelerinin sanal ortamda kurulmasını mümkün kılmasıdır. Kurulan sanal telsiz şebekeleriyle dalga şekli ve tasarım maliyet etkin bir şekilde test edilebilmektedir, dalga şekli tasarımcıları ve yazılım geliştiricilere yapılan dönüşler sayesinde, tasarım ve yazılım iyileştirilebilmektedir. Yazılımcıların görüşüne göre SIMEMESIS yazılım tasarım sürecini en az yüzde elli oranında kısaltmaktadır, hata tespitini ve senaryo testlerini gerçek telsizlerden oluşan sistemlere göreyse oldukça kolaylaştırmaktadır. SIMEMESIS'in diğer bir avantajı da bünyesinde öykünümü yapılan yazılımların başka işletim sistemi ve donanımlara aktarılmasının mümkün kılmasıdır. Son olarak SIMEMESIS'te gönderilen ve alınan tüm veri paketlerinin kaydı tutulduğundan, istenilen çözünürlükte performans analizi gerçekleştirilmesi mümkün olabilmektedir.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] "Wind River VxWorks", <http://www.windriver.com/products/vxworks>.
- [2] "OPNET Network Simulator", <http://www.opnet.com>
- [3] "Win32 API", <https://msdn.microsoft.com/en-un/library/windows/desktop/>
- [4] "Cygwin", <http://www.cygwin.com>
- [5] "Intime ForWindows", <http://www.tenasys.com/overview-ifw>
- [6] F. Bai, A. Helmy, A Survey of Mobility Models in Wireless Adhoc Networks, 2004, <http://nile.usc.edu/helmy/important/Modified-Chapter1-5-30-04.pdf>
- [7] N. Aschenbruck, E. Gerhards-Padilla, and P. Martini, A survey on mobility models for performance analysis in tactical mobile networks, Journal of Telecommunications and Information Technology, vol. 2, pp. 54-61, 2008.
- [8] "Matlab", <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [9] "Octave", <http://www.gnu.org/software/octave/>

## MODEL ROKET FIRLATMA RAMPASI YAPISAL TASARIM VE ANALİZLERİ

Nehir Atasay <sup>(a)</sup>, Simge Melis Muratoğlu <sup>(a)</sup>, Ceyhun Tola <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup>Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Uzay Mühendisliği Bölümü,  
{nehir.atasay,simgemelis.muratoglu,ctola}@stu.thk.edu.tr

### ÖZ

Keşfetmeyi ve sorgulamayı seven insanların havacılığa olan ilgisinin doğal bir sonucu olarak ortaya çıkan model roketler ilk olarak 1950’li yıllarda Orville Carlisle tarafından geliştirilmiştir. Uzay araştırmalarının ivme kazandığı yıllarda amatör roketçiliğe olan ilgi küresel ölçekte artmış ve günümüzde, ulusal ve uluslararası ölçekte amatör roket yarışmaları düzenlenmeye başlanmıştır. Tasarım ve üretim süreci yoğun çaba gerektiren model roketlerin ana amacı, roketi hedeflenen irtifaya ulaştırmak ve sonrasında bir kurtarma sistemi yardımıyla sağlam şekilde yere indirmektir. Bu noktada, roket tasarımının yanı sıra; tasarlanan roketin doğru açıda fırlatılmasını sağlayan en önemli unsur fırlatma rampasıdır. Verimli bir fırlatma rampası mümkün olduğunca hafif olmalı, aynı zamanda fırlatma esnasında farklı ölçeklerdeki model roketlerin lülesinden çıkan gazların üzerinde oluşturduğu gerilmelere dayanabilmelidir. Model roketlerin genellikle hobi amaçlı kullanıldığı dikkate alındığında fırlatma rampalarının kolay temin edilebilir ve düşük maliyete sahip malzemelerden üretilmesi gerekmektedir. Ayrıca, portatif bir rampa tasarımının yapılması sistemin kolaylıkla farklı fırlatma konumlarına taşınmasının önünü açacaktır. Çalışma kapsamında, çeşitli boyutlardaki model roketleri, yapısal bütünlüğünü kaybetmeden fırlatma dayanımına sahip, mümkün olduğunca hafif, ekonomik ve portatif bir model roket fırlatma rampasının tasarımı yapılmıştır. Rampanın yapısal tasarımı Solidworks ticari çizim programında tamamlanmış ve tasarım 1500 N’luk fırlatma yükü altında statik olarak analiz edilerek gerilme, gerinim ve yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Ayrıca aynı yük altında burkulma analizleri de gerçekteştirilen tasarıma ait sonuçlar çalışma kapsamında yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Fırlatma Rampası, Model Roket, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Yapısal Analiz, Yapısal Tasarım

## **STRUCTURAL DESIGN AND ANALYSIS OF A MODEL ROCKET LAUNCH PAD**

### **ABSTRACT**

Model rockets were first developed by Orville Carlisle in the 1950s as a natural consequence of the interest of people who love to explore and examine the aviation. In those years when space exploration gained momentum, interest in amateur rocketry increased on a global scale and nowadays national and international amateur rocket competitions have been organized. The main purpose of the design and production process of model rockets that require intensive effort is ascent the rocket to a target altitude and then descent it to the ground with the assistance of a rescue system. For this critical purpose, besides the rocket design; one of the most significant tools that provides the launch process of the model rocket with correct angle of attack is launch pad. An efficient launch platform should be as light as possible, but it should also be able to withstand the stresses governing from the exhaust gases of model rockets having different thrust values. Considering that model rockets are generally used for hobby purposes, launch pads should be produced from easily available and low-cost materials. Additionally, a portable launch pad design will allow the system to be easily moved to different launch locations. Within the scope of this study, light-weight, low-cost and portable model rocket launch pad that can endure the launch loads without losing its structural integrity has been designed on Solidworks environment. Then, its static finite element analysis is accomplished under 1500 N plume load to obtain stress, strain and displacement values. Buckling analysis of the design is also accomplished under the same amount of load and structural analysis results are interpreted within the scope of the study.

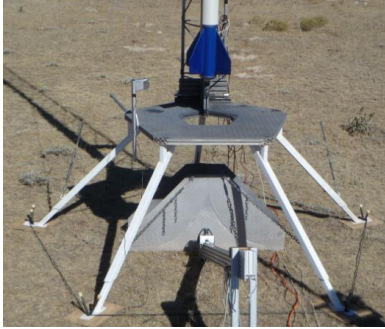
**Keywords:** Launch Pad, Model Rocket, Finite Element Method, Structural Analysis, Structural Design

## 1. GİRİŞ

İkinci Dünya Savaşı'nı takip eden yıllarda havacılığa ve roket teknolojisine olan ilgi artmış, 1969 yılında aya ayak basılmasıyla birlikte bu ilgi küresel ölçüğe yayılmıştır. Günümüzde havacılık alanında tasarım ve üretime yönelik birçok farklı yarışma düzenlenmekte ve pek çok farklı meslek grubundan katılımcıları barındıran gruplar bu yarışmalarda boy göstermektedir. Temel amacı havacılık ve mühendisliğe ilgi duyan kimselere tasarım ve üretimi sevdirmek olan bu yarışmalar aynı zamanda geleceğin mühendislerinin tecrübe kazanmasına önayak olmaktadır.

Çalışma kapsamında, model roket yarışmalarında kullanılacak ölçülere sahip, kolay temin edilebilir ve ekonomik malzemelerden üretilen, kolayca sökülüp takılabilen mümkün olduğunca dayanıklı ve hafif bir model roket fırlatma rampasının tasarlanarak bu tasarıma ait yapısal analizlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede kazanılacak tecrübe ile daha büyük ölçekli fırlatma rampalarının tasarım ve yapısal optimizasyon süreçlerinin kısaltılması mümkün olacaktır.

Tasarıma başlamadan önce mevcut sistemler incelenmiştir. Şekil-1'de bu amaçla kullanılan 4 farklı sistem gösterilmiştir.



a) Tasarım-1 [1]



b) Tasarım-2 [2]



c) Tasarım-3 [3]



d) Tasarım-4 [4]

**Şekil 1.** Mevcut fırlatma rampası tasarımları

Literatür araştırması sonrasında model roket rampası tasarımı üzerine özelleşmiş herhangi bir çalışmaya rastlanmadığı için daha önce literatürde bu alanda yapılmış olan bilimsel nitelikli çalışmalara hazırlanan yayın kapsamında yer verilememiştir.

1 numaralı tasarım, görece büyük boyutlu ve dolayısıyla daha yüksek toplam darbe ve itki üreten model roket motorlarının (K, L, M, N sınıfı vb.) kullanımına uygun olup, tasarımın vidalı bağlantılara sahip olması nedeniyle kurulum ve söküm işlemleri zaman almaktadır. Görece düşük seviye itki ve toplam darbeye sahip (A, B, C sınıfı) model roket motorlarını fırlatmak amacıyla tasarlanan 2, 3 ve 4 numaralı fırlatma rampaları ise kolayca katlanabilen portatif bir tasarıma sahiptir. Ancak bu tasarımlar büyük ölçekli model roketlerin fırlatılmasına yapısal dayanım ve geometrik boyut bakımından izin vermemektedir. Buna ilaveten, 2, 3 ve 4 numaralı tasarımlar seri olarak üretilmekte ve yurt dışından döviz ile ithal edildiği model roketçiler açısından maliyetlidir. Dolayısıyla, çalışma kapsamında tasarlanan model roket fırlatma rampasının 1 numaralı tasarımın yoksun olduğu portatiflik; 2, 3 ve 4 numaralı tasarımların yoksun olduğu yüksek fırlatma kapasitesi ve düşük maliyet gibi avantajları bünyesinde barındırması amaçlanmıştır.

## 2. TASARIM

### 2.1. Geometri

Solidworks ortamında tasarımı tamamlanan ve Şekil-2’de sunulan model roket fırlatma rampası 25 bağımsız parçadan oluşmaktadır. Fırlatılacak roketi kılavuzluk edecek olan çubuk çelikten, roketin yerleştirileceği fırlatma tablası, tasarımın ısıdan asgari düzeyde etkilenmesi için alüminyumdan tasarlanmış olup bu parçalar haricinde kalan bütün taşıyıcı parçalar ve bağlantı parçaları PVC (Polyvinyl chloride) malzemesinden tasarlanmıştır. Kolayca takılıp sökülebilen bu tasarımın fırlatma tablası yerden yaklaşık 90 cm yükseklikte olup tasarımın ağırlığı yaklaşık 17 kg’dır.



Şekil 2. Tasarlanan model roket fırlatma rampası

## 2.2. Malzeme

Tasarımda kullanılan PVC, Al-2024-T6 ve AISI-1006 çelik malzemelerin mekanik özellikleri Tablo-1’de özetlenmiştir.

**Tablo 1.** Malzemelerin mekanik özellikleri

Özellik	AISI-1006 Çelik [5]	Al-2024-T6 [6]	PVC (Ortalama) [7]	Birim
E	206000	72400	2160	MPa
$\nu$	0.29	0.33	0.4	-
$\rho$	7872	2780	1300	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma_{yield}$	285	248 (@ 150°C)	14	MPa

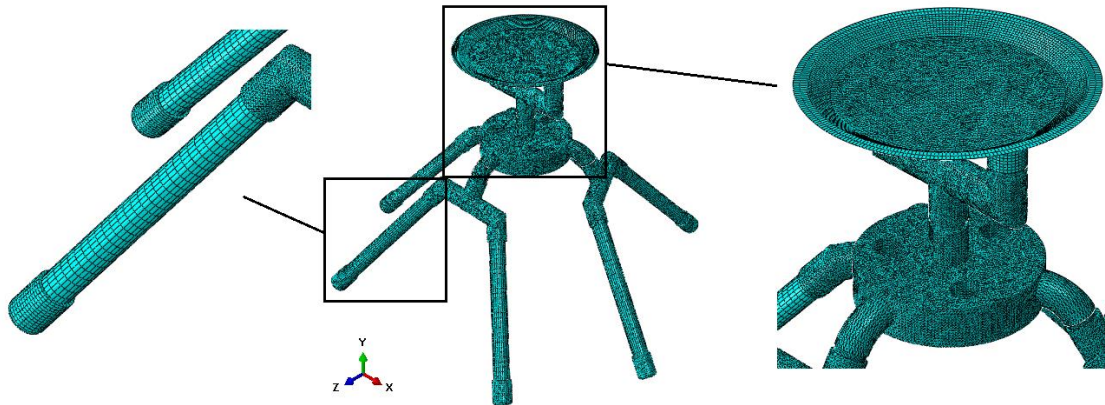
*Not.* E = Elastisite Modülü .  $\nu$  = Poisson Oranı.  $\rho$  = Yoğunluk.  $\sigma_{yield}$  = Akma Dayanımı.

## 3. YAPISAL ANALİZLER

Tasarlanan sistem önce model roketlerin ateşlenmesi sonucunda oluşan 1500 N’luk plüm yükü ve kendi ağırlığı altında statik olarak analiz edilerek gerilme, gerinim, yer değiştirme değerleri elde edilmiş ve daha sonra aynı yük altında sistemin burkulma analizleri tamamlanmıştır. Bütün bu analizler Abaqus 6.12 ticari yazılımında gerçekleştirilmiştir.

### 3.1. Sonlu Elemanlar Modeli

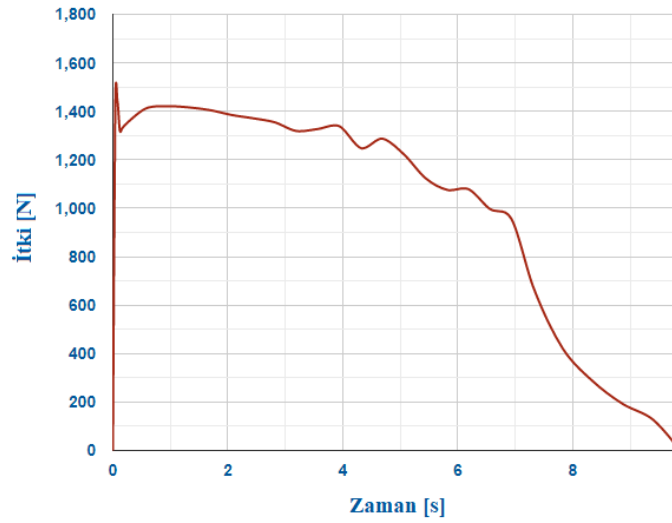
Sonlu elemanlar modeli oluşturulurken önce 25 bağımsız parçaya ait çözüm ağları oluşturulmuş daha sonra bu parçalar geçme bölgelerinden yapıştırılmıştır. Şekil-3’te gösterilen sonlu elemanlar modeli 651975 düğüm noktası ve 367891 elemandan oluşmaktadır. Çözüm ağının sonuçlar üzerindeki etkisi göz önüne alınarak çözüm ağı hassasiyet çalışmaları sonucunda oluşturulan bu sonlu elemanlar ağı ile sonuçların eleman sayısından bağımsızlığı temin edilmiştir.



**Şekil 3.** Çözüm ağı

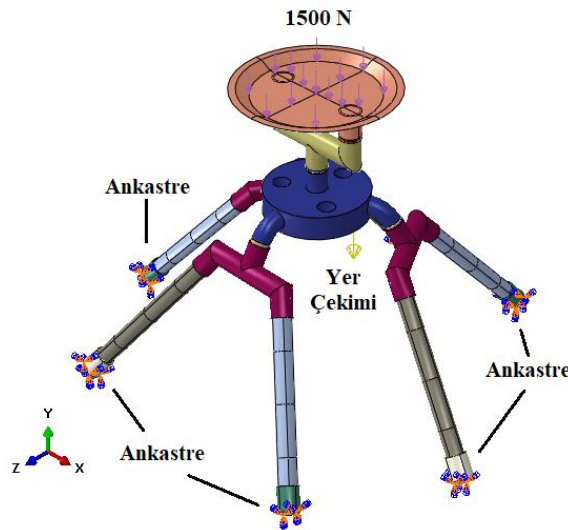
### 3.2. Sınır Koşulları ve Yükler

Model roket fırlatma rampası, fırlatma sırasında roket plümünden kaynaklanan y yönündeki 1500 N'luk tepki kuvvetine ve yapının kendi ağırlığına dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Bu da tasarımın fırlatma anında 1500 N'luk ya da daha az tepki kuvveti üreten HyperTEK M1001 gibi roket motorlarının kullanımına imkân tanımaktadır. Şekil 4'te bu motora ait itki zaman grafiği sunulmuştur.



Şekil 4. HyperTEK M1001 roket motoru itki – zaman grafiği [8]

Sonlu elemanlar modelinde 1500 N'luk plüm yükü fırlatma tablasının iç yüzeyine basınç yükü olarak dağıtılmış ve  $9810 \text{ N/mm}^2$  (1g) yerçekimi ivmesi sisteme uygulandıktan sonra model roket fırlatma rampası ayaklarından ankastre olarak sabitlenmiştir. Yükler ve sınır koşulları Şekil 5'te gösterilmiştir.

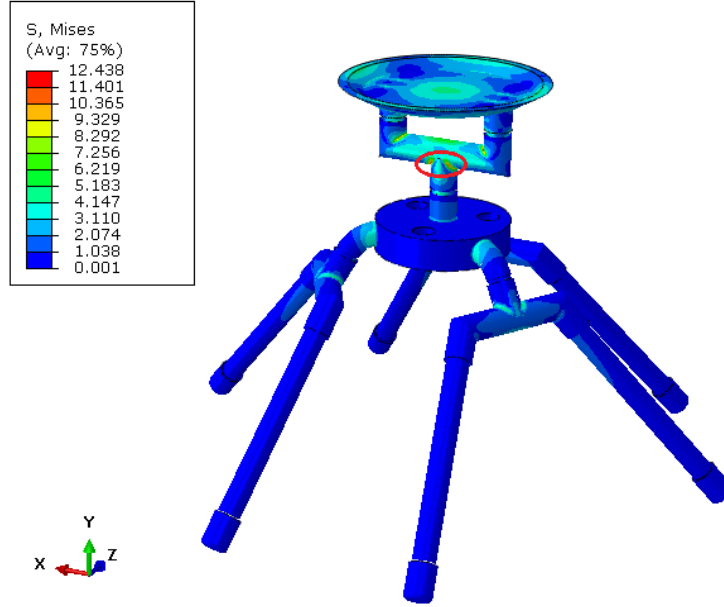


Şekil 5. Sınır koşulları ve yükler



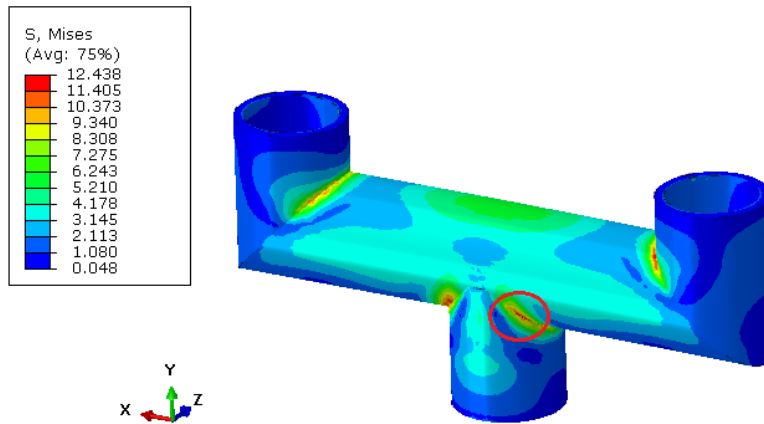
### 3.3. Statik Ateşleme Analizleri Sonucu

Yapısal analizlerin ilk aşamasında tasarımın statik analizleri gerçekleştirilmiştir. Mevcut yükler altındaki statik analizler sonucunda montaj üzerinde oluşan Von Mises gerilme dağılımı Şekil 6’da sunulmuştur.



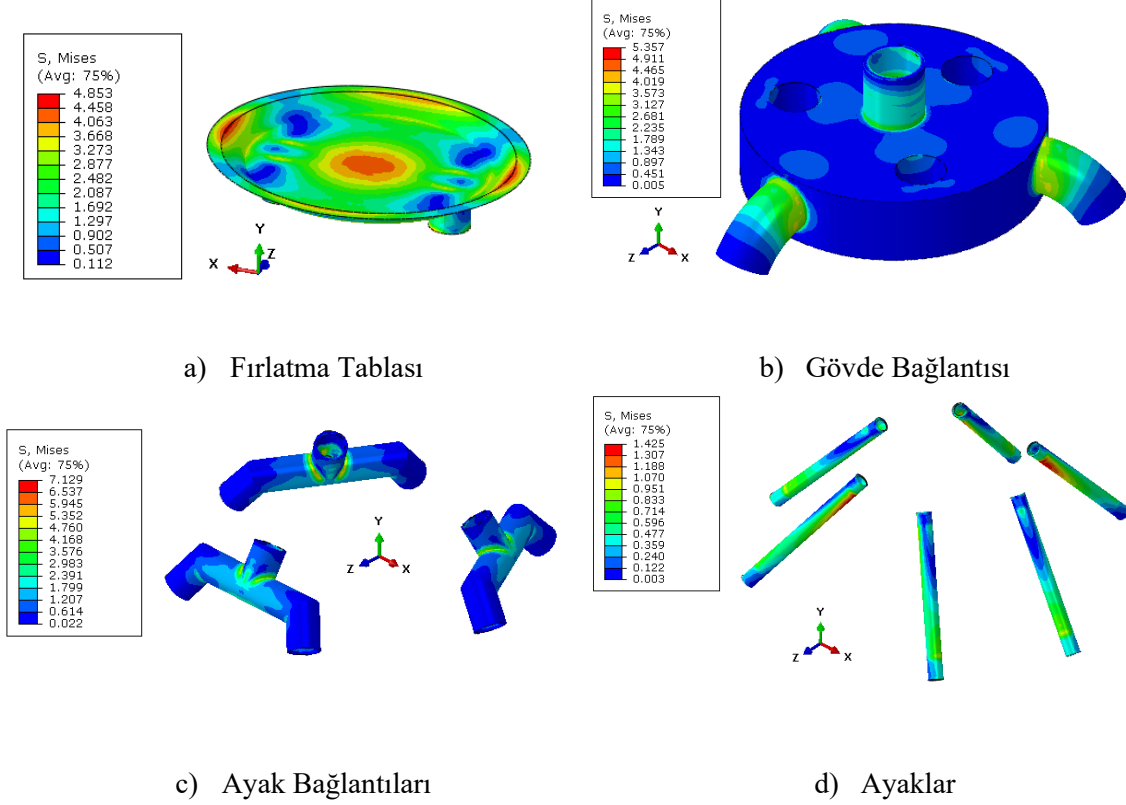
**Şekil 6.** Fırlatma rampası montajı Von Mises gerilmesi dağılımı [MPa]

Şekil 6 incelendiğinde maksimum gerilmenin Şekil 7’de detaylı sonuçları sunulan fırlatma tablası ile gövde arasındaki bağlantı parçasında olduğu gözlenmiştir. PVC’nin ortalama akma dayanımının 14 MPa civarında olduğu göz önüne alındığında; PVC’den imal edilmesi planlanan bu parçada ve PVC’den imal edilen diğer parçaların hiçbirinde mevcut yükleme koşulları altında plastik deformasyon (kalıcı deformasyon) olmayacağı öngörülmektedir.



**Şekil 7.** Fırlatma tablası ara bağlantı parçası Von Mises gerilmesi dağılımı [MPa]

Tasarımdaki diğer parçalara ait Von Mises gerilmesi değerleri Şekil 8’de gösterilmiştir.

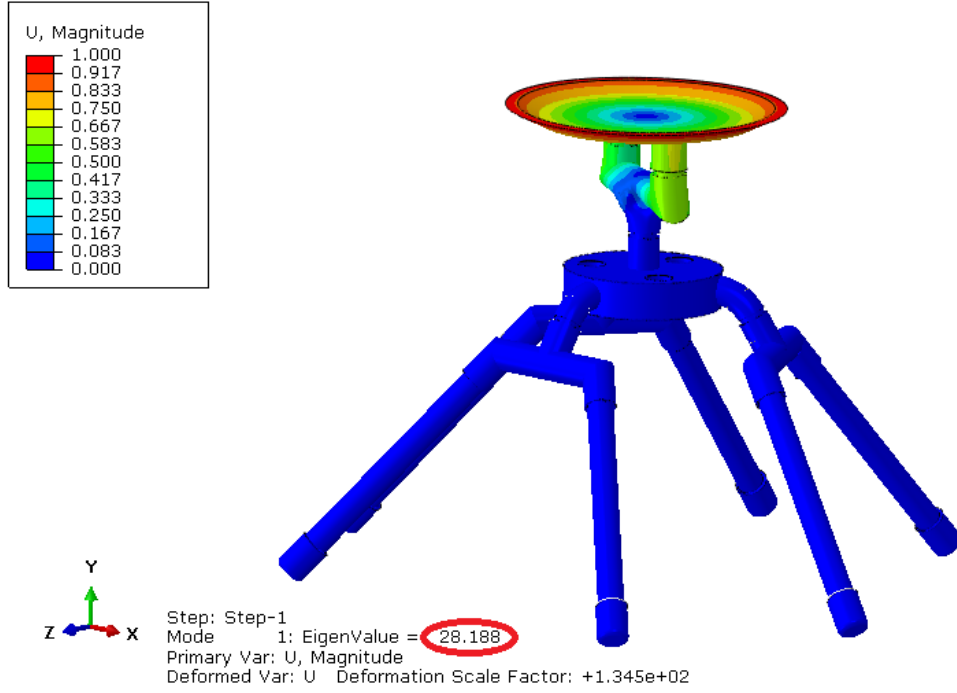


Şekil 8. Diğer parçalara ait Von Mises gerilmesi dağılımı [MPa]

Buna göre, alüminyumdan üretilen fırlatma tabağı sistemi hafifletmek amacıyla daha da inceltiler.

### 3.4. Burkulma Analizleri Sonucu

Basma gerilmesine maruz kalan yapıların burkulma riski göz önüne alındığında tasarlanan model roket fırlatma rampasının mevcut yükler altında burkulma analizlerinin yapılması önem arz etmektedir. Statik analiz modeli ile aynı çözüm ağı yük ve sınır koşullarına sahip olan burkulma analizi modeli çözümlendiğinde birinci burkulma modunun özdeğeri Şekil 9’dan görüleceği üzere 28.188’dir. Buna göre, tasarlanan sistemin burkulmaya maruz kalmadığını, burkulma durumunun oluşması için halihazırda analiz edilen mevcut yüklemenin yaklaşık 28 katına çıkartılması gerektiği anlaşılmaktadır.



**Şekil 9.** Burkulma analizi sonucu [Özdeğer = 28.188]

#### 4. SONUÇ

Çalışma kapsamında, A sınıfı küçük model roket motorlarından bazı M sınıfı roket motorlarına kadar ateşleme anında oluşturduğu itki değeri 1500 N’u geçmeyen birçok farklı kategorideki model roket motorunu fırlatma kapasitesine sahip, kolayca sökülüp takılabilen düşük maliyetli ve görece hafif bir fırlatma rampasının tasarımı yapılmış ve sisteme ait yapısal analizler tamamlanmıştır. Yapılan araştırmalara göre, bu alanda daha önce literatürde benzer bir çalışma yapılmamış olup analiz sonuçlarına göre tasarımda ağırlıklı olarak PVC malzemenin kullanımının maliyeti azalttığı ve yapısal dayanım bakımından herhangi bir soruna yol açmadığı ve bu sayede kolayca erişilebilen PVC su borusu ve türevi ekonomik malzemelerin bu türde bir fırlatma rampasının üretiminde kullanılabileceği görülmüştür. Yapılan çalışma, ülkemiz açısından maliyet etkin bir model roket fırlatma rampasının geliştirilmesi açısından etkilidir. Geliştirilecek ufak boyutlu model roket rampalarından fırlatılacak düşük maliyetli roketlerle görece küçük karargâh binaları ve karakolların maliyet etkin şekilde korunmasına aracılık edebilir. Bunun yanında, düşük maliyete sahip kolayca monte edilebilen hafif bir model roket fırlatma rampasının geliştirilmesi ülkemizde model roketçiliğe ve hava savunma sistemlerine duyulan ilgiyi arttırarak gençlerin uçak, uzay veya havacılık ve uzay mühendisliği gibi katma değeri yüksek bölümlere yönelmesinin önünü açarak yüksek teknoloji barındıran tasarımların tamamen yerli mühendisler tarafından yapılmasına aracılık edecektir.

## 5. KAYNAKÇA

- [1] Launch Pad, Rocketary Photography, <http://www.rocketryphotography.com/LaunchPad.html#prettyPhoto>, erişim tarihi 09.03.2019.
- [2] Macklin Model Rocket Launch Pad, Macklin Missile Works, <http://www.macklinmissileworks.com/shop/macklin-model-rocket-launch-pad> erişim tarihi 09.03.2019.
- [3] E Model Rocket Launch Pad, Rocketarium, <https://www.rocketarium.com/Launch-Equipment/Pads/E?cPath=5&> erişim tarihi 09.03.2019.
- [4] Portable Model Rocket Launch Pad, Makezine, <https://makezine.com/projects/portable-model-rocket-launch-pad/> erişim tarihi 09.03.2019.
- [5] AISI 1006 Steel, cold drawn, Matweb Material Property Database, <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9d1e943f7daf49ef92e1d8261a8c6fc6>, erişim tarihi 16.03.2019.
- [6] Aluminum 2024-T6, Matweb Material Property Database, <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ecf8530875cb4ded9675b827f77bfac5>, erişim tarihi 16.03.2019.
- [7] Overview of materials for PVC, Molded, Matweb Material Property Database, <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=29340c5df4bf4de0a511419ce86db2b>, erişim tarihi 16.03.2019.
- [8] HyperTek M1001-5478CCRGM, Rocketreviews, <https://www.rocketreviews.com/hypertek-m1001-5478ccrgm.html>, erişim tarihi 20.05.2019.

## HAVADAN KARAYA TAKTİK GÖREV PLANLAMA EN İYİLEME ARACI GELİŞTİRİLMESİ

Mehmet Akgül <sup>(a)</sup>, Güneş Aydın<sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> ROKETSAN A.Ş., Kemalpaşa Mahallesi Şehit Yüzbaşı Adem Kutlu Sokak No:21  
06780 Elmadağ ANKARA, {makgul,gunes.aydin}@roketsan.com.tr

### ÖZ

Silahlı kuvvetler envanterinde bulunan çok sayıda farklı özellik ve kabiliyetteki hava platformlar ile bu platformlara ait alt sistemler günümüz şartlarında büyük ölçüde milli imkânlar ile geliştirilmektedir. Platformlar üzerindeki millilik oranının artması, yine milli imkânlar ile geliştirilen birçok mühimmat ve füze sisteminin ilgili platformlarda kullanılabilir/uyumlandırılabilir hale getirilmesine olanak sağlamıştır. Silah uyumlandırmasındaki esneklik görev planlama safhasını karmaşıktır. Bu karmaşıklık planlayıcının göreve uygun maliyet, zaman ve başarımlarında ideal hava platformu ve mühimmat ikilisini seçememe riskini ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle ilgili riskleri ortadan kaldıracak ve görev planlamasını kolaylaştıracak bir en iyileme aracına ihtiyaç duyulduğu değerlendirilmiştir.

Bu bildiri kapsamında entegrasyon ve planlama çalışmalarında kullanılacak, genetik algoritma metotlarını kullanan, tekil veya çoklu görev kısıtlarını karşılayabilen bir görev planı en iyileme aracı Matlab/Simulink altyapısı kullanılarak geliştirilmiştir. Geliştirilen bu araç, içerisinde barındırdığı hava platformu ve mühimmat veri tabanını kullanarak, belirlenen görev senaryosunda üç boyutlu bir benzetim altyapısında, görev isterlerine göre başarımlar, maliyet ve/veya zamanı en iyilemektedir. En iyileme sonucunda görev için en uygun hava platformu ve mühimmat yükleme konfigürasyonu planlayıcıya iletilmektedir. Bu çalışmada ilgili en iyileme aracı detayları anlatılarak örnek bir görev senaryosu üzerinde farklı görev gereksinimleri için üretilen sonuçlar verilmiş ve tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** En iyileme, genetik algoritma, görev planlama, Matlab, mühimmat, modelleme, Simulink, simülasyon

## AIR TO GROUND TACTICAL MISSION OPTIMIZATION TOOL

### ABSTRACT

Aerial platforms in the Armed Forces inventory with many different features/capabilities and subsystems of these platforms are being developed with national means to a great extent in today's conditions. The increase in the nationality rate on the platforms has enabled many munition and missile systems developed by national means to be used / adaptable on the relevant platforms. The flexibility in weapon integration capability complicates the mission planning phase. This complexity raises the risk of the planner not being able to select the ideal air platform and munition/missile duo for cost-effective, time and performance constraints. Therefore, it was evaluated that an optimization tool was needed to eliminate the risks and simplify the mission planning phase.

Within the scope of this paper, an optimization tool that can be used in integration and planning studies, using genetic algorithm methods and meeting single or multi-task constraints has been developed by using Matlab/Simulink infrastructure. This developed tool, containing an aerial platform and munition database, optimizes performance, cost and/or time in a three-dimensional simulation infrastructure according to mission requirements in the specified scenario. As a result of optimization, the most suitable air platform and munition loading configuration for the mission are transmitted to the planner. In this study, the results of different mission requirements are presented and discussed on a sample scenario by explaining the details of the optimization tool.

**Keywords:** Optimization, genetic algorithm, mission planning, Matlab, munition, modeling, Simulink, simulation

## 1. GİRİŞ

Taktik görevlerde görev planlama ihtiyacı zaman ve mevcut yeteneklerin verimli kullanımları ön plana çıktığından geçmiş dönemlere göre daha karmaşık hale gelmiştir. [1] Görev planlayıcısı envanterindeki en iyi seçeneği seçmekle kalmayıp aynı zamanda elindeki yetenekleri oluşacak yeni gereksinimlere göre ileri taşınmalıdır. Bu bağlamda görev planlayıcısının göz önünde bulundurması gereken unsurlar envanter mevcudu, mühimmat maliyeti, platform idamesi, hedef çeşitliliği, hedef menzili, zaman kısıtları ve çeşitli çevresel faktörler olarak sıralanabilir. [2]

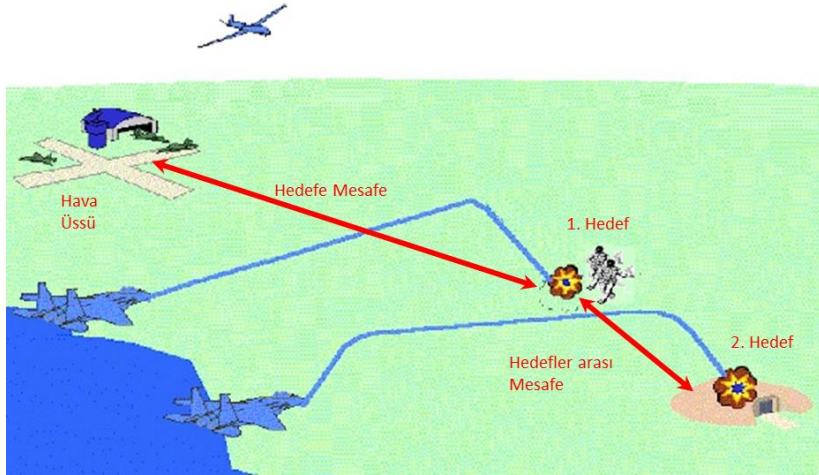
Bu çalışma kapsamında hava yer operasyonları için bir en iyileme aracı geliştirilerek bu araç içerisinde var olan platform ve mühimmat veritabanlarından ilgili görev senaryosu için en iyi platform mühimmat eşleşmesi seçilmektedir. Akgül ve Aydın'ın daha önceki çalışmasından [3] farklı olarak bir boyutlu yerine üç boyutlu (3-D) bir görev simülasyonu

ve genetik algoritma altyapısı kullanarak en iyileme problemini çözmektedir. Genetik algoritmalar, geleneksel yöntemlerle çözülmesi zor ve az sayıda parametre içeren problemlerle iyi performans gösterdiğinden, en iyileme araçlarında kullanılmaktadır. [4,5] Gonsalves ve Burge ani hava operasyon planlarında [6], Ellis hedef-mühimmat eşleştirmesinde [7] ve Porto ve arkadaşları ise tank taktik uygulamalarında [8] en iyileme yöntemi olarak genetik algoritma kullanmışlardır.

Yöntem kısmında en iyileme aracı mimarisi, genetik algoritma ve 3-D görev simülasyonu tanımlanmıştır. Takip eden kısımda örnek bir görev planlama problemi için sonuçlar zaman ve maliyet yönünden en iyilenerek paylaşılmıştır. Son kısımda ise elde edilen sonuçlar tartışılmış ve en iyileme aracı için ileri dönem çalışma planları anlatılmıştır

## 2. YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında tanımlanan en iyileme aracı, belirli bir görev için maliyet etkin veya zaman etkili bir çözüm bulmaya odaklanmıştır. Bu özel görevler, eşzamanlı olarak saldıran düşman gruplarına karşı bir savunma operasyonundan, kritik durağan bir üssü ortadan kaldırmak gibi bir saldırı görevine kadar değişebilir. Görev içeriğinden bağımsız olarak, görevlerin ana parametreleri hedef türü, hedef sayısı, hedef hızı ve hedefe olan mesafe olarak seçilebilir. Hedef türü ve hedef sayısı temel olarak uygun mühimmat türlerinin seçimini etkilerken, hedef hızı ve mesafe ise görevin tamamlanma süresini etkilemektedir. [3] Ana görev değişkenleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



**Şekil 1.** Görev Değişkenleri

Savunma veya saldırı görevlerinde en uygun çözümü bulmak için mühimmat ve platform değişkenleri de dikkate alınmalı ve hedef değişkenleri ile ilişkilendirilmelidir. Mühimmat ve platform değişkenlerini tanımlayabilmek için öncelikle mühimmat ve platform tiplerinin belirlenmesi gerekmektedir. Platform ve mühimmat tipleri, Türk Silahlı Kuvvetleri envanterinde bulunan veya bulunması planlanan platform ve mühimmatlar

arasından seçilmiştir. Bu seçimden sonra mühimmat ve platform tipleri arasında doğru yükleme yapılandırmasını bulmak için bir uyumluluk matrisi oluşturulmuştur. Başka bir deyişle, uyumluluk matrisi uygun platform ve mühimmat yükleme konfigürasyonlarını tanımlamaktadır. Seçilen platform, mühimmat ve uyumluluk matrisi listesi aşağıdaki tablolarda verilmiştir. Aşağıdaki platform ve mühimmat tipleri için operasyon faaliyet değişkenleri ve birim/operasyon maliyet değerleri açık kaynak verilerinden derlenmiştir.

**Tablo 1.** Platform tipleri

Platform Tipi	Platform Tanımı
1	3. Nesil Savaş Uçağı
2	4. Nesil Savaş Uçağı
3	5. Nesil Savaş Uçağı
4	Hafif Taarruz Uçağı
5	MALE-İHA (Medium Altitude Long Endurance/Orta İrtifa Uzun Havada Kalışlı)
6	HALE-İHA (High Altitude Long Endurance/Yüksek İrtifa Uzun Havada Kalışlı)
7	Atak Helikopteri

**Tablo 2.** Mühimmat tipleri

Mühimmat Tipi	Mühimmat Tanımı
1	2.75" Lazer Güdümlü Füze
2	Tanksavar Füzesi
3	250lbs Güdümlü Bomba
4	500lbs Güdümlü Bomba
5	50lbs Mini Akıllı Mühimmat
6	15lbs Mini Akıllı Mühimmat
7	Seyir Füzesi

**Tablo 3.** Uyumluluk matrisi

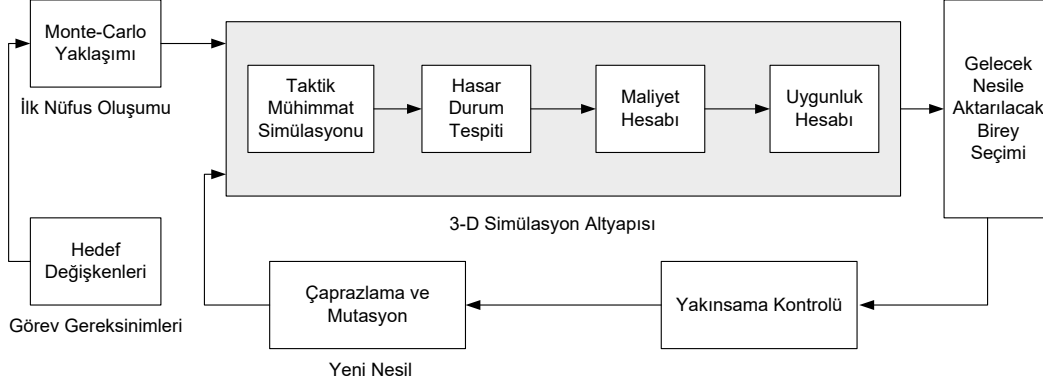
Mühimmat Taşıma Kapasitesi		Mühimmat Tipi							
		1	2	3	4	5	6	7	...
Platform Tipi	1	0	0	4	4	0	0	0	
	2	0	0	4	4	0	0	2	
	3	0	0	4	4	0	0	2	
	4	8	4	4	2	8	8	0	
	5	0	0	0	0	2	2	0	
	6	4	2	2	0	4	4	0	
	7	8	8	0	0	0	0	0	
	:								

## 2.1. Görev en iyileme aracı mimarisi

Görev en iyileme aracı iki ana bölümden oluşmaktadır. Programın dış kısmında, genetik bir algoritma modülü, en iyi çözüm için tüm olası adayları üretir ve yakınsama kontrolünü



yapmaktadır. [3] Programın iç kısmında genetik algoritma ile oluşturulan her aday için platformun noktasal kütle olarak, mühimmatın ise yunuslama ekseninde hareketlerinin modellendiği bir 3-D senaryo simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Görev Optimizasyon Aracının iş akışı, Şekil 2'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.** Görev en iyileme aracı akış şeması

Genetik algoritma ile en iyileme problemlerinde başlangıç koşulları en iyileme sonuçlarını oldukça etkilemektedir. Sınırlı bir başlangıç koşulu yerel bir en iyi değer ile sonuçlanabilir. [8] Bu nedenle tüm çözüm sınırlarını kapsayabilmek için ilk nüfusun oluşturulmasında Monte Carlo yaklaşımı seçilmiştir. En iyileme algoritması her bireyi uyumluluk matrisinde verilen yükleme kısıtlamalarına göre üretmektedir. Üretilen her birey için gerekli süreyi, hasar değerlendirmesini ve maliyet tahminini hesaplamak için bir 3-D görev simülasyonu koşulmaktadır. Simülasyon sonuçları her bireyin uygunluk oranını hesaplamak için kullanılır. Uygunluk oranının en yüksek olduğu bireylerin verilen görev senaryosunda daha iyi performans gösterdiği düşünülmekte, böylece bu bireyler bir sonraki hesaplama döngüsünde kullanılmaktadır.

Genetik algoritma kodları yeni nesiller üretebilmek için çaprazlama ve mutasyon hesaplamalarını yapmalıdır. Gen yapısı kullanmak, çaprazlama ve mutasyon mekanizmalarını uygulamak için en kolay yoldur. Verilen görev değişkenlerine göre çeşitli gen yapıları tanımlanmıştır. Gen yapısı kullanarak tek tip veya karışık yükleme konfigürasyonları kullanmak mümkündür.

Tek tip yükleme konfigürasyonu için gen yapısı:

$$[\text{ACT NAC MT NM}] \quad (1)$$

*Not.* ACT = platform tipi. NAC = platform sayısı. MT = mühimmat tipi. NM = mühimmat sayısı.

Karışık tip yükleme konfigürasyonu için gen yapısı:

$$[\text{ACT NAC MT1 NM1 MT2 NM2}] \quad (2)$$

Yeni nesillerin üretilmesinde tek noktadan çaprazlama yöntemi kullanılmıştır.

1. Birey	[3 1	3 2 4 1]
2. Birey	[2 2	4 1 7 1]
		Çaprazlama Noktası
1. Yeni Birey	[3 1	4 1 7 1]
2. Yeni Birey	[2 2	3 2 4 1]

Şekil 3. Tek noktadan çaprazlama yöntemi

## 2.2. 3-D görev simülasyonu

Genetik algoritma modülünün ürettiği tüm bireyler için 3-D görev simülasyonu koşumu gerçekleştirilerek, 1'den n'e kadar sayıda platformlar tanımlanan hava üssünden hedefe doğru görev sortilerini gerçekleştirmektedir. Her sortide 1 ila n mühimmat, hedef ortadan kalkana veya platformlarda mühimmat bitene kadar ateşlenir. Her simülasyon çalışması için “başarı” (S), “zaman” (T) ve “maliyet” (C) değişkenleri uygunluk oranının belirlenmesi için ana çıktılar olarak hesaplanır. Uygunluk oranlarını karşılaştırabilmek için, mevcut nesildeki tüm bireylerin hesaplamaları ilgili nesil için normalize edilerek kullanılır. Normalize edilmiş değerler başarı (NS), zaman (NT) ve maliyet (NC) olarak tanımlanmıştır. Uygunluk oranı değişkenleri görev gereksinimlerine göre ayarlanabilmektedir. Görev gereksinimleri maliyet etkin, zaman kritik ya da dengeli (maliyet-zaman eş oranlı) olarak değişebilmektedir. Her görev için görev planlayıcısı uygunluk oranının ağırlıklarına karar vermeli ve belirlemelidir. Bu çalışmada kullanılan uygunluk oranı formülü aşağıda verilmiştir.

$$\text{Uygunluk Oranı} = w_1 \cdot NS + w_2 \cdot NT + w_3 \cdot NC \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^3 w_i = 1 \quad (4)$$

$$NS = \frac{S - S_{min}}{S_{max} - S_{min}} \quad (5)$$

$$NT = \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (6)$$

$$NC = \frac{C - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} \quad (7)$$

### 3. ANALİZ

Geliştirilen en iyileme aracını doğrulamak amacıyla, sırasıyla maliyet ve zaman olan iki en iyileme amacı için örnek bir senaryo kullanılarak test edilmiştir. Operasyon senaryosu, hava üssüden 200km mesafede ve birbirlerinden 300m uzaklıkta konuşlanmış 3 sabit düşman grubu şeklinde oluşturulmuştur. Her iki en iyileme problemi için, uygunluk oranı ağırlıkları, maliyet ve zaman değişkenleriyle birlikte başarının en üst düzeye çıkarılması için birleştirilmiştir. Her iki görev gereksinimi için sonuçların özeti Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 4.** En iyileme sonuç özetleri

En İyilenen Değişken	Platform Tipi	Platform Sayısı	Mühimmat Tipi	Mühimmat Sayısı
Maliyet	Hafif Taarruz Uçağı	1	15lbs Mini Akıllı Mühimmat	3
Zaman	3. Nesil Savaş Uçağı	3	250lbs Güdümlü Bomba	1

Maliyet en iyileme probleminin sonucunda, silahlı bir tek hafif taarruz uçağı kullanarak 3 adet 15lbs Mini Akıllı Mühimmat kullanımı, verilen senaryo için en uygun çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Maliyet en iyileme probleminin detayları incelendiğinde en ucuz mühimmat ve düşük işletme maliyetli uçak ikilisi beklendiği gibi en yüksek uygunluk değerine sahiptir. Silahlı bir tek hafif taarruz uçağından 2.75" Lazer Güdümlü Füze kullanılarak yapılan en iyileme sonuçları da ilgili senaryo için uygun maliyetli bir seçenek olarak gözükmektedir. Bu sonuçlar, düşük maliyetli uçakların silahlandırılmasının, benzer tehdit algısına sahip düşük bütçeli ülkeler için uygun bir çözüm olduğunu doğrulamaktadır. Maliyet en iyileme problemi için ayrıntılı sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir.

**Tablo 5.** Maliyet en iyileme sonuç özetleri

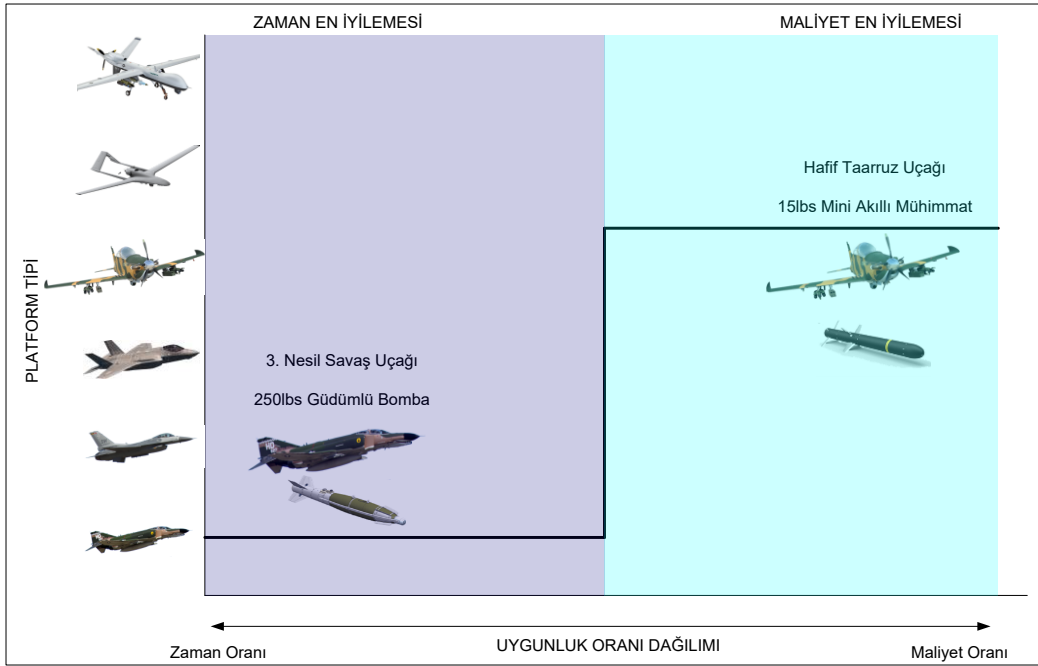
Sıralama	Platform Tipi	Platform Sayısı	Mühimmat Tipi	Mühimmat Sayısı
1	Hafif Taarruz Uçağı	1	15lbs Mini Akıllı Mühimmat	3
2	Hafif Taarruz Uçağı	1	2.75" Lazer Güdümlü Füze	3
3	Hafif Taarruz Uçağı	1	15lbs Mini Akıllı Mühimmat	4
4	Hafif Taarruz Uçağı	1	2.75" Lazer Güdümlü Füze	4
5	Hafif Taarruz Uçağı	1	15lbs Mini Akıllı Mühimmat	5

Hedeflerin zaman kritik olduğu düşünülen senaryoda, savaş uçakları için en iyi uygunluk değerleri elde edilmiştir. Zaman problemi için en uygun çözüm, her biri ayrı hedeflere angaje olmuş 3 ayrı 3. Nesil Savaş Uçağı kullanmaktır. Bu tip uçaklar için yükleme yapılandırması nedeniyle, en iyi alternatif 250lbs Güdümlü Bomba olarak elde edilmiştir. Diğer yüksek uygunluk değerine sahip çözümler incelendiğinde, her ayrı hedef için ayrı bir platform kullanılması gerektiği sonucuna varılabilir. Zaman en iyilemesi problemi için detaylı sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir.

**Tablo 5.** Zaman en iyileme sonuç özetleri

Sıralama	Platform Tipi	Platform Sayısı	Mühimmat Tipi	Mühimmat Sayısı
1	3. Nesil Savaş Uçağı	3	250lbs Güdümlü Bomba	1
2	3. Nesil Savaş Uçağı	3	250lbs Güdümlü Bomba	2
3	3. Nesil Savaş Uçağı	4	250lbs Güdümlü Bomba	1
4	3. Nesil Savaş Uçağı	3	250lbs Güdümlü Bomba	3
5	3. Nesil Savaş Uçağı	3	250lbs Güdümlü Bomba	4

Bu çalışmada görüldüğü üzere çok amaçlı problemlerle uğraşırken doğru sonuçları elde etmek için uygun ağırlıkların seçilmesi kritik bir konudur. Görev planlayıcısı operasyon ihtiyaçlarını ve mevcut yetenekleri belirleyerek ağırlık değerlerini görev gereksinimlerine uygun bir biçimde şekillendirmelidir. Bu bölümde verilen örnek senaryo için farklı ağırlık değerleri için sonuç Şekil 4'te verilmiştir. Görev başarısının güvence altına alındığını bilerek, zaman ve maliyet ağırlıklarının tüm olasılıklara göre değiştiği ve tüm aralık boyunca iki ana bölgede gruplandığı görülmektedir. Bu bölgeler sırasıyla zaman ve maliyet en iyilenmiş bölgeler olarak adlandırılmıştır.

**Şekil 4.** Ağırlık analizi

İki en iyileme probleminin çözümünde, hedef unsurların hava savunma kabiliyetinin bulunmadığı varsayılmıştır. Dost varlıkların veya platformların kırılabilirliği en iyileme probleminde değerlendirildiğinde ve ağırlıklar kırılabilirlik hususlarını karşılayacak şekilde ayarlandığında, işletme masrafları yüksek olan yeni nesil savaş uçakların ve aynı zamanda pahalı olan füzelerin uygunluk değerlerinin de analizlerde çarpıcı bir şekilde artması beklenmektedir.

Örnek senaryonun sonuçlarında, insansız hava araçlarının uygunluk değerleri, mikro mühimmatlarla çalıştırılmaları ve silahlanmaları oldukça ucuz olmasına rağmen, düşük uçuş hızlarına sahip olmaları sebebiyle toplam görev süreleri uzun çıkmaktadır. Hedef tespiti içeren ve fırsat hedefi gibi senaryolarda İHA'ların uygunluk değerlerinin artması beklenmektedir.

#### 4. SONUÇ

Örnek test senaryoları, geliştirilen aracın havadan yere operasyonlar için çok amaçlı en iyileme problemlerini çözebileceğini göstermiştir. Geliştirilen en iyileme aracı, görev planlamacısına farklı görev gereksinimleri için çözüm esnekliği sağlayarak en iyi planın seçilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, araç içerisinde platform ve mühimmat veritabanları ile uyumluluk matrisi değiştirilerek farklı ihtiyaçlar için uyarılama ve özelleştirmelerin yapılabileceği değerlendirilmektedir.

Gelecek dönemde, farklı görev planlarını kapsayacak şekilde test senaryolarının genişletilmesi, karışık yükleme konfigürasyonları ve karışık platform kullanımları için sonuçların genişletilmesi ve dost varlıkların kırılabilirliğinin en iyileme aracına entegre edilmesi planlanmaktadır.

#### 5. KAYNAKÇA

- [1] Gonsalves, P. G., and Burge, J. E., "Software Toolkit for Optimizing Mission Plans (STOMP)" AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference, AIAA, Chicago, IL, 2004
- [2] Guy, P., "Strategic Munitions Planning in Non-Conventional Asymmetric Operations" NATO RTO-MP-SAS-081, April 2010.
- [3] Akgül, M., Aydın, G., "A Mission Optimization Tool for Air to Ground Tactical Operations" AIAA Aviation Forum Modeling and Simulation Technologies Conference, AIAA, Atlanta, GA, 2018
- [4] KrishnaKumar, K., and Goldberg, D., "Genetic Algorithms in Control System Optimization," Journal of Guidance, May-June 1992, pp. 735–740.
- [5] Michalewicz, Z., Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlag, New York,
- [6] Gonsalves, P. G., and Burge J. E., "Multi-objective Optimization to Support Rapid Air Operations Mission Planning," Enabling Technologies for Simulation Science IX, Vol. 5805, SPIE, Bellingham, WA, 2005, pp. 269–277
- [7] Ellis, D., "Offensive/Defensive Mission Planning: Detailed Plan Optimization Using Genetic Algorithms," TRW Technology Review Journal, Fall/Winter 2001.
- [8] Porto, V., Hardt, M., Kreutz-Delgado, K., "Evolving tactics using levels of intelligence in computer-generated forces," Enabling Technologies for Simulation Science III, SPIE, Orlando, FL, 1999, pp. 262–270

## 28VDC ASKERİ BARADAN BESLENEN YÜKSEK KAZANÇLI 700VDC ÇIKIŞLI VE ÇIKIŞI ENDÜKTÖRSÜZ TAM KÖPRÜ KONDANSATÖR ŞARJÖRÜNÜN MODELLENMESİ VE BENZETİMİ

**Muhammed Yusuf CANDAN** <sup>(a)</sup>, **Halil KAVAK** <sup>(a)</sup>, **Mustafa Mert ANKARALI** <sup>(b)</sup>

<sup>(a)</sup> ASELSAN A.Ş., Mehmet Akif Ersoy Mah. 296. Cad. No: 16, 06370 Yenimahalle –  
Ankara/TÜRKİYE, {mycandan, halilkavak}@aselsan.com.tr

<sup>(b)</sup> Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Üniversiteler Mah., Dumlupınar Bl. No:1 06800  
Çankaya - Ankara/TÜRKİYE, mertan@metu.edu.tr

### ÖZ

Bu çalışmada, Çıkışı Endüktörsüz Faz Kaydırmalı Tam Köprü DC/DC Çevirici topolojisinin, 28VDC askeri baradan beslenen 700VDC çıkışlı kondansatör şarjörü uygulamasının modellenmesi ve benzetim sonuçları sunulmuştur. Kondansatör şarj işleminin sabit akımla gerçekleştirilebilmesi için elde edilen modele uygun Ortalama Akım Mod PI Kontrolcü tasarımı anlatılmış, kapalı döngü benzetim çalışması üzerinden kontrolcünün dinamik yanıt performansı test edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Akım Mod Kontrolcü, Çıkışı Endüktörsüz İzole Çevirici, DC/DC Çevirici, Faz Kaydırmalı Tam Köprü, PI Kontrolcüsü

### MODELING AND SIMULATION OF HIGH GAIN OUTPUT INDUCTOR-LESS FULL-BRIDGE CAPACITOR CHARGER WITH 28VDC MILITARY BUS INPUT AND 700VDC OUTPUT

#### ABSTRACT

In this study, the modeling and simulation of Output Inductor-less Phase-Shifted Full-Bridge DC/DC Converter topology for capacitor charging application with 28VDC military bus input and 700VDC output are presented. In order to be able to charge the capacitance with constant current, the design of an appropriate Average Current Mode PI Controller to the obtained system model is explained and the dynamical performance of the controller is tested through closed-loop simulation.

**Keywords:** Current Mode Controller, DC/DC Converter, Isolated Output Inductor-less Converter, Phase-Shifted Full-Bridge, PI Controller

## 1. GİRİŞ

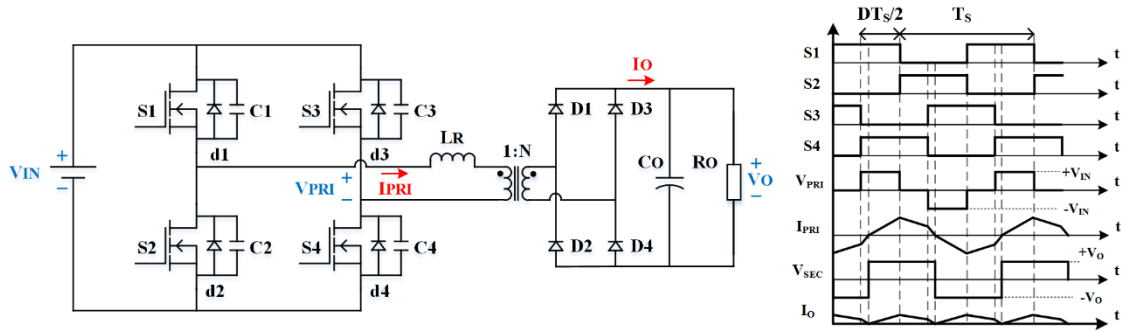
Son yıllarda, endüstriyel, otomotiv ve yenilenebilir enerji uygulamalarında (özellikle fotovoltaik ve rüzgar türbini gibi yenilenebilir kaynaklar, yakıt hücreleri ve termoelektrik jeneratörleri içeren sistemlerde) geniş voltaj dönüşüm oranlarına, yüksek güç yoğunluğu ve verimine sahip DC/DC çeviricilere ihtiyaç duyulmasıyla bu konu önemli bir yere sahiptir [1]. Yüksek gerilime şarj edilmiş yüksek sızgalı kondansatörlere ihtiyaç duyan ve 28VDC askeri baradan beslenen (motor sürücü vb.) uygulamalar için yüksek dönüşüm oranlı ve sabit akımla şarj işlemi gerçekleştirebilen DC/DC çeviriciler gerekmektedir.

Yükseltici (step-up) uygulamalarda, popüler konumda olan Faz Kaydırmalı Tam Köprü çevirici topolojisinin en büyük dezavantajı sekonder taraftaki doğrultucu diyotların ters toparlanma kayıpları (reverse recovery losses) ve diyot parazit kondansatörleri ile transformatörün kaçak endüktansından kaynaklı yüksek gerilim salınımıdır [2]-[7]. Bu probleme bir çözüm olarak, çıkışa filtre amacı ile konulan endüktörün kaldırılması, bu sayede diyotlar üzerindeki gerilim streslerinin çıkış gerilimine klemp etmesi sunulmuştur [2]-[4]. Bu durumda sekonder tarafta “RC snubber” devresi kullanmaya gerek kalmayacaktır.

Bu çalışmada, Faz Kaydırmalı Tam Köprü çeviricisinde çıkıştaki endüktörün kaldırılmasının, sistemin modellenmesi ve kontrolcü tasarımı üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Sistemin modellenmesi, [8]' deki gibi “Buck” çevirici yapısı ele alınarak ve primer taraftaki toplam rezonans endüktansı (transformatör kaçak endüktansı ile harici endüktansın seri bağlantısı) sekonder tarafa yansıtılarak yapılmıştır. Ancak [8]' dekinden farklı olarak bu çalışmada akım kontrolü için de PI (oransal-integral) kontrolcü kullanılmış ve kapalı döngü sistemin dördüncü dereceden karakteristik denklemi elde edilmiştir. Akım ve kontrolcü çıktısı (primer gerilimin efektif doluluk oranı) için kısıtlama olduğundan her iki kontrolcü için de Anti-Windup yapısı kurulmuş ve sistemin dinamik yanıt performansı basamak yanıtları incelenerek değerlendirilmiştir.

## 2. ÇALIŞMA PRENSİBİ

Şekil 1' de Çıkışı Endüktörsüz Faz Kaydırmalı Tam Köprü çevirici devre yapısı ve sürekli iletim modu (continuous conduction mode) için temel dalga şekilleri verilmiştir. Primer taraftaki yarı iletken anahtarlar, konvansiyonel faz kaydırma tekniği ile sürülmektedir. (S1, S2) ve (S3, S4) anahtar çiftleri kendi içinde birbirini tamamlayıcı (complementary) şekilde anahtarlanmaktadır. (S1, S2) ve (S3, S4) yarım köprüleri arasındaki faz farkı değiştirilerek regülasyon sağlanmaktadır [9]. Yarım köprüler arası faz farkının değişmesi primer geriliminin ( $V_{PRI}$ ) efektif doluluk oranının ( $D$ ) değişmesine sebep olur. 180 derecelik faz farkı %50 doluluk oranına karşılık gelmektedir.



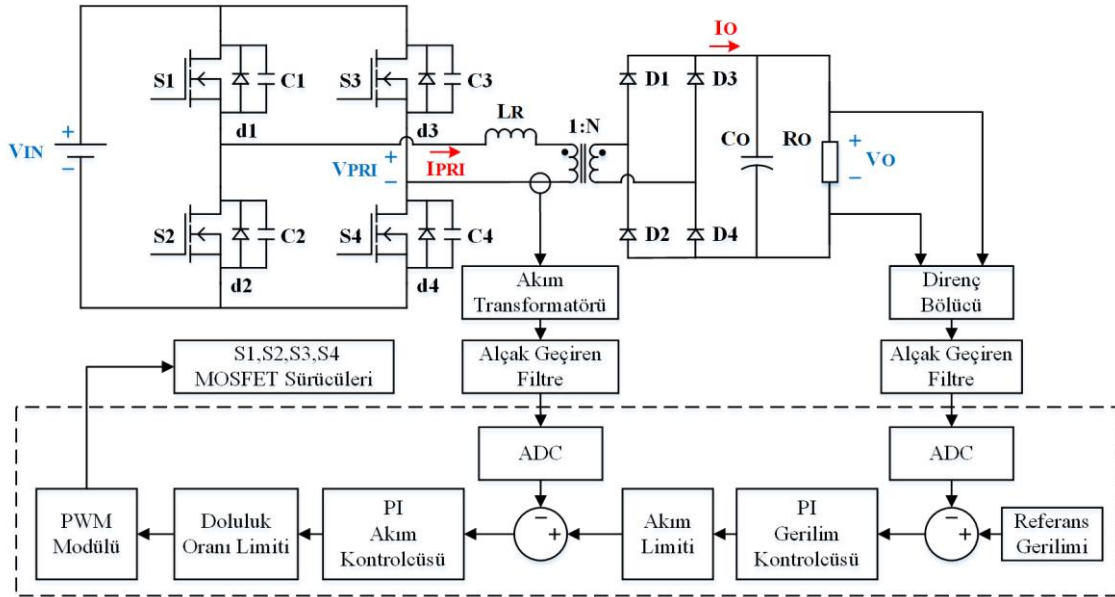
**Şekil 1.** Çıkışı Endüktörsüz Faz Kaydırmalı Tam Köprü Çevirici devre şeması ve sürekli iletim modu için temel dalga şekilleri

Çıkış gerilimi ( $V_O$ ) ve giriş gerilimi ( $V_{IN}$ ) arasındaki statik kazanç denklemi sistemin sürekli ve kesintili iletim (discontinuous conduction) modları için farklılık göstermektedir. Sürekli iletim modunda, çıkış-giriş arasında lineer bir ilişki görülmektedir. Aralarındaki ilişki (1)'de gösterildiği üzere primer geriliminin doluluk oranına ( $D$ ) ve transformatör sarım oranına ( $N$ ) bağlıdır.

$$\frac{V_O}{V_{IN}} = ND \quad (1)$$

Kesintili iletim modunda ise ilişki (2)'deki gibidir [2].

$$\frac{V_O}{V_{IN}} = \frac{2N}{1 + \sqrt{1 + \frac{16N^2 L_R}{R_O T_S D^2}}} \quad (2)$$



**Şekil 2.** Ortalama Akım Mod Kontrolcü sistemi kapalı döngü blok şeması

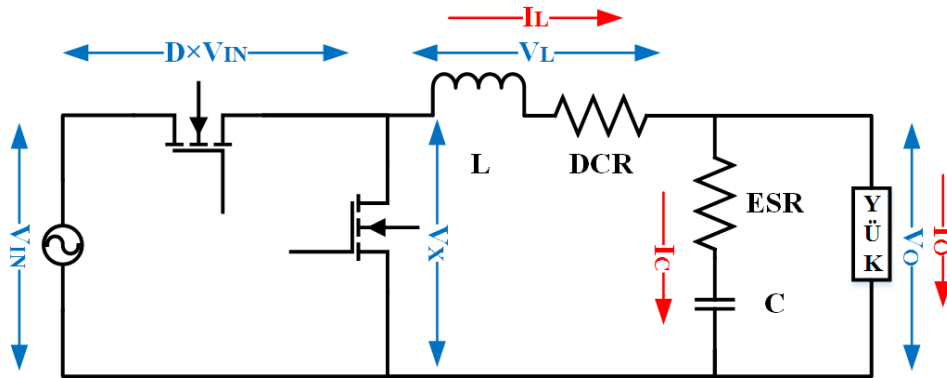


(2)' de görülen  $L_R$ , primer taraftaki toplam rezonans endüktansı;  $R_O$ , çıkış yük direnci ve  $T_S$ , anahtarlama periyoduna karşılık gelmektedir.

Şekil 2' de sistemin ortalama akım mod kontrollü kapalı döngü blok şeması verilmiştir. Kondansatör yükü başlangıç anında çıkışta kısa devreye karşılık geldiği için, kondansatör gerilimi istenilen seviyeye ulaşana kadar, sistem girişten yüksek miktarda akım çekme ihtiyacı duyacaktır. Bu durumun büyük kondansatör yüklerinde, uzun süreli şarj işlemi sonucu devreye zarar vermemesi adına akımın kısıtlanması gerekmektedir. Bu yapıda, primer akımı okunarak döngü içerisinde oluşturacağı referans kısıtlanmaktadır, bu da başlangıç anında çekilecek yüksek akımı istenilen seviyede tutacaktır. Hem akım hem de doluluk oranı için oluşturulan limitler sebebiyle her iki kontrolcü Anti-Windup yapısı ile kurulmuştur.

### 3. SİSTEMİN MODELLENMESİ

Faz kaydırmalı tam köprü çeviricisinin karakteristik denklemi basit bir “Buck” çevirici kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilebilir [8].



Şekil 3. Buck Çevirici

Yukarıdaki şekilde gösterilen devre “Kirchoff” kanunlarına göre çözüldüğünde aşağıdaki denklemler elde edilmektedir.

$$I_C = I_L - I_O \quad (3)$$

$$V_O = D \times V_{IN} - V_L \quad (4)$$

$$I_L = \frac{V_L}{X_L} = \frac{V_L}{2\pi f L} = \frac{V_L}{j\omega L} = \frac{V_L}{sL} \quad (5)$$

$$V_O = I_C \times X_C = \frac{I_C}{2\pi fC} = \frac{I_C}{j\omega C} = \frac{I_C}{sC} \quad (6)$$

Kontrolcü parametrelerinin ( $K_{pv}, K_{iv}, K_{pc}, K_{ic}$ ) değerleri karakteristik denklem elde edildikten sonra, denklem içerisinde konumları gözetilerek hesaplanacaktır. Seçilen parametreler karakteristik denklemin köklerini doğrudan etkilemektedir. Ortalama akım mod kontrollü kapalı döngü blok şema göz önünde bulundurularak aşağıdaki denklemler yazılabilir.

$$V_X = V_O + V_L \quad (7)$$

$$V_X = V_O + sLI_L \quad (8)$$

$$sLI_L = (I_L^* - I_L) \times (K_{pc} + \frac{K_{ic}}{s}) \quad (9)$$

$$I_L = \frac{(K_{pc} + \frac{K_{ic}}{s})I_L^*}{(K_{pc} + \frac{K_{ic}}{s}) + sL} \quad (10)$$

Akım referansı ( $I_L^*$ ) dıştaki gerilim döngüsünden elde edilmektedir. Gerilim için türevsel kazanç iç akım döngüsünde sağlandığı için dış gerilim döngüsünde sadece oransal ve integral kazanç yeterli olmaktadır.

$$I_L^* = (V_O^* - V_O) \times (K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s}) \quad (11)$$

$$I_L \times \frac{(K_{pc} + \frac{K_{ic}}{s}) + sL}{(K_{pc} + \frac{K_{ic}}{s})} = (V_O^* - V_O) \times (K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s}) \quad (12)$$

Fiziksel kondansatör sistemi ele alındığında ( $I_C = I_L - I_O$ ), yük akımı ( $I_O$ ) sabit kabul edilip  $I_L = I_C = sCV_O$  şeklinde alınabilir. Bu durumda (12)' de elde edilen denklem aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$\frac{V_O}{V_O^*} = \frac{s^2(K_{pc}K_{pv}) + s(K_{pc}K_{iv} + K_{ic}K_{pv}) + (K_{ic}K_{iv})}{s^4(LC) + s^3(CK_{pc}) + s^2(CK_{ic} + K_{pc}K_{pv}) + s(K_{pc}K_{iv} + K_{ic}K_{pv}) + (K_{ic}K_{iv})} \quad (13)$$

Paydanın 4 adet kökü (transfer fonksiyonun kutupları) bulunmaktadır. Bu kutuplar 4 farklı bant genişliği tanımlamaktadır. Bu frekanslar; oransal akım döngüsü bant genişliği ( $f_1$ ), integral akım döngüsü bant genişliği ( $f_2$ ), oransal gerilim döngüsü bant genişliği ( $f_3$ ) ve integral gerilim döngüsü bant genişliği ( $f_4$ ) olarak tanımlanabilir. Sistemin kararlı halde çalışabilmesi için aralarındaki ilişki aşağıdaki gibi olmalıdır.

$$f_1 > f_2 > f_3 > f_4 \quad (14)$$

Bu frekanslar sistemin özelliklerine göre, aralarındaki oran en az 3 kat olacak şekilde seçilmelidir. Bu sayede, L ve C değerlerindeki toleransa bağlı değişimler sistemin kararlı halini etkilemeyecektir.

Akım döngüsünün bant genişlikleri ( $f_1$  ve  $f_2$ ) sistemin  $f_3$ ' den büyük frekanslarda salınımsız olmasını sağlamaktadır.

Oransal gerilim döngüsü bant genişliği ( $f_3$ ) kontrolcünün referans gerilimindeki ( $V_O^*$ ) değişimleri takip etme yeteneğini belirlemektedir. Çıkış gerilimi ( $V_O$ )  $f_3$ ' e kadar olan frekanstaki değişimleri takip edebilmektedir.

İntegral gerilim döngüsü bant genişliği ( $f_4$ ) ise yatışma süresini (settling time) etkilemektedir.

Kontrolcü parametreleri, bahsi geçen bant genişlikleri seçildikten sonra hesaplanabilir.

Bu çalışmada kullanılan Çıkışı Endüktörsüz Faz Kaydırmalı Tam Köprü yapısında yukarıdaki denklemleri kullanabilmek için primer taraftaki toplam Rezonans Endüktörü Sekonder tarafa yansıtılmalıdır.

#### 4. ORTALAMA AKIM MOD KONTROLCÜ TASARIMI

(13)' de verilen denklemin paydasını, köklerini bulmak için sıfıra eşitlediğimizde kapalı döngü sistemin dördüncü dereceden karakteristik denklemini elde etmiş oluruz.

$$s^4(LC) + s^3(CK_{pc}) + s^2(CK_{ic} + K_{pc}K_{pv}) + s(K_{pc}K_{iv} + K_{ic}K_{pv}) + (K_{ic}K_{iv}) = 0 \quad (15)$$

Aslında s değeri,  $-2\pi f_1(\omega_1)$ ,  $-2\pi f_2(\omega_2)$ ,  $-2\pi f_3(\omega_3)$  ve  $-2\pi f_4(\omega_4)$  köklerine tekabül etmektedir. Bu kökleri (15)' de yerine yazmak 4 bilinmeyen için 4 farklı denklem verir.

$$\begin{aligned} \omega_1^3(CK_{pc}) + \omega_1^2(CK_{ic} + K_{pc}K_{pv}) + \omega_1(K_{pc}K_{iv} + K_{ic}K_{pv}) + (K_{ic}K_{iv}) &= -\omega_1^4(LC) \\ \omega_2^3(CK_{pc}) + \omega_2^2(CK_{ic} + K_{pc}K_{pv}) + \omega_2(K_{pc}K_{iv} + K_{ic}K_{pv}) + (K_{ic}K_{iv}) &= -\omega_2^4(LC) \\ \omega_3^3(CK_{pc}) + \omega_3^2(CK_{ic} + K_{pc}K_{pv}) + \omega_3(K_{pc}K_{iv} + K_{ic}K_{pv}) + (K_{ic}K_{iv}) &= -\omega_3^4(LC) \\ \omega_4^3(CK_{pc}) + \omega_4^2(CK_{ic} + K_{pc}K_{pv}) + \omega_4(K_{pc}K_{iv} + K_{ic}K_{pv}) + (K_{ic}K_{iv}) &= -\omega_4^4(LC) \end{aligned} \quad (16)$$

Bu katsayılar matris formatında çözülebilir. Denklemi (17)' de gösterildiği şekilde  $A \times Y = B$  formatında yazabiliriz.

$$\begin{bmatrix} \omega_1^3 & \omega_1^2 & \omega_1 & 1 \\ \omega_2^3 & \omega_2^2 & \omega_2 & 1 \\ \omega_3^3 & \omega_3^2 & \omega_3 & 1 \\ \omega_4^3 & \omega_4^2 & \omega_4 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} CK_{pc} \\ CK_{ic} + K_{pc}K_{pv} \\ K_{pc}K_{iv} + K_{ic}K_{pv} \\ K_{ic}K_{iv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega_1^4(LC) \\ -\omega_2^4(LC) \\ -\omega_3^4(LC) \\ -\omega_4^4(LC) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$A \times Y = B$$

Bu durumda bilinmeyenlerin bulunduğu Y matrisi (18)' deki gibi hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} CK_{pc} \\ CK_{ic} + K_{pc}K_{pv} \\ K_{pc}K_{iv} + K_{ic}K_{pv} \\ K_{ic}K_{iv} \end{bmatrix} = A^{-1} \times B \quad (18)$$

Tasarım parametreleri (18)' de yerine yazılarak kontrolcü parametreleri ( $K_{pv}$ ,  $K_{iv}$ ,  $K_{pc}$ ,  $K_{ic}$ ) hesaplanabilmektedir.

Uygulamada şarj edilecek yük kondansatörü, devre üzerindeki filtre kondansatörü C' den daha büyük olacaktır. Kontrolcü parametrelerinin hesabı, daha yüksek frekans bant genişliğine sebep olmasından ötürü filtre kondansatörü C' ye göre yapılacaktır.

Toplam Rezonans Endüktörü ( $L_R$ ), transformatörün kaçak endüktansı ve harici rezonans endüktörünün toplamıdır. Kontrolcü parametrelerinin hesabı sekonder taraf üzerinden yapıldığından (17)' de "L" yerine, Sekonder tarafa yansıtılmış değer kullanılacaktır. Yansıtılmış rezonans endüktansı Simplorer yazılımı üzerindeki açık çevrim benzetim çalışmasıyla 2.5mH olarak hesaplanmıştır.

Tablo 1' de tasarım parametreleri ve Tablo 2' de bu değerler kullanılarak elde edilen kontrolcü parametreleri verilmiştir. Bu çalışmada, sürekli zaman benzetimi yapılacağı için, kontrolcü parametreleri, benzetimin zaman adımı (10ns) dikkate alınarak hesaplanmıştır. Model, sekonder taraf eşdeğer devre için oluşturulduğundan, primer tarafta okunan akımı döngüye dâhil ederken ilgili çevrimler ve oranlamalar yapılmalıdır.

**Tablo 1.** Tasarım Parametreleri

Parametre	Değer
Primer Gerilimi, $V_{PRI}$	18V-36V
Nominal Primer Gerilimi, $V_{NOM}$	28V
Çıkış Gerilimi, $V_O$	700V
Maksimum Yük, $P_{O,MAX}$	150W
Transformatör Sarım Oranı, $N_1:N_2$	1:40
Toplam Rezonans Endüktörü, $L_R$	1.25 $\mu$ H
Çıkış Filtre Kondansatörü, $C$	1.5 $\mu$ F
Anahtarlama Frekansı, $f_{SW}$	75kHz

**Tablo 2.** Kontrolcü Parametreleri

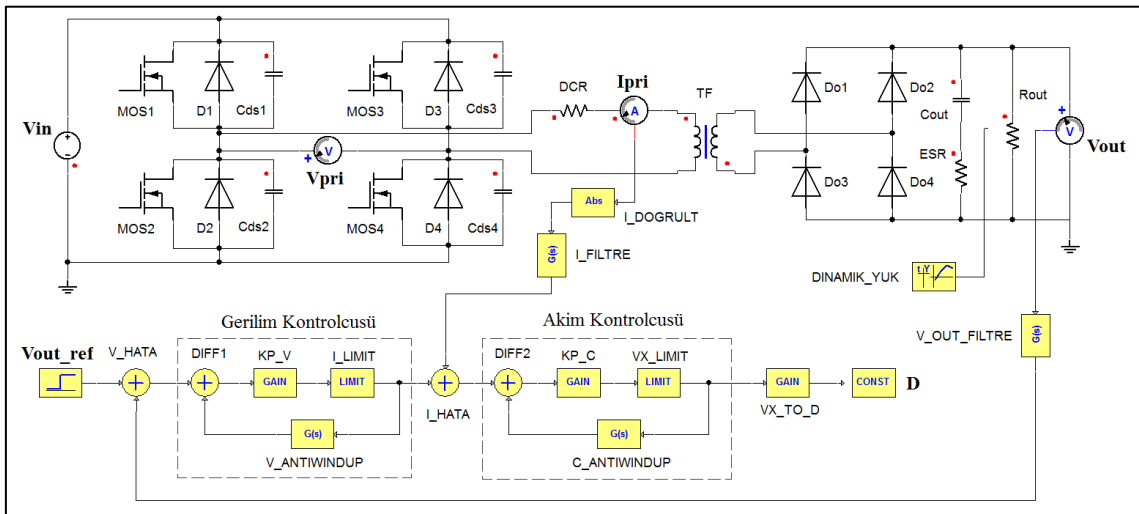
Parametre	Değer
$f_1$	10kHz
$f_2$	7.5kHz
$f_3$	2kHz
$f_4$	1kHz
$K_{pv}$	120.63
$K_{iv}$	0.0106
$K_{pc}$	0.1342
$K_{ic}$	$8.3 \times 10^{-6}$

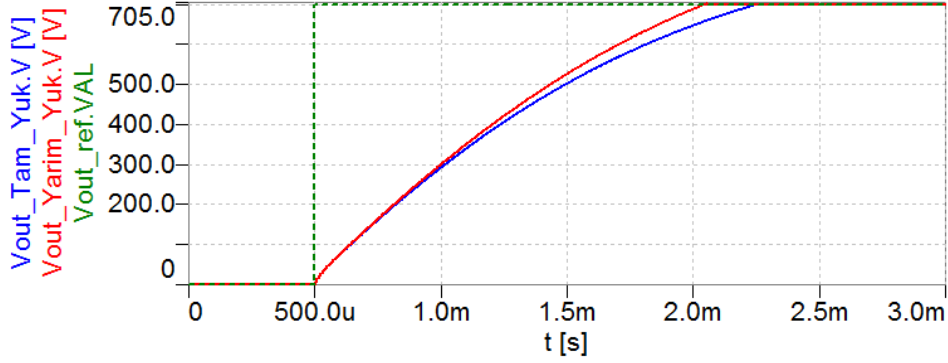
## 5. KAPALI DÖNGÜ BENZETİM SONUÇLARI

Hesaplanan kontrolcü parametreleri kullanılarak Simplerer yazılımı üzerinde kapalı döngü benzetim çalışmaları yapılmıştır. Kurulan devre şeması Şekil 4' deki gibidir.

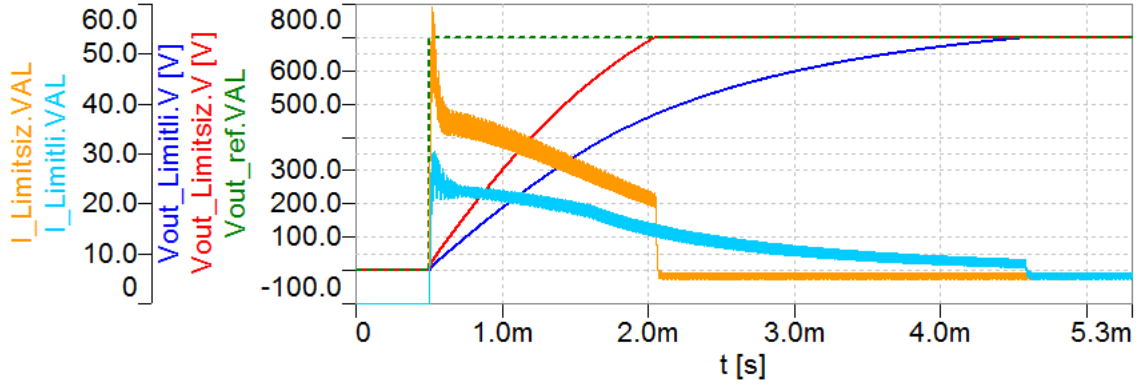
Şekil 5' de akım limiti olmaksızın 28V giriş geriliminde, tam yük (150W) ve yarım yük (75W) durumları için yalnızca filtre kondansatörünün şarj edildiği basamak yanıtı gösterilmektedir.

Benzetim programı üzerinde büyük kondansatörlerin şarj grafiğini elde etmek çok uzun sürdüğünden, akım limiti işlevinin gerçekleştirildiğini küçük kondansatörlerle göstermek yeterli olacaktır.

**Şekil 4.** Kapalı Döngü Benzetim Devre Şeması



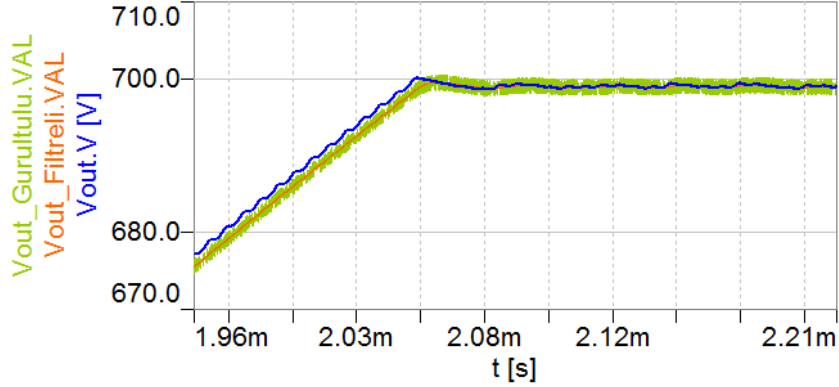
Şekil 5. Akım limiti olmadan tam yük (150W) ve yarım yük (75W) durumları için basamak yanıtı



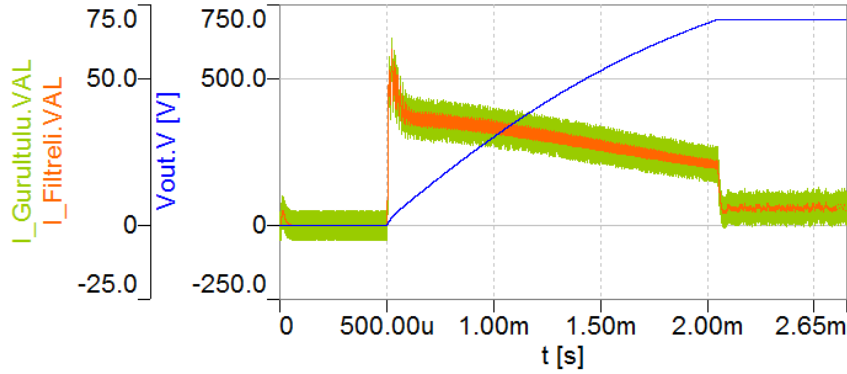
Şekil 6. Yarım yük (75W) durumunda akım limitli ve akım limitsiz çıkış gerilimi basamak yanıtları ile filtrelenmiş primer akımı grafikleri

Şekil 6 ve Şekil 7' de sistemin dinamik yanıt performansı gösterilmektedir. Şekil 6' da görüldüğü üzere akım limiti şarj süresini uzatmaktadır. Şekil 7' deki çıkış gerilimi dalga şekilleri sadece anahtarlama frekansı bileşenini içerdiğinden sistemin kararlı çalıştığını göstermektedir. Sistemdeki lineer olmayan etkiler ayrıştırılarak (decouple), kararlı hal hatası giderilebilmektedir.





**Şekil 9.** Ölçüm gürültüsü olduğu durumda yarım yüklü durum için (75W) kapalı döngü sistemin basamak yanıtı (oturma anına yaklaştırılmış görüntü)



**Şekil 10.** Ölçüm gürültüsü olduğu durumda yarım yükte (75W) akım limitli şarj grafiği

Şekil 9 ve Şekil 10' da görüldüğü üzere sistem, ölçüm gürültüsü olduğu durumda da kararlı davranış göstermeye devam etmektedir.

## 6. SONUÇ

Bu çalışmada, 28VDC askeri baradan beslenen ve yüksek sızgı kondansatörleri 700VDC mertebesine, belirlenmiş akım limiti ile şarj edebilen, Ortalama Akım Mod Kontrollü Çıkışı Endüktörsüz Faz Kaydırmalı Tam Köprü DC/DC Çevirici topolojisinin modellenmesi ve modele uygun kontrolcünün tasarımı sunulmuştur. Kontrolcünün akım limitleme kabiliyeti ile yük değişimi için dinamik yanıt performansı kapalı döngü benzetim çalışması üzerinden test edilmiş ve farklı koşullarda (örneğin ölçüm gürültüsü olduğu durumda) sistemin kararlı çalıştığı gözlemlenmiştir.



## 7. KAYNAKÇA

- [1] C. G. Zogogianni, E. C. Tatakis and V. Porobic, "Investigation of a Non-isolated Reduced Redundant Power Processing DC/DC Converter for High-Power High Step-Up Applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 6, pp. 5229-5242, June 2019.
- [2] D. S. Gautam, F. Musavi, W. Eberle and W. G. Dunford, "A Zero-Voltage Switching Full-Bridge DC-DC Converter With Capacitive Output Filter for Plug-In Hybrid Electric Vehicle Battery Charging," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 12, pp. 5728-5735, Dec. 2013.
- [3] W. Lee, C. Kim, G. Moon and S. Han, "A New Phase-Shifted Full-Bridge Converter With Voltage-Doubler-Type Rectifier for High-Efficiency PDP Sustaining Power Module," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 6, pp. 2450-2458, June 2008.
- [4] M. Pahlevaninezhad, P. Das, J. Drobniak, P. K. Jain and A. Bakhshai, "A Novel ZVZCS Full-Bridge DC/DC Converter Used for Electric Vehicles," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 6, pp. 2752-2769, June 2012.
- [5] W. Cha, J. Kwon and B. Kwon, "Highly Efficient Asymmetrical PWM Full-Bridge Converter for Renewable Energy Sources," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 5, pp. 2945-2953, May 2016.
- [6] K. Domoto, Y. Ishizuka, S. Abe and T. Ninomiya, "Output-inductor-less full-bridge converter with SiC-MOSFETs for low noise and ZVS operation," 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, 2016, pp. 2422-2429.
- [7] A. J. B. Bottion and I. Barbi, "Full bridge zero-voltage-switching PWM dc-dc converter with output capacitive filter," 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), Fortaleza, 2015, pp. 1-6
- [8] R. Kankanala, "Full-Bridge Quarter Brick DC/DC Converter Reference Design App Note", 2012
- [9] R. W. Erickson, D. Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics", Kluwer Academic Publishers, 2nd Edition, 2003.

## BENZETİMDE DENEY TASARIMIN ÖNEMİ

**Muzaffer Balaban** <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Türkiye İstatistik Kurumu, balabanmuzaffer@gmail.com

### ÖZ

Benzetim “var olan veya yeni tasarlanan bir sistem için mantıksal ve matematiksel modelin uygun yazılımlar kullanılarak kurulması ve bu modelle deneyler yapılması işlemi” olarak tanımlanır. Maliyet ya da diğer kısıtlamalar nedeniyle gerçek sistem üzerinde deneyler yapılamayacağından araştırmacılar gerçek sistem yerine benzetim modelini kullanırlar. Deney tasarımı ile benzetim modelinin hangi girdi değişkenleri kombinasyonları için çalıştırılacağı belirlenir. Benzetimde deney tasarımının temel amacı girdi değişkenleri ile çıktı değişkenleri arasındaki ilişkinin incelenmesidir.

Bu çalışmada benzetim için literatürde yaygın olarak kullanılan deney tasarımı yöntemleri incelenmiş ve örnek test fonksiyonu kullanılarak girdi değişkenleri/çıktı değişkenleri ilişkisine etkisi yorumlanmıştır. Çalışmada ayrıca girdi değişkenleri/çıktı değişkenleri ilişkisinin belirlenmesinde deney tasarımının kritik önemi vurgulanmıştır.

Deney tasarımı benzetim modelini kurma amacıyla doğrudan ilgili bir konudur. Girdi değişkenleri/çıktı değişkenleri ilişkisinin genel yapısına ait bilgiye daha önceden sahip isek ona uygun deney tasarımı yöntemi seçerek geçerli analizler yapılabilir. Diğer durumda girdi değişkenlerinin etkileri ve etkileşimleri hatalı tahmin edilebilir. İki seviyeli faktöriyel tasarımlar ile deney bölgesinin iç kısımları ile ilgili herhangi bir bilgi elde etmemiz olanaksız olduğundan karmaşık girdi değişkenleri/çıktı değişkenleri ilişkisine sahip benzetim modelleri için karesel etkiler başta olmak üzere, daha yüksek dereceli ilişkileri incelemeye olanak veren merkezi bileşik tasarım, Latin hiperküp tasarım gibi tasarımlar seçilmelidir.

**Anahtar Kelimeler:** Deney tasarımı, Latin hiperküp tasarım, Tam faktöriyel tasarım, Azaltılmış faktöriyel tasarım, Merkezi bileşik tasarım, Box Behnken tasarımı

## **THE IMPORTANCE OF EXPERIMENTAL DESIGNS FOR SIMULATION**

### **ABSTRACT**

Simulation is defined as the process of establishing the logical and mathematical model for the existing or newly designed system using appropriate software and conducting experiments with this model. Researchers use the simulation model instead of the actual system because experiments cannot be performed on the real system due to cost or other constraints, The combinations of input variables which simulation model will be run is determined with the experimental design.

In this study, experimental design methods which are commonly used in the literature for simulation are examined and the effect of input variable / output variable relationship is interpreted by using a test function. The study also emphasized the critical importance of experimental design in determining the relationship between input variable and output variable.

Experimental design is a direct issue to establish a simulation model. If we have enough information about the general structure of the input variable / output variable relationship, we can do valid analysis by selecting the appropriate experimental design method. In other cases, the effects and interactions of the input variable can be estimated incorrectly. Since it is not possible to obtain information about the inner parts of the experimental region with two-level factorial designs, it is possible to examine the higher order relations especially the quadratic effects using designs such as central composite and Latin hypercube.

**Keywords:** Experimental design, Latin hypercube design, Full factorial design, Fractional factorial design, Central composite design, Box Behnken design

## 1. GİRİŞ

Benzetim modelleri, gerçek sistemin deney yapmaya uygun olmadığı durumlarda, yeni kurulmakta olan sistemin tasarım aşamasında, büyük boyutlu karmaşık sistemlerde, rastsallık içeren sistemlerde veya denge durumu dışında sistemlerin geçici durumlarının incelenmesi gerektiğinde sistemin girdi değişkenlerine karşı nasıl tepki vereceğinin incelenmesinde kullanılan bir karar verme aracıdır. Kelton'a [1] göre benzetim modeli kullanımının temel amacı, doğrudan gerçek sistemlerde uygulanması pahalı ve hatta olanaksız olan deneylerin yapılmasına yardımcı olmaktadır. Deneylerin uygulanmasında benzetim kullanımının önemli bir avantajı da, deneylerin birçok kez tekrarlanabilmesi, girdi değişkenlerinin ana etkilerinin ve etkileşimlerinin tahmin edilebilmesidir [2]. Montgomery [3] deney tasarımını, deneylerden elde edilen verilerin uygun istatistiksel yöntemlerle analiz edilebileceği, geçerli ve objektif sonuçlara ulaşılabilecek şekilde planlanması süreci olarak ifade eder. Kelton'a [1] göre deney tasarımının temel amaçlarından biri girdi değişkenlerindeki değişikliklerin deneyin çıktılarını nasıl etkilediğini tahmin etmektir.

Deney tasarımı ile benzetim modelinin hangi girdi değişkenleri kombinasyonları için çalıştırılacağı belirlenir. Bir deney tasarımı seçerken, benzetim modelinde çalıştırılacak deney sayısı ve girdi değişkenlerinin değerleri de belirlenir. Deney tasarımı, benzetim modelinin girdi değişkenlerini deneme-yanılma teknikleri ile belirleyerek çalıştırmaktan kaçınarak, benzetim modeli ile çalışma sürecindeki performansı iyileştirme olanağı sağlar.

Klasik ve modern deney tasarımı arasındaki temel fark, laboratuvar deneylerinin rastsal hata içerdiği, ancak belirli benzetim modellerinin içermediği varsayımından kaynaklanmaktadır [4]. Belirli benzetim modellerinde aynı girdi değerleri için yapılan yeni deneylerden (tekrarlardan) aynı sonuç elde edilir [5]. Dolayısıyla rastsallaştırma, bloklara ayırma ve tekrarlama belirli benzetim deneyleri için söz konusu değildir. Bununla birlikte olasılıklı benzetim modelleri yapısı gereği rastsal hata içermektedir [6]. Olasılıklı benzetim için deney tasarımında rastsallaştırma ve tekrarlama dikkat

edilmelidir. Benzetim modelinin tekrarlama sayısının hesaplanması Law [7] tarafından ayrıntılı açıklanmıştır.

Bu çalışmada benzetim çalışmalarında kullanılan temel deney tasarım yöntemleri incelenmiş yorumlanmıştır. Deney tasarımı benzetim modelini kurma amacıyla doğrudan ilgili bir konudur. Girdi değişkenleri/çıktı değişkenleri ilişkisinin genel yapısına ait bilgiye daha önceden sahip isek ona uygun deney tasarımı yöntemi seçerek geçerli analizler yapılabilir. Diğer durumda girdi değişkenlerinin etkileri ve etkileşimleri hatalı tahmin edilebilir. İki seviyeli faktöriyel tasarımlar ile deney bölgesinin iç kısımları ile ilgili herhangi bir bilgi elde etmemiz olanaksız olduğundan karmaşık girdi değişkenleri/çıktı değişkeni ilişkisine sahip benzetim modelleri için karesel etkiler için merkezi bileşik tasarım (MBT) ve Latin hiperküp tasarım (LHT) gibi tasarımlar seçilmelidir. Daha yüksek dereceli ilişkileri incelemek için ise LHT benzetim girdi değişkenlerinin birçok düzeyinin çıktılarına etkisini incelememize olanak verdiği için kullanılabilir bir tasarımdır.

Bölüm 2’de deney tasarım yöntemleri incelenmiştir. Bölüm 3’te deney tasarımlarının özellikleri örnek uygulama üzerinde incelenmiştir. Bölüm 4’te sonuçlara yer verilmiştir.

## **2. DENEY TASARIMI YÖNTEMLERİ**

Benzetimdeki girdi değişkenleri deney tasarımında faktör, girdi değişkeni değerleri faktör seviyesi, çıktı değişkeni ise yanıt olarak ifade edilmektedir. Faktöriyel ve merkezi bileşik tasarım tasarımlar konusunda daha ayrıntılı bilgi için araştırmacıların çoğu tarafından sıklıkla kullanılan Montgomery [3] , Myers vd. [8] ve Law [7] iyi bir başvuru kaynağıdır. Benzetim çalışmalarında (özellikle olasılıklı benzetimde) deney verileri pahalı veriler olduğunda makul sayıda deneyle çalışmak oldukça önemlidir.

### **2.1. Tam Faktöriyel Tasarım**

Bir tam faktöriyel deney tasarımı, tüm olası faktör seviyelerinin kombinasyonlarını içerir. Tam faktöriyel tasarımda tasarım noktalarının sayısı, her faktörün seviye

sayılarının çarpımı kadardır. Tam faktöriyel tasarımlar birçok faktör ile ilgili ana etkileri ve etkileşimlerini incelemek için büyük esneklik ve verimlilik sağlar [9].

En yaygın tasarımlar  $2^k$  ve  $3^k$  tasarımlarıdır. Burada k faktör sayısını, 2 ve 3 ise faktörlerin seviye sayısını göstermektedir.  $2^k$  tasarımları, faktörlerin doğrusal etkileri ve etkileşimleri değerlendirmek için kullanılır.  $3^k$  tasarımları ise faktörlerin doğrusal ve karesel etkileri ile etkileşimleri değerlendirmek için kullanılır [10].  $2^k$  tasarımı ile sadece faktörlerin etkisini değil, aynı zamanda tüm ikili etkileşimleri içeren bir meta-model kurmak mümkündür. Daha karmaşık meta-modeller içinse  $3^k$  veya  $m^k$  tasarımları kullanılabilir [11]. Genellikle  $2^k$  tasarımlarında faktörün alacağı en küçük değeri “-” ile en büyük değeri ise “+” ile gösterilir.

## 2.2. Azaltılmış Faktöriyel Tasarım

Finney 1945 yılında, deney sayısını azaltmak için tam faktöriyel tasarımların altkümelerinden seçilen azaltılmış (fractional) faktöriyel tasarımları geliştirmiştir [9]. Azaltılmış faktöriyel tasarım, tam faktöriyel tasarımın bir kısmından oluşur. En yaygın azaltılmış faktöriyel tasarımlar  $1/2^p$  azaltmaya sahip olan  $2^{(k-p)}$  tasarımlardır. Azaltılmış faktöriyel tasarımlarda deney sayısının azaltılmasının da bir bedeli vardır. Bu tasarım seçilirken, tasarımın çözünürlüğü ve etki karışımı konuları dikkate alınması gereken önemli olan konulardır. Diğer bir ifadeyle bu tasarımlar, bazı faktörlerin ana etkilerini ve düşük dereceli etkileşimlerini incelemek için daha yüksek dereceli etkileşimleri tahmin etme yeteneğinden vazgeçerek, tam faktöriyel tasarımlardan çok daha az sayıda deney yapmayı gerektirir [9]. Azaltılmış faktöriyel tasarımlar doğrusal modellerin geliştirilmesi veya önemli faktörlerin belirlenmesi için çok etkilidir, ancak ikinci veya daha üst derecedeki polinomial modellerinin geliştirilmesinde kullanılamazlar [9].

## 2.3. Merkezi Bileşik Tasarım

Karesel etkileri tahmin etmek için  $3^k$  veya  $3^{k-p}$  tasarımları kullanılabilir, ancak genellikle uygulanamaz sayıda çok deney sayısına ihtiyaç duyulur. Karesel etkileri tahmin etmede tasarım noktalarının sayısını azaltmak için geliştirilmiş en yaygın tasarım MBT'dir. MBT, belki de ikinci dereceden modeller için kullanılan tasarımların en popüler

sınıfıdır [10,12]. Box ve Wilson tarafından 1951 yılında tanıtıldığından beri, MBT birçok araştırmacı tarafından çalışılmış ve kullanılmıştır [8].

Bir MBT, bir merkez noktası ve her faktör için  $\pm a$ 'da konumlandırılmış iki "yıldız" noktalarıyla artırılmış iki seviyeli bir faktöriyel tasarımıdır. MBT' de deney sayısı,  $2^k$  ile hesaplanır. Yıldız noktalarının tasarımı ise  $2^k$  ile hesaplanır. Faktörlerin  $a$ 'da alacağı gerçek değerleri ise,  $(x_1, x_2, \dots, x_k)$  ile hesaplanır. Faktörlerin alacağı en büyük ve en küçük değeri göstermektedir. Giunta vd. [4] ve Kleijnen [13] çalışmalarında MBT ve ikinci dereceden polinomlar hakkında detaylı açıklamada bulunmuşlardır.

Box & Behnken tasarımı (BBT) 1960 yılında, karesel regresyon modellerini kurmak için geliştirilmiş bir yöntemdir ve MBT'nin özel bir durumudur [8]. Bu tasarım faktörler için üç seviye gerektiren özel bir tasarımıdır ve deney bölgesinin köşelerinde herhangi bir nokta içermemektedir. Bu, (hiper) küpün köşelerindeki noktalar için fiziksel işlem kısıtlamaları nedeniyle deney yapılmasının olanaksız olduğu durumlarda avantajlı olabilir. Batmaz ve Tunalı [14] benzetim için MBT ve BBT'yi karesel regresyon meta-modellerine en uygun tasarımlar olduğunu göstermişlerdir.

#### 2.4. Latin Hiperküp Tasarım

LHT ilk kez Mc Kay vd. [15] tarafından bilgisayar deneyleri için tanımlanmıştır. Bu tasarım, her bir faktör eksenini "n" eşit aralıklarla bölen, Latin hiperküp örnekleme kullanılarak üretilmektedir [16]. Fang and Sudjianto [17], LHT'nin k sayıda faktörün n farklı değeri ile çalıştığını, LHT(n,k) olarak gösterildiğini ve  $n \times k$ 'lik matrisin her kolonunun  $\{1, 2, \dots, n\}$ 'nin rastsal permütasyonu olduğunu belirtmişlerdir. Böylece meta-model oluşturmada hangi faktör kombinasyonlarının seçileceği rastsal olarak belirlenir.

LHT faktörler için verimli tasarımlar yapmak için oldukça esnektir ve alan doldurma özelliklerinden dolayı çok sayıda faktörün tüm düzeyleri için daha az deney sayısına ihtiyaç duyar [18]. Ancak, rastsal olarak oluşturulan LHT iki soruna neden olabilir. Birincisi faktörler arasında çok yüksek korelasyona sahip olabilirler. İkincisi, deney

bölgesinde geniş alanların incelenmesi mümkün olmayabilir. Bu sorunlardan kaçınmak için literatürde bazı çalışmalar yer almaktadır [19]. Owen [20] ve Tang [21] ortogonal diziyeye dayalı LHT'leri önermişlerdir. Owen [22] girdi değişkenleri arasındaki ikili korelasyonları en küçüklemek için çalışmalarda bulunmuştur. Tang [23] girdi değişkenlerinden kaynaklanan yüksek dereceli etkiler arasındaki korelasyonu dikkate alarak bu yaklaşımı genişletmiştir. Ye [24] tüm faktörlerin sıfır korelasyona sahip olduğu ortogonal sütun LHT'ler için bir yöntem geliştirmiştir. Balaban ve Dengiz [25] iki faktörlü benzetim eniyilemesi probleminde deney tasarım noktalarını elde etmek için tasarım uzayını, faktörler arasındaki yüksek korelasyonun önüne geçmek ve tasarım noktalarının eşit olarak dağıldığından emin olmak için dört bloğa bölmüşler, rastgele LHT algoritması kullanarak her blok için deney noktalarını belirlemişlerdir. Ayrıca, birçok LHT rastsal olarak oluşturularak aralarında deney bölgesindeki yayılımı en fazla olan tasarım seçilerek bu tür sorunların kısmen önüne geçilebilir.

### 3. ÖRNEK UYGULAMA

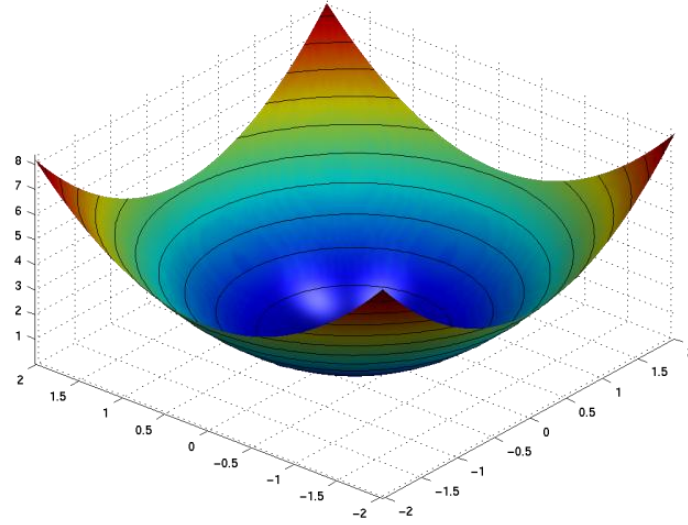
Test fonksiyonları eniyileme, deney tasarımı, meta-model kurma, meta-sezgisel algoritma geliştirme gibi çalışmalarda sıklıkla kullanılırlar. Bu çalışmada tasarımları incelemek ve karşılaştırmak için örnek uygulama olarak belirli ve rastsal değişken içeren (1) ve (2) eşitlikler ile verilen kubbe (sphere) fonksiyonu seçilmiştir. Kubbe fonksiyonu tasarımlar için veri üretme amacıyla kullanılmıştır. Benzetim için deney tasarımı yapılırken faktör /yanıt ilişkisinin bilinmediği varsayılmıştır.

(1)

(2)

Burada verilen  $e$  ortalaması sıfır, varyans değeri bir olan normal dağılıma uygun rastsal değişkendir.  $x_1, x_2, x_3$  faktörleri -2 ile 2 arasında değer almaktadır.





Tasarım tablolarındaki  $D_i$  sütunları  $i$ . faktörün tasarım seviyesini,  $x_i$  sütunları  $i$ . faktörün alacağı değerleri,  $R$  deneyin  $f_1(x)$  fonksiyonundan elde edilen yanıtını,  $\bar{R}$  ise  $f_1(x)$  fonksiyonundan elde edilen ortalama yanıtını göstermektedir.  $2^3$  Tam faktöriyel deney tasarımı Tablo 1, MBT Tablo 2, BBT Tablo 3 ve LHT Tablo 4 ile verilmiştir.

**Tablo 1.**  $2^3$  Tam faktöriyel deney tasarımı

Deney No	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$R$	$\bar{R}$
1	+	+	+	2	2	2	12	12,2592
2	+	+	-	2	2	-2	12	12,3472
3	+	-	+	2	-2	2	12	12,0585
4	+	-	-	2	-2	-2	12	12,6164
5	-	+	+	-2	2	2	12	12,0877
6	-	+	-	-2	2	-2	12	12,1125
7	-	-	+	-2	-2	2	12	11,8105
8	-	-	-	-2	-2	-2	12	11,6966

Bu tasarım ile elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde doğrusal ve karesel regresyon için parametre tahminleri elde edilememiştir. Faktörlerin yanıtlar üzerine etkisinin olmadığı, hem belirli hem de rastsal değişken içeren yanıtların sabit olduğu gözlenmiştir. Faktörlerin yanıtlar üzerindeki etkisinin bilinmediği durumlarda bu tasarım kullanılarak faktörlerin etkisine ait bilgi elde etmek oldukça zayıf bir olasılıktır.

**Tablo 2. MBT**

Deney No	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	R	
1	+	+	+	2	2	2	12	11,9196
2	+	+	-	2	2	-2	12	11,7059
3	+	-	+	2	-2	2	12	12,564
4	+	-	-	2	-2	-2	12	11,8153
5	-	+	+	-2	2	2	12	12,2072
6	-	+	-	-2	2	-2	12	11,8897
7	-	-	+	-2	-2	2	12	12,1533
8	-	-	-	-2	-2	-2	12	11,9396
9	+a	0	0	1,1892	0	0	1,4142	1,248814
10	-a	0	0	-1,189	0	0	1,4142	1,297514
11	0	+a	0	0	1,1892	0	1,4142	1,806714
12	0	-a	0	0	-1,189	0	1,4142	1,245014
13	0	0	+a	0	0	-1,189	1,4142	1,867314
14	0	0	-a	0	0	1,1892	1,4142	1,383514
15	0	0	0	0	0	0	0	0,4923

Bu tasarım ile elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde faktörlerin yanıtlar üzerine doğrusal etkisinin olmadığı, hem belirli hem de rastsal değişken içeren yanıtların sabit olduğu gözlenmiştir. Karesel regresyon için hem belirli hem de rastsal değişken içeren yanıtlara ait parametre tahminleri tam doğrulukta elde edilmiştir. Karesel regresyon için ve doğrusal regresyon için  $R^2 = 0$  elde edilmiştir.

**Tablo 3. BBT**

Deney No	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	R	
1	+	+	0	2	2	0	8	8,2112
2	+	-	0	2	-2	0	8	7,7614
3	-	+	0	-2	2	0	8	8,1524
4	-	-	0	-2	-2	0	8	7,7877
5	+	0	+	2	0	2	8	7,8401
6	+	0	-	2	0	-2	8	8,1064
7	-	0	+	-2	0	2	8	7,8244
8	-	0	-	-2	0	-2	8	8,022
9	0	+	+	0	2	2	8	7,4505
10	0	+	-	0	2	-2	8	7,9353
11	0	-	+	0	-2	2	8	7,9598
12	0	-	-	0	-2	-2	8	8,5167
13	0	0	0	0	0	0	0	-0,2158

BBT ile elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde CCD ile aynı sonuçlara ulaşılmıştır.

**Tablo 4. LHT**

Deney No	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	R	
1	13	14	14	0,8235	1,0588	1,0588	2,9204	2,9669
2	14	16	8	1,0588	1,5294	-0,353	3,5848	3,4902
3	4	11	4	-1,294	0,3529	-1,294	3,474	3,8360
4	9	12	16	-0,118	0,5882	1,5294	2,699	2,8018
5	1	1	13	-2	-2	0,8235	8,6782	8,9064
6	16	10	18	1,5294	0,1176	2	6,3529	5,9961
7	12	9	3	0,5882	-0,118	-1,529	2,699	2,6900
8	7	5	10	-0,588	-1,059	0,1176	1,481	0,7982
9	10	13	15	0,1176	0,8235	1,2941	2,3668	2,0927
10	17	2	5	1,7647	-1,765	-1,059	7,3495	7,0706
11	18	4	9	2	-1,294	-0,118	5,6886	5,6548
12	5	15	2	-1,059	1,2941	-1,765	5,91	6,2123
13	6	17	6	-0,824	1,7647	-0,824	4,4706	5,0539
14	3	3	11	-1,529	-1,529	0,3529	4,8028	4,6461
15	8	18	12	-0,353	2	0,5882	4,4706	4,2252
16	15	7	7	1,2941	-0,588	-0,588	2,3668	1,9194
17	11	6	1	0,3529	-0,824	-2	4,8028	4,1794
18	2	8	17	-1,765	-0,353	1,7647	6,3529	6,3021

LHT ile elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde karesel regresyon için hem belirli hem de rastsal değişken içeren yanıtlara ait parametre tahminleri tam doğrulukta elde edilmiştir. Karesel regresyon için R elde edilmiştir. Faktörlerin yanıtlar üzerine doğrusal etkisinin olmadığı, hem belirli hem de rastsal değişken içeren yanıtların sabit olduğu gözlenmiştir.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada literatürde en yaygın kullanılan deney tasarımı yöntemleri incelenmiştir. Diğer yöntemler kapsam dışı tutulmuştur. İster duyarlılık analizi isterse eniyileme için olsun deney tasarımı benzetim çıktılarının analizinde dikkat edilmesi gereken en temel konulardan birisidir. Girdi değişkenleri/çıktı değişkenleri ilişkisinin genel yapısına ait bilgiye daha önceden sahip isek ona uygun deney tasarımı yöntemi seçerek geçerli analizler yapılabilir. Diğer durumda girdi değişkenlerinin etkileri ve etkileşimleri hatalı tahmin edilebilir. İki seviyeli tam faktöriyel tasarımlar ile deney bölgesinin iç kısımları ile ilgili herhangi bir bilgi elde etmemiz olanaksız olduğundan karmaşık girdi

değişkenleri/çıktı değişkenleri ilişkisine sahip benzetim modelleri için karesel etkiler için MBT, LHT gibi tasarımlar seçilmelidir. Daha yüksek dereceli ilişkileri incelemek için ise LHT benzetim girdi değişkenlerinin birçok düzeyini incelememize olanak verdiğiinden kullanılabilir bir tasarımdır.

Benzetim deneylerinin çalıştırılmasının alacağı süre de dikkat edilmesi gereken diğer bir konudur. Olasılıklı benzetimde deney sayısı hem deney tasarımına hem de tekrar sayısına bağlı olarak değişmektedir. Deney sayısının olabildiğince makul tutularak deneylerden en fazla bilgiyi elde etmek temel amaçlardandır. Bundan sonraki çalışmalarda, LHT vb. alan doldurma tasarımların karesel ve daha yüksek dereceden polinomiyal model kurmada başarımlarının incelenmesi amaçlanmaktadır.

## 5. KAYNAKÇA

- [1] Kelton, W. D. (1999), Designing simulation experiments, *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, 33-38.
- [2] Montevechi, J. A. B., de Pinho, A. F., Leal, F. ve Marins, F.A.S. (2007), Application of design of experiments on the simulation Of a process in an automotive industry, *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*, 1601-1609.
- [3] Montgomery, D.C. (2001), Design and Analysis of Experiments, 5.ed. New York, John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Giunta, A.A., Wojtkiewicz Jr., S.F. ve Eldred, M.S.(2003), Overview of modern design of experiments methods for computational simulations, *AIAA-2003-0649*,1-17.
- [5] Sacks, J., Welch, W.J., Mitchell, T.J. ve Wynn, H.P. (1989), Design and analysis of computer experiments, *Statistical Science*, 4, 409-435.
- [6] Johnson, R. T., Montgomery, D. C., Jones, B. ve Fowler, J. W. (2008), Comparing designs for computer simulation experiments, *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, 463-470.
- [7] Law, A.M. (2007), Simulation, Modeling and Analysis, 4th ed., McGraw-Hill International Edition, New York, USA.
- [8] Myers, R.H., Montgomery, D.C. ve Anderson-Cook, C.M. (2009), Response surface Methodology, 3. Ed. New York, John Wiley & Sons, Inc.
- [9] Chen, V.C.P., Tsui, K.L., Barton, R.R. ve Allen, J.K. (2003), A review of design and modeling in computer experiments, *Handbook of Statistics*, 22, 231–261.
- [10] Simpson, T.W., Peplinski, J.D., Koch, P.N. ve Allen, J.K. (1997), On the use of statistics in design and the implications for deterministic computer experiments, *Proceedings of DETC'97, 1997 ASME Design Engineering Technical Conferences*, Sacramento, California,1-14.

- [11] Kleijnen, J.P.C., Sanchez, S.M., Lucas, T.W. ve Cioppa, T.M. (2005), A User's Guide to the Brave New World of Designing Simulation Experiments, *Informs Journal on Computing*, 17(3), 263–289.
- [12] Biles, W.E., Kleijnen, J.P.C., Van Beers, W.C. ve Van Nieuwenhuyse, M.I. (2007), Kriging metamodeling in constrained simulation optimization: an explorative study, *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*, 355-362 .
- [13] Kleijnen, J.P.C. (2017), Regression and kriging metamodels with their experimental designs in simulation: A review, *European Journal of Operational Research, Elsevier*, 256(1), 1-16.
- [14] Batmaz, I. ve Tunali, S. (2002), Second-Order Experimental Designs for Simulation Metamodeling, *Simulation*, 78(12), 699-715.
- [15] Mc Kay, M G.D., Beckman, R.J. ve Conover, W.J. (1979), A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code, *Technometrics*, 21,239– 245.
- [16] Santner, T.J., Williams, B.J. ve Notz, W.I. (2003), The design and analysis of computer experiments, NY: Springer-Verlag.
- [17] Fang, K.T., Li, R. ve Sudjianto, A. (2006), Design and modeling for computer experiments, Taylor & Francis Group: Boca Raton.
- [18] Sanchez, S.M. ve Wan, H. (2015), Work smarter, not harder: a tutorial on designing and conducting simulation experiments, *Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference*, 1795-1809.
- [19] Joseph, V.R ve Hung, Y. (2008), Orthogonal-maximin latin hypercube designs, *Statistica Sinica*, 18, 171- 186.
- [20] Owen, A.B. (1992), Orthogonal arrays for computer experiments, integration and visualization, *Statistica Sinica*, 2, 439-452.
- [21] Tang, B. (1993), Orthogonal array-based Latin hypercubes, *Journal of the American Statistical Association*, 88,1392-1397.
- [22] Owen, A.B. (1994), Controlling correlation in Latin hypercube samples, *Journal of the American Statistical Association*, 89, 1517-1522.
- [23] Tang, B. (1998), Selecting Latin hypercubes using correlation criteria, *Statistica Sinica*,8, 965-977.
- [24] Ye, K.Q. (1998), Orthogonal column Latin hypercubes and their application in computer experiments, *Journal of the American Statistical Association*, 93, 1430-1439.
- [25] Balaban, M. ve Dengiz, B. (2017), Benzetim eniyilemesinde lognormal ordinary kriging meta-modeli, *Yedinci Ulusal Savunma Uygulamaları Modelleme ve Simülasyon Konferansı Bildiri Kitabı*, ODTÜ, Ankara, 158-168.

# BOMBAATAR MÜHİMMATLARININ PATLAMA SONRASI PARÇACIK SAÇILIM DEĞERLENDİRMESİ: SAYISAL VE DENEYSEL YAKLAŞIMLAR

**Hanife AYYILDIZ<sup>(a)</sup>, Baran YILDIRIM<sup>(a)</sup>**

<sup>(a)</sup> ASELSAN A.Ş., Mehmet Akif Ersoy Mah., 296.Cadde No:16, 06370 Yenimahalle  
Ankara, {hayyildiz,byildirim}@aselsan.com.tr

## ÖZ

Patlayıcı içeren mühimmatların harp başlığı tasarımlarında, patlama sonrası mühimmatın etkinliğinin tasarım aşamasında öngörülmesi, patlama sonrasında açığa çıkacak parçacıkların sayısının, hızının ve konumlarının bilinmesini gerekli kılmaktadır. Etkinlik değerlendirmesi için yapılacak testlerde her testte ulaşılan değerlerin değişmesi yapılacak testlerin birçok kez tekrarlanmasını gerektirmektedir. Ayrıca gerçekleştirilen testlerde her bir parçacığın hız ve konum bilgilerinin elde edilmesi oldukça zordur. Tasarım geliştirme süreçlerinde, zaman ve maliyetten kazanılması için analiz yöntemlerinin kullanılması önemli bir aşamadır.

Harp başlığı parçacık saçılım analizleri, sonlu eleman analiz (SEA) yöntemleriyle yapılabilmekle birlikte, harp başlığı saçılım analizleri için özel olarak geliştirilmiş analitik ve deneysel sonuçlara dayalı ampirik yöntemleri kullanan analiz araçlarıyla daha kısa sürede yapılabilmektedir. Ancak analiz sonucunda ulaşılan sonuçların, tasarıma girdi olabilmesi için analiz ve test sonuçlarının karşılaştırılarak güvenilirliğinin belirlenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, ASELSAN, ATOM akıllı mühimmat ailesinin bir parçası olan 40 mm bombaatar mühimmatı için analitik ve ampirik yöntemlere dayanan analiz yönteminin doğrulanması amacıyla test- analiz karşılaştırması yapılmıştır. Bu amaçla, farklı mühimmat ve hedef plaka konfigürasyonlarında 4 farklı test gerçekleştirilmiştir. Testler sonunda hedef plakaya isabet eden parçacıkların sayısı ve hedef plaka üzerindeki dağılımları elde edilmiştir. Analiz sonucu ulaşılan parçacık sayısı ve hedef plaka üzerindeki parçacık dağılımı test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Test sonuçlarıyla analiz sonuçlarının genel olarak birbiri ile tutarlı olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** 40 mm bombaatar, Harp başlığı patlama testi, Harp başlığı saçılım analizi, kontrollü parça tesiri, doğal parça tesiri.

## **ASSESSMENT ON PARTICLE FRAGMENTATION OF AIR BURST AMMUNITIONS: NUMERICAL AND EXPERIMENTAL APPROACHES**

### **ABSTRACT**

When the design of explosive containing war heads are considered, it is required to know the number of particles, their position and velocity for predicting the effectiveness of ammunition after the explosion. Due to the variability of the measured results among the tests, repetitive tests should be done. Moreover, measuring the velocity and position data for every single particle during the test is a particularly difficult task. Therefore, during the design stage, it is essential to use analysis methods in order to save money and time.

Analyses for particle fragmentation during war head explosions can be done using finite element (FEA) analysis methods. In addition, this type of analyses can be done using tools specially developed for particle fragmentation and dispersion which use empirical methods that are based on experiments and analytical results, in very short run-times. However, in order to validate the results of the analyses, they should be compared with the results from the field tests.

In this study, for the purpose of evaluating the reliability of the methods based on empirical and analytical results, comparison of the two methods, tests and analyses, are conducted for the 40 mm high velocity air burst ammunition. In this regard, 4 different tests are carried out using different ammo-target configurations. After the tests, number of particles on the target and their distribution are obtained. Thereafter, the results from the tests and analyses are compared. It is seen that, majority of the results from the analyses and the results from the tests are consistent.

**Keywords:** 40 mm war head, war head explosion test, analysis of war head, controlled fragmentation, natural fragmentation.

## 1. GİRİŞ

Patlayıcı içeren mühimmatların harp başlığı tasarımlarında, patlama sonrası mühimmatın etkinliğinin tasarım aşamasında öngörülmesi önem arz etmektedir. Mühimmat etkinliği, patlama sonrası ortaya çıkacak parçacık sayısı, hızı ve parçacıklara ait konum bilgileri kullanılarak değerlendirilebilmektedir. Tasarlanan harp başlığı için ihtiyaç duyulan etkinlik değerlendirme parametreleri yapılacak saha testleri ile elde edilebilmektedir; ancak her test sonucunda elde edilen sonuçlar farklılık gösterebilmektedir. Bu durum, tek bir tasarım modeli için, etkinlik parametrelerinin, birden fazla test yapılarak test sonuçlarının istatistiksel bir yaklaşımla değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Ayrıca testler sırasında parçacıklara ait hız ve konum bilgilerini elde etmek oldukça zordur. Belirtilen nedenlerde ötürü harp başlığı tasarımlarının test sonuçlarına göre ilerlemesi zaman ve maliyet açısından önemli bir yük oluşturmaktadır. Bu nedenle tasarım sürecinde modelleme ve simülasyon yöntemlerinin kullanılması önem arz etmektedir.

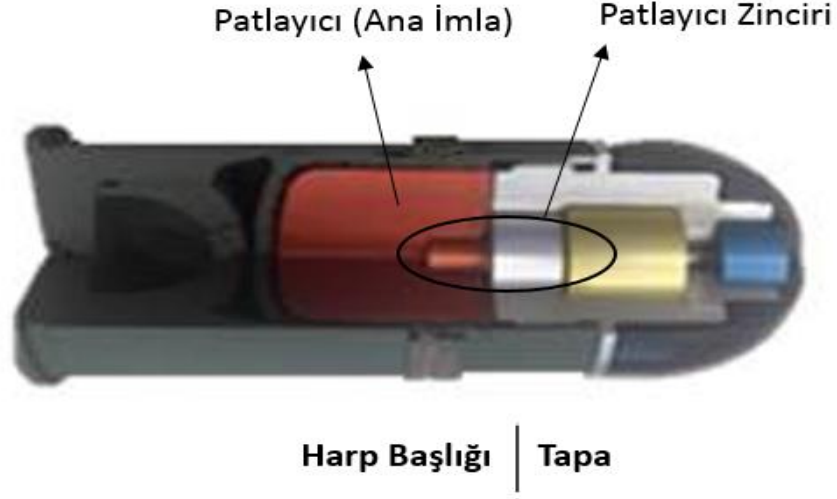
Patlama sonrası harp başlığı parçacık saçılım analizleri sonlu eleman analiz (SEA) yöntemleri ile yapılabilmektedir. Farlie ve diğerleri [1], birden fazla patlama noktasının harp başlığı parçacık dağılımı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla SEA yöntemlerini kullanmıştır. Carculci ve diğerleri[2], patlayıcı içeren mühimmatların 3 farklı patlayıcı malzeme için yakın çevrede oluşturacağı patlayıcı etkinliğini değerlendirmek için SEA (Abaqus/Explicit) gerçekleştirilmiş elde edilen sonuçlar test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Harp başlığı saçılım analizleri sonlu elemanlar (SEA) yöntemleri ile yapılabildiği gibi harp başlığı saçılım analizi için özel olarak geliştirilmiş, analitik ve deneysel yöntemler ile edilmiş ampirik yöntemleri kullanan modelleme ve simülasyon yazılımları ile de yapılabilmektedir. İlgili analiz programları ampirik yöntemlere dayandığından patlama sonrası harp başlığı parçacık özellikleri (sayısı, hızı, konum bilgileri) daha kısa sürede elde edilebilmektedir. Simülasyon sonucu elde edilen sonuçların tasarım sürecine girdi olabilmesi için simülasyon çıktıları test sonuçları ile karşılaştırılarak güvenilirliğinin belirlenmesi gerekmektedir.

Şekil 1’de, ASELSAN, ATOM akıllı mühimmat ailesinin bir parçası olan 40 mm bombaatar mühimmatı verilmiştir. Mühimmat, temel olarak, harp başlığı ve tapa kısımlarından oluşmaktadır. Tapa, namlu çıkışında programlanarak, bir patlayıcı zinciri yardımı ile harp başlığının istenilen zamanda patlatılmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmada, 40 mm bombaatar mühimmatının analitik ve ampirik yöntemlere dayanan simülasyon programı olan, SPLIT-X[3] yazılımı ile modellenerek patlama sonrası parçacıkların sayısı, hızları ve konumları elde edilmiştir. Analiz modelinin güvenilirliğini belirlemek amacı testler gerçekleştirilmiştir.





Şekil 1. 40 mm Bombaatar Mühimmatı

## 2. SİMÜLASYON

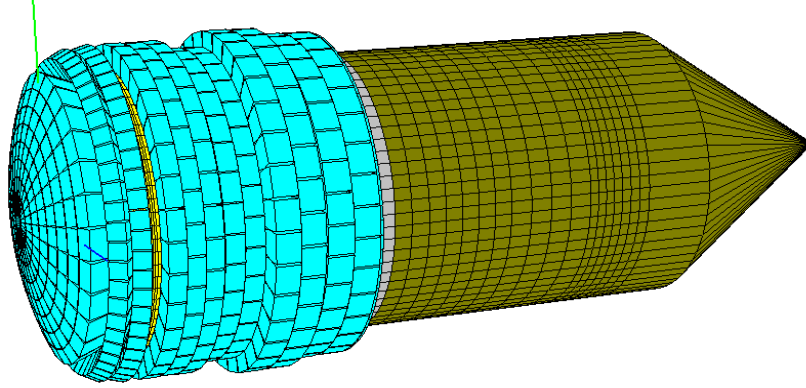
40 mm bombaatar mühimmatı Şekil 1' de belirtilen kısımlardan oluşmaktadır. Harp başlığı gövdesi çentikli gövde(pre-fragmented gövde)' ye sahiptir.

40 mm Bombaatar mühimmatınının SPLIT-X analiz modeli Şekil 2' de verilmiştir. Pre-fragmented harp başlığı gövdesi SPLIT-X yazılımında kontrollü parça tesiri olan tuğla parça dizilimi olarak modellenmiştir. Patlayıcı olarak TNT kullanılmıştır. Harp başlığı gövdesi malzemesi olarak düşük karbonlu çelik kullanılmıştır.

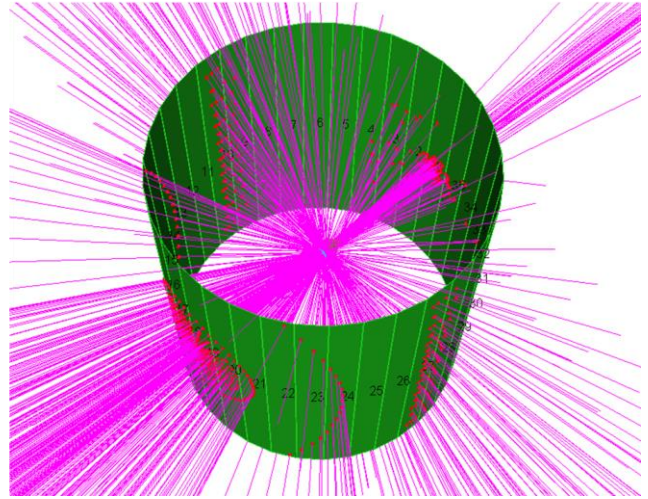
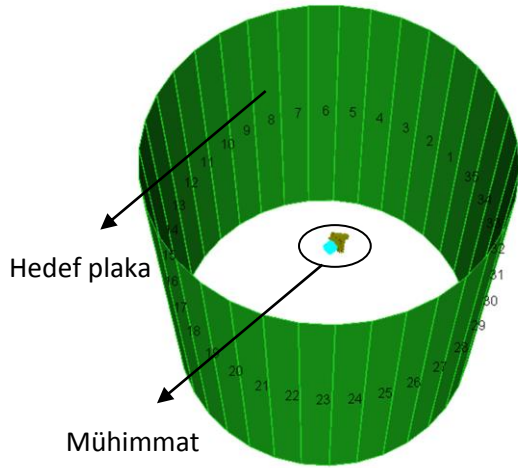
Tapa kısmı gövdesini parçacıklanma analizine dâhil edebilmek için tapa kısmı doğal fragmentasyon olarak, analitik yöntemin izin verdiği ayrıntı seviyesinde tanımlanmıştır. Saçılım analiz sonucunda parçacıkların ilk hız ve çıkış açıları elde edilmiştir.

Analiz sonucunda elde edilen bilgiler ile SPLIT-X yazılımında saha testleri simule edilmiştir. Saha testlerinde olduğu gibi Al plaka mühimmat etrafında 360° çevrelenerek patlatılmıştır. Yazılımda modellenen test ortamı Şekil 3'te verilmiştir.

Test durumu simülasyonu sonucunda patlama sonrası parçacıkların hedef plaka üzerindeki parçacık dağılımı Şekil 3' te verilmiştir.



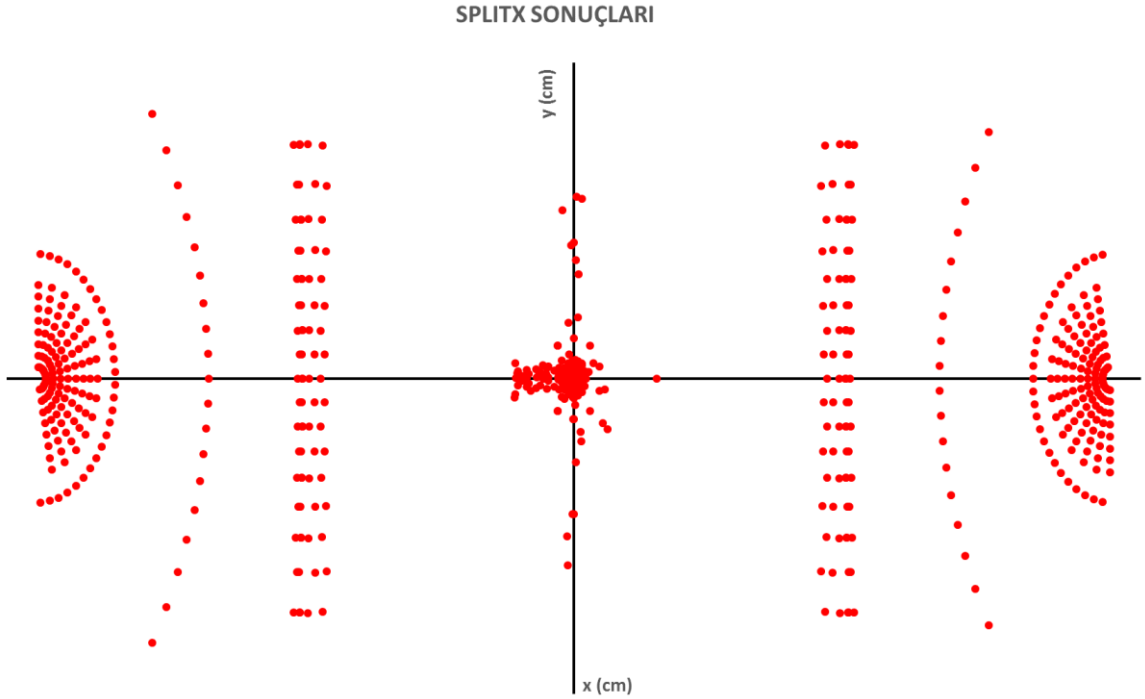
Şekil 2. 40 mm bombaatar mühimmatı SPLIT-X analiz modeli



Şekil 3. Test durumu SPLIT-X simülasyonu

Plaka üzerinde oluşan parçacık dağılımı Şekil 4' te verilmiştir.

Dağılım sonuçlarına göre harp başlığı ön kısımda yer alan parçacıklarının toplam parçacıkların büyük çoğunluğunu oluşturduğu ve hedef plakanın ön kısmında etkin olduğu görülmüştür. Tapa kısmı parçacıklarının saçılım alanının oldukça dar olduğu gözlenmiştir.



**Şekil 4.** Test durumu analiz simülasyonu sonucu hedef plaka üzerinde oluşan parçacık dağılımı. X ve y eksenleri sırasıyla alüminyum plakanın yatay ve dikey yönlerini ifade etmektedir. Orijin plakanın orta noktasını ifade etmektedir.

### 3. TEST ÇALIŞMASI

40 mm bombaatar mühimmatının 4 farklı mühimmat ve hedef plaka konfigürasyonu için gerçek zamanlı testleri gerçekleştirilmiştir. 4 farklı test konfigürasyonu Tablo 1' de özetlenmiştir. Test konfigürasyonlarına ait görsel Şekil 5' te verilmiştir.

4 numaralı test sonucunda hedef plaka üzerinde oluşan parçacık dağılımı Şekil 6'da verilmiştir.

**Tablo 1.** 40 mm bombatar test konfigürasyonları

STATİK TEST	Test Konfigürasyonu	
	Hedef plaka	Mühimmat
1	Al plaka Açı*: 210 derece	Mühimmat patlayıcı tarafı plakaya bakacak şekilde yatay konumda
2	Al plaka Açı*: 210 derece	Mühimmat patlayıcı tarafı plakaya bakacak şekilde yatay konumda
3	Al plaka Açı*: 360 derece	Mühimmat patlayıcı tarafı üstte kalacak şekilde dik konumda
4	Al plaka Açı*: 360 derece	Mühimmat yatay konumda

\*Hedef plakanın mühimmat etrafında hangi açıda çevrelendiğini belirtmektedir.



**Şekil 5.** Test durumları hedef plaka yerleşimleri. Sol: Test-1, Test-2. Sağ: Test-3, Test-4.



**Şekil 6.** Test 4- Patlama sonrası hedef plaka, sırasıyla sol- orta-sağ kısım.

#### 4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

40 mm bombaatar mühimmatının tasarım sürecinde etkinliğinin test faaliyetlerine gerek kalmadan belirlenebilmesi için ampirik yöntemlere dayalı Split-X yazılımı ile modellenerek mühimmatın saçılım analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda parçacıkların çıkış hızları, konumları, hedefe çarpma kadar kaybedecekleri enerji seviyeleri, hedefe çarpma sonrası delip geçip geçmeyeceği sonuçlarına ulaşılabilmektedir. Simülasyon sonucu elde edilen bu bilgilerin 40 mm bombaatar mühimmatının tasarım aşamasında girdi olarak kullanılması, ilgili yazılımın güvenilirliğinin belirlenmesini gerekli kılmaktadır. Bu nedenle 40 mm bombaatar mühimmatının simülasyon sonuçları (parçacık sayısı ve hedef plaka üzerindeki parçacık dağılımı) test sonucu ile karşılaştırılmıştır.

Patlama sonrası analiz ve test sonuçlarından elde edilen parçacık sayısı Tablo 2' de özetlenmiştir.

**Tablo 2.** Analiz ve test sonrası parçacık sayıları. Değerler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Analiz				Test			
Toplam Parçacık Sayısı		Yan Hedef Plakaya Çarpan Parçacık Sayısı		Toplam Parçacık Sayısı		Yan Hedef Plakaya Çarpan Parçacık Sayısı	
Tapa	Harp Başlığı	Tapa	Harp Başlığı	Tapa	Harp Başlığı	Tapa	Harp Başlığı
2.1A*	1.1B*	1.5A	0.8B	-	-	A	B

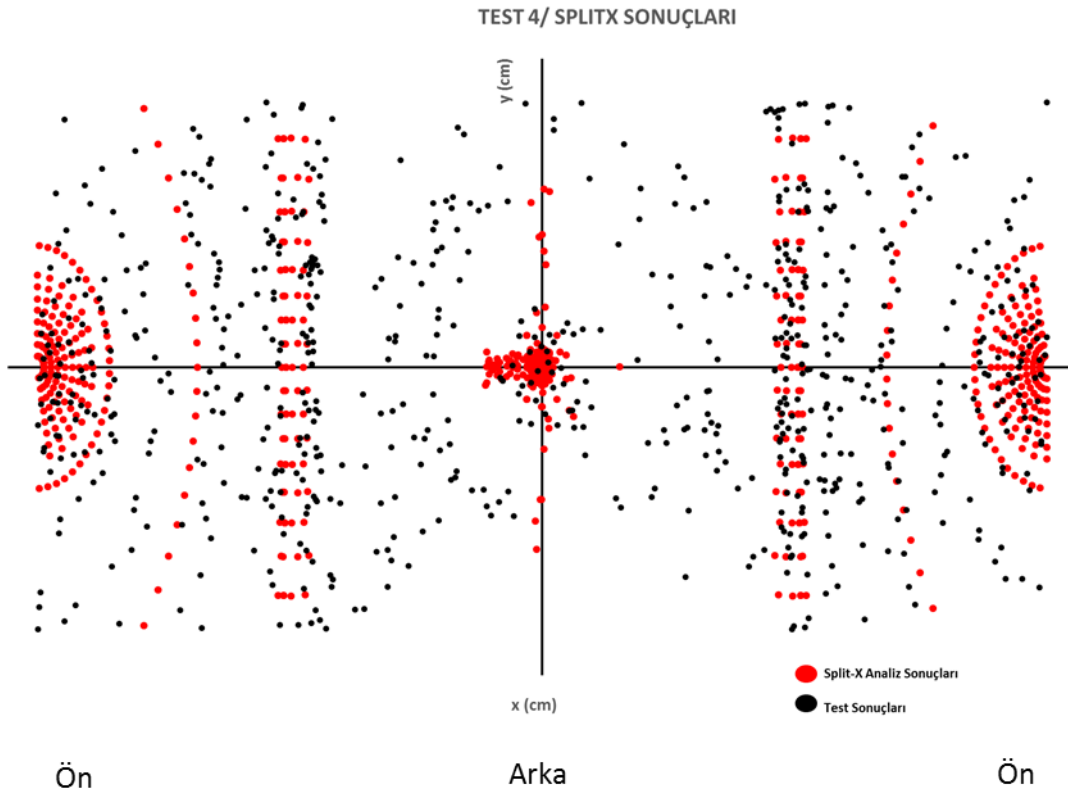
\*Gerçek parçacık sayısı paylaşamadığından karşılaştırma amaçlı tapa ve harp başlığı parçacık sayıları A ve B olarak ifade edilmiştir.

Şekil 7’ de verilen hedef plaka üzerinde sırasıyla simülasyon ve test sonucunda yan plaka üzerinde oluşan parçacık dağılımları incelendiğinde harp başlığı gövde mekaniği parçacıklarının yan hedef plaka ön kısımlarında dağılım şekillerinin benzer olduğu ancak analiz sonucunda görülen dağılımın daha dar bir alanı kapsadığı görülmektedir. Analiz modelinde harp başlığı parçacık sayısı çentikli gövdede çentik sayısına en yakın olacak şekilde modellenmiştir. Ancak analiz ve test sonucunda yan hedef plaka üzerinde parçacık sayısı arasında farklılık görülmektedir. Bu farklılığın aşağıda sıralanan nedenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

- Test durumunda yan hedef plaka üzerinde parçacıkların harp başlığı ya da tapa kısmına ait olup olmadığı mühimmatın konumundan yola çıkarak belirlenmiştir. Ancak hedef plaka üzerinde harp başlığı parçacıklarının etkili olacağı düşünülen kısımlarda tapa parçacıkları da olabileceğinden, tapa parçacıkları harp başlığı parçacığı olarak değerlendirmeye alınmış olabilir.
- Mühimmat testleri toprak zeminde gerçekleştirilmiştir. Patlama sonrası toprak zemine çarpan parçacıkların doğrultuları değişebileceğinden parçacıklar hedef plaka üzerinde beklenen bölgelere isabet etmeyebilir.
- SPLIT-X yazılımında parçacık şeklinin korunduğu varsayılmaktadır; patlama sonrası parçacık deformasyonu ihmal edilmektedir. Ancak gerçek durumda, patlama sonrası bir parçacık birden fazla parçacığa bölünebilmektedir. Bu durum parçacık sayısının beklenenin üzerinde olmasına neden olacaktır.
- Yukarıda belirtildiği gibi test sonucunda harp başlığı kısmı parçacıkları daha geniş açıda yayılım göstermiştir. Bu durum hedef plaka ön kısmı üzerinde etkili olması beklenen parçacıkların üst plakada etkili olmasına neden olabilecektir.

Test ve simülasyon sonucunda tapa kısmının, hedef plakanın arka kısmında oluşturduğu parçacık dağılımları karşılaştırdığında analiz sonucunda oluşan parçacık dağılımın dar bir alanda etkinken, test sonucunda yan hedef plaka üzerinde daha geniş açıda harp başlığı parçacıkları görülmüştür. Analiz modelinde tapa kısmı modellemesi test sonucunda yan hedef plaka üzerinde ölçülen parça sayısı referans alınarak tapa kütlesi de korunacak şekilde modellenmiştir. Bu durumda yan hedef plaka üzerinde tapa parçacık sayılarının yakın olması beklenen bir durumdur. Harp başlığı etkinlik incelemelerinde, tapa kısmının ateşleme sonrası detonasyon dalgası ile etkileşimin sağlıklı olmamasından ve tapa kısmında katmanlı yapıların olmasından dolayı, analitik yöntemler genellikle bu bölge için güvenilir sonuç vermemektedir. Bu sebeple, mühimmat etkinliği açısından güvenilir tarafta kalmak adına, mühimmatın harp başlığı dışında kalan kalan kısımları genellikle parçacıklanma analizlerine dahil edilmemektedir. Bu durum analiz ve test sonuçları ile doğrulanmıştır. Bundan sonra yapılacak harp başlığı analiz çalışmalarında tapa kısmının analiz modeline dahil edilmemesinin, tasarım aşamasında güvenilir tarafta kalmak adına, tercih edilen yöntem olması gerektiği değerlendirilmiştir.

Bu çalışma sonucunda patlayıcı içeren mühimmatların harp başlığı tasarım sürecinin başında tasarım modellerinin etkinlik kıyaslaması için gereken ve test ile elde edilmesi oldukça zor ve maliyetli olan parçacık hızı ve konum bilgilerinin simülasyon ile hesaplanabileceği değerlendirilmiştir. Bu sayede yalnızca analiz sonucunda istenilen parçacık etkinliğe sahip mühimmat tasarımlarının test ile doğrulaması gerçekleştirilerek zaman ve maliyet açısından önemli bir kazanım sağlanacaktır.



**Şekil 7.** Test 4- SPLIT-X simülasyonu patlama sonrası hedef plaka parçacık dağılımı

## 5. KAYNAKÇA

- [1] Fairlie, G., C. M., N. R., I. L., & N. B. (1998). Computer Modelling of Full Size Fragmenting Amiable Warheads Using Autodyn-3d.
- [2] P. C., C. M., & J. H. (2010). Validation of Abaqus Explicit- Cell for Classes of Problems of Interest to The U.S. Army.
- [3] SPLIT-X An Expert system for the Design of Fragmentation Warhead Theory Manual, February 2009.



## KESİK ZAMANLI DAĞITIK SİMÜLASYONLAR İÇİN MODEL DİLİ TANIMLAMA ÇALIŞMASI

**Abdülkadir CAN<sup>(a)</sup>, Gökçen URAL<sup>(a)</sup>, Ali Hikmet DOĞRU<sup>(b)</sup>**

<sup>(a)</sup> CEY Savunma ve Simülasyon Sistemleri A.Ş., Üniversiteliler Mah. 1596. Cad.

Hacettepe Teknokent No: 6A/30, 06800 Çankaya-Ankara,

{acan, gural}@ceysavunma.com

<sup>(b)</sup> ODTÜ, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

dogru@ceng.metu.edu.tr

### ÖZ

Bu çalışmadaki temel amacımız kavramsal model tanımlama amacı ile kullanılacak yüksek seviyeli bir dil geliştirmektir. Kesik zamanlı dağıtık simülasyonlar için bütün geliştirme ihtiyaçlarını desteklemek üzere bir ortam düşünülmektedir ve geliştirilmekte olan dil de ayrıca ilgili birimlerin geliştirilmesinde tanımlayıcı bir rol üstlenecektir. Bu kapsamda bir çalışmada ortaya çıkabilecek olası çeşitlilik düşünülerek yapılabirlik çerçevesinde gerçekçi sınırlar belirlenmiştir. Dilimiz, Kesikli Zaman Simülasyonları için durum tabanlı modellerin nitelik, davranış ve mesajlaşmalarının tanımlanabileceği ve kullanılması gerekecek dış bileşenlerin arayüzlerinin de eklenebileceği yüksek seviyeli görsel ve metinsel bir yazılım dili olacaktır. Hedefimiz, bu dil ile belirtilecek sistemlerin bir yazılım tarafından yorumlanarak daha alt seviyede bir yapıya dönüştürülebilmesidir. Bu dilin farklı paydaşlar tarafından kullanılabilirlik ortak bir dil olmasını tasarlıyoruz. Bu makalede, geliştirme amacı için gerekecek arayüz ve kod üretimi kabiliyetleri ile ilgili tasarım prensipleri ve yapıları anlatılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Model Tanımlama, Kavramsal Model, HLA, Alana Özel Dil, Kod Üretimi

# DESIGNING OF A MODELING LANGUAGE FOR DISCRETE-TIME DISTRIBUTED SIMULATIONS

## ABSTRACT

Our fundamental target in conducting this research is to develop a high-level language for defining conceptual models. An environment to support the development of all stages of discrete-time distributed simulation systems. Also, the language under development will also be used in the specification of various units for the mentioned development. Realistic scope for the expectations had been set considering the wide variability that will probably surface during such a research. This language will be a high-level visual and textual language that can define the attributes, behaviors and the messaging of state based systems for discrete-time simulations. Also addressed will be the interfaces for possible external systems that may be used. The language is aimed to be able to be processed by software for conversion to lower-level structures. We are planning to design the language as a common language for different stakeholders. Related design principles and structures for the corresponding user interface and code generator capability are described.

**Keywords:** Model Definition, Conceptual Modelling, HLA, Domain Specific Language, Code Generation

## 1. GİRİŞ

Dil özünde düşüncenin ifadesine hizmet eder. Bilgisayar dilleri, doğal dillerin aksine farklı yorumlanamayacak kesin yapay yapılardır. Ama aynı zamanda, tasarımı yani insani bir değeri de ifade ederler. Model tanımlama ise simülasyon dünyasındaki en zorlu süreçlerdendir. Olayın çok boyutluluğu ve farklı birikimlere sahip paydaşların olaya dahil olması ortak bir anlayışa ulaşılmasının önünde engel teşkil etmektedir. Bu zorluğu aşmak adına farklı görsel ve metinsel teknikler ve diller kullanılmıştır. Ancak bu ürünler çoğunlukla, zaman içerisinde değişen tasarımlar ve yapılara uyumlu şekilde güncellenemezler ve bütünselliklerini kaybederler. Ayrıca geliştirilen modeller çoğunlukla, belirli altyapıların, kütüphanelerin ve ortamların bağımlısı oldukları için başka şekillerde ya da ortamlarda bağımsız olarak yeniden kullanılabilirleri zor olmaktadır. Modelin özü modelin çalışması için hayati olan bileşenlere karışmıştır. Bu nedenle de çözülmesi ve yeniden kullanılması zor yapılar ortaya çıkmaktadır.

Noam Chomsky, dilin özünde düşüncenin ifadesine hizmet ettiğini belirtmiştir [1]. Bu ifade doğal ve yazılım dilleri dâhil, bütün yapay diller için geçerlidir. Yazılım dilleri doğal dillerin aksine toplum içinde kendi kendine gelişemediklerinden, yapay olarak yaratılmaları gerekir [2]. Yazılım dillerinin doğal dillerden farkı temelde tek şekilde yorumlanabilecek kesin yapılar içermek zorunluluğudur. Doğal dillerde ifade edilen kavramlar çoğunlukla bağlama ve anlık konjonktüre göre yorumlanmaktadır. Yazılım dilleri ifadeye yorum katma yeteneğine sahip olmayan bir işletim sistemi

veya bir işlemci tarafından işletilmektedirler. Bu nedenle hangi seviyede olursa olsun; bütün yazılım dilleri sadece tek bir şekilde yorumlanmak üzere tasarlanmışlardır.

Yıllar içerisinde yazılım dillerinin seviyeleri yükselmiştir. Bilgisayarlar üzerindeki ilk programlama CPU komut setini kullanırken sonrasında komut setleri doğal dillere yaklaştırılmıştır. Bu yaklaştırmanın sebepleri, geliştirilen yazılım komut setlerinin sadece bilgisayarlar tarafından değil, aynı zamanda diğer yazılımcılar ve geliştiricinin kendisi tarafından da anlaşılabilirliğini kolaylaştırmak, geliştirme ve bakım maliyetlerini azaltmak ve yazılım dillerindeki öğrenme eğrisini kısaltmaktır.

Alana özel diller, belirli bir alana odaklanmış sınırlı ifade yeteneğine sahip yazılım dilleridir [3]. Temel olarak belirli bir alanda yer alan operasyonları ifade etmeye odaklanmış bir dil, genel maksatlı dillerin jenerikliği baskısından kurtulduğunda kendisini ifade etmekte daha başarılı olacaktır. Uygun bir yüksek seviyeli dil kullanıldığı durumda yazılım geliştirme üretkenliği 5 kata kadar artabilir [4]. Alana özel diller genel yapıları itibarı ile alana özel diğer yapıları içermekle beraber, genellikle metodoloji düzeyinde destek de sağlarlar. Kullanıcılarına alana özel bir yöntem eşliğinde servis sunarlar.

HLA 1516-2010 revizyonu ile beraber yayınlanan DSEEP standardı; simülasyonların geliştirilmesinde 7 aşamalı bir model önermektedir [11]. Bu aşamalar;

- Simülasyon hedeflerini belirlenmesi
- Kavramsal analiz
- Simülasyon ortamının tasarımı
- Simülasyon ortamını geliştirilmesi
- Simülasyon ortamının planlanması, tümleştirilmesi et ve sınanması
- Simülasyon ortamının çalıştırılması ve sonuçların hazırlanması
- Veri hazırlama ve sonuçların analizi

olarak ifade edilmektedir. Geliştirilmekte olan model tanımlama dili, HLA'da ikinci aşama olan kavramsal modelin dokümantasyonundan dördüncü aşama olan simülasyon ortamını geliştirilmesi aşamasının sonuna kadar yer alan operasyonların yönetimini sağlamayı amaçlamaktadır. Kesikli zaman simülasyonları için ön tanımlı bir metodoloji desteği ile kullanıcıların kodlama yapmadan ajan tabanlı model geliştirmesine olanak sağlayacaktır. Simülasyon ve modelleme dünyasının en kritik ve deneyim gerektiren bileşenlerinden birisi kavramsal modellemedir. Simülasyon geliştirmede kavramsal modeller problem alanının kolay ve düzgün bir şekilde anlaşılmasını sağlamak amacıyla oluşturulur [5].

## **2. KAVRAMSAL MODELLEME**

Kavramsal model özünde farklı paydaşların simülasyon modelleri üzerinde etkin iletişim kurması amacı ile geliştirilir. Bu paydaşlar; Son kullanıcı, İdare Makamı, Proje

Yürütücüleri, Tasarım Ekibi ve Test Ekibi olarak özetlenebilir. Kavramsal model bir doküman olarak kaldığı için tasarım, geliştirme ve entegrasyon aşamalarında gerçekleşen değişikliklerin tamamı kavramsal modele yansıtılamamaktadır. Yansımanın gerçekleşmemesine sebep olan iki temel nedenden bahsetmek mümkündür. İlki, tasarım ve geliştirme sırasında kavramsal model başlangıç olarak alınıp içerisine pek çok detay öge dahil edilmekte olduğundan, bütün bu detayların modelin özüne ait olmadığı düşüncesidir. İkincisi ise, iş yoğunluğundan dokümanın güncellenememesidir. Sonuç olarak kavramsal model tasarım detaylarından soyutlanmış ve belirli bir oranda güncelliğini kaybetmiş bir doküman olarak karşımıza çıkar. Zaman geçtikçe ilgili kavramsal model içerisinde yer alan modellerin yeniden kullanımı gündeme geldiğinde, hedef ortama uygun olarak tasarımlar tekrar gerçekleştirilir ve kayıp detaylar üzerinde tekrar uğraşılır. Daha da kritik olarak, kavramsal model geliştirilmekte olan yeni ortamda kullanılmak için zorlanır, ya da uyumlandırılmaya çalışılır.

Ayrıca projenin ilerleyen dönemlerinde kavramsal model üzerinde yapılan değişiklikler pek çok yazılım birimini etkilemektedir ve sistemin değişikliğe uyumlandırılmasını sorunlu hale getirmektedir. Özellikle modellerin çevresel bileşenlere ve simülasyon altyapısına olan bağımlılık derecesi arttıkça adaptasyon zorluğu da artmaktadır [6].

Kavramsal modelleme için kullanılan birçok araç veya metot kullanılmıştır. Ülkemizde ulusal düzeyde kullanılmak üzere geliştirilmiş KAMA (Kavramsal Modelleme Aracı) geliştirilmiştir. KAMA ürünü kamu bünyesinde tüm simülasyon sektörü geliştiricilerinin kavramsal modelleme aşamasında kullanılması amaçlanmış olsa da bu uygulama hayata geçememiştir.

Dünya üzerinde de kavramsal modelleme için çeşitli araç ve yöntemler kullanılmıştır. UML diyagramları bu amaca yaygınca hizmet emiştir; modeller sınıf yapıları olarak tanımlanmış, model akışları aktivite diyagramları kullanılarak ve görev uzayı ise kullanım diyagramları aracılığı ile ifade edilmiştir. Topic Map ve Mind Map benzeri uygulamalar ile kavramsal modelin ilişki yapıları ifade edilmeye çalışılmıştır. Varlık-İlişki diyagramları ile simülasyon nesnelere varlık ve etkileşimleri ise ilişki tabanlı olarak tanımlanarak ifade edilmiştir.

Kavramsal modelin temel amacı farklı bilgi birikimlerine sahip paydaşların ortak anlayışa ulaşmasını sağlamaktır. Bu amaçla alan uzmanlarından alınan bilgiler, kavramsal modelleme ekibi tarafından simülasyon amaçlarına uygun olarak simülasyon nesnelere ve olayları olarak ifade edilmeye çalışılır ve çıktı dokümanının hem alan uzmanları hem de simülasyon tasarımcıları tarafından kullanılabilmesi amaçlanmıştır. Kavramsal modelleme bir bilgi seti olarak kalmaktadır. Firmalar kendi altyapılarına uygun bazı model geliştirme altyapıları geliştirmişlerse de bu ürünler kurum içi kullanım ile sınırlı kalmış ve ticarileşmemişlerdir.

### **3. MODEL TANIMLAMA DİLİ**

Kavramsal modelin hazırlanmasında kullanılmak üzere dil tasarlama çalışmaları yeni bir çaba değildir. NATO'nun MSG-068 grubunun son raporunda kavramsal modellemenin ortak anlayışa ulaşabilmesi için kullanılan yöntem ve teknikler özetlenmektedir [7]. Bu raporda ülkemizde yapılan değerli çalışmalardan birinin sonucu olarak ortaya çıkmış olan KAMA aracından da bahsedilmektedir. Bütün metodların ortak özelliği, ortak bir dil oluştururken çeşitli paydaşların üzerinde tartışabileceği ve uzlaşabileceği yapılar geliştirmek amacının güdülmesidir. Ancak bütün bu yapılarda tasarım ve geliştirme bileşenleri geliştiricilere bırakılmış ve bu nedenle de geliştirilen model bir dokümantasyon olarak kalmıştır. Bunun bir sonucu olarak bu yöntem ve araçlar kullanılarak geliştirilen modeller (güncel tutulduklarını varsayarsak), sadece kavramsal olarak yeniden kullanım imkânına sahip olmaktadır.

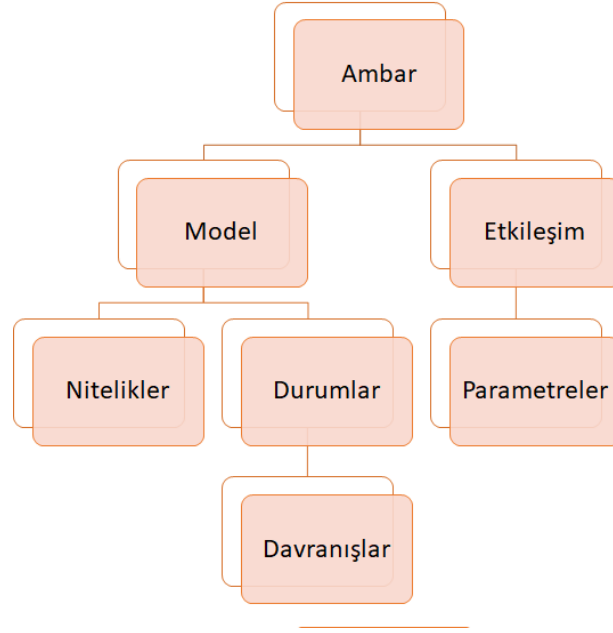
Zaman içerisinde bilgisayar dillerine dönüşümün mümkün olduğu göz önünde bulundurularak kavramsal modelin yanı sıra tasarımı da hedefleyen yapılar üretildiyse de bu çalışmaların teknik olarak belirli bir altyapıya bağımlı oldukları için, farklı ortamlarda ve farklı bileşenler ile birlikte kullanımı mümkün olmamaktadır. Bunların başka bir simülasyon altyapısına ve muhtelif geliştirme ortamlarına aktarımları mümkün değildir.

## **4. TEMEL BİLEŞENLER**

### **4.1. Grafik Editör**

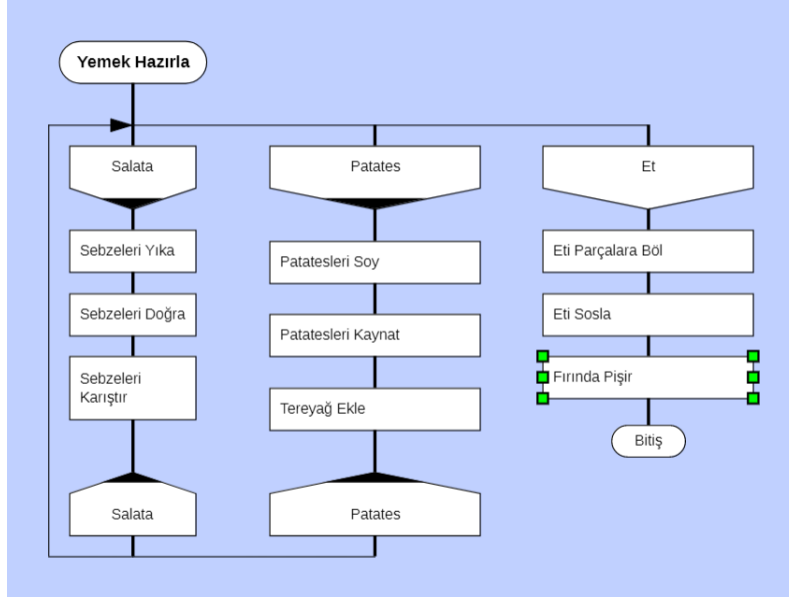
Proje kapsamında model havuzunun oluşturulması Şekil 1'de sunulan katmanlı bir yapıda tasarlanmıştır.

Bu aşamada en üst seviyede, yeni tanımlanacak simülasyon sisteminin tüm model ve etkileşimlerini ya da mevcut bir simülasyon sisteminin ilgili model ve etkileşimlerini ambara tanıtmak mümkün olacaktır. Ambar içerisinde simülasyon modelleri hiyerarşik bir yapıda tanımlanabilecektir. Ambar içerisinde simülasyon hedeflerine uygun olarak tasarlanan modeller tanımlanacaktır. Her bir model için durumları (state) tanımlanacaktır. Örnek olarak bir kara taşıtı için: park halinde, yolda, bakımda gibi durumlar tanımlanabilecek ve her bir durum için modelin yapacağı aksiyonları ve kararları içeren davranışları tanımlanabilecektir. Söz konusu davranış seti, model ilgili durumda iken her simülasyon zaman adımında çalışacak işlevselliği ifade edecektir. Ayrıca durumlar arası geçişler yine davranış tanımlamalarının arasında gerçekleşecektir.



**Şekil 1.** Bileşen Hiyerarşisi

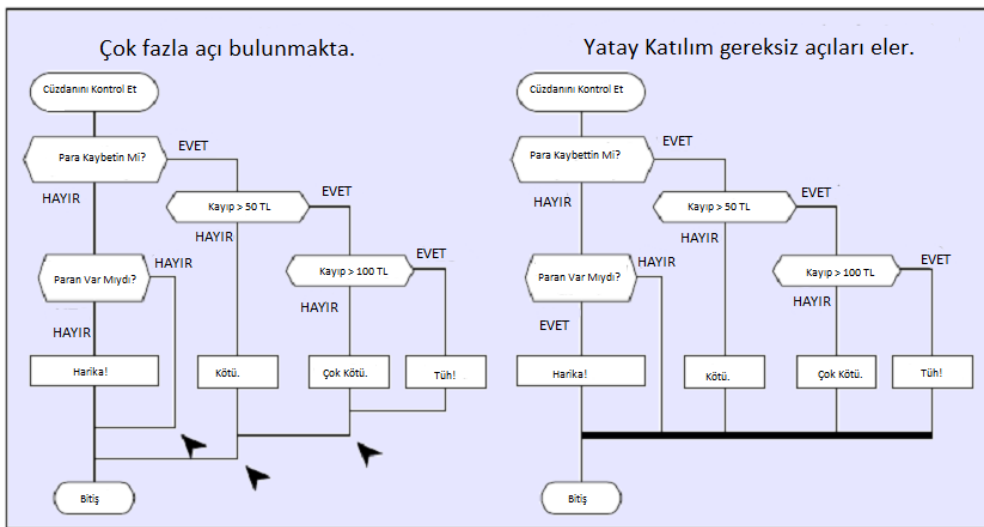
Akış diyagramı konusunda pek çok kaynak incelenmiştir. Bunlardan en öne çıkanları UML aktivite ve sıralama (sequence) diyagramları [9] ile DRAKON diyagramlarıdır [10]. UML diyagramları, sektör standardı haline gelmiş diyagramlar olmalarına rağmen özellikle karmaşık yapılar söz konusu olduğunda diyagramların anlaşılabilirliği kolaylıkla kaybolabilmektedir. Her ne kadar proje kapsamında akışlar bir modelin bir durumu içerisindeki davranışları ile sınırlı olsa da zaman zaman karmaşık ve uzun akışlar içerebileceklerdir. DRAKON’da temel olarak akış diyagramının kullanıcılar tarafından anlaşılabilirliğini artırmak için birtakım önlemler tasarlanmıştır. Bu amaçla şema içerisinde yer alan bileşenlerin konumları, temel akış açısından bilgi içerecek hale gelmişlerdir. İlk olarak DRAKON şemalarında ok işareti kullanımı sınırlandırılmıştır. Bütün akışlar birkaç istisna dışında aşağı yönlüdür (Şekil 2).



Şekil 2. Örnek DRAKON Akışı [10]

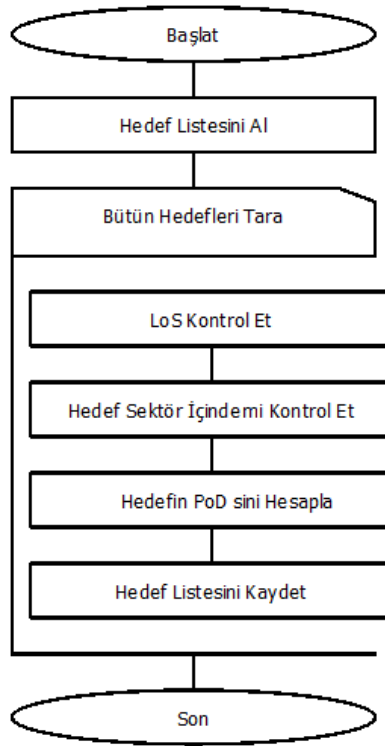
Okuyucu, bir DRAKON modelinde olay gelişimini ve akış önceliğini kolaylıkla ayırt edebilmektedir. DRAKON formatında grupların soldan sağa doğru işletilmesi gerektiği ifade edilmektedir. Ayrıca yukarıdaki grupta tek boyutlu uzun akış diyagramlarının önüne geçilmesine izin vermektedir.

Farklı patikalar söz konusu olduğunda DRAKON, en yüksek ihtimalli yani en çok çalışması beklenen akışın en solda ve diğer akışların öncelik ve sıklık durumuna göre sağa doğru sıralanmasını önermektedir. Şekil 3'te verilen diyagramda, sağa doğru gittikçe fonksiyonların işletilme sıklığının azalmasını beklediği anlaşılmaktadır.



Şekil 3. Örnek DRAKON alternatif patikaları [10]

Proje kapsamında DRAKON benzeri bir yapı kullanılmasına karar verilmiştir. DRAKON sadece proje paydaşlarının ortak anlayışa ulaşabilmesi için hazırlanmış bir çerçeve sunduğundan diyagramlarda herhangi bir seviyede kod üretimi mümkün değildir. Proje kapsamında hazırlanan akışların koda dönüştürülebilmesi için her bir şema elemanının ayrıntılarının doldurulması gerekmektedir. Bu nedenle proje kapsamında kullanıcıların hem parametrik işlemleri hem de kontrol işlemlerini yapabilmelerini sağlamak amacı ile metin girişi yapılmasına imkân sağlayacak bir yapı da geliştirilecektir (Şekil 4).



Şekil 4. Örnek radar model akışı

#### 4.2. Matematiksel Yorumlayıcı

Aksiyon içeren bileşenler içerisine yapılacak matematiksel operasyonlar kullanıcı tarafından girilecektir. Çoklu satırın girilebileceği bu ifadelerde in-fix notasyonu ile atama operatörleri kullanılabilir. Örneğin kullanıcı model parametrelerini ve daha önce tanımlanmış parametreleri kullanarak “ $x = a * b$ ” gibi bir ifade ile  $x$ 'in değerini güncelleyebilecektir. Koşul içeren bileşenler ise mantıksal ifadeler alabileceklerdir. Mantıksal ifadeler tek satırda ifade edilecek ve çıktı olarak doğru ya da yanlış olarak sonuç üreteceklerdir.



Kullanıcının tanımlayabileceği “eşittir”, “büyüktür”, “küçük eşittir”, “ve”, “veya” ve “değil” gibi mantıksal operasyonları ve “çarpma”, “bölme”, “toplama”, “parantez” ve “fonksiyon çağırma” gibi matematiksel fonksiyonları kullanabilmesi için bir yorumlayıcı gerçekleştirilecektir. İlgili yorumlayıcı, ilgili matematiksel ifadelerin içerisinde yer alan değişkenleri tespit ederek, bunları mümkünse otomatik olarak (isimler uyuşuyor ise), değilse kullanıcı yardımı ile model parametreleri ve formül kütüphanesinin formülleri ile eşleştirebilecektir.

Matematiksel yorumlayıcı, girilen parametrelerin birimleri üzerinde de kontrol yapacak ve olası hatalı birim eşleştirmeleri üzerine hata uyarıları üreterek kullanıcı hata payını azaltmayı hedefleyecektir. Matematiksel yorumlayıcı, kullanıcının parametrelere atayacağı veri setlerini kullanarak geliştirme zamanında sonuçlar üretebilecek, aralık verileri ile grafik olarak sonuçları sergileyebilecektir. Yorumlayıcının iki temel amacından ilki, tasarım zamanında kullanıcının işini kolaylaştırmak, ikincisi ise kod üretimi aşamasında ilgili matematiksel ifadeleri parametreler ile eşleştirecek şekilde kod üretimini sağlamaktır.

### 4.3. Kod Üretimi

Kod üretimi bağlama uygun verinin birtakım metotlar kullanılarak yazılım koduna aktarılması işidir. Temel olarak dönüşüm (transformer) üretimi ve şablon (template) üretimi olacak şekilde iki farklı teknik öne çıkmaktadır [3]. Dönüşüm üretiminde, üretimi sağlayacak olan veri belirli bir yazılım içerisinde işlenerek bir metinsel çıktı üretilmesi sağlanır. Bu aşamada bütün bilgi kodun içerisine gömülüdür. Şekil 5’te bu konuda yapılmış bir örnek görülmektedir.

```
//insert type parameter first
if(superClass.isEmpty()) {
    declLines << indentPlus + "//these two parameters are generated automatically";
    declLines << indentPlus + "int version;";
    declLines << indentPlus + rootName + "_Enum " + rootName + "_Type;";

    initLines << indentPlus2 + "version = " + QString::number(treeModel->getVersion()) + ";";

    copyConstructorLines << indentPlus2 + rootName + "_Type = rootName + "_Type;";
    copyConstructorLines << indentPlus2 + "version = instance.version;";

    sizeMethodLines << indentPlus2 + "size += sizeof(int); //version";
    sizeMethodLines << indentPlus2 + "size += sizeof(" + rootName + "_Enum)";

    encodeMethodLines << indentPlus2 + "memcpy(data, (char*)&version, sizeof(int));";
    encodeMethodLines << indentPlus2 + "data += sizeof(int);";
}
```

**Şekil 5.** Dönüşüm üretimi örneği

Şablon üretiminde ise üretimi sağlayacak veri şablon olarak hazırlanmış dosyalar kullanılarak aktarılır. Şablon üretiminde çıktı, şablonlar ve şablonlar içerisinde yer alan komutlar ile belirlenir. Özellikle benzer niteliklere sahip kodların üretiminde etkin olarak kullanılması uygun olur. Kodun yapısı ve üretimi fazla karmaşıklaştığında şablonun okunabilirliği azalacaktır. Bu gibi durumlarda dönüşüm üretimi tercih

edilmelidir. Proje kapsamında şablon ve dönüşüm üretim teknikleri beraber kullanılmaktadır.

Şablon üretimi çıktı kodunun yapısının değiştirilmesi gerektiğinde ve farklı bir çıktı diline ihtiyaç olduğunda çok hızlı uyarlanabilmektedir. Öte yandan dönüşüm üretimi bu esnekliğe sahip değildir. Şekil 6’da bir şablon üretim örneği verilmektedir.

```
#pragma once
#include "ObjectClassBase.h"
#include "ObjectClass&NAME&NotificationInterface.h"

class ObjectClass&NAME& :
    public ObjectClassBase
{
public:
    ObjectClass&NAME&(std::wstring objectInstanceName, rtil516::ObjectClassHandle classhandle,
        ~ObjectClass&NAME&(void);
```

**Şekil 6.** Şablon üretimi örneği

Model tanımlama dilinin ön aşaması olan kod üretimi ile kullanıcı, model özelinde hiçbir kodlama yapmaksızın kavramsal modeli ve tasarımı oluşturarak hedef dil için kod üretebilecektir. Kod üretimi sonrasında kullanıcı tercihlerine uygun olarak salt modellerin ve etkileşimlerin sınıfları ile davranış sınıfları üretilecektir. Kullanıcı tercih ederse HLA 1516:2000 veya HLA 1516:2010 standartlarına uygun olarak model HLA bağlantı kodları da üretilecektir.

## 5. SONUÇ

Kavramsal modelleme öncelikle proje paydaşlarının ortak anlayışa ulaşabilmesi için oldukça önemlidir. Ancak kavramsal modelleme nihai ürün ile bütünlük kalamamaktadır. Bu nedenle kavramsal modelin tanımlanabileceği ve aynı ortamı kullanarak tasarım ve geliştirme yapabilme yeteneğine sahip olacak bir dil tasarladık.

Geliştirilen dilin kapsamını sınırlı tutabilmek için kabiliyetlerini “kesikli zaman simülasyonları için durum tabanlı modeller” ile sınırladık. Bu doğrultuda kullanıcılara simülasyon tanımlama açısından çok seviyeli bir yaklaşım ve yöntem sunmayı hedefledik. Tasarladığımız alana özgü dilin düzeyi yüksek seviye bir dilin de üzerindedir. Bu yaklaşım ile farklı hedef ortamları için yeniden kullanım olasılığı gözetilmiştir. Ayrıca kavramsal seviyenin yanı sıra tasarım seviyesinden de düzenlemeye ve yeniden kullanıma imkân sağlanması hedeflenmektedir.

Kod üretim teknikleri ile yapılan altyapısal ya da model bazlı değişikliklerin sisteme hızlı ve tutarlı bir şekilde yeniden tanımlanabilecek olmasının simülasyon yaşam döngüsüne sürat kazandırmasını ve geliştirici hatalarını azaltmasını bekliyoruz. Ayrıca geliştirilen modellerin gelecek proje ve entegrasyon konularında yeniden kullanım ve adaptasyon kolaylığı sağlamasını bekliyoruz.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] Chomsky, Noam (1979), Language and Responsibility, Pantheon
- [2] Kleppe, A. (2008). Software Language Engineering: Creating Domain-Specific Languages, Addison-Wesley Professional
- [3] Fowler, M. (2010). Domain Specific Languages, Addison-Wesley Professional
- [4] Brooks, F. (1995). The Mythical Man Month, Addison-Wesley Professional
- [5] Karagöz, A., Demirörs, O., Çengel, Ç., & Ündeğer, Ç. (2006). Simülasyon Sistemlerinde Görev Uzayı Kavramsal Modeli Geliştirme: Bir Süreç Tanımı. SAVTEK
- [6] Zorba, O. Atun, M. Can, A., (2013) Deniz Harp Oyunu ve Kazanımları, USMOS
- [7] MSG-058 (2012), Final Report, Conceptual Modeling (CM) for Military Modeling and Simulation (M&S)
- [8] Eryilmaz, U. and N. Alpay Karagöz. 2009. "KAMA: A Tool for Developing Conceptual Models for C4ISR Simulations" (09E-SIW-020), EURO SIW. Istanbul, Turkey: Proceedings of the Euro 2009 Simulation Interoperability Workshop.
- [9] [www.omg.org/spec/UML/2.5.1](http://www.omg.org/spec/UML/2.5.1)
- [10] Mitkin, S. (2011) DRAKON The Human Revolution of Understanding Programs
- [11] IEEE Std 1730-2010 Distributed Simulation Engineering and Execution Process (DSEEP)

## SİMÜLASYON KAYITLARININ VERİMLİ SAKLANMASI VE İŞLENMESİ

**Recep Fırat Çekinel <sup>(a)</sup>, Doğan Poyraz <sup>(b)</sup>, Pınar Karagöz <sup>(a)</sup>,  
Erkin Çilden <sup>(b)</sup>, Halit Oğuztüzün <sup>(a)</sup>, Emre Gültekin <sup>(b)</sup>**

<sup>(a)</sup> ODTÜ, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü,

{rfcekinel, karagoz, oguztuzn}@ceng.metu.edu.edu.tr

<sup>(b)</sup> STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Tic. A.Ş.,

Mustafa Kemal Mahallesi 2151.Cd No:3/A Çankaya Ankara,

{dogan.poyraz, erkin.cilden, egultekin}@stm.com.tr

### ÖZ

Simülasyon çalışmalarında, yapılan her bir işlemin kaydının (log) tutulması, simülasyonun tekrarı ve analizi için önemlidir. Günümüzde, oldukça yüksek miktarda ve sürekli olarak üretilen işlem kayıtlarının saklanması ve analiz edilmesi için çeşitli çözümler kullanılmaktadır. Verinin saklanması sırasında, simülasyon sistemlerinin performansının en az düzeyde etkilenmesi ve verilerin mümkün olduğunca hızlı olarak işlenmesi beklenmektedir. Simüle edilen araç ve ortamların işlem kayıtlarının yapısal olarak farklılık göstermeleri (unstructured) ve veri boyutunun oldukça artmasıyla birlikte ilişkisel veritabanı yönetim sistemleri (RDBMS) yerine NoSQL sistemlerinin kullanımının arttığı gözlemlenmektedir. NoSQL veritabanlarının ölçeklenebilirlik (scalability) ve esneklik (flexibility) yönlerinden ilişkisel veritabanlarına göre daha verimli çalışması bu eğilimin en önemli nedenlerindedir. Bu çalışmamızda simülasyon çalışmalarındaki işlem kayıtlarının tutulması için gerekli isterler ortaya konmuş, kullanılabilir NoSQL sistemler incelenmiş ve bu alanda yapılmış akademik çalışmalarda NoSQL sistemlerde ulaşılmış performans ölçüleri karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** büyük ölçekli log analizi, büyük veri, NoSQL, simülasyon, veri yönetimi

## EFFICIENT STORAGE AND PROCESSING OF SIMULATION LOGS

### ABSTRACT

In simulation studies, data logging is important in terms of reproducibility and analysis of the simulation. Nowadays, various solutions are used for storing and analyzing the data logs, which are produced quite often and large in quantity. During the storage of the data logs, it is expected that the performance of the simulation systems will be minimally affected and the data logs will be processed as fast as possible. It is observed that the use of NoSQL systems instead of relational database management systems increases in the simulation environment because data logs are unstructured and they get bigger. One of the most important reasons of this trend is that NoSQL databases work more efficiently than the relational databases from the scalability and flexibility perspectives. In this study, the requirements for log management in simulation environments are described, NoSQL systems that can be used to keep data logs in simulation studies are examined and performance measurements achieved in NoSQL systems in academic studies in this field have been discussed comparatively.

**Keywords:** big data, data management, large-scale log analysis, NoSQL, simulation

### 1. GİRİŞ

Simülasyon, bir sürecin veya sistemin davranışını tanımlayan bir modelin zaman boyutunda işletilmesini sağlayan yöntemdir. Bir simülasyon çalışması, simülasyon koşumu sırasında ortaya çıkan kayıtların incelenmesini kapsamaktadır. Günümüzde bilgisayarda gerçekleştirilen simülasyonlarla herhangi bir sistemin özellikleri ve davranışları analiz edilerek farklı senaryolarda sistemin nasıl davranacağı tahmin edilebilmektedir. Bu nedenle, simülasyonlar belirli varsayımlar altında sistem hakkında geleceğe yönelik analizler yapılabilmesine olanak sağlar.

Simülasyonlarda her bir koşul ile ilgili bilgilerin ve simülasyon sırasında meydana gelen olayların (işlemlerin) saklanması simülasyonun analizi ve tekrarlanabilmesi için gereklidir [1]. Ancak günümüzde birçok sistemde veri miktarı çok büyük boyutlara ulaşmıştır. Bu bilgilerin veritabanları gibi ortamlarda saklanması da oldukça maliyetli bir işlemdir. İşlem kayıtlarının tutulması ve verimli bir şekilde işlenebilmesi, özellikle analiz amaçlı simülasyonlarda darboğaz olabilmektedir. Koşum çıktıları temel olarak geliştirici ve analiz kayıtları olmak üzere ikiye ayrılabilir. Geliştirici kayıtları, simülasyon yazılımının çalışmasını takip etmek ve hataları belirlemek için geliştiricilerin kullandığı kayıtlardır ve genellikle son kullanıcının ilgileneceği veriler içermez. Analiz kayıtları ise koşum sırasında modellerin davranışlarını ve olayları içerir. Simülasyon sonunda üretilen raporlar bu çıktıları kullanacağı için analiz kayıtlarını

doğru, tutarlı ve verimli işlenebilecek şekilde sorgulamak ve raporlamak kullanıcı deneyimi ve sonuç tutarlılığı açısından da çok kritik bir hal alabilmektedir.

Analiz kayıtları öncelikli olarak görselleştirme/animasyon ve istatistiksel analiz amacıyla kullanılmaktadır. Görselleştirme için sadece varlıkların konumlarıyla ve durumlarıyla ilgili kayıtlar ve benzer bilgiler yeterli iken istatistiksel analizler için modellerin ürettiği en detaylı veriler önemli hale gelebilmektedir. Modellerin üreteceği veriler detaylı ve çeşitli olabileceği için verilerin analize uygun yapıda saklanması da işleme hızını etkileyebilmektedir. Her ne kadar tasarım ve geliştirme aşamasında kayıtlarla ilgili yapısal kararlar alınsa da, çoğu zaman değişiklik kaçınılmaz olmaktadır. Bu nedenle kayıtların tutulmasında kullanılan altyapının belirli bir seviyede esneklik sağlaması ve bu esnekliği yönetebilmesi hem geliştiriciye hem de son kullanıcıya kayıtları görüntüleme ve yönetme açısından kolaylık sağlamaktadır.

Bu çalışmamızda, simülasyon sistemlerinde işlem kayıtlarının (log) saklanması için kullanılabilir NoSQL veritabanları incelenmiştir. Ayrıca bu alanda yapılan akademik çalışmalarda kullanılan mimariler ve bu çalışmalarda ulaşılan performanslar tartışılmıştır. Çalışmamızın devamı şu şekildedir. 2. bölümde simülasyon sistemlerinde ideal bir veritabanının hangi istekleri karşılaması gerektiği açıklanmıştır. 3. bölümde literatürde sıkça kullanılan veritabanları anlatılıp, 4. bölümde ise işlem kayıtlarının tutulduğu sistemlerde sıkça kullanılan mimariler belirtilmiştir ve 5.bölümde de bu mimarileri kullanan sistemlerin ulaştığı performans değerleri tartışılmıştır.

## **2. SİMÜLASYON SİSTEMLERİNDE KAYIT TUTMA İSTERLERİ**

İşlem kayıtlarının saklanması birçok çalışma alanında gerekmektedir. Simülasyon sistemlerinde sistemin ara çıktıları, çalıştırılma parametreleri ve simülasyon çalışmasında hesaplanan önemli değerlerin ve ortaya çıkan olayların kayıt olarak veritabanlarında saklanması gerekmektedir. Simülasyon yeniden oynatılmak(replay) istendiğinde veritabanına yazılan verilere göre simülasyon koşumu canlandırılabilir. Bu nedenle, seçilecek veritabanı dar boğaz yaratmamak adına birtakım yeteneklere sahip olmalıdır.

Simülasyon sistemlerinde aynı anda birçok koşul çalışabilmektedir. Koşumlar aynı anda işlem kayıtlarını yazmaya çalıştıklarında sistemin performansında aksama meydana gelmemesi için veritabanının yazım hızının yüksek olması gerekmektedir. Ayrıca, simülasyon sistemlerinde kayıtların içeriği farklılık gösterebilmektedir. Örneğin birden çok algılayıcının (sensör) simüle edildiği bir sistemde bir radarın verilerinin içeriğiyle kameranın verilerinin içeriği farklılık göstermektedir. Bu nedenle veritabanının esnek şemalı olması gerekmektedir. Bunun yanı sıra, kaydedilen işlemlerin raporlanmasının istendiği durumlarda veritabanının farklı veri alanlarını

sorgulayabilir olması gerekmektedir. İşlem kaydı verilerinin hacim olarak oldukça büyük olabileceği düşünüldüğünde herhangi bir veri alanının sorgulanması indeksleme olmadığı takdirde sorgulama performansını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle gerekli durumlarda herhangi bir veri alanının indekslenebilir olması da gerekmektedir.

Simülasyon sistemlerinde her koşulun süresi farklılık gösterebilir. Simülasyon motoru üzerinde birden çok koşulun da aynı anda çalıştırılabileceği göz önüne alınırsa işlem kayıtlarının hacimce ulaşacağı büyüklükten dolayı tek bir makinede tutmak zorlaşabilir. Ayrıca tek kırılma noktası (single point of failure) gibi sorunlar yaşamamak adına veritabanının yatay olarak ölçeklenebilir yani mevcut donanımın yanına yeni donanımların entegre edilebilir olması gerekmektedir. Ancak bulunabilirlik (availability) isteri, simülasyon sistemlerinde, operasyonel sistemlere göre daha düşük öncelikli olabilir. Buna ek olarak, sorgulama yapıldığında dağıtık veritabanının farklı veritabanı sunucularında tutulan verileri toplayabilmesi gerekmektedir.

Dağıtık simülasyon uygulamalarında (HLA-tabanlı dağıtık simülasyonlar gibi), simülasyon birimleri olay akımları (event streams) yaratabilir. Bunlar ayrı ayrı kaydedilip koşul sonrasında zaman damgalarına göre birleştirilebilir. Birleştirmeyi koşul zamanında yapmaya çalışmak dar boğaz yaratabilir.

Özetle, bu isterleri şu şekilde sıralayabiliriz:

- Simülasyon sırasında darboğaz yaratmadan kayıtların hızlıca yazılabilmesi
- Farklı simülasyon birimlerinin kayıt yapılarının farklılık gösterebilmesi nedeniyle esnek veri yapıların desteklenmesi
- Simülasyon sonuçlarının hızlı raporlanması için ihtiyaç duyulan herhangi bir kayıt alanının indekslenebilmesi
- Tek kırılma noktasını engellemek için yatay olarak ölçeklenebilir olması
- Dağıtık simülasyon sistemlerinde kayıtların birleştirilmesi işleminin hızlıca yapılması

### **3. SİMÜLASYON KAYIT YÖNETİMİ İÇİN VERİ TABANI SEÇİMİ**

İlk kez 1988 yılında ortaya çıkan NoSQL kavramı [2], ACID (bölünmezlik, tutarlılık, izolasyon, süreklilik) özelliklerinin getirdiği veri bütünlüğü ve veri doğruluğu kavramlarından ödün verip yüksek erişilebilirlik ve ölçeklenebilirlik gerektiren durumlar için daha uygundur. Günümüzde farklı amaçlara yönelik birçok NoSQL veritabanı sistemi geliştirilmiş olup bu veritabanları veri modellerine ve veri saklama yöntemlerine göre anahtar-değer, doküman tabanlı, sütun tabanlı ve çizge veritabanları olarak 4 kategoriye ayrılmıştır [3, 4].

### 3.1. Anahtar-değer tabanlı veritabanları

Anahtar-değer veritabanlarında [5], özgün anahtarlar ve bu anahtarlara karşılık gelen değerler tutulmaktadır. Herhangi bir şema içermeyen bu veritabanları sade bir veri yapısına sahiptir. Bu kategorideki veritabanları sadece verilerin alınabilmesini ve yazılablmesini desteklemektedir. Veriler sadece anahtar ismine göre çekilebilmekte ve yazılablilmektedir. Anahtar-değer veri yapısının sadeliği sayesinde performans olarak önemli kazanımlar sunmaktadır. Veri yapısının sadeliği sayesinde basit aramaların yapıldığı sorgular düşük gecikme (low latency) ve yüksek verimle (high throughput) gerçekleştirilebilmektedir. Ancak, belirli bir aralıkta değerlerin sorgulanması gibi daha karmaşık yapıdaki sorgularda performans olarak ilişkisel veritabanlarına göre geride kalmaktadırlar.

#### 3.1.1.Redis

Kayıt yönetimi çalışmalarında yoğun olarak kullanılan anahtar-değer veritabanlarından biri olan Redis [6], yaratma, okuma, güncelleme ve silme işlemlerini gerçekleştirebilmektedir. Redis'te veriler bellekte tutulmaktadır. Bu nedenle okuma ve yazma işlemleri diske göre çok hızlı bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Simülasyon ve işlem kayıtlarının tutulduğu sistemlerde önbellek (cache) olarak kullanılmaktadır [7].

### 3.2. Doküman tabanlı veritabanları

Doküman tabanlı veritabanlarında [5] veriler doküman olarak tutulmaktadır. Dokümanlar genellikle JSON gibi yarı yapı (semi-structured) olup anahtar-değer ikililerinden oluşmaktadır. Anahtar-değer veritabanlarından farklı olarak her özgün anahtar bir dokümanla eşleşmektedir ve her dokümanda birden çok anahtar-değer ikilileri bulunabilmektedir. Dokümanların belirli bir şemaya sahip olması gerekmemektedir. Bu nedenle her dokümanda farklı anahtarlar bulunabilir. Ayrıca anahtar-değer veritabanlarına göre daha esnek bir yapı sunarak dokümanın tamamının ya da belirli bir kısmının sorgulanabilmesini sağlar.

#### 3.2.1.Elasticsearch

Dağıtık bir veritabanı olan Elasticsearch, JSON yapısındaki dokümanlarda arama ve analitik işlemleri için kullanılmaktadır. Elasticsearch tek başına kullanılabildiği gibi veri işleme aracı olan Logstash ve veri görselleştirme aracı Kibana ile entegre olarak kullanılabilmektedir. Özellikle işlem kayıtlarının saklanması Logstash, Elasticsearch ve Kibana ile geliştirilmiş sistemler [9,10,11] verimli bir şekilde çalışmaktadır.

#### 3.2.2.MongoDB

C++ dilinde yazılan açık kaynak kodlu bir veritabanı olan MongoDB'de [12] JSON yapısındaki dokümanlarda işlem yapılır. Bölümlenme işlemi(sharding) sayesinde yatay olarak ölçeklenebilir. Zengin sorgulama yeteneklerine sahip olan MongoDB, dinamik sorguları (çalışma zamanında derlenen SQL ifadeleri) desteklemektedir. İçerik yönetim



sistemleri, mobil ve blog siteleri gibi esnek veri yapılarının gerektiği yerlerde kullanılabilir.

### 3.3. Sütun tabanlı veritabanları

Sütun tabanlı veritabanları [5] her satırı gösteren özgün anahtarlar ve her satırın içerisinde de anahtar-değer ikilileri barındırmaktadırlar. Her satırı gösteren anahtarlara “sütun anahtarı”, ikincil anahtarlara ise “sütun anahtarı” denir. Ayrıca veriler sıklıkla birlikte erişilen sütunlar birlikte olacak şekilde bölümlenerek performans olarak avantaj sağlar. Yani bir satıra ait bütün sütunlar birlikte tutulmayıp sadece birlikte erişilen sütunlar sütun ailesi olarak tutulurlar. Bu nedenle doküman tabanlı sistemlerde bir kerede objeye ait bütün bilgileri çekilebilirken, sütun tabanlı sistemlerde bu işlem birleştirme işlemleri gerektirdiğinden daha uzun sürmektedir. Sütun tabanlı veritabanları, yüksek okuma yazma performansı ve yüksek bulunulabilirlik (high availability) gerektiren durumlar için tasarlanmıştır.

#### 3.3.1.Cassandra

Açık kaynak kodlu bir veritabanı olan Cassandra’da [13] her satırda sütunlar ve sütun aileleri bulunmaktadır. Her satırda farklı sayıda sütun bulunabilmektedir. Ayrıca Cassandra’da tutarlılık seviyesi ayarlanabilir. Tutarlılık sorunları verilerin zaman damgasına (timestamp) göre çözülür. Cassandra’da bütün düğümler okuma ve yazma isteklerini cevaplayabilirler. Cassandra, hacimce büyük miktardaki verileri esnek bir yapıda saklayabilmektedir. Özellikle okuma ve yazma işlemleri çok hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Dağıtık yapıda düğüm sayısı arttırıldığında Cassandra’nın verimliliği artmaktadır. Ayrıca replikasyon stratejisi sayesinde yüksek erişilebilirlik gerektiren durumlarda idealdir.

### 3.4. İlişkisel veritabanları

İlişkisel veritabanları, bilişim sistemlerinde veri yönetim sistemi olarak uzun bir süredir kullanılmaktadır. Sabit bir şemaya göre verilerin tutulduğu bu sistemlerde sorgulama işlemleri gerekli tabloların birleştirilmesiyle (join) yapılmaktadır. Sorgulamalar, yapılan optimizasyonlar ve indekslemeler sayesinde verimli bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Ancak günümüzde, verilerin hacimce büyük miktarlara ulaşmasıyla [16] ve verilerin belirli bir yapıda olmamasından dolayı NoSQL veritabanları ön plana çıkmıştır. Yine de MySQL ve PostgreSQL gibi açık kaynak kodlu sistemler ve bazı ticari ilişkisel veritabanlarının sorgu optimizasyonlarıyla bu sorunları aştığı yapılan çalışmalarda ortaya konmaktadır [17]. İlişkisel veritabanları daha çok merkezi yapılarda kullanılmak için uygun olup gerekirse dağıtık olarak kullanılabilir [18]. Ancak ilişkisel veritabanlarını dikey olarak ölçekleyerek yani mevcut makineye daha fazla güç (CPU, RAM) ekleyerek kullanmak daha uygundur. İlişkisel veritabanlarının sağladığı en büyük avantajlardan biri de ACID özellikleridir. Bu sayede sistemde veri bütünlüğünün korunup doğru ve eksiksiz bir biçimde saklandığı garanti edilmektedir.

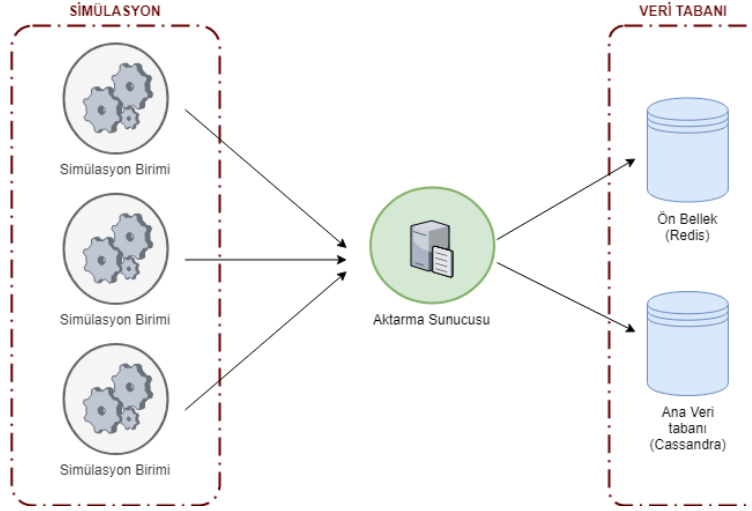
## 4. BENZER SİSTEMLERDE KAYIT TUTMA ÇÖZÜMLERİ

Farklı kaynaklardan sürekli olarak gelen işlem kayıtlarının veritabanına yazım işleminin çok kısa bir sürede gerçekleştirilerek sistemin çalışmasını en az düzeyde etkilemesi gerekmektedir. Günümüzde simülasyon dahil birçok alanda anlık gelen veri miktarı veritabanlarının yazım hızının üzerine çıkıp dar boğaz yaratabilmektedir. Bu durumlarda sistemin akışının aksamaması için farklı çözümler geliştirilmiştir. Aşağıda bu durumlar için geliştirilen sistemlerin başlıcaları sunulmuştur.

### 4.1. Ön bellek veritabanı kullanımı

İşlem kayıtlarının veritabanına yazılmasının simülasyon sisteminde darboğaza neden olmaması için veritabanının yatay olarak ölçeklenebilir olması gerekmektedir. İlişkisel veritabanları yatay ölçeklenebilirlik için uygun değildir. Verilerin dağıtık olarak tutulacağı bu tip durumlar için NoSQL veritabanları daha uygundur. Ayrıca sistemin sürekli olarak kullanılabilmesi de gerekmektedir. Yani herhangi bir veritabanı sunucusunun çökmesi sonucu veri kaybının yaşanmaması gereklidir. Bu nedenle bu sistem mimarisinde işlem kayıtları ana veritabanının yanı sıra ön bellek olarak farklı bir veritabanında tutulur. Ön bellek olarak kullanılacak veritabanının yüksek performanslı olması ve yazım sırasında gecikme süresinin (latency) çok düşük olması gerekmektedir. Anahtar-değer veritabanlarının sistem performansını çok az etkilemesi bu tip mimarilerde ön bellek olarak tercih edilmelerine neden olmaktadır. Ön bellek veritabanları, yedeklemeye ek olarak küçük boyuttaki önemli veriye hızlı erişim amacıyla ana veritabanına opsiyon olarak da kullanılmaktadır.

Şekil 1’de gösterilen, SPring-8 [7] sisteminin işlem kayıtları da bu mimariye göre saklanmaktadır. İlgili sistemde Redis kısa vadeli veritabanı ön bellek olarak, yakın zamana ait verilere hızlı erişim için kullanılmıştır. Ana ve kalıcı veritabanı olarak Cassandra kullanılmıştır. İstemci, aktarma sunucusu ve veritabanı olmak üzere 3 katmanlı bir yapıdan oluşan SPring-8’de katmanlar arası iletişim ZeroMQ itme/çekme (push/pull) düzeni ile sağlanmıştır. Kurulan mimarinin yazma hızı(throughput) saniyede 120.000 işlem olarak ölçülmüştür.



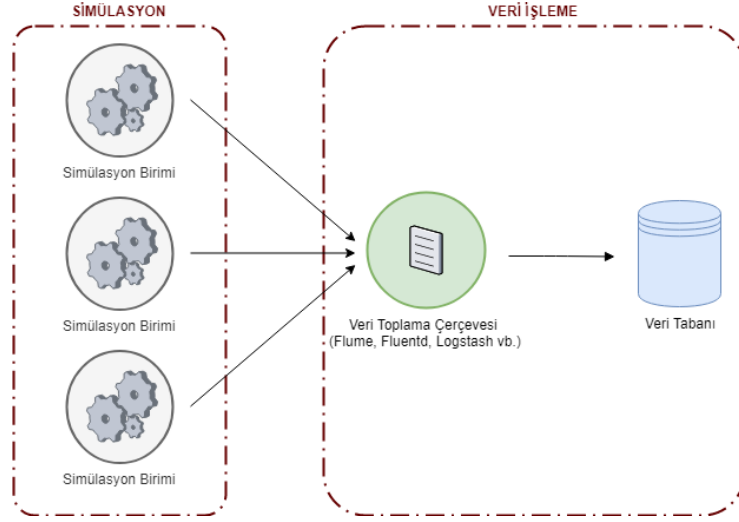
Şekil 1. Ön bellek veritabanı mimarisi [7]

#### 4.2. Veri toplama çerçevelerinin kullanımı

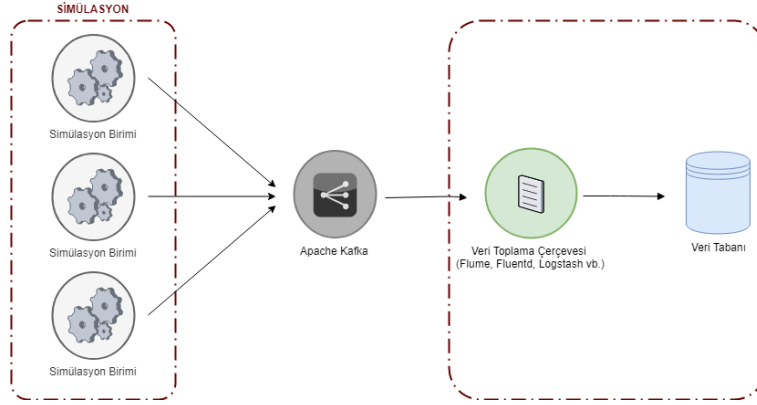
Kayıtların saklanması için başvurulan bir diğer yöntem de Flume [19] ve Logstash [9, 10, 11] gibi veri toplama çerçevelerinin kullanılmasıdır. Kayıt üreten işlemlerden kayıtlar bu yazılımlar sayesinde toplanır. Daha sonra gerekli ön işlemlerden geçirilen kayıtlar sisteme akıtılır. Özellikle Logstash, Elasticsearch ve Kibana ayrı ayrı çalışabileceği gibi entegre olarak sıkça kullanılmaktadır. Bu üç yazılımın beraber çalıştığı sistemlere ELK Yığıt (Stack) [20] denmektedir.

Şekil 2’de gösterilen yapıyı kullanan, ELK Yığıt, PanDA sistemi [9] gibi kayıt analizi çalışmalarında tercih edilen bir mimaridir. Yüksek hacimde veri, kayıt dosyalarından Filebeat tarafından alınarak Logstash’e aktarılır. Filebeat, dosyalardaki kayıtları okuyup Logstash’e TCP/IP üzerinden aktaran ve bu sırada Logstash’deki sıkışıklığı da takip edip trafik hızını değiştirebilen uygulamadır. Logstash, gelen kayıt verilerini birleştirip belli filtrelerden geçirerek Elasticsearch’e gönderir. Elasticsearch ise kayıt verilerini JSON dokümanına dönüştürür ve indeksleme işlemi gerçekleştirilir. Daha sonra Elasticsearch’e kaydedilen veriler Kibana aracılığıyla web üzerinden şablonlar ve tablolar kullanılarak görselleştirilir. PanDA sisteminin ELK Yığıt mimarisini kullanarak günlük 60 GB işlem kaydını sorunsuz analiz edebildiği raporlanmıştır.

Şekil 3’te gösterilen Kafka’nın veri toplama çerçevesinin önüne eklendiği yapı ise bu mimarinin bir uzantısıdır. [21] çalışmasında kullanılan bu yapıda kayıt üreten birimlerin verileri öncelikle Apache Kafka’ya aktarılır. Kafka veya MQ (message queue) gibi mesaj aracısı (message broker) yapıların kullanılması sistemin hataya dayanıklılığını artırır. Şekil 2’de gösterilen yapıda ana makinenin sistemden kopması durumunda işlem kayıtları kaydedilemediği için kaybolabilir. Ancak Şekil 3’te bütün işlem kayıtları Kafka gibi bir mesaj aracısında toplandığı için veri kaybı yaşanmaz.



Şekil 2. Veri toplama çerçevesi veri tabanı mimarisi [9]



Şekil 3. Apache Kafka ve veri toplama çerçevesi veri tabanı mimarisi [21]

#### 4.3. CQRS modelinin kullanımı

CRUD (create, read, update, delete) modelinin kullanıldığı sistemlerde objelerin son durumları tutulmaktadır. Bunun yerine objelerde değişime sebep olan etkinlikler olay (event) olarak tutulursa objenin zamansal olarak uğradığı değişimler hakkında bilgi sahibi olunabilir. Ayrıca objeyle ilgili olaylar yeniden oynatılarak objenin son durumu doğrulanabilir. Objelerde meydana gelen değişimlerin olay olarak kaydedildiği bu yapıya olay kaynağı(event sourcing) denilmektedir [15].

CQRS( Command Query Responsibility Segregation) modeli komut (command) ve sorgu (query) servislerinden oluşmaktadır. Komut servisi objenin durumunu değiştiren işlemlerden sorumluyken sorgu servisi objenin son durumu hakkında sorgulama işlemlerinden sorumludur. CQRS modeli olay kaynağı ile beraber sıkça kullanılmaktadır [8, 15]. CQRS objelerde yapılan işlemleri okuma ve yazma olarak ayırarak ölçeklenebilirliği arttırmayı amaçlamaktadır. Örneğin, komut servisinde normalize edilmiş bir veritabanı gerekliken sorgu servisinde birleştirme (join) işleminden kurtulmak için NoSQL gibi normalize edilmemiş veritabanları

kullanılabilir [15]. Komut ve sorgu veritabanları ise sonunda tutarlı (eventually consistent) olacak şekilde senkronize edilmektedir. CQRS mimarisi, dağıtık simülasyon çalışmalarında ve yüksek ölçeklenebilirlik gereken durumlarda kullanılabilir.

## 5. KARŞILAŞTIRMA

Literatürde, çalışmamızda sunulan veritabanları hakkında çeşitli karşılaştırmalı çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda farklı yöntemler kullanılmış olup Yahoo! tarafından geliştirilen YCSB (Yahoo! Cloud Serving Benchmark) [22] bu yöntemlerin başlıcalarındandır. YCSB, büyük veriler için farklı NoSQL veritabanlarının performanslarını ölçmek için kullanılmaktadır. YCSB ile veritabanlarının CRUD performansları farklı dağılımlardaki iş yükleriyle ölçümlenebilir.

Cassandra, HBase, Voldemort, Redis, VoltDB ve MySQL veritabanlarının performanslarını ölçmek için YCSB yöntemiyle yapılan çalışmada [18] farklı senaryolarla testler yapılmış ve sonuçlar endüstriyel bakış açısıyla tartışılmıştır. Çalışmada, okuma (%95 okuma, %5 yazma), okuma-yazma (%50 okuma, %50 yazma), yazma (%99 yazma), okuma-tarama (%47 okuma, %47 tarama ve %6 yazma) ve okuma-yazma-tarama (%25 okuma, %25 tarama ve %50 yazma) olmak üzere 5 farklı senaryoda veritabanlarının performansları ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda, Cassandra'nın okuma-yazma gecikme süresindeki fazlalığına karşın en verimli (throughput) veritabanı olduğu sonucuna varılmıştır. Özellikle Casssandra'nın düğüm sayısı arttırıldıkça daha performanslı çalıştığı tespit edilmiştir. Çalışmanın bir diğer önemli noktası da dağıtık olarak çalıştırılan Redis ve MySQL veritabanlarının da Cassandra'ya yakın bir okuma-yazma verimiyle çalışmasıdır. Ancak dağıtık çalıştırılan bu veritabanlarının ölçeklenebilirlik açısından diğer veritabanların gerisinde kaldığı belirtilmiştir.

PostgreSQL, MongoDB ve SQLite veritabanlarının değerlendirildiği çalışmada [14] ise robotik alanında mesaj kayıtlarının saklanması için performans testleri yapılmıştır. Yapılan testler farklı iş yüklerinde veritabanlarının verimini, gerçek veri setindeki performansını ve sorgu çeşitliliğini ve hızını ölçmektedir. Yapılan testler sonucunda MongoDB'nin diğer veritabanlarından daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Bu çalışmada kullanılan veri setinin JSON yapısında olması ve MongoDB'nin verileri JSON yapısında sakladığı göz önüne alındığında sonuçların beklentilerle örtüşüğü anlaşılmaktadır.

MongoDB, DB-O (açık kaynak kodlu ilişkisel veritabanı), DB-C (ticari ilişkisel veritabanı) kullanılarak yapılan bir diğer çalışmada [17] ise algılayıcı (sensör) kayıt verileri kullanılmıştır. Çalışmada toplu yükleme, anahtar arama, aralık sorgusu ve birleştirme sorgularında veritabanlarının performansı ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda MongoDB ve DB-C'nin bu testlerde DB-O'dan iyi sonuçlar verdiği

gözlemlenmiştir. Ayrıca MongoDB'nin DB-C'den geride kalmasına rağmen kabul edilebilir sonuçlara ulaştığı belirtilmiştir.

## 6. SONUÇ

Bir veritabanı modelinin diğer veritabanı modellerine göre daha iyi olan özellikleri olabileceği gibi başka yönlerden de diğer veritabanlarının gerisinde kalabilmektedir. Bu nedenle veritabanı seçiminde en önemli etmen, öncelikle simülasyon çalışmasının gereksinimlerinin tam olarak belirlenip buna göre alternatif veritabanlarının araştırılmasıdır. Çalışmamızda simülasyon sistemlerinde işlem kayıtlarının tutulması için kullanılacak veritabanlarının sağlaması gereken isterler belirtilmiştir. Ayrıca literatürdeki çözüm mimarileri açıklanıp geliştirilen çözümlerin performansları tartışılmıştır.

## 7. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 115A044 numaralı proje ile desteklenmiştir.

## 8. KAYNAKÇA

- [1] A. Rozinat, R. S. Mans, M. Song, and W. M. P. van der Aalst, Discovering simulation models, *Information Systems*, vol. 34, no. 3, pp. 305–327, 2009.
- [2] Lith A, Mattson J (2013) Investigating storage solutions for large data: A comparison of well performing and scalable data storage solutions for real time extraction and batch insertion of data. Dissertation, Chalmers University of Technology
- [3] Schram A, Anderson KM (2012) Mysql to nosql: data modeling challenges in supporting scalability. In: Proceedings of the 3rd Annual Conference on Systems, Programming, and Applications: Software for Humanity. *ACM*, Tucson, Arizona, USA. pp 191–202
- [4] Cattell R (2011) Scalable sql and nosql data stores. *ACM SIGMOD Record* 39(4):12–27
- [5] Gessert, F., W. Wingerath, S. Friedrich and N. Ritter. 2016. NoSQL database systems: a survey and decision guidance. *Comput Sci Res Dev*. Special issue paper DOI 10.1007/s00450-016- 0334-3.
- [6] S. Sanfilippo. Redis. <http://redis.io/>
- [7] M.Kago, et al., Development of a Scalable and Flexible Data Logging System Using NoSQL Databases, TUPPC012, *proceedings of ICALEPCS* 2013.
- [8] Dominic Betts, Julian Dominguez, Grigori Melnik, Fernando Simonazzi, and Mani Subramanian. 2013. Exploring CQRS and Event Sourcing: A journey into high scalability, availability, and maintainability with Windows Azure. Microsoft.

- [9] Alekseev, A. A., Megino, F. G., Klimentov, A. A., Korchuganova, T. A., Maendo, T., & Padolski, S. V. (2018). Building analytical platform with Big Data solutions for log files of PanDA infrastructure. *Journal of Physics: Conference Series*, 1015, 032003. doi:10.1088/1742-6596/1015/3/032003
- [10] M. Bajer, "Building an IoT Data Hub with Elasticsearch Logstash and Kibana", 2017 *5th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW)*, 2017, pp. 63-68.
- [11] James Hamilton, Manuel Gonzalez Berges, Brad Schofield, and Jean-Charles Tournier. SCADA statistics monitoring using the Elastic stack (Elasticsearch, Logstash, Kibana). In *International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems*, page TUPHA034. 5 p. JACoW Publishing, 2018.
- [12] J. R. Lourenço, B. Cabral, P. Carreiro, M. Vieira, J. Bernardino, Choosing the right nosql database for the job: a quality attribute evaluation, *Journal of Big Data*, vol. 2, no. 1, pp. 1-26, 2015.
- [13] A. Lakshman and P. Malik. Cassandra: a decentralized structured storage system. *SIGOPS Operating Systems Review*, 44(2):35–40, 2010.
- [14] Fiannaca A.J., Justin Huang, Benchmarking of Relational and NoSQL Databases to Determine Constraints for Querying Robot Execution Logs, Computer Science & Engineering, University of Washington, USA (2015), 1-8
- [15] Greg Young. 2010. CQRS Documents. [https://cQRS.files.wordpress.com/2010/11/cQRS\\_documents.pdf](https://cQRS.files.wordpress.com/2010/11/cQRS_documents.pdf). (Nov. 2010). Accessed: 2019-07-12
- [16] Floratou A, Teletia N, DeWitt DJ, Patel JM, Zhang D (2012) Can the elephants handle the nosql onslaught? *Proc VLDB Endowment* 5(12):1712–1723
- [17] K. Mahmood, T. Risch, and M. Zhu. Utilizing a NoSQL Data Store for Scalable Log Analysis, *Proc. 19th International Database Engineering & Applications Symposium*, Yokohama, Japan, July 2015
- [18] T. Rabl, S. Gómez-Villamor, M. Sadoghi, V. Muntés-Mulero, H.-A. Jacobsen, and S. Mankovskii, Solving big data challenges for enterprise application performance management, *Proc. VLDB Endowment*, vol. 5, no. 12, pp. 1724–1735, 2012.
- [19] B. Jun, "Feasibility Analysis of Big Log Data Real Time Search based on HBase and ElasticSearch," in *Proc. 9th Int. Conf. Natural Comput. (ICNC'13)*, 2013, pp. 1166–1170
- [20] Elasic, "Elastic stack", <https://www.elastic.co/>, 2019.
- [21] W Yuanzhou, L Manman, X Binsen, "Research on Establish an Effient log Analysis System with Kafka and Elastic Search", *Journal of Software Engineering and Applications*, vol.10, no.11,2017.
- [22] F. Cooper, A. Silberstein, E. Tam, R. Ramakrishnan, and R. Sears. Benchmarking cloud serving systems with ycsb. In *SoCC*, pages 143–154, 2010.

## ÇEKİLEBİLİR SAHTE HEDEF ETKİNLİĞİNİN MODELLEME VE SİMÜLASYON İLE ANALİZİ

Kubilay Özbilge <sup>(a)</sup>, Halit Ergezer <sup>(b)</sup>

<sup>(a)</sup> Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. TUSAŞ, kubilay.ozbilge@tai.com.tr

<sup>(b)</sup> Çankaya Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği, halitergezer@cankaya.edu.tr

### ÖZ

Sahte hedefler, uçağın savaş alanında hayatta kalmasını artırmak için radar güdümlü füzeden korumak için kullanılan bir savunma yöntemlerindedir. Bu çalışmada savaş uçaklarında kullanılan çekilebilir aktif sahte hedeflerin uçağın hayatta kalabilirliğine etkisi, uçağın çekilebilir sahte hedef kullandığı ve kullanmadığı durumlar için vurulma olasılıkları ve füzenin kaçırma uzaklığı değerleri hesaplanarak analiz edilmiştir. Çalışmamızda açık kaynaktan elde edilen veriler kullanılmıştır. Jenerik yapıda kurgulanan savaş uçağı modeli, çekilebilir sahte hedef modeli ve radar modeli ile elde edilen veriler sunulmuştur. Benzetim sonuçları çekilebilir aktif sahte hedef kullanımının savaş uçaklarına özellikle angajmanın son safhasında koruma sağladığını ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Çekilebilir sahte hedef, Elektronik Karşı Tedbir, Karşı tedbir etkinlik analizi.

## TOWED DECOY EFFECTIVENESS ANALYSIS USING MODELLING AND SIMULATION

### ABSTRACT

Decoys are a means of defense used to protect the aircraft from radar-guided missiles to increase survivability on the battlefield. In this study, the effect of active towed decoys used in fighter aircraft on the survivability of the aircraft is analyzed by calculating the probability of kill and the miss distance of missile for the cases where the aircraft used and withdrawn. The data obtained from the open source are used in our study. The data obtained by the model of the fighter aircraft model, towed decoy model and radar model constructed in the generic structure are presented. The simulation results show that the use of active towed decoys provides protection to fighter aircraft, especially in the last phase of engagement.

**Keywords:** Electronic Counter Measure, Counter Measure Effectiveness, Towed Decoy.



## 1. GİRİŞ

Elektronik Taarruz sistemlerinin amacı, düşman savaş kabiliyetini devre dışı bırakmak ya da azaltmak için Elektromanyetik (EM) spektrumu düşmana karşı kullanmaktır. Radar ve güdümlü silahların gelişmesi ve platform üzerinde bulunan karşı tedbir sistemlerinin yetersiz kalması gibi sebepler platform dışı karşı tedbir yöntemleri ile savaş uçaklarının korunması ihtiyacını doğurmuştur [4]. Platform dışı karşı tedbir yöntemlerinden biri olan sahte hedefler uçağın savaş alanında hayatta kalmasını artırmak için radar güdümlü füzelere karşı tedbir olarak kullanılmaktadır. Güdümlü silahlarda kullanılan “home on jam” modunun kullanımı artarken, sahte hedeflerinde önemi de artmaktadır. Bu modu kullanan füzelere karşı, aktif sahte hedef yaydığı EM dalga ile füzeyi kendi üzerine çekerek uçağın korunmasını sağlamak amacıyla kullanılır.

Etkinlik Analizi Elektronik Taarruzun radar ve radar güdümlü silah sistemleri üzerine etkinliğinin taktik müdahalelerdeki dinamik ortam etkilerinin de dikkate alınarak belirlenebilmesine yönelik olarak sistematik mühendislik prosedürlerinin belirlenmesi, etkinliğin doğru şekilde tahmin edilmesi ve elde edilen bu sonuçların değerlendirilmesidir.

Literatürde [2], [4], [10] etkinlik analizlerinde kullanılabilecek parametreler hedef tespit radarlarında; karıştırma sırasında radarın tespit olasılığı ve tespit menzili, J/S oranı ve *Burn-through* menzil, hedef izleme radarlarından; hedef tespit hataları, yeterli izleme hatalarının yaratılma süresi, füze güdümlü sırasında ise kaçırma uzaklığı, hedef vurulma olasılığı olarak verilmektedir. Çalışmamızda füzenin çekilebilir aktif sahte hedef kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlarda vurma olasılığı ve füzenin kaçırma uzaklığı parametreleri kullanılmıştır.

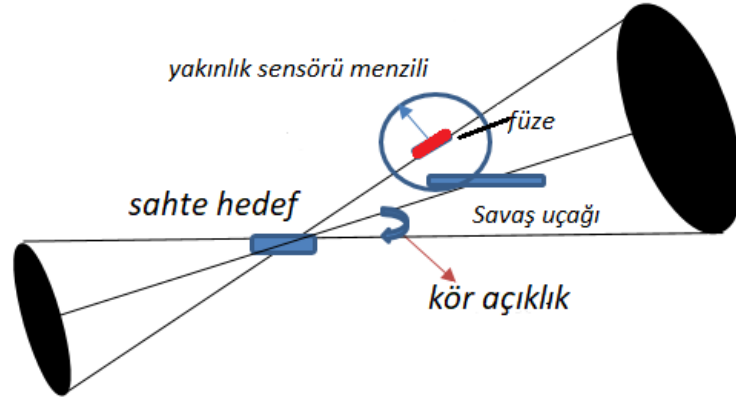
## 2. SAHTE HEDEFLER

Sahte hedefler, uçağın savaş alanında hayatta kalmasını artırmak için radar güdümlü füzeden korumak için kullanılan bir savunma sistemidir. Sahte hedefler platform tarafından çekiliyorsa çekilebilir sahte hedef, platformdan atıldıktan sonra serbest olarak harekete ediyorsa atılabilir sahte hedef olarak adlandırılırlar. Ayrıca sahte hedefler karıştırma sinyali yayıp yaymama durumlarına göre de aktif sahte hedef ve pasif sahte hedef olarak anılırlar [2]. Bu çalışmamızda aktif çekilebilir sahte hedeflerin etkinlik analizi gerçekleştirilmiştir.

### 2.1. Çekilebilir Sahte Hedef

Çekilebilir Sahte Hedeflerin amacı, uçaktan “uzak” bir RF enerjisi kaynağı sağlamaktır. Çekilebilir Sahte Hedefin üç ana kullanım amacı vardır; Bastırma, Aldatma, Baştan Çıkarma. Bu üç kullanım amacı savaşta kullanılan Görünme, Vurulma, Ölme stratejisine uygundur. Çalışmamızda savaş pilotlarının uzman görüşleri doğrultusunda aldatma ve

baştan çıkarma etkinlikleri analiz edilmiştir. Çekilebilir sahte hedef kullanımı uçak manevralarına kısıtlama getirdiğinden genellikle tehdit sistemin füze atımı gerçekleştikten sonra kullanılması söz konusudur.



**Şekil 1.** Çekilebilir Sahte Hedef sınırlamaları

Her iki koninin sahte hedefteki açıklığı [2]:

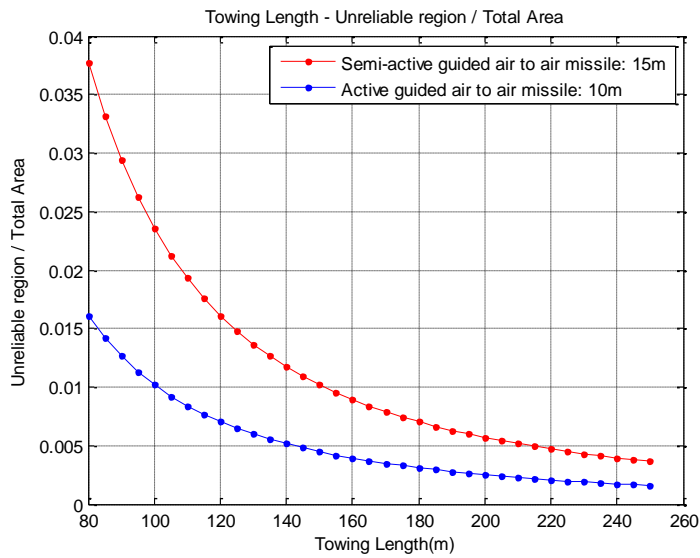
$$a = \tan^{-1} ((r_1 + W) / L) \quad (1)$$

$a$  – Kör açıklık (derece)

$r_1$  – Tapanın öldürücü olma niteliği menzili (m)

$L$  – Çekme kablosunun uzunluğu (m)

$W$  – Uçak gövde genişliği (m)



**Şekil 2.** Çekme kablosunun uzunluğuna göre Güvensiz bölgenin toplam bölgeye oranı

Bazı tipik füzelerin imha yarıçapları [3]:

- Hava/Hava yarı aktif güdümlü füzeler: ~15m
- Hava/Hava aktif güdümlü füzeler: 7~12 m
- Yer/Hava yarı aktif güdümlü füzeler: ~70m

## 2.2. Tekrarlayıcı Karıştırma

Tipik tekrarlayıcı karıştırıcılar, radarın iletilen sinyalini alır, yükseltir ve radara veya yaklaşmakta olan bir füzeye geri iletir. Olağan durumda, yeniden iletilen sinyal, radarın veya füzenin izleme yeteneklerini bozacak şekilde modüle edilir. Bununla birlikte, EKT tekniklerinin etkili olması için, karıştırıcıda yayılan sıkışma sinyalinin (J), uçaktan radara dönen sinyal gücünü (S) aşması gerekir. J'nin S'yi aşan koşullar analitik olarak belirlenebilir [4].

Tekrarlayıcı karışmanın da, iletilen radar sinyali alınan ( $P_{rj}$ ), [10] gösterilmiştir:

$$P_{rj} = \frac{P_t G_t \lambda^2 G_j}{(4\pi R)^2} \quad (2)$$

Radara dönen sinyal gücü;

$$S = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (3)$$

Tekrarlayıcı karışmasının çıkış gücü ( $P_j$ ), tekrarlayıcının elektronik kazancıyla çarpılarak bulunabilir;

$$P_j = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 G_e}{(4\pi R)^2} \quad (4)$$

Radar terminallerin de (J) tekrarlanan karışma sinyali gücü;

$$J = \frac{P_t G_t^2 \lambda^4 G_e}{(4\pi R)^2} \quad (5)$$

Karıştırıcının etkin yayılan gücü denklemi şu şekilde verilebilir:

$$P_j G_j = P_t G_t^2 G_j^2 G_e \quad (6)$$

Ardından J/S oranı,

$$\frac{J}{S} = \frac{P_j G_j \lambda^2}{4\pi P_t G_t^2 \sigma} \quad (7)$$

J/S, tekrarlayıcı karıştırması mesafeden bağımsızdır.

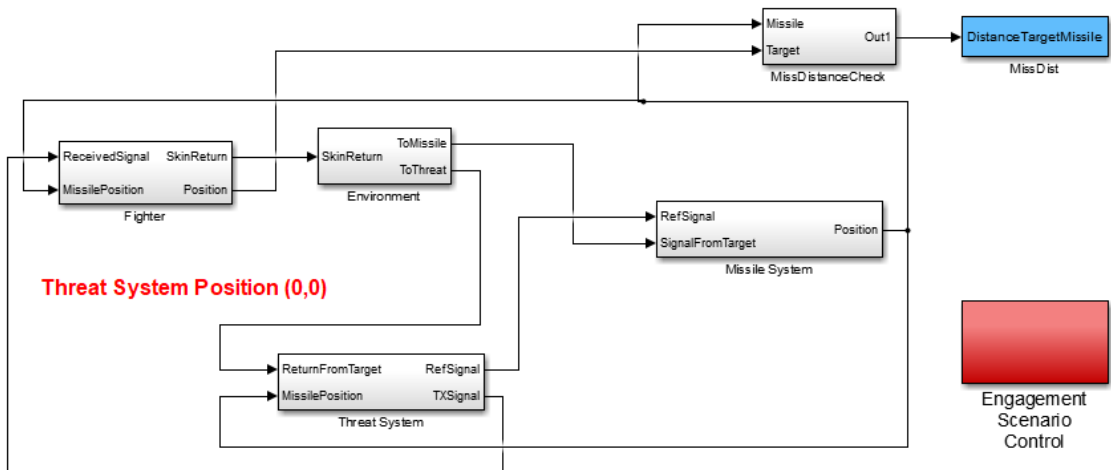
Daha sonra tekrarlayıcı karıştırmasının etkin yayılan gücü:

$$P_j G_j = \frac{4\pi P_t G_t^2 \sigma \left(\frac{J}{S}\right)}{\lambda^2} \quad (8)$$

- $P_T$  : Radar vericisinin çıkış gücü  
 $G_T$  : Radar verici kazancı  
 $\lambda$  : Dalga boyu  
 $G_J$  : Karıştırıcı kazancı (iletim ve alım için aynı kabul edilmiştir)  
 $R$  : Karıştırıcı ve radar vericisi arasındaki mesafe  
 $G_e$  : Karıştırıcının anten kazancı  
 $K_J$  : Güç bastırma oranı  
 $J$  : Radar alıcısında karıştırma sinyalinin gücü  
 $S$  : Alınan Radar alıcısında ki sinyal  
 $P_j$  : Tekrarlayıcı karışmasının güç çıkışı  
 $P_{rj}$  : Alınan, tekrarlayıcı karışmasındaki sinyali  
 $\sigma$  : Radar kesit alanı

### 3. MODELLEME ve SİMÜLASYON YAPISI

Simülasyonlarda, tehdit sistemi, füze ve platform için aşağıdaki parametreler kullanılmıştır. Platform için verilen parametreler avcı uçağı parametreleri kullanılarak değiştirilebilir. Bu parametrelere verilen genel değerler özel tehdit, füze ve/veya hedef platform tanımlamaz. Çekilebilir sahte hedef düzenininin, tekrarlayıcı tipi EKT sinyalleri ürettiği varsayılmaktadır.



Şekil 3. Simulink ortamında oluşturulan modelleme yapısı

Tehdit sisteminin alıcısı, Füze üzerinde bulunan alıcı modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Platform, füze ve çekilebilir sahte hedef 6 serbestlik derecesinde modellenmiştir [12]. Savaş uçağına ait radar kesit alanı değerleri açıya bağlı değerler olacak şekilde modellenmiştir. Savaş uçağının füze fırlatıldıktan sonra yaptığı manevralar 3 ekseninde yapacağı ivmelenmeler şeklinde modellenmiştir. Hedefin hassas alanı ve füzenin taşıdığı patlayıcı miktarına bağlı olarak “probability of kill” değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. Savaş uçağı vurulmadı ise ( $P_{kill} = 0$ ) füzenin tüm senaryo boyunca uçağına en yakın geçtiği uzaklık ise “miss distance” değeri olarak alınmaktadır.

$$P_{kill} = 1 - e^{-0.1(A_{hassas} * M_{patlayıcı} * (\frac{1}{MissDistance})^2)} \quad (9)$$

#### 4. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Simülasyonlarda, tehdit sistemi, füze ve platform için aşağıdaki parametreler kullanılmıştır. Bu parametreler açık kaynaktan elde verilerdir, hiç bir özel tehdit sistemini, füze ve/veya hedef platformunu tanımlamamaktadır. Çekilebilir sahte hedef düzeninin, tekrarlayıcı tip EKT sinyalleri ürettiği varsayılmaktadır. Simülasyonlar, aşağıdaki tabloda verilen parametreler kullanılarak elde edilmiştir. Tabloda verilen manevra zamanı, çekilebilir sahte hedef açma zamanı normal dağılıma uygun olarak üretilen ortalaması 0, standart sapması 0.2 s olacak şekilde zaman farkları eklenerek incelenmiştir.

**Tablo 1.** Hava Aracı için kullanılan temel parametreler

Parametreler	Değerler
Hava Aracının hassas alan	50 m <sup>2</sup>
Hedef Başlangıç Hızı	200 m/s
Hedef Manevraları	
Manevra Zamanı	5. ve 7. s + $N(0, 0.2)$ s
[Eksenel, Yanal, Normal] ivmelenme	[-1 ve 1 g; -1 ve -2 g; -1 ve 1 g]
Çekilebilir Kablo uzunluğu	50 m – 60 m
Çekilebilir Sahte Hedef açma zamanı	4 s + $N(0, 0.2)$ s
Çekilebilir Sahte Hedef kapama	25 s
Çekilebilir Sahte Hedef iletim gücü	10 dBW

**Tablo 2.** Tehdit parametreleri

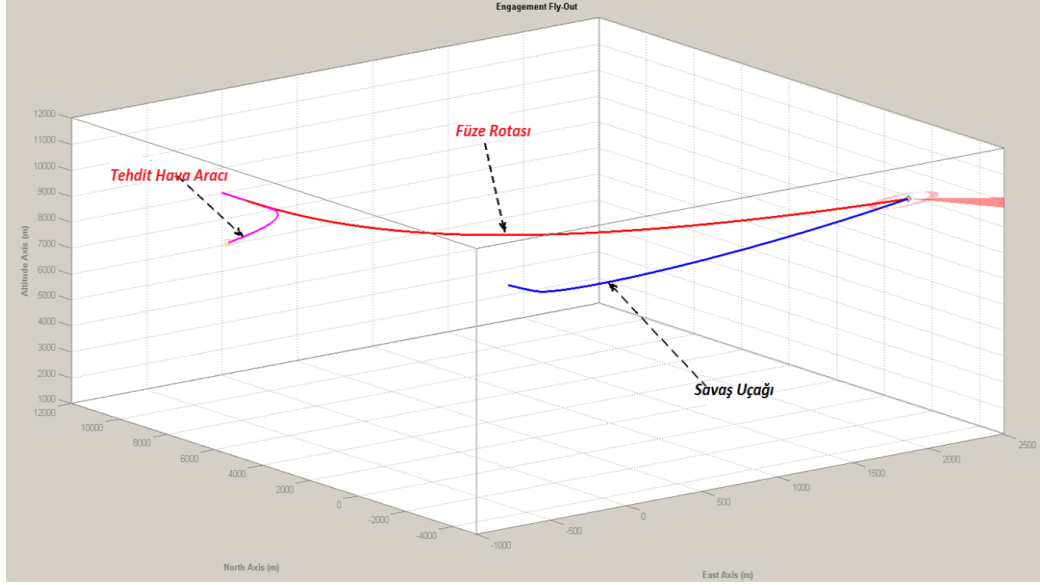
Parametreler	Değerler
Hedef Aydınlatıcı Frekansı	9 GHz
Arayıcı Alıcısı	Tek darbe radar
Arayıcı anten çapı	0.35 m
Maksimum izleme oranı	50 kHz/s
Füze Fırlatma Zamanı	5s

**Tablo 3.** Füze Parametreleri

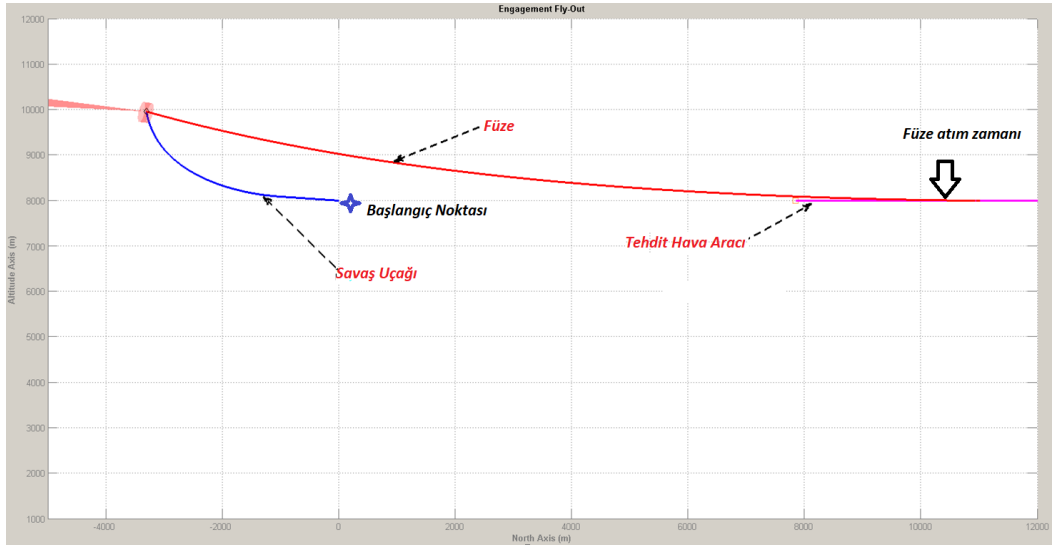
Parametreler	Değerler
Savaş Başlığı Ağırlığı	20 kg
Tapa Mesafesi	55 m
Güdüm	Orantılı seyrişer rehberliği ile füze hedefleme

**Tablo 4.** Simülasyon Sonuçları

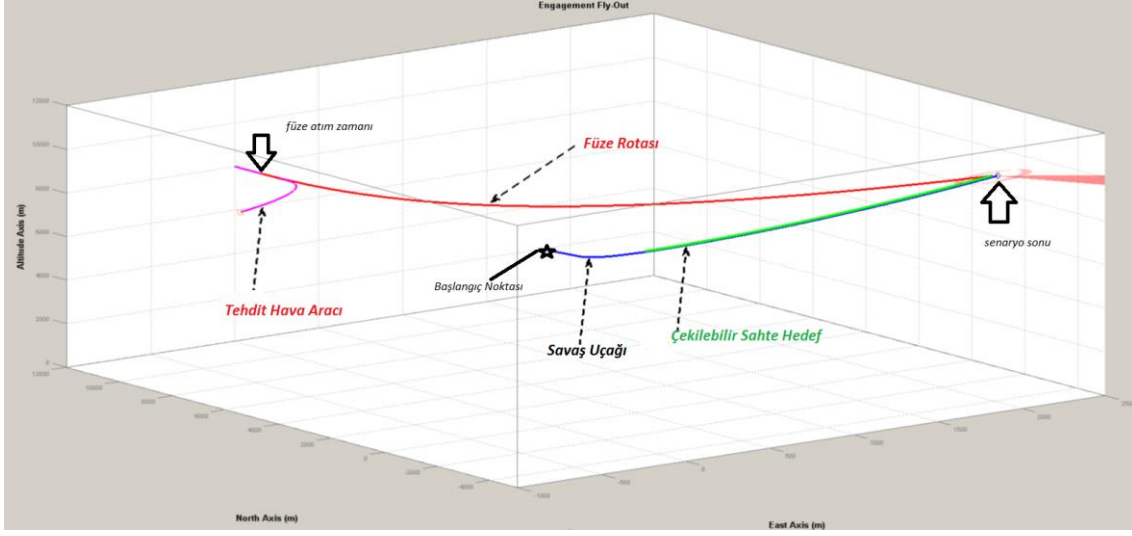
Çekilebilir Kablo uzunluğu	$P_{kill}$ (%)	Kaçırma mesafesi (Miss Distance)
Çekilebilir Sahte Hedef kullanmadan	100	Sapma = 0
50 m	5.2058	43.25 m
60 m	3.5450	52.6365 m



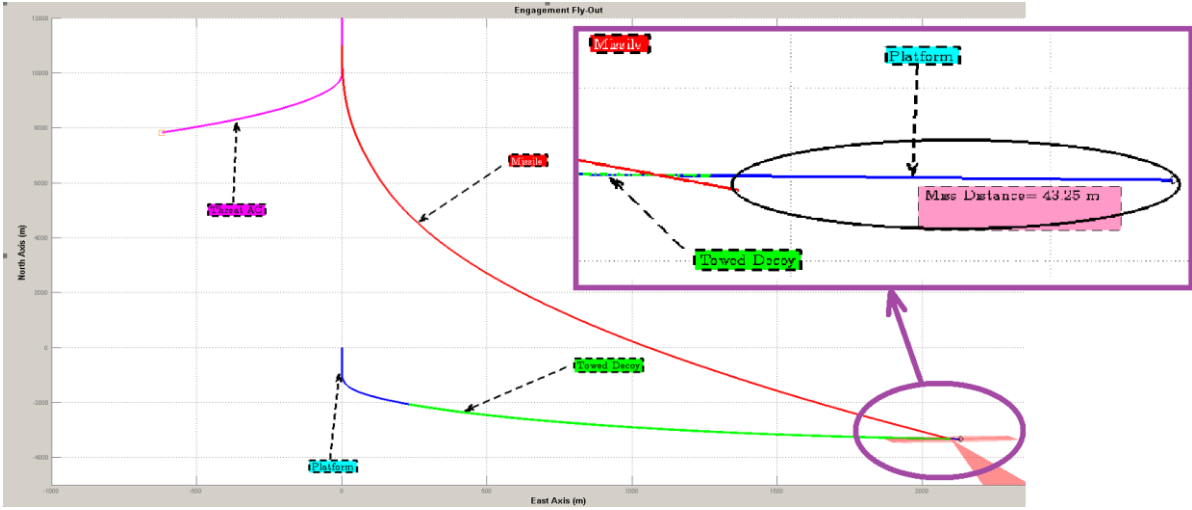
Şekil 4 Çekilebilir Sahte Hedef olmadan angajman senaryosu



Şekil 5. Çekilebilir Sahte Hedef olmadan angajman senaryosu (Kuzey-İrtifa görünümü)



Şekil 6. Çekilebilir Sahte Hedef kullanarak angajman senaryosu



Şekil 7. Çekilebilir Sahte Hedef kullanarak angajman senaryosu (mercek altına alınan kısımda kaçırma mesafesi gösterilmiştir.)

## 5. SONUÇ

Bu dokümanda, Çekilebilir Aktif Sahte Hedef karşı tedbir yönteminin uçağın hayatta kalabilirliğine etkileri analiz edilmiştir. Çekilebilir sahte hedef, uçakları hem yüzeyden havaya hem de havadan havaya RF tehditlerine karşı korumanın önemli yollarından biridir. Çekilebilir sahte hedef, HOJ füzelerine karşı oldukça önemli bir karşı tedbir yöntemidir. Karışma etkileri bu dokümanda verilmiştir ve ihtiyaç duyulan sahte hedef gücü (PJGJ), Yarı Aktif ve Aktif füzelere karşı analiz edilmektedir. Simülasyon bölümünde belirtildiği gibi çekme kablosunun uzunluğu, Çekilebilir sahte hedefin çok kritik bir parametresidir; bu nedenle, gerekli J/S çekme kablosunun uzunluğuna göre belirlenmelidir. Çekilebilir sahte hedef salındığında, uçağın uçuş performansını sınırlayacaktır. Bu nedenle, çekilebilir sahte hedefin farklı kurulum yerleri için bu



bu sınırlar analiz edilmelidir. Şekil 1'de gösterildiği gibi, Uçak korumasını sağlayamayan iki konik alan vardır. Güvenlik alanları çekme kablosunun uzunluğuna göre tespit edilir. Ne yazık ki, bu konikler en riskli bölgelerde bulunur. Öldürme ihtimalinin bir manevra ile azaltılabileceği önerilebilir. Bununla birlikte, Çekilebilir sahte hedefler, uçak manevralarını sınırlandırır. Pilot, güdümlü füzelerin konum bilgisi ile manevra yapmalıdır. Çekilebilir sahte hedefler, manevra sınırlamalarına neden olur ve uçağa yüksek açılı ataklarda zarar verebilir. Bu nedenle çekilebilir sahte hedefler kullanıldığında pilot için manevra tavsiyesi verebilir. Eğer füzelerin HOJ'e özelliği varsa, çekilebilir sahte hedefler kullanılacaktır. Bu durumda sahte hedefin vurulma ihtimali ve birden fazla füze saldırı yapıldığı varsayımı ile uçakta kullanılması gereken çekilebilir sahte hedef sayısını belirlemek gerekmektedir. Bu durumun analiz edilmesi gelecek çalışma planlarımız arasındadır.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] F. Neri, “*Introduction to Electronic Warfare System*” 2<sup>nd</sup> Edition, SciTech Publishing, 2001
- [2] A.D Martino, “*Introduction to Modern EW Systems*,” Artech House, London, 2012.
- [3] Y. Zhou, “Correlation Parameters Simulation for Towed Radar Active Decoy,” Beijing, China, 2012
- [4] W. J. Kerins, “*Analysis of Towed Decoys*” IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems (S0018-9251), Vol. 29(4), 1993
- [5] D. Adamy, “*A First Course in Electronic Warfare*” Artech House, London, 2001
- [6] M. Dongli, W. Shaoqi, Y. Muqing, D. Yongpan, “Dynamic simulation of aerial towed decoy system based on tension recurrence algorithm,” Beijing, 2016
- [7] F. Neri, “*Anti - mono pulse Jamming Techniques*” Microwave and Optoelectronics Conference, Proceedings of the 2001 SBMO/IEEE MTT-S International, 2001.
- [8] AN/ALE 55 Fiber-Optic Towed Decoy, BAE Systems.
- [9] M. I. SKOLNIK, “*Radar Handbook*,” Second Edition, McGraw-Hill, 1990.
- [10] D. Curtis Schleher, “*Electronic Warfare in the Information Age*”, Artech House, London, 1999.
- [11] A. VAKIN, “*Fundamentals of Electronic Warfare*”, Artech House, London, 2001.
- [12] P. Zarchan, “*Tactical and strategic missile guidance*”, AIAA tactical missile series Progress in astronautics and aeronautics, ISSN 0079-6050, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002.

## GERÇEK ZAMANLI ARAMA VE TAKİP RADARI SİMÜLATÖRÜ

**Hasan İhsan Turhan<sup>(a)</sup>, İsa Özçakmak<sup>(a)</sup>, Hilal Şakar<sup>(a)</sup>, Tamer Akça<sup>(b)</sup>, Özlem Gür<sup>(b)</sup>**

<sup>(a)</sup> Komuta Kontrol ve Uygulama Yazılımları Grubu, ICTerra Bilgi ve İletişim Teknolojileri San. ve Tic. A.Ş., hasan.turhan@metu.edu.tr, {isa.ozcakmak,hilal.sakar}@icterra.com, {takca,ogur}@aselsan.com.tr

### ÖZ

Bu çalışmada Hava Savunma Eğitim Merkezi (HSEM) projesi kapsamında Aselsan tarafından üretilen ve kullanılan Mobil Arama Radarı (MAR) için bir simülatör geliştirilmiştir. MAR 3 boyutlu bir radardır. Hedeflerin hızlı bir şekilde tespit ve takibini yapıp, döner ya da sabit kanat olarak sınıflayabilmektedir. Ayrıca çeşitli modlarda IFF (Identification Friend or Foe – Dost Düşman Tanımlama) sorgulaması yapma yeteneğine de sahiptir. Radarın operatör tarafından yönetilebilmesi ve operatöre çıktı sağlayabilmesi için de bir kullanıcı arayüzü (MARKA – MAR Kullanıcı Arayüzü) bulunmaktadır.

Geliştirilen MAR Simülatörü (MARSİM) de sayılan bu yeteneklerin tamamını gerçekleştirebilmektedir. MARSİM'in bu yetenekleri gerçekleştirebilmek için "Data distribution Service (DDS)" ve TCP/IP arayüzleri bulunmaktadır. MARSİM, TCP/IP arayüzü üzerinden MARKA ile haberleşmekte ve böylece operatör tarafından gerekli komutları alabilmektedir. Hedef ve arazi bilgileri ile hava koşulları gibi senaryo bilgilerini alabilmek için ise DDS arayüzünü kullanmaktadır.

MARSİM sanal hedeflerin pozisyon ve radar kesit alanı (RKA) bilgileri ile senaryo ortamının hava koşulları ve arazi bilgilerini kullanarak yüksek sadakat seviyesinde radar ölçümleri oluşturmaktadır. Oluşturulan ölçümler radar izleyici algoritmasına verilmekte, hedefin varlığı ve takibi bu algoritma tarafından yapılmaktadır. MARSİM tarafından üretilen izler MARKA'ya iletilmektedir. Operatör MARKA üzerinden IFF sorgulaması gibi MAR'ın gerçekleştirebildiği diğer yetenekler için komut gönderebilmektedir.

Bu çalışmada, geliştirilen simülatör ve bu kapsamda geliştirilen algoritmalar anlatılarak elde edilen sonuçlar paylaşılacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Arama/takip radarı, "Data Distribution Service – DDS", IFF, radar simülatörü, radar modeli, radar izleyici.

## **Physically Based Real Time Search and Tracking Radar Simulator**

### **ABSTRACT**

In this study, a simulator has been developed for Mobile Search Radar (MAR), which is produced and used by Aselsan, as part of Air Defense Training Center (HSEM) project. MAR is a 3 dimensional radar. It can quickly detects and tracks the targets and also classifies them as rotating or fixed wings. It also has the ability to make IFF interrogation (Identification Friend or Foe) in various modes. There is also a user interface (MARKA - MAR User Interface) so that the radar can be managed by the operator and output to the operator.

The developed MAR Simulator (MARSIM) is able to realize all of these skills. In order to realize these capabilities, MARSIM has Data Distribution Service (DDS) and TCP / IP interfaces. MARSIM communicates with the MARKA via the TCP / IP interface so that it can receive the commands given by the operator. It used DDS interface to take scenario information such as target and terrain information and weather conditions.

MARSIM generates high fidelity radar measurements using position and radar cross section (RCS) information of virtual targets and weather and terrain information of the scenario environment. These measurements are given to the radar tracker algorithm and the detection and tracking of the target is done by this algorithm. Later the tracks produced by MARSIM are sent to MARKA. The operator can send commands for other capabilities that MAR can perform as well as the IFF interrogation.

In this study, the developed simulator and the algorithms developed in this context will be explained and the results will be presented.

**Keywords:** Search/tracking radar, “Data Distribution Service – DDS”, IFF, radar simulator, radar model, radar tracker.

## 1. GİRİŞ

Etkin bir hava savunma sisteminin önemli parçalarından birisi de insandır. İnsan bu sistemlerde radar, komuta kontrol yazılımları vb. sistemlerden gelen bilgileri değerlendirip buna göre karar verir. Bunun için de bu sistemlerin özelliklerini, gelen bilgilerin nasıl değerlendirileceğini ve silah sistemlerinin nasıl kullanılacağını iyi bilmesi gerekir. Bu bilgiler eğitim ile kazanılır. Eğitim, personelin sistem üzerinde olabilecek tüm durumlara karşı nasıl davranacağını öğretmesidir.

Personel eğitiminde, gerçek sistem üzerinde verilen eğitimde tüm durumların oluşturulması oldukça zor ve pahalıdır. Örneğin bir radar operatörüne radarın hedefleri nasıl izlediğini ve radarın çeşitli koşullar altında nasıl davrandığının eğitimini vermek istiyorsunuz. Bu durumda hem farklı hava ve arazi koşullarında pek çok kez uçak, helikopter vb. gibi hedeflerle uçuş yapılması gerekmektedir, hem de bu hedeflerin uçuşu esnasında ortamda karıştırıcı olması ya da radarın bozulma durumları gibi durumların oluşturulması gerekmektedir. Uçuş pahalı, arıza durumunu oluşturmak ise zor bir senaryodur. İşte bu gerekçelerle bu tarz sistemlerde, sistem üzerindeki donanımları olduğu simüle edebilen ve bu donanımların birlikte çalıştığı yazılımlar ile aynı şekilde çalışabilecek simülatörlere ihtiyaç duyulmaktadır.

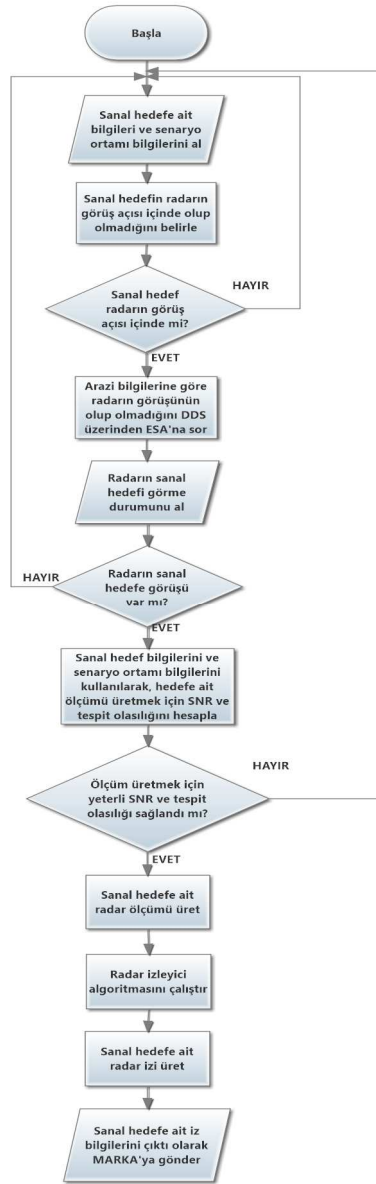
Biz de Hava Savunma Eğitim Merkezi (HSEM) projesi kapsamında Aselsan tarafından üretilen ve kullanılan Mobil Arama Radarı (MAR) için bir MAR simülatörü (MARSİM) geliştirdik. Geliştirilen simülatör gerçek sistemin sahip olduğu tüm yeteneklere sahiptir. MARSİM sanal hedeflerin pozisyon ve radar kesit alanı (RKA) bilgileri ile senaryo ortamının hava koşulları, arazi bilgilerini kullanarak yüksek sadakat seviyesinde radar ölçümleri oluşturmaktadır. Oluşturulan ölçümler radar izleyici algoritmasına verilmekte, hedefin varlığı ve takibi bu algoritma tarafından yapılmaktadır. Radar ölçümlerinin hava koşulları, arazi bilgileri ve ortamdaki karıştırma yöntemleri ile ilgili bilgilerin tamamının kullanılarak üretilmesi bu çalışmaya özgüdür. Ayrıca ortamda gürültü ile karıştırma yapan bir karıştırıcı olması durumunda radar ölçümüne ait SNR değerinin nasıl etkileneceğinin modellenmesi bu çalışma kapsamında yapılmıştır.

Bu çalışma dört bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde simülatör yapısı ve bu kapsamda geliştirilen algoritmalar anlatılmaktadır. Üçüncü bölümde simülatör sonuçlarının analizine yer verilmiştir. Son bölüm ise sonuç bölümüdür.

## 2. SİMÜLATOR YAPISI

Geliştirilen simülatör temelde radarın gerçekleştirdiği hedef tespiti ve takibi görevlerini gerçekleştirirken, takip edilen hedefler için IFF sorgu senaryolarını da simüle edebilmektedir. Ayrıca hedef takibi ile ilgili çeşitli durumlarda MARKA üzerinden komut alarak radarın davranışını olduğu gibi simüle edebilmektedir

MARSİM için senaryo işletimi HSEM kapsamında geliştirilen “Eğitim Simülatörü Altyapısı (ESA)” tarafından “Data distribution Service (DDS)” arayüzü ile sağlanmaktadır. MARSİM sanal hedeflerin pozisyon ve radar kesit alanı (RKA) bilgileri ile senaryo ortamının hava koşulları ve arazi bilgilerini kullanarak yüksek sadakat seviyesinde radar ölçümleri oluşturmaktadır. Oluşturulan ölçümler radar izleyici algoritmasına verilmekte, hedefin varlığı ve takibi bu algoritma tarafından yapılmaktadır. MARSİM tarafından üretilen izler MARKA’ya iletilmektedir. Operatör MARKA üzerinden IFF sorgulaması gibi MAR’ın gerçekleştirebildiği diğer yetenekler için komut gönderebilmektedir. Simülasyon ortamındaki akış şekil 1’de resmedilmiştir.



Şekil 1. MARSİM akış şeması

## 2.1. Radar Ölçümlerinin Oluşturulması

Radar ölçümleri üretilirken, radarın yanca ve yükseliş açılarında yapmış olduğu hatalar, menzil çözünürlüğü, anten gücü, dalga boyu ( $\lambda$ ) ile hedefin radara olan uzaklığı, hedefin radar kesit alanı, senaryo ortamındaki sıcaklık, yağmur, kar ve sis durumu, senaryo ortamında karıştırıcı olması ve karıştırma yöntemi parametreleri kullanılır.

Sanal hedefin pozisyon bilgisi ve arazi bilgilerine göre eğer hedef radarın görüş alanı içerisine girmişse, SNR değeri ve tespit olasılığı göz önünde bulundurularak hedefe ait ölçüm üretilir. Ölçüm üretmek için gerçek hedef yörüngesine radarın hata payı eklenir.

Radarın yanca ve yükseliş açılarında yaptığı hataların standart sapma değerleri (1)'de gösterildiği gibi hesaplanır. Bu formülde yer alan BW radarın huzme genişliği parametresi ifade etmektedir.

$$\sigma_a = \frac{0.44\theta_{BW}}{\sqrt{SNR}} \quad (1)$$

Radarın yanca ve yükseliş açılarında yapmış olduğu hata, (1)'de hesaplanan standart sapma değeri kullanılarak '0' ortalama değerli Gauss dağılımından çekilerek eklenir. Aynı şekilde menzil hassasiyetine bağlı olarak menzile tekdüze dağılımdan çekilmiş hatalar eklenir. Menzil hassasiyeti radarların özellikleri göz önünde bulundurularak seçilmiştir.

Ölçüm oluştururken öncelikle radarın bu hedefi görüp ölçüm üretmesi durumunda bu ölçüme ait SNR değeri (2)'deki gibi hesaplanmaktadır [1].

$$SNR = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_0 L R^2} \quad (2)$$

Denklem (2)'de,  $P_t$  radar tarafından uygulanan gücün tepe değerini (Watt),  $G$  iletim kazancını (dB),  $\lambda$  radarın dalga boyunu (m),  $\sigma$  radar kesit alanını ( $m^2$ ),  $L$  genel kayıp miktarını (dB),  $R$  radarın hedefe olan uzaklığını (m),  $T_0$  sıcaklığı (Kelvin) ifade etmektedir.

### 2.1.1. Hava Durumu Koşullarının SNR Değerine Etkisi

SNR değeri hesaplandıktan sonra hava durumu koşullarının oluşacak ölçümün SNR değerine etkisi hesaplanarak nihai SNR değerine ulaşılmaktadır. Radarı etkileyen hava durumu koşulları yağmur, kar ve sistir. Bu hava koşullarının oluşması durumunda (2)'de hesaplanan SNR değerinde düşüş yaşanmakta ve bu da radarın hedefi tespit etme olasılığını etkilemektedir.

Özellikle 10GHz ve üstü frekanstaki elektromanyetik dalga enerjisinin sinyal kayıplarının önemli faktörlerinden biri yağmurdur. Yağmur kaynaklı zayıflama miktarı hesabında [2] ile referans verilen model kullanılmıştır. Buna göre yağmurdan kaynaklı zayıflama miktarı  $\gamma_R$ , dB/km cinsinden (3)'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad (3)$$

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2\theta\cos 2\tau] / 2 \quad (4)$$

$$\alpha = [k_H\alpha_H + k_V\alpha_V + (k_H\alpha_H - k_V\alpha_V)\cos^2\theta\cos 2\tau] / 2k \quad (5)$$

Denklem (4) ve (5)'te  $k$  ve  $\alpha$  parametrelerinin hesabında Tablo 1'de verilen katsayı değerleri kullanılmıştır.

**Tablo 1.** 10GHz Frekansta hesaplanmış katsayı değerleri

$k_H$ (yatay)	$\alpha_H$ (yatay)	$k_V$ (dikey)	$\alpha_V$ (dikey)
0.01217	1.2571	0.01129	1.2156

Denklem (3), (4) ve (5)'te,  $R$  yağmur hızını (mm/sa),  $k$  ve  $\alpha$  her frekans için farklı değerleri olan katsayıları,  $\theta$  yükseliş açısını (derece) ve  $\tau$  eğim açısını (derece) ifade etmektedir.

Elektromanyetik dalga enerjisinin sinyal kayıplarının bir diğer faktörü kardır. Kar kaynaklı zayıflama hesabında [3] ile referans verilen model kullanılmıştır. Kar kaynaklı zayıflama, frekansla doğru orantılıdır ve dalga boyu küçüldükçe zayıflama daha baskın hale gelir. Buna göre kardan kaynaklı zayıflama miktarı  $\gamma_K$ , dB/km cinsinden (6)'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$\gamma_K = \frac{0.00349r^{1.6}}{\lambda^4} + \frac{0.00224r}{\lambda} \quad (6)$$

Denklem (6)'da  $r$  karın iniş hızını (mm/sa) ve  $\lambda$  radarın dalga boyunu ifade etmektedir.

Elektromanyetik dalga enerjisinin sinyal kayıplarının bir diğer faktörü sistir. Sis kaynaklı zayıflama hesabında [4] ile referans verilen model kullanılmıştır. Buna göre kardan kaynaklı zayıflama miktarı  $\gamma_K$ , dB/km cinsinden (6)'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$\gamma_S = K_I M \quad (7)$$

$$K_I = \frac{0.819f}{\epsilon''(1+\eta^2)} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{2+\epsilon'}{\epsilon''} \quad (9)$$

$$\epsilon''(f) = \frac{f(\epsilon_0 - \epsilon_1)}{f_p [1 + (f/f_p)^2]} + \frac{f(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{f_s [1 + (f/f_s)^2]} \quad (10)$$

$$\epsilon'(f) = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_1}{[1 + (f/f_p)^2]} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{f_s [1 + (f/f_s)^2]} + \epsilon_2 \quad (11)$$

$$\theta = 300 / T \quad (12)$$

$$f_p = 20.09 - 142(\theta - 1) + 194(\theta - 1)^2 \quad (13)$$

$$f_s = 590 - 1500(\theta - 1) \quad (14)$$

$$\epsilon_0 = 77.6 + 103.3(\theta - 1) \quad (15)$$

$$\varepsilon_1 = 5.48 \quad (16)$$

$$\varepsilon_2 = 3.51 \quad (17)$$

Denklem (7)-(17)'de  $K_l$  zayıflama miktarı katsayısını ((dB/km)/(g/m<sup>3</sup>)),  $m$  sis halindeki suyun yoğunluğunu (g/m<sup>3</sup>),  $f$  radar frekansını (GHz),  $f_p$  birincil zayıflatma frekansını,  $f_s$  ikincil zayıflatma frekansını,  $T$  sıcaklığı (Kelvin),  $\varepsilon$  suyun dielektrik sabitini ifade etmektedir.

### 2.1.2. Karıştırıcı Kaynaklı Gürültünün SNR Değerine Etkisi

Günümüzdeki elektronik harp tekniklerinden birisi de karıştırıcının ortama yoğun gürültü yayını yaparak radarın ölçüm üretmesinin engellenmesidir. Karıştırıcı etkisinin modellenmesinde [5] numara ile referans verilen çalışmadaki ortamda karıştırıcı olması durumundaki radar ölçüm modeli kullanılmıştır. Buna göre karıştırıcı etkisindeki bir hedefin SNR değeri (18)'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$SNR = SNR_{pre} \left( e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{|x_k - b_k|^2}{b^2} \right)} \right) \left( 1 - e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{|x_k - j_k|^2}{j^2} \right)} \right) \quad (18)$$

Denklem (18)'de  $SNR_{pre}$  karıştırıcı etkisinden önceki SNR değerini,  $x_k$  hedefin yanca ve yükselişte bulunduğu açı vektörünü,  $b_k$  radar huzmesinin yanca ve yükselişte bulunduğu açıları, radar huzmesinin huzme genişliğini,  $j_k$  karıştırıcının bulunduğu yanca ve yükseliş açıları vektörünü,  $j$  radarın ortamda karıştırıcı olması durumunda uyguladığı karartma huzmesinin genişliğini ifade eder.  $j$  parametresi bu çalışmada radar huzme genişliği ile aynı olarak alınmıştır.

### 2.1.3. Ölçüme Ait Tespit Olasılığı Hesabı ve Ölçümün Üretilmesi

Ölçüm oluşturmak için, ilk olarak ölçüm gelmeme olasılığı olarak kullanılmak üzere [0,1] aralığında tekdüze dağılımdan rastgele bir sayı çekilir. Sonrasında menzil, yanlış alarm oranı ( $\beta_{FA}$ ) ve SNR değeri kullanılarak tespit olasılığı hesaplanır.

$$P_D = \beta_{FA}^{\frac{1}{1+SNR}} \quad (19)$$

Eğer tespit olasılığı, ölçüm gelmeme olasılığından büyükse ve hesaplanan menzil ve SNR değerleri, nominal menzil ve SNR değerlerinden büyükse ölçüm oluşturulur.

### 2.1.4. Mesafe, Açı Hız Aldatma Durumlarının Modellenmesi

Karıştırıcının ortama yoğun gürültü yayını yaparak radarın ölçüm üretmesinin engellenmesi haricinde kullanılan diğer elektronik harp teknikleri, mesafe, açı ve hız aldatma olarak sıralanabilir. Radar üzerinde bu karıştırma tekniklerinin uygulanması



durumunda, radar hedefi olduğundan farklı konum ve hız değerlerine sahip bir şekilde görmektedir.

Bu karıştırma teknikleri temelde radardan gelen elektromanyetik dalganın manipülasyonu ile uygulanmaktadır. Örneğin gelen bu dalga emilip olması gerekenden çok daha sonra gönderildiğinde radar bu hedefi olduğundan çok daha uzaktaymış gibi algılamaktadır.

Bu durumlar göz önünde bulundurularak ortamda mesafe, açı ve hız aldatma yapabilen karıştırıcı olması ve hedefin karıştırma yapılan bölge içerisine girmesi durumunda uygulanan karıştırma tekniğine göre üretilen ölçüm değiştirilmektedir.

## 2.2. Radar İzlerinin Üretilmesi

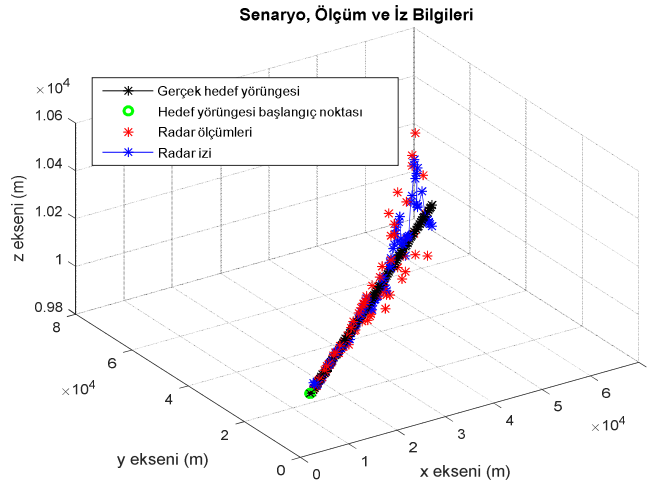
Radar ölçümleri üretildikten sonra her zaman anında üretilen ölçümler radar izleyici algoritmasına verilir ve radar izleyici algoritması tarafından hedeflere ait radar izleri üretilir. İz başlatma ve bitirme ‘M/N logic’ mantığı ile yapılır. İzleyici algoritması olarak ‘Global Nearest Neighbor - GNN’ (En Yakın Komşuluk) tabanlı bir ‘Interacting Multiple Model – IMM’ (Etkileşimli çoklu model tekniği) filtresi kullanılmıştır. Kullanılan filtrede birisi küçük süreç gürültüsü diğeri ise büyük süreç gürültüsüne sahip iki model bulunmaktadır.

## 2.3. IFF Sorgulaması Senaryosu

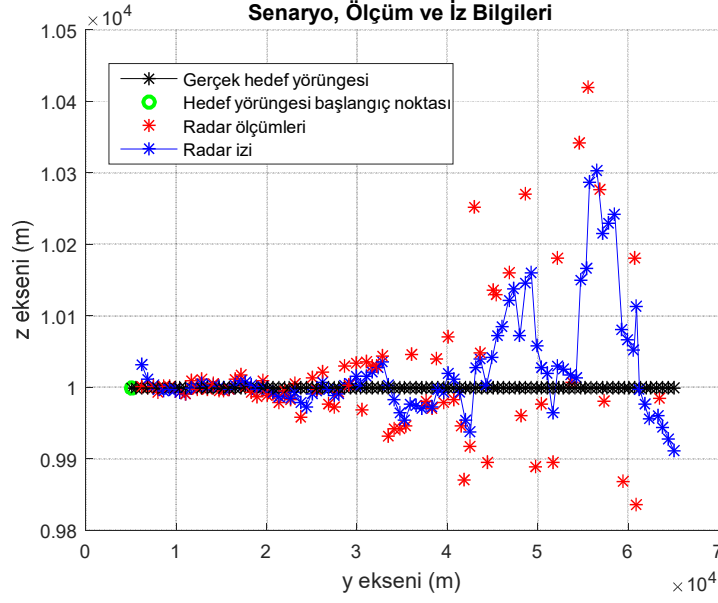
Radar izleyici algoritması tarafından takip edilen izler için MARKA üzerinden IFF sorgusu yapılması talep edilebilir. Bu durumda arayüzden seçilen mod bilgilerini kullanarak IFF simülasyonu gerçekleştirilir ve üretilen IFF tanımlama raporu MARKA’ya iletilir. Hedefin teşhis bilgileri DDS üzerinden alınmaktadır.

## 3. SİMÜLASYON SONUÇLARI

MARSİM ölçüm ve iz sonuçları örnek bir hedef senaryosu üzerinden irdelenmiştir. Senaryo ortamında yağmur kar ve sis yoktur. Buna göre gerçek hedef yörüngesi ve MARSİM tarafından üretilen radar ölçümleri şekil 2’de verilmiştir.



a) 3 boyutlu gösterim

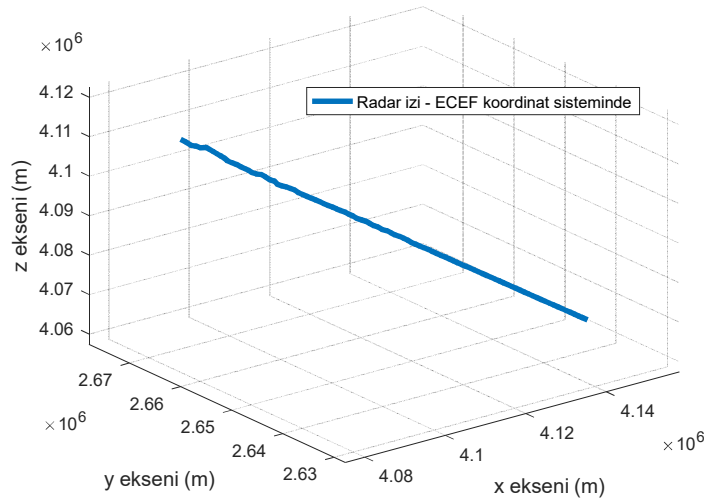


b) y-z eksenini gösterimi

**Şekil 2.** Gerçek hedef senaryosu, oluşturulan radar ölçümleri ve radar izi

Hedef radarın lokal koordinatlarına göre  $x=5000$  m,  $y=5000$  m,  $z=10000$  metreden başlayıp sadece x-y eksenini doğrultusunda hareket etmektedir. z ekseninde ise sabit 10000 m irtifada seyretmektedir. Şekil 2 incelendiğinde hedefin radara yakın olduğu noktalarda radar ölçümlerindeki hata oldukça küçüktür. Hedef radardan uzaklaştıkça radarın hata oranı artmaktadır.

Bu ölçümler kullanılarak radarın lokal koordinat sisteminde elde edilen radar izi Şekil 2’de ECEF koordinatlarında elde edilen radar izi de Şekil 3’te verilmiştir.

**Şekil 3.** ECEF koordinat sistemindeki radar izi

Şekil 2 ve 3 incelendiğinde görülmektedir ki radar, hedefi başarılı bir şekilde takip edebilmiştir. Ölçümlerdeki hata oranının artmasıyla doğru orantılı olarak hedef radardan uzaklaştıkça radar izindeki hata oranı da artmaktadır.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada Hava Savunma Eğitim Merkezi (HSEM) projesi kapsamında Mobil Arama Radarı (MAR) için gerçek sistemin sahip olduğu tüm yeteneklere sahip bir MAR simütörü (MARSİM) geliştirilmiştir. Geliştirilen MARSİM sanal hedeflerin pozisyon ve radar kesit alanı (RKA) bilgileri ile senaryo ortamının hava koşulları, arazi bilgilerini kullanarak yüksek sadakat seviyesinde radar ölçümleri oluşturmaktadır. Oluşturulan ölçümler radar izleyici algoritması tarafından işlenmektedir. Hedef tespiti ve takibi radar izleyicisi tarafından yapılmaktadır.

Radar ölçümlerinin hava koşulları, arazi bilgileri ve ortamdaki karıştırma yöntemleri ile ilgili bilgilerin tamamının kullanılarak modellenmesi ve üretilmesi bu çalışmaya özgü ve yenidir.

Geliştirilen MARSİM örnek bir senaryo üzerinden irdelenmiş ve sonuçlar sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre gerçekçi radar ölçümü üretme, hedef tespiti ve takibi başarı ile gerçekleştirilmiştir.

#### 5. KAYNAKÇA

- [1] Richards, M. A. (2005). *Fundamentals of radar signal processing*. Tata McGraw-Hill Education.
- [2] Recommendation, I. (2005). Specific attenuation model for rain for use in prediction methods,". *ITU-R P. 838, 3*.
- [3] Mahafza, B. R. (2013). *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB Third Edition*. CRC press.
- [4] Zheng, J. Y., Hai, N., & Zhu, Y. S. (2014). The Selection of Transmitter Elevation in a Ka-Band HAP-based Communication System Under Fog Attenuation. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 687, pp. 3709-3713). Trans Tech Publications.
- [5] Blanding, W., Wolfgang Koch, and Ulrich Nickel. Tracking through jamming using negative information. *IEEE 9th International Conference on Information Fusion*, 2006.

## ÜÇ BOYUTLU, WEB TABANLI, DIS PROTOKOLU KULLANAN AĞ SİMÜLASYONU ÖRNEĞİ

**Yusuf Ziya Temiz <sup>(a)</sup>, Emre Boran <sup>(a)</sup>, Aydın Doğan <sup>(a)</sup>**

<sup>(a)</sup> Hacettepe Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü,  
{yusufziyatemiz,eboran01,ydndogan}@gmail.com

### ÖZ

Bu çalışma, Dağıtık Etkileşimli Simülasyon (DIS) protokolünü temel alarak geliştirilmiş, ağ üzerinden oynanabilen üç boyutlu, çok oyunculu bir tank benzetim uygulaması sunmayı amaçlamaktadır. Uygulama; web tabanlı, popüler açık kaynak JavaScript kütüphanesi “three.js”i kullanarak, üç boyutlu simülasyon ortamını WebGL teknolojisi üzerinde resmedebilmektedir. Web tarayıcısı koşturabilen çoğu cihaz ile açılabilen uygulama; ağ üzerinde iletişimi, üzerinde Websocket sunucusu çalıştırdığımız Raspberry Pi cihazına internet üzerinden bağlanarak sağlamaktadır. Websocket sunucusu, TCP bağlantısı sağlayan kullanıcıların gönderdiği farklı türdeki DIS mesaj tiplerini tekrarlayarak tüm kullanıcılara dağıtabildiği gibi, bu mesajları ayrı bir askeri benzetim uygulamasına (VBS 3 gibi) UDP formatında da iletebilmektedir. Web tabanlı olarak geliştirilen benzetime, kullanıcı herhangi bir cihazda açacağı web tarayıcısına gireceği adres ile kolayca ulaşabilir. Üç boyutlu görüntülerin kolayca resmedebilmesi, birçok cihazda koşturulabilmesi, ayrı bir yazılımın kurulmasını gerektirmemesi, güncellemelerin sunucu tarafından yapılmasının yeterli olması web tabanlı uygulamaları günümüzde oldukça popüler hale getirmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ağ, Birlikte İşlerlik, Ciddi Oyun, Simülasyon, Web Tabanlı.

## AN EXAMPLE OF A 3D WEB BASED SIMULATION USING DIS PROTOCOL

### ABSTRACT

This study aims to offer an online 3D multi-agent tank simulation that is based on the Distributed Interactive Simulation (DIS) protocol. This application can map 3D simulation environment by using ‘three.js’, a popular web-based open-source JavaScript library, over WebGL technology. Our application which can be accessed by almost every device running a web browser, provides communication over the network via connecting to a Raspberry Pi device that runs a WebSocket server. In addition to multicasting different type of DIS messages received from clients that have already established TCP connection to other users, the websocket server can also send these messages to another military simulation (like VBS 3) in UDP format. Users can access this web-based simulation by entering the link in a web browser of any device. Rendering 3D images easily, being able to run in many devices, not requiring additional software installation and being sufficient to update the app only on the server side are features that make web-based applications popular recently.

**Keywords:** Network, Interoperability, Serious Games, Simulation, Web-based.

### 1. GİRİŞ

Günümüzde, çok oyunculu yazılımlara çeşitli platformda ihtiyaç duyulmaktadır. Gerçek ortamın gerektirdiği fiziki ve maddi pek çok zorluğa nazaran gerçeğe yakın zamanlı yazılımlar iyi bir alternatif çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Bu platformlar sağlık, eğlence, oyun ve askeri alanlar gibi pek çok ortamda varlık göstermektedir. Organizasyonlar, bu ihtiyaçlarını karşılayacak benzetimler ile ciddi anlamda tasarruf sağlayabilmektedir. Tüm bu temel ihtiyaçları karşılamak için kullanılması zorunlu olan yazılım gereksinimleri benzetim platformları ile karşılamak mümkün olabilmektedir.

Simülasyon ortamının sürekli gelişen yapısı dağıtık sistemlerin kullanılmasını zorunlu hale getirmektedir. Bu dağıtık yapı mimarisi, merkezi olmayan iletişim altyapısı, bulut bilişim, ortak akılla hareket edebilen sürü zekâsı gibi alanlarda gelişimi doğrudan tetiklemektedir. Bu bahse konu olan bileşenlerin özellikle oyun platformlarında ve askeri simülasyon tatbikatlarındaki gelişimleri rahatlıkla gözlemlenebilmektedir. Tüm bu platformlardaki simülasyonların uygulanabilmesi için unsurlar arası iletişimi sağlayacak ağ protokolünün kullanılması zorunludur. Ağ protokolü ihtiyacını karşılamak için geliştirilen standart protokollerden biri de Distributed Interactive Simulation(DIS) [1] protokolüdür. DIS protokolünü simülasyon katılımcılarını belirli standartlara uygun olarak birbirine bağlayan, iletişim kuralları olarak tanımlamak mümkündür.

Bu çalışmada, simülasyon platformlarında kullanılan protokol ve uygulamaları hakkında bilgi verilecek ve uygulamalı bir örnek ile sunulacaktır. İkinci kısımda Dağıtık Etkileşimli Simülasyon (DIS), Yüksek Seviye Mimari (HLA) ve Test ve Eğitim Etkinleştirme Mimarisi (TENA) protokolleri irdelenmiştir. Üçüncü kısımda; DIS, HLA ve TENA protokolleri detaylı olarak anlatılacaktır. Dördüncü kısımda, simülasyonun çalışma yapısı, kullanılan kütüphaneler, dağıtık yapı mimarisi ve bileşenleri detaylı olarak incelenecektir. Uygulamada, DIS protokolünün tercih edilmesinin sebepleri; dağıtık mimaride merkezi yönetim sistemine gerek duymadan ve benzetim sistemleri arasında uyum problemi yaşamadan her benzetim uygulamasının mesajlarını çoklayarak iletebilmesine imkân sağlaması, her benzetim uygulamasının kendi gerçek durumunu yayınlaması, yazılımsal anlamda ilave bir mimariye gerek duymaması olarak sıralanabilir.

## 2. MEVCUT SİSTEMLER

Simülasyon ortamı, sistemde ağ protokolü oluşturmak ve uygulamak için bazı optimizasyonlara ihtiyaç duyar. Ağ yapısı ve sınırlamaları dikkate alındığında, sistemin minimum gereksinimleri, etkin kullanım standartlarına erişebilmek ve eniyileme sağlayabilecek pratik çözümler bulmak, simülasyon ortamının en zor kısmını teşkil etmektedir. Bu eniyilemenin standart protokollerdeki etkisini incelemek için iletişim ve simülasyon dinamiklerini uygulanabilir kılan ağ paketi birimlerinin istatistikleri değerlendirilebilir.

Simülasyon platformlarında, bilgisayarlar, sensörlerle donatılmış sistemler, simülatörler gibi birçok dağıtık bileşen vardır. Bunların hepsi farklı altyapı sistemlerine sahiptir. Bu standartların varlığı, farklı platformların ağ paketleri üzerinden haberleşmesinden büyük katkı sağlamaktadır. Bu haberleşme altyapısına DIS gibi standart yapıların kullanılması, simülasyon ortamına bağımsız bir esneklik sağlamakta ve modüler bir yapı oluşturmaktadır [2].

Farklı platformların ağ üzerinden etkin iletişimi için standart kurallara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu standartlardan bir tanesi de Protokol Veri Birimleri (PDU) paketleri için tasarlanan kurallar bütünüdür.

Bu PDU'ların minimum ihtiyaçlarını tespit etmek için DIS PDU'larının analizi ilgili çalışmanın konusu olmuştur [3]. Aynı çalışmada geniş alan ağını kullanan simülasyon katılımcıları için gereksinimleri karşılayacak minimum DIS PDU yapısı tartışılmıştır.

Ordu unsurları, simülasyonun sağladığı avantajları kullanarak, planlama, senkronizasyon ve eğitimi kolay bir şekilde uygulamaya çalışmaktadır. Orduda faaliyet gösteren farklı simülasyon bileşenlerini ihtiva eden unsurların eş zamanlı iletişimi sağlama ihtiyacı DIS, HLA gibi standart protokoller geliştirilmesine sebep olmuştur. DIS, askeri alanlarda

kullanılmak üzere geliştirilmiş olmasına rağmen, oyunlar ve sivil uygulama alanları gibi diğer alanlarda da kullanılmaktadır [4]. Askeri eğitim için hazırlanmış açık kaynak oyun ve simülasyon motorları, DIS yetenekleri de bünyesine katmasıyla pek çok alanda bu oyun motorlarının kullanıma aday olmasını sağlamıştır. Delta 3D isimli askeri eğitim için hazırlanmış açık kaynak oyun ve simülasyon motoru bu durum için örnek teşkil etmektedir[5].

Sanal ortam çok oyunculu ortamların kullandığı teknolojilerin incelendiği çalışmada [6] varolan kütüphanelerin, simülasyonla uyumlu ve eşgüdümlü çalışmaları irdelenmiştir. Çok oyunculu ortamların oluşturduğu sunucu istemci mimarileri arasındaki problemler ve çözümler analiz edilmiştir. Ayrıca, simülasyon ortamlarındaki ücretsiz mimarilerin askeri ve sivil alanda kullanımlarındaki avantaj-dezavantajları incelenmiş ve sivil ve askeri ortamlarda kullanılacak sistemlere yön vermek amaçlanmıştır.

Başka bir çalışmada da ordu için kullanılmak üzere geliştirilen simülasyon ortamında DIS, HLA kullanılmıştır [7]. Bu çalışmada kullanılan standart mimari yapının nesnelerin simülasyon ortamında askeri planlama, komuta ve kontrol sistemleri tekrar kullanılabilirlik ve modüler yapı konusunda esneklik sağladığı belirtilmiştir.

### 3. STANDART PROTOKOLLER

Dağıtık bir simülasyonda, varlıkların, yani araçlar, askerler, savaş gemileri, hava araçları, hakkındaki bilgi ana bilgisayarlar arasında paylaşılmaktadır. Bir simülasyonda, bir uçağı gösterebilmek için, diğer simülasyonun uçağın tam konumunu, yönünü, yüksekliğini veya diğer değişkenlerini bilmesi gerekir. Bu uçak durumu hakkında anlamlı bilgi simülasyon tarafları arasında değiştirilmelidir. Gönderen simülasyon tarafı, durum bilgisinin nasıl kodlanacağını bilmeli ve alıcı taraf da durum bilgisinin kodunu nasıl çözeceğini bilmelidir. Bu ana bilgisayarlar arasında gönderilen ve alınan mesaj sözdizimi olarak, mesajın anlamı ise semantik olarak adlandırılır.

Bu nedenlerden dolayı, dağıtık simülasyonlarda çoğunlukla kabul edilmiş standartlar vardır. Dağıtık Etkileşimli Simülasyonlar (DIS), tüm dünyadaki savunma müteahhitleri tarafından kullanılan ana standart olarak düşünülmesine rağmen, bunun dışında standartlar da mevcuttur: Yüksek Seviye Mimari (HLA) ve Test ve Eğitim Etkinleştirme Mimarisi (TENA) gibi. Bu standartlar DIS'in temel kavramlarını kullanır. Ancak DIS protokolünün yeterli olmadığı durumlarda, diğer protokollerin kullanılma ihtiyacı doğmaktadır. Bundan sonraki kısımlarda bu üç temel standart hakkında detaylı bilgi verilecektir.

#### 3.1 Dağıtık Etkileşimli Simülasyon (DIS)

Dağıtık Etkileşimli Simülasyon (DIS), ağ üzerinden çok oyunculu oynanan gerçek zamanlı savaş oyunları alanında sıkça kullanılan bir IEEE standardıdır ve bu protokol

**PDU Components:**

Item Name	Bit Length	Opt	Opt Ctl	Rpt	Rpt Ctl
<a href="#">PDU Header Record</a>	96				
<a href="#">Entity ID Record</a>	48				
<a href="#">Force ID Field</a>	8				
<a href="#"># of Articulation Parameters (n) Field</a>	8				
<a href="#">Entity Type Record</a>	64				
<a href="#">Alternative Entity Type Record</a>	64				
<a href="#">Entity Linear Velocity Record</a>	96				
<a href="#">Entity Location Record</a>	192				
<a href="#">Entity Orientation Record</a>	96				
<a href="#">Entity Appearance Record</a>	32				
<a href="#">Dead Reckoning Parameters Record</a>	320				
<a href="#">Entity Marking record</a>	96				
<a href="#">Entity Capabilities Record</a>	32				
<a href="#">Articulation Parameter Record</a>	128	Yes	Number of Articulation Parameters	Yes	Number of Articulation Parameters

**Şekil 1.** Varlık Durum Protokol Veri Biriminin (PDU) DIS veri sözlüğündeki [10] tanımı

genellikle, askeri kuruluşlar, uzay araştırmaları ve sağlık sektörünün etki alanıyla ilgilenen diğer kuruluşlar tarafından kullanılır [8].

Dağıtık Etkileşimli Simülasyon, Modelleme ve Simülasyon (M&S) için orijinal standart olarak kabul edilir. DIS şunları içerir,

1. Durum bilgisi alışverişinde kullanılan mesajlar,
2. Mesaj için semantik standartlar ( Koordinat sistemi, ölçü birimi vb.)
3. Bilgi işleme prosedürleri (Mesaj değişim sırası, varlıkların simülasyona dâhil olduğunda haberdar edilme vb.) [9]

Protokol Veri Birimleri (PDU) olarak adlandırılan özgün mesaj parçalarından oluşan DIS mesajları, ilgili ünitelerin kodlanmış konumunu ve kullanılan veri formatı gibi bilgileri tanımlar [9]. Esasen bu Dağıtık Etkileşimli Simülasyon Protokol Veri Birimleri (DIS PDU'ları), kullanılması gereken verileri biçimlendirmek ve bu simülasyonun uçtan uca birlikte çalışabilirliği için etkin hale getirilen tüm ağın semantik anlamını tanımlamak amacına hizmet eder [3].

Dağıtık Etkileşimli Simülasyon (DIS), Yüksek Seviye Mimari (HLA) ve Test ve Eğitim Etkinleştirme Mimarisi (TENA); dünyadaki varlıkların konumlarını tanımlamak ya da semantik bilgilerini tanımlamaktan başka roller için de kullanılabilir (Benzetilmiş radyo trafik sesi verilerinin DIS ile simülasyon ağı üzerinden iletilmesi gibi). Örnek bir Varlık Durumu PDU'su, DIS Veri Sözlüğünde [10] tanımlandığı şekliyle Şekil 1'de sunulmuştur.

"Belirli bir varlık durumuna ilişkin bilgi, bir varlık durumu PDU'su yayınlamak iletilmelidir. Varlık durumu PDU'su aşağıdaki alanları içermelidir" [10].



Mesajların semantiği hakkındaki anlaşmaya, mesajların içeriğinden ziyade DIS standartları ile varılır. Örneğin, hangi koordinat sisteminin kullanılacağı DIS'te tanımlanmıştır. Ancak bir simülasyonda gerçekleştirilen olayların tamamı sadece bir PDU kullanımı ile tanımlanamaz. Gerçekleşen olay ateş açma olayında olduğu gibi birden fazla PDU kullanılarak da tanımlanabilir. DIS'te ateş açma olayı tanımlanırken ateş açan, hedef ve ateş açmakta kullanılan mühimmatın için ayrı ayrı PDU'ları tanımlanmalı ve gönderilmelidir.

DIS, DNS ve HTTP protokollerinde olduğu gibi standardize edilmiştir. DIS yukarıda belirtildiği gibi üç bileşen ile standart hale getirilir: PDU formatları, içerik semantiği ve bunların değişiminde kullanılacak yöntem.

### 3.2 Yüksek Seviye Mimari(HLA)

DIS, askeri simülasyonlarda kullanılacak bir standart olarak ortaya çıkmıştır. Yüksek seviye mimarisi (HLA) ise DIS'i, daha da iyileştirme ve sivil alan için de kullanma inancıyla oluşturulmuştur. HLA, Dağıtık Etkileşimli Simülasyonun aksine bir grup API(Uygulama Programı Arayüzü) ile tanımlanmıştır [11]. HLA, simülasyonların dâhili olarak tekrar kullanılabilirliği ve işletilebilirliğini sağlayan bir çerçeve olarak tanımlanabilir [12].

HLA'nın standart hale getirdiği şey DIS'ten farklıdır. HLA'da simülasyon katılımcılarına federe adı verilir. İki federe veri alışverişinde bulunuyorsa, Federasyon Nesne Modeli'ni (FOM) kullanmalıdırlar. FOM'ların kullanımı olmadan, federeler mesajların semantiği konusunda anlayamazlar. FOM, federeler arasında bir simülasyon kurulabilmesi için, ağ üzerinden gönderilecek ve alınacak bilgileri tanımlayan bir model olarak tanımlanmaktadır [13]. FOM'lar, bir HLA simülasyonu kurulumundaki nesnelere ve niteliklere tanımlar.

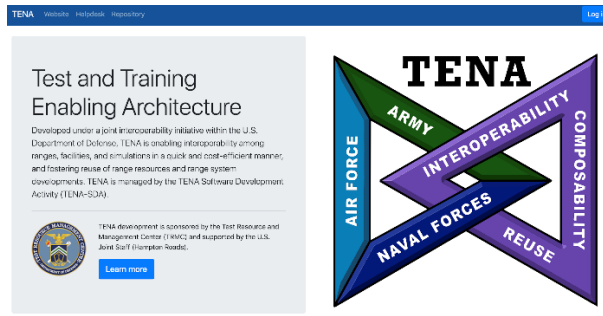
DIS'ten HLA'ya geçişi çok daha hızlı yapabilmek için, büyük ölçüde DIS semantiğini ve sözdizimini kullanan, Gerçek Zamanlı Referans Platformu FOM'u (RPR-FOM) kullanılmıştır [9]. Sonuç olarak, varlık sayısına göre kıyaslama yapıldığında HLA ile elde edilen simülasyon boyutu, DIS'ten daima daha büyüktür.

Simülasyonlar, ana bilgisayarlar arasındaki varlıkların durumları hakkında bilgi alır ve gönderir. DIS, durumları değişmese de, birkaç saniye içinde bir varlık durumları hakkında güncelleme bilgisi gönderir. Simülasyon kaynak kısıtlamaları nedeniyle, bu durum yüksek maliyetlidir. Bu nedenle HLA'da, varlıkların durum bilgileri hakkındaki güncelleme yayılımı sadece değişiklik olduğunda ana bilgisayarlar arasında yayılır. Park halindeki bir kamyon örneğinde, kamyonun ivmesi değişmediğinden, herhangi bir mesajın gönderilmesini gerektirmez. HLA, kamyonun yönü veya hızı değiştirilinceye kadar kamyonun durumu hakkında herhangi bir güncelleme göndermez, bu nedenle de daha az bant genişliği kullanır.

DIS'te, mesajların semantiği ve sözdizimi standardize edilmiştir. İkili veri mesajlarını okuyabilen ve iletebilen tüm programlama dilleri, C, C++, Java, Javascript, Objective-C, Python vb. DIS mesajlarının kodunu çözebilir ve gönderebilir. Ancak HLA'da API kullanılır ve birincil API'ler için ana diller C++ ve Java'dır. Sonuç olarak; HLA, DIS standartına göre bir dizi ilerleme sağlasa da, DIS'a nazaran kullanılabilir programlama diline yönelik büyük kısıtlamalar getirmiştir [9].

### 3.3 Test ve Eğitim Etkinleştirme Mimarisi (TENA)

TENA, 2011 yılında ABD ordusu tarafından geliştirilmiştir [14]. Temel amacı, araziye çıkacak birlikler için test ve eğitim sistemleri eklemek olan TENA, Amerika Birleşik Devletleri Savunma Sekreteri Test Kaynak Yönetim Merkezi Ofisi (TRMC) [9] tarafından sürdürülmektedir. TENA'nın resmi web sitesi [15], Şekil 2' de görülebilir.



Şekil 2. TENA Resmi Web Sitesi [10]

TENA, ABD ordusu tarafından gerçek arazi gereksinimlerine uyacak şekilde geliştirilmiştir. DIS, içindeki durum bilgisini değiştirmek için sabit bir mesaj dizisi kullanır. HLA ise bir API yapısı kullanmaktadır. Ancak TENA'da uzak nesnelere mimarisi benimsenmiştir ve bu durum kodun tekrar kullanılabilirliğini sağlamaktadır.

Örneğin, simülasyondaki bir tank, tank nesnesi örneği olarak yayınlanır. Diğer simülasyon katılımcıları, bu nesne örneğindeki metotları, kendi ana bilgisayarlarındaki bir vekil sunucu (proxy) aracılığıyla kullanabilen hizmetkarlar kullanırlar [9]. Hizmetkarlar ve vekil ,orijinal simülasyondaki nesne ile aynı arayüze sahiptir. Vekilde yerel bir uygulama tarafından, çağrısına eklenen bazı argümanlarla bir metot çağrıldığında, vekil kendi üzerinde işlem yapma yükünü taşımamaktadır. İşlemleri kendi üzerinde yapmak yerine, metot tarafından kullanılacak argümanlar da dahil olmak üzere metot çağrısı için bir paket yaratır ve mesajı ağ üzerinden, hizmetkarın yardımıyla simülasyondaki ana bilgisayara aktarır. Bu alıcı ana bilgisayar kodu yürütür, ardından kodun sonucunu, hizmetkar vasıtasıyla isteği yapan vekile yeniden iletir.

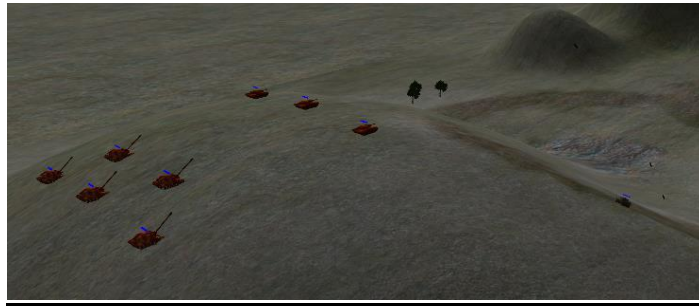
TENA, gerçek zamanlı bileşenlerini ücretsiz olarak indirebilmek için sitesinde bir hesap oluşturmayı talep etmektedir. Ancak, hâlihazırda, TENA sadece Amerikan Savunma Bakanlığı ve Amerikan Savunma Bakanlığı müteahhitleri için erişilebilir durumdadır. Ayrıca, TENA kullanıcılarına, web sitesinde yeniden kullanılabilir TENA objeleri

deposunu sağlamakta ve kullanıma sunulmaktadır. TENA henüz açık kaynak kodu olarak paylaşımına sunulmamıştır ve bu kısıtlı kullanım alanı nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir standart olarak kabul edilememektedir [9].

#### 4. UYGULAMA VE YÖNTEM

Bu çalışma; askeri uygulamalar arasındaki mesaj trafiğini izleyebilmek ve uygulayarak kullanımını göstermek amacıyla üç boyutlu web tabanlı ağ üzerinde çalışabilen bir simülasyon geliştirmeyi hedeflemektedir. Simülasyonda, temelde birlikte çalışabilirlik prensibini uygulamalı ortaya koymak adına literatürde kabul görmüş DIS standardı kullanılmıştır. Uygulama, üç boyutlu popüler JavaScript kütüphanesi Three.js kullanılarak nesne yönelimli programlama dillerinden JavaScript ile geliştirilmiş, ve ‘canvas’ objesi üzerinde WebGL teknolojisi ile resmedilerek web tarayıcısı vasıtasıyla koşturulmaktadır (Şekil 3).

Uygulamanın web tabanlı olarak geliştirilmesi beraberinde birçok fayda getirmiştir. Öncelikle; geliştirilmesi ve derlenmesi herhangi bir ek yazılım kurulumu getirmemektedir. Basit bir metin düzenleyicisinde yazılan kod, tüm web tarayıcılarının içinde gömülü JS (JavaScript) motoru vasıtası ile derlenebilmektedir. Programı çalıştırmak isteyen kişinin, hâlihazırda neredeyse her akıllı cihazda kurulu gelen web tarayıcısına sahip olması yeterlidir. Bu özellik, uygulamanın birçok platformda ek kurulum gerektirmeden çalışmasına imkân sağlamaktadır. Ayrıca uygulama üzerinde yapılan güncellemelerin sunucu tarafındaki dosyalarda yapılması yeterlidir. Kullanıcının, tarayıcısında yenile tuşuna basarak sunucudaki güncellenmiş dosyaların indirmesi, son sürüme erişmesini sağlamaktadır.



**Şekil 3.** Simülasyondan anlık bir görüntü

Simülasyon, kullanıcının tek bir tankı kontrol edebildiği eş zamanlı çalışan strateji oyununa benzer bir formatta geliştirilmiştir. Uygulamada üç çeşit askeri sınıfı temsil eden silahlar bulunmaktadır: üzerinde makineli tüfek bulunduran tekerlekli personel taşıyıcı (piyade), kundağı motorlu obüs (topçu) ve tank silahları. Sunucu tarafında çalışan ana uygulamada, düşman tarafı hâkim bir tepede güçlü topçu birlikleriyle desteklenen tanklarla temsil edilmektedir. Kullanıcıların hedefi, internet üzerinden simülasyona bağlanan diğer

kullanıcılarla mavi kuvvetleri oluşturmak ve kırmızı kuvvetleri etkisiz halde getirmektir. Ağ bağlantısı, HTTP protokolündeki tokalaşma yordamına benzer bir şekilde iletişime başlayan, ancak bağlantı kurulduktan sonra her iki tarafın (sunucu ve istemci) veri alışverişine imkân sağlayan ‘websocket’ vasıtasıyla sağlanmaktadır. Yine benzer bir şekilde birçok web tarayıcısı, ek bir kurulum gerektirmeden standart ‘websocket’ bağlantısı kurulmasına imkân sağlamaktadır. Kullanıcı tarafından web sayfasında açılan uygulama, sunucu tarafında, Java dilinde geliştirilmiş websocket sunucusu (‘mcgredonps’ kullanıcısı tarafından açık kaynak kod olarak github’da paylaşılmış [16]) ile bağlantı kurmaya çalışmaktadır. Bu sunucu, bağlantıyı gerçekleştiren her kullanıcının göndermiş olduğu farklı tipteki mesajları, diğer kullanıcılara çoklu yayınlamaktadır.

```
// Set the entity type. SISO has a big list of enumerations, so that by
// specifying various numbers we can say this is an M1A2 American tank,
// the USS Enterprise, and so on. We'll make this a tank. There is a
// separate project elsewhere in this project that implements DIS
// enumerations in C++ and Java, but to keep things simple we just use
// numbers here.
EntityType entityType = espdu.getEntityType();
entityType.setEntityKind((short)1); // Platform (vs lifeform, munition, sensor, etc.)
entityType.setCountry(225); // USA
entityType.setDomain((short)1); // Land (vs air, surface, subsurface, space)
entityType.setCategory((short)1); // Tank
entityType.setSubcategory((short)1); // M1 Abrams
entityType.setSpec((short)3); // M1A2 Abrams
```

#### Şekil 4. Varlık durumu PDU’sundan bir kesit

Projede; DIS, open-dis projesi [17] tarafından açık kaynak olarak birçok programlama dilinde hazırlanmış kütüphanelerden JavaScript versiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Protokol standartlarından, esasen simülasyonda kullanılan iki tip mesaj bulunmaktadır. Bunlardan ilki her 100 ms’de bir sunucuya gönderilen, simülasyonda oluşturulan her bir varlık için ünite genel durumunu tanımlayan, temelde ünite hakkında tüm bilgileri içeren, varlık durumu PDU’sudur. Taşınan ve işlenen verinin bir kısmı Şekil 4’de görüldüğü gibidir. Bu PDU’nun mesaj uzunluğu 144 byte’dır. Tekrarlayan mesajları ihmal etmek için PDU’nun zaman damgası her gönderide güncellenmektedir. Buna ek olarak her gönderiden önce; varlığın konumu, vektör yönelimi ve hasar durumundaki değişiklikler güncellenmektedir. Hasar bilgisi, PDU içerisinde ünite görünümünü tanımlayan 32 bitlik tamsayının 3 ve 4’üncü bitleri üzerinde tanımlanmıştır. Dolayısı ile 4 durumun tanımlanabildiği veri biriminde; hasar bilgisi, hasarsız, kısmi hasarlı, orta dereceli hasarlı ve tam hasarlı (imha) durumlarını ifade edebilmektedir. Kullanıcı tarafında çalıştırılan simülasyon, her bir varlık için gönderilmiş olan PDU’ları inceleyerek, ait olduğu varlığı tanımlanan konum ve yönde resmetmekte ve hasar bilgisinin temsil edildiği can çubuğunu araç üzerinde çizmektedir.

Open-dis kütüphanesinin sunduğu başka bir PDU olan ateş PDU’su, ateşlenmiş bir mühimmatın balistik konum ve hareketini temsil etmektedir. Ağ trafiğini meşgul etmemek ve simülasyonu daha karmaşık hale getirmemek maksadıyla, bu tip PDU kullanılmamıştır. Simülasyonda üniteler tarafından ateşlenen ağır mühimmatlar balistik yolları üzerinde resmedilmektedir. Ancak bu bilgi sunucuya gönderilip, çoklu

yayınlanmadığı için çalıştırılan her farklı simülasyonda, varlık konum ve yönleri senkronize olmuş olsa da atılan mühimmatların ateşleme zaman ve yolları farklı animasyonlarla resmedilmektedir. Bu durum istikrarsız bir duruma sebep olmamaktadır çünkü ikinci tip PDU olarak kullandığımız patlama PDU'ları, mühimmatın atıldığı simülasyon tarafından hedef, mühimmat cinsi, patlama noktası ve etki yarıçapı bilgisi ile sunucuya gönderilip çoklu yayınlandığından, bu veriyi alan diğer simülasyonlar kendi varlıklarının etki yarıçapı içerisinde olduğunu tespit ettiği durumda yine kendi hasar durumlarını aldıkları hasar oranında düşürmektedir ve bunu varlık durum PDU'su olarak yayınlamaktadır. Bu yordam, her bir ekranda simülasyonun az da olsa farklı resmedilmesinin, istikrarsız bir duruma yol açmasını engellemektedir. Çünkü hasar bilgisi, gelen patlama PDU'larını esas alarak her varlığın kendi öz simülasyonu tarafından değiştirilerek ağa yayınlanmaktadır. Simülasyon mavi veya kırmızı tarafta herhangi bir ünite kalmayana kadar devam etmektedir.

## 5. SONUÇ

Bu proje; üç boyutlu web tabanlı, DIS protokolü kullanan, çok oyunculu bir ağ simülasyonu örneği sunmaktadır. Web tabanlı uygulamaların avantajlarını kullanarak, kullanıcının kendisine sağlanan linki tıklayarak makinasına indirdiği ve web tarayıcısında rahatlıkla çalıştırdığı uygulama, Rasperry Pi cihazı üzerinde kurduğumuz websocket sunucusu ile internet üzerinden bağlantı kurmakta ve simülasyonda işlenen DIS protokolü formatında binary mesajları (PDU) gönderip almaktadır. Ek bir yetenek olarak, Rasperry Pi cihazı tarafından çoklanan mesajlar UDP formatında aynı ağda çalışan diğer askeri simülasyonlara gönderilebilmektedir. Örneğin, aynı ağa bağlı VBS 3 (Virtual Battlespace Simulation) adlı simülasyon durum, ateş ve patlama PDU'larını işleyip resmedebilmektedir. İleri aşamada simülasyonun, kullanıcı kontrollerinin iyileştirilerek ve düşman ünitelerine yapay zekâ algoritmaları eklenerek geliştirilmesi planlanmaktadır.

(Bu bildiri hiçbir şekilde TSK'nin görüşlerini yansıtmamaktadır. Yapılan araştırma ve yorumlar tamamen yazarların görüşü ve çalışmalarının bir parçasıdır.)

## 6. KAYNAKÇA

- [1] IEEE 1278.1-2012 - IEEE Standard for Distributed Interactive Simulation--Application Protocols
- [2] Toledo-Ramirez, R. (2006). Design of an object oriented and modular architecture for a naval tactical simulator using Delta3D's game manager. Naval Postgraduate School Monterey CA.
- [3] Zalzman, L. (2004), What Distributed Interactive Simulation (DIS) Protocol Data Units (PDU) Should My Australian Defence Force Simulator Have? DSTO Systems Sciences Laboratory: Edinburgh, S. Aust.
- [4] Jense, G. J., Kuijpers, N. H. L., & Dumay, A. C. M. (1997). DIS and HLA: connecting people, simulations and simulators in the military, space and civil domains. Astronautics., TNO Physics and Electronics Laboratory.

- [5] McDowell, P., Darken, R., Sullivan, J., & Johnson, E. (2006). Delta3D: a complete open source game and simulation engine for building military training systems. *The Journal of Defense Modeling and Simulation*, 3(3), 1
- [6] Sanders, K. (2007). Requirements to create a persistent, open source, mirror world for military applications. Naval Postgraduate School Monterey CA.
- [7] Cotton, A. L. (1997). Developing a standard unit-level object model. Monterey, California. Naval Postgraduate School.
- [8] <https://en.wikipedia.org/wiki/DistributedInteractiveSimulation> En Son Erişim =12-21-2018
- [9] <https://github.com/open-dis/DISTutorial/wiki/Department-of-Defense-Simulation-Protocol-Standards> En Son Erişim =12-21-2018
- [10] <http://faculty.nps.edu/brutzman/vrtp/mil/navy/nps/disenumerations/jdbe-htmlfiles/pdu/29.html> En Son Erişim =12-21-2018
- [11] <https://www.mak.com/learn/industry-standards/hla-protocol> En Son Erişim =12-21-2018
- [12] [https://www.springer.com/cda/content/document/cda\\_downloadaddocument-/9783319612669-c2.pdf](https://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloadaddocument-/9783319612669-c2.pdf)
- [13] Möller, B., Löfstrand, B. and Karlsson, M., 2007, March. An overview of the HLA evolved modular FOMs. *In Spring Simulation Interoperability Workshop. Norfolk, Virginia: Simulation Interoperability Standards Organization.*
- [14] Cantot, P., and D. Luzeaux. Simulation and Modeling of Systems of Systems,(2013) ISTE.
- [15] <https://www.tena-sda.org>
- [16] [https://github.com/mcgregdonps/DIS\\_Map](https://github.com/mcgregdonps/DIS_Map)
- [17] <http://open-dis.sourceforge.net/DIS.html>

## UZAKTAN KOMUTALI SİLAH SİSTEMİNDE KULLANILAN ATEŞLEME SOLENOİDİNİN ELEKTROMANYETİK BENZETİMİ

Yusuf Kürşat Ekiz <sup>(a)</sup>, İbrahim Güngen <sup>(a)</sup>, İbrahim Kaya <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> ASELSAN A.Ş., {ykekiz,igungen,ibrahim}@aselsan.com.tr

### ÖZ

Uzaktan komutalı silah sistemlerinde belli sayıda atış yapabilmek üzere silahı ateşlemek için solenoidler kullanılmaktadır. Solenoid, elektrik enerjisi ile doğrusal hareket elde etmek için kullanılan elektromekanik bir yapıdır. Solenoid bobinine uygulanan gerilim solenoidin elektromanyetik devresinde manyetik akı yoğunluğu indükleyerek, solenoid içerisindeki piston üzerinde elektromanyetik kuvvet oluşturur. Elektromanyetik kuvvet, bobin gerilimine, direncine, sargı sayısına, manyetik devreyi oluşturan malzemelerin ferromanyetik özelliklerine, solenoid içerisindeki manyetik boşluğa, piston ve gövde geometrisine bağlıdır. Solenoid tasarımında manyetik devredeki doyumun kuvveti sınırlandırmaması için analiz edilmesi gerekmektedir. Piston geometrisi solenoidin hareketi boyunca uygulayacağı kuvvet değerini etkilemektedir. Elektromanyetik analiz için solenoid manyetik devresinin her noktası özelinde hesaplama yapmak mümkün olmadığı için Sonlu Eleman Analizi (Finite Element Method, FEM) adı verilen yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntem ile solenoidi sonlu sayıda dörtgen prizması şeklinde parçaya ayırıp, dört nokta için manyetik alan yoğunluğu hesaplanıp, prizmanın içine interpolasyon yapılarak benzetim yapılmaktadır. Bu bildiride ASELSAN'da tasarımı yapılan ve deniz platformu uzaktan komutalı silah sisteminde kullanılan ateşleme solenoidinin ANSYS MAXWELL yazılımı kullanılarak yapılan elektromanyetik benzetim çalışmalarına yer verilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Solenoid, Elektromanyetik analiz, Sonlu Eleman Analizi (FEM).

## **ELECTROMAGNETIC SIMULATION OF FIRING SOLENOID USED IN REMOTE CONTROLLED WEAPON SYSTEM**

### **ABSTRACT**

Solenoids are used for firing guns to shoot a certain number of bullets in remote controlled weapon systems. The solenoid is an electromagnetic structure used to obtain linear motion from electrical energy. The voltage applied to solenoid coil generates electromagnetic force on the plunger in solenoid. Electromagnetic force depends on the voltage applied to coil, the coil resistance, the number of winding, the ferromagnetic properties of the magnetic materials forming the magnetic circuit, the magnetic space in the solenoid, the plunger and the body geometry. In the solenoid design, the saturation in the magnetic circuit must be analyzed in order not to limit the force. The plunger geometry affects the force value of the solenoid during its movement. Since it is not possible to calculate electromagnetic equations for each point of the solenoid magnetic circuit, the Finite Element Method (FEM) is used. With this method, the solenoid is divided into a finite number of rectangular prisms pieces and the magnetic field density is calculated for four points and interpolation is made into the prism. In this paper, the electromagnetic studies are carried out by using ANSYS MAXWELL software which is design in ASELSAN and used in a marine platform remote controlled weapon system.

**Keywords:** Solenoid, Electromagnetic Simulation, Finite Element Method (FEM).

### **1. GİRİŞ**

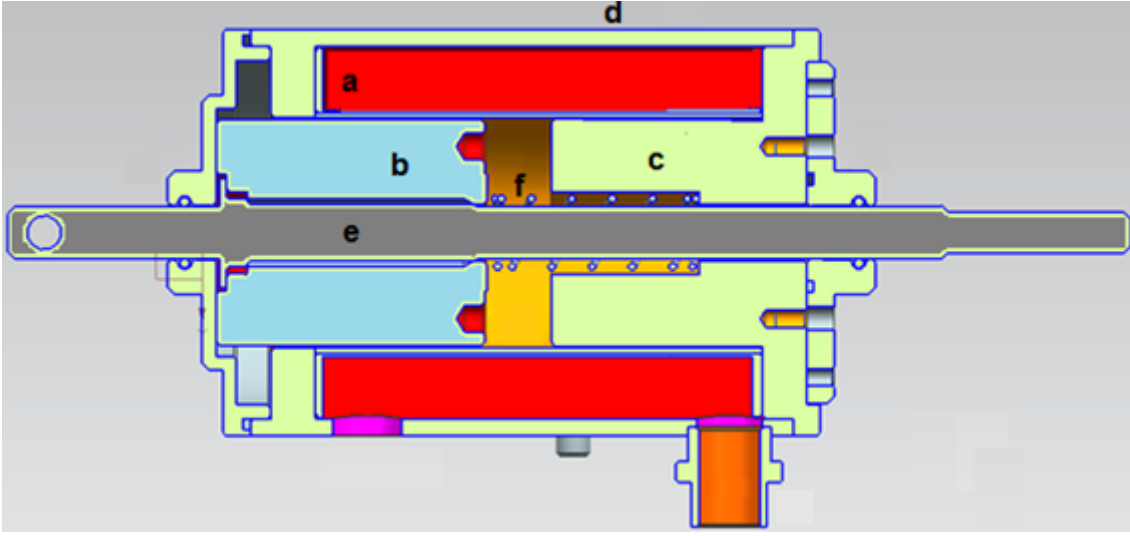
Savunma sanayinde silah sistemlerinin uzaktan kontrolü üzerinde çalışmalar yoğunlukla sürdürülmektedir. Uzaktan komutalı silah sistemleri ile silah kullanımında ve ateşlenmesinde insan faktörü minimuma indirgenerek, silah sistemlerinin hedefe odaklanarak atış görevini yerine getirmektedir.

Endüstride birçok amaç için kullanılan elektromanyetik solenoidler, savunma sanayinde uzaktan komutalı silah sistemlerinde, silahın ateşlenmesinde yoğunlukla kullanılmaktadır. Silah sistemin mekanik özelliklerine, uygulanacak kuvvetlere ve itme veya çekme özelliğine bağlı olarak solenoid tasarımlara özelleştirilip ihtiyaca göre özgün tasarımlar yapılabilmektedir. Solenoidler sistemlerde sadece tetik düşümünde kullanılmamakta, sistemlerdeki mekaniklerin ayrılmasında, kilitlemelerde de kullanılabilirlerdir.



## 2. SOLENOID BİLEŞENLERİ

Solenoidler düz pistonlu ve konik pistonlu olarak tasarlanabilir. Tasarımda ihtiyaç duyulan boyutlara, tetik düşümü için kullanılacak mekaniği çekmek veya itmek için gerekli olan kuvvetlere bağlı olarak solenoidler tasarlanır. Şekil 1’de düz pistonlu bir solenoidin bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 1. Solenoid bileşenleri

- a: Bobin
- b: Piston (Plunger)
- c: Piston Yuvası (Alt Gövde)
- d: Dış Gövde
- e: Mil
- f: Yay

**a. Bobin:** Elektrik akımını manyetik alana dönüştüren bileşendir. Bobine uygulanan elektrik akımı ile birlikte bobinin etrafındaki manyetik devrede manyetik akı ( $\Phi$ ) oluşur. Bobin tur sayısı (N) tasarım için gerekli kuvvet, endüktans değeri, solenoid tepki süresi göz önünde bulundurularak ayarlanmalıdır.

**b. Piston (Plunger):** Solenoidin hareketli bileşenidir. Solenoid manyetik devresinin bir parçasıdır. Piston manyetik geçirgenliği (permeability) yüksek malzemeden üretilir.

**c. Piston Yuvası (Alt Gövde):** Solenoidin sabit bileşenidir ve manyetik devresinin bir parçasıdır. Manyetik devredeki akı yoğunluğunu artırmak amacıyla piston yuvası manyetik geçirgenliği yüksek malzemeden üretilir.

**d. Dış Gövde:** Solenoidin içerisindeki bileşenleri çevresel etkilerden korur. Aynı zamanda solenoidin manyetik devresinin bir parçasıdır. Manyetik geçirgenliği yüksek malzemeden üretilir.

**e. Mil:** Piston hareketini mekanik yüke aktarmak için kullanılan parçadır. Piston ile birlikte hareket edecek şekilde pistona sabitlenir. Manyetik olmayan (manyetik geçirgenliği olmayan) malzemeden üretilir.

**f. Yay:** Pistonun hareketi ettikten sonra eski konumuna dönmesi için kullanılır. Pistonun başlangıç konumuna hızlı bir şekilde dönmesi için yay kuvvetli olmalıdır. Diğer yandan yay kuvvetinin artması solenoide akım uygulanınca elde edilen net kuvveti azaltır.

### 3. SOLENOİD MANYETİK KUVVET HESABI

Solenoid manyetik devresi bobin, piston, piston yuvası ve dış gövdeden oluşmaktadır. Solenoid pistonu ile piston yuvası arasındaki boşluk üzerinde oluşacak olan kuvvet, hava boşluğunda oluşacak olan manyetik akı yoğunluğuna ve pistonun kesit alanına bağlıdır [1]. Manyetik devrelerde elektromanyetik kuvvet, manyetik relüktansı azaltacak hareketi sağlama yönüne doğru oluşmaktadır.

$$F=B^2A/2\mu_0 \quad (1)$$

F : Pistona etki edecek kuvvet, N

B : Hava boşluğunda oluşacak manyetik akı yoğunluğu, T

A : Piston kesit alanı, m<sup>2</sup>

$\mu_0$  : Havanın manyetik geçirgenlik katsayısı,  $4\pi 10^{-7}$  Tm/A

Piston ile alt piston yuvası arasındaki manyetik boşlukta oluşacak manyetik akı yoğunluğu Maxwell denklemleri kullanılarak aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanabilir. Manyetik akı yoğunluğu solenoid bobininin tur sayısına, uygulanan akıma ve hava boşluğunun uzunluğuna bağlıdır [2], [3].

$$NI=HL_g \quad (2)$$

$$B= \mu_0 H \quad (3)$$

$$B=NI \mu_0/L_g \quad (4)$$

B : Hava boşluğunda oluşacak manyetik akı yoğunluğu, T

N : Solenoid bobininin tur sayısı

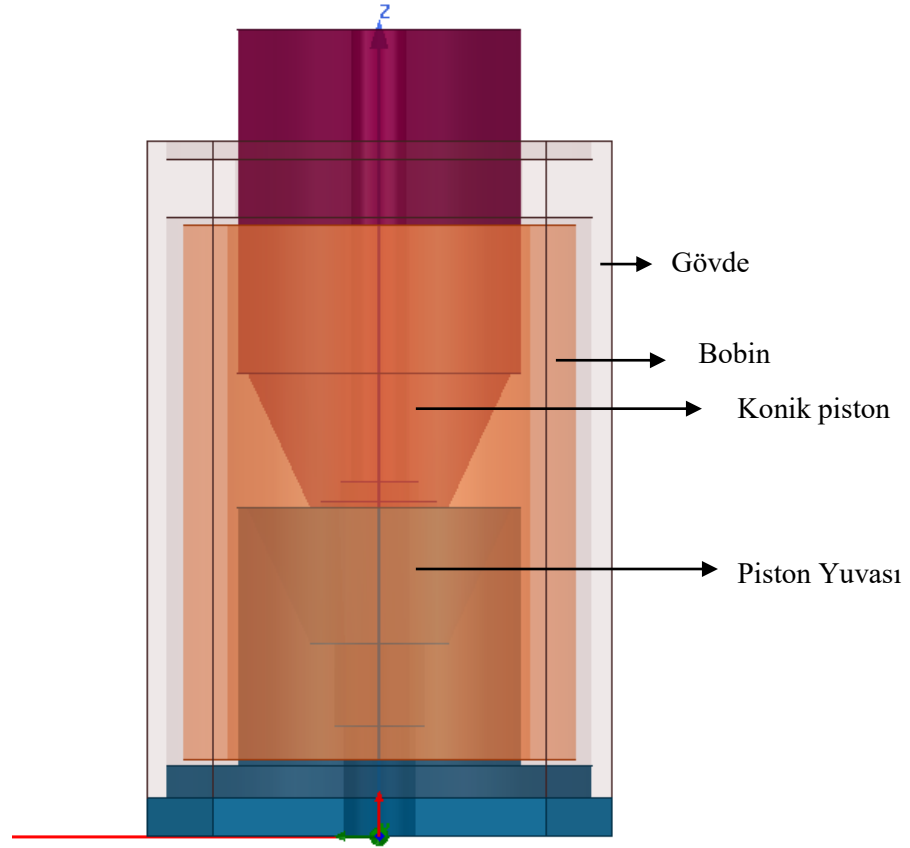
I : Solenoid bobininin akımı, A

$L_g$  : Hava boşluğunun uzunluğu, m

Eşitlik (1) ve Eşitlik (4) numaralı denklemler kullanılarak solenoidin manyetik kuvvet formülü aşağıdaki gibi elde edilir.

$$F=(NI)^2 \mu_0 A/2L_g^2 \quad (5)$$

Eşitlik (5) ile verilen denklem düz pistonlu solenoidlerde pistonun hareket etmesi için gerekli olan kuvveti hesaplamak için kullanılır. Solenoidlerin itilmesi veya çekilmesi için gerekli olan kuvveti hesaplamak için kullanılan yayın net kuvvetinin de bilinmesi gerekmektedir. Solenoid net kuvvetinin hesaplanması için yay kuvveti manyetik kuvvetten çıkartılmalıdır. Piston ucunun konik tasarlanması durumunda kuvvet değerinin bulunması için MAXWELL programı kullanılabilir.



**Şekil 2.** Konik pistonlu solenoid

Solenoid manyetik kuvvet formülünün geçerli olabilmesi için solenoidin manyetik devresindeki yollarda saturasyon olmaması gerekir. Manyetik devrede saturasyon olduğunda, bu doyum manyetik akı yoğunluğunu sınırlayacağı için manyetik kuvvet hesaplanandan daha düşük olacaktır. Manyetik devrede doyum olup olmadığının kontrolü MAXWELL programı kullanılarak yapılabilir.

### **3.1. Tur sayısının (N) kuvvete etkisi**

Eşitlik (5)'e göre solenoid kuvveti tur sayısı ile artmaktadır. Tur sayısı artırılırken sargı direncinin sabit tutulması gerekir. Tur sayısını artırırken telin kalınlığı sabit tutulur ise sargı direnci artacaktır. Bu durumda akım ve dolayısıyla kuvvet azalacaktır.

Tur sayısı artırılırken telin çapı da artırılırsa bobin direnci sabit tutulabilir. Bu durumda ise sargının boyutu büyüyeceği için solenoidin boyutu da büyür. Tur sayısını ve sargı direncini gerekli olan kuvvet ihtiyacına uygun olarak boyutları da göz önüne alarak optimum şekilde ayarlamak gerekmektedir.

### **3.2. Akımın (I) kuvvete etkisi**

Manyetik kuvvet bobin akımı ile artar. Akım, sargı direnci azaltılarak artırılabilir. Sargı direncini azaltmak için de tel kalınlığını artırmak gerekir. Bunun sonucunda ise solenoidin boyutları büyür.

Akımdaki artış aynı zamanda bobinin ısı yükünü de artırır. Solenoide uzun süreli güç uygulanması, bobin sıcaklığının artmasına, bobin direncinin yükselmesine ve dolayısıyla akımın tekrar düşmesine neden olur.

### **3.3. Piston kesit alanının (A) kuvvete etkisi**

Piston kesit alanı kuvveti arttırır. Kesit alanı pistonun çapının karesi ile orantılı olduğundan, kuvvet piston çapının karesi ile artar.

Piston kesit alanı ile birlikte manyetik devrede dolaşan toplan akı miktarı da artacaktır. Manyetik akı yoğunluğunun malzemede doyuma uğramaması için manyetik akının döndüğü diğer manyetik özellikli parçaların boyutlarının arttırılması gerekebilir.

### **3.4. Hava boşluğunun ( $L_g$ ) kuvvete etkisi**

Hava boşluğunun uzunluğunu solenoid pistonunun hareket mesafesi belirlemektedir. Piston başlangıç konumundayken hava boşluğu maksimum değerindedir ve pistonu uygulanan kuvvet en düşük noktasındadır. Piston kuvvetin etkisi ile hareket ettikçe hava boşluğu azalır ve bununla birlikte pistonu etki eden kuvvet artar.

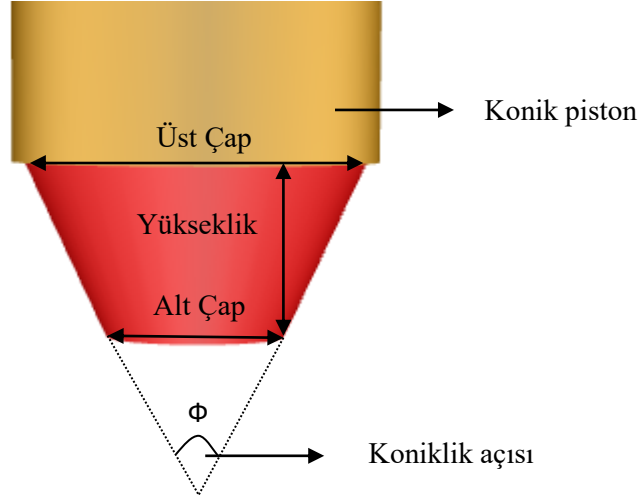
## **4. KONİK PİSTONLU SOLENOİD MANYETİK KUVVET ANALİZİ**

Solenoidlerde çekme veya itme kuvvetini artırmak için konik pistonlu olarak tasarlanabilir. Konik pistonlu solenoidlerde teorik olarak net bir kuvvet hesabı yapılamadığı için MAXWELL programını kullanarak analiz edilmelidir.

Konik pistonlu solenoidler ile pistonun kesit alanı azaltılır. Bunun yanında kesit alandaki manyetik akı yoğunluğu artırılmış olur. Eşitlik (1)'de de görüleceği üzere pistonu etki eden manyetik kuvvet, manyetik akı yoğunluğunun karesi ile doğru orantılı olduğu için pistonu uygulanan kuvvet artırılmış olur. Bu sayede daha küçük boyutlarda daha kuvvetli solenoidler tasarlanabilir. Burada en önemli nokta piston kesit alanı

azaltılırken manyetik doyuma ulaşmamasına dikkat edilmesidir. Piston manyetik doyuma ulaştığında solenoidde sıcaklık artışı meydana gelecektir.

Bu bölümde uzaktan komutalı silah sistemlerinde tetik düşümü işleminde kullanılacak olan farklı koniklik açısında tasarlanmış solenoidin kuvvet analizi yapılacaktır. Kuvvet ve manyetik doyum göz önüne alınarak optimum solenoid tasarımı yapılacaktır.



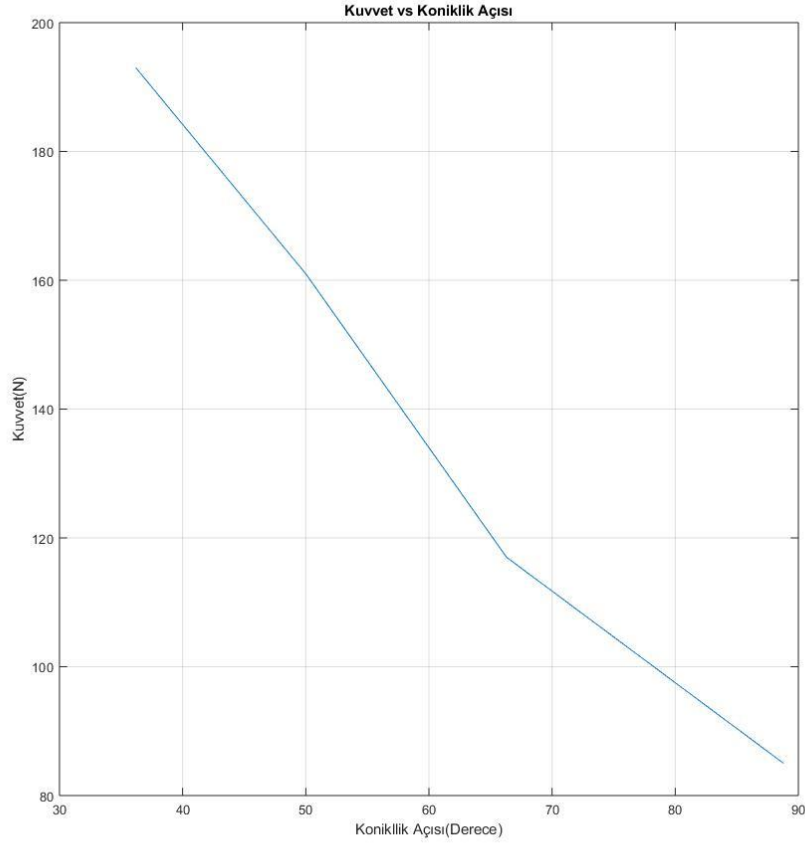
**Şekil 3.** Koniklik açısı

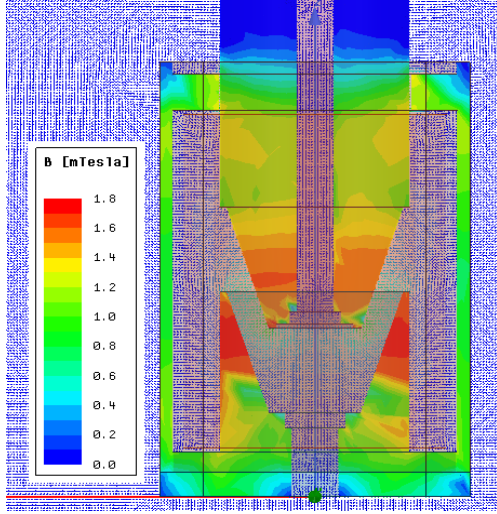
Tablo1’de koniklik açısı farklı solenoid tasarımlarının MAXWELL analizi sonucu elde edilmiş kuvvet değerleri verilmiştir. Koniklik açısı küçüldükçe pistonun kesit alanı daralmaktadır. Buna bağlı olarak kesit alanı azalan bölgelerde de manyetik akı yoğunluğu ve manyetik kuvvet artmaktadır.

MAXWELL benzetiminde kullanılan malzemenin manyetik doyum noktası 1.7 Tesla civarındadır. Malzeme doyuma ulaştığında aşırı ısınacak ve reelde daha fazla kuvvet vermesi mümkün olmayacaktır. Bundan dolayı yapılan analizlerde malzemenin doyum noktası göz önüne alınmalı ve optimum boyutlara karar verilmelidir.

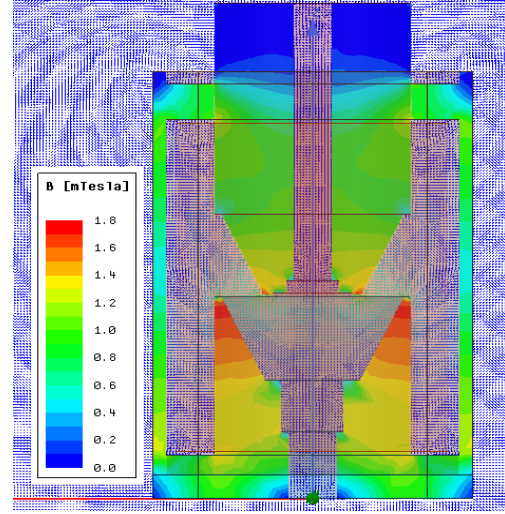
**Tablo 1.** Farklı boyutlarda tasarlanmış konik pistonlu solenoid analizi

	Üst Çap (mm)	Alt Çap (mm)	Yükseklik (mm)	$\Phi$ (derece)	Kuvvet (N)	Tur Sayısı	Akım (A)
Analiz 1	41	21.4	30	36.2	193	505	9.2
Analiz 2	41	21.4	21	50	161	505	9.2
Analiz 3	41	21.4	15	66.3	117	505	9.2
Analiz 4	41	21.4	10	88.8	85	505	9.2

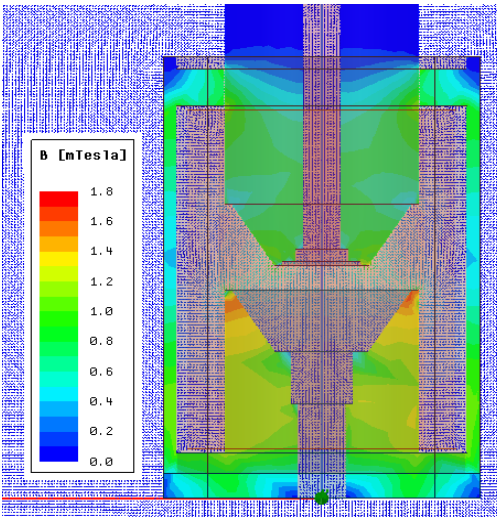
**Şekil 4.** Koniklik açısına bağlı elektromanyetik kuvvet değişimi



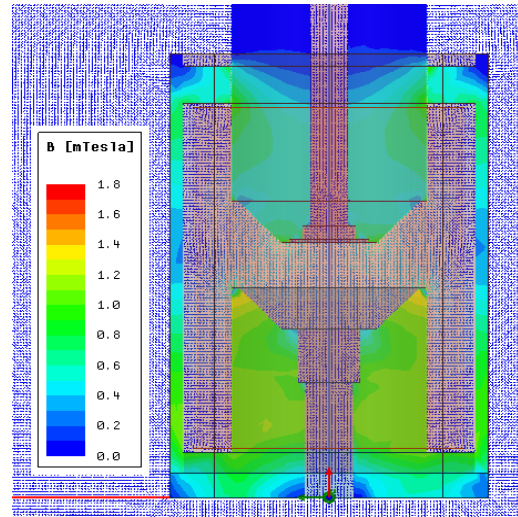
Şekil 5a. Analiz 1 manyetik alan dağılımı



Şekil 5b. Analiz 2 manyetik alan dağılımı



Şekil 5c. Analiz 3 manyetik alan dağılımı



Şekil 5d. Analiz 4 manyetik alan dağılımı

## 5. SONUÇ

MAXWELL analiz sonuçları Tablo 1’de kuvvet değerlerini, Şekil 4’te ise farklı koniklik açısında tasarlanmış solenoidlerin manyetik devresindeki akı yoğunluklarını göstermektedir.

Sonuçlar incelendiğinde en fazla başlangıç kuvvetinin Analiz 1’de 36.2 derece koniklik açısına sahip olan solenoidde olduğu görülmektedir. Fakat bu solenoidin manyetik devresi incelendiğinde piston ve piston yuvasının manyetik doyuma girdiği

görülmektedir. Hareketin devamında solenoidin sağlayacağı kuvvet düşmektedir ve verim düşmektedir.

Analiz 3 ve Analiz 4'te incelenen solenoid tasarımlarında manyetik devrede bir doyum söz konusu değildir. Bu solenoidlerin koniklik açısı arttıkça sağladıkları manyetik kuvvetin düştüğü Tablo 1'den görülmektedir.

İncelenen bu analizler sonucu en optimum tasarımın Analiz 2'de benzetimi yapılan solenoid olduğu görülmektedir. Bu solenoidin manyetik devresinde doyum çok sınırlıdır ve sağladığı kuvvet de yeterince yüksektir.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] Vogel, O. ve Ulm, J. (2011), Theory of Proportional Solenoids and Magnetic Force Calculation Using COMSOL Multiphysics, Proceedings of the 2011 COMSOL Conference.
- [2] Cardarelli, F. (2008), Materials Handbook, Springer-Verlag London Limited, 487-498.
- [3] Song, C.W. ve Lee, S.Y. (2015), Design of a Solenoid Actuator with a Magnetic Plunger for Miniaturized Segment Robots , Applied sciences, ISAN 2076-3417.
- [4] Lequesne, B. (1988). Finite-element analysis of a constant-force solenoid for fluid flow control. IEEE Transactions on Industry Applications, 24(4), 574–581. doi: 10.1109/28.6107
- [5] Xiao-Qing, X., & Long, Q. (2011). A novel analysis method for proportional solenoid magnetic circuit. Proceedings of 2011 International Conference on Fluid Power and Mechatronics. doi: 10.1109/fpm.2011.6045780
- [6] Yoon, S.-B., Hur, J., Chun, Y.-D., & Hyun, D.-S. (n.d.). Shape Optimization of Solenoid Actuator Using the Finite Element Method And Numerical Optimization Technique. 1997 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG97). doi: 10.1109/intmag.1997.597697
- [7] Mahajan, D. P., Narayanaswamy, R., & Bavisetti, S. (2013). Saw-tooth pole solenoid actuator for aerospace applications. 2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). doi: 10.1109/iciea.2013.6566577
- [8] Mahajan, D. P., Narayanaswamy, R., & Bavisetti, S. (2014). Performance analysis and experimental verification of solenoid actuator. 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). doi: 10.1109/isie.2014.6864792



## **MEMS DÖNÜÖLÇER STOKASTİK HATA PARAMETRELERİNİN KESTİRİMİ ve MATEMATİKSEL MODELLENMESİ**

**Ş.Tuna AKAN <sup>(a)</sup>, Dinçer GÖKCEN <sup>(b)</sup>**

<sup>(a)</sup> Hacettepe Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü; Aselsan A.Ş.  
Mehmet Akif Ersoy Mahallesi 296.Cd. No:16, Yenimahalle-Ankara  
stakan@aselsan.com.tr

<sup>(b)</sup> Hacettepe Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,  
dgokcen@hacettepe.edu.tr

### **ÖZ**

Mikroelektromekanik Sistemler(MEMS) hareket kontrol sistemlerinde yüksek doğruluklu hız ve pozisyon bilgileri elde edebilmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. MEMS dönüölçerler, sistem üzerinde uygulanmadan önce, benzetim ortamında yapılmış olan dönüölçer stokastik hata modeli çalışmaları sayesinde, sensör çıktılarının olasılıksal hatalarla değişimi gözlemlenebilmektedir. Bu hata modelini oluşturabilmek için öncelikle sabit kayma kararsızlığı, açısız rastgele yürüyüş ve oransız rastgele yürüyüş gibi stokastik hata parametrelerinin kestirilmesi gerekmektedir. Allan varyans metodu, bu stokastik hataların kestiriminde kullanılabilecek en etkili yöntemlerden biridir. Bu metot, dönüölçerin çıktısındaki rastgele süreç hatalarının türleri ve büyüklükleri hakkında bilgi verir. Bu çalışmada Allan varyansı yöntemiyle stokastik hata modelinde kullanılacak olan parametreler kestirilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Allan varyansı, Dönüölçer, Güç tayf yoğunluğu, Olasılıksal hatalar, Özilinti

### **ESTIMATION AND MATHEMATICAL MODELLING OF STOCHASTIC ERROR PARAMETERS OF MEMS GYROSCOPE**

#### **ABSTRACT**

Microelectromechanical Systems(MEMS) are commonly used for obtaining high accuracy angular velocity and position information in motion control systems. Before verifying the performance of the MEMS gyroscope on a particular system, designing the

stochastic error model of the sensor would be helpful. To design this error model, some stochastic error parameters such as bias instability, angular random walk and rate random walk are needed to be estimated. Allan variance method is one of the most effective approaches to estimate stochastic sensor errors. This method gives information about the types and magnitude of stochastic errors. This paper covers the estimation of parameters which are used for the stochastic error model of a MEMS gyroscope by the help of Allan variance method.

**Keywords:** Allan variance, Autocorrelation, Gyroscope, Power spectral density, Stochastic errors,

## 1. GİRİŞ

MEMS dönüölçer genellikle herhangi bir aracın, uçağın veya taretin hız verilerinin ölçülmesinde kullanılır. Bu hız ölçümünün farklı hata kaynakları sebebiyle gerçek değerinden sapması sonucunda, ilgili aracın hız ve pozisyon verileri doğru ölçülemediği olacaktır. Durağan haldeki sensör verisi dahi içerdiği hata bileşenleri sebebiyle kullanışlı olmayabilir. Bu, ataletsel sistemin tasarım ve performans öngörüsü bahsedilen hataların modellenmesini gerekli kılmıştır.

Allan varyans metodu ilk defa 1960`ların ortasında osilatörün kararlılık analizinde kullanılmıştır. Bu metot osilatörün kararsız hatalarını gün yüzüne çıkarmıştır. Daha sonra bu hataların ataletsel sensör hatalarıyla oldukça benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir [1,2]. Bununla birlikte, bu metot aracılığıyla rastgele sensör hatalarının tanımlanması üzerine çalışmalar başlatılmıştır. Allan varyans metodu IEEE tarafından ataletsel sensörlerin stokastik hatalarının kestirilmesinde kullanılacak etkin bir yöntem olarak kabul edilmiştir [3].

## 2. MEMS DÖNÜÖLÇER HATA PARAMETRELERİ

MEMS dönüölçer çıktıları, sıcaklığı bağlı ve zamana bağlı olmak üzere iki farklı çeşit hata kaynaklarına sahiptir [4]. Bu hataları sırasıyla deterministik ve stokastik (olasılıksal) hatalar olarak adlandırmak mümkündür. Sensör çıktısı denklem (1)`deki gibi bir matematiksel ifadeyle modellenabilir.

$$w_o(t) = w_i(t) + d(T) + n(t) \quad (1)$$

Burada  $w_o(t)$  sensör çıktısı,  $w_i(t)$  sensör girdisi,  $d(T)$  deterministik hata (sıcaklığa bağlı) ve  $n(t)$  stokastik hatayı ifade etmektedir.

## 2.1. Deterministik hatalar

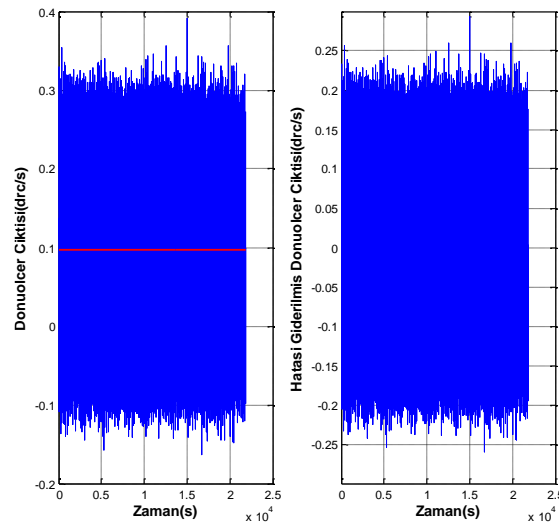
Deterministik hataların saptanması ve gözlenmesi stokastik hatalara nazaran daha kolay ve bu hatalar çeşitli testler sonucunda belirlenip, rahatlıkla giderilebilir. Bu hatalar dönüölçer kullanımı esnasında dönüölçer çıktısından çıkarılıp, sensörün kullanıldığı ilgili düzeneklerde performans artırımı sağlarlar.

Deterministik hatalar temel olarak sabit kayma hatası, orantı katsayısı hatası, eksen kaçıklığı ve ivmeye bağlı sabit kayma hatası adı altında dört gruba ayrılabilirler [5].

### 2.1.1. Sabit kayma hatası

Dönüölçere herhangi bir girdi uygulanmadığı koşulda sensörün çıktı sinyalinde sıfır değeri gözlemlenmelidir. Dönüölçere girdi uygulanmamasına rağmen dönüölçer çıktısında gözlemlenen sinyalin ortalama değerine dönüölçer sabit kayma hatası denir. Sabit kayma hatasının birimi drc/s veya drc/sa ile ifade edilir. Dönüölçerin her üç ekseninde meydana gelen sabit kayma hatası ve bu hataların sıcaklık karşısındaki değişimleri kalibrasyon testleriyle kestirilebilirler.

Şekil 1`de yaklaşık 6.5 saat boyunca toplanmış olan sabit kayma hatası giderilmemiş ve giderilmiş dönüölçer çıktısı yer almaktadır. Bu sensör çıktısının sabit kayma hatası 0.097 drc/s olarak hesaplanmıştır.

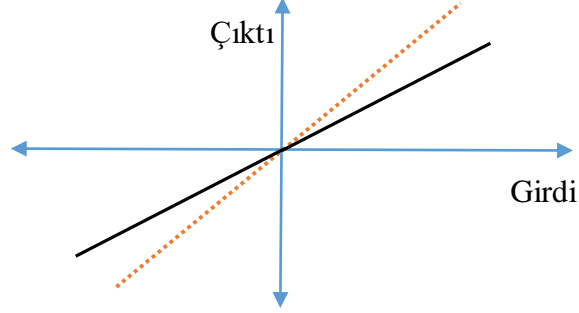


Şekil 1. Sabit kayma hatası giderilmemiş ve giderilmiş dönüölçer verisi

### 2.1.2. Orantı katsayısı hatası

Dönüölçerin çıkış ve girişi arasındaki orantı katsayısı hatası olarak tanımlanır. Orantı katsayısının faktörünün ortalama değeri 1`dir, ancak bu değer çoğu durumda 1`den farklıdır. Orantı katsayısı hatasının birimi yüzde (%) veya ppm`dir. Dönüölçer orantı

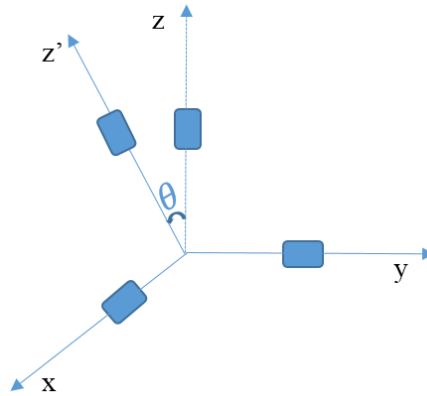
katsayısı hatasının olmasıyla pozisyon hatası da meydana gelir. Bu durum alınan ölçümü olumsuz yönde etkiler. Aşağıdaki Şekil 2'de kesikli çizgiyle gösterilen doğru ideal durumu gösterirken (eğimin 1 olduğu durum), düz çizgi ise orantı katsayısı hatasından dolayı genelde karşılaşılan durumu göstermektedir.



Şekil 2. Orantı Katsayısı Hatası

### 2.1.3. Eksen kaçıklığı hatası

Dönüölçer eksenlerinde bulunan algılayıcıların birbirlerine dik olmaması durumunda, bir eksendeki dönü hareketi diğer iki eksen üzerinde dönü bileşenleri oluşmasına neden olur. Eksen kaçıklığı olarak adlandırılan bu durum dönüölçerden okunan verinin yanlış olmasına sebebiyet verir. Dönüölçer eksen kaçıklığını saptayabilmek için iki yönlü kalibrasyon testi gerçekleştirilir. Şekil 3'de dönüölçerin 3 ekseninde bulunan algılayıcılardan z eksenindeki algılayıcı, montaj esnasında ekseni kaçık olacak şekilde monte edilmiştir. Eksen kaçıklığı hatasının birimi mrad'dır.



Şekil 3. Algılayıcılar arasındaki eksen kaçıklığı hatası

### 2.1.4. İvmeye bağlı sabit kayma hatası

MEMS dönüölçer yapısındaki katı malzemeler ve yay gibi etkenlerden dolayı doğrusal ivme bu bileşenler üzerinde ek harekete sebep olurlar. Bu ek bileşen doğrudan uygulanan ivmeyle orantılıdır. Bu ek bileşenin etkisi kalibrasyon testleriyle saptanarak, ortadan kaldırılırlar. İvmeye bağlı sabit kayma hatasının birimi  $\text{drc/s/g}$  ile gösterilmektedir.

## 2.2. Stokastik hatalar

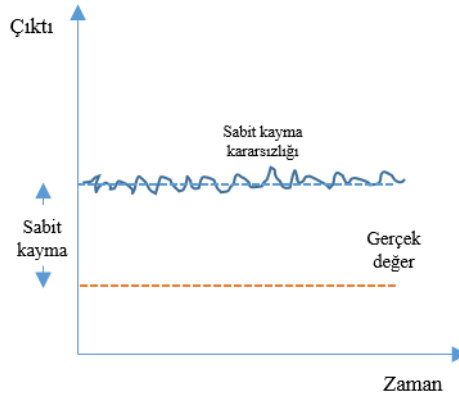
Ataletsel sensör verileri barındırdığı elektriksel devreler ve arayüzler nedeniyle rastgele dağılım özelliğine sahiptir. Bu olasılıksal hatalar dönüölçer sabit kayma kararsızlığı, açısal rastgele yürüyüş ve oransal rastgele yürüyüş olarak sınıflandırılabilirler[6]. Zamana bağlı değişken olan bu hatalar (2)'deki gibi matematiksel ifadeyle belirtilebilir.

$$n(t) = B(t) + N(t) + K(t) \quad (2)$$

Burada  $B(t)$  sabit kayma kararsızlığını,  $N(t)$  açısal rastgele yürüyüşü ve  $K(t)$  açısal hız rastgele yürüyüşü ifade etmektedir.

### 2.2.1. Dönüölçer sabit kayma kararsızlığı

Sabit kayma kararsızlığını düşük frekanslı gürültü olarak değerlendirmek mümkündür. Bu gürültü sabit kayma hatasının üzerine binmiş kararsız bir sinyali ifade etmektedir. Bu hatanın Güç Tayf Yoğunluğu(GTF) frekansın tersiyle ( $1/f$ ) orantılı olduğundan,  $1/f$  gürültüsü olarak da adlandırılır[7].



Şekil 4. Sabit kayma kararsızlığının dönüölçer çıktısına etkisi

### 2.2.2. Açısal rastgele yürüyüş

MEMS dönüölçer çıktısı termo -mekanik bozuculardan etkilenir ve bu bozucuların ilinti zamanı sensörün örnekleme periyodundan daha küçüktür. Rastgele yürüyüş “beyaz gürültü” karakteristiğine sahiptir. Bu sebeple ilintisiz gürültü olarak değerlendirilirler. Bu hata tipi bütün MEMS dönüölçer tiplerinde hata kısmının büyük bir bölümünü oluşturur.

### 2.2.3. Oransal rastgele yürüyüş

Oransal rastgele yürüyüş hatası diğer hata bileşenlerine göre yüksek grup zamanlarında gözlemlenen bir hata türüdür. Bu sebeple eğer dönüölçer kısa süreli periyotlarda kullanılıyorsa bu hata bileşeni gözlemlenmeyebilir.

## 3. STOKASTİK HATA PARAMETRELERİNİN KESTİRİMİ

Stokastik hatalar ölçümlerde pozisyon ve hız hatalarına sebep olurlar. Bu hatalar modellenemesine rağmen, doğru hata modeli oluşturmak sıklıkla karşılaşılan bir zorluktur. Model parametresi gerçek değere yakınsanamazsa, mevcut çıktılardan çok uzak noktalarda kalınabilir.

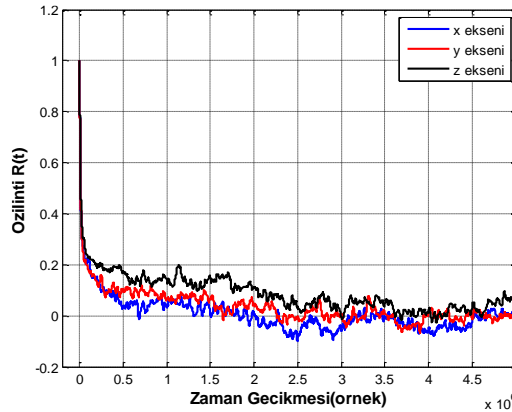
Özilinti, Güç tayf yoğunluğu (GTY) ve Allan varyans metodu olasılıksal hataların kestiriminde kullanılan önemli yöntemlerdendir.

### 3.1. Özilinti metodu

Özilinti metodu sensörlerin zaman sabitinin belirlenmesi için kullanılır. Sabit kayma kararsızlığı sensor zaman sabitinden itibaren sensor verisiyle ilintili olmaya başlar. Aşağıdaki (3) nolu denklemde özilinti fonksiyonunun hesaplanması için gereken formül ifade edilmiştir.

$$R(\tau) = E[w_o(t) * w_o(t + \tau)] \quad (3)$$

Bu ifadede  $R(\tau)$  x eksenindeki verinin özilinti fonksiyonuna,  $\tau$  zaman kaymasına ve  $E[*]$  beklenen değere karşılık gelmektedir. Sabit kayma kararsızlığı, zaman kayması sonsuza gittikçe özilinti fonksiyonu sıfıra yakınsadığından, ilintili gürültü olarak modellenabilir. Bu sebeple sabit kayma kararsızlığının modeli için zaman sabitinin düzgün hesaplanması çok önemlidir. Fakat dönüölçer çıktısı ilişkisiz gürültü(beyaz gürültü) de içermektedir. Bu gürültü sensörün zaman sabitinin hesaplanmasını zorlaştırır. Özilinti analizi yapılmadan önce ilişkisiz gürültü hatalarının alçak geçiren filtresiyle giderilmesi gerekmektedir



Şekil 5. Dönüölçerin üç eksenindeki tek taraflı özilinti fonksiyonu

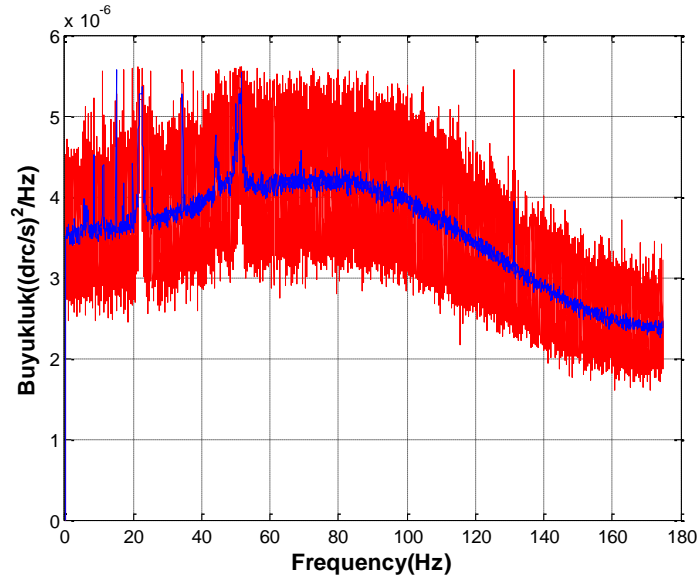
Şekil 5`de 3 eksen sensör çıktıları köşe frekansı 0.2 Hz olan alçak geçiren filtreden geçirildikten sonra özillinti fonksiyonları elde edilmiştir. Her eksene ait zaman sabitini bulabilmek için özillinti ekseninde 0.37`ye karşılık gelen örnek eksenindeki değer 1000`e bölünmelidir. Her bir örnek 1 milisaniyede bir alındığından bu bölüm işlevi gerçekleştirilmelidir.

### 3.2. Güç tayf yoğunluğu fonksiyonu

Güç tayf yoğunluğu(GTY) dönüölçer gürültü terimlerini açıklamak için kullanılabilecek diğer bir yöntemdir. İlintisiz gürültüler(beyaz gürültü) yüksek frekanslı bileşenler içerirken ilintili gürültüler düşük frekanslı bileşenler içerirler. GTY zaman bileşeninin frekans içerikleri hakkında bilgi verir, buradaki güç terimi verideki gürültü miktarını ifade etmektedir.

$$S(w) = F[R(\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau)e^{-jw\tau} dt \quad (4)$$

Denklem 4`de  $S(w)$  güç tayf yoğunluğunu ve  $F[*]$  fourier dönüşümünü ifade etmektedir. Şekil 6`da dönüölçerin x ekseninin güç tayf yoğunluğu verilmiştir. Açısız rastgele yürüyüş hatası frekans bölgesinde sabit bir değere sabittir. Bunun sonucunda açısız rastgele yürüyüş hatasının güç tayf yoğunluğu fonksiyonu  $N$  gibi bir sabitinin karesi olarak ( $N^2$ ) olarak ifade edilir. Şekil 6`ya göre  $N^2 \cong 3.57 * 10^{-6} \rightarrow N \cong 18.9 * 10^{-4}$  drc/ $\sqrt{s}$ . Bu bilgiye ek Şekil 6`daki güç tayf yoğunluğu fonksiyonundan sensörün bant genişliği 140 Hz olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6. Dönüölçerin x ekseninin güç tayf yoğunluğu

### 3.3. Allan varyans metodu

Bu metot toplanan dönüölçer verilerini farklı kümelerle ayırır ve bu farklı kümeler içinde de farklı sayıda veri mevcuttur. Her kümedeki bu verilerin ortalaması alınır ve bu ortalamaların ardışık farklarının etkin değeri (RMS) alınır. Her kümedeki verilerin ortalamasına  $\omega(i)$  dersek, denklem (5)'deki gibi bir ifadeyle allan deviasyonu hesaplanabilir.

$$\sigma(\tau) = \left[ \frac{1}{2L} \sum_{i=0}^{L-1} (\omega(i+1) - \omega(i))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Allan varyansı ile GTY arasında doğrudan bir ilişki kurmak mümkündür. GTY denklem (6)'daki gibi transfer fonksiyonu  $\frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2}$  olan filtreden geçirildikten sonra allan varyans denklemine yerleştirilir[8].

$$\sigma^2(\tau) = 4 \int_0^{\infty} S(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df \quad (6)$$

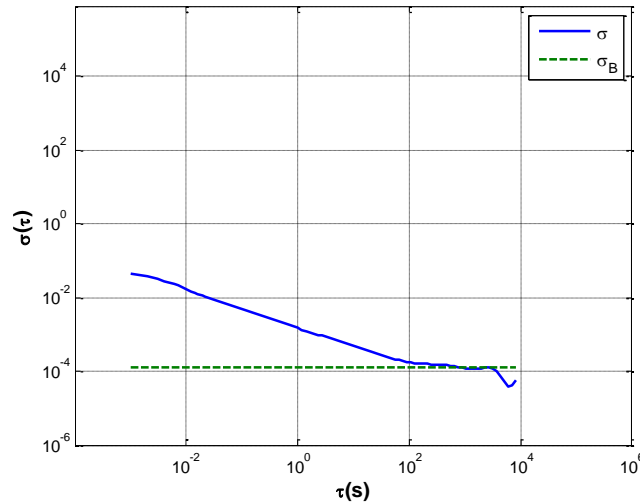
#### 3.3.1. Sabit kayma kararsızlığı parametresi

Düşük frekanslı hata terimi olan sabit kayma kararsızlığını bulabilmek için denklem (6)'daki GTY bileşeninin değeri yerine yazılmalıdır. Denklem (7)'deki  $f_c$  sabit kayma kararsızlığının MEMS dönüölçer çıktısındaki etkisinin gözlemlenmemeye başladığı frekansı ifade etmektedir.

Denklem (7)'nin denklem (6)'da yerine koyulması ve düzenlenmesiyle denklem (8) elde edilmiştir.

$$S(f) = \frac{B^2}{2\pi f}, f < f_c \quad (7)$$

$$\sigma(\tau) = 0.664B \quad (8)$$



Şekil 7. Allan deviasyon eğrisi ve sabit kayma kararsızlığı



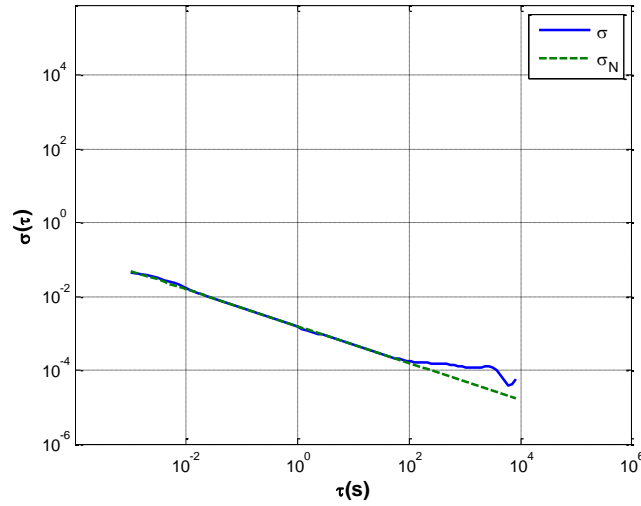
X eksenindeki dönüölçer verisinin loglog Allan deviasyon grafiği Şekil 7`de verilmiştir. Bu grafiğin eğiminin 0`a eşit olduğu yer sabit kayma kararsızlığına karşılık gelmektedir.

### 3.3.2. Açısal rastgele yürüyüş parametresi

Açısal rastgele yürüyüş hatasının güç tayf yoğunluğu frekans bölgesinde sabit bir değere karşılık gelmektedir. Denklem (9)`da bu parametrenin GTY değeri verilmiştir. Denklem (9)`daki ifade denklem (6)`ya yerleştirilir ve düzenlenirse denklem (10)`daki ifade elde edilir.

$$S(f) = N^2 \quad (9)$$

$$\sigma(\tau) = \frac{N}{\sqrt{\tau}} \quad (10)$$



Şekil 8. Allan deviasyon eğrisi ve açısal rastgele yürüyüş

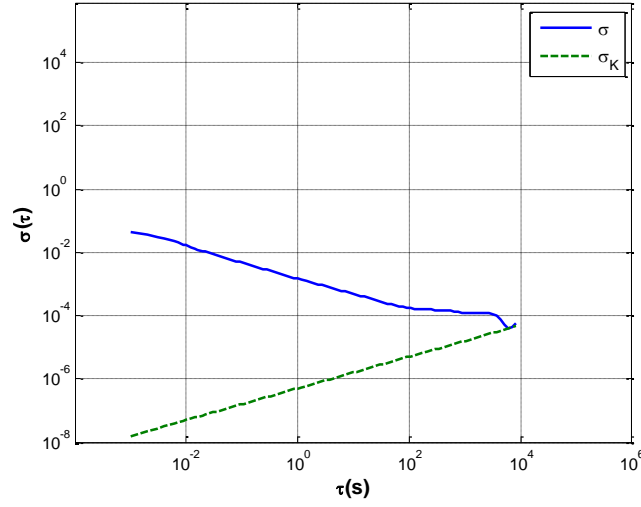
X eksenindeki dönüölçer verisinin loglog Allan deviasyon grafiği Şekil 8`de verilmiştir. Bu grafiğin eğiminin -0.5`e eşit olduğu bölgede (kesikli çizgi) açısal rastgele yürüyüş hatası baskın olarak gözlemlenmektedir.

### 3.3.3. Oransal rastgele yürüyüş parametresi

Yüksek grup zamanlarında meydana gelen oransal rastgele yürüyüş hatası, uygulama zamanı kısa olan dönüölçerler verilerinde gözlemlenmeyebilir. Denklem (11)`de bu parametrenin GTY değeri verilmiştir. Denklem (11)`deki ifade denklem (6)`ya yerleştirildiğinde denklem (12)`deki ifade elde edilir.

$$S(f) = \frac{K^2}{(2\pi f)^2} \quad (11)$$

$$\sigma(\tau) = K \frac{\sqrt{\tau}}{3} \quad (12)$$



**Şekil 9.** Allan deviasyon eğrisi ve oransal rastgele yürüyüş

X eksenindeki dönüşler verisinin loglog Allan deviasyon grafiği Şekil 9`da verilmiştir. Bu grafiğin eğiminin +0.5`e eşit olduğu bölgede oransal rastgele yürüyüş hatası baskın olarak gözlemlenmektedir.

Tablo 1`de dönüşlerin farklı eksenlerdeki kestirilen hata parametreleri verilmiştir. Buna göre X, Y ve Z eksenlerinde, birim saniyede açısal rastgele yürüyüş parametresi en büyük değeri gösterirken, en düşük değerler oransal rastgele yürüyüş parametresinde elde edilmiştir.

**Tablo 1.** 3 eksen dönüşler hata parametreleri

Dönüşler	X eksen	Y eksen	Z eksen
Sabit kayma kararsızlığı parametresi(drc/s)	$1.8 \cdot 10^{-4}$	$1.7 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$
Açısal rastgele yürüyüş parametresi(drc/ $\sqrt{s}$ )	$15.6 \cdot 10^{-4}$	$17 \cdot 10^{-4}$	$15.6 \cdot 10^{-4}$
Oransal rastgele yürüyüş parametresi(drc/s $\sqrt{s}$ )	$8.7 \cdot 10^{-7}$	$19.6 \cdot 10^{-7}$	$35.6 \cdot 10^{-7}$

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada MEMS dönüşlerden toplanmış olan verinin stokastik hata parametreleri kestirilmiştir. Bu hata parametreleri kestirilirken özilinti fonksiyonu, güç tayf yoğunluğu fonksiyonu ve allan varyans metodu kullanılmıştır. Kestirilen bu hata parametreleri dönüşler modeli oluşturulmasında kullanılmıştır.

## 5. TEŞEKKÜR

Yazarlar, değerli katkılarından dolayı Alper Gül'e teşekkürlerini sunar.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] D. W. Allan (1966), Statistics of atomic frequency standards, Proceeding of the IEEE, 221–230.
- [2] D. W. Allan and J. A. Barnes (1981), A modified Allan Variance with increased oscillator characterization ability, in Proc. 35th Ann. Freq. Control Symposium, 470–475.
- [3] IEEE standard specification format guide and test procedure for single-axis interferometric fiber optics gyros, IEE Std 952, 1997.
- [4] P. Aggarwal et. Al.( 2007), A Standard Testing and Calibration Procedure for Low Cost MEMS Inertial Sensors and Units, Journal of Navigation 323-336.
- [5] D.Ünsal (2012), Estimation of Deterministic and Stochastic IMU Error Parameters, M.Sc. Thesis, Electrical Electronics Eng. Dept., METU.
- [6] J.O. Woodman (2007), An Introduction to Inertial Navigation, Technical Report University of Cambridge.
- [7] J.Skaloud, A.M. Bruton, K.P. Schwarz (1999), Detection and Filtering of Short Term (1/f) Noise in Inertial Sensor, Journal of the Institute of the Navigation, 97-108.
- [8] H. Hou (2004), Modeling Inertial Sensors Errors Using and Analyzing the Effect of their Errors in Navigation Application, M.Sc. Thesis, The Graduate Faculty of Auburn University.

## SABİT KANAT BİR HAVA ARACININ YAKIT YÖNETİM SİSTEMİ BENZETİM MODELİ

Yunus Suat <sup>(a)</sup>, Onur Özdemir <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Türk Havacılık Uzay Sanayii, Fethiye Mahallesi, Havacılık Bulvarı No:17,  
Kahramankazan Ankara, {yunus.suat,onur.ozdemir2}@tai.com.tr

### ÖZ

Bir hava aracında yakıt sistemi fonksiyonlarının bir kısmı yakıt yönetim sistemi tarafından gerçekleştirilmektedir. Uçaklarda birden fazla yakıt tankı mevcuttur. Yakıt dolun ve boşaltım işlemleri ve tanklar arasındaki yakıt transferi yakıt yönetim sisteminin kontrolünde gerçekleşen fonksiyonlardır. Yakıt dolunu esnasında ağırlık merkezi kontrolünün sağlanması, tanklardaki yakıtın istenilen seviyeye geldiğinde dolun veya boşaltım işleminin durdurulması yakıt yönetim sistemiyle sağlanmaktadır. Motor çalışırken, yerde ve uçuş esnasında tanklar arasında yakıt transferi gerçekleşir. Bu esnada uçağın ağırlık merkezinin çok fazla yer değiştirmemesi için tankların belirli bir sıralamaya göre tüketilmesi ve tanklar arasında doğabilecek yakıt miktarı dengesizliğinin kısa sürede bertaraf edilmesi gerekmektedir. Bütün bu fonksiyonlar sistemde bulunan birtakım ekipmanın kontrolü ile gerçekleşmektedir. Genel olarak uçuş sırasında pilota düşen iş yükünün en aza indirilmesi ve pilotu yanıltıcı ve rahatsız edici hataların önüne geçilmesi için yakıt sistemi altında gerçekleşen bir takım operasyonun belirli bir yönetim sistemi dahilinde otomatik olarak yapılması gerekmektedir. Bu çalışma bir hava aracının yakıt yönetim sistemi benzetim modelini sunmaktadır. Bu model uçaktaki tanklara yakıt dolunu ve tanklar arası yakıt transferi fonksiyonlarını içermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Hava aracı yakıt sistemi, yakıt tankları, yakıt sistemi ekipmanları, yakıt yönetim sistemi, modelleme ve benzetme.

## FUEL MANAGEMENT SYSTEM SIMULATION MODEL OF A FIXED WING AIRCRAFT

### ABSTRACT

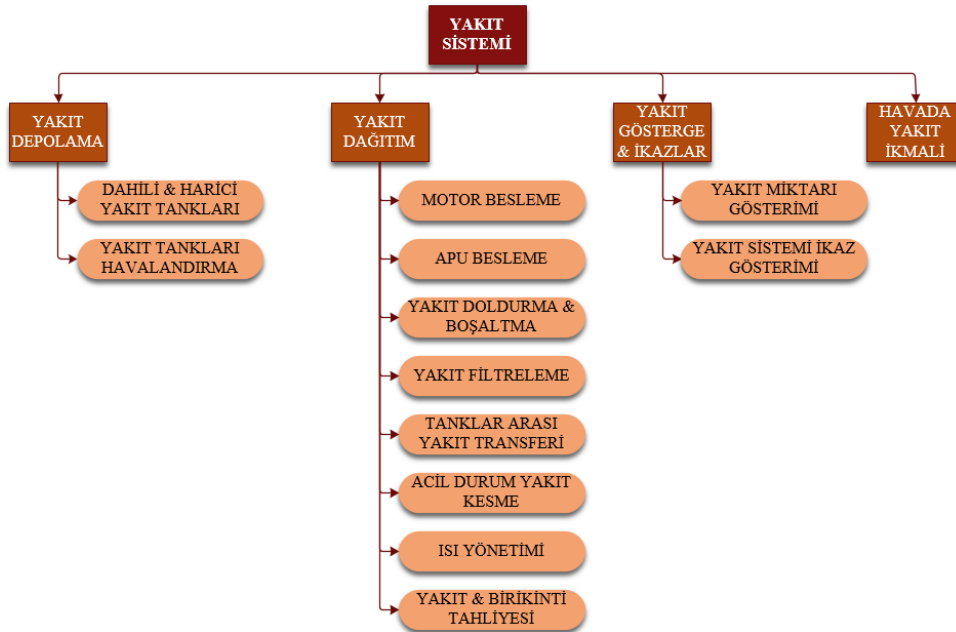
Some of fuel system functions in an air vehicle are accomplished by fuel management system. There are several fuel tanks in aircrafts. Refueling, defueling and fuel transfer between the tanks are the functions that fuel management system handles. Center of gravity control during refueling and termination of refueling or defueling at a

pre-determined fuel level are provided by the fuel management system. Fuel transfer between the tanks is accomplished while engine is running. In this case, fuel shall be consumed with a specified fuel burn sequence and a possible fuel imbalance between the tanks shall be eliminated in a short time to maintain allowable center of gravity limits of the aircraft. All these functions are performed by the several equipment which is controlled by the fuel management system. Generally, some of the fuel system operations in the aircraft shall be automatically done by the fuel management system to minimize workload of the pilot and to prevent confusing and disturbing faults. This paper presents fuel management system simulation model of an air vehicle. This model includes selective refueling and fuel transfer between the tanks.

**Keywords:** Aircraft fuel system, fuel tanks, fuel system equipment, fuel management system, modelling and simulation.

## 1. GİRİŞ

Hava araçlarında yakıt sisteminin temel amacı motora her koşulda kesintisiz yakıt sağlamaktır. Bu görevin yanı sıra yardımcı güç ünitesinin beslenmesi, elektronik motor beyninin soğutulması ve hidrolik sistem gibi bazı sistemlerin soğutulması gibi farklı görevleri de vardır. Günümüzde yakıt sistemi bu görevlerin dışında uçağın boylamsal ve yanal eksenlerdeki denge ve kararlılığının sağlanabilmesinde kilit rol oynamaktadır. Bu doğrultuda özellikle yolcu uçaklarında uçak ağırlık merkezinin kabul edilen limitler arasında kalması için yakıt uçağın bazı bölgelerinde bulunan tanklara transfer edilir [5].



Şekil 1. Yakıt sistemi fonksiyon ağacı

Büyük yolcu uçaklarında uçağın kalkışından bir süre sonra kanat tanklarındaki yakıtın bir kısmı boş durumdaki kuyrukta bulunan tanklara transfer edilir ve bu yakıt tüketilmeden uçakta kalır. Yakıt sistemi temelde 4 farklı alt sistemden oluşmaktadır ve her bir alt sistemin icra ettiği farklı fonksiyonlar bulunmaktadır. Yakıt sistemini oluşturan alt sistemler ve fonksiyonları Şekil 1’de gösterilmiştir. Çoğu platformda yakıt kontrol bilgisayarı olarak adlandırılan spesifik bir birimde kodlanmış olan yakıt yönetim sistemi uçak yakıt sisteminin normal ve anormal bütün koşullarının takip ve kontrolünden sorumludur [4]. Genel olarak yakıt yönetim sistemi yakıt dağıtım, yakıt gösterge ve ikazlar ve havada yakıt ikmali alt sistemlerinin bazı fonksiyonlarını yerine getirmektedir. Bu çalışmada yakıt dağıtım alt sisteminde bulunan yakıt doldurma ve tanklar arası yakıt transferi fonksiyonlarının modelleme ve benzetim çalışmaları yürütülmüştür.

## 2. YAKIT DAĞITIM SİSTEMİ

Yakıt sisteminin icra ettiği çoğu fonksiyon yakıt dağıtım alt sistemine dahil edilmiştir. Yakıtın bir yerden başka bir yere taşınması yakıt dağıtım alt sisteminde bulunan ekipmanlarla sağlanmaktadır. Ayrıca yakıtta meydana gelen sıcaklık ve basınç değişimlerinin en fazla görüldüğü alt sistemdir. Eğer başka bir sistemin ısı yükü yakıtla alınmıyorsa uçağın operasyonu süresince yakıt sıcaklığı çok fazla değişim göstermemektedir. Yakıt sistemi kapsamında tanklarda ve borularda meydana gelecek basınç değişimleri tasarımı etkileyen önemli bir parametredir. Sistemde önem teşkil eden bir diğer parametrede yakıt debisidir. Gerek tankların doldurulması gerekse de yakıt transferi esnasında borulardaki akış hızı havacılık standartlarında belirtilen limitleri geçmemelidir. Yakıt sağlama ve uçak yakıt sistemleri borulardaki elektrostatik yüklenmeleri mümkün olduğunca azaltacak şekilde tasarlanmalıdır. Borulardaki hızlar 7 m/s’den tank içinde boru çıkışlarındaki hızlar ise 1 m/s’den az olmalıdır [1]. Sisteme yerleştirilen boruların boyutlandırılması yapılırken buna benzer gereksinimler göz önünde bulundurulmaktadır. Silindirik borulardaki akış hızı aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır.

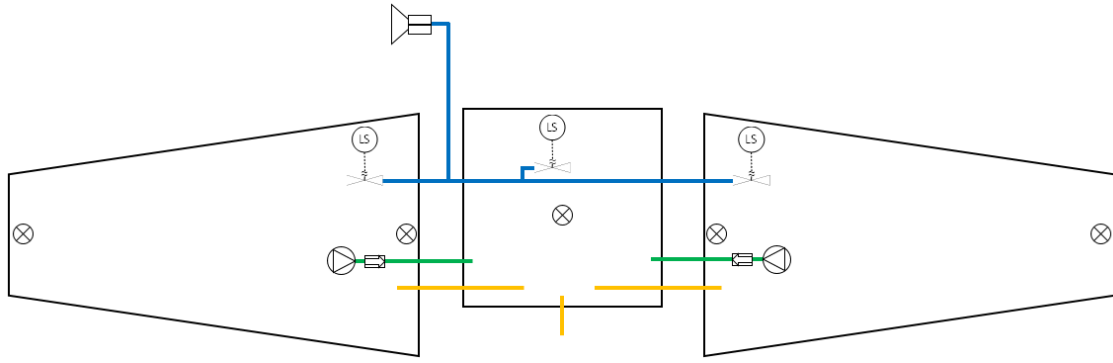
$$V = 4Q/\pi D^2 \quad (1)$$








V: boru kesitinden geçen akışkan hızı,

Q: boru kesitinden birim zamanda geçen akışkan hacmi

D: borunun çapı

Bir uçak sistemi tasarımının en önemli adımlarından bir tanesi sistem mimarisinin oluşturulmasıdır. Bu çalışmada tanklara yakıt doldurulması, tanklar arası yakıt transferi ve yakıt miktarı bilgileri olmak üzere 3 ana fonksiyon üzerinde durulacağından Şekil 2’deki mimaride sadece bu üç fonksiyona ait ekipmanlar sembollerle gösterilmiştir.

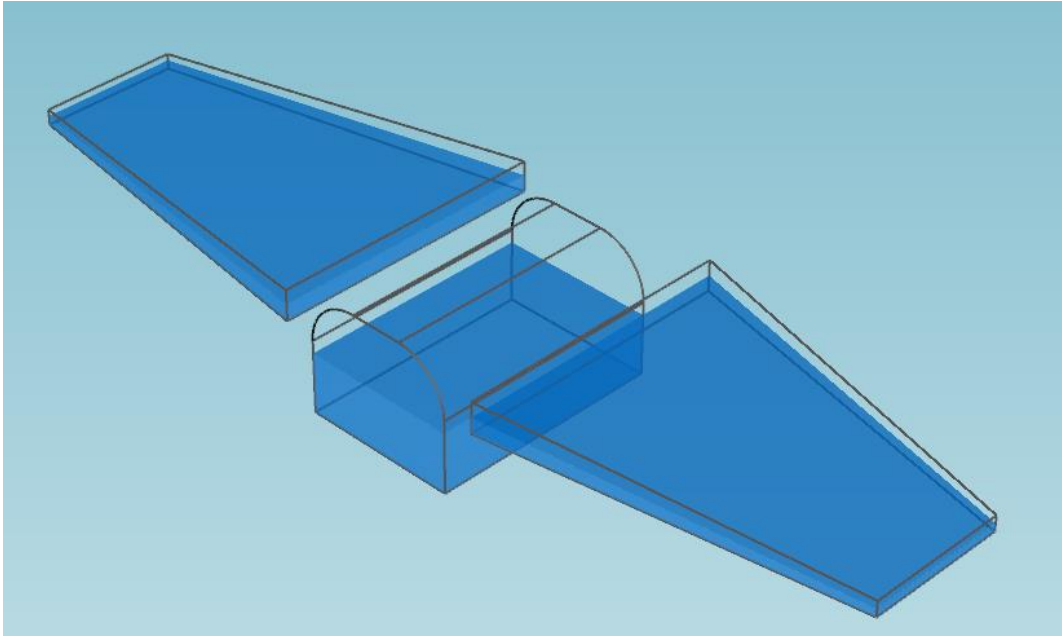


Not.  = dolun durdurma vanası.  = doldurma kapağı.  = transfer pompası.  = seviye çubuğu.  = doldurma hattı.  = transfer hattı.  = havalandırma hattı

**Şekil 2.** Modele ait sistem mimarisi

### 2.1. Yakıt doldurma

Yakıt doldurma işlemleri tankların üzerinde bulunan doldurma noktalarından yer çekimi vasıtasıyla yapılabilmesine rağmen günümüz askeri jet uçaklarında ve ticari yolcu uçaklarında basınçlı dolun yöntemi tercih edilmektedir.



**Şekil 3.** Model tankların doldurulması

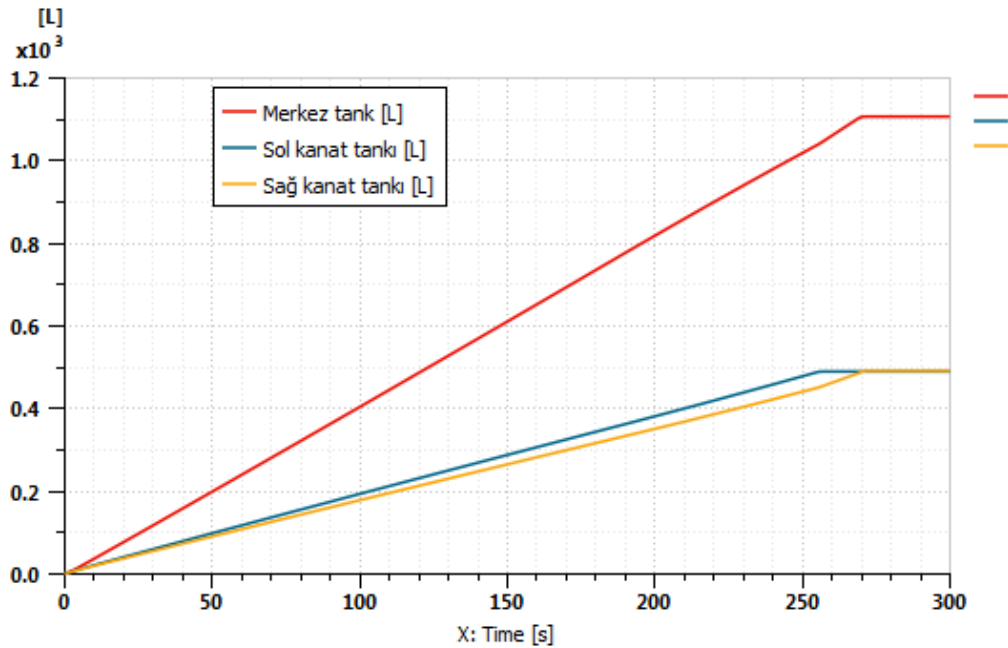
Basınçlı dolun yöntemi uçaktaki tank sayısının fazla olması ve tankların bir birine göre konumlarının farklılık göstermesi durumlarında dolun işlemleri kolaylaştırmaktadır. Bu çalışmada kullanılan model tankların dolunu esnasından bir görünüm Şekil 3'te verilmiştir. Basınçlı dolun yöntemi sayesinde tanklar daha kısa sürede eş zamanlı

doldurulabilmektedir. Basınçlı dolum sisteminin sağlayacağı maksimum basınç 3.79 bar (55 psi) olmalıdır [1]. Dolum işlemi tankların üst kısmına yakın konumlandırılmış seviye sensörlerinin ürettiği sinyalle durdurulmaktadır. Tankların kapasiteleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Tankların kapasiteleri

Tank ismi	Kapasite [Litre]
Merkez tank	1130
Sol kanat tankı	504
Sağ kanat tankı	504

Havacılık standartlarında, dolum işleminin tankın üstünde kapasitenin minimum %2’si kadar bir boşluk kalacak şekilde yapılması gerektiği belirtilmektedir. Bu sebepten dolayı yüksek yakıt seviye sensörleri tankların en üstüne değil de bu kapasiteyi sağlayacak bir konuma yerleştirilmektedirler.



**Şekil 4.** Tankların zamana göre dolumu

Basınçlı dolum yönteminde, tankların toplam hacmi uçak yakıtı ağırlık biriminden 10000 poundun altında olan platformların maksimum 5 dakikada doldurulması gerekmektedir [2]. Tankların zamana göre dolum eğrileri Şekil 4’te gösterilmiştir.



Burada sağ ve sol kanat tanklarının farklı zamanlarda dolmasının sebebi Şekil 2'deki mimariden de anlaşılacağı üzere basınçlı dolun noktasının sağ kanat tankına daha uzakta olmasıdır. Borularda sürtünmeden dolayı yük kayıpları olmaktadır. Sağ kanat tankına giden doldurma hattı sol kanat tankına giden hattan daha uzun olduğu için bu hattaki direnç daha büyük olacak ve buna bağlı olarak ta bu hattaki akış debisi daha az olacaktır. Tam gelişmiş iç akışların tüm türleri için borulardaki direnç denklemi ve yük kaybı denklemi sırasıyla aşağıda verilmiştir.

$$R = \frac{8L}{\pi^2 D^5 g} f \quad (2)$$

$$\Delta H = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (3)$$

R: boruda sürtünmeden dolayı meydana gelen direnç

L: borunun uzunluğu

D: borunun çapı

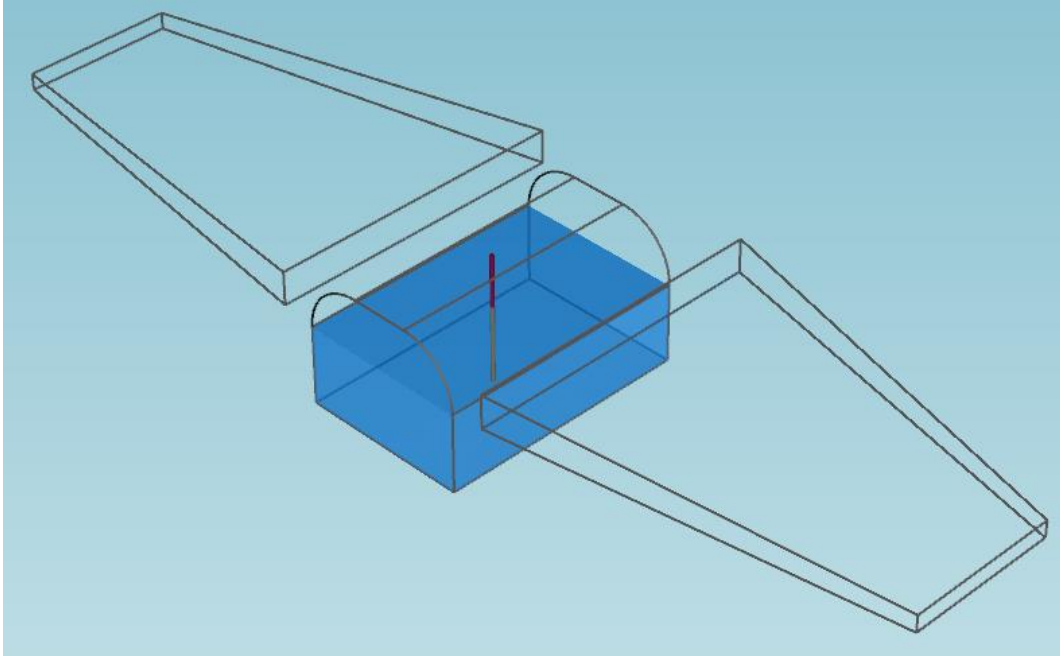
g: yerçekimi ivmesi

f: sürtünme katsayısı

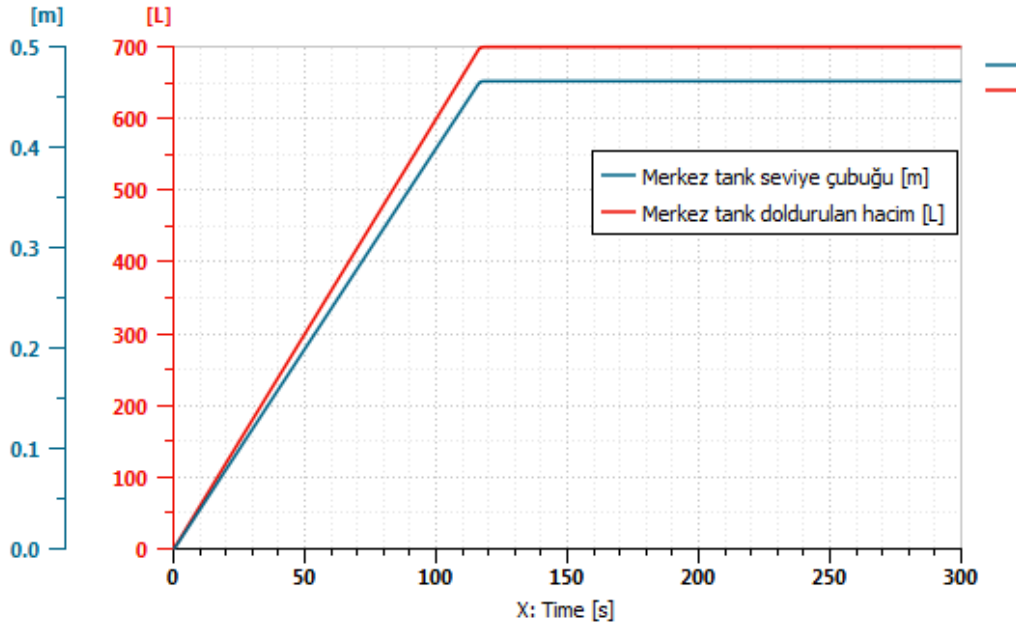
$\Delta H$ : borudaki yük kaybı

Fakat bazen görev gereği tankların tamamının doldurulmasına ihtiyaç olmamaktadır. Bu durumda dolunun istenilen seviyede durdurulabilmesi için yakıt yönetim sistemi devreye girmektedir. Sistem tankların içine konumlandırılmış seviye çubuklarından aldığı sinyal sayesinde dolun vanalarını kapatarak dolun işlemini durdurmaktadır. Bazı test uçuşları gibi kısa süreli uçuşlar için uçağa dolun yapmadan önce görev için ne kadar yakıt ihtiyacı olduğu hesaplanır. Hesaplanan miktar uçak bilgisayarına işlenir ve bilgisayar da bu miktarın seviye çubuğunda hangi konuma geleceğini hesaplar. Yakıt o seviyeye gelince bilgisayar dolun durdurma vanalarına gönderdiği kapatma sinyali ile dolun işlemini sonlandırır.

Bu çalışmada 700 litre yakıtın yeterli olduğu bir görev profili ele alınmıştır. Yakıt yönetim sistemi tanklarda 700 litrelik yakıt sağlandığında dolunu durduracaktır. Tanklardaki yakıtın tüketim sıralaması önce kanat tankları sonra merkez tank şeklindedir. Bu sebeple sistem 700 litrelik yakıtı sığıdığı için sadece merkez tanka dolduracaktır. Bu senaryoda doldurulan tank modellerine ait bir görsel Şekil 5'te verilmiştir. Merkez tank seviye çubuğunda okunan değer ise yaklaşık 0.463 m'dir. Merkez tankın zamana göre dolun eğrisi ve bu tanka ait seviye çubuğundan okunan yakıt serbest yüzeyinin seviyesi Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 5. 700 litre doldurulan tankların görünümü

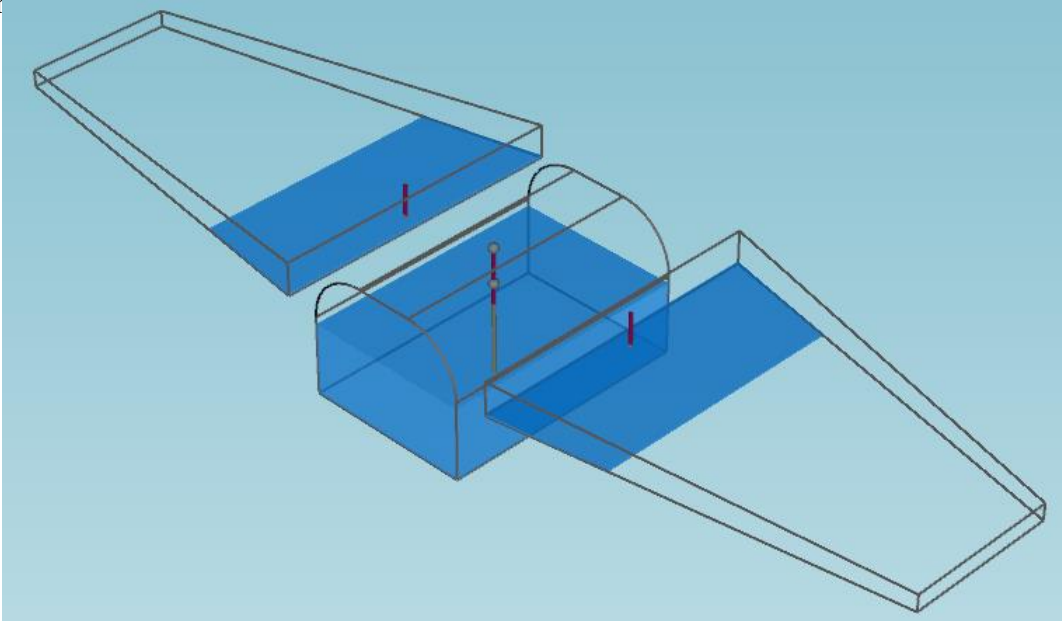


Şekil 6. Merkez tank dolum eğrisi ve seviye çubuğundan okunan yakıt konumu

## 2.2. Tanklar arasında yakıt transferi

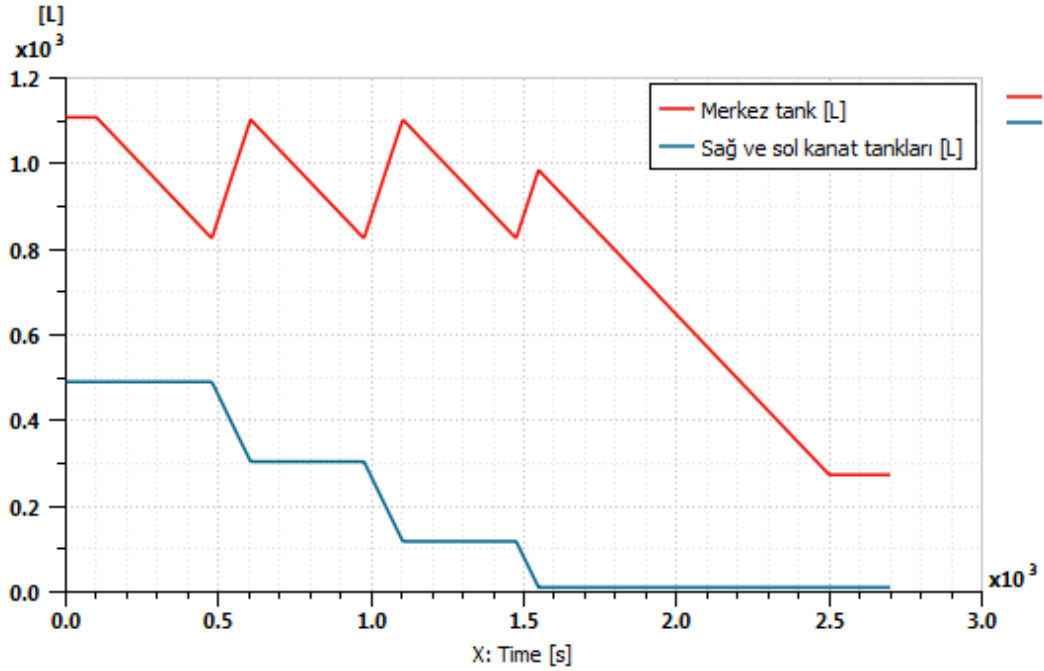
Hemen hemen bütün uçaklar birden fazla yakıt tankına sahiptir ve uçuş süresince tanklar arasında yakıt transferi devam etmektedir. Yakıt transferi uçakta bulunan vanalarla kontrol edilir ve yakıtta alternatif transfer yolları takip ettirilir [4]. Yakıtı depolamak için

birçok tankın bulunduğu platformlarda yakıtın her tanktan bir sıraya göre tüketilmesini garanti eden programa yakıt transfer sistemi denir. Tanklar arasındaki bu sıralama yakıt tüketiminden kaynaklanan ağırlık merkezindeki değişim, kanatlara düşen yapısal yüklerin hafifletilmesi ve motor besleme tanklarının uçuş boyunca tam dolu olmasının sağlanması gibi faktörler göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. Yakıt transfer sisteminin kontrolü ya direkt olarak mürettebatta ya da yakıt yönetim sisteminde olur [3]. Yakıt sistemi transfer pompalarının kontrolünü alarak tüm yakıtın motor besleme tankına transferini sağlamalıdır. Yakıt yönetim sistemi uçak ağırlık merkezinin güvenli operasyon limitlerini geçmesine izin vermemelidir [2]. Bu çalışmada merkez tanka yerleştirilen iki sensör sayesinde tanklar arasında yakıt transferi komutu sağlanabilmektedir. Merkez tanktaki yakıt seviyesi düşük seviye sensörüne ulaştığında tanklar arasındaki pompalar devreye girer ve transfer başlar. Merkez tanktaki yakıt seviyesi yüksek seviye sensörüne ulaştığında ise transfer pompaları devre dışı kalır ve transfer durdurulur. Bu sıralı işlem kanat tanklarındaki yakıt tükenene kadar devam eder. Kanat tanklarındaki yakıt bittiğinde bu tanklara ait seviye çubuğunda okunan düşük yakıt seviyesi değerine istinaden pompalar devre dışı bırakılır. Bu işlemler esnasında bir görüntü Şekil 7’de görülmektedir.



**Şekil 7.** Yakıt yönetim sistemi kontrolüyle tüketilen tanklardan bir görünüm

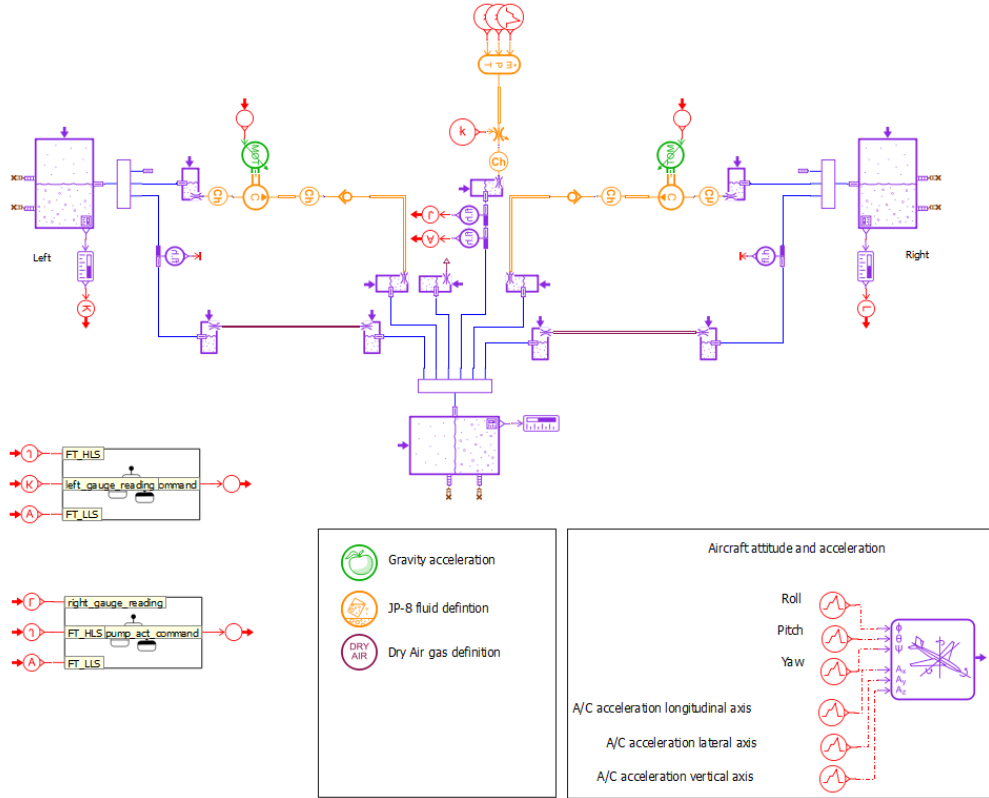
Bu çalışmada 45 dakikalık bir görev uçuşu için havalanan uçaktaki yakıtın tüketilmesi Şekil 8’de verilen yakıt tüketim eğrileri gibi olacaktır. Kanat tankları tamamen tüketilene kadar gövde tankı düşük seviye sensör konumuna kadar 2 kez azalıp tekrar dolmuştur. 3. adımda ise kanat tanklarındaki yakıt tamamen bittiği için merkez tanktaki yakıt sensör hizasından bir miktar yükselebilmiş ve tekrar düşüşe geçmiştir. Uçuş süresince uçağın aynı koşullarda uçtuğu ve motorun aynı güçte çalıştığı varsayılmıştır. Transfer pompaları emiş tarafının konumundan dolayı tüm yakıtı çekemeyip tank dibinde bir miktar kullanılmayan yakıt bırakırlar.



**Şekil 8.** Tanklardaki yakıt miktarının zamanla değişimi

Yakıt transfer sistemi benzetim modeli Şekil 9’da verilen görseldeki gibidir. Modelde yakıt seviye çubukları, pompalar, sensörler, valfler, yakıt transfer ve havalandırma hatları tankların uçaktaki konumuna göre yerleştirilmiştir.

Üstten kanatlı muharebe uçaklarında yakıt tüketimi merkezde bulunan tanktan gerçekleşirken kanat tanklarındaki yakıt pompa kullanmadan yerçekimi vasıtasıyla merkez tanka transfer olmaktadır. Bu tip uçaklarda kanat tanklarında bulunan transfer pompaları uçağın yaptığı manevralar sonucunda yakıt dengesizliği oluştuğunda kanat tankları arasındaki yakıt dengesini sağlamak için devreye girerler. Bu çalışmada bahsedilen uçak gibi alttan kanatlı platformlarda uçak gövdesinde bulunan merkez tank kanat tanklarından daha yukarıda olacağından dolayı yakıt transferi ancak ve ancak transfer pompaları vasıtasıyla sağlanmalıdır. Kanat tanklarındaki yakıtın önce biteceği göz önünde bulundurulursa bu modelde sunulan transfer sıralaması gibi bir çözüm uygulanabilir.



**Şekil 9.** Yakıt transfer sistemi benzetim modeli

### 3. SONUÇ

Hava araçlarında yakıt sisteminin temel amacı motora her koşulda kesintisiz yakıt sağlamaktır. Savaş uçağı gibi bazı uçaklarda bir takım sistem ve ekipmanların ısıl yükü de yakıtta atılmaktadır. Yakıt sisteminin yakıt dolmu ve boşaltımı, tanklar arasında yakıt transferi, tankların havalandırılması, yakıt miktarının ölçülmesi ve havadan havaya yakıt ikmal gibi birçok fonksiyonu ve bu fonksiyonları icra eden pompaları, valfleri, sensörleri vb. gibi birçok ekipmanı bulunmaktadır. Yakıt sisteminin bir alt sistemi olan yakıt yönetim sistemi ise bu fonksiyonların çoğunda otomatik olarak devreye girmektedir. Bu alt sistem sayesinde pilotun elle vereceğı çoğu komut sensör gibi bazı ekipmanlarla algılanıp gerekli operasyon tam zamanında ve pilota bir iş yükü bırakmadan yerine getirilmektedir. Bu çalışmada yakıt dağıtım alt sisteminde bulunan yakıt doldurma ve tanklar arası yakıt transferi fonksiyonlarının modelleme ve benzetim çalışmaları yürütülmüştür.

#### 4. TEŞEKKÜR

Havacılık sektöründe çok önemli projeleriyle ülkemizi gururlandıran Türk Havacılık Uzak Sanayii'ne AR-GE çalışmalarına teşvik vererek çalışanlarına kazandırdığı know-how sayesinde bu çalışmada olduğu gibi bildiri ve makale yayınlamak için bizlere uygun zemin hazırladığından dolayı şükranlarımı sunarım.

#### 5. KAYNAKÇA

- [1] Aerospace Standards. (2018), Design and Operating Requirements of the Onboard Aircraft Refueling System and Associated Ground Refueling Equipment Interface, USA.
- [2] Department of Defense Joint Service Specification Guide. (2015), Air Vehicle Subsystems, USA.
- [3] Roy Langton, Chuck Clark, Martin Hewit and Lonnie Richards. (2009), Aircraft Fuel Systems, John Wiley & Sons Ltd: The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, United Kingdom.
- [4] Juan F. Jimenez, Jose M. Giron-Sierra, C. Insaurralde, M. Seminario (2007), A simulation of aircraft fuel management system, *Departamento ACYA, Fac. Fisicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, Spain.*
- [5] Zdobyslaw GORAJ, Pawel ZAKRZEWSKI, Aircraft fuel systems and their influence on stability margin, *Institute of Aviation.*

# ASKERİ BİR JET EĞİTİM UÇAĞI HİDROLİK GÜÇ SİSTEMİNE AİT SOĞUTMA İHTİYACININ BENZETİM MODELİ İLE BELİRLENMESİ

Ayşe Dilek Özkan <sup>(a)</sup>, Onur Özdemir <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Fethiye Mahallesi, Havacılık Bulvarı No:17,  
Kahramankazan Ankara, {aysedilek.ozkan,onur.ozdemir2}@tai.com.tr

## ÖZ

Jet motorlu uçakların yüksek hızlarda manevra kabiliyetleri, kontrol yüzeyleri güç kapasiteleri artırılarak arttırılmaktadır. Motor çıkışından elde edilen işlenmemiş gücün, eyleyiciler için gereken güce dönüşümü; akışkan gücü sistemi kullanıldığında en hafif tasarım ile başarılmaktadır. Elde edilen ağırlık kazancı, hareketli sistemlerde yüksek basınçlı akışkan kullanımının risklerine rağmen tercih edilmesine ve risklerin azaltılması için yapılan çalışmaların artmasına sebep olmaktadır. Günümüzde hava araçları için; güvenilirlik, sürdürülebilirlik, hassas debi/basınç kontrolü gibi gereksinimleri karşılamak üzere yüksek karmaşıklıkta, yedekli hidrolik güç sistemleri tasarlanmaktadır. Bu sistemlerin çalışması ile oluşan güç kayıplarının bir kısmı, akışkanın sıcaklığını yükseltmektedir. Yükselen sıcaklık, akışkanı kaçağa meyilli hale getirmekte, yağlama özelliğinin azaltmakta ve eyleyicilerde performans kaybına sebep olmaktadır. Hidrolik sistemlerde ideal soğutma ihtiyacının belirlenmesi, sıcaklık düşüşünün de sistem verimi üzerine olumsuz etkisi göz önünde bulundurulduğunda önem arz etmektedir. Bu çalışmanın amacı, askeri bir jet eğitim uçağı hidrolik sisteminde oluşan ısıl yüklerin benzetim modeli kullanılarak hesaplanmasıdır. Amesim yazılımı kullanılarak oluşturulan benzetim modeli, termal detaylara sahip bir boyutlu fiziksel alt modeller ile kurulmuştur. Hava aracı görev profili temel alınarak oluşturulan benzetim modelinde, soğutma sistemi tasarımına girdi sağlayacak şekilde eyleyici hızı ve kullanım sıklığının ısıl etkileri değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Akışkan gücü sistemi, hidrolik sistem modelleme, uçak hidrolik sistemi , termal-hidrolik analiz.

# DETERMINING COOLING REQUIREMENT OF A MILITARY JET TRAINER AIRCRAFT HYDRAULIC SYSTEM VIA SIMULATION MODEL

## ABSTRACT

High-speed manoeuvrability of jet engine air vehicles enhanced by increasing power capability of flight control surface actuators. Converting raw mechanical power obtained from jet engine to necessary actuation power achieved by employing fluid power system with lowest weight design. In spite of the risks of using high-pressurized fluid on motion systems, that weight gain causes to fluid systems be preferred and increase in risk reduction studies. Nowadays, highly complicated redundant hydraulic systems are designing for aircrafts by considering such requirements as safety, reliability, maintainability, high sensitivity in flow pressure control etc. A considerable part of power losses from working system lead to increase in fluid temperature. Rising temperature makes fluid more prone to leakage, having less capacity of lubrication and decrease in performance of actuators. It becomes important to determine ideal cooling requirement, by considering adverse effects of decreasing temperature on performance. Purpose of this study is calculating thermal loads of hydraulic systems of a military jet trainer aircraft by using simulation model. Simulation model, which were built on Amesim software, composed of one-dimensional physical submodels with thermal properties. By simulating the model under aircraft mission profile, thermal effects of actuator speed and operation frequency evaluated for providing design input for cooling system.

**Keywords:** Aircraft hydraulics, fluid power, modelling, modelling hydraulic system, thermal hydraulic analysis.

## 1. GİRİŞ

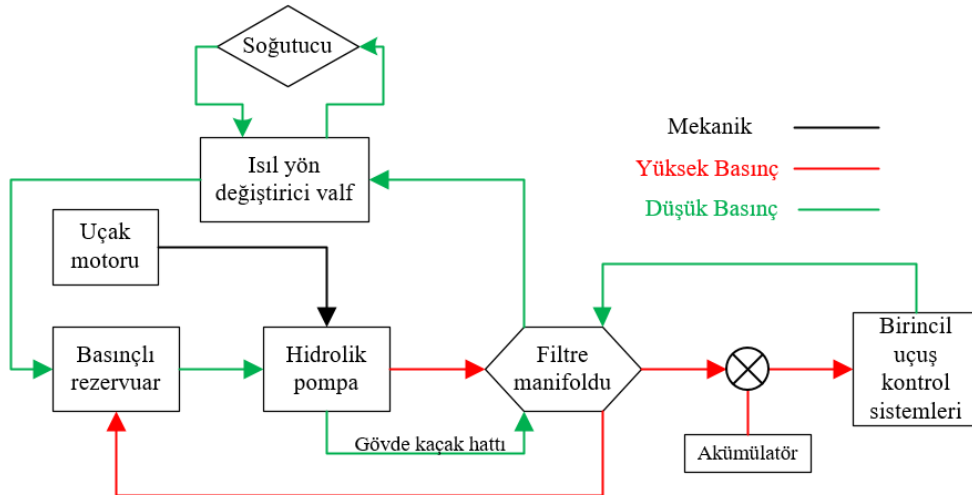
Hava araçlarında hidrolik güç sistemleri, 1930'lu yıllarda kullanılmaya başlanmıştır [1]. İlk dönemlerde tercih edilen akışkan çalışma basıncı 1500 psi değerini geçmez iken, 1950'lerde 3000 psi çalışma basıncına sahip sistemler kullanılmaya başlanmış ve günümüzde de birçok hava aracında kullanılmaktadır [2]. 1970 ortalarında 4000 psi çalışma basıncı Concord, F-22 gibi sayılı hava araçlarına ait hidrolik sistemlerde kullanılmaya başlanmıştır. 1990 yılları başlarında 5000 psi çalışma basıncı, "Rafale" ve V-22 uçaklarına ait hidrolik sistemlerde kullanılmıştır. Hidrolik sistem çalışma basıncı, teknolojinin gelişmesi ile beklenen artışı göstermemiş fakat sistem gücü 20 kW mertebesinde 250 kW değerine kadar yükselmiştir. Pompada oluşan kayıpların, basıncın karesi ile arttığı göz önünde bulundurulduğunda sistem sıcaklığının istenmeyen seviyelere geleceği bilinmektedir [3]. Yüksek sistem basıncı kullanılmamasının sebepleri arasında, yüksek sıcaklığın akışkan ve sızdırmazlık elemanları üzerine olumsuz etkileri gösterilmektedir. Bu sebeple hava aracı hidrolik sistemine ait akışkan



sıcaklıklarını belirli aralıklarda tutmak üzere çeşitli çalışmalar yürütülmüştür. Uçuş profiline bağlı olarak, rezervuardaki ortalama sıcaklığı tespit etmek üzere, verim kayıplarını kullanarak statik bir hesap yöntemi geliştirilmiştir [4]. Statik çalışmaların yanında, benzetim modeli oluşturularak dinamik sıcaklık hesaplama yöntemi hava aracı hidrolik sistemine ait bir akümülatör için kullanılmıştır [5]. Tüm hava aracı hidrolik sistemine ait benzetim modelleri de daha önce geliştirilmiş ve sistem dinamik davranış kestirimi amacıyla kullanılmıştır fakat ısıl özellikleri ihmal edilmiştir [6]. Bu çalışma kapsamında ise, hidrolik sistemin tümüne ait benzetim modeli kullanılmış ve elemanlara ait ısıl özellikler ihmal edilmemiştir.

Jet eğitim uçaklarında, uçuş kontrol yüzeyleri hidrolik güç ile çalıştığı için, hidrolik gücün kaybı uçak kontrolünün kaybına neden olacaktır. Uçuş kritik sistem olarak nitelendirilen hidrolik sistemler en az iki bağımsız sistemden oluşmalıdır. Ana sistemlerden biri sadece uçuş kontrol yüzeylerine güç sağlamak için ayrılmalıdır. Akışkan olarak, MIL-PRF-83282 kullanılan sistemler 3000 psi çalışma basıncına sahip olarak tasarlandığında  $-40^{\circ}\text{C}$  ile  $+135^{\circ}\text{C}$  sıcaklık aralığının dışına çıkmamalıdır [7].

Bu çalışma kapsamında, birincil uçuş kontrol yüzeylerini besleyen ana hidrolik sistem ele alınacaktır. Birincil hidrolik sisteme ait elemanların dizilimi Şekil 1’de gösterilmiştir. Mekanik tahrikli pompa, uçak motorundan elde edilen gücü akışkan gücüne dönüştürmektedir. Pompa çıkışından sonra, eyleyicilere iletilmeden akışkan filtreden geçirilmektedir. Filtre modülü içerisinde yer almakta olan bu yüksek basınç filtresi, akışkanı belirli bir temizlik seviyesinde tutmak üzere seçilmiştir. Kullanıcı dönüşünde tekrar filtrelenen akışkan, ısıl yön değiştirici valf üzerinden rezervuara gitmektedir. İletilen akışkan, sıcaklığı belirli bir değeri geçtiğinde soğutucuya iletilmektedir



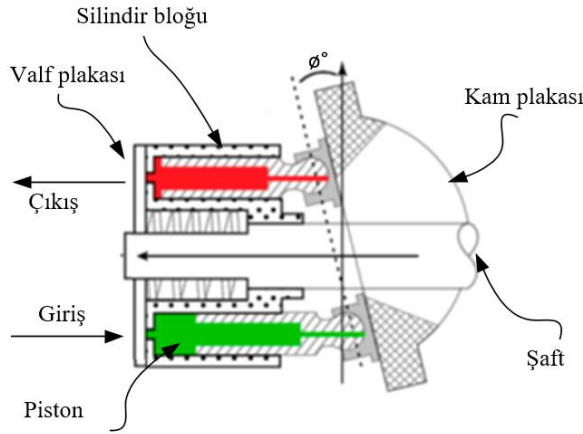
Şekil 1. Birincil hidrolik sistem elemanları

## 2. HİDROLİK SİSTEM BENZETİM MODELİ

Bu bölümde, çalışma kapsamına alınan hidrolik sistemin benzetim modeli anlatılacaktır. Hidrolik sisteme ait elemanlar sıra ile incelenecek ve göz önünde bulundurulmuş fiziksel özelliklerine ait matematiksel ilişkiler belirtilecektir. Yapılacak benzetim modeline soğutucu ve ısıl yön değiştirici valf dâhil edilmeyecek olup, sistem çalışması ile oluşan ısıl yükler tespit edilecektir.

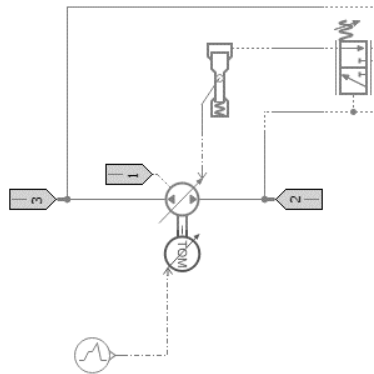
### 2.1. Hidrolik Pompa Modeli

Hidrolik sistemde, bir adet değişken deplasmanlı, basınç ayarlı piston tipi eksenel pompa kullanılmıştır. Mekanik tahrikli bu pompalar, çıkış basıncını belirli bir seviyede tutmak üzere debi üretmektedir.



Şekil 2 Tipik piston tipi eksenel pompa kesiti

Bu tip pompalar, Şekil 2 de görüldüğü gibi kam plakası eğiminden faydalanarak üzerinde radyal olarak kayan pistonların eksenel hareket yapmasını sağlamaktadır. Eksenel hareket ile piston içerisinde depolanan düşük basınçlı akışkan hacmi azalmaya ve basınçlanarak piston dışına çıkmaya zorlanmaktadır.



Şekil 3 Basınç ayarlı değişken deplasmanlı pompa benzetim modeli

Amesim ortamında oluşturulan pompa benzetimi Şekil 3' de gösterilmiştir.

$$Q_p(t) = \frac{\phi(t)}{\phi_l} D_l \omega(t) \quad (1)$$

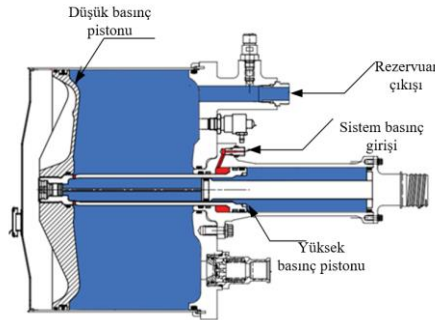
Denklem (1) de, pompa debisi  $Q_p$  hesaplanmıştır. Kam plakası açısı  $\phi$  pompa çıkış basıncı  $p_c$  ile değişmekte ve  $D$ , pompa deplasmanını değiştirmektedir. Limit kam açısı  $\phi_l$ , mevcut shaft açısal hızı  $\omega$ , ile sağlanabilecek en yüksek debinin üretildiği değerdir.

$$\frac{\Theta(s)}{P_c(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (2)$$

Kam plakası açısı  $\phi$ , denklem (2) de görüldüğü gibi çıkış basıncına bağlı birinci derece transfer fonksiyon ile modellenmiştir.

## 2.2. Hidrolik Rezervuar Benzetimi

Hava araçlarında, farklı uçuş ve manevra koşullarında pompa emiş basıncını korumak amacıyla basınçlandırılmış rezervuarlar kullanılmaktadır. Rezervuarı basınçlı tutmak için farklı yöntemler mevcut olup, bu çalışma kapsamında Şekil 4'de gösterildiği gibi sistem basıncı ile basınçlandırılan bir rezervuar kullanılacaktır. Bu tip rezervuarlar, düşük basınç ve yüksek basınç olmak üzere iki farklı hazneye ve farklı alanlara sahip iki pistonla sahiptir. Düşük basınç haznesinde basınç düştüğünde, pistonlar üzerlerinde basınçtan dolayı oluşan kuvvetler dengelenene kadar düşük basınç haznesinin hacmini azaltmaya zorlayacak şekilde hareket ederler.



Şekil 4. Rezervuar kesit görüntüsü [8]

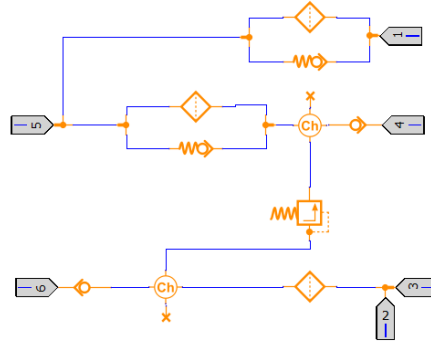
## 2.3. Filtre Modülü Benzetimi

Pompada basınçlandırılan akışkan, kullanıcı sistemlere ulaşmadan önce filtre elemanından geçmektedir. Kullanıcı sistemlerden dönen akışkan ise rezervuar haznesine ulaşmadan önce tekrar filtre elemanından geçmektedir. Pompa gövde kaçak debisi de filtrelendikten sonra rezervuara dönüş hattı ile birleştirilerek iletilmektedir. Bir örneği Şekil 5'de gösterilen bu tip modüller, hava aracı hidrolik sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 5 Filtre modülü örneği [9]

Şekil 6’de görüldüğü gibi, modül içerisinde filtre elemanları, çek valfler ve basınç rahatlatma valfi bulunmaktadır. Amesim yazılımı termal-hidrolik kütüphanesinde bulunan elemanlar ile benzetim modeli kurulmuştur.



Şekil 6 Filtre modülü benzetimi görseli

$$dm = \rho \times c_q \times A \times \sqrt{\frac{2 \times |\Delta P|}{\rho}} \quad (3)$$

Elemanlara ait basınç kayıpları, Denklem (3) kullanılarak hesaplanmıştır. Eşdeğer orifis alanı  $A$  [ $m^2$ ] ve akış katsayısı  $c_q$  parametreleri her eleman için yazılımda tanımlanmıştır. Eleman üzerindeki basınç kaybı  $\Delta P$  [Pa], akışkan kütleli debisi  $dm$  [kg/s] ve bulunduğu sıcaklıkta sahip olduğu yoğunluk  $\rho$  [ $kg/m^3$ ] değerleri ile hesaplanmaktadır.

#### 2.4. Akümülatör Benzetimi

Akümlatörler gazların sıkıştırılabilir oluşundan faydalanarak, enerji depolama ve basınç dalgalanmalarını azaltmak amacı ile kullanılmaktadır. Kapalı bir silindirik hacimde, bir tarafı hidrolik sıvı diğer tarafı gaz olarak ayıran sızdırmaz pistondan oluşmaktadır.

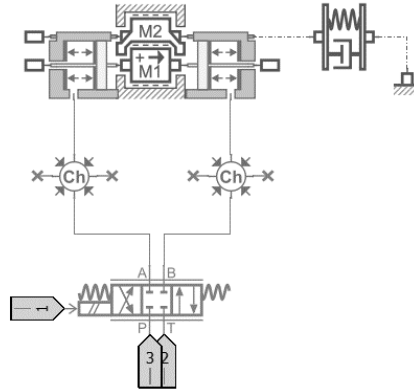
$$P_g \cdot V_g^k = C_p \quad (4)$$

Akümülatörde depolanan gaz basıncı  $P_g$ , sistem basıncı yükselmesi ile yükselmekte ve hacmi  $V_g$  azalmaktadır. Sistem basıncı düştüğünde, sıkışan gaz genişerek depolanan akışkanın sisteme iletilmesini sağlamaktadır. Politropik gaz sabiti,  $C_p$  akümülatör hacmi ve gaz başlangıç dolum basıncına bağlıdır. Gaz hacimsel değişimi ile oluşan ısı değişimin etkisi sisteme yansıtılmamıştır.

Bu akümülatör, kullanıcı sistemlere giden yüksen basınç hatlarına ani basınç dalgalanmalarını sönmölemek ve basınç kaybı durumunda güç sağlamak amacıyla yerleştirilmiştir. Sistem benzetiminde aldığı konum Şekil 8’ de gösterilmiştir.

## 2.5. Aktüatör Benzetimi

Birincil uçuş kontrol yüzeylerinin hareketleri, hidrolik silindir ile sağlanmaktadır. Bu mekanizmalar, hidrolik besleme basıncını, mekanik harekete dönüştürürler. Benzetim modelinde karşı yük olan hava yükleri ihmal edilmiştir.



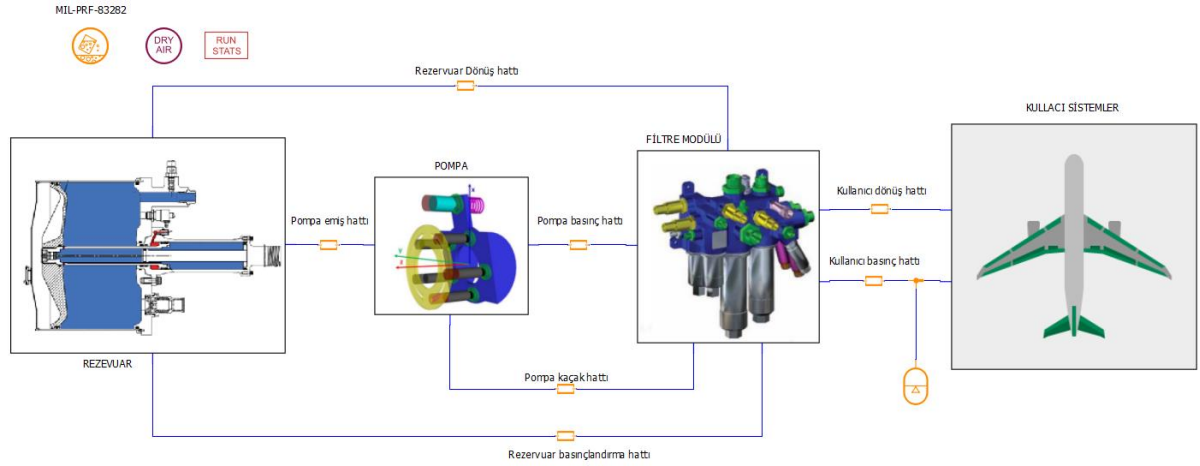
Şekil 7. Hidrolik eyleyiciye sahip servomekanizma benzetim görseli

Amesim yazılımı, kullanılarak oluşturulan benzetime ait görsel Şekil 7’ de gösterilmiştir.

## 2.6. Borulama Benzetimi

Elemanlar arasında kullanılan borulara ait sürtünme kayıpları ve hacimleri, benzetime yansıtılmıştır.

Amesim ortamında oluşturulan hidrolik sisteme ait yerleşim düzeni Şekil 8’ de gösterilmiştir.



Şekil 8 Amesim yazılımında oluşturulan hidrolik sistem modeli görseli

### 3. BENZETİM ÇALIŞMA KOŞULLARI VE ÇIKTILARI

Hidrolik sistemin çalışması ile oluşan ısısal yükün hava aracı ortamına transfer edilmediği kabulü yapılmıştır.

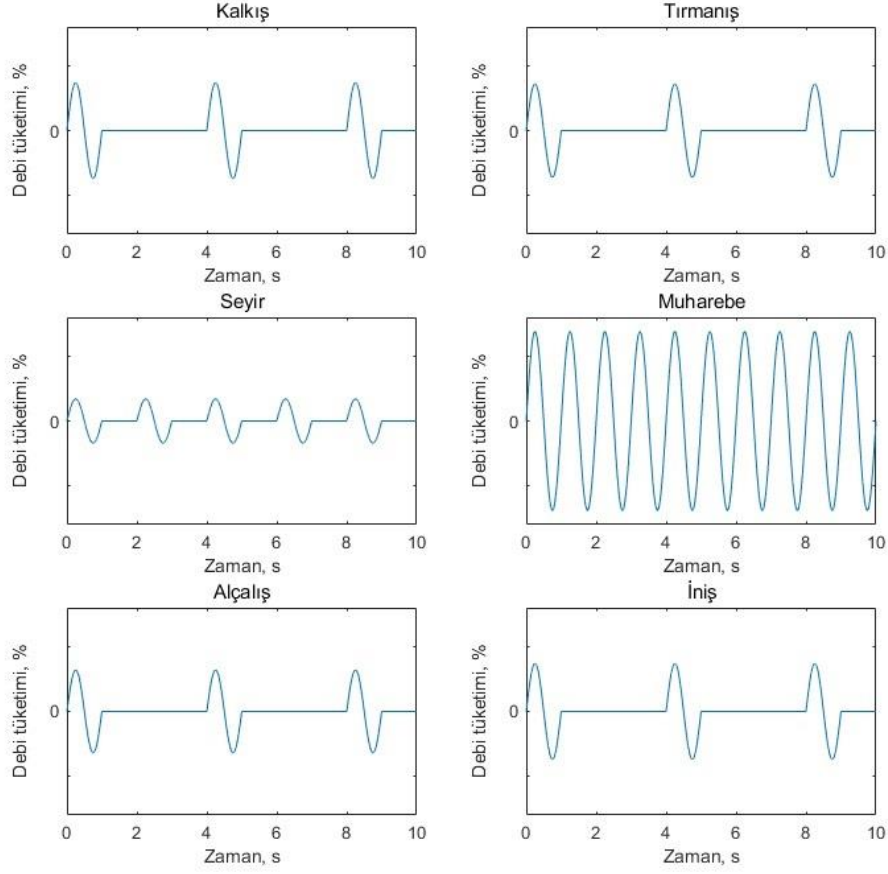
Uçuş fazlarında pompa tarafından üretilen debinin, pompa kapasitesine göre yüzdesi aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. En fazla debi, muharebe fazında üretilmektedir.

Tablo 1 Uçuş fazına göre debi tüketim tablosu

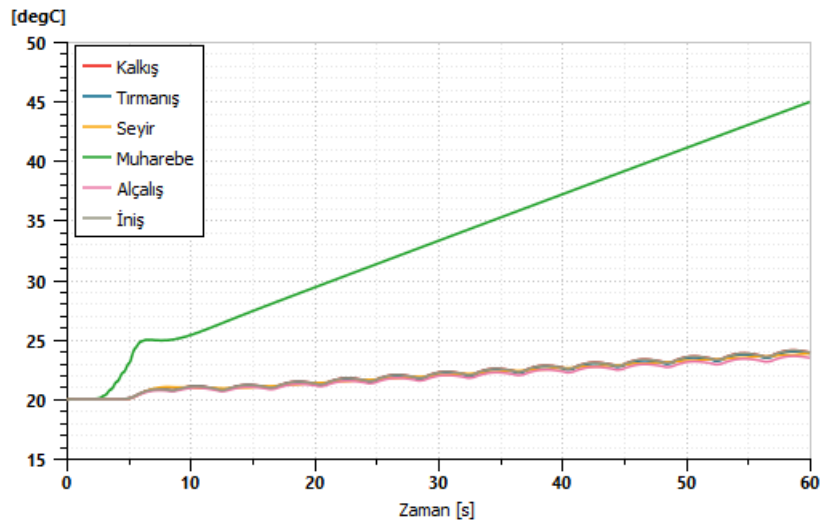
Uçuş Fazı	Debi Kullanımı*, %
Kalkış	A
Tırmanış	B
Seyir	C
Muharebe	D
Alçalış	E
İniş	F

Eyleyiciler, uçuş profili gereksinimlerini karşılamak için farklı hızlarda, farklı kullanım sıklıklarında çalıştırılmıştır. Eyleyici kullanım durumuna bağlı olarak, hidrolik sistemden talep edilen debi profili Şekil 9' da gösterilmiştir.

\* Debi kullanım yüzdeleri, gizlilik gerekçesi ile harf olarak gösterilmiştir.



Şekil 9 Uçuş fazına bağlı olarak birincil uçuş kontrol yüzeylerine ait debi tüketim talepleri



Şekil 10 Uçuş fazlarına bağlı olarak rezervuar dönüş sıcaklık değerleri

Uçuş fazına bağlı olarak hidrolik sistemde oluşan ısı yüküne ait ortalama değerler, Şekil 10' da görülen sıcaklık bilgileri kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

**Tablo 2** Uçuş fazlarına göre sistemde oluşan ısı yükleri

Uçuş fazı	Isıl yük, W
<b>Kalkış</b>	992
<b>Tırmanış</b>	992
<b>Seyir</b>	984
<b>Muharebe</b>	6890
<b>Alçalış</b>	865
<b>İniş</b>	992

Sistem çalışmasında, en fazla 6.89 kW ısı yükü Tablo 2' de görüldüğü gibi muharebe fazında oluşmaktadır.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada askeri bir jet eğitim uçağına ait bir hidrolik sistem ele alınmıştır. Kurulan sistem diğer hidrolik sistemler için de uygulanabilir olup, sistemlerin birbirleri üzerine etkisi olmadığı için ayrı ayrı ele alınması kolaylık ve işlem hızı sağlayacaktır.

Hidrolik sistemde bulunan ekipmanlar, basınç kayıplarını ısı yükü olarak sisteme ekleyecek matematiksel detaylara sahiptir. Bu çalışmada bu ısı yükünü, eyleyici kullanım sıklığından ve hızından direkt olarak etkilendiği görülmektedir.

Çalışmanın özgün olan kısmı, eyleyici hareketleri her uçuş fazı içerisinde ortalama frekans, genlik ve bekleme zamanı yaklaşık olarak öngörülerek periyodik olarak verilmiştir. Bu periyodik hareket ile kullanılabilir bir sıcaklık yükselimi eğilimi elde edilmiştir. Kapalı bir döngüye sahip olan bu hidrolik sistemde bulunan akışkanın, rezervuara ısınarak dönmesi ve rezervuarda depolanmış akışkanı ısıtarak pompaya iletmesinin etkisi, benzetim çalışmaları ile göz önünde bulundurulabilmektedir.

Simülasyon sonuçları incelendiğinde, uçuş fazları arasında oluşan ısı yükü yaklaşık %700 değişebilmektedir. Bu durum, soğutucu boyutlandırmasının yapılacağı uçuş zarfı seçiminin önemine işaret etmektedir.

Hidrolik sisteme ait soğutma sistemi tasarımı bu çalışma kapsamında değildir. Birden fazla karmaşık sisteme ve hava ortam sıcaklığına bağlı bu sistemin tasarım sürecine girildiği sağlanmak üzere bu çalışma yapılmıştır.



## 5. TEŞEKKÜR

Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.' ye bu çalışmaya sağladığı destekler için teşekkür ederiz.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] Moir, I. ve Seabridge, A. (2008), Aircraft Systems: Mechanical, Electrical and Avionics Subsystems Integration, John Wiley& Sons: West Sussex, İngiltere.
- [2] Wang, S., Tomovic, M. ve Liu, H. (2015), Commercial Aircraft Hydraulic Systems, Shanghai Jiao Tong University Press Aerospace Series.
- [3] Aaltonen, J. (2016), Interaction of bootstrap reservoir and hydraulic pump in aircraft hydraulic systems.
- [4] Li, J., Xu, J., Zhang, X. ve Yin, Y. (2010), An estimation method of the fluid temperature for commercial aircraft hydraulic systems, *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, (pp. 2962-2965). IEEE.
- [5] Li, J., Zhang, X., Yin, Y. Ve Zhang, J. (2011), Dynamic temperature simulation of an accumulator in aircraft hydraulic systems, *Proceedings of 2011 International Conference on Fluid Power and Mechatronics*, (pp. 653-657). IEEE.
- [6] Joshi, A. ve Jayan, P.G. (2002), Modelling and simulation of aircraft hydraulic system, *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, (p. 4611).
- [7] SAE International (2011), Hydraulic Systems, Military Aircraft, Design and Installation, Requirements For (Standart no. AS5440A)
- [8] Parker Aerospace. (2016), Aerospace Systems and Technologies. Erişim adresi [http://www.parker.com/Literature/Hydraulic%20Systems%20Division/HSD%20literature%20files/HSD\[1\].product.spec.sheet\\_BootstrapReservior.pdf](http://www.parker.com/Literature/Hydraulic%20Systems%20Division/HSD%20literature%20files/HSD[1].product.spec.sheet_BootstrapReservior.pdf)
- [9] PTI Technologies Inc. (2011), Multi- component filter modules, ABD. Erişim adresi <https://www.ptitechnologies.com/global/file/Multi-Compenent%20Filter%20Modules%20LR%202011-06-06.pdf?phpMyAdmin=b29f31540c0073bab184cdac5d21d1ea&phpMyAdmin=JaqAvxTX0mnKfRQAMpsNS9JcT9>

# ANALİZ SİMÜLASYONU UYGULAMALARINDA DOĞRUSAL SÖZDE RASSAL SAYI ÜRETEÇLERİNİN KULLANIMI ÜZERİNE BİR LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Gökçe Özkan <sup>(a)</sup>, Harun Gökçe <sup>(a)</sup>, Erkin Çilden <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Tic. A.Ş., Ankara,  
{gokce.ozkan, harun.gokce, erkin.cilden}@stm.com.tr

## ÖZ

Simülasyon yönteminin en yaygın kullanım alanlarından biri kapalı formüller ile ifade edilemeyen ve içeriğinde rassal fenomenler bulunduran problemlerin analizidir. Simülasyon uygulamalarında modellenen sürecin rassallığını yansıtabilme için rassal sayı üreteçlerinden faydalanılmaktadır. Analiz simülasyonlarında varyans azaltma tekniklerinin kullanımı, doğrulama ve geçirme gibi sebeplerle ihtiyaç duyulan tekrarlanabilirliği sağlamak amacıyla sözde-rassal sayı üreteçleri kullanılmaktadır. Günümüzde paralel ve dağıtık simülasyon uygulamalarının giderek yaygınlaşması sonucu sözde rassal sayı üreteçleri ile ilgili yeni gereksinimler ortaya çıkmıştır. Bu bildiride analiz simülasyonunda sıkça kullanılan doğrusal sözde-rassal sayı üreteçleri, bu sözde-rassal sayı üreteçlerinin başarımını değerlendirmek için kullanılan testler, paralel ve dağıtık simülasyon uygulamalarında rassal sayı kullanımı ile ilgili ortaya çıkan problemler ve bu problemlerin çözümü için önerilen yöntemler üzerine bir literatür araştırması sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** analiz simülasyonu, doğrusal sözde-rassal sayı üretici, paralel simülasyon.

## A LITERATURE SURVEY ON THE USAGE OF LINEAR PSEUDO-RANDOM NUMBER GENERATORS IN ANALYSIS SIMULATION APPLICATIONS

### ABSTRACT

One of the most common uses of the simulation method is the analysis of the problems that cannot be expressed by closed formulas and which contain random phenomena. In order to reflect the randomness of the process modeled in simulation applications, random number generators are used. Pseudo-random number generators are used to provide the reproducibility which is required for usage of variance reduction techniques and,

validation and verification purposes in analysis simulations. Recently, new pseudo-random number generator requirements have emerged as a result of the increasing use of parallel and distributed simulation applications. In this paper, we present a literature survey on the linear pseudo-random number generators which are frequently used in analysis simulation, the test procedures used to evaluate pseudo-random number generators, the problems related to the use of random numbers in parallel and distributed simulation applications and the proposed methods for solving these problems.

**Keywords:** analysis simulation, linear pseudo-random number generator, parallel simulation.

## 1. GİRİŞ

Rassal sayılara olan gereksinim çok eski zamanlara dayanmaktadır. İlk olarak, üzerinde çeşitli sembollerin olduğu madeni paralar atılmak suretiyle rassallık sağlanmaya çalışılmıştır. Zarların art arda atılarak üste gelen sayıların görülmeden yan yana dizilmek yoluyla yorumlanması ile rassal değerler oluşturmaktan, günümüzde donanım temelli ve algoritmik üreteçlerle rassal sayıların oluşturulmasına gelinmiştir.

Rassal sayılara duyulan ihtiyaç farklı alanlarda görülmektedir. Örneğin kriptoloji alanında kriptografi şifrelerinin üretilmesi, büyük verilerden rastgele seçimler, şans ve kumar oyunları rassal sayılarına ihtiyaç duyulan olaylardır. Bunların yanı sıra, rassal sayıların yaygın olarak kullanıldığı bir diğer alan ise simülasyon çalışmalarıdır. Simülasyon koşullarında modellerin ihtiyaç duyduğu rassallık rassal sayı üreteçlerinin kullanılması ile sağlanır [1].

Rassal sayıların rassallığı iki temel özelliğin sağlanmasını gerektirir. İlk olarak üretilen rassal sayıların dağılımı eş ve olasılıkları eşit olmalıdır. İkinci olarak ise üretilen rassal sayılar birbirlerine bağımlı olmamalıdır. Bu iki koşulu sağlayacak şekilde rassal sayı üreten iki farklı tip rassal sayı üretecinden bahsedilebilir. Gerçek rassal sayı üreteçleri, doğada rastgele gerçekleşen bazı olayları kullanılabilir rassal sayılara çevirerek rassal sayı üretirler. Sözde rassal sayı üreteçleri ise gerçek anlamda bir rassallığın aksine gerçekmiş gibi görünen rassal sayıları bazı matematiksel formüller aracılığı ile üreten üreteçlerdir. Sözde ve gerçek rassal sayı üreteçleri kararlılık ve verimlilik açısından farklılaşırlar. Sözde rassal sayı üreteçleri aynı koşullarda aynı rassal sayı dizisini oluşturabilirler ve birim zamanda çok sayıda rassal sayı üreterek verimli çalışırlar. Bu yönüyle özellikle simülasyon uygulamalarında çoklu koşullarda aynı rassal sayı dizisine ve koşum sırasında hızlı ve çok sayıda rassal sayıya ihtiyaç duyulması nedeniyle gerçek rassal sayı üreteçleri yerine tercih edilirler [1].

Sözde rassal sayı üreteçleri kullandıkları algoritmaların yapısına göre farklılaşırlar. Bu çalışmada ilk olarak Bölüm 2’de yapılarına göre farklılaşan ve tarih içinde kullanılan

sözde rassal sayı üreteçlerine yer verilmiştir. Bölüm 3'te, verilen sözde rassal sayı üreteçlerini doğrulamak için kullanılan testlere değinilmiştir. Bölüm 4'te ise sözde rassal sayı üreteçlerinin özellikle paralel ve dağıtık simülasyon uygulamalarında kullanımı, ortaya çıkan problemler ile bu problemlerin çözümlerine yönelik literatürde bulunan öneriler bulunmaktadır.

## 2. SÖZDE RASSAL SAYI ÜRETEÇLERİ

Sözde rassal sayı üreteçleri, genellikle kullanıcı tarafından sağlanan başlangıç değerlerini kullanarak, sonlu bir durum kümesinden 0 ile 1 arasında bir çıktılar serisi üretirler. Bir sözde rassal sayı üreticisine aynı başlangıç değerinin verildiği her denemede aynı çıktı serisi elde edilmektedir. Sözde rassal sayı üreteçleri sonlu durum kümelerini kullanarak çalıştığı için bir noktada başlangıç durumuna geri dönerler. Bir sözde rassal sayı üreticinin başladığı konuma geri dönmesi için gereken minimum tekrarlamaya sayısı, o üreticinin *periyodu* olarak adlandırılır [2]. Sözde rassal sayı üreteçlerinin çıktılarının bağımsızlığının önemli olduğu alanlarda uzun periyotlara sahip rassal sayı üreteçlerinin kullanımı tercih edilmektedir. Benzer şekilde rassal sayı üreteçlerinin yüksek başarıma ve minimum hafıza gereksinimine sahip olması beklenen özelliklerdir [3, 4].

Literatürde, simülasyon uygulamalarında istatistiksel geçerliliği yüksek sonuçlar elde edebilmek için ihtiyaç duyulan sözde rassal sayı üreteçleri hakkında bir çok çalışma bulunmaktadır. Özellikle simülasyon alanındaki yazılımların ve kütüphanelerin çoğunda doğrusal rassal sayı üreteçlerinin kullanımının yaygın olduğu görülmektedir [4, 5]. Bu çerçevede, yaygın kullanıma sahip doğrusal sözde rassal sayı üreteçleri, temel olarak dört kategoride ele alınabilir.

### 2.1. Doğrusal Eşlenik Rassal Sayı Üreteçleri

Doğrusal eşlenik (İng., linear congruential) rassal sayı üreteçleri en sık kullanılan ve diğer üreteçlerle karşılaştırıldığında göreceli olarak daha basit algoritmalara sahip üreteçlerdir. İlk doğrusal eşlenik rassal sayı üretici Lehmer [6] tarafından önerilmiştir. Bir doğrusal eşlenik rassal sayı üretici (1) ile tanımlanır.

$$x_n = ax_{n-1} + c \pmod{m} \quad (1)$$

Burada  $a$ ,  $c$  ve  $m$  doğrusal eşlenik rassal sayı üreticinin parametrelerini,  $x_0$  değeri başlangıç değerini,  $x_n$  ise  $n$  numaralı yinelemede üretilen ve rassal sayı üretiminde kullanılan tamsayıyı temsil eder. Üretilecek rassal sayı değeri  $u_n$ ,  $x_n$  değerinin  $m$  değerine bölünmesiyle bulunmaktadır. Bir doğrusal eşlenik rassal sayı üreticinin periyodu bu parametreler tarafından belirlenir. Bir üreticinin maksimum periyoda sahip olması için bu parametrelerin alacağı değerlerin uyması gereken kriterler Hull ve Dobell [7] tarafından belirtilmiştir. Bir doğrusal eşlenik rassal sayı üreticinin periyodunun alabileceği

maksimum değer  $m$  ile limitlidir. Maksimum periyoda sahip olmak dışında istenilen diğer özellikleri sağlayabilecek çıktı serilerinin üretilebilmesi için de  $a$ ,  $c$  ve  $m$  parametrelerinin değerleri büyük önem taşımaktadır. Parametre kümesinin alabileceği değerler için farklı öneriler bulunmaktadır [8–12]. Aynı zamanda L’Ecuyer [13] farklı parametre kümesi değerleri için bir karşılaştırma sunmuştur.

## 2.2. Matris Eşlenik Rassal Sayı Üreteçleri

Doğrusal eşlenik rassal sayı üreteçleri yüksek periyotlara sahip olabilmek için  $m$  parametresinin yüksek bir değere sahip olmasına ihtiyaç duyar. Ancak bu gereksinim rassal sayı üreticinin başarımını yüksek hafıza ve işlem gücü gereksinimi sebebiyle olumsuz etkiler. Bu problemin üstesinden gelebilmek için matris eşlenik rassal sayı üreteçleri önerilmiştir. Bu üreteçler (2) ile tanımlanan yapıya sahiptirler.

$$X_n = AX_{n-1} + C \pmod{m} \quad (2)$$

Bu üreteçlerde doğrusal eşlenik rassal sayı üreteçlerinden farklı olarak  $X_n$  değişkenleri tamsayı değil  $k$  boyutlu vektörlerdir. Benzer şekilde  $a$  ve  $c$  parametresi de  $k \times k$  boyutlu bir matris olan  $A$  ve  $C$  ile değiştirilmiştir. Bu değişiklikler üreticinin  $m^k - 1$  periyoduna sahip olabilmesine imkan sağlamaktadır. Matris eşlenik rassal sayı üretici örnekleri literatürde görülmektedir [3, 14–17].

## 2.3. Çoklu Özyinelemeli Rassal Sayı Üreteçleri

Çoklu özyinelemeli (İng., multiple recursive) rassal sayı üreteçleri matris eşlenik rassal sayı üreteçlerinin özel bir durumudur. Bu üreteçlerde  $C$  matrisi sıfır değerini almaktadır. Bir çoklu özyinelemeli rassal sayı üreticinin yapısı (2) ile verilmiştir.

$$x_n = (a_1x_{n-1} + \dots + a_kx_{n-k}) \pmod{m} \quad (3)$$

$a_1, \dots, a_k$  üreticinin parametrelerini temsil etmektedir. (3)’te görülebileceği üzere, doğrusal eşlenik rassal sayı üreteçlerinin aksine, son  $k$  adet durum yeni durumu belirlemek için kullanılmaktadır. Bu uyarılama, üreticinin periyodunun  $m^k - 1$  olabilmesini ve doğrusal eşlenik üreteçlere göre daha hızlı sonuç alınabilmesini sağlamaktadır. Ancak bu üreteçler, doğrusal eşlenik üreteçlere kıyasla daha yüksek bir hafıza kullanımı gerektirmektedir. Literatürde birçok çoklu özyinelemeli rassal sayı üretici önerisi bulunmaktadır [3, 18–21]. Oldukça sık kullanılan Mersenne Twister [22] üretici de bir çoklu özyinelemeli rassal sayı üreticidir.

## 2.4. Birleşik Rassal Sayı Üreteçleri

Birleşik rassal sayı üreteçleri iki ya da daha fazla rassal sayı üreticinin sonuçlarının toplama, çarpma gibi yöntemlerle birleştirilmesiyle oluşurlar. Birden çok doğrusal eşlenik rassal sayı üreticinin birleştirilmesi sonucu oluşan birleşik doğrusal eşlenik rassal sayı üreteçleri [8, 17, 23] ve birleşik çoklu özyinelemeli (İng., recursive) rassal sayı

üreteçleri [24, 25] gibi örnekleri mevcuttur. Genel olarak birleşik rassal sayı üreteçleri kendilerini oluşturan rassal sayı üreteçlerinden daha uzun periyotlara ve daha başarılı istatistiksel özelliklere sahiptirler.

### 3. RASSAL SAYI ÜRETEÇLERİNİN DOĞRULANMASI VE GEÇERLENMESİ

Sözde rassal sayı üreteçleri, rassal sayıları birer dizi (İng., stream) halinde ve tanımlanmış kararlı bir fonksiyon aracılığı ile üretirler. Bu şekilde üretilmiş sayılar her ne kadar görünüş itibarı ile rassal olsalar da, bu sayıların gerçekten rassal oldukları sonucuna varmak mümkün değildir. Fakat, bir rassal sayı dizisi bazı testlere tabi tutularak, üretilen sayıların rassallığa ne kadar yakın oldukları tespit edilebilir ve sözde rassallıkları belirli bir güven oranında belirlenebilir. Bunun yanı sıra rassal sayı üreteçlerinin karşılaştırılması ve rassallık açısından hangisinin başarılı olduğunun belirlenmesi bu testlerin sonuçlarına bağlıdır.

Sözde rassal sayı üreteçlerinin rassal sayı üreteç testlerinden birini başarıyla geçmemesi rassallık olmadığı anlamına gelirken; testleri başarıyla geçmesi, rassallık gereksinimi bağlamında, bir zorunluluk olmasına rağmen yeterli olmayabilir. Buna göre bir testi geçen bir rassal sayı üreticinin başarılı bir rassal sayı üretici olma olasılığı vardır; ancak testi geçmeyen bir üreticinin kötü bir rassal sayı üretici olduğu kesindir.

Rassal sayı üreteçlerinin ne kadar “başarılı” olduklarının belirlenmesi için kullanılan testler ve deneysel ve teorik olmak üzere sınıflandırılırlar [26]. Teorik testler, rassal sayı üreteçlerinin sonuçları ile değil, doğrudan üreticinin iç yapısı ve tasarımı ile ilgilenir ve matematiksel olarak üreticinin ne oranda rassal bir üreteç olduğunu ölçmeye çalışır. Deneysel testler ise teorik testlerin aksine, üreticinin tasarım ve çalışma prensibini bilmeksizin, ürettiği sonuçlar üzerinde uygulanan istatistiksel yöntemlerden oluşur.

#### 3.1. Deneysel Testler

Rassal sayı dizilerinin testi için kullanılan en yaygın testler Ki-Kare ve Kolmogorov-Smirnov testleridir.

##### 3.1.1. Ki-Kare Testi

Deneysel testler arasında en yaygın olarak kullanılan Ki-Kare testidir. Bu test 1900 yılında Pearson tarafından geliştirilmiştir [27]. Test, iki farklı veri kümesinin arasında önemli bir fark olup olmadığını belirlemek için kullanılan bir istatistiksel analiz yöntemidir. Rassal sayı üreteçleri ile oluşturulan rassal sayı dizilerinin histogramları ( $k$  adet) oluşturularak, her histogram verisi ( $i$ ) için gözlenen frekans ( $o_i$ ) ve beklenen frekans ( $e_i$ ) değerleri aşağıdaki (4) kullanılarak ki-kare değeri hesaplanır.

$$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i} \quad (4)$$

Bulunan değer, ki-kare testi için hazırlanmış serbestlik derecesi ve hata payı oranlarından oluşan tanımlı kritik değerler tablosundaki karşılık gelen değerle karşılaştırılır. Bulunan değer karşılık gelen kritik değerden küçük ise gözlenen değer ile beklenen değerler arasında önemli bir fark olmadığı ileri sürülür; böylece oluşturulan rassal sayıların birbirinden bağımsız ve eş dağılımlı olduğuna hükmedilir.

### 3.1.2. Kolmogorov-Smirnov Testi

Kolmogorov-Smirnov testi A.N. Kolmogorov ve N.V. Smirnov tarafından geliştirilmiştir. Sürekli dağılımlara uygulanan bu test gözlenen kümülatif dağılım fonksiyon değerleri ile beklenen kümülatif dağılım fonksiyon değerleri arasındaki farkı dikkate alır [28, 29].

$n$  adet sayıdan oluşan bir rassal sayılar dizisinin Kolmogorov-Smirnov testi için öncelikle gözlenen değerlerin kümülatif dağılım fonksiyonunu ( $F_{obs}(x)$ ) ve beklenen değerlerin kümülatif dağılım fonksiyonunun ( $F_{exp}(x)$ ) hesaplanması gerekir. Ardından, Kolmogorov-Smirnov değeri ( $D_n$ ) (5) kullanılarak hesaplanır.

$$D_n = \max_x (|F_{exp}(x) - F_{obs}(x)|) \quad (5)$$

Bulunan  $D_n$  değeri, Kolmogorov-Smirnov kritik değerler tablosundaki  $n$  ve hata payına karşılık gelen eşik değerinden küçük ise gözlenen rassal sayıların beklenildiği ölçüde rassal olduğu sonucuna varılır. Aksi durumda, Kolmogorov-Smirnov testine göre bu rassal sayı dizisinin rassallığından söz etmek mümkün olmamaktadır.

### 3.1.3. Çok Seviyeli Testler

Ki-Kare ve Kolmogorov-Smirnov testleri, çok elemanlı rassal sayı dizilerine, dizileri belirli sayıda rassal sayı içeren bloklara ayırarak her blok üzerinde uygulanmak suretiyle yapılır. Bu şekilde testi geçen diziler için ileri seviye testler uygulanabilir. Bunun için bloklama işlemi her blok için yapılır ve oluşan alt bloklar için de Ki-Kare ve Kolmogorov-Smirnov testleri uygulanabilir. Seviyeler halinde uygulanan bu testler çok seviyeli testler olarak adlandırılmaktadır [26, 29]. Üst seviyede testi geçen diziler alt seviyelere inildiği durumunda de aynı başarıyı gösteriyorsa “başarılı” oluşturulmuş rassal sayılar olarak kabul edilirler.

### 3.1.4. Diğer Testler

Rassal sayı dizilerinin “başarım” testleri için kullanılan diğer testler; k-dağılılabilirlik testi, seri testi, spektral testi, eş dağılım ve frekans testleri ile boşluk testidir [29, 30].

### 3.2. Teorik Testler

Teorik testler rassal sayı üretçilerinin sonuçlarına değil, üretici oluşturan fonksiyonun tasarımına ve özelliklerine odaklanır. Bilinen en temel teorik test periyot testidir. Üretici oluşturan fonksiyon sayı üretirken belirli bir noktadan sonra bu sayı serisini tekrar üretmeye başlar. Periyodu uzun bir rassal sayı üretici, periyodu kısa olan bir rassal sayı üreticisine kıyasla kendini tekrar etmeden uzun süre sayı üretebilir. Bu yönü ile karşılaştırıldığında uzun periyotlu bir üreticinin daha başarılı olduğu açıktır.

Rassal sayı üretçilerinin periyodunun, durum kümelerinin sayısından büyük olamaması rassal sayı üretçilerinin doğasından gelen bir özelliktir. Fakat tersi durumların varlığı - periyodun durum sayısından düşük olması- bazı algoritmalar için söz konusu olabilir. Bu durum rassal sayı üreticinin kararlı fonksiyonunun erişilemeyen durumlara sahip olduğunu gösterir. Bu ise rassal sayı üreticinin kullanıldığı bilgisayarda fazladan bellek tüketimine neden olur. Verimli bir rassal sayı üreticinin periyodu sahip olduğu durum kümesi sayısına eşit veya çok yakın olmalıdır. [3, 29]. Yapısı ve parametreleri bu şekilde uygun belirlenmiş bir rassal sayı üretici için bu koşul sağlanabilir. Aksi durumda yönetilemeyen ve israf edilmiş bellek kullanımı sorunuyla karşılaşılır.

Rassal sayı üretçilerinin bilinen bir diğer teorik testi, durumların oluşturduğu yapının (İng., structure) incelenmesidir. Doğrusal eşlenik sayı üretçileri ile üretilen ardışık değerlerin vektörleri şekilsel olarak kafes (İng., lattice) yapısına sahiptirler. Dahası, matris eşlenik rassal sayı üretçileri de bu özelliğe sahiptir. Kafes yapısına sahip olmayan üretçiler başarılı olmayan üretçiler olarak nitelendirilirler. Doğrusal eşlenik sayı üretçilerinin kafes yapısına sahip olup olmadıklarının testi için farklı algoritmalar önerilmiştir [3, 29, 31].

## 4. PARALEL VE DAĞITIK SİMÜLASYONLARDA RASSAL SAYI KULLANIMI

Analiz amaçlı simülasyonlarda tekrarlanabilirlik (İng., repeatability) ihtiyaç duyulan bir özelliktir. Bir simülasyon uygulaması, aynı girdilerin sağlandığı her koşulun sonucunda aynı çıktıları üretiyor ise tekrarlanabilir olarak nitelendirilir [32]. Sonuçların tekrar edilebilirliği doğrulama ve geçерleme çalışmalarında gerekli olabildiği gibi aynı zamanda ortak rassal sayı kullanımı gibi varyans azaltma tekniklerinin kullanılabilmesine olanak sağlar. Yalnızca bir rassallık kaynağının kullanıldığı simülasyonlar ve tüm simülasyonun seri olarak koşulduğu uygulamalarda, Bölüm 3'te bahsedilen testlerden başarıyla geçmiş sözde-rassal sayı üretçilerini kullanmak sonuçların rassallığını ve tekrarlanabilirliğini sağlamak için yeterli olmaktadır. Ancak paralel ve dağıtık simülasyon uygulamalarının yaygınlaşması, bu uygulamalarda tekrarlanabilirliği sağlamak için ortaya çıkan yeni gereksinimler ve bu gereksinimleri karşılayabilmek için üretilen çözümler hakkındaki çalışmaları da beraberinde getirmiştir. Bu uygulamalarda tekrar edilebilirliği



sağlayabilmek için göz önünde bulundurulması gereken faktörlerden biri de gerekli koşulları sağlayabilen sözde-rassal sayı üreteçlerinin kullanımınıdır [32, 33].

Paralel simülasyon sistemlerinde kullanılacak sözde rassal sayı üreteçlerinin taşınması gereken öncelikli özelliklerden biri, birbirinden bağımsız çok sayıda rassal sayı dizisinin üretilebilmesine imkan sağlamalarıdır [34, 35]. Tüm rassallık kaynakları için tek bir rassal sayı dizisinin kullanımı tekrarlanabilirlik ihtiyacını sağlayamadığı için tercih edilmemektedir [35].

Birden fazla bağımsız rassal sayı dizisi üretebilmek için önerilen metotlardan biri ayırma (İng., *splitting*) tekniğidir. Ayırma tekniğinde tek ve merkezi bir sözde-rassal sayı üreticinin ürettiği uzun bir rassal sayı dizisi uzun alt dizilere ayrılır. Kullanılan rassal sayı üretici doğrusal eşlenik, çoklu yinelemeli ya da birleşik rassal sayı üretici olabileceği gibi farklı algoritmik üreteçler de tercih edilebilmektedir. Ayırma tekniğinin kullanımı birbirini takip eden dizilerin başlangıç noktalarını hesaplayabilmek için düşük işlem gücü gerektiren yöntemlerin geliştirilmesini gerektirir. Özellikle paralel simülasyon uygulamalarında modellenen rassallık kaynaklarının sayısı arttıkça, dizilerin başlangıç noktalarının hızlı bir şekilde belirlenebilmesi önem kazanmaktadır [4].

Rassal sayı dizilerinin başlangıç noktalarının belirlenebilmesi için sabit uzunlukta diziler kullanımı, “leap-frogging” yöntemi gibi yaklaşımlar önerilmiştir. Sabit uzunlukta dizilerin kullanımı yönteminde sözde rassal sayı üreticinin tüm periyodu eşit uzunlukta çok sayıda diziye bölünür ve her bir rassallık kaynağı için farklı bir dizi atanır. “Leap frogging” yönteminde ise benzer bir şekilde üreticinin tüm periyodu  $k$  diziye bölünür. Ancak bu diziler, birinci dizi  $x_1, x_{k+1}, x_{2k+1}$  sıralı rassal sayıları, ikinci dizi  $x_2, x_{k+2}, x_{2k+2}$  sıralı rassal sayıları üretecek şekilde oluşturulur. Her iki yöntemde de dizi sayısı arttıkça üreteçlerin “rassallıkları” azalmaktadır. Bir diğer yaklaşım ise dizilerin başlangıç noktalarını rassal olarak belirlemek amacıyla başka bir sözde-rassal sayı üreticiden faydalanmaktır [35–37]. Literatürde ayırma tekniğinin kullanımı için birçok yaklaşım bulunmaktadır [38–42]. Günümüzde birçok ticari yazılım da ayırma tekniği kullanan sözde rassal sayı üreteçlerinden faydalanmaktadır [4].

Paralel simülasyonlarda kullanılan bir diğer rassal sayı üretimi yöntemi ise, her bir paralel kaynakta farklı sözde-rassal sayı üretici kullanımınıdır [4, 35]. Bu yöntemde aynı yapıdaki bir rassal sayı üreticinin farklı parametreler ile kullanımı tercih edilebildiği gibi farklı tipteki rassal sayı üreteçlerinin kullanımının örnekleri de bulunmaktadır [43–47]. Ancak bu yöntem kullanım zorluğu ve çok sayıda “başarılı” parametre kümesinin bulunmaması nedeniyle sık tercih edilmemektedir [4, 35].

Paralel rassal sayı üretimi, başlangıçlı birkaç on yıl öncesine dayanan, göreceli olarak yeni bir konudur [37]. Dağıtık simülasyon uygulamalarında rassal sayı kullanımında temel prensipler aynı olduğundan, bu alanda uygulamaya ve dağıtık simülasyon sorunlarının

kapsamına özel çalışmalar dışında, yazarların bilgisi dahilinde bir çalışma bulunmamaktadır.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada analiz simülasyonu uygulamalarında ihtiyaç duyulan ve sıkça kullanılan doğrusal sözde rassal sayı üreticileri hakkındaki literatürün bir özeti sunulmuştur. Rassal sayı üreticinin seçimi, kullanım şekli, doğruluğu gibi kararlar, hazır bir simülasyon yazılımının kullanım etkinliğini etkileyebileceği gibi, analiz amaçlı bir simülasyon yazılımının geliştirilmesi aşamasında da gerek model tasarımcısı, gerekse yazılım geliştirici tarafından ihtiyaç duyulacak bilgilerdir. Bu ihtiyaca cevap verecek şekilde, farklı sözde rassal sayı üretici tipleri ve bu üreticilerin değerlendirilmesi için kullanılan testler hakkında bilgi verilmiş, daha detaylı çalışmalar için başlangıç teşkil edebilecek önemli referans çalışmalar işaret edilmiştir.

Son olarak dağıtık simülasyon uygulamalarında rassal sayıların kullanımı ve bu konuda karşılaşılan problemlerin olası çözüm yöntemleri ile ilgili bir özet verilmiştir. Görece yeni olan bu alandaki girişimler, mevcut rassal sayı üretici altyapılarının uyumlandırılmasını gerektirmektedir. Paralel ve dağıtık simülasyon geliştiricilerin, uygulamalarında tekrarlanabilirliği etkileyen eş zamanlı olayların yönetimi gibi faktörleri de göz önünde bulundurarak paralel rassal sayı kullanımının etkilerini analiz etmeleri, problem tanımlarına uygun bir uyarlama gerçekleştirmeleri gerekmektedir.

## 6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 115A044 numaralı proje ile desteklenmiştir.

## 7. KAYNAKÇA

- [1] Kasım, B., Gözütok, M. ve Oğuztüün, H. (2009), Simülasyon uygulamalarında rastlantısal sayı kullanımı, *Üçüncü Ulusal Savunma Uygulamaları Modelleme Ve Simülasyon Konferansı* 1-11.
- [2] Law, A.M. (2013), *Simulation modeling and analysis*, McGraw-Hill Education.
- [3] L'Ecuyer, P. (1990), Random Numbers for Simulation, *Commun. ACM*, 33, 85–97. DOI: 10.1145/84537.84555.
- [4] L'Ecuyer, P. (2017), History of uniform random number generation, *2017 Winter Simulation Conference (WSC)* 202-230.
- [5] L'Ecuyer, P. (2001), Software for Uniform Random Number Generation: Distinguishing the Good and the Bad, *Proceedings of the 33th Winter Simulation Conference* 95–105.
- [6] Lehmer, D.H. (1951), Mathematical methods in large-scale computing units, *Annu. Comput. Lab. Harvard Univ.*, 26, 141–146.
- [7] Hull, T.E. ve Dobell, A.R. (1962), Random number generators, *SIAM review*, 4, 230–254.
- [8] L'Ecuyer, P. (1988), Efficient and Portable Combined Random Number Generators, *Commun. ACM*, 31, 742–751. DOI: 10.1145/62959.62969.

- [9] Lewis, P.A.W., Goodman, A.S. ve Miller, J.M. (1969), A Pseudo-random Number Generator for the System/360, *IBM Syst. J.*, 8, 136–146. DOI: 10.1147/sj.82.0136.
- [10] Park, S.K. ve Miller, K.W. (1988), Random Number Generators: Good Ones Are Hard to Find, *Commun. ACM*, 31, 1192–1201. DOI: 10.1145/63039.63042.
- [11] Rotenberg, A. (1960), A New Pseudo-Random Number Generator, *J. ACM*, 7, 75–77. DOI: 10.1145/321008.321019.
- [12] Wu, P.-C. (1997), Multiplicative, Congruential Random-number Generators with Multiplier  $+2^K1$   $\pm 2^K2$  and Modulus  $2^P - 1$ , *ACM Trans. Math. Softw.*, 23, 255–265. DOI: 10.1145/264029.264056.
- [13] L'Ecuyer, P. (1999), Tables of linear congruential generators of different sizes and good lattice structure, *Mathematics of Computation*, 68, 249-261. DOI: 10.1090/S0025-5718-99-00996-5.
- [14] Franklin, J.N. (1964), Equidistribution of matrix-power residues modulo one, *Mathematics of Computation*, 18, 560–568.
- [15] Grothe, H. (1987), Matrix generators for pseudo-random vector generation, *Statistische Hefte*, 28, 233-238. DOI: 10.1007/BF02932602.
- [16] Niederreiter, H. (1986), A pseudorandom vector generator based on finite field arithmetic, *Math. Japonica*, 31, 759–774.
- [17] L'Ecuyer, P. ve Panneton, F. (2005), Fast Random Number Generators Based on Linear Recurrences Modulo 2: Overview and Comparison, *Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2005*. 110-119.
- [18] L'Ecuyer, P., Blouin, F. ve Couture, R. (1993), A search for good multiple recursive random number generators, *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 3, 87-98. DOI: 10.1145/169702.169698.
- [19] L'Ecuyer, P. (1994), Uniform random number generation, *Annals of Operations Research*, 53, 77-120. DOI: 10.1007/BF02136827.
- [20] Niederreiter, H. (1992), Random Number Generation and Quasi-Monte Carlo Methods, Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [21] Deng, L.-Y. ve Lin, D.K.J. (2000), Random Number Generation for the New Century, *The American Statistician*, 54, 145. DOI: 10.2307/2686034.
- [22] Matsumoto, M. ve Nishimura, T. (1998), Mersenne twister: a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator, *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 8, 3-30. DOI: 10.1145/272991.272995.
- [23] Wichmann, B.A. ve Hill, I.D. (1982), Algorithm AS 183: An Efficient and Portable Pseudo-Random Number Generator, *Applied Statistics*, 31, 188. DOI: 10.2307/2347988.
- [24] L'Ecuyer, P. (1996), Combined Multiple Recursive Random Number Generators, *Operations Research*, 44, 816-822. DOI: 10.1287/opre.44.5.816.
- [25] L'Ecuyer, P. (1999), Good Parameters and Implementations for Combined Multiple Recursive Random Number Generators, *Operations Research*, 47, 159-164. DOI: 10.1287/opre.47.1.159.
- [26] L'Ecuyer, P. (1992), Testing random number generators, *Proceedings of the 24th conference on Winter simulation - WSC '92* 305-313.
- [27] Pearson, K. (1900), X. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 50, 157-175. DOI: 10.1080/14786440009463897.
- [28] Sheskin, D.J. (2003), Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures, crc Press.
- [29] Knuth, D.E. (1981), The Art of Computer Programming, Volume II: Seminumerical Algorithms, 2nd Edition, Addison-Wesley.
- [30] Bratley, P., Fox, B.L. ve Schrage, L.E. (2011), A Guide to Simulation, Springer Science & Business Media.
- [31] Ripley, B.D. (1983), The Lattice Structure of Pseudo-Random Number Generators, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 389, 197-204. DOI: 10.1098/rspa.1983.0103.
- [32] Fujimoto, R.M. (1997), Zero lookahead and repeatability in the high level architecture, *Proceedings of the 1997 Spring Simulation Interoperability Workshop*.

- [33] Kiesling, T., Lüthi, J. ve El Abdouni Khayari, R. (2005), Bias in Parallel and Distributed Simulation Systems, *Proceedings of the 37th Conference on Winter Simulation* 384–393.
- [34] L’Ecuyer, P. (2015), Random number generation with multiple streams for sequential and parallel computing, *2015 Winter Simulation Conference (WSC)* 31-44.
- [35] L’Ecuyer, P., Munger, D., Oreshkin, B. ve Simard, R. (2017), Random numbers for parallel computers: Requirements and methods, with emphasis on GPUs, *Mathematics and Computers in Simulation*, 135, 3-17. DOI: 10.1016/j.matcom.2016.05.005.
- [36] Brugger, C., Weithoffer, S., de Schryver, C., Wasenmüller, U. ve Wehn, N. (2014), On parallel random number generation for accelerating simulations of communication systems, *Advances in Radio Science*, 12, 75–81. DOI: 10.5194/ars-12-75-2014.
- [37] Eddy, W.F. (1990), Random number generators for parallel processors, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 31, 63-71. DOI: 10.1016/0377-0427(90)90336-X.
- [38] L’Ecuyer, P., Simard, R., Chen, E.J. ve Kelton, W.D. (2002), An Object-Oriented Random-Number Package with Many Long Streams and Substreams, *Operations Research*, 50, 1073-1075. DOI: 10.1287/opre.50.6.1073.358.
- [39] L’Ecuyer, P. (2004), SSJ: A Java library for stochastic simulation. Software user’s guide.
- [40] Wikramaratna, R. (2000), Pseudo-random number generation for parallel Monte Carlo-a splitting approach, *SIAM News*, 33, 1–5.
- [41] Steele, G.L., Lea, D. ve Flood, C.H. (2014), Fast splittable pseudorandom number generators, *Proceedings of the 2014 ACM International Conference on Object Oriented Programming Systems Languages & Applications - OOPSLA ’14* 453-472.
- [42] L’Ecuyer, P., Munger, D. ve Kemerchou, N. (2015), *clRNG: A Random Number API with Multiple Streams for OpenCL*, Technical Report, URL:<http://www.iro.umontreal.ca/~lecuyer/myftp/papers/clrng-api.pdf>.
- [43] Mascagni, M. ve Srinivasan, A. (2000), Algorithm 806: SPRNG: A Scalable Library for Pseudorandom Number Generation, *ACM Trans. Math. Softw.*, 26, 436–461. DOI: 10.1145/358407.358427.
- [44] Saito, M. ve Matsumoto, M. (2013), Variants of Mersenne Twister Suitable for Graphic Processors, *ACM Trans. Math. Softw.*, 39, 12:1–12:20. DOI: 10.1145/2427023.2427029.
- [45] Durst, M.J. (1989), Using Linear Congruential Generators For Parallel Random Number Generation, *1989 Winter Simulation Conference Proceedings* 462-466.
- [46] Gao, S. ve Peterson, G.D. (2013), GASPRNG: GPU accelerated scalable parallel random number generator library, *Computer Physics Communications*, 184, 1241-1249. DOI: 10.1016/j.cpc.2012.12.001.
- [47] Manssen, M., Weigel, M. ve Hartmann, A.K. (2012), Random number generators for massively parallel simulations on GPU, *The European Physical Journal Special Topics*, 210, 53-71. DOI: 10.1140/epjst/e2012-01637-8.

# ETKİNLİK DEĞERLENDİRME AMAÇLI ASKERİ ANALİZ SİMÜLASYONLARI İÇİN BİR SİSTEM AKIŞ ÖRÜNTÜSÜ ÖNERİSİ

Gökçe Özkan <sup>(a)</sup>, Erkin Çilden <sup>(a)</sup>, Emre Gültekin <sup>(a)</sup>,  
Ahmet Sezer <sup>(a)</sup>, Haluk Canberi <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Tic. A.Ş., Ankara,  
{gokce.ozkan, erkin.cilden, egultekin, asezer, hcanberi}@stm.com.tr

## ÖZ

Bu çalışmada askeri taktiksel analizlerde sıkça faydalanılan simülasyon uygulamaları için referans bir sistem akış örüntüsü önerilmektedir. Önerilen sistem akış örüntüsü deney tasarımı, sözde-rassal sayı üreteçleri, istatistiksel analizler gibi yöntemlerden faydalanılarak istatistiksel geçerliliği yüksek sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamaktır. Ayrıca, taktiksel analiz problemlerine karar desteği sağlamak amacıyla önerilen sistem akış örüntüsüne çok kriterli karar verme yöntemlerini kullanan bir analiz safhası dahil edilmiştir. Önerilen sistem akış örüntüsü örnek bir güdümlü mermi angajman senaryosu kullanılarak gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Askeri analiz simülasyonu, etkinlik değerlendirme, güdümlü mermi angajman senaryosu, karar destek amaçlı simülasyon, sistem akış örüntüsü.

## A SYSTEM FLOW PATTERN PROPOSAL FOR MILITARY EFFECTIVENESS ANALYSIS SIMULATIONS

### ABSTRACT

In this study, a reference system flow pattern is proposed for simulation applications which are frequently used in military tactical analysis. The proposed system flow pattern aims to provide statistically valid results by using methods such as experimental design, pseudo-random number generators and statistical analysis. In addition, an analysis phase that utilizes multi-criteria decision-making methods is included in the proposed system flow pattern to provide decision support for tactical analysis problems. The proposed system flow pattern is illustrated using a sample guided missile engagement scenario.

**Keywords:** effectiveness analysis, guided missile engagement scenario, military analysis simulation, system flow pattern, simulation for decision support.

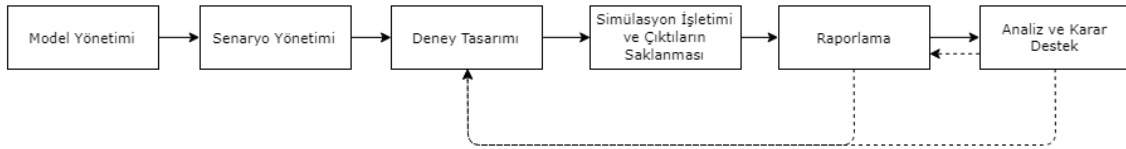
## 1. GİRİŞ

Simülasyonlar, başka koşullar altında test edilmesi maliyetli olan sistemlerin analizinde yüksek istatistiksel geçerliliğe sahip sonuçların elde edilmesi amacıyla sıkça kullanılmaktadır. Taktik denemeleri, tedarik, modernizasyon ve tasarım kararlarının verilmesi gibi problemlerin çözümünü gerektiren askeri analiz problemlerinin çözümünde de simülasyonların kullanımı oldukça yaygındır. Bu problemler, maliyetin minimizasyonunun yanı sıra sistemin bekasının sağlanması, ateş gücünün maksimize edilmesi gibi, aynı anda optimize edilemeyen birçok farklı amacı içerebilmektedir. Ancak literatürde simülasyonun bir araç olarak kullanıldığı çalışmalar, genellikle tek bir amacın optimizasyonuna odaklanmaktadır [1, 2, 3]. Birden fazla amacın gözetildiği çalışmalarda ise simülasyon uygulamaları tercih edilmemektedir [4, 5].

Bu bildiride askeri analiz problemlerinde kullanılmak üzere istatistiksel geçerliliği yüksek sonuçların elde edilmesinin yanı sıra Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin kullanımıyla birden çok fazla amacın birlikte optimize edilmesine imkan sağlayan bir sistem akış önerisi önerilmiştir. Bildirinin ikinci bölümünde önerilen sistem akış örüntüsü tanımlanmıştır. Bölüm 3, önerilen sistem akış örüntüsünün örnek bir senaryo üzerinde uygulamasına yer vermektedir. Bölüm 4 ile bildiri sonlandırılmıştır.

## 2. ÖNERİLEN SİSTEM AKIŞ ÖRÜNTÜSÜ

Bu çalışmada, birden fazla performans kriterinin değerlendirilmesini gerektiren askeri analiz problemlerinin çözümünde faydalanılacak olan simülasyon uygulamaları için geliştirilen bir akış örüntüsü önerilmektedir. Önerilen akış örüntüsü, çözümlenecek problem için ihtiyaç duyulan modellerin tanımlanması aşamasından sonuçların analiz edilmesine kadar olan tüm aşamaları içermektedir. Önerilen sistem akış örüntüsü Şekil 1’de gösterilmiştir. Örüntüyü oluşturan aşamalar hakkında detaylı bilgi takip eden alt başlıklarda sağlanmıştır.



Şekil 1. Sistem akış örüntüsü

### 2.1. Model Yönetimi

Model yönetimi aşamasında ilgili senaryo kapsamında kullanılacak modellerin belirlenmesi ve tanımlanması işlemleri gerçekleştirilmektedir. Senaryoya dahil edilecek modellerin tasarımı ve ilgili model parametrelerinin belirlenmesi de model yönetimi kapsamında gerçekleştirilmektedir.

Model tasarımı, geliştiricilerin ilgili modellerin işlevlerini, modellerin kullanacağı parametre kümelerini, model bazlı performans ölçüleri gibi model özniteliklerini tanımlamasını içermenin yanında aynı zamanda takip edilecek modelleme yaklaşımının da belirlendiği aşamadır. Kullanılabilecek modelleme yaklaşımları için [6-8] referanslarına başvurulabilir. Tercih edilen modelleme yaklaşımına uygun olacak şekilde modellere arası ilişkilere bağlı performans ölçüleri ve diğer öznitelikler de bu aşamada tanımlanmalıdır.

Son olarak deney tasarımı aşamasında faktör olarak kullanılabilecek model parametreleri ile değerleri olasılıksal dağılımlar yardımıyla belirlenebilecek model parametrelerinin seçimi kullanıcı ve/veya tasarımcı tarafından bu aşamada belirlenmektedir.

## **2.2. Senaryo Yönetimi**

Senaryo yönetimi, kullanıcının analiz etmek istediği baz senaryoyu tanımladığı aşamadır. Senaryo tanımlamak amacıyla, senaryonun gerçekleşeceği alan, senaryo başlangıç zamanı, ortam şartları gibi parametreler belirlenir. Bunlara ek olarak modellere tanımlanacak başlangıç olayları, modellerin takip edeceği şartlı davranışlar, senaryo sırasında gerçekleşmesi istenen harici olayların tanımları da bu aşamada yapılmalıdır.

Model parametrelerine benzer bir şekilde, senaryo parametrelerinin bir kısmı da deney tasarımında kullanılmak üzere faktör olarak seçilebileceği gibi rassal değişkenler olarak da tanımlanabilmektedir. Bu senaryo özniteliklerinin belirlenmesi de senaryo yönetimi aşamasında gerçekleştirilmelidir.

## **2.3. Deney Tasarımı**

Deney tasarımı aşamasında daha önceki aşamalarda belirlenen faktörler arasında seçim yapılarak bir faktör kümesi belirlenir. Önerilen sistem akış örüntüsü bir baz senaryo kullanılarak bir problemin varyasyonlarının analiz edilmesini hedeflemektedir. Bu nedenle, bir baz senaryo için birden fazla deney tasarımı tanımlanabilmesi öngörülmüştür. Bir senaryo için tanımlanan deney tasarımları birbirinden farklı faktör kümeleri içerebilmektedir.

Bu aşamada mevcut donanım altyapısı ve analiz gereksinimleri de göz önünde bulundurularak kullanılacak deney tasarımı tipine karar verilmelidir. Faktörler arası ilişkilerin önemli olduğu durumlarda tam faktöriyel tasarım ya da merkezi kompozit tasarım gibi daha büyük tasarımların tercih edilmesi uygun iken, sahip olunan işlem gücünün kısıtlı olduğu durumlarda Latin hiperküp tasarımlar gibi daha kompakt tasarımlar tercih edilebilmektedir [9-11].

Deney tasarımında kullanılacak faktör kümesi ve kullanılacak deney tasarımı tipi belirlendikten sonra, her bir faktörün test edilecek seviyeleri ve her bir deney için tekrar sayıları belirlenir. Tekrarlar arasındaki çeşitliliği sağlamak amacıyla kullanılacak olan rassal değişkenlerin sahip olduğu dağılımlar da bu aşamada kullanıcı tarafından sağlanır.

Rassal değişkenlerin her bir denemede alacağı değerlerin belirlenmesi için sözde rassal sayı üreticilerinden faydalanılması önerilmektedir. Bu üreticilerin kullanımı kontrollü bir rassallık sağlanmasına ve bu sayede sonuçların tekrarlanabilir olmasına olanak sağlamaktadır [12, 13]. Deney tasarımı aşamasında kullanılacak sözde rassal sayı üretici tarafından ihtiyaç duyulan başlangıç değerleri de kullanıcı tarafından sağlanmalıdır.

#### **2.4. Simülasyon İşletimi ve Çıktıların Saklanması**

Bir simülasyon işletimi aracı faktörlerin deney tasarımında tanımlanmış farklı kombinasyonlarının tamamı için baz senaryoya bağlı senaryo örnekleri oluşturur. Tüm senaryo örnekleri ve bu örneklerin tüm tekrarları sıralı olarak işletilebileceği gibi paralel ve dağıtık koşullar da gerçekleştirilebilir. Paralel ya da dağıtık koşulların tercih edildiği durumlarda, kullanılacak sözde rassal sayı üreticinin bu tip koşulların gereksinimleri göz önünde bulundurularak seçilmesi gerekmektedir [14].

Simülasyon işletimi sonucunda raporlama, analiz ve karar destek süreçlerinde kullanılacak çıktıların saklanması gerekmektedir. Bu süreçlerin doğası gereği kullanılacak çıktıların farklı özelliklere sahip olabileceği öngörülmektedir. Örneğin raporlama aşamasında tek bir tekrarın sonuçları önem taşıyabilirken, analiz için tüm sonuçların toplaştırılması gerekebilmektedir. Bu çıktıların yanında, işletimde oluşabilecek hata verilerinin de saklanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Tüm bu verilerin yönetimi için veritabanı kullanımı gibi çözümlerin değerlendirilmesi önerilmektedir.

#### **2.5. Raporlama**

Raporlama aşamasında, simülasyon sonucu elde edilen çıktıların farklı yöntemlerden faydalanılarak kullanıcıya sunumu gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemlerden tek bir tekrarın animasyon yardımı ile görselleştirilmesini içerebileceği gibi, bir senaryo örneği ya da tüm senaryoya ait tekrarlar üzerinde gerçekleştirilecek istatistiksel analizleri de kapsayabilmektedir. Söz konusu istatistiksel analizler, seçilmiş çıktıların tekrarlar üzerinden varyasyonu, ortalaması, ortalamanın içinde bulunduğu güven aralıkları gibi tanımlayıcı istatistiklerin sunulması, faktörlerin ve faktörler arası etkileşimlerin etkilerinin hesaplanması ve tüm bu hesaplamaların grafikler yardımı ile görselleştirilmesi şeklinde gerçekleştirilebilir. Saklama çözümü olarak uygun bir metodun kullanılması durumunda sonuçların raporlanmasında sorgulardan da faydalanılabilir. Bu aşamada istenilen istatistiksel geçerliliğin sağlanmadığı durumlarda, deney tasarımı aşamasına geri dönülerek faktörlere yeni seviyeler eklenmesi ya da her bir senaryo örneği için yeni tekrarlar koşulması önerilmektedir.

#### **2.6. Analiz ve Karar Destek**

Askeri simülasyonların kullanıldığı problemlerin birçoğu, birden fazla performans ölçüsünün birden değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bu nedenle önerilen sistem akış örüntüsüne performans ölçülerinin çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak değerlendirildiği bir analiz ve karar destek aşaması eklenmiştir. Birden fazla çok kriterli



karar verme yönteminin yanı sıra diğer toplama yöntemlerinin kullanımına da olanak sağlamaları nedeniyle, önerilen sistem akış örüntüsünde etkinlik ağaçlarının [15-17] kullanımı tercih edilmiştir. Bu yöntemde değerlendirmede kullanılacak tüm performans ölçüleri hiyerarşik yapılarına göre bir ağaç yapısı şeklinde ifade edilmekte, bir üst seviyede aynı düğüme bağlı alt-düğümlerin değerlendirilmesi için çeşitli toplama teknikleri kullanılmaktadır. Önerilen yöntem ile ilgili daha ayrıntılı bilgi için okuyucular [18] numaralı referanstan faydalanabilir. Bu aşamada elde edilen çıktıların raporlanması için raporlama aşamasında kullanılan çözümden faydalanılması önerilmektedir.

### 3. ÖRNEK UYGULAMA

Bu bölümde önerilen sistem akış örüntüsünün, bir geminin kendisine angaje olmuş bir güdümlü mermiye karşı savunma yapmak amacıyla kullandığı samanın (İng., chaff) etkinliğinin ölçüldüğü bir senaryo üzerinde örnek uygulaması verilmiştir.

#### 3.1. Model Yönetimi

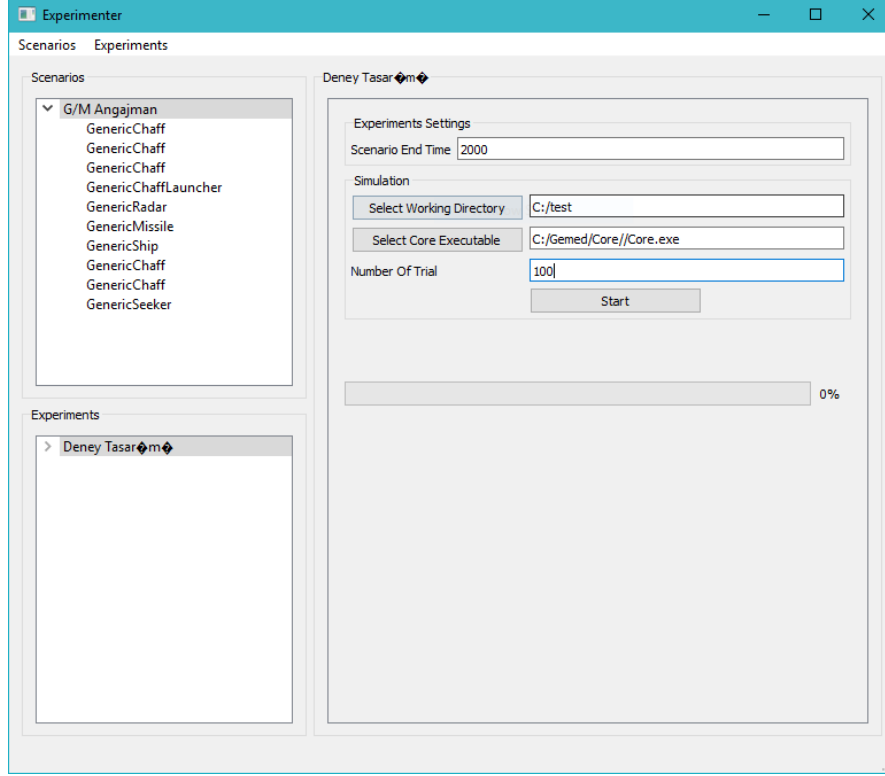
Analiz edilecek problemde ihtiyaç duyulan modeller, gemi modeli, gemi tarafında taşınan radar ve saman lançeri modelleri, gemi tarafından atılacak belirli sayıda saman modeli ve gemi için tehdit unsuru oluşturacak RF arayıcı başlığa sahip güdümlü mermi modeli olarak belirlenmiştir. Bu senaryonun modellenmesinde, etmen tabanlı modelleme yaklaşımı tercih edildiği için, tanımlanan tüm unsurlar birer etmen olarak modellenmiştir. Modellerin etkileşimlerini sağlamak amacıyla RF ve fiziksel olmak üzere birbirleri ile mekansal etkileşime sahip iki farklı çevre modeli tanımlanmıştır. Radar, güdümlü mermiye ait RF aracıyı başlık ve radar kesit alanına sahip unsurlar arasında RF dalgaları yoluyla gerçekleşen etkileşimler RF çevrede gerçekleşirken, diğer tüm etkileşimler fiziksel çevre aracılığıyla gerçekleşmektedir.

Deney tasarımında faktör olarak kullanılacak parametre kümesi saman atım programına ait parametreler olarak belirlenmiştir. Güdümlü merminin hareket modeline ait parametreler ise sağlam (İng., robust) sonuçlar elde edebilmek amacıyla rassal değişken olarak tanımlanabilecek parametre seti olarak seçilmiştir. Analiz edilecek performans ölçüleri ile ilgili bilgi Bölüm 3.6'da sağlanmıştır.

#### 3.2. Senaryo Yönetimi

Senaryonun geçeceği alan İzmir Körfezi olarak belirlenmiştir. Körfez içerisinde gemi ve güdümlü merminin başlangıç konumları, hızları ve yönelimleri tanımlanmıştır. Senaryo başlangıcında gemi radarı açık ve güdümlü mermi arayıcı başlığı gemiye angaje olmuş şekilde tanımlanmıştır. Senaryo başlangıcında gemi intikal halindedir. Senaryo esnasında, güdümlü mermi gemi radarı tarafından tespit edildiğinde gemi savunma davranışı gerçekleştirecek şekilde tanımlanmıştır. Savunma hareketinde gemi, deney tasarımı faktörleri tarafından belirlenen saman atım programı parametrelerine uygun

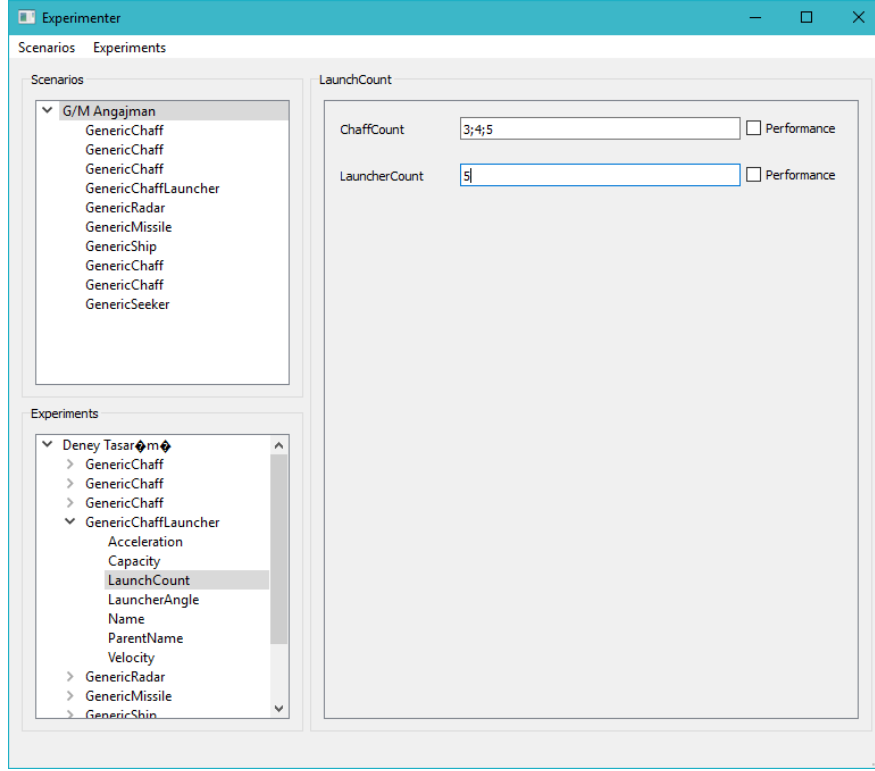
olacak şekilde saman atımı gerçekleştirmek üzere programlanmıştır. Senaryo yönetimi kullanıcı arayüzü Şekil-2’de görülebilmektedir.



Şekil 2. Senaryo yönetimi örnek kullanıcı arayüzü

### 3.3. Deney Tasarımı

Deney tasarımında kullanılacak faktörler saman atım sıklığı ve atılacak saman sayısı olarak belirlenmiştir. Bu iki faktör arasındaki ilişkinin analizi de gerçekleştirilmek istendiği için  $2^3$  faktöriyel deney tasarımının kullanımı tercih edilmiştir. Her bir faktör kombinasyonu için başlangıç olarak 100 tekrar tanımlanmıştır. Gülümlü mermiye ait motorun sahip olduğu itme kuvveti normal dağılıma sahip bir rassal değişken olarak tanımlanmıştır. Sözde rassal sayı üretici tarafından kullanılmak üzere gerekli olan başlangıç değerlerinin tanımlanmasıyla deney tasarımı aşaması sonlandırılmaktadır. Deney tasarımına ait kullanıcı arayüzü Şekil-3’te sunulmuştur.



Şekil 3. Deney tasarımı örnek kullanıcı arayüzü

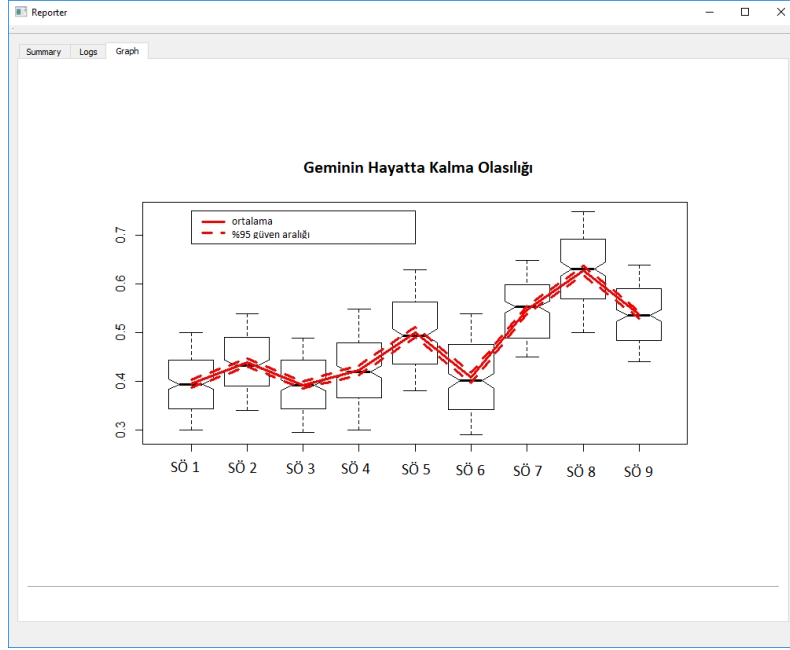
### 3.4. Simülasyon İşletimi ve Çıktıların Saklanması

Deney tasarımı, aynı zamanda simülasyon işletiminin de yönetildiği kısım olarak tasarlanmıştır. Burada, deneylerin kullanıcının yönlendirmesi ile tamamının veya bir kısmının artırımsal olarak koşturulması sağlanır. Bazı senaryo, faktörler ve seviyeleri tarafından tanımlanmış olan senaryo örnekleri (İng., instance) için tekrar sayısı kadar simülasyon motoru üzerinde koşturulmaktadır. Mevcut örnekte tüm koşullar merkezi işlemci üzerinde sıralı şekilde yapılmaktadır.

Senaryo koşumu sırasında, her etmen, tasarımcı tarafından tanımlanmış simülasyon çıktıları önceden belirlenmiş formatta oluşturularak dosya sistemine yazmaktadır. Simülasyon çıktıları, seçilen performans ölçüleri için ortalama, en yüksek/düşük değerler gibi tekrarlar arası bazı hesaplama sonuçlarını da içerir.

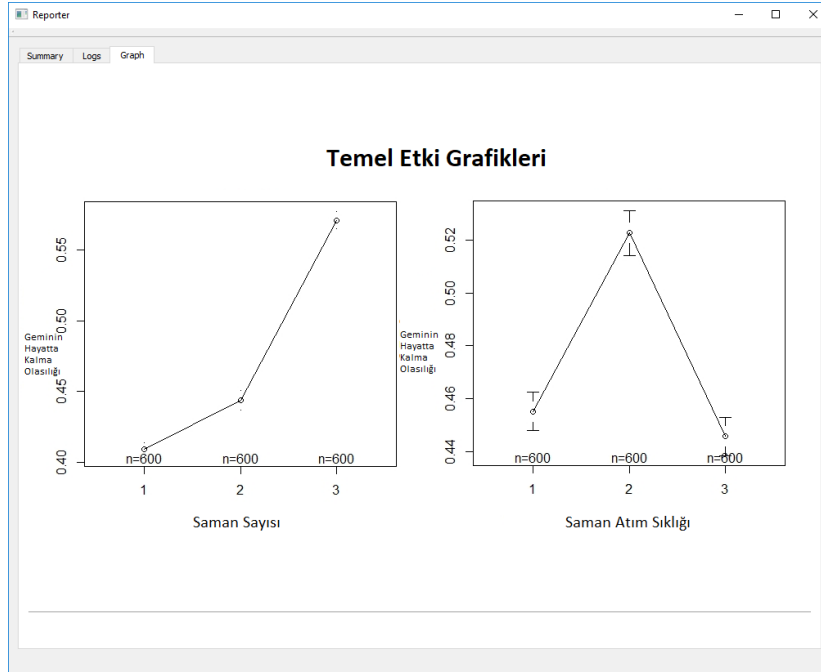
### 3.5. Raporlama

Raporlama aşamasında kullanılmak üzere geminin hayatta kalma olasılığı seçilmiştir. Saman atım programının farklı parametreleri için geminin hayatta kalma olasılığının tekrarlar üzerinden ortalamaları ve %95 güven aralığı sınırları Şekil 4'te sunulmuştur.

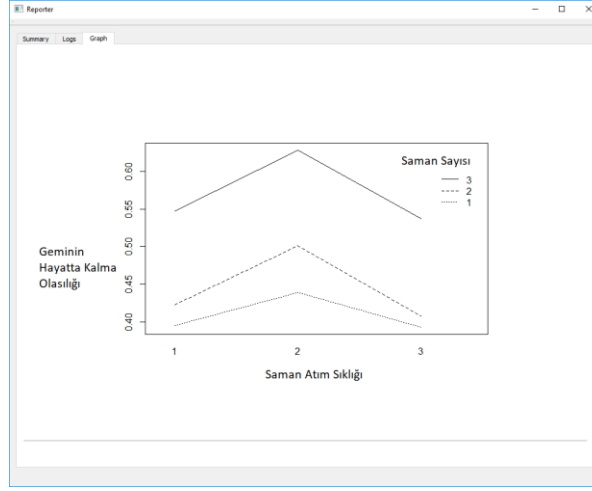


**Şekil 4.** Geminin hayatta kalma olasılığı istatistikleri

Faktörlerin ve faktörler arası etkileşimlerin geminin hayatta kalma olasılığı üzerindeki etkileri Şekil-5a ve 5b’de sunulmuştur.

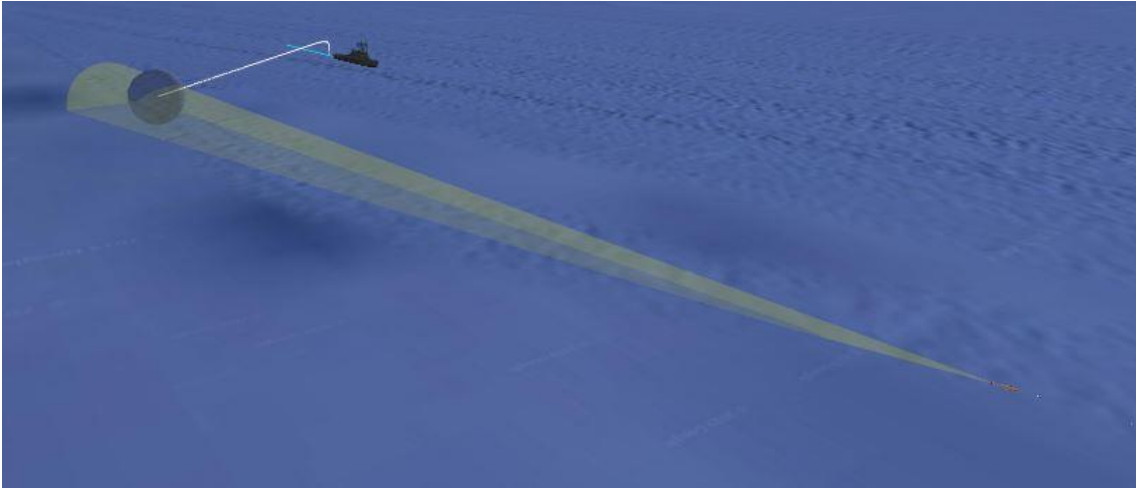


**Şekil 5.** Temel etki grafikleri



**Şekil 5b.** Etkileşim etkisi grafiği

Bu grafiklerden görülebileceği üzere saman atım sıklığının 2. Seviyesi ve atılacak saman sayısının 3. Seviyesinin kombinasyonu, geminin hayatta kalma olasılığı göz önünde bulundurulduğunda en etkili kombinasyon olmuştur. Bu kombinasyon için gerçekleştirilen tekrarlardan birinin SIMDIS SDK [19] kullanılarak gerçekleştirilmiş animasyonundan bir görüntü Şekil 6 da sunulmuştur.

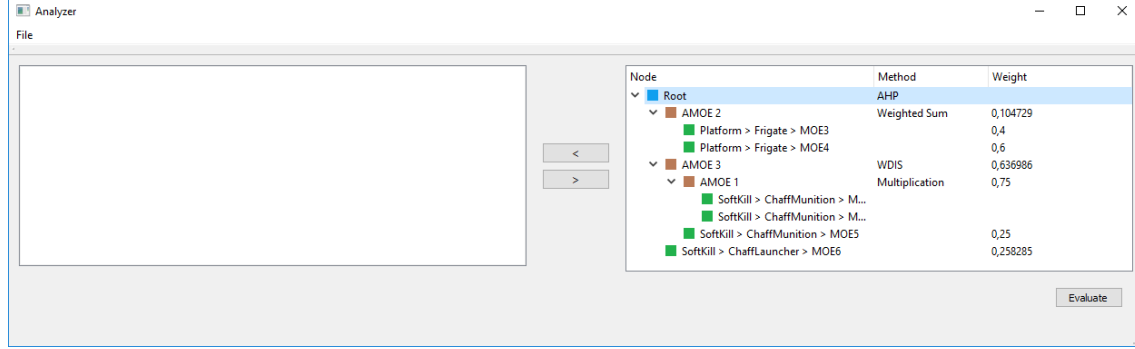


**Şekil 6.** SIMDIS SDK ile oluşturulmuş 3B görüntü

### 3.6. Analiz ve Karar Destek

Senaryonun analizinde kullanılmak üzere gemi, saman lançeri ve saman mühimmatına ait 7 adet çıktı performans ölçüsü olarak seçilmiş, anonim hale getirilerek sunulmuştur. Seçilen performans ölçüleri 3 ara etkinlik ölçüsü ve bir temel amaca ait etkinlik ölçüsünün bulunduğu bir etkinlik ağacı oluşturulmasında kullanılmıştır. Toplaştırma yöntemi olarak birinci ara etkinlik ölçüsü (AEÖ-1) için çarpım, AEÖ-2 için ağırlıklı toplam, AEÖ-3 için ise ideal çözüme uzaklık yöntemi tercih edilmiştir. Temel amaca ait etkinlik ölçüsünün hesaplanmasında kullanılacak ağırlıkların hesaplanmasında ise Analitik Hiyerarşi Süreci

yönteminde kullanılan ağırlık hesaplama metodu tercih edilmiştir. Yapılan analize ait kullanıcı arayüzü Şekil-7 de görülebilmektedir.



Şekil 7. Analiz kullanıcı arayüzü. Sol çerçeve, sağa taşınmadan önce, performans ölçülerinin listesini içerir.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, çözümünde askeri analiz simülasyonlarından faydalanılan tedarik, taktik değerlendirme, modernizasyon ve tasarım benzeri problemlere istatistiksel geçerliliği yüksek sonuçlar sağlayan bir karar destek yaklaşımı sağlamak amacıyla kullanılması hedeflenen bir sistem akış örüntüsü önerilmektedir. Önerilen sistem akış örüntüsü, model yönetimi, senaryo yönetimi, deney tasarımı, simülasyon işletimi, raporlama, analiz ve karar destek aşamalarını içermektedir. Son olarak, önerilen sistem akış örüntüsünün gösterimi amacı ile örnek bir güdümlü mermi angajmanı senaryosundan faydalanılmıştır.

#### 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından başlıklı, 115A044 numaralı proje ile desteklenmiştir.

#### 6. KAYNAKÇA

- [1] Nguyen, B. U. (2014), Assessment of a Ballistic Missile Defense System, *Defense & Security Analysis*, 30 (1), 4–16.
- [2] Seo, K.M., Song, H.S., Kwon, S.J. ve Kim, T.G. (2011), Measurement of Effectiveness for an Anti-torpedo Combat System Using a Discrete Event Systems Specification-based Underwater Warfare Simulator, *The Journal of Defense Modeling and Simulation*, 8 (3), 157–171.
- [3] Lei, Y., Zhu, Z., Li, Q., Yang, F. ve Zhu, Y. (2017), WESS: A Generic Combat Effectiveness Simulation System, *Proceedings of the 17th Asia Simulation Conference*, , 272–283.
- [4] Hootman, J. C. ve Whitcomb, C. (2005), A Military Effectiveness Analysis and Decision Making Framework for Naval Ship Design and Acquisition, *Naval Engineers Journal*, 117 (3), 43–61.
- [5] Na, S. S. ve Karr, D.G. (2016), Development of Pareto strategy multi-objective function method for the optimum design of ship structures, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 8 (6), 602–614.

- [6] Yılmaz, L. (2015), Concepts and Methodologies for Modeling and Simulation, Springer International Publishing, İsviçre.
- [7] Zeigler, B.P, Kim, T.G. ve Praehofer, H. (2000), Theory of Modeling and Simulation, Academic Press, Florida, ABD.
- [8] Macal, C.M. ve North M.J. (2008), Agent-based modeling and simulation: ABMS examples, *Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation*, 101-112.
- [9] Montgomery, D. (2017), *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons.
- [10] Kleijnen, J.P.C., Sanchez, S.M., Lucas, T.W. ve Cioppa T.M. (2005), *State-of-the-Art Review: A User's Guide to the Brave New World of Designing Simulation Experiments*, *INFORMS Journal on Computing*, 17(3), 263-289.
- [11] Kelton, W.D. (1999), Designing Simulation Experiments, *Proceedings of the 31st Conference on Winter Simulation: Simulation*, 1, 33-38.
- [12] L'Ecuyer, P. (2017), History of Uniform Random Number Generation, *Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference*, 13, 1-29.
- [13] L'Ecuyer, P. (1990). Random numbers for simulation. *Communications of the ACM*, 33(10), 85–97.
- [14] L'Ecuyer, P., Munger, D., Oreshkin, B. ve Simard, R. (2017). Random Numbers for Parallel Computers: Requirements and Methods, with Emphasis on GPUs, *Mathematics and Computers in Simulation*, 135, 3–17.
- [15] Dong, C., Wu, D. ve He, J. (2008), Study on Method of Satellite Navigation System Combat Effectiveness Evaluation Based on Rough Fuzzy Sets, *2008 Chinese Control and Decision Conference*, 3220-3223.
- [16] Dong, C., Wu, D. ve He, J. (2008), Decision Analysis of Combat Effectiveness Based on Rough Set Neural Network, *2008 Fourth International Conference on Natural Computation*, 7, 227-231.
- [17] Keeney, R.L. (1996), *Value-Focused Thinking*, Harvard University Press.
- [18] Özkan, G., Tural, M.K., Gültekin, E. ve Canberi, M. H. (2017), Muharebe Etkinlik Değerlendirme Modeli, *Yedinci Ulusal Savunma Uygulamaları Modelleme ve Simülasyon Konferansı Bildiri Kitabı*, 129-140.
- [19] U.S. Naval Research Laboratory (2019), The SIMDIS Software Development Kit (SDK), <https://github.com/USNavalResearchLaboratory/simdissdk>, Erişim Tarihi Mayıs 2019.

## KIZILÖTESİ SAHNE SİMÜLASYONUNDA İZ MODELLEME YAKLAŞIMLARI

Büşra Yılmaz<sup>(a)</sup>, Erkin Çilden<sup>(a)</sup>, Ahmet Sezer<sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Tic. A.Ş., Ankara,  
{busra.yilmaz, erkin.cilden, asezer}@stm.com.tr

### ÖZ

Modern kızılötesi sistemlerin gelişmesi ile birlikte farklı yaklaşım ve modelleme yöntemlerine sahip simülasyon sistemlerine ihtiyaç doğmuştur. Bu çalışmada, kızılötesi iz modelinin ana elemanları tanıtılmış ve sahne simülasyonunda iz modelleme ile ilgili literatür araştırması yapılmıştır. Geliştirilmiş model ve yaklaşımlar kullanılan sensör spektral bant aralığı, sadakat seviyesi, modellemede kullanılan atmosferik araç, kullanım amacı ve simülasyon zaman yönetimi açısından farklılık gösterebilmektedir. Bu karşılaştırma parametreleri göz önünde bulundurularak karşılaştırmalı bilgiler sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** ışınım, iz modelleme, kızılötesi imza, sahne simülasyonu.

## SIGNATURE MODELING APPROACHES IN INFRARED SCENE SIMULATION

### ABSTRACT

With the development of modern infrared systems, there has been a need for simulation systems with different approaches and modeling methods. In this study, the main elements of the infrared signature model were introduced and a literature search on signature modeling was performed in the scene simulation. Improved models and approaches can vary in terms of the sensor spectral band, fidelity level, atmospheric tool used in modeling, simulation type and simulation technique. Comparative information is presented considering these comparison parameters.

**Keywords:** radiance, signature modeling, infrared signature, scene generation.



## 1. GİRİŞ

Modern kızılötesi sistemlerin gelişimi ile birlikte kızılötesi iz tahmini ve sahne simülasyonunda farklı yaklaşımlar ve modeller geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Bu çalışmada CHAMP, CHORALE, DIRSIG, OSSIM, RISS, RTIRS, SAFIR, VIRSuite, SensorFX, Ondulus IR ve [1–3] referanslarında anlatılan modeller incelenmiş ve çalışma bandı aralığı, sadakat seviyesi, simülasyon zaman yönetimi, kullanım amacı ve modellemede kullanılan atmosferik araca göre sınıflandırılmıştır. İnceleme ve sınıflandırmalar yapılmadan önce, öncelikle kızılötesi iz modelinden bahsedilmiştir. İz tahmininde fiziksel modelin anlaşılması önem taşımaktadır. Bu nedenle kızılötesi sahnede yer alan kızılötesi iz katkıları açıklanmış ve kızılötesi iz eşitliği tanıtılmıştır. Sonrasında ise modelleri karşılaştırmak için kullanılacak parametreler açıklanmıştır.

Karşılaştırma parametrelerinden biri olan elektromanyetik çalışma bandı aralığı modelin kullanım amacına göre değişim göstermektedir. Elektromanyetik spektrum gama ışınları, X-ışınları, ultraviyole ışınlar, görünür ışın, kızılötesi, mikrodalga ve radyo dalgalarını kapsamakta olup bu çalışmada belirtilen bant aralıklarına sahip simülasyon sistemleri incelenmiştir.

Bir sonraki karşılaştırma parametresi kullanım amacıdır. Kullanım amacı, uygulamaya göre kapalı döngü içerisinde donanım desteği tabanlı simülasyon, kapalı döngü içerisinde insan desteği tabanlı simülasyon ve bilgisayar simülasyonu olmak üzere 3 ana kategoriye ayrılmaktadır.

İz tahmini ve sahne simülasyonunda, farklılık gösteren bir diğer parametre ise atmosferik etkileri modellemede kullanılan araçtır. Literatürde yapılan incelemeler sonucunda, MODTRAN, LOWTRAN, EOSAEL ve MATISSE olmak üzere dört farklı atmosferik araca rastlanmıştır.

Diğer bir karşılaştırma parametresi simülasyon zaman yönetimidir. Simülasyon zaman yönetimi, matematiksel modeli koşturmak için geçen gerçek zaman ile simülasyon zamanı arasındaki ilişkinin bir ifadesi olup, IR benzetimi çerçevesinde gerçek zamanlı simülasyon ve çevrimdışı simülasyon olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır.

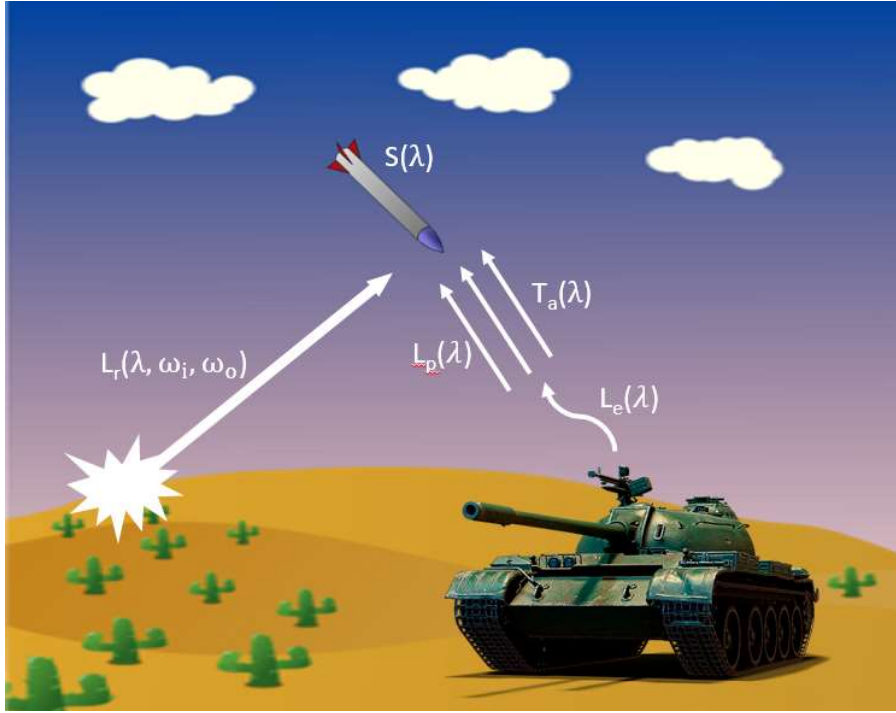
Yapılan çalışmada son olarak ise sahne simülasyonunda kullanılan modelin sadakat seviyesi incelenmiştir. Sadakat seviyesi, görece öznel bir kriter olup, oluşturulacak modelin kullanım alanına bağlıdır. Düşük sadakat seviyesine sahip modeller hız ve maliyet açısından fayda sağlarken, yüksek sadakat seviyesine sahip modeller yavaş olmasına karşın doğru ve kesin sonuçlar vermektedir.

## 2. KIZILÖTESİ İZ MODELLEME

İz tahmini kızılötesi sistem analizinde önem arz etmektedir. Doğru kızılötesi iz tahmini ise uygulamaya yönelik fiziksel modeli anlamakla gerçekleştirilebilir. Bu kısımda

kızılötesi iz modeline ait ana elemanlar tanıtılacak ve genel kızılötesi iz denklemi açıklanacaktır.

Kızılötesi iz, tüm kızılötesi spektrum boyunca nesne yüzeyinden yayılan, yansıyan ve iletilen sinyali ifade eder. Kızılötesi görüntüleme sistemlerinde, sensöre gelen ışınma nesnelerin termal kendinden yayılan ışınmaları ile çevredeki diğer kaynaklardan yansıyan ışınmaları içerir. Nesnenin termal yayılımı (emission), sıcaklık ve yayıcılığına (emissivity) bağlıken çevreden yansıyan ışınma güneş, gökyüzü ve arkaplanı içermektedir. Atmosferik iletim (transmittance), kızılötesi ışınmanın atmosferden geçerek nesneden sensöre doğru ilerlerken saçılma (scattering) ve soğurulma (absorption) nedeni ile zayıflamasıdır. Aynı zamanda atmosferin kendisi doğrudan bir ışınma kaynağı olup bu etki yol ışınması (path radiance) olarak tanımlanır ve sensöre giden ışınmaya katkı sağlar [9].



Şekil 1. Kızılötesi sahne yer alan kızılötesi iz katkıları

Gelen ışınmanın negatif yönü  $\omega_i$ , yansıyan ışınma yönü  $\omega_o$ , dalga boyu  $\omega_i$  olmak üzere; yüzeyden ayrılan ışınma  $L_o(\lambda, \omega_o)$ , termal yayılan spektral ışınma  $L_e(\lambda)$  ve yansıyan spektral ışınma  $L_r(\lambda, \omega_i, \omega_o)$  toplamına eşittir.

$$L_o(\lambda, \omega_o) = L_e(\lambda) + L_r(\lambda, \omega_i, \omega_o) \quad (1)$$

Termal yayılan spektral ışınma  $L_e(\lambda)$  ise Planck eşitliği kullanılarak hesaplanan karacisim spektral yayılan ışınma  $L_{BB}(\lambda, T)$  ve yarıküresel spektral yüzey yayma oranı  $\varepsilon(\lambda)$  çarpımına eşittir.

$$L_e(\lambda) = L_{BB}(\lambda, T)\varepsilon(\lambda) \quad (2)$$

Toplam yansıyan spektral ışımaya  $L_r(\lambda, \omega_i, \omega_o)$ , spektral solar dağılıp yansıyan ışımaya  $L_{solar/diffuse}(\lambda, \omega_i)$ , gökyüzü çevresel yansıyan ışımaya  $L_{sky/diffuse}(\lambda, \omega_i)$  ve sahne arka plan aynasal yansıyan ışımaya  $L_{bg/specular}(\lambda, \omega_i, \omega_o)$  toplamlarına eşittir.

$$L_r(\lambda, \omega_i, \omega_o) = L_{solar/diffuse}(\lambda, \omega_i) + L_{sky/diffuse}(\lambda, \omega_i) + L_{bg/specular}(\lambda, \omega_i, \omega_o) \quad (3)$$

Yüzey-sensor arasındaki spektral atmosferik iletim katsayısı  $\tau_a(\lambda)$ , yüzey-sensor arasındaki yol ışımaya  $L_p(\lambda)$  ve sensörün spektral normalize edilmiş spektral tepkisi  $S(\lambda)$  olmak üzere sensör tarafından tespit edilen spektral ışımaya  $L_s(\lambda, \omega_i, \omega_o)$ ,

$$L_s(\lambda, \omega_i, \omega_o) = [L_o(\lambda, \theta_r, \phi_r)\tau_a(\lambda) + L_p(\lambda)]S(\lambda) \quad (4)$$

şeklinde hesaplanır [9].

### 3. LİTERATÜR TARAMASI

Geçmiş 25 sene boyunca, kızılötesi iz tahmini ve sahne simülasyonunda değişik birçok yaklaşım ve model geliştirilmiştir. Kızılötesi sahne üretimi ülkeler açısından kritik teknolojiler olduğundan, literatürde bulunan bilgiler kısıtlı olabilmektedir. Belirtilen koşul altında, ticari ve akademik olarak geliştirilmiş modeller çalışma bandı aralığı, kullanım amacı, atmosferik yayılımı incelemede kullanılan araç, simülasyon zaman yönetimi ve sadakat seviyesi açısından karşılaştırılmış ve sınıflandırılmıştır. Bu çalışmada CHAMP, CHORALE, DIRSIG, OSSIM, RISS, RTIRS, SAFIR, VIRSuite, , Ondulus IR, [1–3] modelleri karşılaştırılmıştır. Modeller karşılaştırılmadan önce karşılaştırma parametrelerini incelemekte fayda vardır. Karşılaştırma parametreleri şu şekilde sıralanabilir:

#### 3.1. Elektromanyetik çalışma bandı aralığı

Gelişen algılayıcı sistem teknolojisi ile birlikte farklı elektromanyetik çalışma bandı aralıklarında çalışabilen simülasyon sistemleri önem kazanmıştır. Bu nedenle elektromanyetik çalışma bandı ve kullanım alanlarını incelemekte fayda vardır.

Elektromanyetik spektrum, radyo dalgalarından gama ışınlarına kadar olan aralığı kapsar. Bu aralıkta sırasıyla gama ışınları, X-ışınları, ultraviyole ışınlar, görünür ışın, kızılötesi, mikrodalga ve radyo dalgaları yer almaktadır. Elektromanyetik spektrumun farklı kısımları farklı askeri amaçlara hizmet etmektedir. Gama ışınları yüksek enerjiye sahip olup askeri alanlarda potansiyel nükleer olayların saptanmasında kullanılır. X-ışınları uçak gövdesinde bulunan çatlakların tespit edilip uçak yaşam döngüsünün devamlılığı amaçlı kullanılmaktadır. Kızılötesi ışımaya, istihbarat ve hedef tespiti amaçlı kullanılmaktadır [5]. Her nesne kendi sıcaklığının bir fonksiyonu olarak kızılötesi ışımaya yaymaktadır. Daha sıcak nesnelere daha yoğun kızılötesi ışımaya yayar. Görünür ve kızılötesi ışımaya arasındaki fark, görünür sahnelerde yansıma ve dış ışınım kaynağı ana parametrelerken kızılötesi ışımada nesnelere tarafından yayılan ışımaya, nesnenin kendi

sıcaklığı ile yayıcılık ve yansıtıcılık gibi yüzey materyal parametrelerine bağlıdır [1]. Mikrodalgalar ve radyo dalgaları ise genellikle radar ve uydu iletişimi için kullanılır [5].

### 3.2. Kullanım amacı

Uygulamaya bağlı olarak, simülasyon üç ana kategoride incelenebilir [1]:

1. **Kapalı döngü içerisinde donanım desteği tabanlı simülasyon (Hardware in the loop, HWIL):** HWIL simülasyon, simülasyon sürecinin bir parçası olarak gerçek bir sistem ya da sensör içerir. Deney odalarında, benzetilmiş hedef, arkaplan ve kontrollü çevre koşulları ile yapılır.
2. **Kapalı döngü içerisinde insan desteği tabanlı simülasyon (Human in the loop):** Kapalı döngü içerisinde insan desteği tabanlı simülasyon, insan etkileşimi gerektirir. Genellikle test yada operatör eğitimi amaçlı kullanılır. Bu tip simülasyonda gerçek sinyal üretimi gerçekleştirilmeden modellenen duruma oluşan tepki operatör tarafından okunur. Operatör simülasyon sırasında klavye, kumanda gibi cihazlarla etkileşime geçebilir.
3. **Bilgisayar simülasyonu (Computer Simulation):** Bu tip simülasyonda matematiksel modeller, hiçbir donanım ya da gerçek sistem kullanılmadan sadece bilgisayar üzerinden üretilir. Genellikle sensör dizaynı karşılaştırması yada önerilen dizaynın beklenen performansını hesaplamak için kullanılır.

### 3.3. Atmosfer modeli

Atmosferik etkileri modellemede kullanılan araçlar farklılık gösterebilmektedir. Bu çalışmada MODTRAN, LOWTRAN, EOSAEL ve MATISSE olmak üzere dört atmosferik araç incelenecektir:

1. **LOWTRAN:** LOWTRAN (LOW resolution TRANsmittance) modeli, Air Force Cambridge Research Laboratory (şimdi Air Force Geophysics Laboratory) tarafından 1972'de atmosferik iletimi modellemek için üretilen düşük çözünürlüklü ( $20 \text{ cm}^{-1}$ ) bir araçtır. Sonrasında, atmosferik iletme ek olarak ışıma hesapları da eklenmiştir [10].
2. **MODTRAN:** MODTRAN (MODerate resolution TRANsmittance) modeli, mikrodalga, kızılötesi, görünür ve yakın ultraviyole spektral alanlarda atmosferik iletim ve ışıma tahmini yapabilen bir araçtır. MODTRAN, LOWTRAN 7 ile aynı yeteneklere sahip olmasının yanı sıra, LOWTRAN'dan daha yüksek spektral çözünürlüğe sahiptir [10].
3. **EOSAEL:** Electro-Optical Systems Atmospheric Effects Library (EOSAEL) modeli, görünür, yakın kızılötesi, orta dalga kızılötesi, uzak kızılötesi ve milimetre dalga spektral alanlarında atmosferik yayılım etkilerini hesaplamaya yarayan bir araçtır [11, 13, 14].
4. **MATISSE:** Advanced Modeling of the Earth for Environment and Scenes Simulation (MATISSE) 1990ların ortalarında Onera tarafından geliştirilen kızılötesi arkaplan sahne üreticisidir. MATISSE,  $5 \text{ cm}^{-1}$  çözünürlükte 3 mikrometreden 13 mikrometreye kadar spektral bant genişliğine sahip olup bakış

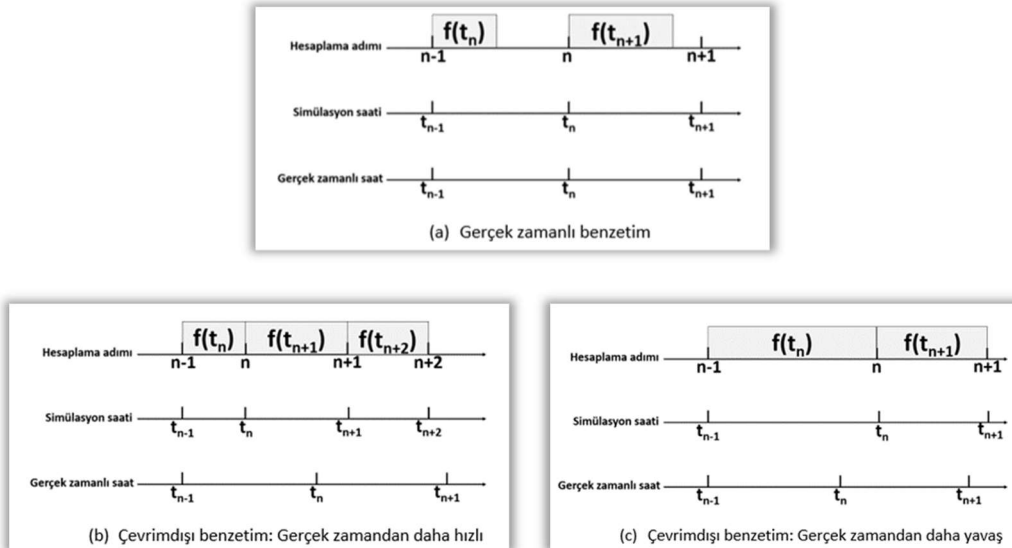
açısı (LOS) boyunca spektral iletim ve spektral ışımayı hesaplar [12, 15–17].

### 3.4. Simülasyon zaman yönetimi

Simülasyon zaman yönetimi; hesaplama adımı, simülasyon saati ve gerçek zamanlı saat arasındaki ilişkiyi ifade eder. Simülasyon zaman yönetimi, IR sahne benzetimi kapsamında gerçek zamanlı simülasyon ve çevrimdışı simülasyon olmak üzere iki kategoride incelenmektedir:

1. **Gerçek zamanlı simülasyon:** Gerçek zamanlı simülasyon, fiziksel bir sistemin gerçek duvar saati ile aynı hızda çalışabilen matematiksel modelini ifade eder [18]. Gerçek zamanlı saat, gerçek zaman ile simülasyon zamanının senkronizasyonundan sorumludur [19].
2. **Çevrimdışı simülasyon:** Ayrık zamanlı simülasyon boyunca, verilen bir zaman aralığında fiziksel bir sistemin matematiksel modelini oluşturmak için hesaplanacak tüm denklemler ve fonksiyonlar için gereken gerçek zaman, simülasyon zamanından uzun yada kısa olabilir. Bu simülasyon zaman yönetimi tekniği çevrimdışı simülasyon olarak tanımlanır [20, 21].

Şekil 2, gerçek zamanlı simülasyon ve çevrimdışı simülasyon zaman yönetimi tekniklerinin çalışma prensibini göstermektedir [20, 21]. Şekil 2(a)'da hesaplama zamanı belirli bir zaman aralığından daha kısadır. Bu tip simülasyon zaman yönetimi tekniğine hızlandırılmış simülasyon da denmektedir. Şekil 2(b)'de ise hesaplama zamanı belirli bir zaman aralığından daha uzun sürmektedir. Şekil 2(c)'de hesaplama zamanı ile simülasyon saati ile senkronize olup gerçek zamanlı simülasyonu ifade etmektedir.



Şekil 2. Simülasyon zaman yönetimi teknikleri [20, 21].

### 3.5. Model sadakat seviyesi

Kızılötesi sahne simülasyonunda sadakat iki anlama gelir. İlki doğruluk, ikincisi ise gerçekçiliktir. Doğruluk herhangi bir ölçümden okunan sonuçlar ile oluşturulan matematiksel modelin ne kadar yakın olduğu ile ilgilidir. Gerçekçilik ise simülasyon tarafından üretilen sahne ile gerçek sahne arasındaki benzerliğin boyutunu ifade eder. Oluşturulacak modelin sadakat seviyesi kullanıma bağlıdır. Düşük sadakat seviyesine sahip modeller daha düşük parametre sayısı içerirken, yüksek sadakat seviyeli modeller yüksek detay seviyesine sahip yapıları ve atmosferik etkileri içerebilmektedir. Fakat yüksek sadakat seviyesi daha fazla hesaplama karmaşıklığı ve daha uzun hesaplama sürelerini de beraberinde getirmektedir [23].

CHAMP, hava aracı ve arkaplana ait nesnelere yüksek sadakat seviyesinde simülasyonun yapılmasını sağlayan bir programdır. CHAMP, kapalı döngü dijital ve hardware in the loop simülasyon tekniklerinin kullanımı amacıyla gerçek zamanlı kızılötesi görüntülemeyi desteklemektedir. Kızılötesi iz hesaplamaları katı yüzeylerdeki emisyon ve yansımaları, hava araçlarının egzozundan yayılan ışımayı ve atmosferik yol etkilerini içermektedir. Atmosferik yol etkileri MODTRAN kullanılarak offline olarak elde edilen verilerin sonrasında gerçek zamanlı olarak işlenmesiyle oluşturulur [24].

CHORALE, kızılötesi, milimetrik radar ve akustik sensör tarafından gözlenebilen yer-yer, yer-hava, hava-hava, hava-yer ve deniz muharebe alanlarını modellemeyi sağlayan bir simülasyon aracıdır. Kullanıcının, sanal ve gerçekçi çok bantlı 3B sahneler yaratmasını ve sensör tarafından alınan fiziksel sinyalin üretimini sağlar. CHORALE'da kullanılan sistemler yer aracı, uçak, helikopter, gemi, füze ve uydu olarak sıralanabilir. Sahne üretiminde aşağıdaki çevresel yapıları içerebilmektedir:

- Hedef ya da karşı tedbir gibi aktif kaynaklar
- Gökyüzü, arazi, deniz gibi arkaplan yapıları,
- Optik ışın yayılımını içeren atmosfer,
- Güneş, ay, yıldızlar ve bulutları içeren gökyüzü.

CHORALE, güneş ve ay ışınım spektral verisini dalga boyu ve yükseklik girdilerine bağlı olarak; atmosferik yayılım ve gökyüzü ışınımını ise dalga boyu, yükseklik ve uzaklık girdilerine bağlı olarak; LOWTRAN ve MODTRAN yardımıyla hesaplar. Aynı zamanda termal gölgeleri de hesaplama yeteneğine sahiptir. CHORALE, gerçek zaman ve çevrimdışı simülasyon tekniklerinin ikisini de aynı 3B veri tabanını kullanarak oluşturabilir. Böylece zaman ve maliyet açısından kazanç sağlar [26, 28].

The Digital Imaging and Remote Sensing Image Generation (DIRSIG), ışın izleme algoritması kullanılarak çevrimdışı simülasyon ile fizik tabanlı sahne modellemeyi sağlayan bir araçtır. DIRSIG, görünür ve kızılötesi bantlarda yüksek radyometrik sadakat

seviyesine sahip çoklu ve hiperspektral görüntüler üretebilir. DIRSIG, atmosferik yayılım modelini oluşturmak için MODTRAN kullanır [22, 25, 29].

The Optronic Scene Simulator (OSSIM), görünür ve kızılötesi bantlarda çevrimdışı simülasyon ile sentetik görüntü üretebilen bir sahne simulatörüdür. OSSIM, elektro-optik sensörlerin ve görüntü işleme algoritmalarının (hedef tanıma ve takip) geliştirilmesinde, kızılötesi iz çalışmalarında, füze karşı tedbir sistemlerinde, sistem performans hesabı ve uçuş test hazırlık performans hesaplarında kullanılır. OSSIM, termal modeli yayılan ışımaya, dağılan ve yansıyan güneşsel ışımaya, yansıyan arkaplan ve gökyüzü ışımalarını içerir. OSSIM, spektral atmosferik zayıflama ve atmosferik yol ışımalarını hesaplamak için MODTRAN kullanır [27, 30].

Real-Time Infrared Scene Simulator (RISS), kızılötesi bantta yüksek çözünürlükte gerçek zamanlı sahne üretimini sağlayan bir araçtır. RISS, kızılötesi sensör sistemlerinin geliştirimi, entegrasyonu ve testlerini desteklemek için kullanılır. Atmosferik modeller, güneş ve gökyüzü ışımaları, atmosferik iletim ve yol ışımalarının LOWTRAN ve MODTRAN yardımıyla hesaplanmasıyla oluşturulur [31].

Real Time InfraRed Scenario Digital Simulator (RTIRS), kızılötesi bantta çalışan arama, takip ve görüntüleme ekipmanlarının laboratuvar testleri ve performans hesaplaması için geliştirilmiştir. Atmosferik modelin üretimi için LOWTRAN kullanılır. Atmosferik model, senaryo içinde yer alan iki nokta arasındaki atmosferik iletim ve ışımaların hesaplanması ile oluşturulur [32].

SAFIR, kara, hava ve deniz senaryoları için yüksek sadakat seviyesinde 3B sentetik görüntüler üretebilen bir simülasyon sistemidir. SAFIR, 0.3-25 um aralığındaki birçok elektro-optik sensör (hava ve uydu tabanlı, bant içi, çok bantlı, hiperspektral, lazer görüntü gibi) için görüntü/video oluşturabilir. Atmosferik hesaplamalar MATISSE (ONERA tarafından) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. MATISSE, güneş ve gökyüzü ışımalarının, görüş açısı boyunca atmosferik iletim ve yol ışımalarının hesaplanmasını sağlar [9, 17].

VIRSuite, gerçek-zamanlı ya da çevrimdışı olarak görünür ve kızılötesi bantlarda sahne üretimi sağlayan bir araçtır. Füze sistemlerinin arayıcı başlıklarının yüksek performansta kapalı döngü içerisinde donanım desteği tabanlı simülasyonlarının ve elektro-optik sistemlerin çevrimdışı simülasyonlarında kullanılmaktadır. VIRSuite, MODTRAN tarafından üretilen atmosferik iletim katsayısı, yol ışımaları ve gökyüzü ışımaları verileri çevrimdışı olarak hesaplar ve saklar. Planck denklemi kullanılarak elde edilen bant içi veriler çalışma zamanından önce hesaplanır. Su yansımaları için Fresnel kuralı yaklaşımı, arkaplan katkıları için küp haritalar ve farklı yüzey tipleri için BRDF yaklaşımı kullanılır [4, 6].

SensorFX, elektro-optik, kızılötesi ve gece görüşü gözlüğü (night vision goggles, NVG) tabanlı sahneler üretebilen bir araçtır. SensorFX, yüzeylerden yayılan ve yansıyan ışık

enerjisini, atmosferik iletimi ve algılayıcı cihazları gerçek zamanlı olarak ve hassas (accurate) sonuçlarla fiziksel olarak modellemeyi sağlar. SensorFX, 0.3-16 um aralığındaki sensörleri simüle etme yeteneğine sahiptir. Atmosferik etkileri modellemek için MODTRAN kullanılmıştır [7].

Ondulus IR, fizik tabanlı kızılötesi sensorler için yüksek sadakat seviyesinde simülasyon ve eğitim senaryoları sağlayan bir araçtır. Ondulus IR, gerçek zamanlı simülasyon zaman yönetim tekniği kullanmaktadır. Işıma, soğuma, kondüksiyon (conduction) ve konveksiyon (convection), kızılötesi iz hesaplamalarında Ondulus IR tarafından kullanılan parametrelerdir. Aynı zamanda günün herhangi bir zamanı, yılın herhangi bir günü, herhangi bir atmosferik koşul ve dünya üzerindeki herhangi bir lokasyonda kızılötesi iz hesaplamaları gerçekleştirilebilmektedir [8].

[2], uçaklar için geliştirilmiş gerçek zamanlı kızılötesi görüntü simülatör platformu hakkında bilgi vermektedir. Fizik tabanlı modeli oluşturmak için 3B uçak geometrisi modeli CFD (Computational Fluid Dynamics) FEM (Finite Element Method) ile çözülmüş ve uçağın yüzey sıcaklık alanı gerçek-zamanlı çözülmüştür. Sonrasında uçağın sıfır mesafeli kızılötesi modeli oluşturulmuş, atmosferik iletim modeli yardımıyla atmosferik sönümlenme etkileri eklenmiş ve sensöre ulaşan kızılötesi ışıma hesaplanmıştır. Son olarak ise kızılötesi görüntüleme sistem modeli ile görüntüleme sistemlerine ait çeşitli etkiler eklenmiş ve nihai kızılötesi görüntü elde edilmiştir. Yapılan çalışmada atmosferik iletim modelini tanımlamak için MODTRAN kullanılmıştır.

[3], büyük ölçekteki sahnelerin orta-dalga kızılötesi bantta görselleştirilmesi için BRDF modeli sunmaktadır. BRDF modeli güneşsel ve gökyüzü kaynaklı katkıları hesaplamak için kullanılır. Gökyüzünden yansıyan ışıma, atmosferik iletim ve yol ışıması MODTRAN aracılığı ile hesaplanır.

[1], pasif kızılötesi görüntüleyicili arayıcı başlıklı füzelerin hava hedefleri ile angajmanını benzetimlemek için geliştirilmiş bir algoritmayı tanımlamaktadır. Yapılan çalışmada, askeri hedefler, arkaplan ve atılabilir kızılötesi ısı fişeklerinin yüksek-sadakat seviyesinde fizik tabanlı kızılötesi izleri modellenmiştir. Atmosferik iletim ve gökyüzü ışıması LOWTRAN kullanılarak farklı hava koşulları için hesaplanmış ve taramalı tablolarda çalışma zamanında kullanılmak üzere saklanmıştır.

Tablo 1’de CHAMP, CHORALE, DIRSIG, OSSIM, RISS, RTIRS, SAFIR, VIRSuite, SensorFX, Ondulus IR, [1–3] referanslarında anlatılan modeller bant aralığı, sadakat seviyesi, simülasyon zaman yönetimi, kullanım amacı ve modellemede kullanılan atmosferik araç açısından karşılaştırılmıştır.



**Tablo 1.** Araçların karşılaştırması (- ile işaretli maddeler, belirsizlik, net olmayan bilgi, veya genel amaçlılık işaret eder)

	<b>Bant Aralığı</b>	<b>Sadakat</b>	<b>Simülasyon zaman yönetimi</b>	<b>Kullanım amacı</b>	<b>Atmosferik Araç</b>
<b>CHAMP</b>	Kızılötesi	Yüksek	Gerçek zamanlı	Closed loop / HWIL	MODTRAN
<b>CHORALE (2006)</b>	Görünür, kızılötesi, ışık, akustik, yüksek frekans	-	Gerçek zamanlı	HWIL / MIL	LOWTRAN
<b>CHORALE (1999)</b>	Kızılötesi, görünür, milimetrik radar, akustik	-	Gerçek zamanlı / çevrimdışı	-	LOWTRAN / MODTRAN / EOSAEL
<b>DIRSIG</b>	0.2-20 um (görünürden LWIR'a kadar)	Yüksek	Çevrimdışı	-	MODTRAN
<b>OSSIM</b>	0.2-20 um	-	Çevrimdışı	-	MODTRAN
<b>RISS</b>	Kızılötesi	-	Gerçek zamanlı	-	LOWTRAN / MODTRAN
<b>RTIRS</b>	Kızılötesi	-	Gerçek zamanlı	-	LOWTRAN
<b>SAFIR</b>	0.3-25 um	Yüksek	-	-	MATISSE
<b>VIRSuite</b>	Görünür ve kızılötesi	-	Gerçek zamanlı / çevrimdışı	HWIL	MODTRAN
<b>SensorFX</b>	0.3 – 16 um	Yüksek	Gerçek zamanlı	-	MODTRAN
<b>Ondulus IR</b>	Kızılötesi	Yüksek	Gerçek zamanlı	-	
<b>Ref. [2]</b>	3-5 ve 8-12 um	-	Gerçek zamanlı	-	MODTRAN
<b>Ref. [3]</b>	MWIR (3-5 um)	-	Gerçek zamanlı	-	MODTRAN
<b>Ref. [1]</b>	1-15 um	Yüksek	-	-	LOWTRAN

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada son 25 sene içerisinde kızılötesi iz tahmini ve sahne simülasyonunda kullanılan model ve yaklaşımlar incelenmiştir. Kullanılan model ve yaklaşımlar savunma uygulamaları açısından kritik olduğu için literatürden elde edilen bilgiler bazı alanlarda kısıtlı olmuştur. Belirtilen koşul altında incelenen model ve yaklaşımlar çalışma bandı aralığı, kullanım amacı, atmosferik yayılımı incelemede kullanılan araç, simülasyon zaman yönetimi ve sadakat seviyesi açısından karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda tüm modellerin kızılötesi bant aralığında çalışabildiği gözlemlenmiştir. Sıklıkla kullanılan atmosferik araçların MODTRAN ve LOWTRAN olduğu, simülasyon zaman yönetimi olarak da sıklıkla gerçek zamanlı simülasyon tercih edildiği görülmüştür.

Model sadakat seviyesi ve kullanım amacı için daha kısıtlı bilgiler elde edilmiştir. Sadakat seviyesi bilgisine erişilebilen modeller ise CHAMP, DIRSIG, SAFIR, SensorFX, Ondulus IR ve [1] olup yüksek sadakat seviyesine sahip modellerdir.

## 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 115A044 numaralı proje ile desteklenmiştir.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] Baqar, S. (2007), *Low-cost PC-based high-fidelity infrared signature modelling and simulation*, Cranfield University.
- [2] Li, N., Su, Z., Chen, Z. ve Han, D. (2013), A real-time aircraft infrared imaging simulation platform, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 124, 17 (2013), 2885-2893. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2012.08.083>.
- [3] Xin, W., Jianqi, Z., Yang, C. ve Xi, H. (2015), Real-time mid-wavelength infrared scene rendering with a feasible BRDF model, *Infrared Physics & Technology*, 68, (2015), 124-133. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.infrared.2014.11.011>.
- [4] Williams, O.M., Christie, C.L., Shen, G., Gouthas, E. ve Swierkowski, L. (2010), Real-time scene generation infrared radiometry, (Orlando, Florida, 2010), 76630N.
- [5] Hoehn, J.R. (2019), Defense Primer: Military Use of the Electromagnetic Spectrum.
- [6] VIRsuite Real-time Visible and Infra-red scene generator: (2019), <https://www.dst.defence.gov.au/publication/virsuite-real-time-visible-and-infra-red-scene-generator>.
- [7] SensorFX: (2019), <https://www.mak.com/products/visualize/sensorfx>, Accessed: 2019-05-30.
- [8] Ondulus IR: (2019), <https://www.presagis.com/en/product/ondulus-ir/>, Accessed: 2019-05-31.
- [9] Kavak, Ç. (2014), *GPU based infrared signature modeling and scene simulation*, Middle East Technical University.
- [10] Wright, J.C. (1991), *Evaluation of Lowtran and Modtran for Use Over High Zenith Angle/Long Path Length Viewing*, AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSON AFB OH.
- [11] Richard C Shirkey (1988), Determination Of Atmospheric Effects Through Eosael, (1988).
- [12] Simoneau, P., Caillault, K., Fauqueux, S., Huet, T., Krapez, J.C., Luc Labarre, Claire Malherbe ve Christophe Miesch (2006), MATISSE: version 1.4 and future developments, (2006).
- [13] Richard C. Shirkey ve Louis D. Duncan (1982), The Electro-Optical Systems Atmospheric Effects Library, (1982).
- [14] Modeling, Simulation and Data Management Division (1995), *EOSAEL For Windows Final Report*, Mission Research Corporation.
- [15] Pierre Simoneau, Roland Berton, Karine Caillault, Gerard Durand, Thierry Huet, Luc Labarre, Claire Malherbe, Christophe Miesch, Antoine Roblin ve Bernard Rosier (2002), MATISSE: advanced Earth modeling for imaging and scene simulation, (2002).
- [16] Luc Labarre, Karine Caillault, Sandrine Fauqueux, Claire Malherbe, Antoine Roblin, Bernard Rosier ve Pierre Simoneau (2010), An overview of MATISSE-v2.0, (2010).
- [17] Dumont, R., Robert, T., Verdavaine, Y., Lapierre, F., Acheroy, M. ve Marcel, J. (2007), SAFIR, a testbed for maritime simulation, *3rd International IR Target, Background Modelling & Simulation (ITBMS) Workshop* (2007).
- [18] Worschech, N. ve Mikelsons, L. (2012), A toolchain for real-time simulation using the OpenModelica compiler, *Proceedings of the 9th International MODELICA Conference; September 3-5; 2012; Munich; Germany* (2012), 839-846.
- [19] Cellier, F.E. ve Kofman, E. (2006), Continuous system simulation, Springer Science & Business Media.
- [20] Nguyen, V.H., Besanger, Y., Tran, Q.T., Boudinnet, C., Nguyen, T.L., Brandl, R. ve Strasser, T.I. (2017), Using Power-Hardware-in-the-Loop Experiments together with Co-simulation for the Holistic Validation of Cyber-Physical Energy Systems, (2017).

- [21] Belanger, J., Venne, P. ve Paquin, J.-N. (2010), The what, where and why of real-time simulation, *Planet Rt*, 1, 1 (2010), 25–29.
- [22] Goodenough, A.A. ve Brown, S.D. (2017), DIRSIG5: Next-Generation Remote Sensing Data and Image Simulation Framework, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10, 11 (2017), 4818-4833. DOI:<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2758964>.
- [23] Baqar, S., Jenkin, R., Richardson, M. ve others (2008), High-fidelity Infrared Signature Modelling Using Matlab Virtual Reality Toolbox, *Journal of Battlefield Technology*, 11, 1 (2008), 39.
- [24] Crow, D.R. ve Coker, C.F. (2001), Real-time CHAMP (RTC) infrared scene generation program, (Orlando, FL, 2001), 445-452.
- [25] Mason, J.E., Schott, J.R., Salvaggio, C. ve Sirianni, J.D. (1994), Validation of contrast and phenomenology in the Digital Imaging and Remote Sensing (DIRS) lab's image generation (DIRSIG) model, (1994).
- [26] Le Goff, A., Latger, J. ve Kersaudy, P. (1999), Realistic multispectral simulation including IR simulation, (Orlando, FL, 1999), 152-163.
- [27] Willers, C.J., Delpont, J.P. ve Willers, M.S. (2010), CSIR optronic scene simulator finds real application in self-protection mechanisms of the South African Air Force, (2010).
- [28] Cathala, T., Le Goff, A., Gozard, P. ve Latger, J. (2006), Realtime simulation tools in the CHORALE workshop, (Orlando (Kissimmee), FL, 2006), 62390F.
- [29] Sanders, J.S. ve Brown, S.D. (2000), Utilization of DIRSIG in support of real-time infrared scene generation, (Orlando, FL, 2000), 278-285.
- [30] Optronic System Simulator: (2019), <http://defsec.csir.co.za/optronic-sensor-systems-oss/infrastructure/optronic-sensor-systems-infrastructure>.
- [31] O'Toole, B.E. (1996), Real-time infrared scene simulator (RISS), (Orlando, FL, 1996), 209-218.
- [32] Cenci, A., Daniele, G., Ferrara, M. ve Balzarotti, G. (1998), Architecture of a real-time simulator for testing and evaluation of infrared systems, (San Diego, CA, USA, 1998), 855.

## YER ETKİSİNİ KULLANAN BİR ARAÇ İÇİN OTOPILOT TASARIMI

Selman Fatih Avşar <sup>(a)</sup>, İzel Sever <sup>(a)</sup>, Raha Shabani <sup>(a)</sup>, Kemal Leblebicioğlu <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü,  
{selman.avsar,izel.sever,raha.shabani,kleb}@metu.edu.tr

### ÖZ

“Yer etkisi”, bir taşıma yüzeyinin yere yeteri kadar yakın mesafede uçuşunda oluşan ve taşıma/sürükleme oranında artışa neden olan bir olgudur. Bu çalışmada, insansız bir “yer etkisini kullanan araç” için otopilot tasarımı anlatılacaktır.

Otopilot tasarımının ilk aşaması, aracın 6 serbestlik dereceli doğrusal olmayan matematiksel modelinin elde edilmesidir. Yer etkisini kullanan bir araç da havalandıktan sonra - standart hava araçlarıyla benzer şekilde - yer çekimi, itki ve aerodinamik kuvvetlerinin etkisinde hareket eder. Yer çekimi ve itki kuvveti standart hava araçlarıyla benzer şekilde hesaplanırsa da; yer etkisini kullanan bir araç için aerodinamik kuvvetlerin hesabı standart hava araçlarına göre farklılık gösterir. Bu çalışmada, yer etkisindeyken aerodinamik kuvvetlerin hesabına kısaca değinilecektir.

Araca etkiyen toplam kuvvet ve momentin aracın doğrusal ve açısal hareketine olan etkisini gözlemek amacıyla, aracın 6 serbestlik dereceli doğrusal olmayan matematiksel modeli elde edilmiştir. Aracın kontrolü için hız, yükseklik ve sapma açısı otopilotları tasarlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Aerodinamik Kuvvet, Kontrol, Matematiksel Model, Otopilot, Yer Etkisi.

## AUTOPILOT DESIGN FOR A WING-IN-GROUND EFFECT VEHICLE

### ABSTRACT

Ground effect is an event that occurs when a lifting surface flies sufficiently close to ground and that leads an increase in lift to drag ratio. In this study, autopilot design for wing-in-ground (WIG) effect vehicle is explained.

First step of designing an autopilot is obtaining six degrees of freedom (dof) nonlinear mathematical model of the vehicle. A WIG effect vehicle also moves via three forces which are gravitational, thrust, and aerodynamic forces similar to standard air vehicle. Gravitational and thrust forces for WIG are calculated similar to standard air vehicle, however; calculation of aerodynamic force has a number of differences for WIG case. In this study, it is mentioned shortly to calculation of aerodynamic forces in ground effect.

To observe the effect of total force and moment on translational and rotational motion of the vehicle, 6-dof nonlinear mathematical model of the vehicle was derived. Altitude, speed and yaw autopilot were designed to be able control the vehicle.

**Keywords:** Aerodynamic Forces, Control, Mathematical Model, Autopilot, Ground Effect.

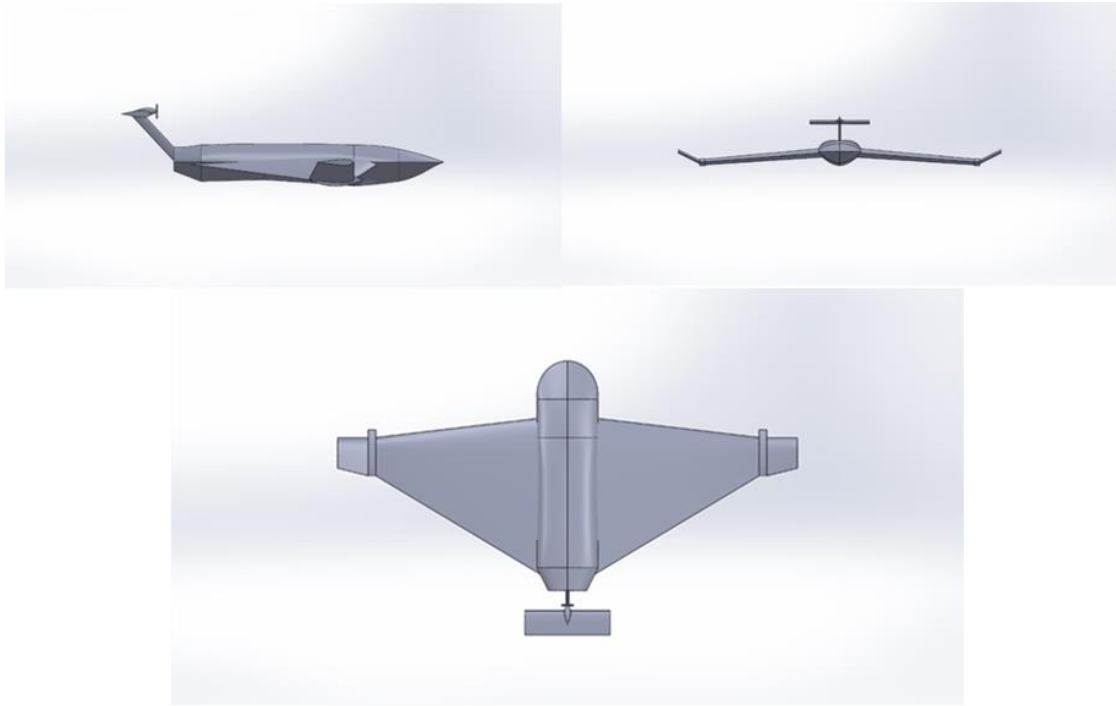
### 1. GİRİŞ

“Yer etkisi”, bir taşıma yüzeyinin yere yeteri kadar yakın mesafede uçtuğunda oluşan ve taşıma/sürüklenme oranında artışa neden olan bir olgudur [1]. “Yer” terimiyle kastedilen yalnızca kara değildir ve bu kapsama su, kar, buz da girebilir [2]. Yer etkisini kullanan araç tanımı ise şu şekilde yapılabilir: Yer etkisinden istifade edebilmek için deniz veya kara yüzeyine yakın mesafede uçabilen araçtır [3]. Yer etkisi, aracın yerden yüksekliğinin kanat açıklığı mesafesinin altına düştüğünde hissedilmeye başlansa da, yer etkisini kullanan araçlar temel kural olarak veter uzunluğunun  $\frac{1}{4}$ 'ünden daha küçük mesafelerde uçarlar [4]. Yer etkisini kullanan araçlar, kara üzerinde engellerin çok olması ve engebelerden dolayı su yüzeyinde kullanıma uygundur. Bu çalışmaya konu olan yer etkisini kullanan araç, suda ve havada gidebilen bir araçtır. Aracın katı modeline ait 3 görünüm Şekil 1’de verilmiştir.

Bir hava aracının taşıma/sürüklenme oranının artması, aracın veriminin artması ve bu da yakıt tüketiminin azalması anlamına gelmektedir. Yakıt ekonomisi, su yüzeyinde iniş-kalkış kapasitesine sahip olması, bakım ücretlerinin düşük olması, acil durumlarda suya acil iniş yapma imkanının olması, suda giden araçlara göre yüksek hız kapasitesine sahip olması, hızlı olması, düşük yükseklikten uçması dolayısıyla radarlara ve deniz

yüzeyine temas etmediği için de sonarlara karşı görünmezlik özelliği kazanması yer etkisini kullanan araçların başlıca avantajları arasındadır [3]. Yer etkisini kullanan araçlar, sivil ve askeri amaçlı çok çeşitli görevlerde kullanılmaya uygundur [5]. Yolcu ve kargo taşımacılığı, arama-kurtarma faaliyetleri, devriye gezisi yer etkisini kullanan araçların kullanılabileceği başlıca alanlar arasında gösterilebilir [6].

Bu çalışmada, insansız bir “yer etkisini kullanan araç” için otopilot tasarımı anlatılacaktır. Bunun için ilk olarak yer etkisini kullanan bir araç için matematiksel modelin elde edilmesi ele alınacak; sonrasında bu model için otopilotlar tasarlanıp, simülasyon sonuçları verilecektir.



**Şekil 1.** Aracın 3 farklı açıdan görünümü

## 2. MATEMATİKSEL MODEL

Bir uçak, uçuşu esnasında üç dış kuvvetin etkisindedir. Bu üç kuvvet itki, ağırlık ve aerodinamik kuvvetlerdir [8]. Yer etkisini kullanan bir araç da bu üç kuvvetin etkisinde uçar. Yer etkisini kullanan araçlar için itki ve ağırlık hesabı uçaklarla benzer şekilde yapılsa da aerodinamik kuvvet hesabında farklılıklar vardır.

Kuvvet ve momentler farklı farklı koordinat sistemlerinde hesaplanıp, toplam kuvvet ve moment hesaplanırken gerekli dönüşümler yapılarak uygun bir koordinat sisteminde ifade edilir ve toplanırlar.

Yer etkisini kullanan aracımızın hızı, menzili, yerden yüksekliği gibi özellikleri açısından değerlendirildiğinde kuzey-doğu-aşağı koordinat sisteminin ataletsel koordinat sistemi olarak kullanılabilmesi varsayımı yapılmıştır [3].

Bu ön bilgiler göz önünde bulundurularak doğrusal olmayan matematiksel modellerle ilgili denklemler şu şekilde çıkarılabilir.

## 2.1. Hareket denklemleri

Doğrusal olmayan 6 serbestlik dereceli matematiksel modeli elde etmenin ilk adımı, hareket denklemlerinin çıkarılmasıdır. Hareket denklemleri 6 dinamik ve 6 kinematik olmak üzere toplam 12 adet 1. dereceden diferansiyel denklemden oluşmaktadır.

### 2.1.1. Doğrusal dinamik denklemler

Newton'un 2. yasasına göre kuvvet ve hız arasındaki ilişki

$$\sum F = \frac{d(mV)}{dt} \quad (1)$$

şeklindedir. Bu ilişki ataletsel koordinat sistemi için geçerlidir. Bu ilişki gövde koordinat düzleminde Coriolis teoremi kullanılarak

$$\left( \frac{d(V)}{dt} \Big|_I \right)^B = \left( \frac{d(V)}{dt} \Big|_B \right)^B + \Omega_{BI}^B \times V^B \quad (2)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada B ve I indisleri, sırasıyla gövde ve ataletsel koordinat düzlemlerini ifade etmektedir. (1) ve (2)'de değişkenler yerine konulup, gövde eksenindeki doğrusal hızın değişimi yalnız bırakılırsa:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{F_x}{m} - qw + rv \\ \frac{F_y}{m} - ru + pw \\ \frac{F_z}{m} - pv + qu \end{bmatrix} \quad (3)$$

elde edilir.

### 2.1.2. Dönel dinamik denklemler

Newton'un 2. yasasına göre moment ve açısal hız arasındaki ilişki

$$\sum M = \frac{d(H)}{dt} \quad (4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada H açısal momentumu ifade etmektedir ve

$$H = I\Omega_{BI}^B \quad (5)$$

şeklinde tanımlanır. Simetri eksenleri gözününde bulundurulduğunda,  $I$  ataletsel matrisi:

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & -I_{xz} \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ -I_{xz} & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (6)$$

şeklinde bulunur. Açısal momentumun değişiminin gövde koordinat düzleminde

$$\left( \frac{d(H)}{dt} \Big|_I \right)^B = \left( \frac{d(H)}{dt} \Big|_B \right)^B + \Omega_{BI}^B \times H^B = I \dot{\Omega}_{BI}^B + \Omega_{BI}^B \times I \Omega_{BI}^B \quad (7)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bilinenler (4) ve (7)'de yerine konulup, açısal hızların değişimleri yalnız bırakıldığında ise:

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{I_{xz}(I_{xx} - I_{yy} + I_{zz})pq - (I_{zz}(I_{zz} - I_{yy}) + I_{xz}^2)qr + I_{zz}L + I_{xz}N}{I_{xx}I_{zz} - I_{xz}^2} \\ \frac{(I_{zz} - I_{xx})pr - I_{xz}(p^2 - r^2) + M}{I_{yy}} \\ \frac{((I_{xx} - I_{yy})I_{xx} + I_{xz}^2)pq - I_{xz}(I_{xx} - I_{yy} + I_{zz})qr + I_{xz}L + I_xN}{I_{xx}I_{zz} - I_{xz}^2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

ifadesi elde edilir.

### 2.1.3. Doğrusal kinematik denklemler

Gövde koordinat sistemindeki doğrusal hızlarla, ataletsel koordinat sistemindeki doğrusal hızlar arasında ilişki Euler açılarının 3-2-1 kullanımına göre:

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} c(\psi) & -s(\psi) & 0 \\ s(\psi) & c(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c(\theta) & 0 & s(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -s(\theta) & 0 & c(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c(\phi) & -s(\phi) \\ 0 & s(\phi) & c(\phi) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$= \begin{pmatrix} c(\psi)c(\theta) & -s(\psi)c(\phi) + c(\psi)s(\theta)s(\phi) & s(\psi)s(\phi) + s(\psi)s(\theta)s(\phi) \\ s(\psi)c(\theta) & c(\psi)c(\phi) + s(\psi)s(\theta)s(\phi) & -c(\psi)s(\phi) + s(\psi)s(\theta)c(\phi) \\ -s(\theta) & c(\theta)s(\phi) & c(\theta)c(\phi) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (10)$$

şeklinde elde edilir. Burada, s ve c fonksiyonları, sin ve cos'un kısaltmalarıdır.

### 2.1.4. Dönel kinematik denklemler

Gövde koordinat sistemindeki dönel hızlarla, ataletsel koordinat sistemindeki dönel hızlar arasında ilişki Euler açılarının 3-2-1 kullanımına göre elde edilirse:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi) \tan(\theta) & \cos(\phi) \tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) \sec(\theta) & \cos(\phi) \sec(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (11)$$

ifadesi ortaya çıkar.



## 2.2. Toplam kuvvet ve momentin bulunması

Üç temel kuvvet-momentin her biri, hesaplanmasının en kolay olduğu bir koordinat sisteminde hesaplanır ve daha sonra elde edilen kuvvet-momentlerin tamamı, uygun dönüşüm matrisleriyle çarpılarak gövde koordinat sistemine çevrilir.

### 2.2.1. Yerçekimi kuvveti ve moment

Yer çekimi kuvveti, aracın yerçekimi merkezine uygulanır. Ataletsel koordinat sistemi olarak varsaydığımız kuzey-doğu-aşağı koordinat sisteminde

$$mg^I = m \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (12)$$

şeklinde ifade edilir. Gerekli dönüşüm matrisi ile çarpığımızda, gövde koordinat sistemindeki ifadesi

$$mg = mg \begin{bmatrix} -\sin(\theta) \\ \cos(\theta) \sin(\phi) \\ \cos(\theta) \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (13)$$

olarak bulunur. Yer çekimi kuvveti yer çekimi merkezine uygulandığı için, bu kuvvet dolayısıyla moment oluşmaz.

### 2.2.2. İtki kuvveti ve moment

İtki motorunun yöneliminin  $x^B$  eksenine tam olarak hizalı olduğu ve konumunun  $p_m^B = [x_m, 0, -z_m]$  olduğu varsayıldığında, itki sonucunda oluşacak kuvvet ve moment gövde koordinat sisteminde aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$F_T^B = \begin{bmatrix} F_{Tx} \\ F_{Ty} \\ F_{Tz} \end{bmatrix}^B = F_T \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$M_T^B = \begin{bmatrix} L_T \\ M_T \\ N_T \end{bmatrix}^B = F_T \begin{bmatrix} 0 \\ -z_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

### 2.2.3. Aerodinamik kuvvet ve momentler

Aerodinamik katsayılar ve momentler, birimsiz aerodinamik katsayılarla hesaplanmaktadır.

$$F_A^B = \begin{bmatrix} F_{Ax} \\ F_{Ay} \\ F_{Az} \end{bmatrix}^B = \underbrace{\frac{1}{2} \rho V^2 S}_Q \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \end{bmatrix} = QS \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} M_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & \bar{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C & \bar{c} \end{bmatrix} \quad (17)$$

burada  $\rho \triangleq$  hava basıncı,  $Q \triangleq$  dinamik basınç,  $c$  kanat açıklığı ve  $\bar{c} \triangleq$  ortalama veter uzunluğudur. Aerodinamik katsayılar uçuş parametrelerinin ( $\alpha$ ,  $\dot{\alpha}$ ,  $r$  gibi) doğrusal olmayan fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

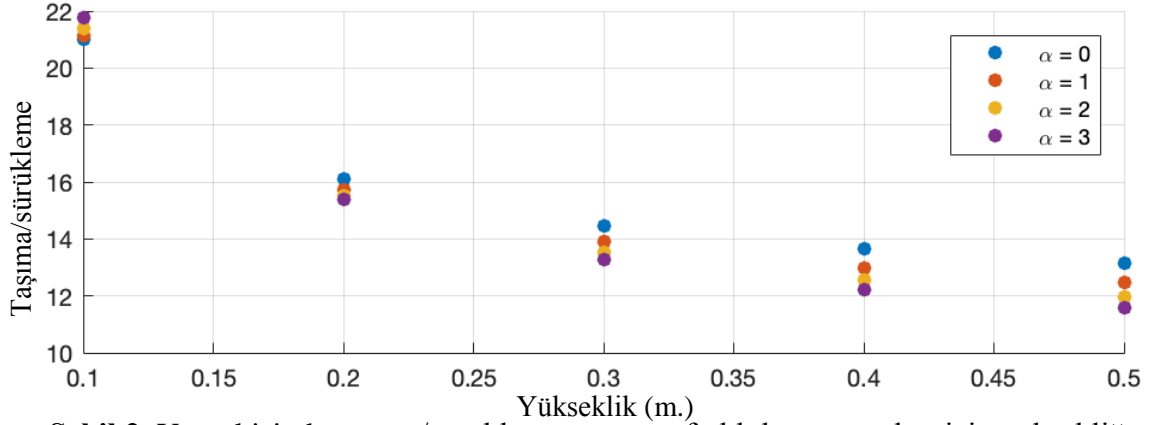
$$\begin{aligned} & \frac{\bar{c}}{Q} \cdot \dot{\alpha} \\ & \frac{\bar{c}}{Q} (C \cdot \dot{\alpha} \quad q) \\ & \frac{\bar{c}}{Q} (C \quad r) \end{aligned} \quad (18)$$

Aerodinamik katsayılar, hesaplamalı akışkanlar dinamiği programları ile, rüzgar tüneli testleri veya uçuş testleri ile belirlenebilir ama bu yöntemlerin uygulanması için ciddi bir vakte ve maddi imkana ihtiyaç vardır. Aerodinamik katsayıları elde etmenin bir diğer hızlı ve ekonomik yolu DATCOM programı ile tahmin etmektir. Digital DATCOM, uçakların geometrik bilgilerini ve uçuş koşullarını girdi olarak alır ve statik ve dinamik aerodinamik kuvvet-moment katsayılarını çıktı olarak verir. [9]

DATCOM'un çıktısı olarak elde edilen aerodinamik katsayılar, yer etkisi bölgesini göz önünde bulundurmaz. Yer etkisi dışına çıkıldığında bu katsayılar kullanılır ve yer etkisinin etkili olduğu alana girildiği zaman, yer etkisi modeli devreye girer.

### 2.2.3.1. Yer etkisi modeli

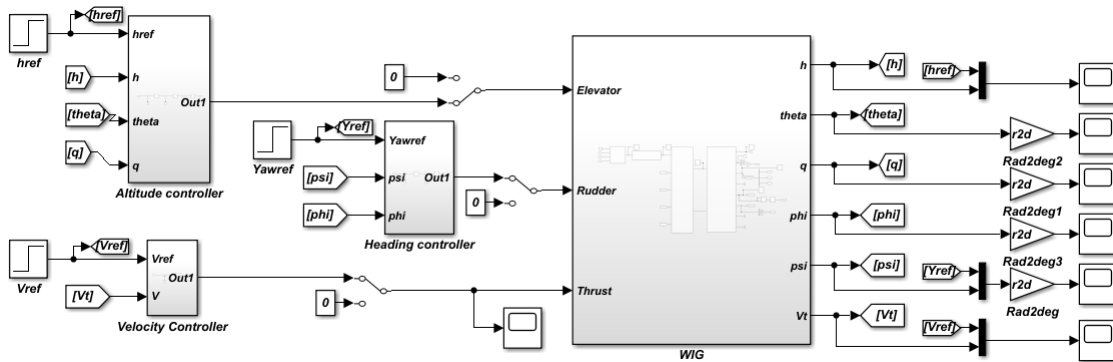
Yer etkisi modelinin elde edilmesiyle ilgili geniş bilgi bu konferanstaki “yer etkisini kullanan insansız araç tasarımı ve yer etkisi modeli” başlıklı bildirimizde verilmiştir. Bu bildiride, araç yer etkisinde iken, farklı hücum açıları için yüksekliğin değişimiyle taşıma/sürüklenme katsayılarının oranında meydana gelen değişime ait simülasyon sonucunu vermenin yeterli olacağı düşünülmüştür. Simülasyon sonucu Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Yer etkisinde taşıma/sürüklenme oranının farklı hücum açıları için yüksekliğe göre değişimi

### 3. OTOPILOT TASARIMI

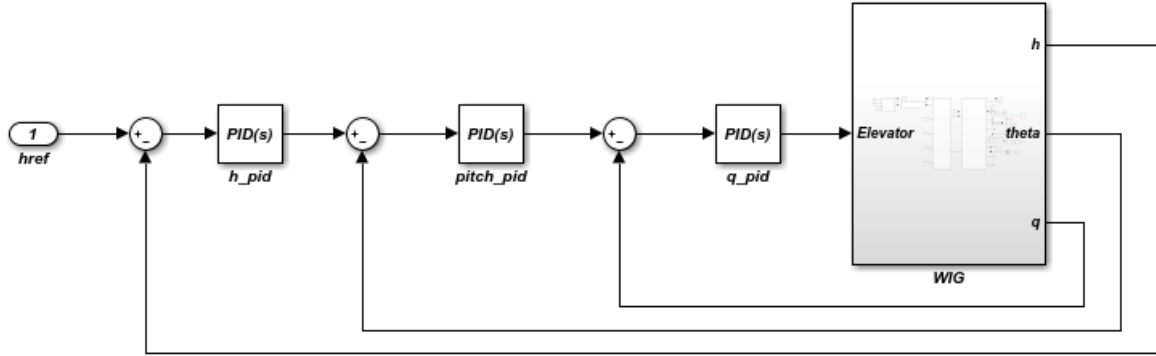
2. bölümde anlatılanlar MATLAB-Simulink ortamında uygulanmış ve aracın 6 serbestlik dereceli doğrusal olmayan modeli elde edilmiştir. Bu model tek bir blok haline getirilip, WIG olarak isimlendirilmiştir. Sonrasında otopilot yapıları kaskat PID kontrolcülerıyla kurulmuştur. Bu çalışmada yükseklik otopilotu, hız otopilotu ve sapma açısı otopilotu tasarlanmıştır. MATLAB'ın otomatik ayarlama özelliği kullanılarak PID kontrolcülerinin katsayıları, iç döngü dinamiğinin dış döngü dinamiğine göre hızlı olduğu varsayımıyla, iç döngüden dış döngüye doğru olacak şekilde belirlenmiştir. Oluşturulan simülasyon ortamının en üst blok görüntüsü aşağıdaki gibidir.



Şekil 3. Simulink modelinin en üst blok görüntüsü

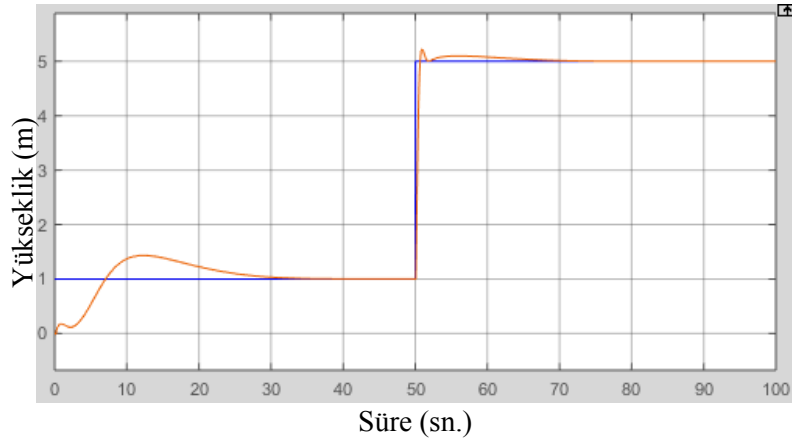
#### 3.1. Yükseklik otopilotu

Yükseklik otopilotu olarak arka arkaya sıralanmış PID yapısı kullanılmıştır. Araçtan  $q$ ,  $\theta$  ve  $h$  bilgileri geri besleme olarak alınmış ve kontrol yüzeyi olarak yunuslama kontrol kanatçığı kullanılmıştır.



**Şekil 4.** Yükseklik otopilotu kontrol yapısı

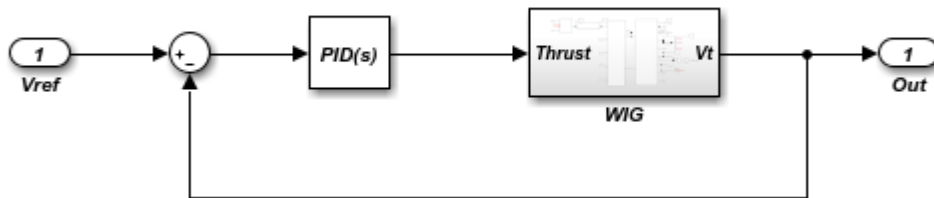
Kontrolcünün yükseklik takip etme performansı Şekil 5’te verilmiştir. Mavi çizgi referans işaretini ve kırmızı çizgi de simülasyon sonucunu göstermektedir.



**Şekil 5.** Yükseklik otopilotu performansı

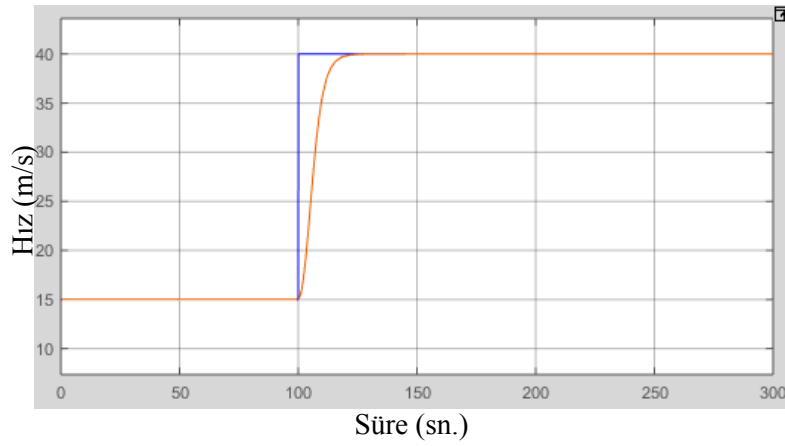
### 3.2. Hız otopilotu

Yönelim otopilotu için PID yapısı kullanılmıştır. Hız, itki ile kontrol edilmektedir.



**Şekil 6.** Hız otopilotu kontrol yapısı

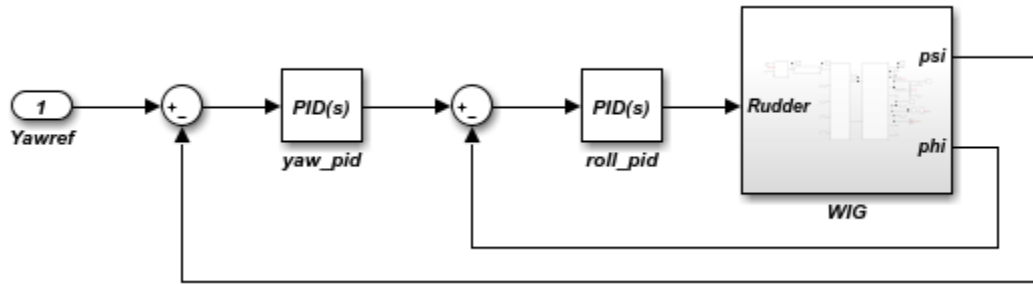
Kontrolcünün hız takip etme performansı Şekil 7’de verilmiştir. Mavi çizgi referans işaretini ve kırmızı çizgi de simülasyon sonucunu göstermektedir.



Şekil 7. Hız otopilotu performansı

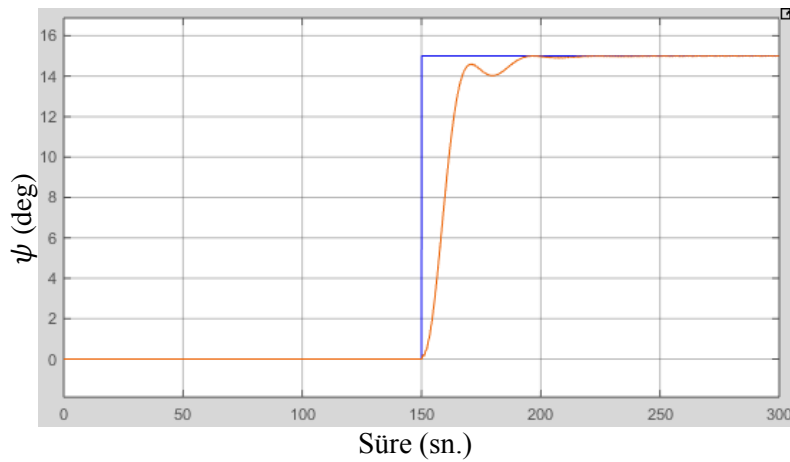
### 3.3. Sapma açısı otopilotu

Yönelim otopilotu için arka arkaya sıralanmış PID yapısı kullanılmıştır. Kontrol yüzeyi olarak yana dönme kontrol kanatçığı kullanılmıştır.



Şekil 8. Yönelim otopilotu kontrol yapısı

Kontrolcünün hız takip etme performansı Şekil 9'da verilmiştir. Mavi çizgi referans işaretini ve kırmızı çizgi de simülasyon sonucunu göstermektedir.



Şekil 9. Yönelim otopilotu performansı

## 4. SONUÇ

Bu çalışmada, yer etkisini kullanan bir araç için 6 serbestlik dereceli doğrusal olmayan matematiksel modelinin elde edilmesi; yükseklik, hız ve yönelim otopilotlarının tasarımı ve bunların simülasyonlarının gerçekleştirilmesi anlatılmıştır. Elde edilen sonuçlar, otopilotların isterleri sağladığını göstermektedir. Bundan sonraki çalışmalarımız, doğrusal olmayan modelin doğrusallaştırılması ve elde edilen doğrusal model üzerinden doğrusal sistem teorisi ile tasarlanabilecek farklı otopilotlar tasarlanması ve onların başarımının incelenmesi olacaktır. Sonraki aşamada ise tasarlanan otopilotların araç prototipi üzerinde denenmesi ve otopilotların başarımının test edilmesi planlanmaktadır.

## 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya 117E966 numaralı proje kapsamında finansal destek sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'a teşekkür ederiz.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] K.V. Rozhdestvensky (2006), Wing in Ground Effect Vehicles, Progress in Aerospace Science, vol. 42, pp. 211-283.
- [2] K.V. Rozhdestvensky (2000), Aerodynamics of a Lifting System in Extreme Ground Effect, 1<sup>st</sup> ed., Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin, Germany.
- [3] A. Ghafoor (2015), Wing in Ground Effect Vehicle: Modeling and Control, M.Sc. Thesis, Middle East Technical University, Turkey.
- [4] En, N. D., Benedict, N. G. H., Seng, Q. Y., Johnathan, T. B. W., Gerard, L. S., & Number, R. R. (2005), Wing in Ground (WIG) Effect Vehicles. National University of Singapore.
- [5] Holloran, M., & O'Meara, S. (1999). Wing in ground effect craft review (no. dsto-gd-0201). defence science and technology organisation canberra (Australia).
- [6] Nebylov, A., Davila, D., Sharan, S., & Nebylov, V. (2007), Flight automatic control system for wing-in-ground effect craft buchon-1.
- [7] Hean, N. G. (2005). AM90 Wing In Ground (WIG) Aircraft–Aerodynamics (Doctoral dissertation, NUS, Singapore).
- [8] J.L. Boiffier (1998), The Dynamics of Flight: The Equations, John Wiley & Sons, vol. 1, Chichester, West Sussex, England.
- [9] N. Anton, R.M. Botez, D. Popescu (2010), Stability derivatives for a delta-wing X-31 aircraft validated using wind tunnel test data, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G, Journal of Aerospace Engineering, cilt. 225, s. 403-416.

## TERMİNOLOJİ

- = Kütle
- = Atalet matrisi
- = Kuvvet
- = Moment
- = Çizgisel hız vektörü
- = Açısal hız vektörü
- = Çizgisel hız vektörünün sırasıyla  $x$   $y$   $z$  bileşenleri
- = Açısal hız vektörünün sırasıyla  $x$   $y$   $z$  bileşenleri
- = Kuvvet vektörünün sırasıyla  $x$   $y$   $z$  bileşenleri
- = Euler açıları
- = Çizgisel hız vektörünün sırasıyla  $x^l, y^l, z^l$  bileşenleri
- = İtke kuvveti ve momentini
- = Aerodinamik kuvvet ve momentini
- =  $x^B, y^B, z^B$  yönündeki aerodinamik kuvvet katsayıları
- =  $x^B, y^B, z^B$  yönündeki aerodinamik moment katsayıları
- = Gövde koordinat sisteminin ataletsel koordinat sistemine göre açısal hızının gövde koordinat sisteminde ifadesi
- $\left( \frac{—}{—} \right)$  = Çizgisel ataletsel koordinat sistemine göre değişiminin gövde koordinat sisteminde ifadesi.

## YER ETKİSİNİ KULLANAN İNSANSIZ ARAÇ TASARIMI VE YER ETKİSİ MODELİ

**Raha Shabani (a), İzel Sever (a), Selman Fatih Avşar (a), Ferit Çakıcı (a), Kemal Lelebicioğlu(a)**

(a) Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü,  
{raha.shabani,izel.sever,favsars,feritcakici,kleb}@metu.edu.tr

### ÖZ

Yer etkisini kullanan araçlar (Wing in ground effect vehicle, WIG), yer etkisini etkili bir şekilde kullanabilmek için deniz seviyesine çok yakın bir yükseklikte uçarlar. Bu nedenle hava araçlarına çok benzerler. Fakat bu araçları hava veya deniz araçları olarak sınıflandırmak uygun değildir. Bu çalışmada yer etkisini kullanan insansız bir aracın mekanik tasarım aşamaları ve yer etkisi modeli anlatılacaktır. Bu çalışmada, yapılan çalışmalar incelenerek, uygun bir kanat yapısı seçilmiş, bu tarz bir uçağın isterlerimizi karşılaması için gerekli kanat açıklığının ne olması gerektiği belirlenmiş, tüm geometrik parametreler için ilk boyutlandırılmalar yapılmış ve buna uygun CAD modeli, aerodinamik katsayılarla ve simülasyonlarımıza uygun olarak elde edilmiştir.

Bir hava aracı üç kuvvet etkisinde hareket etmektedir. Bunlar yer çekimi, itki aerodinamik kuvvetler ve sudan kalkış yapana kadar hidrodinamik kuvvettir. Yer etkisinde uçan bir araç için yer çekimi ve itki kuvvetinin hesabı normal bir uçakla aynı şekilde yapılmakta ancak aerodinamik kuvvetlerin hesabı farklılaşmaktadır [1]. Literatürdeki bilgiler kullanılarak [1], [2], [3], bu geometrik yapıdaki bir aracın yer etkisindeki aerodinamik kuvvetlerinin ne olacağı, yüksekliğin ve aracın geometrisinin (hücum açısı, kanadın referans alanı, kanat açıklığı, kord uzunluğu) bir fonksiyonu olarak modellenmiştir. Yer etkisinin sağladığı taşıma, sürüklenme katsayıları ve DATCOM kullanılarak elde edilen veriler bir araya getirilerek aerodinamik katsayılar belirlenmiş ve bir yer etkisi modeli oluşturulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Aerodinamik Kuvvet, DATCOM, Hava Aracı, Mekanik, Tasarım, Yer Etkisi



## **AN UNMANNED WING-IN-GROUND EFFECT VEHICLE DESIGN AND GROUND EFFECT MODEL**

### **ABSTRACT**

Wing in ground effect vehicles (WIG) fly in close proximity to the sea in order to use ground effect effectively. Therefore they are very similar to aircraft. However, it is not appropriate to classify these vehicles as air or sea vehicles. In this study, mechanical design stages and mathematical modeling explaining the ground effect of an unmanned vehicle will be explained. The appropriate wing structure has been selected by examining the previous studies conducted in this field. The wingspan and the chord lengths are determined in order to meet our design requirements. Initial dimensions for all geometric parameters are decided and the corresponding CAD model is obtained in accordance with our aerodynamic coefficients after some simulations.

The forces (and torques) acting on ground effect vehicles are gravitational, propulsion, aerodynamic forces and hydrodynamic forces which act until the vehicle starts to take off from the water. For a vehicle that benefits from the ground effect, gravity and thrust forces are calculated in the same way as a usual aircraft, but the aerodynamic forces become different due to ground effect (GE) [1]. Using the information in the literature [1], [2], [3], the aerodynamic forces of a vehicle of this geometric structure are modeled as a function of the ground clearance and the geometry of the vehicle (angle of attack, reference area of the wing, wingspan, cord length, incidence angle). By combining the lift and drag coefficients provided from the ground effect and the aerodynamic drag and lift coefficients obtained from DATCOM, we obtain total aerodynamic coefficients and a ground effect model.

**Keywords:** Aerodynamic Forces, Air Vehicles, DATCOM, Design, Ground Effect, Mechanics.

## **1. INTRODUCTION**

In this study an appropriate ground effect model will be found by using system identification process on a constructed wing-in-ground effect vehicle. Consequently, we may design very fast vehicles with a large payload in Turkish rivers. They can also be used as cheap “sea-commando” vehicles and missiles having a very long range.

Design of Wing in Ground (WIG) effect vehicles consists of four main parts. They can be listed as, investigation of different mechanical structures, aerodynamics and geometry, mass and inertia parameters, construction of 6DOF dynamical mathematical model by applying ground effect, modeling of different actuators for pitch, roll, yaw, speed and altitude control and the guidance of the vehicle.

In the first two steps there are two main challenges such as determining suitable airfoils for wings, tails, fuselage, and suitable structures for geometry and mechanical design, in order to get the maximum benefit from the Ground Effect (GE) and construction of the mathematical model including the ground effect.

In the following, we have dealt with these challenges using SolidWorks and DATCOM programs for the design and geometry evaluation.

### **1.1. SolidWorks**

SolidWorks is a solid modeler and utilizes a parametric feature-based approach which was initially developed by PTC (Creo/Pro-Engineer) to create models and assemblies. The software is written on Para solid-kernel.

Building a model in SolidWorks usually starts with a 2D sketch (although 3D sketches are available for power users). The sketch consists of geometry such as points, lines, arcs, conics (except the hyperbola), and splines. Dimensions are added to the sketch to define the size and location of the geometry. They are used to define attributes such as tangency, parallelism, perpendicularity, and concentricity. The parametric nature of SolidWorks means that the dimensions and relations drive the geometry, not the other way around. The dimensions in the sketch can be controlled independently, or by relationships to other parameters inside or outside of the sketch.

### **1.2. DATCOM**

In the method of building a model using DATCOM, there are no point-and-click interfaces, only points in space. Fundamentally, the purpose of the DATCOM, is to provide a systematic summary of methods for estimating basic stability and control

derivatives. For all given flight s and configurations the complete set of derivatives can be determined in Datcom without resort to outside information.

## **2. GROUND EFFECT THEORY**

The ground effect is an increase in the lift-to-drag ratio of a lifting surface (wing) moving close to the ground. For a lifting surface, this effect works at distances from the ground less than the chord of the wing; but the most beneficial range of ground effect normally lies below one-fourth of the chord length. However, as discussed in some studies, e.g., [4] and [5], for a given size of the vehicle, the ground effect depends on the vehicle configuration and ratio of lateral and longitudinal dimensions. Rozhdestvensky [4] introduced two approaches of the ground effect which are chord-dominated ground effect (CDGE) and span-dominated ground effect (SDGE). In the chord-dominated case and for adequately designed craft the wing corresponds to smaller ground tolerances by flow stagnation under the wing and eventual growth of both lift and drag coefficients resulting in an enhanced lift-to-drag ratio. In the span-dominated case, the GE reveals itself in reduced induced drag and enhanced lift, this combination consequently leading to increased lift-to-drag ratio. The GE zone for a vehicle can be defined as the distance from the ground below where the lift force has an 30% increase as compared to the same vehicle in condition without the effect of GE [2], [3]. According to this study, similarity theory allows us to define the GE zone through model experiments and absolute dimensions of the craft before the construction of the scaled models and full-scale implemented model. For an appropriately designed lifting surface, the effect of the ground causes the augmentation of lift for smaller ground distances. Wing profiles, as NACA 4412, produce an optimum ground effect in lifting. The drag is usually defined by induced vortex drag component and it depends on the reciprocal relationship of the chord, span and ground clearance. In chord-dominated GE case, experiments and theory prove that in a fixed pitch angle the drag increases as the wing moves closer to the ground. In span dominated the GE case, the drag decreases with decreasing ground clearance. In all cases for an accurately designed lifting system, the lift-to-drag ratio tends to increase with the decrease of the ground clearance.

### **2.1. Mathematical Modeling of Ground Effect**

In unconventional vehicles, such as ours which benefits from the ground effect, existing prototype data are restricted. A rational approach to design such kinds of vehicles, should be based on an appropriate mathematical model, reflecting the essential features

of the craft under consideration [2], [3]. Therefore, for the present, we formed an approximate ground effect model. The ground effect model of ours is based on some assumptions:

- There are no losses.
- The variation of pressure can be found for a two-dimensional wing based on a channel flow consideration using Bernoulli's law and the continuity equation.
- The velocity and pressure at the wing trailing edge equal the free stream values .

By these assumptions [1], formulae for the pressure coefficient along the chord and the lift coefficient can be found as:

$$C_{P_{GE}}(x) = 1 - \left( \frac{h_0}{h(x)} \right)^2 \quad (1)$$

$$C_{L_{GE}}(x) = 1 - \int_0^1 \left( \frac{h_0}{h(x)} \right)^2 dx \quad (2)$$

Local clearance among the foil and the ground is shown by  $h(x)$  and  $h_0$  is the trailing edge height. Lippisch [2], point that for applying these formulae, the trailing edge height  $h_0$  should not be equal to the geometric value, as the boundary layer builds up causing a reduction in the gap height. Thus, even for zero angle of attack when the bottom surface is parallel to the ground, there can be a lift increase due to ram. The same formulae can be used with both the local and the trailing edge height corrected for the thickness of the boundary layer. We simplified these formulas in order to have the formulas in terms of angle of attack,  $\alpha$ , incidence angle,  $\theta_{inc}$ , and the trailing edge height  $h_0$ .

$$h(x) = h_0 + C(x)\sin(\alpha + \theta_{inc}) \quad (3)$$

where  $C(x)$  is the chord length. Using the equation (2),  $C_{P_{GE}}$  and  $C_{L_{GE}}$  is found as:

$$C_{P_{GE}}(x) = \frac{\tan(\alpha + \theta_{inc})}{\frac{h_0}{x} + \tan(\alpha + \theta_{inc})} \quad (4)$$

$$C_{L_{GE}}(x) = \frac{\tan(\alpha + \theta_{inc})}{h_0 + \tan(\alpha + \theta_{inc})} \quad (5)$$

where  $x$  is the location from where the  $h(x)$  data is taken. The induced drag coefficient

of a lifting surface in the conventional form, introduced by Prandtl [1] is given by:

$$\mathfrak{C}_{D_i} = \frac{C_{LGE}^2}{\pi \lambda \mu} = \frac{C_{LGE}^2}{\pi \lambda_e} \quad (6)$$

where the function  $\mathfrak{H}(h, \lambda)$  characterizes the influence of the ground and the wing aspect ratio,  $\mathfrak{H}$  upon the induced drag coefficient of a wing for a fixed magnitude of the lift coefficient. The quantity  $\lambda_e = \lambda \mu$  is interpreted as effective aspect ratio [1]. Rozhdestvensky [1], states that in order to have maximum efficiency, the optimal  $\mathfrak{H}$  should be  $\mathfrak{H}_{opt} = \frac{l}{3\pi h_0}$ . Hence, the induced drag coefficient becomes,

$$\mathfrak{C}_{D_i} = \frac{3Sh_0}{l^3} \left( \frac{\tan(\alpha + \theta_{inc})}{h_0 + \tan(\alpha + \theta_{inc})} \right)^2 \quad (7)$$

where  $\mathfrak{H}$  is the span length and  $\mathfrak{S}$  is the reference wing area. In the book [1], an approximate formula for the viscous drag coefficient is given as,

$$\mathfrak{C}_{D_o} = C_f \left( 2 + \frac{S_{wep}}{\lambda} \right) \quad (8)$$

where  $C_f = \frac{0,455}{(\log Re)^{2,58}}$  is the friction drag coefficient,  $S_{wep} = 4 \int_0^1 h_{ep}(x) dx$  is the

wetted surface of (two) endplates and  $h_{ep}(x)$  is a chord-wise distribution of the height of the endplate as a fraction of the chord of the wing. Moreover,  $Re$  is the Reynolds number based on the root chord  $c_r$ , cruise speed  $u_0$  and the kinematic viscosity of the fluid  $\nu$ , given as  $Re = \frac{u_0 c_r}{\nu}$ .

Substituting  $C_f$  and  $S_{wep}$  into the equation (8),

$$\mathfrak{C}_{D_o} = \frac{0,91}{(\log Re)^{2,58}} \left( 1 + \frac{1}{\lambda} (2h_0 - l \sin \theta_d + \tan \alpha) \right) \quad (10)$$

where  $\theta_d$  is the dihedral angle of the wing. Total drag coefficient introduced by ground effect is  $\mathfrak{C}_{DGE} = C_{D_i} + C_{D_o}$ .

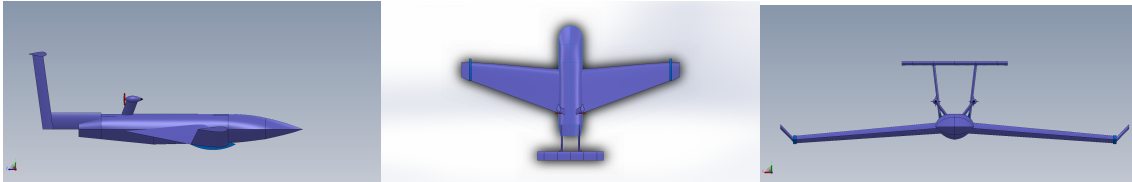
For our vehicle whose span is approximately 1.5m, the effect of the ground disappears when the craft exceeds 0.5m. Out-of-GE aerodynamics become effective after this height. We collect aerodynamic coefficients for out-of-GE heights by using DATCOM

and combine the aerodynamic data of GE and out-of-GE cases by multiplying the GE aerodynamics with a constant,  $\sigma_{GE}$  in order to have GE lift force or  $C_{L_{GE}}$  which is 2.5 or 3 times larger than the out-of-GE lift force or  $C_{L_{aero}}$  [8]. The real value of  $\#_{GE}$  is going to be calculated by doing system identification after the flight tests.

### 3. MAIN DESIGN PROCESS

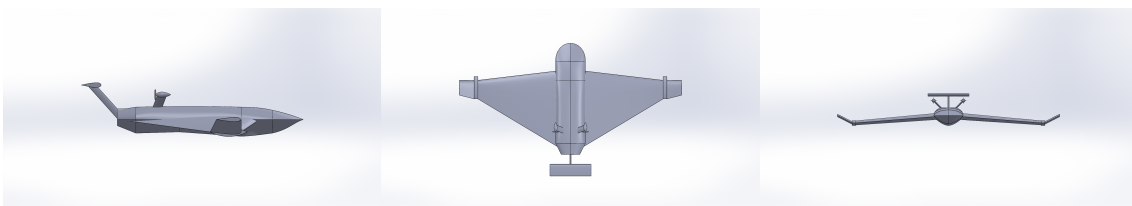
After discussing different parts and parameters for the vehicle, its implementation in Computer Aided Design (CAD) software like SolidWorks is done. All types of motions, forces and moments acting on the vehicle is derived by Newton- Euler approach based on DATCOM, aerodynamics coefficients and stability derivatives.

First, different specifications, structures and parameters were determined on the basis of different studies especially from aerospace and mechanical systems and also inspired by AirFish8 by Singapore. According to those studies (Figure 1) we define some specifications for our vehicle such as the configuration of the tail (which was a double T tail in the first try). We use wing profile as NACA 4412 and the wing span is decided as 1.5 meter. More details of our design and its parameters can be obtained from DATCOM output.



**Figure 1.** Different views of the first model

According to the 2D print of Figure 1 the DATCOM file has been written. In the design process different configurations were chosen for vehicle design in its wing, horizontal and vertical stabilizers and fuselage and tail and place of motor. They are shown in figures 2, 3 and 9, respectively.



**Figure 2.** Different views of the second model

Consequently, model parameters were found first by applying those changes in SolidWork model such as wing area, chord length or wingspan and next by applying them in the DATCOM input file. From DATCOM output, information about  $C_L$ ,  $C_D$ , velocity and other coefficients can be extracted. Many DATCOM input and output files have been investigated for different incidence angles, different Mach numbers in different altitudes:

- *MACH* = Mach number: 0.0202, 0.065,
- *ALSCHD* = Angle of attack: 0°, 1°, 2° and 3°,
- *ALIW* Incidence angle: 4°, 5° and 6°,
- *ALT* Trailing edge height: 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5 m.

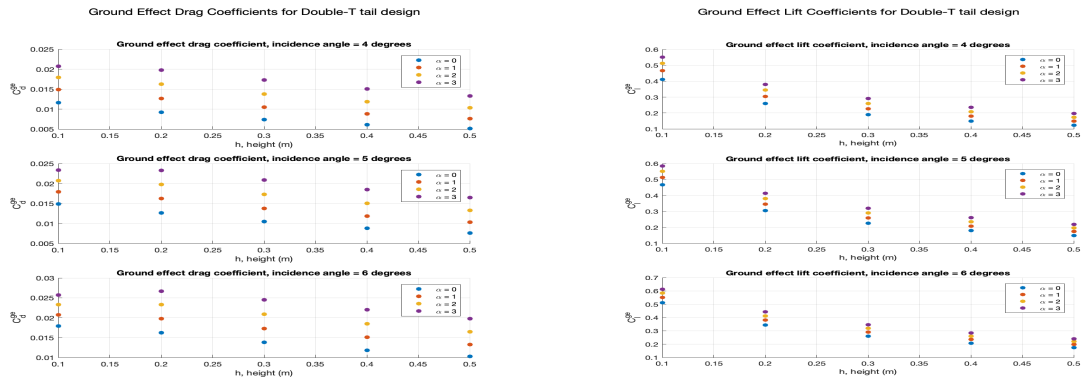
These selections were done in two ways: First, extensive study of aerodynamics and how it can be implemented in reality were studied. Second is the GE analysis, which was studied in detail in [2]. Its formulations were made for both span dominated and chord dominated GEs. These GE formulations were added in the vehicle mathematical model. These formulations together with outputs of DATCOM show vehicle efficiency, and behavior of lift and drag ratio and how it could be utilized in a better way.

Figure 2 stands for the second model. It shows changes in chord length and fuselage investigated in the second part. Difficulty in construction of the original model (double T) caused changes in the tail shape.

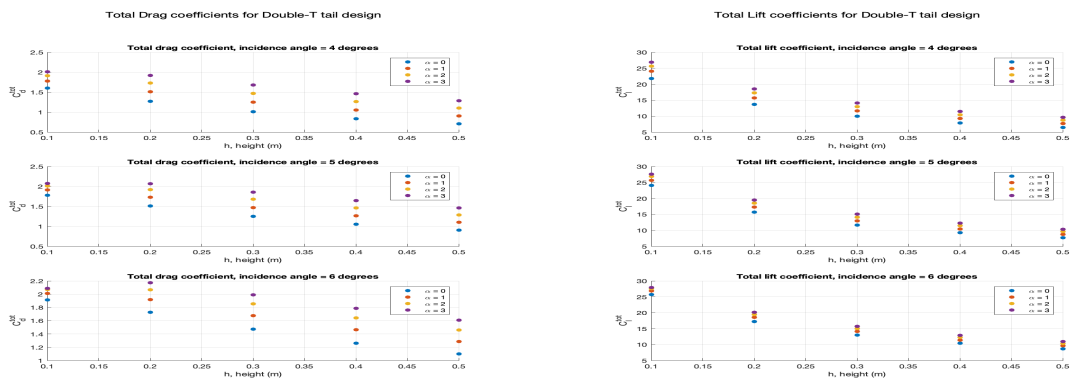
#### 4. SIMULATION RESULTS

This section presents our simulation results. We simulated two designs with two critic design parameters; the angle of attack and the incidence angle. We tested five different operational height values to cover the GE zone. The values of the tested parameters are given in the previous section.

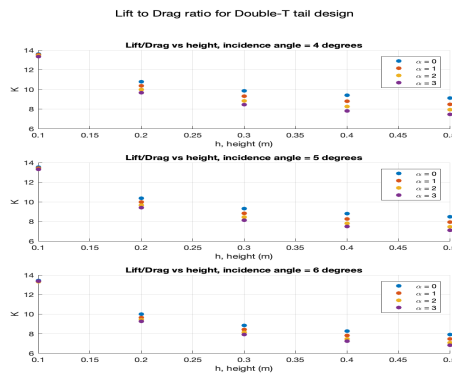
First, we designed our vehicle with double-T tail configuration and a smaller chord. After conducting experiments to find aerodynamic coefficients and the vehicle efficiency, we observed that double-T configuration did not meet our requirements such as an improved lift to drag ratio (more accurately, due to difficulties in construction). Therefore we changed the tail configuration from double-T tail to T-tail. The lift-to-drag ratio,  $K$ , specifies the aerodynamic efficiency of the lifting system; therefore it is the most important parameter in designing a Wing-in-Ground effect vehicle.



**Figure 3.** Ground effect drag and ground effect lift coefficients versus height graphs for double-T tail design with respect to different angle of attack values. From top to bottom,  $\theta_{inc} = 4^\circ$ ,  $\theta_{inc} = 5^\circ$  and  $\theta_{inc} = 6^\circ$



**Figure 4.** Total drag and total lift coefficients versus height graphs for double-T tail design with respect to different angle of attack values. From top to bottom,  $\theta_{inc} = 4^\circ$ ,  $\theta_{inc} = 5^\circ$  and  $\theta_{inc} = 6^\circ$



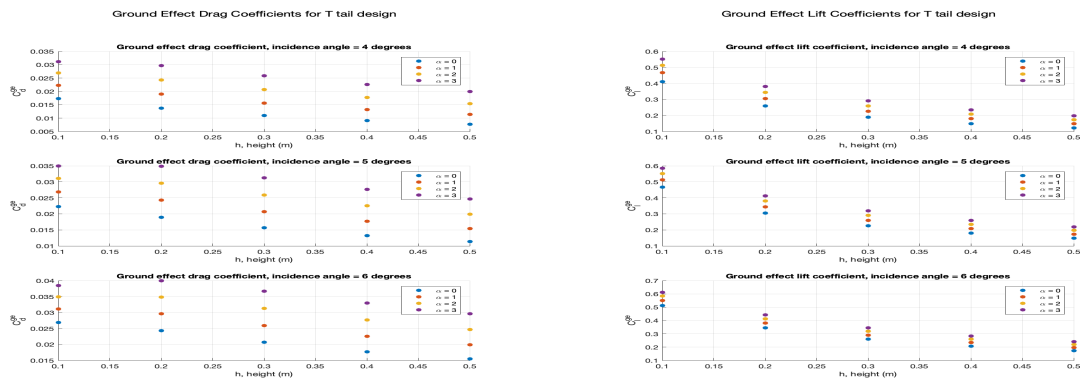
**Figure 5.** Lift to drag ratio, K versus height for double-T tail design with respect to different angle of attack values. From top to bottom,  $\theta_{inc} = 4^\circ$ ,  $\theta_{inc} = 5^\circ$  and  $\theta_{inc} = 6^\circ$



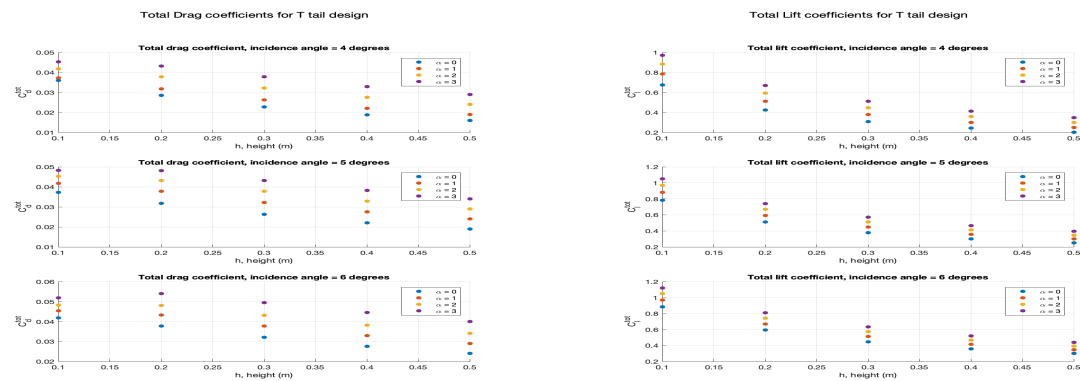
Taking into account the equations, we can write the expression for the aerodynamic quality (lift-to-drag ratio) in the form of  $K = \frac{L}{D}$ .

Simulations with the double-T tail design are shown in Figures 3, 4 and 5 while the simulations with the T-tail design are shown in Figures 6, 7 and 8.

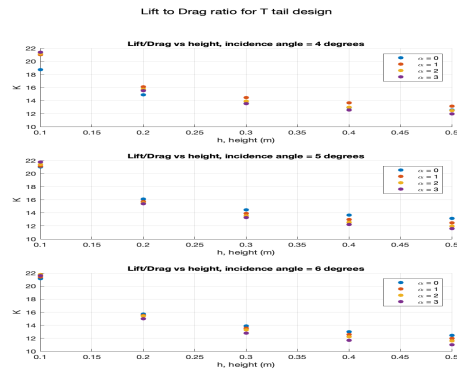
After these investigations, the geometrical design was implemented in SolidWorks to have a better idea about vehicle body and to determine its geometric, mass and inertial elements. According to difficulties in implementation and due to aerodynamic studies motor is placed on the tail and these changes are shown on Figure 9.



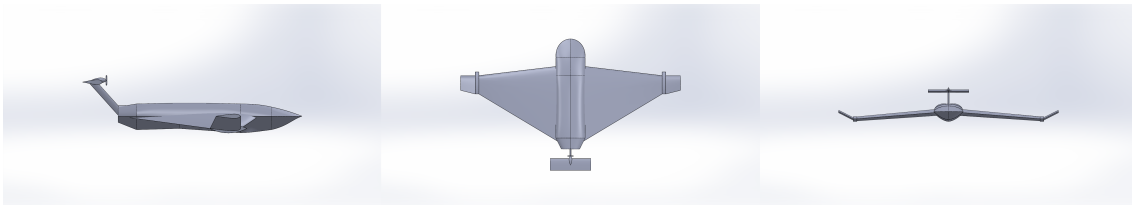
**Figure 6.** Ground effect drag and ground effect lift coefficients versus height graphs for single-T tail design with respect to different angle of attack values. From top to bottom,  $\theta_{inc} = 4^\circ$ ,  $\theta_{inc} = 5^\circ$  and  $\theta_{inc} = 6^\circ$



**Figure 7.** Total drag and total lift coefficients versus height graphs for single-T tail design with respect to different angle of attack values. From top to bottom,  $\theta_{inc} = 4^\circ$ ,  $\theta_{inc} = 5^\circ$  and  $\theta_{inc} = 6^\circ$



**Figure 8.** Lift to drag ratio,  $K$  versus height for single-T tail design with respect to different angle of attack values. From top to bottom,  $\theta_{inc} = 4^\circ$ ,  $\theta_{inc} = 5^\circ$  and  $\theta_{inc} = 6^\circ$



**Figure 9.** Different views of single motor on tail. This shows the final model for implementation.

## 5. CONCLUSION

There is always a need to modify the resultant model, which can be done after some experimental work or by using the techniques mentioned in this paper. They will be done after the prototype model and system identification test are performed on it. We plan to continue our calculations in the next phase using an alternative software, XFLR5. As a result, all these methods are weak in modeling the ground effect and a full-finite element based approach is very difficult and will take a very long time.

## 6. ACKNOWLEDGMENT

This work is supported by TÜBİTAK grant 117E966. Authors are grateful for the support of the Scientific and Technological Research Council of Turkey.

## 7. REFERENCES

1. Rozhdestvensky K.V. (2000), *Aerodynamics of a lifting system in extreme ground effect*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
2. Rozhdestvensky K.V. (2006), *Wing in Ground Effect Vehicles*, *Progress in Aerospace Science*, (42), 211-283.
3. Ghafoor, A. (2015), *Wing in ground effect vehicle: modeling and control*, M.Sc. thesis, METU.
4. Rozhdestvensky K.V. (1997), *Ekranoplans- The GEMs of fast water transport*, *Transactions of The Institute of Marine Engineers*, London, 109 (1), 47-74.
5. Zhukov, V. I., (1997), *Features of aerodynamics, stability and controllability of ekranoplans*, *Tsentralniy Aerogidrodinamicheskiiy Institut im. prof. N.E. Zhukovskogo*, 81.
6. A. Maimun, S. Jamei, A. Priyanto ve N. Azwadi (2010), *Aerodynamic Characteristics of Wing of WIG Catamaran vehicle During Ground Effect*, *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics*,3(5), 196-205.
7. Ockfen, A. (2008), *Viscous Modeling of Ground Effect Aerodynamics of Airfoil and Jet*, M.Sc. thesis, Washington State University.
8. M.R. Ahmed, T. Takasaki, Y. Kohama (2007), *Aerodynamics of a NACA4412 Airfoil in Ground Effect*, *Aiaa J.*, 45, 37-47.

## İKİ EKSENLİ GİMBAL SİSTEMLERİ İÇİN SÜRÜŞ HATTI MODELLEMESİ

Kaan Şahin <sup>(a)</sup>, A. Furkan Güç <sup>(a,b)</sup>, Zafer Yumrukçal <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Aselsan A.Ş., Mehmet Akif Ersoy Mahallesi 296. Cd No:16, Yenimahalle Ankara  
{ksahin,afguc,zyumrukcal}@aselsan.com.tr

<sup>(b)</sup> Bilkent Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, furkan.guc@bilkent.edu.tr

### ÖZ

Hareket kontrol algoritmalarının sistem üzerinde geliştirilmesi öncesinde benzetim ortamında yapılabilecek ön tasarım çalışmaları verim ve etkinliği artırmaktadır. Bu tip çalışmaların yürütülebilmesi için sistemlerin yüksek doğruluklu matematiksel modellerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada iki eksenli gimbal sistemleri için kontrolcü geliştirme çalışmalarına temel oluşturacak nitelikte, dişli boşluğu, sürtünme, dengesizlik gibi doğrusal olmayan etkiler içeren dinamik servo sistem modeli oluşturmak amaçlanmaktadır. Çalışma kapsamında model parametreleri belirlenirken yararlanılan sistem tanılama süreçlerinden bahsedilmiştir. Sonuç kısmında model doğrulamada kullanılan test sürecinden bahsedilmiş ve gerçek sistem ile oluşturulan modelin karşılaştırmalı sonuçları verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Dinamik sistemler, Gimbal sistemleri, Modelleme, Simülasyon, Sistem tanılama

### ABSTRACT

Inertial stabilization platforms are using lots of applications such as cameras, weapon systems and telescopes. The aim of the systems is stabilizing line of sight and positioning to the desired position. There is various motion control methods for providing the requirements. Before development of motion control algorithms on the real system, preliminary works which is working on simulations is increase the efficiency. In this paper, obtaining detailed model of 2 degree of freedom gimbal systems which has nonlinear effects such as friction, static unbalance, gyroscope noises and gear backlash is explained. System identification processes are briefly mentioned under the related

sections. At the 3th section, test processes which is used for system identification briefly mentioned and comparative results between real system and simulation model are shared.

**Keywords:** Dynamical systems, Gimbal systems, Modelling, Simulation, system identification

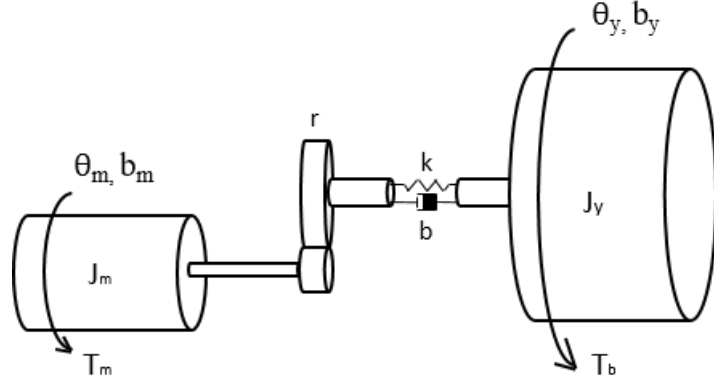
## 1. GİRİŞ

Gimbal sistemleri bilgisayar ya da kullanıcı tarafından kontrol edilen, üzerine farklı amaçlarla takılan faydalı yükü istenen hedefe yönlendirilen sistemlerdir. Sabit ya da hareketli bir platform üzerinde konumlandırılabilir. Üzerindeki faydalı yük bir ateşli silah, radar, lazer ve ya görüntüleme cihazı olabilir. Stabilize gimbal sistemlerinin amacı çeşitli sebeplerle oluşan bozucuların etkisini en aza indirerek istenilen hedefe bakmayı sürdürebilmesidir. Bozucu etkiler sistemin üzerine monte edildiği aracın hareketleri, titreşimleri ve sürtünme, statik kütle dengesizliği, dinamik kütle dengesizliği, tork dalgalanmaları gibi doğrusal olmayan bozucular olabilir.[1][2]

İki eksenli stabilize yönlendirme platformları yan ve yükseliş eksenleri olmak üzere iki eksenle yönlendirilebilen ve bu eksenlerde stabilize olma kabiliyetine sahip platformlardır. Stabilize yönlendirme platformlarında eyleyici olarak her eksenle birer tane fırçasız DC motor kullanılmaktadır. Bu motorlarda hem komütasyonu sağlamak hem de motor pozisyon ve hız bilgilerini üretmekte kullanılan açı algılayıcı bulunmaktadır. Farklı platformlarda kullanılan motorlar dişli kutulu veya doğrudan tahrikli olabilmektedir. Eksenlerin yönlendirmesi için gerekli olan pozisyon bilgisi yine her eksenle birer adet açı kodlayıcı vasıtasıyla sağlanmaktadır. Stabilizasyon için gerekli olan hız bilgileri genellikle yükseliş eksenine monte edilen iki eksenli dönüölçer ile ölçülmektedir. Bu bildiri, ASELSAN tarafından geliştirilen iki serbestlik dereceli stabilize yönlendirme sisteminin modelleme ve sistem tanılama çalışmalarını içermektedir. Çalışma kapsamında iki eksen birbirinden bağımsız kabul edilmiş ve tek eksen bağımsız olarak ele alınmıştır. Çalışma boyunca MATLAB/Simulink paket programı kullanılmıştır.

## 2. MODELLEME

Stabilize yönlendirme platformları oldukça rijit uzuvlardan oluşmaktadır. Ancak eklem bölgelerindeki dişli kutusu bağlantılarından kaynaklanan esneklikler bulunmaktadır. Sistem davranışı 2 serbestlik dereceli kütle yay sistemiyle paralellikler göstermektedir. Bu sebeple sürüş hattını modellerken 2 serbestlik dereceli kütle yay modeli kullanılmıştır. Sonrasında sisteme doğrusal olmayan etkilerden, sürtünme ve yükseliş ekseninin farklı açılarda bulunmasından kaynaklanan dengesizlik eklenmiştir.



**Şekil 1.** İki serbestlik dereceli kütle yay sistemi

### 2.1.Dinamik modelleme

Şekil 1’de örnek iki kütleli ve aralarında esneklik bulunan kütle yay sistemi gösterilmektedir. Kullanılan parametrelerin açıklamaları ve birimleri de Tablo 1’de yer almaktadır. Sistemi tanımlayan diferansiyel denklemler aşağıda verilmiştir.

**Tablo 1.** Sistem parametreleri ve açıklamaları

Parametre	Açıklama	Birim
$T_m$	Sisteme uygulanan elektromekanik tork girdisi	N.m
$J_m$	Motor şaft ataleti	kg.m <sup>2</sup>
$b_m$	Motor şaft rulmanındaki sönümlenme katsayısı	N.m/(rad/s)
$\theta_m$	Motor milinin açısız pozisyonu	rad
$r$	Aktarma oranı	-
$k$	Dişli kutusu esnekliği	N.m/rad
$b$	Dişli kutusu sönüm katsayısı	N.m/(rad/s)
$J_y$	Yük tarafına aktarılan motor şaftı ataleti	kg.m <sup>2</sup>
$b_y$	Yük tarafına aktarılan rulman sönümü	N.m/(rad/s)
$\theta_y$	Yük tarafının açısız pozisyonu	rad
$T_b$	Yük tarafındaki bozucu tork	N.m

$$T_m(t) - J_m * \ddot{\theta}_m(t) - b_m * \dot{\theta}_m(t) - rk * (r\theta_m(t) - \theta_y(t)) - rb * (r\dot{\theta}_m(t) - \dot{\theta}_y(t)) = 0 \quad (1)$$

$$T_d(t) - J_l * \ddot{\theta}_y(t) - b_y * \dot{\theta}_y(t) + rk * (r\theta_m(t) - \theta_y(t)) + rb * (r\dot{\theta}_m(t) - \dot{\theta}_y(t)) = 0 \quad (2)$$

(1) ve (2)'de tariflenen doğrusal zamanla değişmeyen sistemin çözümü için Laplace dönüşümü yapılabilir. Uygulanan motor ve bozucu torku giriş, motor ve yük tarafındaki hızlar çıkış olarak alındığında denklemler aşağıdaki gibi olur.  $\omega_m$  motor hızını,  $\omega_y$  yük tarafındaki hızı göstermektedir.

$$T_m(s) = J_m * s * \omega_m(s) + b_m * \omega_m(s) + \frac{rk}{s} * (r\omega_m(s) - \omega_y(s)) + rb * (r\omega_m(s) - \omega_y(s)) \quad (4)$$

$$(J_m * s + b_m + \frac{rk}{s} + rb) * \omega_m(s) - (\frac{rk}{s} + rb) * \omega_y(s) = T_m(s) \quad (5)$$

$$(J_y * s + b_y + rb + \frac{rk}{s}) * \omega_y(s) - (\frac{rk}{s} + rb) * \omega_m(s) = T_d(s) \quad (6)$$

Yukarıdaki denklemlerde sadeleştirme yapılarak matris formu aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$A = (J_m * s + b_m + \frac{rk}{s} + rb), B = (\frac{rk}{s} + rb), C = (J_y * s + b_y + rb + \frac{rk}{s}) \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} A & -B \\ -B & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_m(s) \\ \omega_y(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_m(s) \\ T_d(s) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Denklemlerdeki parametreleri elde etmek için sisteme sabit genlikli, değişken frekanslı sinüs işaretleri uygulanmıştır. Dönüölçer ve açı algılayıcıdan veriler toplanmıştır. Sistem cevabı düşük frekanslarda  $\frac{1}{J*s}$  fonksiyonunun cevabı ile paralellik gösterdiği kabul edilmiş ve atalet parametreleri buradan elde edilmiştir. Sistemin tüm frekans tepkisi cevabına bakarak rezonans ve anti-rezonans çiftleri belirlenmiştir. Rezonans ve anti-rezonans çiftinin frekans ve genliklerinden yola çıkarak esneklik ve sönüm katsayılarına ulaşılmıştır.

## 2.2.Sürtünme modeli

Stabilize yönlendirme platformunun istenen konum ve ya hız isteklerini gerçekleştirirken karşılaştığı bozucu etmenlerden biri sürüş hattındaki sürtünme kuvvetidir. Literatürdeki sürtünme modelleme çalışmalarında doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlara sahip birçok sürtünme karakteristiği bulunmaktadır.[3]

Çalışma kapsamında, gerçek sisteme yakınlıklarını karşılaştırabilmek ve ihtiyacı en iyi karşılayan modeli bulabilmek amacıyla farklı sürtünme modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerin ilki ve temeli sayılabilecek Coulomb modeli, (9)'da verildiği gibi statik pürüzlü yüzeylerin hızlarının yönüne bağlıdır.[4]

$$F_s = F_c * \text{sgn}(v) \quad (9)$$

(9)'da  $F_c$  Coulomb kuvvetini,  $v$  pürüzlü yüzeylerin bağıl hızını göstermektedir. Birçok uygulamada kullanılan basit ama etkili bu modele kayma bölgesi tanımını iyileştirmek amacıyla viskoz etkiler eklendiğinde (10) elde edilir.

$$F_s = F_c * \text{sgn}(v) + \sigma_2 v \quad (10)$$

(10)'da  $\sigma_2$  viskoz sürtünme katsayısını göstermektedir. Yukarıdaki her iki model de pürüzlü yüzeylerin bağıl hızlarının sıfırdan farklı olduğu durumları açıklamaktadır. Sıfır bağıl hız geçişini daha iyi açıklamak için Coulomb modeli üzerine yapışma modeli eklenmiştir.

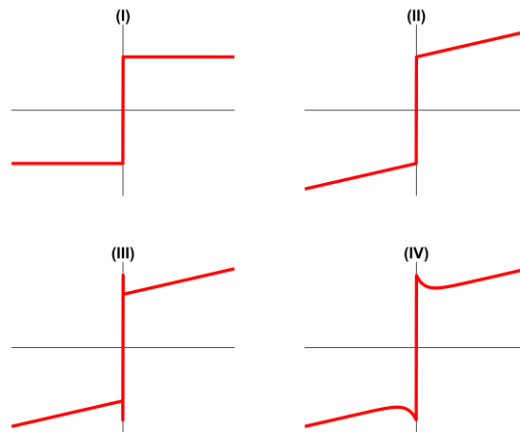
$$F_s = \begin{cases} F_a, & v = 0 \text{ ve } |F_a| < F_s \\ F_s * \text{sgn}(v), & v \neq 0 \text{ ve } |F_a| \geq F_s \end{cases} \quad (11)$$

(11)'de  $F_a$  uygulanan kuvveti,  $F_s$  yapışma kuvvetini ifade etmektedir. (11)'de sürtünme kuvvet, süreksiz bir fonksiyon şeklinde tanımlanmıştır. Bu modele Stribeck etkisi eklenerek süreksizlik ortadan kaldırılmış ve sürtünme kuvveti yüzeylerin birbirine göre bağıl hızlarının sürekli bir fonksiyonu haline getirilmiştir.

$$F_s = \begin{cases} s(v) + \sigma_2 & v \neq 0, \\ F_a & v = 0 \text{ ve } |F_a| < F_s \\ F_s * \text{sgn}(v) & \text{diğer.} \end{cases} \quad (12)$$

$$s(v) = \left( F_c + (F_s - F_c) e^{-\frac{v}{v_s} \delta} \right) * \text{sgn}(v) \quad (13)$$

(12)'de  $s(v)$ , stribeck eğrisini ifade etmektedir ve (13)'de gösterilmiştir. (13)'de  $v_s$  Stribeck hızını,  $\delta$  Stribeck biçim çarpanını göstermektedir. Yukarıda denklemleri verilen modellerin kombinasyonları ile oluşturulan ve sisteme eklenen sürtünme modellerinin hızla bağlı grafikleri Şekil 2.'de verilmiştir.



**Şekil 2.** Farklı sürtünme modelleri, (I) Coulomb, (II) Coulomb + Viskoz, (III) Coulomb + Viskoz +Yapışma (IV) Coulomb + Viskoz +Yapışma + Stribeck



Klasik modellerin yanında kayma bölgesi, kayma öncesi bölgesi, Stribeck, tutma bırakma (stick-slip), sürtünme gecikmesi, histerisiz özelliklerini kapsayan LuGre sürtünme modeli de sisteme dahil edilmiştir. Dinamik bir sürtünme modeli olan LuGre modelinde kayma ve kayma öncesi bölgede ayrı parametreler kullanılmaktadır.

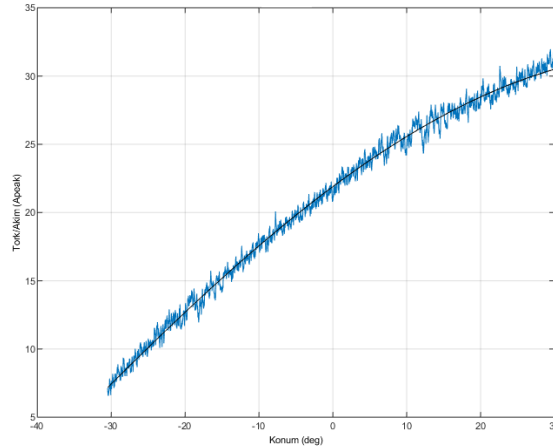
$$\frac{dz}{dt} = \dot{q} - \sigma_0 \frac{|\dot{q}|}{s(\dot{q})} z \quad (14)$$

$$F(\dot{q}, z) = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 \dot{q} \quad (15)$$

(14) ve (15)'te  $\dot{q}$  hızı,  $z$  iç sürtünme katsayısını,  $\sigma_0$  fırça katılığı,  $\sigma_1$  fırça sönümlemesini ifade etmektedir. Sürtünme modellerinin parametrelerini belirlerken gri kutu yaklaşımıyla, sabit ve değişken hızlarda bir dizi testler yapılmış ve parametrelere karar verilmiştir.[5]

### 2.3. Dengesizlik modeli

Statik dengesizlik, ataletsel eksen takımının (dönme eksen takımının) orijini ile gımbal kütle merkezi arasındaki uzaklık farkından kaynaklı; yerçekimi veya lineer kuvvetler sebebiyle oluşan bozucu torktur [6]. Çalışılan sistemlerde yükseliş ekseninde dengesizlik etkileri önemli seviyeye ulaşmaktadır. Dengesizlik sistemde sabit hızla yapılan testler sonucunda toplanan verilere eğri uydurma yöntemiyle hesaplanmıştır. Şekil 3.'te örnek bir dengesizlik grafiği verilmiştir.

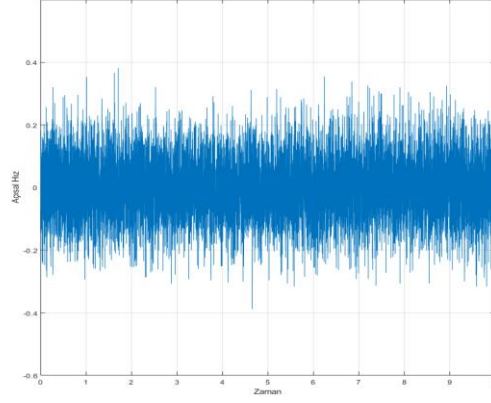


Şekil 3. Örnek dengesizlik eğrisi

### 2.4. Dönüölçer modeli

Dönüölçerler  $x, y, z$  eksenlerinde açısal hız ölçmede kullanılan araçlardır. Stabilize yönlendirme platformlarında, kontrol döngülerinde geri besleme işareti olarak dönüölçer algılayıcılarından toplanan veriler kullanılabilir. Ancak bu ölçüm cihazlarındaki deterministik ve stokastik hatalar ölçüm doğruluğunu olumsuz etkilemektedir. Stokastik

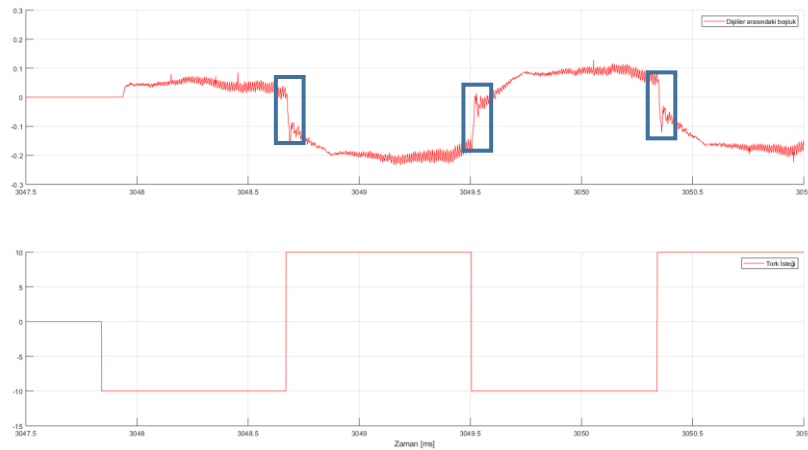
hatalara örnek sabit kayma kararsızlığı, oransal rastgele yürüyüş ve açısal rastgele yürüyüş verilebilir.[7] Oluşturulan modelde yer verilen dönüölçer modeli çıktısının örnek görüntüsü Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Örnek dönüölçer ölçümü

## 2.5. Dişli boşluk modeli

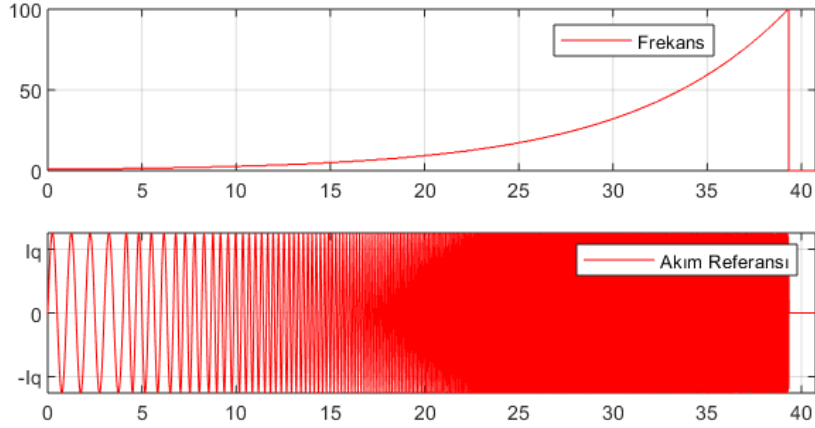
Hassas stabilize yönlendiricilerde genellikle kuvvetten kazanç sağlamak amacıyla dişli çarklar kullanılmaktadır. Kullanılan dişlilerin arasında boşluk olması kaçınılmazdır. Çeşitli mekanik iyileştirmelerle boşluk oranı minimize edilmeye çalışılsa da tamamen ortadan kaldırılamamaktadır.[8] Bu sebeple modele aktarma oranlarındaki boşluk oranı da dahil edilmiştir. Bu boşluk oranını tanımlamak için sisteme kare dalga tork isteği verilerek testler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'te örnek bir sisteme ait dişli boşluğu ölçümü verilmiştir.



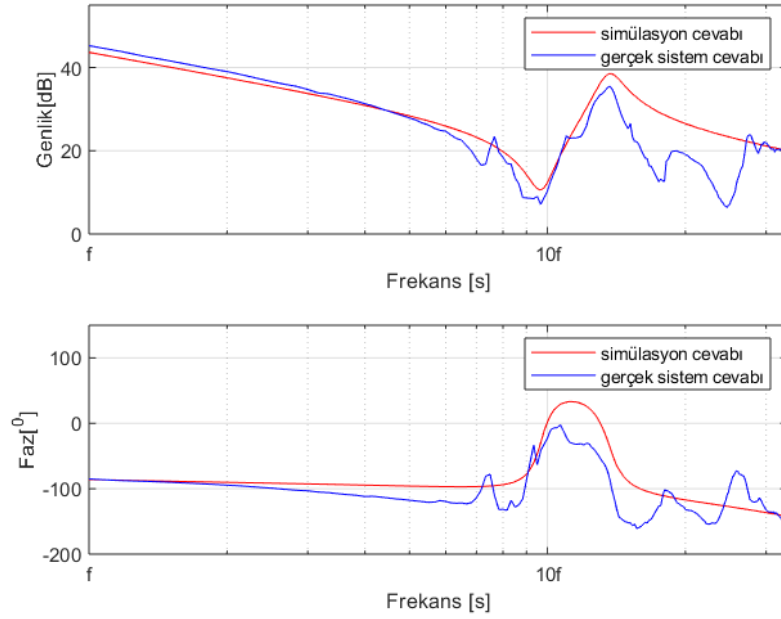
Şekil 5. Sabit genlikli tork isteği testi, tork(alt) dişli boşluğu (üst)

### 3. SONUÇ

Stabilize yönlendirme platformlarında hareket kontrol algoritmaları ve kontrolcü tasarımından önce modelleme çalışmaları yapılması büyük önem arz etmektedir. Oluşturulan model gerçek sisteme ne kadar yakınsa, gerçek sistem cevabı ile simülasyon cevabı o derece tutarlı olacaktır. Bu sebeple modelleme çalışmalarında doğrusal ve doğrusal olmayan etkiler göz önünde bulundurulup gerçeğe yakın bir sonuç elde edilmeye çalışılmıştır. Şekil 6’ da sistem tanılama ve doğrulama testleri için yararlanılan frekans tepkisi testi gösterilmiştir. Bu testte sisteme belirli aralıktaki frekanslarda sabit genlikli sinüs girdi işareti uygulanmaktadır. Şekil 7’de frekans tepkisi testi sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde gerçek sistem ve oluşturulan model cevabı büyük oranda örtüşmektedir. Yüksek frekansta ayrışmalar bulunmaktadır. Bunun sebebi sistemin serbestlik derecesinin 2den fazla olmasıdır. Ancak 2 serbestlik derecesine indirgenip elde edilen sonuçlar kontrolcü tasarımı için gerekli isterleri sağlamaktadır.



**Şekil 6.** Uygulanan Frekans Taraması Testi



Şekil 7. Frekans Tepkisi Testi Sonuçlarının Karşılaştırılması

#### 4. KAYNAKÇA

- [1] P. J. Kennedy and R. L. Kennedy(2003), Direct Versus Indirect Line of Sight (LoS) Stabilization. Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 11(1):3–15.
- [2] Biezad D.J.(1999), Integrated Navigation and Guidance Systems, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.,Virginia,ABD.
- [3] Armstrong-Hélouvry Brian, Pierre Dupont, and Carlo Canuda De Wit. (1994) "A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction." Automatica 30.7: 1083-1138.
- [4] Akmeliawati, Rini, and Momoh Jimoh E. Salami.( 2011) "Artificial intelligent based friction modelling and compensation in motion control system."Advances in Mechatronics. IntechOpen,.
- [5] Güç,A.F.,Yumrukçal Z. ve Özcan O.(2019), İki Eksenli Gimbal Sistemlerinin Benzetiminde Doğrusal Olmayan Sürtünme Etkilerinin Tanılanması,*Türkiye Robotbilim Konferansı, İstanbul*(yayın aşamasında)
- [6] M. Abdo, A. R. Toloei, A. R. Vali, M. R. Arvan, (2013), “Cascaded Control System for Two Axes Gimbal System with Mass Unbalance”,*International Journal of Scientific & Engineering Research*, Cilt: 4, No: 9, s:903 -912,.
- [7] Woodman O.J.(2007), An Introduction to Inertial Navigation.University of Cambridge Computer Laboratory:Cambridge,Birleşik Krallık
- [8] Maitra G. M.(1994), Handbook of Gear Design. Tata McGraw-Hill Education:Yeni Delhi,Hindistan.

## BİRLİKTE ÇALIŞABİLİRLİK SORUNLARI VE ARTI ÜRÜNÜ İLE ÇÖZÜM YAKLAŞIMI

**Serkan ÖZKAYMAK<sup>(a)</sup>, Merve Büşra SAYIN<sup>(a)</sup>, Arzum Berrak ARIBAL<sup>(a)</sup>  
Hürkan Orkun ZORBA<sup>(a)</sup>**

<sup>(a)</sup> CEY Savunma ve Simülasyon Sistemleri A.Ş., Üniversiteler Mah. 1596. Cad.  
Hacettepe Teknokent No: 6A/30, 06800 Çankaya-Ankara  
{sozkaymak, msayin, baribal, ozorba}@ceysavunma.com

### ÖZ

Yüksek Seviye Mimari (High Level Architecture HLA), simülasyon sistemlerinin birlikte çalışabilirliğini ve tekrar kullanılabilirliğini sağlamak amacıyla IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) tarafından tanımlanmış bir standarttır. HLA standardının yaygınlaşmasına paralel olarak, birlikte çalışabilirlik kavramı simülasyon ve modelleme dünyasında önem kazanmıştır.

Temel seviyede birlikte çalışabilirliği sağlamak için; federasyon, federasyonu oluşturan federeler, federeler arasındaki veri değişimi ve federe işleyişinin koordine edilmesi pratikte yeterli görülmektedir. Bu durumda HLA kurallarının sadece belirli bir kısmı uygulanmaktadır. Bu yaklaşım simülasyon sistemlerinin birlikte çalışabilirliğini sağlamak açısından yetersiz kalmaktadır. Bu kapsamda birlikte çalışabilirlik sorunlarına çözüm olması için yine IEEE tarafından FEDEP (Federation Development and Execution Process) ve DSEEP (Distributed Simulation Engineering and Execution Process) standartları tanımlanmıştır. Bu standartları kullanarak federasyon tasarımının gerçekleştirilmesi, birlikte çalışabilirlik sorunlarının giderilmesine yardımcı olmaktadır. Bu bildiride ARTI projesi kapsamında geliştirilmekte olan birlikte çalışabilirlik altyapısının birlikte çalışabilirlik sorunlarına getirdiği çözümlere yer verilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Birlikte çalışabilirlik, Yüksek Seviye Mimari, HLA, DSEEP, FEDEP, ARTI

# SIMULATION INTEROPERABILITY PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH BY ARTI PRODUCT

## ABSTRACT

In order to achieve interoperability and reuse of simulation systems, High Level Architecture (HLA) is published by IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Interoperability is gained popularity in parallel to proliferation of HLA standards in Modelling and Simulation world.

It might be thought that coordination of federation, federates, information exchange in federates and federation execution concepts would be sufficient for interoperability. Some parts of HLA rules are applied in this case. Such an approach is very insufficient for achieving interoperability. In order to solve this simulation interoperability problems, FEDEP (Federation Development and Execution Process) and DSEEP (Distributed Simulation Engineering and Execution Process) standards are also published by IEEE. Designing the federation by using these standards may help to solve the interoperability problems. In this paper, solutions to interoperability problems provided by the infrastructure developed in ARTI project are presented.

**Keywords:** Interoperability, High Level Architecture, HLA, DSEEP, FEDEP, ARTI

## 1. GİRİŞ

En basit tanımıyla birlikte çalışabilirlik, belirli amaca sahip sistemlerin ya da modellerin daha büyük bir amacı gerçekleştirmek için bir arada çalışabilme yeteneğidir. Model ve simülasyonların birlikte çalışabilirliğini sağlamak karmaşık bir konudur. Bu nedenle modelleme ve simülasyon dünyasında birlikte çalışabilirlik için birçok standart tanımlanmıştır. Bu standartlar farklı soyutlama seviyelerini hedeflemektedir. Örneğin Dağıtık Simülasyon Mühendislik ve İşletme Süreci (Distributed Simulation Engineering and Execution Process, DSEEP) simülasyon birlikte çalışabilirliğini sağlamak için ön koşul olan simülasyon geliştirme sürecini tanımlar [1]. Daha düşük soyutlama seviyelerinde birlikte çalışabilirliği ve tekrar kullanılabilirliğini sağlamak için IEEE tarafından Yüksek Seviyeli Mimari (High Level Architecture, HLA) standardı tanımlanmıştır [2], [3], [4], [5].

Temel seviyede birlikte çalışabilirliği sağlamak için; federasyon, federasyonu oluşturan federeler, federeler arasındaki veri değişimi ve federe işleyişinin koordine edilmesi pratikte yeterli görülmektedir. Bu durumda HLA kurallarının sadece belirli bir kısmı uygulanmaktadır. Bu yaklaşım simülasyon sistemlerinin birlikte çalışabilirliğini sağlamak açısından yetersiz kalmaktadır. HLA kuralları standartta tanımlandığı şekliyle bir bütün olarak uygulanmalıdır. Bir bütün olarak uygulanmaması durumunda diğer kural setleri için özel çözümler geliştirilmekte, bu çözümler çoğu zaman standartta belirtilen beklentileri karşılayamadığı gibi bazı durumlarda performans ve işlevsellik benzeri sıkıntılara bile yol açabilmektedir. Bu bildiride HLA tabanlı simülasyon sistemlerinde DSEEP süreç adımları uygulanırken karşılaşılan birlikte çalışabilirlik

problemleri incelenmiş ve İleri Koşum Zaman Altyapı (Advanced Run-Time Infrastructure, ARTI) projesinde HLA bileşenlerinin bu problemlerin çözümüne nasıl katkı sağladığına yer verilmiştir.

ARTI projesi öncelikli olarak ülkemizde geliştirilmekte olan simülasyon projelerinin birlikte çalışabilirlik çalışmalarında kullanılmak üzere milli imkanlarla geliştirilmekte olan bir projedir. Hedef en az bu konuda halihazırda kullanılmakta olan RTI ve diğer altyapıların sağladığı performans ve işlevsellikleri sağlamak ve bu konuda yaşanmakta olan entegrasyon problemlerini en aza indirmektir. Öte yandan, SISO tarafından önerilen DLC (Dynamic Link Compatibility) özelliği sayesinde, ARTI'da geliştirilen RTI, herhangi bir simülasyon sisteminde kullanılmakta olan farklı RTI ürününün yerine, herhangi bir kod değişikliği olmadan kullanılacaktır. Böylece ARTI ile sağlanan performans ve işlevselliğin gözlemlenebilmesine ve benzerleriyle karşılaştırılabilmesine olanak sağlanmış olacaktır.

## **2. DAĞITIK SİMÜLASYON MÜHENDİSLİK VE İŞLETME SÜRECİ**

DSEEP dağıtık simülasyon ortamları için planlama, tasarım, işletim ve değerlendirme safhalarını tanımlayan bir süreç modelidir. Süreç modeli genel olarak aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır [1].

1. Simülasyon ortamı hedeflerinin tanımla
  - a) Kullanıcı ihtiyaçlarını tanımla
  - b) Simülasyon için hedefleri belirle
  - c) Ön planlama yap
2. Kavramsal analiz gerçekleştir
  - a) Senaryoları geliştir
  - b) Kavramsal modeli oluştur
  - c) Simülasyon ortamı gereksinimlerini tanımla
3. Simülasyon ortamını tasarla
  - a) Simülasyon ortamına dahil olabilecek simülasyon bileşenlerini belirle
  - b) Simülasyon ortamını tasarla
  - c) Simülasyon bileşenlerini tasarla
  - d) Detaylı plan hazırla

4. Simülasyon ortamı gerçekleştirimi yap
  - a) Simülasyon veri değişim modelini oluştur
  - b) Simülasyon ortamı kabullerini tanımla
  - c) Simülasyon bileşenlerini tasarla
  - d) Simülasyon ortamı altyapısını tasarla
5. Simülasyon ortamı entegrasyon ve test faaliyetlerini gerçekleştir
  - a) Simülasyon işletimini planla
  - b) Simülasyon bileşenlerini entegre et
  - c) Simülasyon ortamını test et
6. Simülasyon işletimini gerçekleştir
  - a) Simülasyonu işlet
  - b) Simülasyon ortamı çıktılarını hazırla
7. Veriyi analiz et ve sonuçları değerlendir
  - a) Veriyi analiz et
  - b) Sonuçları değerlendir ve geribildirim oluştur

### **3. YÜKSEK SEVİYE MİMARİ**

HLA, SISO (Simulation Interoperability Standards Organization) tarafından geliştirilmiş ve IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) tarafından yayınlanmıştır [2]. Standart tarafından 3 HLA bileşeni (HLA kuralları, arayüz tanımlamaları ve nesne model şablonu) tanımlanmıştır. HLA bileşenlerini kullanarak simülasyon mimarisi tasarlanabilir. HLA bileşen tanımlamaları; federasyon, federe ve koşum zaman altyapısı (Run-Time Infrastructure, RTI) kullanımını gerektirir. Federasyon, dağıtık HLA simülasyonu boyunca birlikte kullanılan simülasyon, araç ya da modellerin oluşturduğu kümedir. Simülasyon, araç ve modellerin her birine federe adı verilir. RTI ise dağıtık federasyon işletiminden sorumlu birimdir. Federasyon nesne modelleri FOM'da, simülasyon nesne modelleri ise SOM'da tanımlanır. FOM (Federation Object Model) bilgi değişimi için gerekli olan nesne sınıfları ve etkileşim sınıflarının tanımlanması, SOM (Simulation Object Model) ise federasyondaki tüm federelerin kullandığı bilgilerin tanımlanması için kullanılır.

DIS (Distributed Interactive Simulation) HLA'dan önce en yaygın kullanılan mimarilerden birisi iken, TENA (Test and Training Enabling Architecture) ise son yıllarda bu amaçla geliştirilmekte olan ancak henüz yeterince uygulama alanı



bulamamış bir mimaridir. Günümüzde bu konuda halen en yaygın kullanılan ve standartlar tarafından da önerilmekte olan mimari HLA'dır.

ARTI projesi kapsamında IEEE-1516-2000 ve IEEE-1516-2010 uyumlu bir koşum zaman altyapısı geliştirilecektir. Birlikte çalışabilirlik için temel bileşen olan koşum zaman altyapısına ek olarak FOM/SOM editörü, kod üretici ve kayıt/oyunatma aracı geliştirilecektir.

#### **4. BİRLİKTE ÇALIŞABİLİRLİK SORUNLARI**

Literatürde simülasyonların birlikte çalışabilirlik sorunlarını analiz etmek için bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan en önemlisi NMSG (NATO Modelling and Simulation Group) çalışma grubu tarafından gerçekleştirilen MSG-086 Simulation Interoperability çalışmasıdır [6]. Bu çalışma 2010 yılında başlatılmış ve birlikte çalışabilirlik sorunları DSEEP adımları ile eşleştirilmiştir. Bu sorun gruplarından bazıları şunlardır:

- Kavramsal model ile ilgili sorunlar
- Federasyon geliştirimi sorunları
- Sadakat seviyesi ile ilgili sorunlar
- Altyapı ile ilgili sorunlar
- HLA kurallarının uygulanması ile ilgili sorunlar

HLA kullanılmasının birlikte çalışabilirlik problemlerinin çözümünde sağladığı avantajlar için çeşitli çalışmalar mevcuttur [11], [12]. Bunlardan birisinde HLA'nın köprü (bridge) olarak kullanılması ile sağlanacak avantajlardan bahsedilmiştir [13]. Bu bildiriye ise yukarıda belirtilen DSEEP çalışması ile tespit edilen sorunlar ve çözümlerine ağırlık verilmiştir.

##### **4.1. Kavramsal Model İle İlgili Sorunlar**

DSEEP sürecinin 2. adımı kavramsal analiz adımıdır. Bununla birlikte ilk adımda yapılan kullanıcı ihtiyaçları ve simülasyon hedeflerini belirlemek kavramsal analiz çalışmasının girdisidir. Kavramsal analizin temel adımları; senaryo geliştirme, kavramsal model geliştirme ve simülasyon ortamı gereksinimlerinin tanımlanmasıdır. Bunun sonucunda senaryo, kavramsal model, simülasyon ortamı gereksinimleri ve test kriterleri bilgi olarak üretilmektedir. Bu adımların sonucunda ortaya çıkan bilgi, diğer DSEEP süreç adımları için ön koşul olarak bulunmaktadır. Kavramsal analiz adımları doğru uygulanmadığı durumda birlikte çalışabilirliği etkileyebilecek tutarsızlıklar,

uyumsuzluklar ve eksiklikler ortaya çıkmaktadır. Simülasyon modelleri kavramsal birlikte çalışabilirlik seviyesinde birbirleriyle uyumsuzluk problemleri yaşamaktadır. Bu sorunların oluşmasının nedenleri;

- Kavramsal model analizi yapılmaması
- Dağıtık simülasyon ortamlarının geliştirimi için standart ya da kılavuz bulunmaması
- Format ve notasyon konusunda bir kabullenme yapılmaması
- Kavramsal modelleme araçlarının kavramsal model üzerinde tutarlılık kontrolleri yapılmaması

olarak verilebilir.

Federasyon tasarımı aşamasında kavramsal modellemenin sistematik bir şekilde yapılması önem kazanmaktadır. Sistematik modellemeyi destekleyecek araçlar yardımı ile proje takvimi ve bütçesinde önemli tasarruflar yapılabilir. Kavramsal modelleme sonrası ortaya çıkacak araç destekli ürünler ile DSEEP süreç adımları için sade, kolay anlaşılır ve sürdürülebilir bir modelleme yapmak mümkün hale gelir. Bu amaçla görsel bir modelleme aracı kullanılabilir. CEY Savunma bünyesinde geliştirilmekte olan görsel model tanımlama aracı ve dili ile kavramsal modelleme problemlerine çözüm bulunabileceği değerlendirilmektedir [7]. Bu araç ile tanımlanan kavramsal model çıktısı kullanılarak simülasyon bileşenleri üretmek mümkün olacaktır. Bu HLA uyumlu simülasyon bileşenleri HLA uyumlu bir federe tasarlanması aşamasında girdi olarak kullanılacaktır.

#### **4.2. Federasyon Geliştirilmesi Sırasında Karşılaşılan Sorunlar**

DSEEP sürecinin 3. ve 4. adımları federasyon geliştirimi adımlarıdır. Federasyon geliştirimi sırasında karşılaşılan sorunlar genellikle HLA altyapısı ile ilgili problemler olarak ortaya çıkmaktadır. Bu problemler;

- HLA, TENA ve DIS gibi farklı mimarilerin birlikte kullanılması ile oluşan problemler
- Farklı HLA versiyonlarının kullanılması sonucu ortaya çıkan problemler
- Farklı FOM versiyonlarının kullanılması ile ortaya çıkan problemler
- Uyumsuz FOM modüllerinin kullanılması ile ortaya çıkan problemler
- Federasyon kabullenmelerinin eksik olması sonucu ortaya çıkan problemler

olarak sıralanabilir.

Proje kapsamında geliştirilecek FOM/SOM editörü ve kod üretici ile yukarıda adı geçen problemlerin bir kısmını çözmek mümkündür. FOM/SOM üretici ile Object Model Template (OMT) dokümanında belirtilen kurallara [4] uygun FOM ve SOM üretecektir. Bu FOM ve SOM kod üreticisine girdi olarak kullanılarak simülasyon mühendisini HLA detaylarından soyutlayacak kod üretilecektir. Örneğin bu soyutlama düzeyi ile bir federenin *BaseEntity* sınıfında bir nesne üretmesi için *registerObject* HLA servisini çağırarak yerine kod üretici ile üretilen *BaseEntity* sınıfından bir nesne yaratması mümkün olacaktır. Bu sınıfın *setWorldLocation* metodunu çağırarak unsurun lokasyonu değiştirilebilecektir. Bu metodun çağırımı ile alt seviyede gerekli kodlama/dönüştürme işlemleri yapılacak ve ilgili HLA servisleri çağrılacaktır. Buna ek olarak farklı mimarilerin birlikte kullanıldığı simülasyon projeleri için gerekli geçit kapısı bileşenlerini bu yöntemi kullanarak oluşturmak mümkün olacaktır. Ayrıca FOM/SOM editörünün sahip olacağı tutarlılık kontrol özellikleri ile FOM problemlerinin önüne geçmek mümkün olabilecektir.

#### 4.3. Sadakat Seviyesi İle İlgili Sorunlar

DSEEP sürecinin 3, 4 ve 5. adımlarında sadakat seviye problemleri ile karşılaşabilmektedir. Bu sorunlar genellikle seviye ve gösterim konularında belirli bir kabullenmenin bulunmadığı durumlarda ortaya çıkmaktadır. Bu problemler;

- Unsur bütünleştirme/ayırışma için bir tanımlama yapılmaması
- Unsur çözünürlük seviyeleri için mutabakata varılamaması
- Sadakat seviyeleri ile ilgili bir sınıflandırma yapılmaması
- Kritik davranışların ve ilgili algoritmaların tanımlanmaması
- Tutarsız insan-makine arayüzleri

olarak sıralanabilir.

Yukarıda verilen problemleri çözmek için detaylı modelleme ve tasarım yapmak gerekmektedir. Bunun ötesinde oluşturulacak modelin açık, üzerinde tartışılabilir, farklı soyutlama seviyelerinde incelenebilir olması gerekmektedir. Kavramsal analiz problemleri bölümünde açıklanan araç kullanılarak yukarıdaki özelliklere sahip bir modelleme yapmak mümkün olabilecektir. Böylece sadakat seviyesi problemlerinin büyük bir kısmını çözmek mümkün hale gelecektir.

#### 4.4. Altyapı İle İlgili Sorunlar

DSEEP sürecinin 4, 5 ve 6. adımlarında altyapı ile ilgili sorunlar ile karşılaşabilmektedir. HLA ile birlikte çalışabilirliği sağlamak için gereken en önemli bileşen koşum zaman altyapısıdır. Altyapı ile ilgili sorunlar;

- Kodlama ve ayrıştırma problemleri
- Veri yoğunluğu nedeniyle paket kayıpları
- Federasyon ve federe tasarımından kaynaklanan performans kayıpları

olarak sıralanabilir.

IEEE-1516 standardı ile uyumlu koşum zaman altyapıları kullanarak veriyi kodlamak ve ayrıştırmak mümkündür. Bu şekilde kodlama ve ayrıştırma koşum zaman altyapısı bileşenleri kullanılarak daha az hata ile gerçekleştirilebilir. Proje kapsamında gerçekleştirimi yapılacak Kayıt ve Oynatma Aracı ile Gerçek Zamanlı Platform Tanımlama FOM (Real-time Platform Representation FOM, RPR-FOM) [8] uyumlu verileri görselleştirmek mümkün olabilecektir. Geliştirilecek araç, aynı zamanda jenerik etkileşimlerle gönderilen simülasyona özel verilerin anlamlandırılması için bir arayüz içerecektir. Bu arayüz yardımı ile simülasyona özel veriler görselleştirilerek kodlama ve ayrıştırma problemlerini tespit etmek ve çözmek kolaylaşacaktır. Federasyon trafiği ve istatistiklerini bu araç ile görselleştirmek mümkün olacak ve bu sayede ağ trafiğinde oluşan problemleri görmek kolaylaşacaktır. Bu istatistikler sayesinde federasyon konfigürasyonu değiştirilerek performans iyileştirmeleri yapılabilecektir.

#### **4.5. HLA Kurallarının Uygulanması İle İlgili Sorunlar**

HLA standardında federelerin uyması gereken kurallar belirtilmiştir. Federelerin Simülasyon Nesne Modeli (Simulation Object Model, SOM) ile bu kurallara uyması beklenir. Bu kurallara uyulmadığı durumda federe amaçları bilinemediği için birlikte çalışabilirlik faaliyetlerini yürütmek zorlaşmaktadır. Dağıtık simülasyonlar ile HLA kurallarının uygulanması konusundaki detaylara [9] ve [10] numaralı kaynaklardan erişilebilir.

HLA federe kurallarına uyulmadığı durumda aşağıdaki sorunlar gözlemlenebilir.

- Federelerin ihtiyaç duyduğu ve dışarıya servis ettiği veriler bilinemez
- Federelerin sahiplik yönetimi ile ilgili bilgi almak mümkün olmaz
- Federelerin bilgi değişimini nasıl yaptıkları bilinemez
- Federelerin zaman yönetimini nasıl gerçekleştirdikleri bilinemez

Proje kapsamında geliştirilecek en önemli bileşen Koşum Zaman Altyapısı'dır (Run-Time Infrastructure, RTI). Proje kapsamında geliştirilecek yardımcı araçlar ve RTI bileşeni ile federe HLA uyumluluğu belirli bir seviyede denetlenebilecek ve bu federeyi oluşturan simülasyon bileşeninin tekrar kullanılması durumunda oluşabilecek birlikte çalışabilirlik problemlerinin en aza indirilmesi hedeflenecektir.,

## 5. SONUÇ

Simülasyon sistemleri birlikte çalışabilirliğinde çeşitli sorunlarla karşılaşabilmektedir. Bunlardan bazıları; kavramsal modelleme aşamasında karşılaşılan sorunlar, federasyonun geliştirilmesi sırasında karşılaşılan sorunlar, sadakat seviyesi sorunları, altyapı sorunları ve HLA kurallarının uygulanması ile ilgili sorunlardır.

Bu sorunlar çoğunlukla bilinen, çözülmesi için fazladan ilgi ve motivasyon gerektiren, bazen göz ardı edilen, bazen de farkedilemeyen sorunlardır. Bu sorunların çözümlerinde farklı yaklaşımlar geliştirilebilir ve farklı ürünlerden yararlanılabilir. Biz bu sorunları ARTI ürünü ile çözmeyi hedefliyoruz.

Geliştirilmesi halen devam eden ARTI projesinin öncelikli hedefi HLA IEEE-1516-2000 ve HLA IEEE-1516-2010 (Evolved) uyumlu bir koşum zaman altyapısı geliştirerek simülasyon sistemlerinin birlikte çalışabilirliği ve tekrar kullanılabilirliğini sağlamaktır. Milli imkânlarla geliştirilecek bu projeye birlikte modelleme ve simülasyon sektöründe ihtiyaç duyulan RTI ürünlerinde yurt dışına bağımlılığı ortadan kaldıracak milli bir ürüne sahip olunacaktır. Ayrıca teknik yeterlilik, sağlanacak hizmet desteği ve entegrasyon kolaylığı ile mevcut simülasyonlarda birlikte çalışabilirlik faaliyetlerinin ARTI bileşenlerinin kullanımı ile kolaylaşabileceği, proje takvim ve bütçelerinde tasarruf sağlanabileceği düşünülmektedir. Ürünün sahip olacağı Dinamik Link Uyumluluğu (Dynamic Link Compability, DLC) yeteneği ile, önceden geliştirilmiş simülasyon projelerinde kod değişikliğine ihtiyaç olmadan ARTI koşum zaman altyapısını kullanmak mümkün olacaktır.

Sonuç olarak ARTI projesi bileşenleri kullanımı ile federasyonun geliştirilmesi, sadakat seviyesi ve HLA kurallarının uygulanması gibi birlikte çalışabilirlikte karşılaşılan sorunların bir kısmının çözülebileceğini değerlendirmekteyiz. Projenin geliştirilmesine halihazırda devam edilmekte, 2020 yılı başlarında çıkacak ilk prototiple birlikte ürünün yetkinlikleri ve sağladığı kolaylıklar görülebilecektir. Projenin tamamlanmasının ardından bu sorunların nasıl çözülebildiğine dair detay bilgiler, uygulama sonuçları ile birlikte verilecektir.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] IEEE (2010), IEEE Std 1730 IEEE Recommended Practice for Distributed Simulation Engineering and Execution Process (DSEEP).
- [2] IEEE (2010), IEEE-1516-2010 Modeling and Simulation High Level Architecture - Framework and Rules.
- [3] IEEE (2010), IEEE-1516-2010-1 Modeling and Simulation High Level Architecture - Federate Interface Specification.
- [4] IEEE (2010), IEEE-1516-2010-2 Modeling and Simulation High Level Architecture - Object Modeling Template (OMT) Specification.
- [5] IEEE (2000), IEEE-1516-2010-3 IEEE Recommended Practice for High Level Architecture (HLA) Federation Development and Execution Process (FEDEP).
- [6] SISO (2015), Simulation Interoperability TR-MSG-086.
- [7] Can, A., Ural, G., Doğru, A. (2019), Model Dili Tanımlamak, *USMOS 2019*.
- [8] SISO (1999), SISO-STD-001.1, Realtime Platform Reference (RPR) FOM.
- [9] Topçu, O., Durak, U., Oğuztüzün, H., Yılmaz, L. (2016) , Distributed Simulation : A Model Driven Engineering Approach, Springer, İsviçre.
- [10] Topçu, O., Oğuztüzün, H. (2017), Guide to Distributed Simulation with HLA, Springer, İsviçre.
- [11] Dahmann, J. et.al. (1999), HLA and Beyond: Interoperability Challenges, *Simulation Interoperability Workshop*.
- [12] Möller, B. et.al. (2008), HLA Evolved-A Summary of Major Technical Improvements, *Spring Simulation Interoperability Workshop*.
- [13] Dingel, J., Garlan, D., Damon, C. (2002), Bridging the HLA: Problems and Solutions, *IEEE International Workshop on Distributed Simulations and Real Time Applications*.

## MOTOR BRAKETİ CIVATA BAĞLANTISININ TUTUNMA YETERLİLİĞİNİN SONLU ELEMANLAR METODU İLE İNCELENMESİ

Ahmet Özgün Aksoy <sup>(a)</sup>, Göktuğ Çınar <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> OTOKAR OTOMOTİV VE SAVUNMA SANAYİ A.Ş., Atatürk Cd No:9 Arifiye Sakarya, {aaksoy, gcinar}@t.otokar.com.tr,

### ÖZ

Cıvatalar en yaygın kullanılan bağlantı elemanlarından biridir. Çözülüp değiştirilebilir olmaları, standartlar dahilinde kolayca temin edilebilir olmaları ve farklı bir çok amaç doğrultusunda kullanılabilir olmaları cıvataları günümüzde en çok karşılaştığımız bağlantı elemanları konumuna getirmiştir. Ancak yaygın kullanım alanına rağmen cıvatalarda ön gerilme kaybı tam anlamıyla önlenememiş değildir. Ön gerilme kaybının yaşanması cıvata ile bağlanan iki yüzey arasında oluşan kuvvetin düşmesine, hatta cıvata bağlantısının çözülmesine yol açabilir.

Bu çalışmada bir askeri aracın motor bağlantı braketi cıvatalarının farklı konstrüksiyon ve sıkma torklarından nasıl etkilendiği sonlu elemanlar metodu kullanılarak araştırılmıştır. Araştırma parametrelerine boyalı yüzeylerden kaynaklanan sürtünme katsayısı değişikliği de dahil edilmiştir. Cıvatalarda yaşanan ön gerilme kaybına, cıvata başı altı basınç dağılımları ve yüzeyler arasındaki teması bağlı kayma incelenerek bir açıklama getirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Cıvata, ön gerilme, sıkma torku, sonlu elemanlar metodu, gevşeme

### SELF-LOOSENING ASSESSMENT OF A BOLTED JOINT ON AN ENGINE BRACKET USING FINITE ELEMENT METHOD

Bolts are one of the most widely used fasteners today. Their several advantages such as reusability, procurement easiness of standardized products and multi-purpose usage area

have made bolts become in a state that they are the most common fasteners used in every field of life. Despite their common use, the self-loosening has not been prevented in a complete manner yet. The self-loosening causes a decrease in clamping force between two parts aimed to be held together. Furthermore, the process may end up with a zero contact pressure, which means separation.

In this study, it has been investigated how engine bracket bolts of a military vehicle are affected by various tightening torques and connection types using finite element method. Friction coefficient, which varies due to surface condition (e.g. coated, not coated), has been taken into account as a variable parameter. An explanation for the self-loosening has been proposed considering pressure distribution under bolt head and sliding areas between surfaces.

**Keywords:** Bolt, preload, tightening torque, finite element method, self-loosening

## 1. GİRİŞ

Cıvataların birçok farklı alanda geniş bir kullanım alanına sahip olması çeşitli problemleri de beraberinde getirmiştir. Statik gibi görünen çoğu sistem dahi belirli şartlar altında dinamik yüklere maruz kalabilirken, doğrudan titreşim kaynağı etkisinde çalışan sistemler de bulunmaktadır ve cıvatalar her iki durumda da bağlantı elemanı olarak kullanılmaktadır. Cıvatalarda yaşanan ön gerilme kayıplarının en önemli nedenlerinden biri titreşimdir. Zaman içerisinde titreşim kaynaklı problemler yaşandığından Junker testi olarak literatüre geçen bir test ile artık cıvataların gevşeme dirençleri ölçülmektedir [1]. Kontra somun, çentikli rondela, fiberli somun gibi uygulamalar cıvatalardaki gevşemenin önüne geçmek için kullanılmaktadır. Ancak bu uygulamalara rağmen gevşeme problemi tam anlamıyla önlenebilmiş değildir. Özellikle cıvata shaft eksenine dik yönde gelen kuvvetlerin oluşturduğu çevrimsel yüklemeye gevşeme probleminin temel kaynağıdır. Gevşemenin yanı sıra cıvataların yorulması da önemli bir unsur olarak öne çıkmaktadır ve bu iki unsur dinamik sistemlerdeki cıvatalı bağlantıların görev yapamaz hale gelmesinin en yaygın nedenleridir [2].

Jiang, Zhang ve Park [3] cıvatalı bağlantılarda sürtünme katsayısı üzerine yaptığı çalışmada temas yüzeylerinin kaplamalı olmasının somun altı sürtünmesini azalttığını göstermiştir. Jiang, Zhang ve Lee [4] cıvata gevşemesinin ilk aşaması olan oturma sürecini incelemişler ve dinamik yükler altında çalışan bir cıvata için oturma evresindeki ön gerilme kaybının dişlerdeki lokal çevrimsel plastik deformasyondan kaynaklandığını ortaya koymuşlardır. Jiang, Zhang ve Park [5] bir diğer çalışmada cıvata gevşemesinin ikinci aşaması olan somun çözülmesine odaklanmışlardır. İki plakayı cıvata ile bağlamışlar ve plakalardan birini cıvata eksenine dik doğrultuda



çevrimsel yer değiştirmeye zorlamışlardır. İki plaka arasındaki bağıl yer değiştirmenin civata gevşemesindeki temel faktör olduğunu ve bağıl yer değiştirme arttıkça civatanın çok daha erken çözüldüğünü göstermişlerdir. Yorulma eğrisine benzer bir eğri elde edilmiş ve bağıl yer değiştirmenin belirli bir değerin altında olması durumunda çözümler gerçekleşmediği ortaya koyulmuştur. Ayrıca civataya verilen ön gerilmenin çözümler direncini artırırken yorulma kaynaklı kırılma riskini de arttırdığı çalışmada belirtilmiştir. Zhang, Jiang ve Lee [6] civata gevşemesinin ikinci aşamasını konu aldıkları başka bir çalışmada gevşemenin temel mekanizmasını dişler arasındaki mikro kaymalarla ve civata eksenine dik gelen yüklerin yarattığı yüzey basınçlarındaki dalgalanma ile açıklamışlardır. Tasarımın ilk aşamasında civataları yorulma dayanımlarına göre boyutlandırmak için Eurocode [7] ve VDI 2230 [8] standartları yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu standartlar civata dişlerindeki gerilme durumlarını dikkate almadığı için sadece genel bir değerlendirme imkanı sağlar, çatlak başlangıç noktası tespitinde ve hasar analizinde yetersiz kalır. Nominal gerilme yaklaşımının aksine, Schneider, Wuttke ve Berger [9] lokal bir yaklaşımla, çevrimsel yüklemeye maruz kalan vida profilli bağlantı elemanlarının yorulma ömürlerini tespit edebilmek için diş diplerindeki çevrimsel histeresis mekanizmasını esas alarak bir yöntem geliştirmiştir. Novoselac vd., [10] kritik düzlem teorisine dayanan bir yorulma kriterini kullanarak, farklı ön gerilmeler verilmiş civatalar için hasar analizi yapmışlardır. En yüksek hasar yük taşıyan ilk civata dışında meydana gelmiş ve bu durum farklı ön gerilmeli civatalar için ortak nokta olarak belirlenmiştir. Ayrıca civatanın maruz kaldığı değişken yüklemeye büyüklüğünün sabit olduğu şartlar altında, ön gerilme artışının sürekli mukavemet sınırını (endurance limit) aşağı çekerken aynı zamanda civatada oluşan hasarı azalttığı da gösterilmiştir.

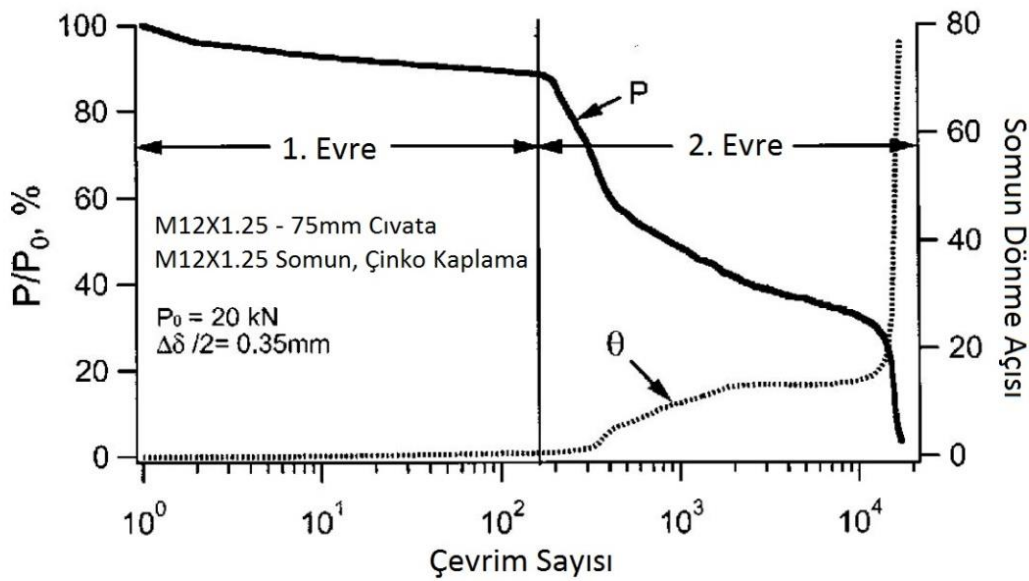
Şekil 1’de civata ile sıkıştırılmış iki plakadan birisinin çevrimsel olarak diğer plaka üzerinde yer değiştirmeye zorlandığı durumda plakalar arasındaki kuvvetin ve somun dönme açısının çevrim sayısına bağlı grafiği verilmiştir. Grafikte  $P_0$  test başlamadan önceki plakalar arasındaki sıkışma kuvvetini,  $P$  ise plakalar arasındaki anlık sıkışma kuvvetini temsil eder. Plakaların birbirlerine göre bağıl yer değiştirme miktarı için  $\Delta\delta$  terimi kullanılmıştır. Somun dönme açısı ise  $\theta$  ile gösterilmiştir.

İlk aşamada plakalar arasındaki kuvvette önemli bir düşüş yok iken, ikinci aşamada somunun çözülmeye başlamasıyla kuvvet grafiğinde ani bir düşüş olur.

Bir civatalı bağlantının sıkılması için gerekli olan tork değeri üç unsurdan oluşur; civatanın aksenal gerilmesi için gerekli olan tork, civata dişlerindeki sürtünmenin yenilmesi için gerekli olan tork ve somun sürtünmesinin yenilmesi için gerekli olan tork.

Civatalı bağlantıların sıkılıp gevşetilmesi sırasındaki ilişki (1) numaralı denklemde verilmiştir. Denklemde yer alan terimlerden  $T$ , civata sıkma ya da gevşetme torkunu,  $P$

cıvata ön gerilme kuvvetini,  $p$  cıvata diş adını,  $\mu_t$  cıvata dişleri arasındaki sürtünme katsayısını ifade eder. Cıvata dişlerindeki efektif sürtünme yarıçapı  $r_t$  ile, somun altı sürtünme katsayısı ise  $\mu_n$  ile gösterilmiştir. Somun altı efektif sürtünme yarıçapı için  $r_n$  terimi, vida eğim açısı için ise  $\beta$  terimi kullanılmıştır. Denklemde bulunan  $\frac{p}{2\pi}$  terimi sıkma için pozitif gevşetme için negatif alınır. Denklemde yer alan sürtünme terimleri ve vida eğim açısı terimi, çalışma şartları altında dişlerde meydana gelecek deformasyonların cıvata ön gerilmesini doğrudan etkileyeceğini teorik olarak göstermektedir.



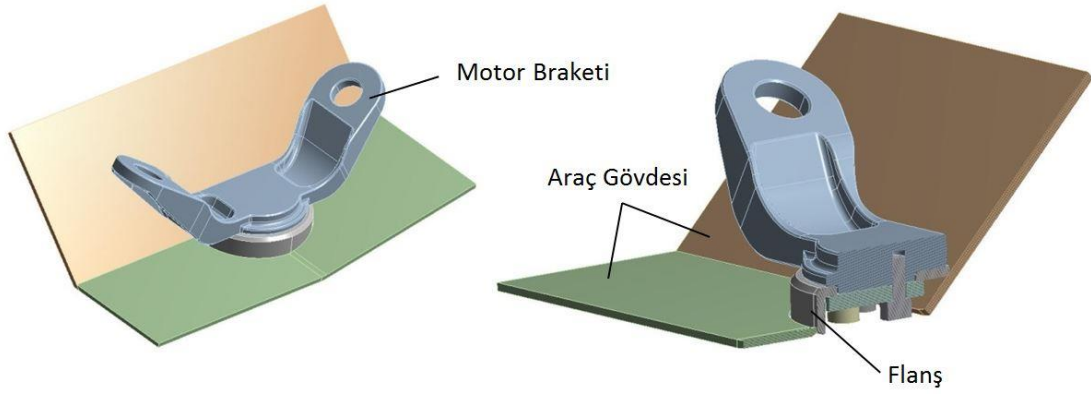
Şekil 1. Cıvata gevşemesinin aşamaları [4]

$$\frac{dT}{dP} = \pm \frac{p}{2\pi} + \frac{\mu_t r_t}{\cos\beta} + \mu_n r_n \quad (1)$$

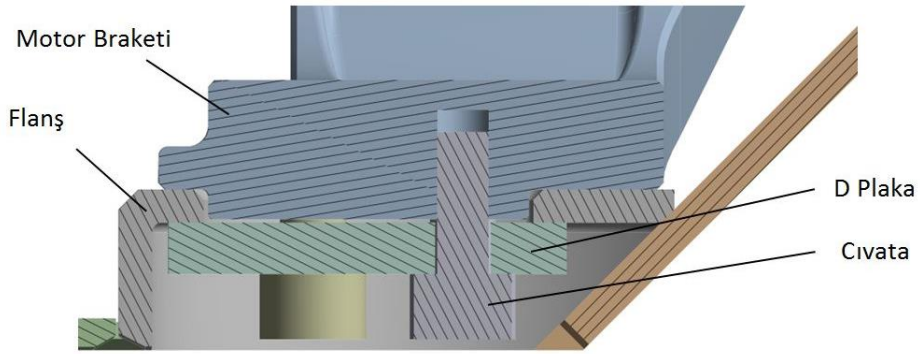
Bu çalışmada bir askeri aracın motor bağlantı braketinin cıvatalarındaki gevşeme problemi ele alınmıştır. Motor braket bağlantısındaki konstrüktif detayların cıvata bağlantısına etkileri araştırılmıştır. Cıvata başı altındaki basınç dağılımı ve temas yüzeylerindeki kayma durumu incelenmiştir. Ön gerilme ve sürtünme katsayısı etkileri de değerlendirilmiştir.

## 2. GEOMETRİK MODEL

Geometrik model Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterildiği gibidir. Motor braket gövdeye kaynaklı bir flanşın üzerine oturmaktadır.

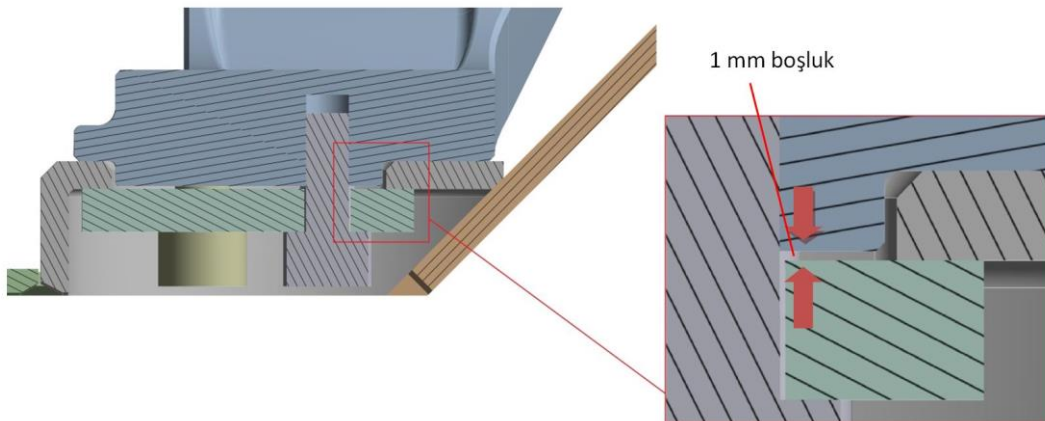


**Şekil 2.** Motor braketi bağlantısı



**Şekil 3.** Motor braketi bağlantısı kesiti

Flanşın altında D plaka olarak adlandırılan bir parça bulunmaktadır ve motor braketinin bağlantısı D plaka üzerinden atılan 5 adet M20x1.5 10.9 kalitede civata ile yapılmaktadır. D plaka ile motor braketinin birbirlerine bakan yüzeyleri arasında 1 mm boşluk vardır (Şekil 4). Motor braketi iki tane takoz ile motora bağlanmaktadır.



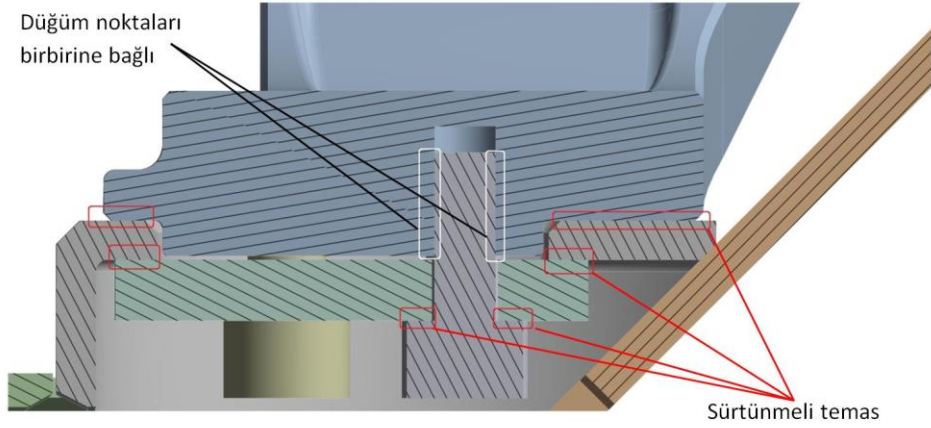
**Şekil 4.** Motor braketi – D plaka arası boşluk

### 3. ANALİZ

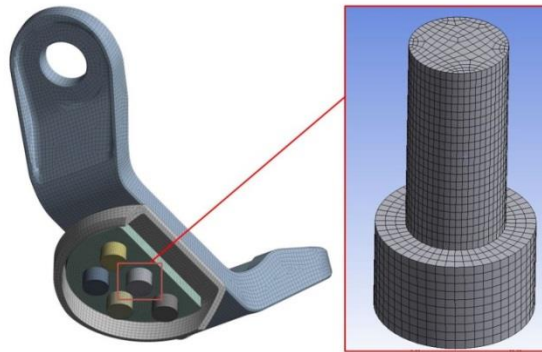
Cıvatalı bağlantılarda yüzeylerin birbirine oturması ve cıvata şaftına eğilme zorlanması taşıtılmaması önemlidir. Şekil 4’de gösterilen boşluğun cıvata başı altı basınç dağılımını ve tutunma yüzeylerini nasıl etkilediği analiz edilmiştir. Cıvata ön gerilmelerinde yapılacak artışın ve kaplamalı yüzeylerden kaynaklanan sürtünme katsayısı düşüşünün etkileri de incelenmiştir.

#### 3.1. Sonlu elemanlar modeli

Sonlu elemanlar modeli tamamen katı elemanlardan oluşmaktadır ve modelde toplam 140 bin elemandan bulunmaktadır. Cıvatalar, cıvata başı ve cıvata şaftı olmak üzere iki kademeli silindir şeklinde modellenmiştir. Cıvata başı çapı, araç üzerinde kullanılan rondela dış çapı ile aynıdır. Cıvata dişleri modellenmemiş olup cıvata şaftındaki diş bölgesinin düğüm noktaları motor braketindeki düğüm noktalarına bağlanmıştır. D plaka ile cıvata başı altına, D plaka ile flanş basma yüzeylerine ve flanş ile motor braketi temas yüzeylerine sürtünmeli temas tanımlanmıştır.



Şekil 5. Yüzey teması bilgileri



Şekil 6. Sonlu elemanlar ağı

Tablo 1’de kullanılan cıvatanın emniyet yükü, akma yükü ve ön gerilme değerleri verilmiştir. Emniyet yükü ve akma yükü standart değerlerdir. Cıvataya verilecek ön gerilme değeri emniyet yükünün %75’i olarak alınmıştır.

**Tablo 1.** M20x1.5 10.9 kalitesindeki cıvatanın özellikleri [11]

	Emniyet Yükü [kN]	Akma Yükü [kN]	Ön Gerilme [kN]
M20x1.5 10.9 Kalite	224.6	254.6	168

Şekil 2’de görülen araç gövdesini temsil eden plakaların çevresine sınır şartı uygulanmıştır ve bütün çevre düğüm noktalarının tüm serbestlik dereceleri kısıtlanmıştır. İlk analizde cıvatalara 168 kN ön gerilme uygulanmıştır. Ardından ön gerilme artışının cıvata başı altı basınç dağılımına ve yüzey tutunmasına etkisini görmek için ön gerilme değeri 180 kN’a çıkarılmıştır ve ikinci bir analiz yapılmıştır. Kaplamalı ya da boyalı yüzeylerden kaynaklanan sürtünme katsayısındaki düşüşün etkisi de ayrıca analiz edilmiştir. Son olarak D plaka ile braket arasındaki boşluğun olmadığı, yüzeylerin birbirine tamamen oturduğu durumda cıvata başı altındaki basınç dağılımı ve tutunma yüzeyleri incelenmiştir.

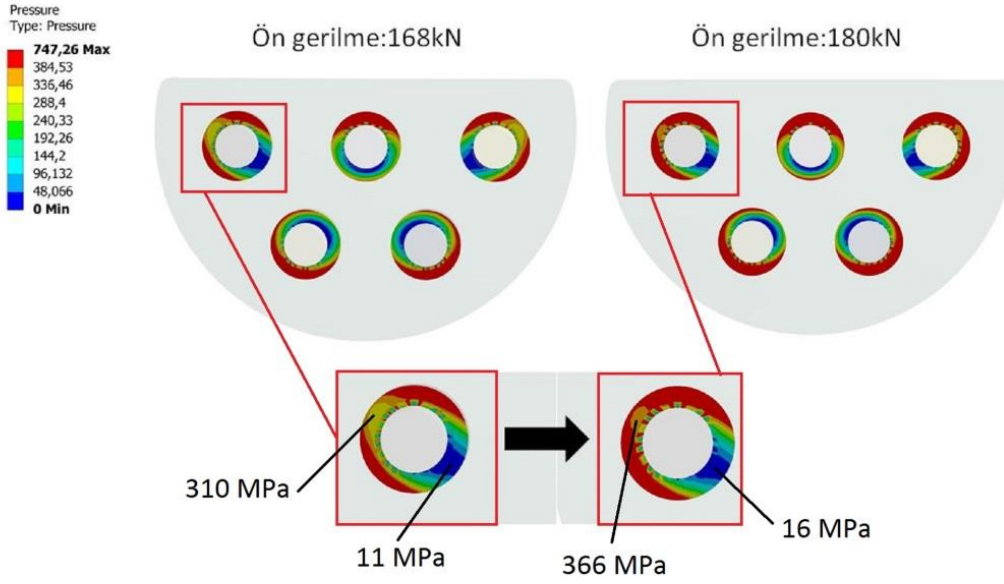
## 4. ANALİZ SONUÇLARI

D plaka üzerinde bulunan 5 adet cıvata için cıvata başı altı basınç değerleri ve tutunma yüzeyi büyüklükleri aşağıda açıklanan durumlarda analiz edilmiştir.

### 4.1. Ön gerilme etkisinin karşılaştırılması

#### 4.1.1. Cıvata başı altı basınç dağılımı

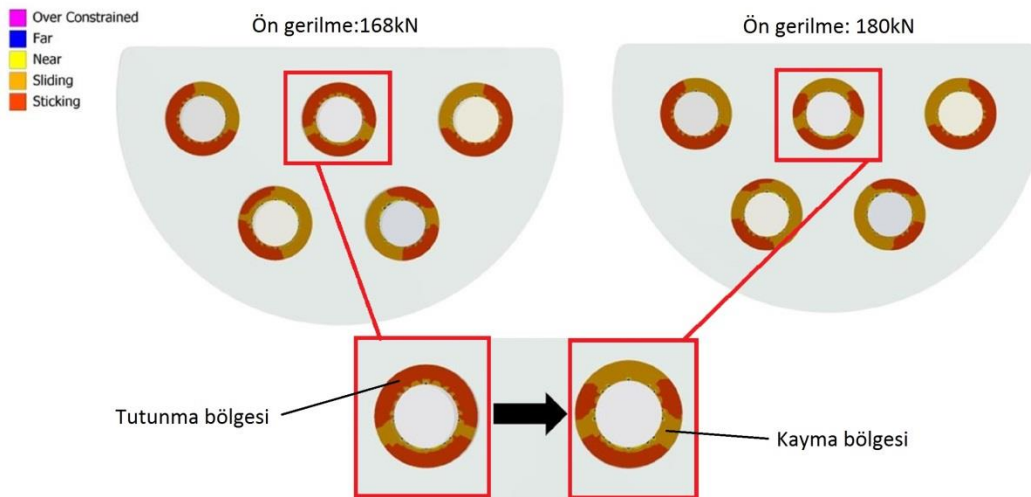
168 kN ve 180 kN cıvata ön gerilmeleri için cıvata başlarının altlarında oluşan basınç dağılımı Şekil 7’de verilmiştir. Motor braketini ile D plaka arasındaki boşluğun basınç dağılımına etkisi görülmektedir. D plakanın ortasına bakan bölgelerde düşük, çevresine yakın bölgelerde yüksek basınç değerleri ortaya çıkmıştır. Ön gerilmenin artması basınç değerlerinin artmasını sağlamış ancak homojen olmayan bir basınç dağılımı kendini tekrar etmiştir.



Şekil 7. Cıvata başı altı basınç dağılımı

#### 4.1.2. Cıvata başı altı tutunma durumu

168 kN ve 180 kN cıvata ön gerilmeleri için cıvata başlarının altlarındaki tutunma ve kayma bölgeleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Her iki ön gerilme için de cıvata başları altında kısmi kayma bölgelerinin olduğu görülmektedir. Ön gerilme artışının her cıvatada önemli ölçüde olmasa da Şekil 8'de kırmızı kutu içerisinde işaretlenen cıvatada kayma bölgesi artışına sebep olduğu açıktır.



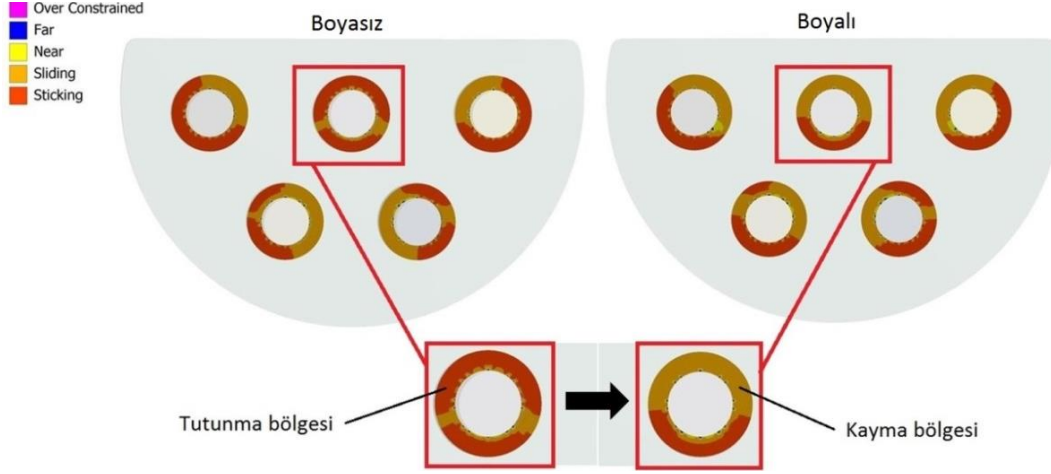
Şekil 8. Cıvata tutunma ve kayma bölgeleri

#### 4.2. Sürtünme katsayısı etkisinin incelenmesi

Jiang, Zhang ve Park yaptıkları çalışmada cıvatalı bağlantılarda kaplamalı yüzeyler için ortalama sürtünme katsayısını 0.1 olarak tespit etmişlerdir[3]. Boyalı yüzeyi temsil



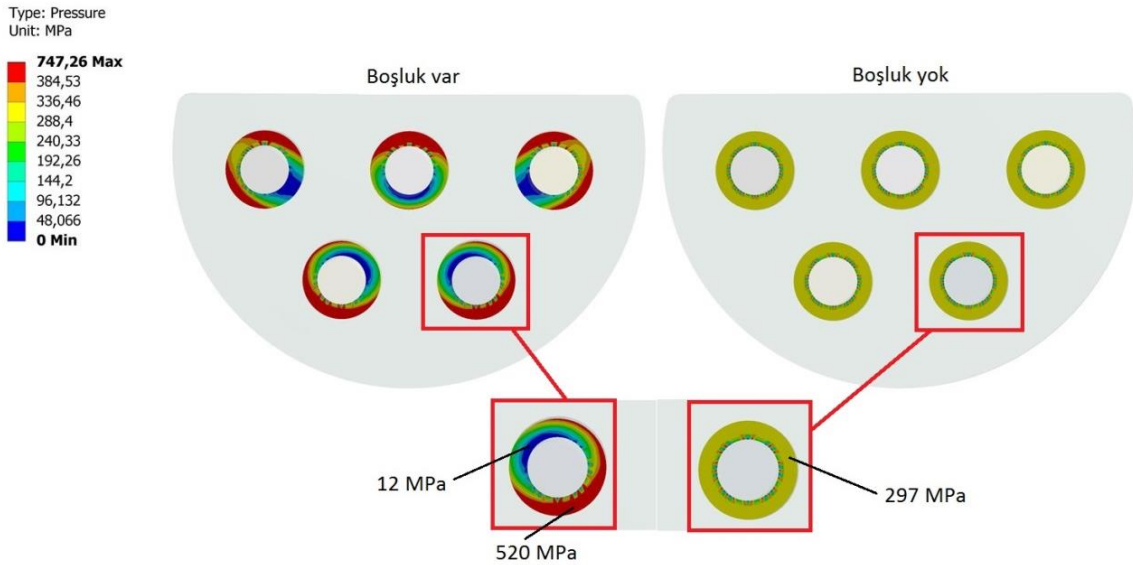
eden, 168 kN ön gerilme ve 0.1 sürtünme katsayısı için yapılan analiz sonuçları bir önceki analiz ile karşılaştırılmıştır. Sürtünme katsayısındaki düşüş kayma bölgelerini arttırmıştır (Şekil 9).



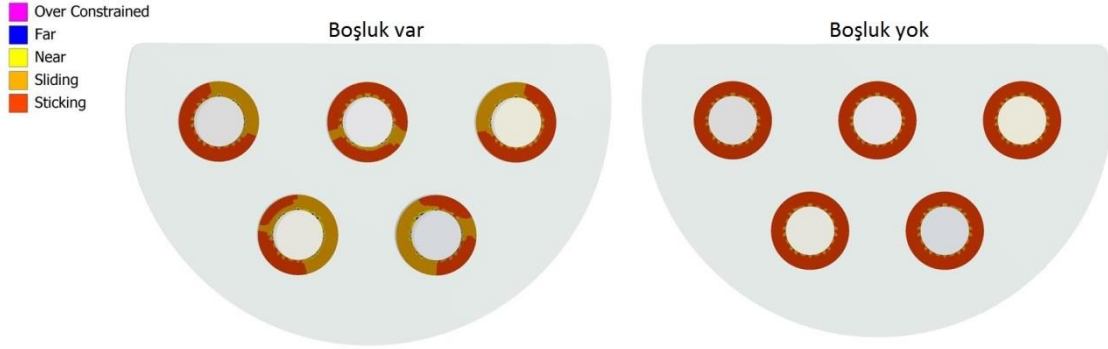
Şekil 9. Cıvata tutunma ve kayma bölgeleri

#### 4.3. Boşluk etkisinin incelenmesi

D plaka ile motor braketini arasındaki boşluk kapatılarak analizler tekrar edilmiş ve boşluklu bağlantının cıvata başı altı basınç dağılımına ve tutunma yüzeylerine etkisi incelenmiştir. Boşluk olmadığı durumda D plakanın ortası sehim yapmadığı için basınç dağılımı çok daha homojen olmuştur (Şekil 10). Tutunma bölgeleri de tüm cıvata başı altı boyunca yayılmıştır (Şekil 11).



Şekil 10. Cıvata başı altı basınç dağılımı



**Şekil 11.** Cıvata tutunma ve kayma bölgeleri

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada ön gerilmenin, sürtünme katsayısının ve cıvata ile bir arada tutulmak istenen iki yüzeyin arasındaki boşluğun cıvata başı altı basınç dağılımına ve tutunma yüzeylerine etkisi incelenmiştir. Cıvata başı altı basınç dağılımının homojen olmamasının en önemli nedenlerinden birinin konstrüktif olduğu ve boşluklu bağlantının cıvata başı altında kayma bölgeleri oluşturduğu gösterilmiştir. Böyle bir konstrüksiyonda ön gerilme artışının sadece cıvata başı altındaki basıncı arttırmadığı aynı zamanda basınç dağılımındaki düzensizliği de arttırdığı açıktır. Basınç dağılımındaki düzensizlik artışı da beraberinde kayma bölgelerinin büyümesini getirmiştir. Boyalı ya da kaplamalı yüzeylerin kayma bölgelerinde artışa sebep olduğu gösterilmiştir.

Bu çalışma kapsamında motor braketini cıvatalarındaki gevşeme mekanizması aşağıdaki gibi önerilmektedir.

- i. Motor braketinin motor yükleri altında flanş üzerinde küçük kaymalar yaşaması cıvata shaft eksenlerine dik etkiyen çevrimsel kuvvetler ortaya çıkarmıştır. Bu kuvvetler cıvata başı altındaki temas yüzeylerinde basınç dalgalanmalarına, mikro kaymalara sebep olmuştur.
- ii. D plaka ile motor braketini arasında boşluk olması basınç dalgalanmalarına ve mikro kaymalara katkıda bulunmuştur.
- iii. Cıvata başı altındaki basınç dalgalanmaları ve mikro kaymalar cıvata gevşemesinin temel sebebidir.
- iv. Cıvata başı altındaki basınç dağılımının (plakalar arasında boşluk bırakılması ve benzeri nedenlerle) homojen olmaması durumu ya da boyalı yüzeylerin kullanımı cıvata gevşemesini arttıran etkenlerdir.



Edinilen tecrübeler ışığında ideal bir cıvatalı bağlantı için dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıdaki gibidir.

- i. Cıvata ile bir arada tutulmak istenen parçaların temas yüzeyleri arasında boşluk olmamalıdır.
- ii. Cıvata başının eğimli yüzeylere oturması cıvata şaftında eğilme gerilmelerinin oluşmasına sebep olacağı için bu durumdan kaçınılmalıdır.
- iii. Mümkünse konstrüktif önlemler alınarak, cıvata ile bağlanan parçaların cıvata şaft eksenine dik düzlemde hareket serbestliği şekil bağı (flanş benzeri yapılar) ile engellenmelidir.
- iv. Zorunda kalınmadıkça cıvata şaftının kesme yüklerine maruz kalmayacağı tasarımlar tercih edilmelidir.
- v. Dinamik sistemlerde, cıvata ile bağlanan parça temas yüzeylerinde tam oturma sağlanıyorsa ve yüksek değişken yüklerin etkisi altında cıvatalı bağlantıda ayrılma yaşanıyorsa (kritik nokta aşımı) yorulma ömrünü arttırmak için cıvatada ön gerilme artışı tercih edilmelidir. Değişken yükler cıvatalı bağlantıda ayrılmaya sebep olacak kadar büyük değilse ön gerilme artışı cıvatanın maruz kaldığı ortalama gerilmeyi (mean stress) arttıracaktır.
- vi. Mümkünse cıvata başı ve somun altındaki yüzeylerin boyalı ya da kaplamalı olmaması tercih edilmelidir.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] Junker GH. New criteria for self-loosening fasteners under vibration. *SAE Trans* 1969;78:314-35.
- [2] Dinger G., Friedrich C. Avoiding self-loosening failure of bolted joints with numerical assessment of local contact state. *Engineering Failure Analysis* 2011;18:2188-2200.
- [3] Jiang Y, Zhang M, Tae-Won P. An experimental investigation on frictional properties of bolted joints. *ASME Pressure Vessels and Piping Conference* 2002.
- [4] Jiang Y, Zhang M, Lee C. A study of early stage self-loosening of bolted joints. *Journal of Mechanical Design* 2003;125:518-526.
- [5] Jiang Y, Zhang M, Park T. An experimental study of self-loosening of bolted joints. *Journal of Mechanical Design* 2004;126:925-931.
- [6] Zhang M, Jiang Y, Lee C. Finite element modelling of self-loosening of bolted joints. *Journal of Mechanical Design* 2006;129:218-226.
- [7] Eurocode No. 3 (1993) Design of steel constructions, Part 1. Beuth – Verlag, Berlin.
- [8] Verein Deutscher Ingenieure (2003) VDI 2230 Guidelines.
- [9] Schneider R, Wuttke U, Berger C. Fatigue analysis of threaded connections using the local strain approach. *Procedia Engineering* 2010; 2357-2366.

- [10] Novoselac C, Kozak D, Ergic T, Damjanovic D. Fatigue damage assessment of bolted joint under different preload forces and variable amplitude eccentric forces for high reliability. *New Trends in Fatigue and Fracture* 2014; 93-109.
- [11] Proof load, yield & tensile strength chart metric[PDF file]. Retrieved from <https://www.genfast.com/wp-content/uploads/2016/09/Proof-Load-Yield-Tensile-Strength-Metric.pdf>

## ERİŞİLEBİLİR ÇEVİRİMİÇİ KAYNAKLARDAN 3B ŞEHİR MODELLEME

Abdullah Bülbül <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü,  
abulbul@ybu.edu.tr

### ÖZ

Üç boyutlu şehirlerin dijital ortama aktarılması Bilgisayar Grafikleri ve Bilgisayarlı Görme disiplinlerinin önemli problemlerindedir. Bir şehrin ya da binanın modellenmesi 3B tasarım programlarıyla ve çoğunlukla insan emeğine dayanarak yapılmaktayken, son yıllardaki akademik çalışmalar ve teknolojik gelişmeler bu işin etkileşimli yarı-otomatik yollarla ya da kullanıcıdan çok az girdi alan otomatik yöntemlerle yapılmasını mümkün kılmıştır. Literatürdeki hareketten yapı çıkarımı gibi yöntemler çok fazla sayıda fotoğrafın işlenmesini gerektirmektedir ve ortaya çıkan modeller gerçek zamanlı uygulamalarda kolaylıkla kullanılamayacak kadar kompleks olmaktadır. Bu çalışmada, çeşitli çevrimiçi kaynaklardan yararlanarak bir yerleşim yerinin üç boyutlu olarak dijital ortama aktarılmasını sağlayan bir yöntem sunulmaktadır. Oluşturulan sistemde binalar, yer şekilleri, cadde ve sokaklar basit poligonal modeller şeklinde üretilmektedir. Sokak seviyesindeki fotoğrafların binalar üzerine giydirilmesiyle de gerçekçi bir görüntü elde edilmektedir. Ortaya çıkan üç boyutlu şehir modelleri; simülasyon ve bilgisayar oyunu gibi gerçek zamanda çalışması gereken uygulamalarda kullanılmaya elverişlidir ve oluşturulacak alanın sadece coğrafi koordinatlarının sağlanması ile hızlı bir şekilde elde edilebilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** 3B modelleme, bilgisayar grafikleri, coğrafi bilgi sistemleri, simülasyon, şehir modelleme.

### 3D CITY MODELING FROM ACCESSIBLE ONLINE SOURCES

#### ABSTRACT

Reconstructing 3D Cities in the digital environment is an important concern of Computer Graphics and Computer Vision. While modelling a city or a building was used to be manually performed with 3D modelling tools, recent academic studies and technological advances allowed this process to be performed by interactive semi-automatic methods or

automatic methods with minimum user input. Reconstruction methods like structure from motion require a big number of photos to be processed and the resulting models are usually too complex to be used in real-time applications. In this study, we propose a method for modelling 3D cities using a variety of online accessible sources. This system generates buildings and streets as simple 3D polygonal models. By projecting street level photography to those simple models, a realistic appearance is achieved. The only input for quickly generating the cities is the geo-coordinate of the area of interest. Reconstructed 3D city models are suitable for real-time applications such as computer games and simulations.

**Keywords:** 3D Modeling, city modelling, computer graphics, geographic information systems, simulation.

## 1. GİRİŞ

Görüntüleme ve iletişim teknolojilerinin ilerlemesiyle dijital içeriğe olan ihtiyaç artmakta buna bağlı olarak bu içeriklerin kolay bir şekilde üretilmesine yönelik çalışmalar da hız kazanmaktadır. Üç boyutlu kent modelleri de artırılmış ve sanal gerçeklik ortamlarında, benzetim uygulamalarında ve bilgisayar oyunlarında çok ihtiyaç duyulan içerik türlerinden biridir.

Şehir ya da yapıların üç boyutlu olarak modellenmesi için 3B tasarım programları, aynı alanın farklı açılardan çekilmiş yüzlerce fotoğrafını gerektiren otomatik yöntemler [1,2] ve daha az sayıda fotoğraf ile kullanıcı etkileşimine dayanan yarı otomatik yöntemler [3] kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin bir kısmı büyük miktarda kullanıcı emeği gerektirmekte, bir kısmı ise büyük miktarda görsel veri gerektirmektedir. Popüler mekânlar için görsel veri bulma zorluğu yaşanmasa da, daha az görüntülenen kısımları da içeren, tüm şehir ölçeğinde 3B modellemenin gerçekleştirilmesi zorluğunu korumaktadır.

Bu çalışmada son yıllarda miktarı oldukça artan çevrimiçi erişilebilir veriler yardımıyla, gerçek şehirlerin üç boyutlu modellerinin oluşturulmasını sağlayan otomatik bir yöntem sunulmaktadır. Bu yöntemin kullanıcıdan istediği tek bilgi modellenmesi istenen bölgenin koordinatlarıdır. Şehirlerin 2B planları, yükseklik bilgileri, sokak seviyesinden çekilmiş fotoğraflar gibi ihtiyaç duyulan veriler çevrimiçi kaynaklardan otomatik olarak edinilmektedir. Çalışmamızda çoğunlukla OpenStreetMap ve Google Maps'ten faydalanılsa da, bu verilerin farklı kaynaklardan edinilmesi durumunda da önerilen yaklaşımın uygulanması mümkündür. Önerilen yöntem gerçek zamanda çalışması gereken uygulamalar için elverişli basit 3B şehir modelleri oluşturmaktadır.

## 2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde kent modelleme ile ilgili çalışmalar iki altbaşlıkta incelenmektedir. Bunlardan ilki fotoğraflardan yararlanarak üç boyutlu modelleme yapan çalışmaları ikinci kısım ise yordamsal modelleme çalışmalarını içermektedir.

### 2.1. Fotoğraflardan yapı oluşturulması

Birden fazla fotoğraf kullanılarak bilinmeyen bir 3 boyutlu geometrinin ortaya çıkarılması farklı fotoğraflarda birbirine karşılık gelen noktaların belirlenip bu noktaların 3 boyutlu uzaydaki konumlarının çözümlenmesine dayanır. Diğer bir ifadeyle, 3B ortamdaki herhangi bir nokta öyle konumlandırılmış olmalı ki; bu noktanın farklı açılardaki kameralardaki görüntüsü fotoğraflardaki ilgili koordinatlarla uygun olsun. Bu temel prensip, insandaki görme sistemi tarafından da kullanılmakta ve iki göze gelen farklı görüntülerin beyinde işlenmesi ile 3 boyutlu algı oluşmaktadır. Bilgisayar Grafiği ve Bilgisayar Görmesi alanlarında bu yöntemle Hareketten Yapı Çıkarımı (Structure from Motion, SfM) denilmektedir.

Herhangi bir şekilde konumlandırılmamış ve birbiri ile ilişkisi bilinmeyen fotoğraflardan üç boyutlu modellerin elde edilmesine yönelik kapsamlı bir yöntem Pollefeys vd. [4] tarafından sunulmuştur. Daha sonra, Snavely vd. [5] başka bir çalışmada, seyrek nokta bulutları oluşturan üç boyutlu modelleme yöntemlerini ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada Brown ve Lowe [6] ile Hartley ve Zisserman'ın [7] benzer yöntemleri geliştirilmiştir. Ortaya çıkan seyrek nokta bulutu, daha yakın tarihli bir çalışmada [8], yoğunlaştırılmış ve daha sık nokta bulutlarından oluşan üç boyutlu modeller elde edilmiştir. Bir başka benzer sonuç, seyrek nokta bulutları yardımıyla her fotoğraf için ayrı derinlik haritaları oluşturulmasına dayanan bir yöntemle elde edilmiştir [9].

Yakın zamanda SfM çalışmaları farklı açılardan geliştirilmiştir. Oldukça ünlü çalışmasında, Agarwal vd., [1] birçok bilgisayarın paralel şekilde çalışması ile Roma'daki tarihi ve popüler eserleri Flickr (<https://www.flickr.com/>) üzerinde paylaşılan fotoğrafları kullanarak bir gün içerisinde nokta bulutları şeklinde modellemiştir. Frahm vd. [2] ve Wu [10] SfM yöntemlerini performans yönünden, Cohen vd. [11] ve Ceylan vd. [12] ise simetrik ve tekrarlanan özelliklerin daha doğru şekilde modellenmesi yönünden geliştirmişlerdir. Bütün bu çalışmalarda fotoğraflar arasında karşılıklı görsel özelliklerin tespitinden yararlanılmıştır. Böyle bir yaklaşım fotoğraflarda yer alan özelliklerin 3B ortamda sabit durduğu varsayımına dayanmaktadır ki bu görünen özelliklerin bakış noktasına göre değiştiği yansıtıcı materyallere sahip yüzeyler için doğru bir varsayım değildir. Bu koşullarda daha isabetli modellemeler yapılması yönünde, Bülbül vd. [13] başlangıçtaki üç boyutlu modelleme sonuçlarını kullanarak konveks yansıtıcı yüzeylerin tespitini ve düzeltilmesini içeren bir yöntem geliştirmiştir.

## 2.2. Otomatik Şehir Modelleme

Lindenmayer'in 1968 yılında geliştirdiği L-sistemi [14] ilk olarak hücrelerin ve bitkilerin büyümesini modellemek için kullanılmıştır. Bu sistem, bitkinin yapısını ifade eden semboller ve sembol dizileri ile bu sembollerin ne şekilde gelişebileceğini belirleyen kurallardan oluşur. Bu yöntem doğal yapıların ve fraktalların modellenmesinde uzun yıllar kullanıldıktan sonra 2001 yılında Parish ve Müller [15] L-sistemi'ni yordamsal (prosedürel) şehir modelleme için kullanmıştır. Bu çalışma şehrin nüfus yoğunluğunu ve kara sınırlarını gösteren haritaları kullanarak, cadde, sokak ve binalardan oluşan sanal bir şehir üretmektedir. Zamanla bu çalışma geliştirilerek daha kapsamlı bir şekil-grameri ortaya çıkarılmıştır [16, 17].

Merrell vd. [18] doku sentezleme olarak bilinen bir örnek dokuyu farklı boyutlardaki modelleri örtecek şekilde genişletmeye yarayan yöntemlerden [19, 20] ilham alarak, model sentezleme tekniğini önermiştir. Bu çalışmada verilen bir örnek 3 boyutlu model örnek alınarak daha geniş alanların modellenmesi amaçlanmıştır. Benzeri bir yöntem, özel olarak mimari yapılara uygulanmasa da, verilen çeşitli 3B modelleri sentezleyerek, benzeri yeni 3B modellerin üretilmesine yöneliktir [21].

Gerçekte karşılığı olmayan tamamen sanal şehirlerin üretilmesine ek olarak, gerçek şehirlerden yararlanılarak sanal şehirler üretilmesini amaçlayan çalışmalar da mevcuttur. Örneğin, Brenner vd. [22] ilgilenilen alanın kuşbakışı fotoğrafları içerisinde görüntü işleme yöntemleri ile tespit edilen bölgelere önceden belirlenmiş muhtemel yapı örneklerini yerleştiren bir yöntem önermiştir. Uydu fotoğraflarına ek olarak, günümüzde oldukça yaygınlaşmış olan cadde seviyesinden, Google streetview'de olduğu gibi, çekilmiş fotoğraflardan yararlanmak da mümkündür. Bu kategorideki çalışmalara örnek olarak [23] verilebilir. Google Earth son yıllarda otomatik olarak modellenen üç boyutlu binaları içerecek şekilde geliştirilmiş olmasına rağmen, üretilen modellere açıktan ulaşım mümkün değildir.

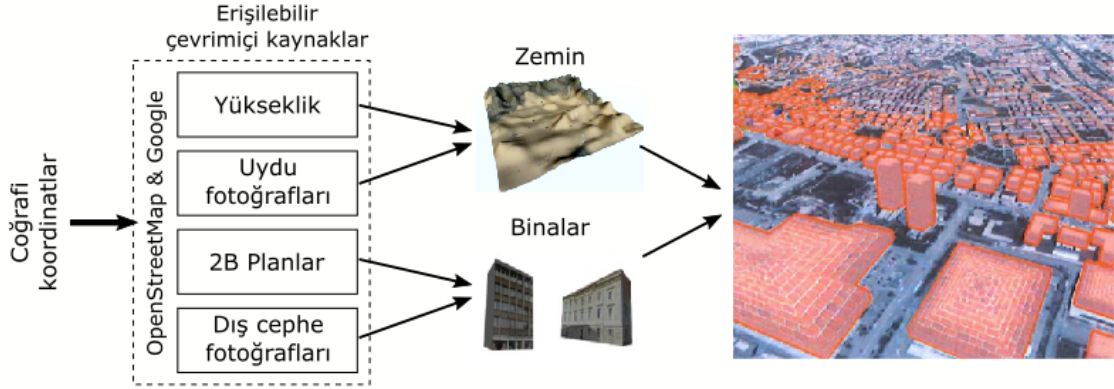
## 3. GENEL BAKIŞ

Oluşturulan sistemin genel görünümü Şekil 1'de görülmektedir. Kullanıcının belirlediği koordinatlar arasında kalan kısım için erişilebilir çevrimiçi kaynaklardan edinilen veri ile öncelikle zemin üretilmekte, daha sonra oluşturulan binalar bu zemine eklenerek 3B şehir oluşturulmaktadır.

### 3.1. Yararlanılan çevrimiçi kaynaklar

Çalışmamızda kullandığımız çevrimiçi kaynaklar aşağıda listelenmiştir.

*OpenStreetMap*: Kullanıcıların katılımıyla oluşturulan ücretsiz bir harita uygulamasıdır. Veriler uydu görüntüleri yardımıyla kullanıcılar tarafından girilmektedir. Bu platformda binalar kuşbakışı olarak iki boyutlu çokgenler şeklinde belirtilmektedir. Yollar ise ardışık



Şekil 1. Sistemin genel görünümü

doğru parçaları şeklinde ifade edilmektedir. Bunların dışında kullanıcıların sağladığı detay seviyesine göre, parklar, ağaçlar gibi farklı elemanlar ile binaların kat sayıları ve işlevleri, yolların genişlikleri gibi bilgiler de bulunabilmektedir. Çalışmamızda binaların iki boyutlu planlarının edinilmesi için kullanılmıştır.

*Google Elevation API:* Yükseklik verileri için Google Elevation API kullanılmıştır. Verilen bir dizi koordinat için yükseklik verileri elde edilebilmektedir.

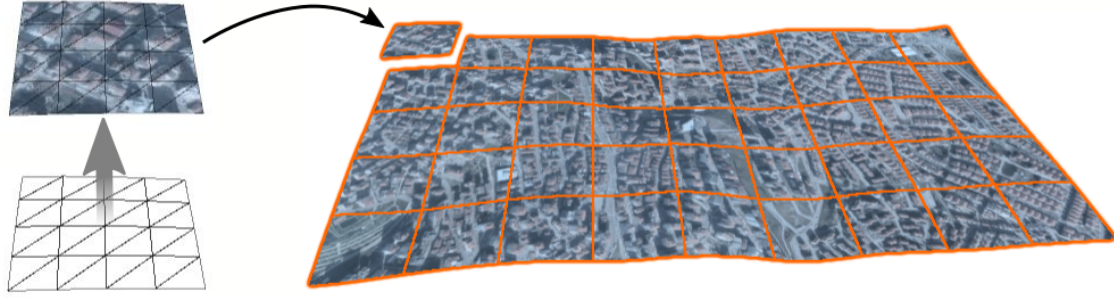
*Google Static Maps:* Uydu görüntülerinin edilmesi için kullanılmıştır. Her sorgu ile belirtilen bir koordinatın farklı ölçeklerde ve çözünürlükte görüntüsünü almak mümkündür.

*Google Streetview:* Şehirdeki yollar boyunca yaklaşık 20'şer metre aralıklarla çekilmiş panoramik fotoğraflar içermektedir. Sokak seviyesinden dış cephe görüntülerinin edinilmesi için kullanılmıştır. Belirtilen bir coğrafi koordinata en yakın panoramik görüntü elde edilebilmektedir.

#### 4. ZEMİNİN MODELLENMESİ

Zeminin düzenlenmesi için ihtiyaç duyulan bilgi yükseklik verileri ve gerçekçi bir görüntü için doku kaplamada kullanılacak uydu fotoğraflarıdır. Sistemimizde zemin her düğümü farklı yüksekliklere sahip dörtgenlerden oluşan bir ızgara şeklinde modellenmektedir (Şekil 2). Dünya üzerindeki koordinatlar ile şehrin oluşturulduğu sanal platformun yerel koordinatları arasındaki dönüşüm Merkatör projeksiyonu kullanılarak yapılmaktadır.

**Yükseklik:** Zemini oluşturan her bir parça kendi içerisinde  $(a \times a)$  kadar yükseklik değeri bulundurmaktadır. Şekil 2'nin sol tarafında görülen örnekte  $a$  değeri 5 olarak alınmıştır ve bu zeminin her parçası için 25 yükseklik değeri kullanıldığı anlamına gelmektedir. Daha yüksek bir  $a$  değeri yükseklik çözünürlüğünü artıracak ancak, daha fazla yükseklik değeri edinilmesini gerektirecektir.



**Şekil 2.** Zeminin ızgara şeklinde modellenmesi

Deniz seviyesine göre yükseklik verilerinin alındığı Google Elevations API üzerinden bir parça üzerindeki  $a^2$  adet yükseklik değerlerinin tümü tek seferde aşağıda belirtilen şekilde sorgulanmaktadır.

[https://maps.googleapis.com/maps/api/elevation/json?locations=enlem\(1\),boylam\(1\)|enlem\(2\),boylam\(2\)| ... |enlem\(a<sup>2</sup>\),boylam\(a<sup>2</sup>\)&key=API\\_KEY](https://maps.googleapis.com/maps/api/elevation/json?locations=enlem(1),boylam(1)|enlem(2),boylam(2)|...|enlem(a^2),boylam(a^2)&key=API_KEY)

Yukarıdaki örnekte olduğu gibi bir parça için istenilen tüm koordinatların enlem ve boylamlarını içeren bir *url* oluşturulmaktadır. Elde edilen sonuç tekrar sorgulandığında doğrudan kullanılmak üzere *json* formatında kaydedilmektedir.

**Doku:** Zemini oluşturan her bir parça daha gerçekçi bir görünüme ulaşmak amacıyla bir uydu fotoğrafı ile kaplanmaktadır. Bu veri de yine Google Static Maps üzerinden elde edilebilmektedir. Zemini oluşturan parça sayısı arttığında parça başına gösterilecek kısım küçüldüğünden uydu fotoğrafının çözünürlüğü artmakta fakat saklanan ve sorgulanan veri miktarı da aynı oranda artmaktadır. Çalışmamızda her bir fotoğraf bir kenarı 225m ya da 450m olacak bir bölgeyi kapsayacak şekilde ayarlanmıştır.

Google Maps api üzerinden statik uydu fotoğrafı sorgusu yine bir *url* vasıtasıyla, istenen bölgenin merkez koordinatını, ölçek seviyesini ve fotoğrafın çözünürlüğü bilgisini içermelidir. Bu yöntemle en fazla 640x640 çözünürlüğe sahip uydu fotoğrafları elde edilebilmektedir. Zeminde olduğu gibi elde edilen sonuç aynı parametrelerle tekrar uydu fotoğrafı sorgulandığında kullanılmak üzere kaydedilmektedir.

Bir sonraki bölümde oluşturulan binalar, modellendikten sonra buldukları yerin zemin yüksekliğine göre konumlandırılmaktadır.

## 5. BİNALARIN MODELLENMESİ

2 boyutlu şehir verisi için her binanın ve diğer kapalı alanların çokgenler ile ifade edildiği OpenStreetMap kullanılmaktadır (Şekil 3). Bu poligonların her köşesi için coğrafi koordinatlara erişim de mümkündür. OpenStreetMap ile binaların iki boyutu oluşturulabilse de yükseklikleri ve görsel dokularını oluşturmak için daha fazla bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır.





**Şekil 3.** Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi civarının OpenStreetMap görüntüsü.

Öncelikle modellenecek bölgenin 2 boyutlu planı elde edilmektedir. Bu amaçla her binanın, yolların ve benzeri bölgelerin kullanıcılar tarafından 2 boyutlu poligonlar ve çizgiler şeklinde oluşturulduğu Openstreetmap'ten veri indirilmektedir. Bu veri *.osm* uzantılı bir *xml* dosyasından oluşur. Örnek bir alan tanımını Şekil 4'te gösterilmektedir.

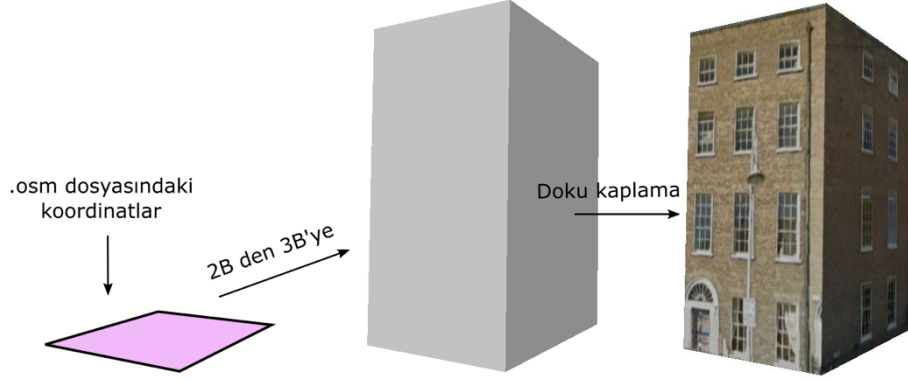
```

...
<way id="289999975" visible="true" version="2" changeset="38500788"
timestamp="2016-04-12T13:54:29Z" user="Nesim" uid="1386706">
  <nd ref="4116768402"/>
  <nd ref="4116768401"/>
  <nd ref="4116768400"/>
  <nd ref="2935330490"/>
  <nd ref="2935330491"/>
  <nd ref="2935330492"/>
  <nd ref="4116768408"/>
  <nd ref="4116768407"/>
  <nd ref="4116768406"/>
  <nd ref="4116768405"/>
  <nd ref="4116768404"/>
  <nd ref="4116768403"/>
  <nd ref="4116768402"/>
  <tag k="addr:city" v="Ankara"/>
  <tag k="addr:houseNumber" v="2"/>
  <tag k="addr:street" v="Halil Sezai Erkut Caddesi"/>
  <tag k="amenity" v="university"/>
  <tag k="building:levels" v="4"/>
  <tag k="name" v="Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Etlik Yerleşkesi"/>
</way>
<node id="4116768402" visible="true" version="1" changeset="38500788"
timestamp="2016-04-12T13:54:23Z" user="Nesim" uid="1386706" lat="39.9708517"
lon="32.8254215"/>
...

```

**Şekil 4.** osm dosyasından örnek bir kısım.

Şekil 4'teki örnekte *way*, ilgili binanın 2B sınırlarını oluşturan poligonu ve isim, adres, kat sayısı gibi tercihe bağlı bilgileri içermektedir. Poligonun her köşesi bir düğümden (*nd*) oluşur ve bu düğümler koordinat bilgisi içerir. Modellenen bölgeyi içeren .osm dosyası okunarak oluşturulan 2 boyutlu poligonlar yerden yükseltilerek 3 boyutlu basit modellere dönüştürülebilir. Çalışmanın şu anki halinde çatı kısmı düz bir şekilde üçgen yüzeylerle kapatılmaktadır.



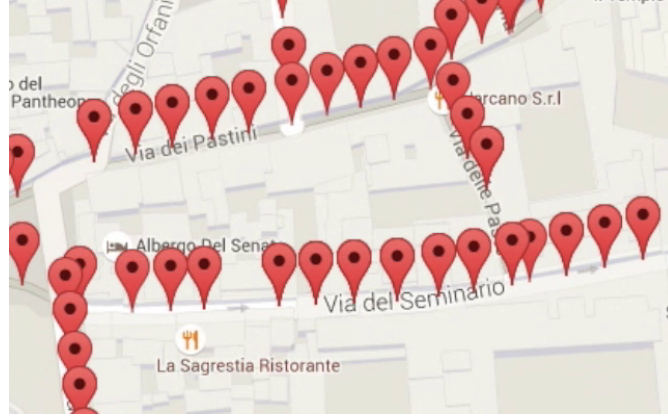
Şekil 5. 3B Bina oluşturma örneği.

### 5.1. Doku kaplama ve bina yüksekliği

Şekil 5'te görüldüğü gibi binaların gerçekçi bir görüntüye sahip olması ve gerçek yüksekliklerinin belirlenmesi için sokak seviyesinden çekilmiş fotoğraflarla doku kaplamak mümkündür. Bu yaklaşımın doğru bir şekilde çalışması için binanın ve fotoğrafın çekildiği kameranın pozisyonu, yönelimi ve görüş sahası bilinmelidir. Sokak seviyesi fotoğrafları için bu parametrelerin tümüne ulaşılabilen Google StreetView API kullanılmıştır.

Daha önce belirtildiği üzere, Google Streetview yollar üzerinde yaklaşık 20m aralıklarla 360 derece panoramik fotoğraflar içermektedir ancak bu panoramaların erişilebilir bir listesi bulunmamaktadır. Sadece verilen bir noktaya en yakın panoramaya erişim verilmektedir. Bir panoramaya eriştikten sonra ise o panoramanın özel kimlik numarasına ve koordinatlarına erişim mümkün olmaktadır. Bu nedenle modellenen bölgedeki tüm panoramaların listesini oluşturmak amacıyla haritanın ilgili alanı üzerinde 10m aralıklarla streetview panoramalar talep edilmektedir. Her talebin sonunda elde edilen panorama daha önce karşılaşılmayan bir panorama ise eldeki listeye eklenir. Yukarıda bahsedilen işlem javascript kodu ile gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemle tespit edilen panoramik fotoğraf pozisyonlarından bir örnek Şekil 6'da gösterilmektedir.

Elde edilen bir panoramik fotoğraf, gördüğü binaların doku kaplaması için kullanılabilir. Diğer bir deyişle, her bina kendisini gören fotoğraflar yardımıyla kaplanabilir. Bu nedenle bir binayı gören tüm fotoğraflar belirlendikten sonra, bu fotoğraflardan en uygun olan bir



Şekil 6. Örnek bir alanda Google Streetview panorama dağılımı.

alt küme seçilerek doku oluşturulması için kullanılır. Bir binayı gören fotoğrafın uygunluğu aşağıdaki skor denklemine göre belirlenir.

$$skor(k, c) = \frac{n_c \cdot d_k}{|m_{ck} - u_c/2| + u_c/2} \quad (1)$$

Burada  $k$  ilgili fotoğrafın çekildiği kamerayı,  $c$  binanın cephesini belirtmektedir. Ayrıca  $n_c$  cephe normali,  $d_k$  kamera pozisyonunun cephenin orta noktasına göre yönünü gösteren birim vektör,  $m_{ck}$  kameranın cepheye mesafesini,  $u_c$  ise cephenin uzunluğunu belirtmektedir. Buradaki yaklaşım cepheyi mümkün olduğunca karşıdan gören ( $n_c \cdot d_k$  skaler çarpımı), çok uzak olup detayları kaybetmeyen, ve çok yakın olup cephenin bir kısmını dar açıyla gördüğü için projeksiyon sırasında bozulmalara sebep olmayan fotoğrafı tespit etmektir.

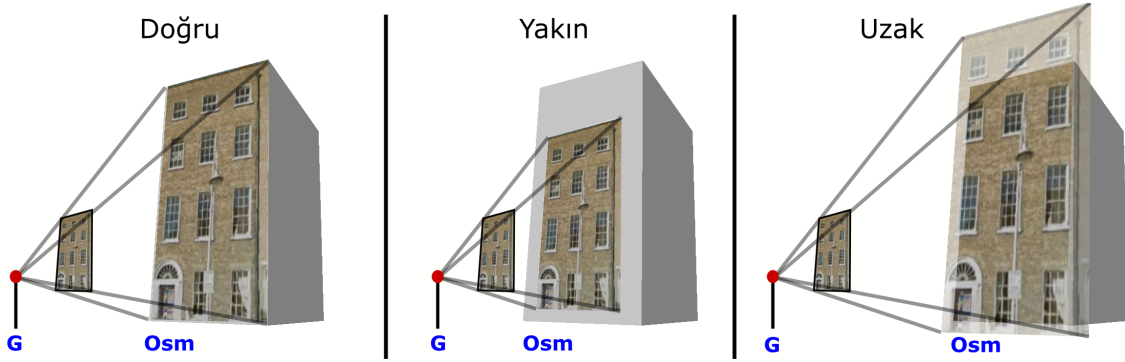
Tespit edilen fotoğraf, cephe üzerine yansıtılarak (ters projeksiyon) cepheye ait görsel doku oluşturulur. Bazı durumlarda tek fotoğraf binanın bir cephesini tümüyle kaplayabilirken, tek fotoğrafın tüm cepheyi görmemesi durumunda ise birden fazla fotoğrafın birleştirilmesi gerekebilir. Böyle durumlarda, en yüksek skora sahip fotoğrafın dolduramadığı kısım diğer fotoğraflar yardımıyla doldurulur.

**Bina yüksekliği:** Binanın görsel dokusu oluşturulduktan sonra, fotoğrafta binanın bitip gökyüzünün başladığı yükseklik bina yüksekliği olarak atanır. Fotoğraftan gökyüzü tespiti için renk eşiği tabanlı [24]'tekine benzer bir yöntem kullanılmıştır. Çalışmamızın şu halinde çatının karmaşık olabilecek geometrisi göz ardı edilerek fotoğrafta çoğunluğu gökyüzü olarak sınıflanan satır binanın yüksekliğini belirlemektedir.

Uygulanan yöntemde herhangi bir kamera tarafından görülmeyen kısımlar dokusuz kalmaktadır. Bununla birlikte, hiçbir kameranın görmediği kısımlar gerçekte de görülme ihtimalinin daha zayıf olduğu yerler olduğu için bu durumun rahatsız edici etkiler oluşturmaması beklenmektedir.

### 5.1.1. Bina ve fotoğraf koordinatlarının uyumsuzluğu

Kullanılan yöntemin farklı kaynaklardan veri almasından dolayı koordinat uyumsuzlukları özellikle bina dokularının kaplanmasında sorun oluşturabilmektedir. Panoramik fotoğrafların koordinatları Google Streetview'e göre oluşurken, Bina planları Openstreetmap üzerinden edinilmektedir. Bu durumda fotoğrafın çekildiği kameranın binaya göre konumu hata barındırabilir. Kameranın binaya olması gerektiğinden daha yakın konumlandırılmış olduğu durumlarda fotoğraf daha kısa mesafeye yansıtılacağından daha çok az yer kaplar, bu da dokunun olması gerekenden daha küçük oluşturulmasına ve bina yüksekliğinin olması gerekenden daha kısa olmasına sebep olur. Bu durum Şekil 7'de örneklendirilmiştir.



**Şekil 7.** Doku olarak kullanılacak fotoğrafın çekildiği konum (G) ve bina konumu (Osm) arasındaki uyumsuzluğun sonuçları. Solda koordinatları uyumlu, ortada kamera binaya gerçeğe kıyasla daha yakın ve sağda daha uzak.

Bahsedilen uyumsuzluğun giderilmesi için kullanıcının konumlara müdahalesi, ya da birden fazla kameradan gelen bilgilerin stereo derinlik ölçümü yoluyla kullanılması mümkün olabilir ancak bu çalışmada bu düzeltme yöntemleri kullanılmamıştır.

## 6. SONUÇ

Bu çalışmada çevrimiçi olarak erişilebilen kaynakları kullanarak hızlı bir şekilde, gerçekçi yer şekillerine üzerinde, basit geometrilere ve görsel dokuya sahip binalar içeren 3B şehir modelleri üreten bir yöntem önerdik. Elde edilen sonuçlardan örnekler Şekil 8'de gösterilmektedir. Uygulama Unity oyun motoru ve C# programlama dilleri kullanılarak geliştirildi. Bu uygulama içerisinde yüzlerce binadan oluşan kent modeli internetten indirilen veri haricinde saniyeler içinde oluşturulmaktadır.

Sunulan sistemin gelişime açık yönleri bulunmaktadır. Oluşturulan sistemin doku kaplama kısmında, binaların önündeki ağaç, direk gibi binalardan bağımsız nesnelere fotoğrafın cephe üzerinde izdüşümü sırasında bina dokusuna yapışmaktadır. Bu durumun önlenmesi için binanın aynı cephesini gören birden fazla resmin birlikte incelenmesi potansiyel bir çalışma olup bu konunun üzerinde ileride durulması düşünülmektedir.



**Şekil 8.** Solda: Basit şekilde modellenen binaların dokusuz halleri, zemin üzerinde görüntülenmiştir. Sağda: Oluşturulan başka bir şehrin içinden dokulara sahip binaların görüntüsü.

Yine Bölüm 5.1.1’de belirtilen farklı kaynaklardan edinilen bilgiler arasındaki uyumsuzlukların giderilmesine yönelik, kullanıcı etkileşimli ya da otomatik yöntemlerin geliştirilmesi amacıyla çalışmalar yapılması mümkündür. Elde edilen 3B sanal şehirlerin gerçek şehirlerle daha detaylı ve nesnel olarak kıyaslanması da gelecekte yapılması planlanan çalışmalardandır.

Geliştirdiğimiz yöntem, erişilebilir veriler olması durumunda dünya üzerinde istenilen herhangi bir yerleşim alanının hızlı bir şekilde 3B modelini üretmektedir. Elde edilen 3B içerik sanal gerçeklik ortamlarında, gerçek şehirlerde geçmesi düşünülen oyun ve benzetim uygulamalarında faydalı olma potansiyeli taşımaktadır.

## 7. TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK – BİDEB 2232 programı dahilinde desteklenen 117C010 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

## 8. KAYNAKÇA

- [1] Agarwal, S., Furukawa, Y., Snavely, N., Simon, I., Curless, B., Seitz, S. M. ve Szeliski, R. (2011), Building rome in a day, *Communications of the ACM*, 54(10), 105-112.
- [2] Frahm, J.M., Fite-Georgel, P., Gallup, D., Johnson, T., Raguram, R., Wu, C., Jen, Y.H., Dunn, E., Clipp, B., Lazebnik, S. ve Pollefeys, M. (2010), Building rome on a cloudless day, *European Conference on Computer Vision*, 368-381.
- [3] Sinha, S. N., Steedly, D., Szeliski, R., Agrawala, M. ve Pollefeys, M. (2008), Interactive 3D architectural modeling from unordered photo collections, *ACM Transactions on Graphics*, 27(5), 159.
- [4] Pollefeys, M., Van Gool, L., Vergauwen, M., Verbiest, F., Cornelis, K., Tops, J. ve Koch, R. (2004), Visual modeling with a hand-held camera, *International Journal of Computer Vision*, 59(3), 207-232.

- [5] Snavely, N., Seitz, S. M. ve Szeliski, R. (2006), Photo tourism: exploring photo collections in 3D, *ACM Transactions on Graphics*, 25(3), 835-846.
- [6] Brown, M. ve Lowe, D. G. (2005), Unsupervised 3D object recognition and reconstruction in unordered datasets, *3-D Digital Imaging and Modeling*, 56-63.
- [7] Hartley, R. ve Zisserman, A. (2003), Multiple view geometry in computer vision, Cambridge university press.
- [8] Furukawa, Y. ve Ponce, J. (2010), Accurate, dense, and robust multiview stereopsis, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(8), 1362-1376.
- [9] Goesele, M., Snavely, N., Curless, B., Hoppe, H. ve Seitz, S. M. (2007), Multi-view stereo for community photo collections. *International Conference on Computer Vision*, 1-8.
- [10] Wu, C. (2013), Towards linear-time incremental structure from motion, *3D Vision-3DV*, 127-134.
- [11] Cohen, A., Zach, C., Sinha, S. N. ve Pollefeys, M. (2012), Discovering and exploiting 3D symmetries in structure from motion, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 1514-1521.
- [12] Ceylan, D., Mitra, N. J., Zheng, Y. ve Pauly, M. (2014), Coupled structure-from-motion and 3D symmetry detection for urban facades, *ACM Transactions on Graphics*, 33(1), 2.
- [13] Bulbul, A., Grogan, M. ve Dahyot, R. (2015), 3D reconstruction of reflective spherical surfaces from multiple images, *Irish Machine Vision & Image Processing Conference*.
- [14] Prusinkiewicz, P. ve Lindenmayer, A. (2012). The algorithmic beauty of plants. Springer Science & Business Media.
- [15] Parish, Y. I. ve Müller, P. (2001), Procedural modeling of cities, *ACM Conference on Computer graphics and interactive techniques*, 301-308.
- [16] Müller, P., Wonka, P., Haegler, S., Ulmer, A. ve Van Gool, L. (2006), Procedural modeling of buildings, *ACM Transactions On Graphics*, 25(3), 614-623.
- [17] Schwarz, M. ve Müller, P. (2015), Advanced procedural modeling of architecture, *ACM Transactions on Graphics*, 34(4), 107.
- [18] Merrell, P. ve Manocha, D. (2008), Continuous model synthesis. *ACM Transactions on Graphics*, 27(5), 158.
- [19] Efros, A. A. ve Leung, T. K. (1999), Texture synthesis by non-parametric sampling. *International Conference on Computer Vision*, Vol. 2, 1033-1038.
- [20] Wei, L. Y. ve Levoy, M. (2000), Fast texture synthesis using tree-structured vector quantization, *Annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 479-488.
- [21] Kalogerakis, E., Chaudhuri, S., Koller, D. ve Koltun, V. (2012), A probabilistic model for component-based shape synthesis. *ACM Transactions on Graphics*, 31(4), 55.
- [22] Brenner, C. (2000), Towards fully automatic generation of city models, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(B3/1; PART 3), 84-92.
- [23] Huang, F. ve Klette, R. (2012), City-Scale Modeling for Street Navigation, *Journal of information and communication convergence engineering*, 10(4), 411-419.
- [24] Hernández, J. ve Marcotegui, B. (2009), Morphological segmentation of building façade images, *IEEE International Conference on Image Processing*, 4029-4032.

## SINIRLI SAYIDA VERİ İLE GÜVENİLİRLİK TAHMİNİ: SARP MODELİ

**Faruk Umut Küçüker <sup>(a)(b)</sup>, Barbaros Yet <sup>(b)</sup>**

<sup>(a)</sup> T.C. Cumhurbaşkanlığı Savunma Sanayii Başkanlığı, fkucuker@ssb.gov.tr

<sup>(b)</sup> Endüstri Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi,  
barbaros.yet@hacettepe.edu.tr

### ÖZ

Hava aracı güvenilirliği belirlenirken kullanılan ana kaynaklar üretici firmanın sağladığı tasarım değerleri ve filo işletmecisinin topladığı hata verisidir. Üretici firma, sağladığı tasarım güvenilirlik değerlerinde hatalar arası zamanların sadece beklenen değerlerini vermekte, hata dağılımına ilişkin veriyi çoğu zaman iletmemektedir. Dahası, üretici firmanın sağladığı beklenen değerler ile gerçek değerler arasında, üretim ve tasarım kalitesi gibi faktörler sebebiyle, farklar oluşabilmektedir. Filo işletmecisi, özellikle yeni hava araçları için, çoğu zaman kısıtlı miktarda hata verisi toplayabilmektedir. Dolayısıyla, tasarım değerleri de hata verisi de tek başına değerlendirildiğinde kısıtlı bilgi sağlamaktadır. Yüksek doğrulukta güvenilirlik tahmin için, bu iki kaynağı tutarlı olarak birleştirerek tahmin üreten modellere ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, hava aracı filolarındaki hatalar arasındaki zaman dağılımını değişik seviyelerde tahmin eden bir Bayes ağı modeli sunulmaktadır. Önerilen model, tasarım değerlerini, gerçek hata verilerini ve hava aracı bölümlerinin tasarım ve üretim kalitesine ilişkin uzman değerlendirmelerini Bayes ağları kullanarak birleştirmektedir. Uzman değerlendirmeleri, hava aracı üreticisi tarafından sağlanan tasarım ömür tahminlerini temel almakta ve bu tahmin değerlerini, değerlerdeki belirsizlikleri yansıtan bir dağılıma dönüştürmektedir. Daha sonra, bu dağılım filo işletmecisi tarafından toplanan hata verisi ile revize edilmektedir. Modelimiz hava aracı ana sistemleri güvenilirliğini tahmin etmek için uygulanmış, performansı yaygın olarak kullanılan güvenilirlik analizi yöntemleri ile karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Bayesci Modeller, Güvenilirlik Tahmini, Hava Aracı Güvenilirliği

## **RELIABILITY PREDICTION USING LIMITED DATA: THE SARP MODEL**

### **ABSTRACT**

The main resources for estimating reliability of aircrafts are the design estimates that the manufacturer provides and the failure data that the fleet operator collects. Manufacturers often provide the mean time between failures, and they do not provide data regarding the entire probability distribution of time between failures. Moreover, there can be differences between the values provided by the manufacturer and the failures observed by the operator due to factors including quality of manufacturing and design. Fleet operators can often collect limited amount of failure data, especially for new aircrafts. Hence, both design estimates and failure data can provide limited amount of information if they are evaluated separately. In order to provide accurate reliability predictions, models that combine these two resources are required. In this paper, we demonstrate a Bayesian network that predicts the time between failures in aircraft fleets in different levels. The model can combine different sources of information by using Bayesian networks. Design estimates provided by the manufacturer are combined with expert knowledge and transformed into prior probability distributions. These prior distributions are reviewed by the failure data collected by the operator. The performance of our model is compared with widely used reliability estimation techniques.

**Keywords:** Aircraft Reliability, Bayesian Models, Reliability Prediction

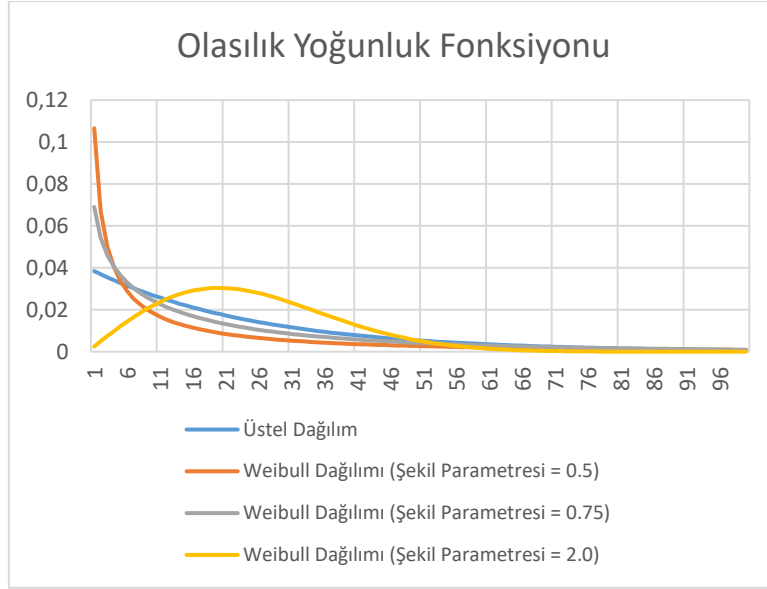
### **1. GİRİŞ**

Karmaşık ve onarılabılır sistemlerin güvenilirliğini tahmin etmek, özellikle ömür devrinin erken aşamalarında, zor bir iştir. Ancak doğru bir modelleme ile tahmin yapıldığında, bu tahminler karmaşık sistem kullanıcılarının yedek parça stok optimizasyonu, bakım ve operasyon planlaması gibi verimlilik problemlerinin çözümünde yardımcı olabilirler. Bu tahminlerin doğru bir şekilde geliştirilebilmesi için güvenilirlik metriklerine ilişkin belirsizliğin yeterince hassas bir şekilde hesaplanmaması ve kullanıcının yeterli veri adedine sahip olmaması gibi temel problemlerin aşılması gerekmektedir.

Hatalar Arası Ortalama Süre (Mean Time Between Failure – MTBF) onarılabılır sistemlerin güvenilirliği için yaygın kullanılan bir metriktir. Genellikle bir hava aracının ana sistemlerine ilişkin MTBF değerleri tedarikçi tarafından kullanıcıya verilir. Sistemin güvenilirliğini anlamak için MTBF tek başına kullanılırsa, ya hatalara ilişkin belirsizliği göz ardı etmek ve sadece ortalama değeri kullanmak gerekir; ya da hatalar arası sürenin üstel dağılıma sahip olduğu varsayılır [1]. Her iki varsayımda çoğu zaman sistemin hata karakteristiğini anlamak için yetersiz olmaktadır. Bir sistemin hatalar arası sürelerinin



üstel dağılıma uyduğunu varsaymak konu sistemin ömür devri boyunca sabit bir hata oranına sahip olduğu anlamına gelmektedir. Bugün birçok malzeme çeşidinin hatalar arası süresinin üstel dağılıma uymadığı bilinmektedir [2]. Konu sistemin hatalar arası geçen sürelerinin üstel dağılımdan farklı bir tür dağılıma, örneğin Weibull dağılımına, uyduğu bir durumda ortaya büyük farklar çıkabilmektedir.



**Şekil 1.** Olasılık dağılım fonksiyonları

Şekil 1’de aynı MTBF değerine sahip dört farklı olasılık dağılımı örneği görülmektedir. Tüm dağılımların ortalama değeri 25 iken, üstel dağılımın medyan değeri 17.3, şekil parametresi 0.5, 0.75 ve 2 olan Weibull dağılımlarının medyan değerleri sırasıyla 12.1, 20.6 ve 27.9’dur. Örnekte görüldüğü gibi, ilgili olasılık dağılımı anlamadan sadece MTBF değerini veya üstel dağılım varsayımını kullanmak sistem güvenilirliğini anlamak için yeterli olmayabilir.

MTBF hesaplamalarında ortaya çıkabilecek sorunlardan bir diğeri tedarikçi tarafından hesaplanan değer ile kullanıcı tarafından tecrübe edilen değer farklı olmasıdır. Yüksek fiyatlı ve yüksek dayanımlı ürünlerin gerçek kullanım esnasında testlere tabi tutulması hem teste tabi tutulacak ürün adedini, hem de test sürelerinin çok uzaması sebebiyle maliyetleri oldukça artırabilmektedir. Bu sebeple tedarikçi firmalar hızlandırılmış ömür testleri uygulamakta veya güvenilirlik testlerini sınırlı sayıda ürüne uygulamaktadır. Bu durum üretimden kaynaklı malzeme özelliklerinde oluşabilecek olan değişkenliğin veya tasarımdan elde edilen güvenilirlik metriklerinin yeterince doğrulanamamasına yol açabilmektedir. Ayrıca ‘Küvet Eğrisi’ adı verilen ve ürünlerin ömür devri sürecinde uğradığı hata oranının değişkenliğini gösteren faktör de hesaba katıldığında ürünlerin ömür devri boyunca aynı güvenilirlik metriklerine sahip olmadığı görülmektedir.

Bu çalışmada, karmaşık sistemlerin güvenilirlik karakteristiklerini kısıtlı sayıda veriden kestirmek için tedarikçi tarafından sağlanan nokta değer olan MTBF metriği ve hata verisini birlikte kullanan bir tahmin modeli geliştirilmiştir. Geliştirdiğimiz modele Tedarikçi Değerlendirme ve Güvenilirlik Tahmini (Supplier Assessment and Reliability Prediction – SARP) ismi verilmiştir. Bu model ile:

- 1- Tedarikçi firmaların tasarım ve üretim kalitesi gibi özelliklerine ilişkin uzman görüşü,
- 2- Tedarikçi firma tarafından sağlanan MTBF değeri,
- 3- Operasyonel sahadan elde edilen gerçek hata verileri

kullanılarak konu sistemin hatalar arası süre dağılımının etkin bir şekilde tahmin edilmesi sağlanmaktadır. Geliştirilen model bir hava aracı filosuna vaka çalışması olarak uygulanmıştır. Kullanıcı tarafından belirli bir sürede toplanan veriler incelenerek geliştirilen modelden elde edilen tahmin sonuçları ile En Büyük Olabilirlik Kestirimi (EBOK)’nden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Makalenin geri kalanında, Bölüm 2 Bayes ağlarına giriş yapmakta, Bölüm 3 SARP modelini anlatmakta, Bölüm 4 ve 5 vaka çalışmasındaki değerlendirmeyi ve sonuçları sunmaktadır.

## 2. BAYES AĞLARI

Bayesci modeller, özellikle Bayes ağları, uzman görüşünün kolayca entegre edilebilmesi, esnek ve şeffaf bir çatı oluşturması sebebiyle güvenilirlik analizlerinde sıklıkla tercih edilen bir istatistiksel yaklaşımdır. Uygulaması Bayes teoremine [3] dayanan Bayes ağları temel olarak iki bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenlerden ilki yönlü döngüsüz grafiştir (Directed Acyclic Graph – DAG). Bu diyagramda yer alan her düğüm bir değişkeni, her ok ise değişkenler arasındaki direkt bağımlılıkları sembolize etmektedir.

Bayes ağı modelinde  $W$  düğümünden  $X$  ve  $Y$  düğümlerine direkt bağlantı bulunursa  $W$  düğümü,  $X$  ve  $Y$  düğümlerinin ebeveyn düğümü olarak adlandırılır.  $X$  ve  $Y$  düğümleri ise  $W$  düğümünün çocuk düğümüdür. Bayes ağlarında her çocuk düğümün koşullu olasılık dağılımları ebeveyn düğümlerine göre belirlenmektedir. Bayes ağlarının ikinci bileşeni ise bu koşullu olasılık dağılımlarının kesikli değişkenler için kullanılan formu olan Düğüm Olasılık Tablolarıdır (Node Probability Table – NPT).

Bayes ağlarının grafiksel yapısı, ilgi alanı bilgisiyle nedensel ilişkilerin modellenmesine uygun bir gösterim sağlamaktadır [4]. Bu kolaylık, alan uzmanlarının problem tanımına odaklanmalarını da kolaylaştırmaktadır. Bu sebeple, Bayes ağları alan uzmanlarının bilgisinin kritik öneme haiz olduğu birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bayes ağı modeli doğru bir şekilde oluşturulduğunda nedensel (ebeveynden çocuğa), tanısal (çocuktan ebeveyne) veya hepten gidimsel (nedenler arası açıklamalar getirme) çıkarımlar hesaplamakta kullanılabilir. Yapılan bu çalışmada hesaplamaları Dinamik

Kesiklileştirme (Dynamic Discretization – DD) ve Birleşim Ağacı (Junction Tree – JT) algoritmaları ile yapan AgenaRisk<sup>1</sup> programı kullanılmıştır.

## 2.1. Bayesci Güvenilirlik Analizi

Güvenilirlik analizi hata modlarının ve sebeplerinin doğrulanması ile bileşenlerin güvenilirlik değerlerinin kestirimi için matematiksel modeller kurmayı hedefler [5]. Güvenilirlik fonksiyonu;  $t$  zamanına kadar hata oluşumunun olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(t)$  ve birikimli dağılım fonksiyonu  $F(t)$  iken Denklem (1)'de yer aldığı şekilde tariflenmektedir. Güvenilirlik fonksiyonu  $R(t)$ , bir bileşenin  $t$  zamanına kadar hatasız çalışmasının olasılığını göstermektedir.

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(u)du \quad (1)$$

Tedarikçi firmalar ürünlerin güvenilirlikleriyle ilgili bir takım kestirimler paylaşıyor olsa da bu kestirimler hesaplanan özet istatistik veriler olmaktadır. Güvenilirlik için parametrik yöntemler kullanıldığında en çok kullanılan dağılım türü Weibull dağılımıdır. Weibull dağılımının şekil ve ölçek parametrelerini hesaplamak için geleneksel veya Bayesci yöntemler kullanılabilir.

Bayesci yöntemlerin geleneksel yöntemlere kıyasla en önemli avantajı, veri adedinin kısıtlı olduğu durumlarda bile alan uzmanının görüşlerini öncül bilgi olarak modele dahil ederek veri analizinde daha hızlı sonuca yakınsamasıdır. Ancak Weibull dağılımının şekil ve ölçek parametrelerine ilişkin öncül bilginin uzmanlar tarafından yorumlanması zordur [6]. Bu sebeple literatürde Weibull parametreleri ile ilgili birçok farklı öncül bilgi kombinasyonu yer almaktadır. Daha önceki çalışmalarda şekil için kesikli ölçek için gamma dağılımı [7], şekil için türdeş ölçek için genelleştirilmiş ters gamma dağılımı [8], şekil ve ölçek için gamma dağılımı [9], şekil için türdeş ölçeğin yüzdelik dilimleri için ters Weibull dağılımı [10] kullanılmıştır. Ancak bu çalışmalar temel olarak Bayesci güvenilirliğin matematiksel çözümüne odaklanmıştır ve kullanıcının yüksek istatistiksel bilgi seviyesine sahip olduğu varsayılmıştır.

## 2.2. Güvenilirlikte Bayes Ağları

Bayes ağları, nedensel yapısı sayesinde kolaylıkla hata ağaçları, olay ağaçları ve güvenilirlik blok diyagramlarından dönüştürülebilirler. Literatürde Bayes ağlarının hata ağaçları ve güvenilirlik blok diyagramları ile karşılaştırıldığı ve Bayes ağlarının bu yaklaşımlara nazaran büyük avantajları olduğunun savunulduğu çalışmalar mevcuttur [11], [12]. Ayrıca karmaşık sistemlerin güvenilirlik blok diyagramlarının veya birden fazla olay ağacının tek bir Bayes ağı modeline dönüştürülmesi ve hata oluşumu ile güvenilirlik analizlerinin bu Bayes ağı modeli vasıtası ile gerçekleştirilmesi de mümkündür [13], [14]. Reese ve diğerleri [15] karmaşık sistemlerin güvenilirlik blok

<sup>1</sup> AgenaRisk, Agena Ltd.

diyagramlarında yer alan bileşenlerin ve ana sistemin güvenilirlik verileri ve uzman görüşünün Bayes ağları yardımı ile ana sistemin güvenilirlik tahminine teorik bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Çalışmalarında bileşenlerin güvenilirlik fonksiyonlarını modellemek için Weibull dağılımı, Weibull parametreleri için ise ters gamma (şekil) ve gamma (ölçek) dağılımı kullanmışlardır. Ancak bu çalışmada gerçek veriler değil, Monte Carlo simülasyonundan oluşturulan veriler kullanılmıştır.

Marquez ve diğerleri [16] dinamik hata ağaçlarını Bayes ağı modeline dönüştürerek DD algoritması aracılığıyla statik ve dinamik geçit kombinasyonlarını çözerek hata zamanı dağılımının çözümüne erişmiştir. Zhang ve Marsh [17] Birleşik Krallık'taki demiryollarına ait köprülerin mevcut ve yakın gelecekteki durumlarını kestirmek ve bu doğrultuda bakım zamanına ilişkin kararlarını daha maliyet etkin hale getirmek üzere bir Bayes ağı modeli önermişlerdir. Song ve diğerleri [18] sistemde kayıtlı rüzgar hızı, elde edilen güç ve jeneratör hızı verilerini kullanarak rüzgar türbinlerinin hata durumunu tahmin eden veri odaklı Bayesgil çok değişkenli bir yapı kurgulamıştır. Rebello ve diğerleri [19] Dinamik Bayes Ağları ve Gizli Markov Modeli kullanarak sistemde yer alan alt bileşenlerin fonksiyonel güvenilirliklerinin dağılımının tahmin edilmesi vasıtası ile sistem fonksiyonel güvenilirliğinin tahmin edildiği bir model öne sürmüştür.

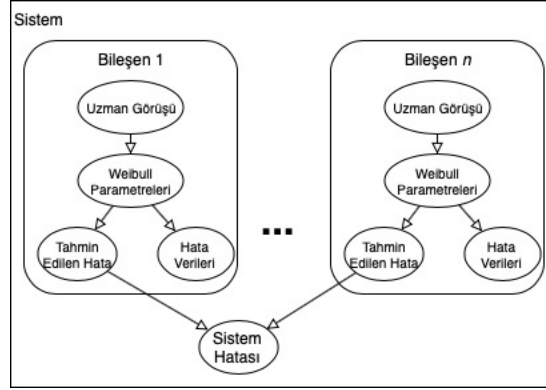
Hata ve olay ağaçları ve güvenilirlik blok diyagramlarının Bayes ağı modellerine dönüştürülmesinden farklı olarak henüz kullanım aşamasında olmayan sistemlerin güvenilirliğini tahmin etmeye yönelik de literatürde çalışmalar vardır. Bouissou ve diğerleri [20] Fransa'da elektrik gücü sağlayacak olan nükleer santrallerin enstrümantasyon ve kontrolü için tedarik edilen sistemlerin sistem gereksinimlerinin, tasarım ve geliştirme süreçlerinin uygunluğunu, tedarikçilerin tecrübesini, testlerden elde edilen sistem performans verileri gibi parametreleri analiz ederek sistemin güvenli çalışma kapasitesini ölçümleyen bir Bayes ağı modeli geliştirmişlerdir. Sigurdsson ve diğerleri [21] çevresel faktörler, tedarikçi kalitesi, geliştirilecek ürünün daha önce üretilmiş olan ürünlere benzerliği ve test gereksinimleri gibi parametreleri çift olasılıklı düğümler olarak modellemiş ve karmaşık bir sistemin kavram tasarım aşamasında hedeflenen güvenilirlik değerlerine ulaşma olasılığını kurduğu bu Bayes ağı modeli vasıtası ile tahmin etmiştir. Neil ve diğerleri [22] askeri kara araçlarının ihale, tasarım ve test aşamasındaki güvenilirlik metriklerini tahmin etmek üzere çok detaylı bir Bayes ağı yazılım aracı geliştirmişlerdir. Konu model, kullanımda olan benzer araçlara ilişkin kayıtlı verileri, tedarikçi firmanın tasarım ve üretim kapasitesini, deneme ve kabul testlerinden elde edilen hata verilerini, projedeki risk ve takvim baskısı gibi faktörleri harmanlayarak ihale aşamasından envantere alınma aşamasına kadar kademeli bir şekilde kara aracının hata oranını tahmin etmektedir. Böylece envantere alınması planlanan aracın şartnamede yer alan güvenilirlik hedeflerine ulaşma olasılığı da öngörülmektedir.

Ancak literatürde yer alan önerilerde doğrudan kullanıcı tarafından kolaylıkla kullanılabilir olan ve envantere yer alan karmaşık sistemlerin sahadaki hata verilerini

muhteva eden bir güvenilirlik tahmin modeli bulunmamaktadır. Geliştirilen SARP Bayes ağı modeli ile bu eksikliğin giderilmesi hedeflenmiştir.

### 3. SARP MODELİ

Önerilen modelin özeti Şekil 2’de yer almaktadır. Şekil 2’de yer alan farklı bileşenlerin hata tahminleri sonucunda sistemin çözümüne erişilmektedir.



Şekil 2. SARP modeline genel bakış

Sistem çözümüne erişilirken herhangi bir bileşen arızasının sistemin de arıza durumuna geçeceği varsayılarak Denklem (2)’deki gibi ifade edilmiştir. “Tahmin hata” ilgili bileşenin hatalar arası süre dağılımının tahminidir.

$$\text{Sistem Hatası} = \min(\text{Tahmin Hata Bileşen 1}, \dots, \text{Tahmin Hata Bileşen n}) \quad (2)$$

Her bir bileşen için hatalar arası sürenin Weibull dağılımı ile dağıldığı varsayılmakta ve bu dağılımın parametreleri, tedarikçi tarafından hesaplanan MTBF değeri ve tedarikçinin tasarım ve üretim kalitesi hakkında bilgi sahibi olan analizcinin öncül bilgisi kullanılarak tahmin edilmektedir. Daha sonra modele sahadan gelen gerçek hata verileri eklenerek parametrelerin güncellenmesi sağlanmaktadır. Bölümün geri kalanında her bir bileşendeki dört ana bölüm anlatılacaktır.

#### 3.1. Uzman Görüşü

Bu bölümde modelin uzman görüşü kısmında nokta değer olan, tedarikçi tarafından sağlanan MTBF değeri, o tedarikçinin tasarım ve üretim kabiliyetinin uzman tarafından değerlendirilmesi ile MTBF değerine ilişkin belirsizliği/kuşkuyu ifade eden bir olasılık dağılımına dönüştürülmektedir. Bölümde altı değişken yer almaktadır.

1.  $MTBF_t$ : Tedarikçi tarafından sağlanan MTBF değeri.
2.  $MTBF_d$ : Olasılık dağılımına dönüştürülen MTBF değeri.  $MTBF_t$  ile birlikte tedarikçi firmanın tasarım ve üretim kalitesi değerlendirilmesi suretiyle bu dağılım belirlenmektedir.  $MTBF_d$  için Denklem (3)’te ifade edildiği üzere tek taraftan kesilmiş (sıfırdan artı sonsuza) normal dağılım kullanılmaktadır. Bunun

sebebi güvenilirlik değerlerinin 0'dan küçük değer almamasıdır. Ayrıca bu normal dağılımın ortalama ( $\mu$ ) ve standart sapması ( $\sigma^2$ ) bahsedilen tasarım ve üretim kalitesi düğümleri aracılığı ile belirlenmektedir.

$$MTBF_d \sim \text{Kesikli Normal}(\mu, \sigma, 0, \infty) \quad (3)$$

3. **Tasarım Kalitesi (TK):** Bileşenin güvenilirlik açısından tasarımına duyulan güveni temsil eden düğüm. Tasarım dokümanlarının ve bu doğrultuda tasarım güvenilirlik metriklerinin doğru hesaplandığını ifade etmektedir. Tasarım kalitesi üç seviyeli (düşük, orta, yüksek) kesikli değer alabilecek şekilde modele dahil edilmiştir. Düşük tasarım kalitesi  $MTBF_t$ 'nin daha düşük olma olasılığını artırırken yüksek tasarım kalitesi de daha yüksek bir değer alma ihtimalini artırmaktadır.  $MTBF_d$ 'nin kesikli normal dağılımının ortalamasını ( $\mu$ )  $MTBF_t$  değeri ile birlikte belirlemektedir.
4. **Üretim Kalitesi (ÜK):** Bileşenin güvenilirlik açısından üretimine duyulan güveni temsil eden düğüm. Üretim tekniklerinin uygunluğu ve malzeme partileri arasındaki güvenilirlik özelliklerine etki eden farklılıkları ifade etmektedir. Üretim kalitesi üç seviyeli (düşük, orta, yüksek) kesikli değer alabilecek şekilde modele dahil edilmiştir. Düşük üretim kalitesi  $MTBF_t$ 'nin daha geniş bir aralıkta değer alması olasılığını artırırken yüksek üretim kalitesi de daha dar bir aralıkta değer alma ihtimalini artırmaktadır.  $MTBF_d$ 'nin kesikli normal dağılımının standart sapmasını ( $\sigma^2$ )  $MTBF_t$  değeri ile birlikte belirlemektedir.
5. **Ortalama ( $\mu$ ):** Tasarım kalitesine göre ortalama değer dağılımı Denklem (4)'te gösterildiği üzere  $MTBF_t$ 'nin parametrik oranı olarak belirlenmiştir.  $MTBF_d$ 'nin ortalama değeri tasarım kalitesi arttıkça artmakta, düşüktüce azalmaktadır.

$$\mu = \begin{cases} \text{Tekdüze}(a * MTBF_t, b * MTBF_t) & \text{eğer } TK = \text{Düşük} \\ \text{Tekdüze}(b * MTBF_t, c * MTBF_t) & \text{eğer } TK = \text{Orta} \\ \text{Tekdüze}(c * MTBF_t, d * MTBF_t) & \text{eğer } TK = \text{Yüksek} \end{cases} \quad (4)$$

Burada  $a \leq b \leq c \leq d$  olacaktır.

6. **Standart Sapma ( $\sigma^2$ ):** Üretim kalitesine göre standart sapma Denklem (5)'te gösterildiği üzere  $MTBF_t$ 'nin parametrik oranı olarak belirlenmiştir.  $MTBF_d$ 'nin standart sapması üretim kalitesi arttıkça azalmakta, düşüktüce artmaktadır.

$$\sigma^2 = \begin{cases} \text{Tekdüze}((e * MTBF_t)^2, (f * MTBF_t)^2) & \text{eğer } ÜK = \text{Yüksek} \\ \text{Tekdüze}((f * MTBF_t)^2, (g * MTBF_t)^2) & \text{eğer } ÜK = \text{Orta} \\ \text{Tekdüze}((g * MTBF_t)^2, (h * MTBF_t)^2) & \text{eğer } ÜK = \text{Düşük} \end{cases} \quad (5)$$

Burada  $e \leq f \leq g \leq h$  olacaktır.

### 3.2. Weibull Parametreleri

Her bir bileşenin hatalar arası süre dağılımının modellenmesi için Weibull dağılımı kullanılmıştır. Weibull dağılımı sağladığı esneklik sebebi ile güvenilirlik alanında en sık kullanılan dağılımlardandır. İki parametrelili Weibull dağılımının belirlenmesi için şekil ve ölçek parametrelerinin hesaplanması yeterlidir. Bu bölümde iki değişken yer almaktadır:

1. Şekil Parametresi ( $\beta$ ): Şekil parametresi hata oranının trendini belirlemektedir. Şekil parametresinin birden küçük olması azalan hata oranını, bire eşit olması sabit hata oranını (üstel dağılım), birden büyük olması ise artan hata oranını göstermektedir. Tüm bu açıklamalar ışığında ürünün ömür devri boyunca geçeceği hata oranı trendlerinin hepsini kapsayan üçgensel bir dağılım seçilmiştir.

$$\beta \sim \text{Üçgensel}(0.5,1,2) \quad (6)$$

2. Ölçek Parametresi ( $\alpha$ ): Ölçek parametresinin tahmin edilmesi şekil parametresine göre çok daha zordur. Bu sebeple öncül bilginin modele eklenmesi de zorlaşmaktadır. Literatürde daha önce kullanılan [23] ve SARP modelinde MTBF<sub>t</sub> değeri olarak yorumlanabilecek olan uzman görüşünün Weibull dağılımının medyan değerine tekabül ettiği yaklaşımdan istifade edilmiştir. Denklem (7)'de yer alan  $t_m$  değeri Weibull dağılımının medyan noktasına denk gelmektedir.

$$\alpha = \frac{(\ln 2)^{\frac{1}{\beta}}}{t_m} \quad (7)$$

### 3.3. Hata Verileri

Gerçek hata verileri ve planlı bakım verileri modele en son eklenen verilerdir. Her bir hata/planlı bakım verisi modele kanıt olarak girilmekte ve hata süresinin Denklem (8)'de yer aldığı şekilde Weibull dağılımına uyduğu varsayımı doğrultusunda Weibull parametrelerinin tahmini güncellenmektedir.

$$Hata_i \sim \text{Weibull}(\alpha, \beta) \quad (8)$$

Yapılan planlı bakım faaliyeti sonucunda daha sonra gerçekleşebilecek olan bir hatanın önüne geçildiği varsayımıyla planlı bakım verileri sağ sansürlü veri olarak modele dahil edilmiştir. AgenaRisk yazılımında sansürlü verilerin de modele eklenmesi Denklem (9)'daki gibi kolaylıkla yapılabilmektedir.

$$\text{EĞER}(Hata \text{ Süresi} > Sansür \text{ Süresi}; DOĞRU; YANLIŞ) \quad (9)$$

### 3.4. Tahmin Düşümü

'Tahmin Edilen Hata' düşümü, hesaplanan Weibull parametreleri doğrultusunda ilgili bileşenin hatalar arası süre dağılımının Denklem (10) doğrultusunda tahmin edildiği düşümdür.

$$Tahmin \ Edilen \ Hata \sim \text{Weibull}(\alpha, \beta) \quad (10)$$

#### 4. VAKA ÇALIŞMASI

Önerilen modelin doğrulaması için gerçek bir vaka çalışması gerçekleştirilmiştir. Bir hava aracı filosu için kayıtlı hata ve planlı bakım sürelerine ilişkin kayıtlar incelenmiş ve hatalar arası sürelerin tahmini gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sınırlandırılması maksadıyla hava aracı dört adet alt sisteme (AS) bölünmüş (gövde, itki vb.) ve bu seviyede analizler gerçekleştirilmiştir. R yazılımının<sup>2</sup> ‘fitdistrplus’ paketi ile öncelikle verilerin dağılımının EBOK sonucu hesaplanmış ve Weibull dağılımına uyduğu doğrulanmıştır. Daha sonra SARP modelinden elde edilen tahminin performansı 5-katlamalı çapraz değerlendirme yöntemi ile veri güdümlü parametrik yaklaşımlardan en sık kullanılan EBOK yaklaşımı ile karşılaştırılmıştır. 5-katlamalı çapraz değerlendirme yönteminde kullanım saati esas alınarak veriler beş adet yaklaşık olarak eşit kullanım saati içeren gruplara bölünmüş ve her bir katta tahmin edilen değerler bir sonraki katta yer alan gerçek veriler ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmanın yapılabilmesi için Ortalama Hataların Karesi (OHK) metriği kullanılmıştır. OHK formülü Denklem (11)’de paylaşılmıştır:

$$OHK = \frac{\sum_i^n (O_i - E_i)^2}{n} \quad (11)$$

Burada  $n$  hata verisi adedini,  $O_i$ :  $i$ . hatanın gözlemlenen süresini,  $E_i$ :  $i$ . hatanın beklenen (tahmin edilen) süresini temsil etmektedir. Yapılan OHK hesaplamaları sonucunda elde edilen özet sonuç Tablo 1’de yer almaktadır.

**Tablo 1.** OHK sonuçları özeti

	AS <sub>1</sub>	AS <sub>2</sub>	AS <sub>3</sub>	AS <sub>4</sub>
<b>Gözlem Adedi</b>	128	43	90	50
<b>SARP</b>	542	4936	785	3282
<b>EBOK</b>	517	5219	807	3786

SARP Modeli AS<sub>2</sub>, AS<sub>3</sub> ve AS<sub>4</sub>’te EBOK’tan daha iyi sonuç vermiştir. Özellikle veri adedinin daha limitli olduğu AS<sub>2</sub> ve AS<sub>4</sub>’te performansı belirgin olarak daha iyidir. Bunun sebebi temel olarak Bayes ağı yapısının öncül bilgiyi sınırlı sayıda veri ile de etkin bir şekilde kullanabilmesidir. AS<sub>1</sub>’de ise SARP Modelinin performansı nispeten düşüktür. Burada Bayes ağına öncül bilgi olarak dahil olan MTBF<sub>t</sub> değerinin oldukça isabetsiz olması yatmaktadır. Buna rağmen SARP Modeli, oluşan hata verileri

<sup>2</sup> R, CRAN tarafından geliştirilmiş açık kaynak kodlu bir yazılımdır.



doğrultusunda sonuca düzeltme vermek suretiyle uzman görüşünden daha iyi bir sonuç vermiştir. Öte yandan, veri adedi arttıkça veri güdümlü parametrik yöntemler da SARP Modeli ile yakın sonuçlara yakınsamaktadır. Bu da SARP Modelinin özellikle veri adedinin az olduğu durumlarda kullanılmasının daha etkin bir sonuç verdiğini göstermektedir.

## 5. SONUÇ

Savunma alanında ürün teknik şartnamelerine sıklıkla MTBF metriğine ilişkin hedefler konmaktadır. Ancak MTBF metriğinin kullanımı, nokta değer olması sebebiyle gerçek anlamda beklenen faydayı sağlamamaktadır. Bu sebeple öncelikle teknik şartnamelerde MTBF metriği yerine ürünün güvenilirliğine ilişkin daha detaylı verilerin talep edilmesinde fayda olduğu değerlendirilmektedir.

Bununla beraber, tedarikçi tarafından hesaplanan MTBF değerini, tedarikçi firmanın üretim ve tasarım kapasitesine ilişkin uzman görüşü ve sınırlı sayıda hata verisini birleştirerek daha somut ve daha isabetli sonuçlar elde etmek üzere Bayes ağı yapısını esas alan bir model önerilmiştir. Model kurgulanırken özellikle kullanıcının geri planda ileri seviyede matematik ve istatistik bilgisine sahip olmayabileceği de varsayılarak kullanım açısından kolay bir model oluşturulması hedeflenmiştir. SARP Modeli ile hatalar arası süre dağılımı diğer yaklaşımlara nazaran daha düşük hata ile tahmin edilebilmekte, tedarikçi tarafından sağlanan metrikler ile gerçek hata verileri kombine edilerek hatalar arası sürenin bilinmezliği modellenmekte ve aynı zamanda modelin tanısız çıkarım yapması sağlanarak öngörünün olmadığı durumda tedarikçinin tasarım ve üretim kalitesi de değerlendirilebilmektedir. Modelin, ilerleyen dönemde, hata oranının zamanla değişimini de kapsayacak ve kullanıcı tarafından hata trendinin kronolojik şekilde gözlemlenebileceği Dinamik Bayes Ağı modeline dönüştürülmesi ve model için kullanıcı dostu bir ara yüz geliştirilmesi planlanmaktadır.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] Schenkelberg, F. (2013), The Perils of MTBF, *Asset Management and Maintenance Journal*, 26(4), 32-34.
- [2] US Department of Defense (1991), MIL-HDBK-217F: Reliability Prediction of Electronic Equipment, Washington DC, ABD.
- [3] Bayes, M. ve Price, M. (1763), An Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 53, 370-418.
- [4] Jensen, F. V. ve Nielsen, T. D. (2007), Bayesian Networks and Decision Graphs, Springer: New York, ABD.
- [5] Blischke, W. R. ve Murthy, D. N. P. (2003), Case studies in reliability and maintenance, Wiley: Hoboken, New Jersey, ABD.
- [6] Hamada, M. S., Wilson, A. G., Reese, C. S. ve Martz, H. F. (2008), Bayesian Reliability, Springer: New York, ABD.

- [7] Soland, R. M. (1969), Bayesian Analysis of the Weibull Process with Unknown Scale and Shape Parameters, *IEEE Transactions on Reliability*, R-18(4), 181-184.
- [8] Erto, P. (1982), New Practical Bayes Estimators for the 2-Parameter Weibull Distribution, *IEEE Transactions on Reliability*, R-31(2), 194-197.
- [9] Banerjee, A. ve Kundu, D. (2008), Inference based on type-II hybrid censored data from a Weibull distribution, *IEEE Transactions on Reliability*, 57(2), 369–378.
- [10] Erto, P. ve Giorgio, M. (2013), A note on using Bayes priors for Weibull distribution, çevrimiçi: [https://www.researchgate.net/publication/258105964\\_A\\_note\\_on\\_using\\_Bayes\\_priors\\_for\\_Weibull\\_distribution](https://www.researchgate.net/publication/258105964_A_note_on_using_Bayes_priors_for_Weibull_distribution).
- [11] Khakzad, N., Khan, F. ve Amyotte P. (2011), Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches, *Reliability Engineering and System Safety*, 96(8), 925-932.
- [12] Langseth, H. ve Portinale, L. (2007), Bayesian networks in reliability, *Reliability Engineering and System Safety*, 92(1), 92-108.
- [13] Marsh, D. W. R. ve Bearfield, G.(2008), Generalizing event trees using Bayesian networks, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 222(2), 105-114.
- [14] Torres-Toledano, L. E. ve Sucar, J.G. (1998), Bayesian Networks for Reliability Analysis of Complex Systems, *Lecture Notes in Computer Science*, 1484, 195-206.
- [15] Reese, C. S., Wilson, A. G., Guo, J., Hamada, M. S. ve Johnson V. E. (2011), “A Bayesian Model for Integrating Multiple Sources of Lifetime Information in System-Reliability Assessments,” *Journal of Quality Technology*, 43 (2), 127–141.
- [16] Marquez, D., Neil, M. ve Fenton, N. (2010), Improved reliability modeling using Bayesian networks and dynamic discretization, *Reliability Engineering and System Safety*, 95(4), 412-425.
- [17] Zhang, H. ve Marsh, D. W. R. (2018), Generic Bayesian network models for making maintenance decisions from available data and expert knowledge, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 232(5), 505-523.
- [18] Song, Z., Zhang, Z., Jiang, Y. ve Zhu, J. (2018), “Wind turbine health state monitoring based on a Bayesian data-driven approach,” *Renewable Energy*, 125, 172–181.
- [19] Rebello, S., Yu, H. ve Ma, L. (2018), “An integrated approach for system functional reliability assessment using Dynamic Bayesian Network and Hidden Markov Model,” *Reliability Engineering and System Safety*, 180, 124–135.
- [20] Bouissou, M., Martin, F. ve Ourghanlian, A. (1999), Assessment of a safety-critical system including software: a Bayesian belief network for evidence sources, *Annual Reliability and Maintainability Symposium 1999 Proceedings*, 142–150.
- [21] Sigurdsson, J. H., Walls, L. A. ve Quigley, J. L. (2001), Bayesian belief nets for managing expert judgement and modelling reliability, *Quality and Reliability Engineering International*, 17(3), 181-190.
- [22] Neil, M., Fenton, N., Forey, S. ve Harris, R. (2001), Using Bayesian belief networks to predict the reliability of military vehicles, *Computing & Control Engineering*, 12(1), 11-20.
- [23] Song, M. S. (1988), Reliability Analysis using Weibull Lifetime Data and Expert Opinion, *IEEE Transactions on Reliability*, 37(3), 340-347.

## GÜDÜMSÜZ BİR MÜHİMMATA GÜDÜM YETENEĞİ KAZANDIRILMASI VE MONTE CARLO BENZETİMLERLE SAÇILIM VE HASSASİYET ANALİZİ

Abdullah Alp Muhiddinoğlu <sup>(a,b)</sup>, Koray Yayla <sup>(a,b)</sup>, Ozan Tekinalp <sup>(b)</sup>

<sup>(a)</sup> Roketsan A.Ş., İleri Teknolojiler ve Sistemler Grup Başkanlığı,  
{alp.muhiddinoglu, koray.yayla}@roketsan.com.tr

<sup>(b)</sup> Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü,  
{alp.muhiddinoglu, koray.yayla, tekinalp}@metu.edu.tr

### ÖZ

Bu çalışmada, küçük çapa sahip güdümsüz bir mühimmata güdüm ve kontrol yeteneği kazandırılmış ve bu kazanımın sonucu modelleme ve benzetim analizleri ile incelenmiştir. Benzetim modelinde güdümlü ve güdümsüz mühimmatın fırlatma sistemi olarak çok rotorlu İnsansız Hava Aracı (İHA) tercih edilmiştir. İHA'nın seyir sırasında oluşturacağı aşağıya akış (İng. down-wash) etkisi, rüzgâr ortam modeli ve fırlatma sistemi hataları bozuntu olarak modellenmiştir. Aerodinamik parametreleri çıkartılan mühimmat için, altı serbestlik dereceli uçuş mekaniği modeli hazırlanmıştır. Hazırlanan benzetim ortamında, İHA'nın atış öncesinde nominal yörüngeyi bozuntuları görmezden gelerek üzerinde taşıdığı donanımda hesapladığı ve balistik yörünge bilgisini güdümlü mühimmata aktardığı varsayılmıştır. Güdümlü mühimmatın alınan balistik yörünge verileri ile bozuntu altında, noktasal yörünge (İng. waypoint) navigasyonu yapması planlanmıştır. Belirtilen güdümlü mühimmat ve güdümsüz mühimmatın bozuntular mevcutken Monte Carlo benzetim analizleri yapılmış ve bozuntuların bahse konu dış etkilere karşı duyarlılıkları değerlendirilmiştir. Güdümlü mühimmatın hedefe olan doğruluk oranının güdümsüz mühimmata göre daha iyi olduğu ve bozucu etkilere karşı daha duyarsız olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** güdüm, hassasiyet analizi, modelleme ve benzetim, Monte Carlo analizi, navigasyon, otopilot, uçuş mekaniği

# ADDING GUIDANCE CAPABILITY TO UNGUIDED AMMUNITION AND SCATTERING AND SENSITIVITY ANALYSIS WITH MONTE CARLO SIMULATIONS

## ABSTRACT

In this study, unguided munition with a small diameter is given a guidance and flight control ability. The success of the controlled munition is examined through simulation. In the simulation model, a multi-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) is selected as the launching system of guided and unguided munition. The down-wash effect of UAV during hover, the wind model, and launching errors are modeled as disturbance. For the ammunition whose aerodynamic parameters are obtained, six degrees of freedom flight mechanics model are prepared. In the simulation environment, it is assumed that the UAV calculates the nominal trajectory before the launch while ignoring the disturbance effects and supplies the ballistic trajectory information to the guided munition. Guided munition is planned to perform waypoint navigation under disturbance using the pre-calculated ballistic trajectory data. Monte Carlo simulation analyses are carried out for guided and unguided munitions. Their sensitivities to disturbances are evaluated. It is observed that the accuracy of the guided munition in hitting the target is better than the unguided munition and is more robust against disturbances.

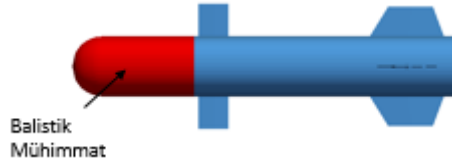
**Keywords:** autopilot, flight mechanics, guidance, modeling and simulation, Monte Carlo analysis, navigation, sensitivity analysis

## 1. GİRİŞ

Günümüz savunma teknoloji çalışmaları büyük bir hızla ilerliyor olsa da, güdümsüz mühimmatlar, hakkındaki bilgi birikimi yanında görece düşük maliyetleri ve kolay kullanım konseptleri nedeniyle yaygınlığını koruduğu gözlemlenmektedir. Diğer yandan vuruş hassasiyetindeki muhtemel düşük başarı nedeniyle güdümsüz mühimmatlara güdüm yeteneği kazandırılması, ya da ortaya çıkan yeni kullanım konseptleri nedeni ile başka bir sisteme entegrasyonun yapılması konusunda çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmada güdümsüz bir mühimmata kontrol tahrik sistemi ve gerekli algılayıcıların takılması ile güdüm yeteneği kazandırıldığı ve yeni mühimmatın insansız bir hava aracından (İHA) atıldığı varsayılmıştır. İHA ile bütünleştirilen güdüm yeteneği kazandırılmış mühimmatın, atış öncesinde İHA bilgisayarında koşacak, bozuntu etkilerinin göz ardı edildiği bir benzetim ile izlemesi gereken koordinat bilgilerini alması planlanmıştır. İHA'dan konsept mühimmata yapılan veri aktarımı sonrasında, İHA'dan atılan mühimmat yörünge üzerinde belirlenen koordinatları takip etmek üzere güdülmüş böylece hedefe ulaşma başarımını arttırmıştır.

Bu sayede modelleme benzetimden faydalanılarak ve düşük maliyetli bir donanım çözümü sunulurken, güdümsüz balistik bir sistemin ortam bozunumlarına karşı gürbüz hale gelebileceği gösterilmiştir.



Şekil 1. Güdümlü Mühimmat için Önerilen Konsept Tasarım

## 2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Dünya genelindeki benzer akademik çalışmalarda, genellikle güdümsüz mühimmatlara, kontrol tahrik sistemi ve arayıcı başlık takılması ile elde edilebilecek başarımlar gösterilmiş ve böyle kurgulanmış bir sistemin güdümü ve kontrolü üzerine çalışmalar yapılmıştır.[1], [2], [3]

Örneğin bir akademik çalışmada, elde taşımaya uygun 40mm çaptaki güdümsüz bir mühimmatın rüzgar, türbülans bozuntularına karşı gürbüz olabilmesi amacıyla ucuz kontrol yeteneği kazandırılıp kazandırılmayacağı incelenmiş ve farklı yenilikçi kontrol tahrik sistemi tasarımı ortaya konmuştur. Çalışmanın son kısmında incelenen tahrik sistemleri arasından seçilen bir tanesi deneysel olarak doğrulanmak üzere hazırlandığı ve sistem gereksinimlerinin analiz edildiği belirtilmektedir. [4]

Fresconi ve Rogers [5] küçük çaplı, dönü ile stabilize edilmiş mermilerin düşük maliyetli bileşenler kullanan güdüm ve kontrol teknikleriyle hedefe ulaşma hassasiyetinin geliştirilmesi amacıyla bir çalışma yapmıştır. Kullanılan güdüm ve kontrol tekniklerinin etkinliğini göstermek amacıyla balistik ve kontrollü uçuş benzetimleri kullanılarak Monte Carlo benzetim analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları güdümlü merminin sadece balistik uçuş yapan mühimmatlara göre hedefe ulaşma ihtimallerinin daha fazla olduğunu göstermiştir.

## 3. YÖNTEM

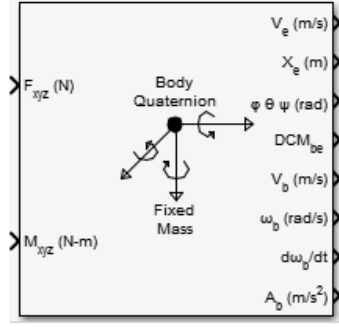
Çalışmanın bu kısmında, benzetim modeli hakkında bilgi verilecek, mühimmatın başlangıç koşul değerleri tanımlanacak, hangi bozucu etkilerin ele alındığı aktarılacak ve sistemin güdüm algoritması özetlenecektir. Yapılan çalışmanın başarımını gösterebilmek amacıyla bozuntusuz ortamda güdümsüz atış, bozuntulu ortamda güdümsüz atış, bozuntusuz ortamda güdümlü atış ve bozuntulu ortamda güdümlü atış

koşumları yapılacaktır. Bu atış tiplerinden bozuntusuz ortamda güdümlü atışın İHA uçuş bilgisayarında koşan bozuntusuz bir benzetim olduğu varsayılacak ve asıl mühimmatın geçmesi gereken noktalar bu koşumdan elde edilecektir.

Çalışma içerisinde konum gösterimleri Kuzey-Doğu-Aşağı (İng. *North-East-Down*, *NED*) eksen takımı ile yapılacaktır. NED eksen takımının merkezi atış noktasında kabul edilen, x-ekseni kuzeyi, y-ekseni doğuyu ve z-ekseni aşağıyı gösteren eksen takımındır. Eksen takımı söz konusu sistemin doğrultusundan ve doğrultu değiştirmesinden bağımsızdır. [11]

### 3.1. Benzetim modeli ve Başlangıç Koşulları

Çalışmada MATLAB/Simulink yazılımı kullanılmıştır. Benzetim modeli ihtiyacı olan uçuş mekaniği modeli için Şekil 2’de gösterilen “Simulink Aerospace Blockset” içerisinde yer alan altı serbestlik dereceli düz dünya varsayımı kullanan “6DOF (Quaternion)” modeli tercih edilmiştir. [6],[7],[8]



**Şekil 2.** MATLAB/SimulinkAltı Serbestlik Dereceli Quaternion Modeli

Benzetim modeli, 300 m irtifada askıda duran çok rotorlu İHA’nın mühimmata 30 m/s hız kazandırması ile başlayacaktır. Mühimmatın atış doğrultusunun kuzeye ve yere paralel olarak gerçekleştiği senaryolar ele alınacaktır. Koşumlar sırasında gerçekleştirilecek atışların başlangıç değerleri Tablo 1’de özetlenmiştir.

**Tablo 1.** Başlangıç Atış Değerleri

NED Eksen Takımına Göre Tanımlı Başlangıç Pozisyonu ( $X_N, X_E, X_D$ ) $_{t=0}$	:	[ 0 0 -300] m
Başlangıç Euler Açılımları ( $\phi, \theta, \psi$ ) $_{t=0}$	:	[ 0 0 0] der
Başlangıç Açısal Hızları ( $p, q, r$ ) $_{t=0}$	:	[0 0 0] der/s

### 3.2. Bozucu Etkiler

İHA'nın seyir sırasında oluşturacağı aşağıya akış (İng. down-wash) etkisi, rüzgâr ortam modeli ve fırlatma sistemi hataları bozuntu olarak modellenmiştir.

#### 3.2.1. Aşağı Akış Etkisi

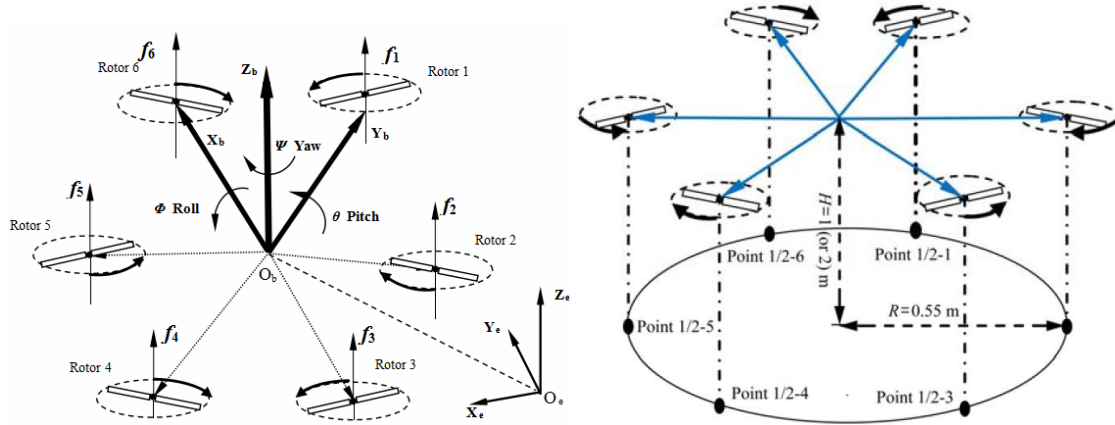
Benzetim modelinde çok rotorlu İHA'nın mühimmata NED eksen takımının z-ekseni yönünde uyguladığı bozucu etkidir. Mühimmat üzerindeki bu bozucu etki, İHA'nın merkezine göre etkili akış çapının aşılması ile sona ermektedir.

Atış sırasında İHA'nın oluşturduğu akış alanının mühimmat üzerindeki etkisini modellemek için deneysel veriler kullanılmıştır [9]. Havada belirli bir noktada duran 6 rotorlu insansız hava aracı (Şekil 3) için yapılan çalışma sonucunda elde edilen aşağı akış hızları Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Aşağı Akış Hız Değerleri [9]

	Rotor 1	Rotor 2	Rotor 3	Rotor 4	Rotor 5	Rotor 6
Aşağı akış hızı [m/s] H = 1 m	8.1	7.8	8.2	8.1	7.9	7.9
Aşağı akış hızı [m/s] H = 2 m	4.5	4.6	4.4	4.5	4.5	4.6

*Not:* H : Verilerin alındığı noktaların araca olan dik uzaklığı



**Şekil 3.** 6 Eksenli İHA Hareket Sistemi ve Aşağı Akış Hız Ölçüm Noktaları [9]

### 3.2.2. Rüzgâr Etkisi

Rüzgâr, benzetimin aerodinamik hesaplamalarında kullanılan hücum açısını ( $\alpha$ ) ve kayma açısını ( $\beta$ ) etkilemektedir. Monte Carlo analizleri sırasında benzetimlere girdi sağlayacak rüzgâr bozucu etki değerleri Tablo 3’de gösterildiği gibi alınmıştır.

**Tablo 3.** Rüzgar Modeli Bozucu Etki Değerleri

Sembol	Tanımı	Birimi	Ortalama ( $\mu$ )	Standart Sapma ( $\sigma$ )
$V_{wind}$	Rüzgâr Hızı	Knot	5	1
$\eta_{wind}$	Rüzgârın NED eksen takımının y-ekseni ile yaptığı açı	Derece	40	30

### 3.2.3. Fırlatma Sistemi Etkisi

Benzetim modelinde mühimmatın tanımlı başlangıç değerlerindeki bozuntu etkisidir. Monte Carlo analizleri sırasında fırlatma sisteminin bozucu etkileri Tablo 4’te belirtildiği şekilde alınmıştır. Fırlatma sistemi bozucu etkileri için kullanılan sayısal değerler, belirtilen çok rotorlu İHA’nın askıda kalma performansı gözetilerek belirlenmiştir.

**Tablo 4.** Fırlatma Sistemi Bozucu Etki Değerleri

Sembol	Tanımı	Birimi	Ortalama ( $\mu$ )	Standart Sapma ( $\sigma$ )
$\phi_{t=0}$	Başlangıç pozisyonundaki yuvarlanma açısı	Derece	0	3
$\theta_{t=0}$	Başlangıç pozisyonundaki yunuslama açısı	Derece	0	3
$\psi_{t=0}$	Başlangıç pozisyonundaki sapma açısı	Derece	0	3
$p_{t=0}$	Başlangıç pozisyonundaki yuvarlanma açısal hızı	Derece/Saniye	0	5
$q_{t=0}$	Başlangıç pozisyonundaki yunuslama açısal hızı	Derece/Saniye	0	5
$r_{t=0}$	Başlangıç pozisyonundaki sapma açısal hızı	Derece/Saniye	0	5

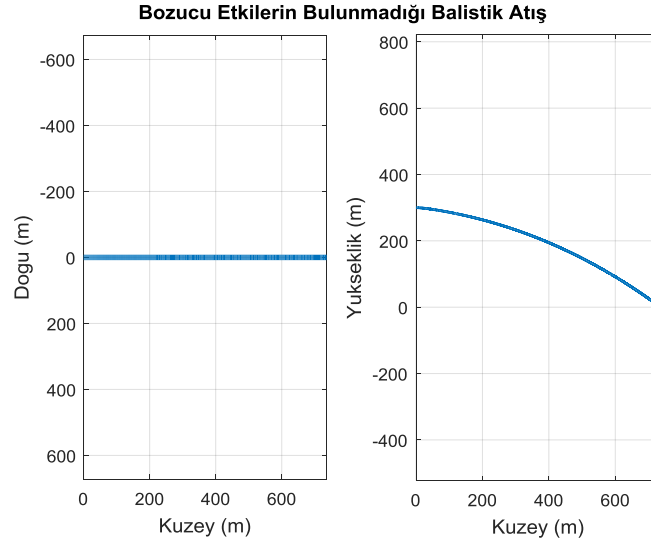


### 3.3. Örnek Benzetim Koşulları

#### 3.3.1. Referans Balistik Atışı

Bu kısımda ortamda herhangi bir bozucu etki olmadan yapılan atış gösterilecektir. Bu atışın İHA uçuş bilgisayarında hesaplanarak bozuntulu ortamda güdümlü atış için referans olması planlanmıştır. Tablo 1’de gösterilen değerler uçuş başlangıç koşulu olarak alınmıştır.

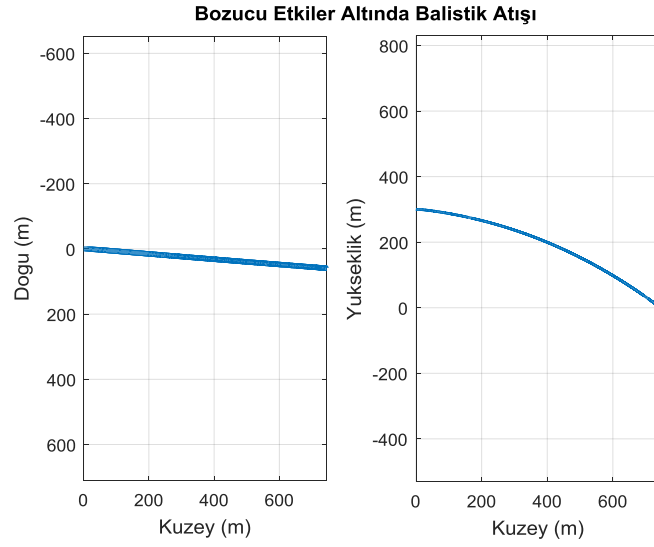
Yapılan balistik atış sonrasında referans hedef noktasının NED eksen takımına göre [736.5 0 0] m konumunda, bozucu etkiler olmadığı takdirde bu noktanın da vurulabilir olduğu görülmüş ve uçuş yörüngesi Şekil 4’te gösterilmiştir.



**Şekil 4.** Uçuş Yörüngesinin 2 Eksenli Gösterimi

#### 3.3.2. Bozucu Etkiler Altında Balistik Atışı

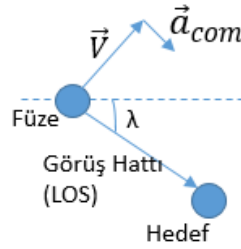
Bu kısımda, bölüm 0’de belirtilen bozucu etkiler altında yapılan balistik atış incelenmiştir. Tablo 1’de gösterilen değerler uçuş başlangıç koşulu olarak alınmıştır. Bozucu etkiler ise bölüm 0’de belirlenen ortalama değerler olarak belirlenmiştir. Yapılan atış sonrasında güdümsüz mühimmatın vuruş noktası NED eksen takımına göre [737.8 104.2 0] m konumudur. Ortalama bozucu etkiler kullanılarak elde edilen uçuş yörüngesi Şekil 5’te gösterilmiştir.



**Şekil 5.** Uçuş Yörüngesinin 2 Eksenli Gösterimi

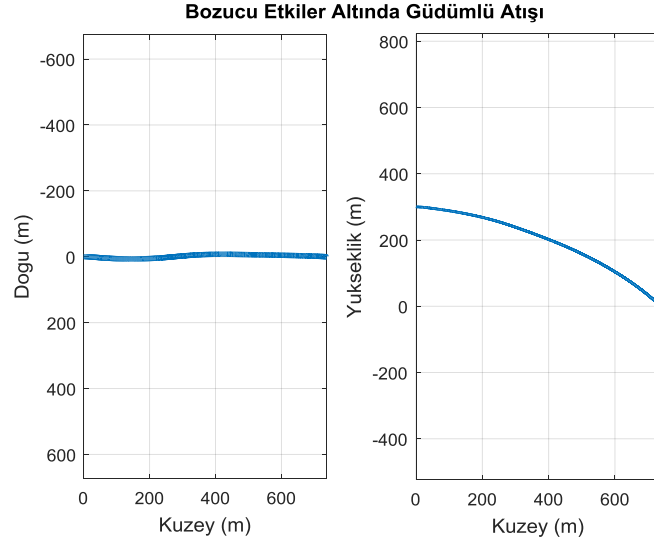
### 3.3.3. Bozucu Etkiler Altında GÜdümlü Atışı

Güdümlü hale getirilen balistik sistemde, (1) de gösterilen Oransal Seyrüsefer GÜdüm kanunu tercih edilmiş [10] ve sistemin bozuntusuz balistik yörünge içerisinde alınan noktaları takip etmesi amacıyla güdümlendirilmiştir. Yapılan atış sonrasında güdüm yeteneği kazandırılmış mühimmatın vuruş noktası NED eksen takımına göre [736.5 0 0] m konumudur.

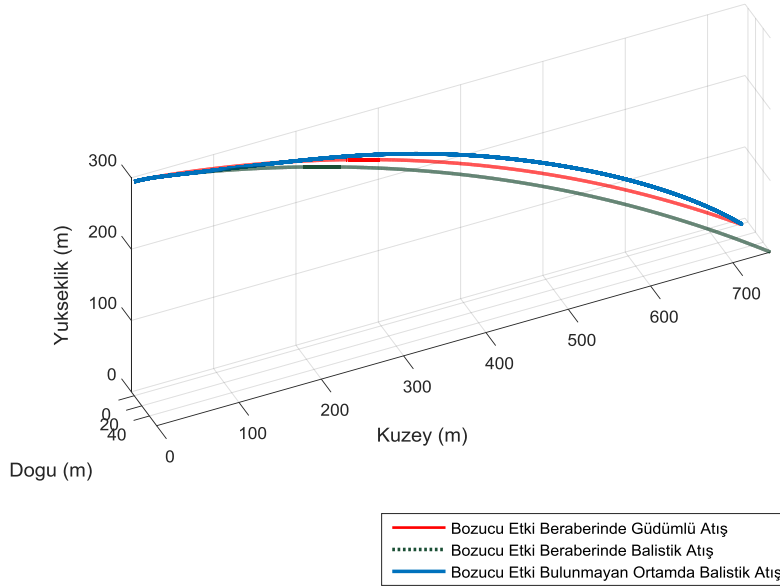


**Şekil 6.** Görüş Hattı Vektörü

$$\vec{a}_{com} = N \cdot \dot{\lambda} \times \vec{V} \quad (1)$$



Şekil 7. Uçuş Yörüngesinin 2 Eksenli Gösterimi



Şekil 8. Üç Farklı Uçuş Konfigürasyonunun Bir Arada Gösterimi

#### 4. BENZETİM ANALİZİ VE SONUÇLAR

Çalışmanın bu kısmında tasarım konseptleri için çeşitli analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonrasında mühimmatın düştüğü noktanın hedef noktaya olan uzaklığına göre, bir başka deĐiŐle kaçırma mesafesine göre tablo oluşturulmuştur. Ayrıca her konsept özeline hassasiyet analizi hazırlanmıştır. Simulink benzetim ortamında yapılan

koşumlarda sabit zaman adımlı birinci dereceden çözücü kullanılmıştır. Benzetim modeli 3000 Hz'de çalıştırılmıştır.

#### 4.1. Monte Carlo Analizi

Çalışmanın bu kısmında güdümlü ve güdümsüz sistem için Monte Carlo analizi yapılmıştır. Analiz değişkenleri bölüm 0'de belirtildiği gibi alınmış güdümlü ve güdümsüz mühimmat konsepti için toplamda 3000 koşumlu Monte Carlo analizi yapılmıştır.

##### 4.1.1. Kaçırma Mesafesi

**Tablo 5.** Kaçırma Mesafesi Tablosu

	Kaçırma Mesafesi < 1m	Kaçırma Mesafesi < 5m
Güdümsüz Sistem	% 0	% 0.5
Güdümlü Sistem	% 68.2	% 99.1

Yapılan analiz sonrasında, güdümlü sistemin başarı oranı incelendiğinde bozucu etkiler altında dahi görevini başarı ile tamamlayabildiği görülmüştür.

##### 4.1.2. Hassasiyet Analizi

Hassasiyet analizi yapmak için korelasyon katsayısı hesaplanmış ve Tablo 6 ve Tablo 7'de sonuçlar sunulmuştur. Korelasyon ile iki veya daha fazla değişken arasındaki bağımlılık ya da bağımsızlık mertebesi incelenir.[12]

$$\rho_{xy} = \frac{V_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2)$$

Korelasyon katsayısının hesaplanması (2)'de gösterilmiştir.  $V_{xy}$ , x ve y rassal değişkenlerinin kovaryansını gösterirken  $\sigma_x$  ve  $\sigma_y$ , x ve y değişkenlerin standart sapma değerlerini ifade etmektedir.[13]

Monte Carlo analizleri sonrasında elde edilen kaçırma mesafesinin girdilere olan hassasiyeti incelenmiştir. Elde edilen çıktılar sonrasında güdümlü sistemin bozucu etkilere karşı daha dayanıklı olduğu görülmüştür.

Örneğin Tablo 6'da yer alan başlangıç pozisyonundaki sapma açısının güdümsüz sistemin başarı oranını kötüleştiren en etkili parametre olduğu görülmektedir. Bu parametrenin bağımlılık değeri güdümsüz sistem için 0.55 mertebesindeyken, güdümlü sistemde (Tablo 7) aynı parametrenin değeri 0.06 mertebesine inmiştir. Mühimmata güdümlü yeteneği kazandırılarak bu parametrenin kaçırma mesafesine olan etkisinin azaldığı görülmüştür.

Benzer olarak verilebilecek bir başka örnek ise rüzgâr hızıdır. GÜDÜMSÜZ sistem hassasiyet analizine göre en etkin üçüncü parametre olan rüzgâr hızı bozucu etkisi, güdümlü sistemin analizi sonrasında kaçırma mesafesine olan etkinliğini kaybettiği görülmüştür.

**Tablo 6.** GÜDÜMSÜZ Sistem Hassasiyet Analizi

	Rüzgar Hızı	Rüzgar Açısı	$\phi_{t=0}$	$\theta_{t=0}$	$\psi_{t=0}$	p	q	r
Kaçırma Mesafesi	0.211089	0.502146	-0.01432	-0.01432	0.549356	0.008999	-0.02357	0.018255

**Tablo 7.** GÜDÜMLÜ Sistem Hassasiyet Analizi

	Rüzgar Hızı	Rüzgar Açısı	$\phi_{t=0}$	$\theta_{t=0}$	$\psi_{t=0}$	p	q	r
Kaçırma Mesafesi	-0.01389	0.231784	0.041777	0.041777	0.060211	0.016387	0.012076	-0.02489

GÜDÜMSÜZ sistemde kaçırma mesafesi,  $\theta_{t=0}$ ,  $\psi_{t=0}$  ve rüzgâr hızına oldukça bağımlıdır. Ancak, önerilen güdümlü sistem sayesinde, kaçırma mesafesinin, belirtilen bozucu etkenlere olan hassasiyeti büyük ölçüde azaltılmıştır.

## 5. SONUÇ

Bu bildiriye güdümsüz balistik bir sisteme, önerilen konsept bir tasarım ile, güdüm yeteneği kazandırılmıştır. Önerilen tasarımın, güdümsüz sisteme göre bağıl başarımını gösterebilmek amacıyla, 6 serbestlik dereceli bir benzetim ortamı oluşturulmuştur. Benzetimlerde, bildiriye belirtilen bozucu etkiler altında, güdümlü ve güdümsüz sistem için birçok koşum yapılmıştır. Koşumlar sonrasında, tahmin edilebileceği üzere, güdüm yeteneği kazandırılmış sistemin, güdümsüz sisteme kıyasla, oldukça başarılı olduğu görülmüştür. İleride güdümsüz bir mühimmat sistemi için yenilikçi kontrol tahrik sistemi, yenilikçi güdüm kontrol algoritmaları ve görev planlamaları özelinde çalışmaların yapılması ile teorik tasarımların geliştirilmesi planlanmaktadır.

## 6. TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya olan değerli katkıları ve görüşleri için Dr. Özgür ATEŞOĞLU'na teşekkür ederiz.

## 7. KAYNAKÇA

- [1] McCoy, Robert L. (2012). *Modern Exterior Ballistics the Launch and Flight Dynamics of Symmetric Projectiles*. Schiffer Publ.
- [2] Wang, Y., Song, W., Fang, D., & Guo, Q. (2015). Guidance and Control Design for a Class of Spin-Stabilized Projectiles with a Two-Dimensional Trajectory Correction Fuze. *International Journal of Aerospace Engineering*. 2015, 1-15. doi:10.1155/2015/908304
- [3] Muhiddinoglu, A., Yayla, K. & Tekinalp, O. (2019). Scatter and sensitivity analysis of a projectile modeled under magnus effect. *10<sup>th</sup> Ankara International Aerospace Conference*
- [4] Celmins, I., Fresconi, F. E., & Nelson, B. P. (2014). Actuator characterization of a man-portable precision maneuver concept. *Defence Technology*, 10(2), 141-148. doi:10.1016/j.dt.2014.03.
- [5] Fresconi, F. & Rogers, J. Guidance and Control of a Man-Portable Precision Munition Concept; ARL-TR-6966; U.S. Army Research Laboratory: Aberdeen Proving Ground, MD, June 2014.
- [6] Stevens, B. L. & Lewis F. L. (2003). *Aircraft Control and Simulation*, Second Edition, John Wiley & Sons.
- [7] Zipfel, P. H. (2007). *Modeling and Simulation of Aerospace Vehicle Dynamics*. Second Edition, AIAA Education Series,
- [8] MATLAB and Aerospace Toolbox Release 2015b, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
- [9] Yang F B, Xue X Y, Zhang L, Sun Z. *Numerical simulation and experimental verification on downwash air flow of six-rotor agricultural unmanned aerial vehicle in hover*. Int J Agric & Biol Eng, 2017; 10(4): 41–53.
- [10] Zarchan, P. (2012). *Tactical and strategic missile guidance*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [11] Tewari, A. (2007). *Atmospheric and Space Flight Dynamics: Modelling and Simulation with MATLAB and Simulink*. Boston: Birkhauser.
- [12] Kendall, M.G. (1979). *The Advanced Theory of Statistics*, 4th Ed., Macmillan.
- [13] Cowan, G. (1998). *Statistical Data Analysis*. Oxford University Press.

## YAKIN HAVA SAVUNMA SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR OTOMATİK HEDEF TESPİT ALGORİTMASI

Ahmet GÜNGÖR PAKFILİZ <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Başkent Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,  
apakfiliz@baskent.edu.tr

### ÖZ

Elektro-optik (EO) güdümlü yakın hava savunma sistemleri hedef takibine başlamak için öncelikle tespiti gerçekleştirmesi gerekmektedir. Ancak yerden havaya EO güdümlü sistemlerde hedef tespiti ve iz başlatılması uygulamanın doğası gereği genellikle operatör kararı ile gerçekleştirilmekte, otomatik olmamaktadır. Bunun sebebi hedef tespiti için kullanılan standart görüntü işleme metotları olan; çerçeve farkı, arka fon eliminasyonu ve optik akış algoritmalarının bu tip uygulamalara değişik açılardan uygun olmamasıdır. Bu uyumsuzluklar; oldukça fazla gürültü oluşması, gerçek zamanlı olmaması ve arka fonun sürekli değişmesi olarak sayılabilir.

Bu çalışmada yerden havaya gerçek zamanlı tespit ve takip amaçlı kullanılacak ölçüm verilerinin elde edilmesi için bir algoritma geliştirilmiştir. Algoritma hedefin arka fondan ayrıştırılması ve arka fondaki aydınlık farklarının azaltılması amacıyla dalgacık tabanlı dinamik menzil azaltılması işlemlerinden oluşmaktadır. Söz konusu algoritma gerçek video verileri için simülasyon ortamında denenmiş ve elde edilen sonuçlar, standart olarak kullanılan hedef tespit metotlarından aynı durumlar için elde edilmiş sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta önerilen algoritmanın standart algoritmalara karşı olan üstünlüğü gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Dalgacık dönüşümü, video hedef tespiti, yerden havaya sistemler.

### A NOVEL AUTOMATIC TARGET DETECTION ALGORITHM FOR SHORT RANGE AIR DEFENSE SYSTEMS

#### ABSTRACT

Electro-optics (EO) guided short range air defense systems must perform the detection first to initiate target tracking. However, target detection and track initiation for surface-to-air EO-guided systems are usually carried out by the operator's decision due to the nature of the application and are not automatic. This is due to the standard image processing methods used for target detection; frame difference, background elimination

and optical flow algorithms are not suitable for these applications in different ways. These discrepancies can be listed as; lots of clutter, not proper for real-time applications, and continuous changes in background.

In this study, an algorithm has been developed to obtain measurement data for real-time detection and tracking in surface to air applications. The algorithm consists of target discrimination from background, and wavelet based dynamic range compression for reducing brightness level difference. The algorithm has been tested in the simulation environment for the actual video data and the results have been compared with the results obtained from the standard detection methods used in the same situations. As a result, the superiority of the proposed algorithm over standard algorithms has been observed.

**Keywords:** Surface to air systems, video target detection, Wavelet transform.

## 1. GİRİŞ

Orta ve uzun mesafede radar güdümlü yerden havaya sistemler uçan nesnelerin tespiti için oldukça etkin olmakla birlikte, yakın hava savunma sistemleri için bazı dezavantajları ortaya çıkar. Bu dezavantajların ilki, özellikle darbeli radarların verici olarak çalıştığı sürede tespit gerçekleştiremediği bir alan olmasıdır. Bu alan radarın merkezde olduğu bir çember alanını ifade eder. Radarların kısa mesafedeki bir diğer dezavantajı ise yakın mesafede savunma sistemlerinin hızlı bir karar verme süreci gerçekleştirmesi, bunun için yeterli detayda bilginin sağlanması ihtiyacı ile ilgilidir. Yüksek çözünürlüklü özel radarlar hariç, radarlar ölçümlerini nokta veriler şeklinde gösterir. Bunun sonucu olarak radarda nesne tespiti yapılmakla birlikte, nesnenin tam olarak ne tür bir cisim olduğu tespit edilememektedir.

Bu durumda elektro-optik sistemlerin yakın hava savunması için önemli bir tespit unsuru olarak karşımıza çıkar. Elektro-optik sistemler gün ışığında video verisi, gece görüş sistemlerinde ise Kızıl Ötesi (IR) video verisi olarak elde edilir. Bu çalışmada gün ışığında alınan video verisi üzerinde durulacaktır. Elektro-optik sistemler pasif oldukları için yakından tespit ile ilgili bir kısıtları yoktur. Diğer taraftan uçan nesnenin tipi belli olduğu için karar verme süreci hızlı olarak gerçekleşir. Ancak ham video verisi ile hedef tespiti için operatör kararı gereklidir, bir diğer ifade ile tespit otomatik değil manueeldir.

Ham video verisini işleyerek otomatik hedef tespiti için kullanılan metotlar; çerçeve farkı (ÇF), arka fon eliminasyonu (AE) ve optik akış (OA)'tır [1]. ÇF [2] metodu birbirini takip eden çerçevelerin farkının alınması ile hedef tespitini hedefler. Bu metot basit bir yapıya sahip olup, gerçek zamanlı ve dinamik ışık değişimleri için adaptif bir yaklaşım sunar. Bu yönleri ile uçan nesnelerin tespitinde oldukça kullanışlı bir metot olarak karşımıza çıkar. Ancak arka fonda bulunan hareketlerin ve kamera hareketlerinin



parazit yankı oluşturması bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca hızlı hareket eden nesnelere ve örnek alma periyodunun artması hareket eden nesnenin hayalet bölge olarak isimlendirilen bir gölge oluşturmasına sebep olur [3]. AE metodunda arka fon modellenir ve video verisinin akışında sıralı çerçeveler modellenen referans arka fon çerçevesi ile karşılaştırılır [4]. AE kullanışı kolay ve gerçek zamanlı bir metottur. Arka fonun modellenmesi algoritmanın temelini oluşturur ve arka fon modelinin adaptif hale getirilmesi için tekrarlamasız ve tekrarlamalı teknikler kullanılır [5]. Ancak ışık şiddetlerinin ve arka fonun sürekli değiştiği, kameranın sürekli hareketli olduğu yerden havaya tespit uygulamaları için bu metod yetersiz kalmaktadır. Hareketli nesnelere tespitinde kullanılan bir diğer yöntem ise OA metodudur. OA ilk defa Horn ve Schunck [6] ile Lucas ve Kanade [7] tarafından sunulmuştur. Hareket eden nesnelere ilgili ön bilgi gerektirmeyen ve hareketli kamera ile kullanılacak bir metod sunar. Ancak OA karmaşık bir yapıya sahip olup, gerçek zamanlı olarak uygulanamamaktadır ve gürültüden oldukça çok etkilenir. Bu dezavantajları ortadan kaldırabilmek için bazı çalışmalar yapılmaktadır [8, 9].

Yerden havaya sistemlerde uçan nesnelere otomatik olarak tespiti için bir başka metod ise gökyüzünün parlaklığının ve uçan nesnelere gökyüzü arka fona göre mat yapısının kullanılmasıdır [10]. Bu metod *Dalgacık Temelli Görüntü İyileştirme-Ters piksel yoğunluğunun Sobel Eşiği* (DTGİ-TSE) olarak isimlendirilmiştir. DTGİ-TSE birbirini takip eden çerçevelere karşılaştırma için kullanmaz, hedef ile ilgili ön bilgiye gerek duyulmaz. Bu metotta tespit gerçek zamanlı olarak sağlanmakta, kameranın hareketli olması tespiti etkilememektedir. Ayrıca arka fondaki hareketli cisimlerden gelen gürültü büyük ölçüde elimine edilmekte, ışık farklılıklarından gelen gürültü bastırılmakta, tespit edilen nesnenin fiziksel şekli büyük ölçüde korunmaktadır.

Bu çalışmada yerden havaya sistemlerde kullanılacak bir metod olan DTGİ-TSE'nin otomatik tespit performansının simülasyonu MATLAB ortamında gerçek video ölçümleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca aynı ölçüm verileri için standart tespit metodlarından çerçeve farkı ve optik akış algoritmalarının simülasyonu gerçekleştirilmiş ve elde edilen performanslar DTGİ-TSE'nin performansı ile karşılaştırılmıştır.

## 2. DTGİ-TSE ALGORİTMASI

Bu teknik iki ana alt süreçten oluşmaktadır [10]. Bunlar; DTGİ ve TSE süreçleridir. Bu süreçler ayrı başlıklar altında aşağıda sunulmuştur.

### 2.1. DTGİ süreci

Algoritmada DTGİ süreci arka fondaki parlak ve karanlık bölgelerden dolayı oluşan gürültünün azaltılması için kullanılır. Bu süreçte ayrık dalgacık dönüşümü (ADD) ile dinamik menzilin bastırılması (DMB) hedeflenir. DTGİ sürecinde izlenen adımlar;

ADD ve normalizasyon, DMB ve denormalizasyon (normalizasyonun kaldırılması), kontrast iyileştirme ve ters ADD ile renk restorasyonudur [11]. Öncelikle RGB (Kırmızı-Yeşil-Mavi) formatındaki video çerçeveleri gri formata çevrilir [12],

$$I(m, n) = 0.299 R(m, n) + 0.587 G(m, n) + 0.114 B(m, n) \quad (1)$$

bu eşitlikte  $R(m, n)$ ,  $G(m, n)$  ve  $B(m, n)$  çerçevedeki her bir pikselin kırmızı, yeşil ve mavi renklerinin değerlerini ifade etmektedir. Gri formatta elde edilen çerçeveye DTGİ algoritması uygulanır. DTGİ sürecinin başlangıcında ADD için Haar dalgacığı kullanılır. ADD girişteki gri çerçeveyi dört alt çözünürlük katsayısına ayırır. Bunlar; yaklaşım, yatay, dikey ve diyagonal detay katsayıları olup, aşağıdaki gibi elde edilir.

$$I(m, n) = \sum_{k, l \in \mathbf{Z}} A_{j_0, k, l} \Phi_{j_0, k, l}(m, n) + \sum_{i=h, d, v} \sum_{j \geq j_0} \sum_{k, l \in \mathbf{Z}} D_{j, k, l}^i \Psi_{j, k, l}^i(m, n) \quad (2)$$

Bu eşitlikte  $A_{j_0, k, l}$   $j_0$  başlangıç skalasındaki yaklaşım katsayılarını,  $\Phi_{j_0, k, l}$  ise bununla bağlantılı ölçeklendirme fonksiyonlarını ifade eder.  $D_{j, k, l}^i$ ,  $j \geq j_0$  skalasındaki dikey, yatay ve diyagonal detay katsayıları olup,  $\Psi_{j, k, l}^i(m, n)$  ise bu katsayılarla bağlantılı dalgacık fonksiyonlarıdır. Burada  $k$  ve  $l$  tamsayıları tüm çerçevedeki piksellerin taranmasında kullanılan boyutsal kaydırma farkıdır. Normalize yaklaşım katsayıları ise,

$$A_{norm}(m, n) = \frac{A_{j_0, k, l}(m, n)}{255} \quad (3)$$

Giriş çıkış parlaklık değerlerinin doğrusal olarak kullanılması durumunda, çerçevenin doğrudan görüntüsünden farklı bir görsel elde edilemez. Arka fonun parlaklık farklılıklarının, bir başka ifade ile DM'nin küçültülerek arka fon gürültüsünün azaltılması için görüntünün histogramından elde edilen bilgi kapsamında doğrusal olmayan bir dönüşüm kullanılır. Bu amaçla çerçevelerin gri formattaki histogramları dört bölgeye ayrıştırılır:  $r_1=0-63$ ,  $r_2=64-127$ ,  $r_3=128-191$  ve  $r_4=192-225$ . Bu durumda normalize yaklaşım katsayıları ( $A_{norm}$ ), aşağıdaki şekilde DMB katsayılarına ( $A_{norm}^{DMB}$ ) dönüştürülür,

$$A_{norm}^{DMB} = \begin{cases} (A_{norm})^x + \alpha, & 0 < x < 1 \\ (0.5 + (0.5 \times A_{norm})^x) + \alpha, & x \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

Bu eşitlikte  $x$  eşleştirme kuvveti olup,  $0 < x < 1$  aralığında seçilmesi karanlık bölgelerdeki detayları kuvvetlendirir,  $x \geq 1$  olarak seçilmesi ise aşırı parlaklıkları bastırır. Bu çalışmada  $x$ 'in amacı bulut kenarlarındaki parlaklık seviyesinin bastırılması olup, değeri 1'den küçük seçilmektedir. Sonuçta DMB gerçekleştirilirken parlak kısımların bir seviyeye kadar baskılanması, karanlık kısımların detaylarının artırılması, yüksek parlaklık geçişlerini yok edilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca (4)'te  $\alpha$  video çerçevesinin parlaklığının ayarlanması için kullanılan dengeleme parametresi olup, bu çalışmada "0" olarak alınmıştır. Sonuçta  $x$  değerleri ampirik olarak aşağıdaki gibi elde edilir;

$$x = \begin{cases} 0.1 \rightarrow [(f(r_1) + f(r_2)) \geq (f(r_3) + f(r_4))] \wedge [f(r_1) \geq f(r_2)], \\ 0.4 \rightarrow [(f(r_1) + f(r_2)) \geq (f(r_3) + f(r_4))] \wedge [f(r_1) < f(r_2)], \\ 0.9 \rightarrow [(f(r_1) + f(r_2)) < (f(r_3) + f(r_4))] \wedge [f(r_3) \geq f(r_4)], \\ 0.5 \rightarrow [(f(r_1) + f(r_2)) < (f(r_3) + f(r_4))] \wedge [f(r_3) < f(r_4)], \end{cases} \quad (5)$$

Bu eşitlikte  $f(r_i)$ ,  $(r_i)$  değerleri arasında değer alan piksel sayısını,  $\wedge$  ise mantıksal “VE” operatörünü ifade etmektedir. Bu dönüşüm sonucu elde edilen normalize  $A_{norm}^{DMB}$  katsayıları, aşağıdaki şekilde denormalizasyon katsayılarına dönüştürülür.

$$A_{dn}^{DMB}(m, n) = 255 \times A_{norm}^{DMB}(m, n) \quad (6)$$

Sürecin bu aşamasında kontrast iyileştirme işlemi gerçekleştirilir. Bu amaçla elde edilen denormalizasyon katsayı  $A_{dn}^{DMB}$  değerleri iyileştirilmiş katsayıya dönüştürülür,

$$A_i(m, n) = (A_{dn}^{DMB}(m, n))^{E(m, n)} \quad (7)$$

Eşitlik (7)’de  $E(m, n)$  ve  $A_{filt}(m, n)$  ifadeleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır,

$$E(m, n) = \left( \frac{A_{filt}(m, n)}{A_{dn}^{DMB}(m, n)} \right)^S, \quad A_{filt}(m, n) = A_{dn}^{DMB}(m, n) * G(m, n) \quad (8)$$

Burada “\*” konvolüsyon operatörü,  $G(m, n) = \mathcal{K} \exp\left(-\frac{(m^2 + n^2)}{2\sigma_s^2}\right)$  olarak tanımlanan Gauss Kerneldir [13]. Burada  $\mathcal{K}$  kombinasyon katsayısı,  $\sigma_s$  Gauss kernelin standart sapmasıdır.  $S$  ise aşağıdaki gibi tanımlanan adaptif iyileştirme parametresidir,

$$S = \begin{cases} 3 & \rightarrow \sigma \leq 7 \\ 1.5 & \rightarrow 7 < \sigma < 20 \\ 1 & \rightarrow \sigma \geq 20 \end{cases} \quad (9)$$

Bu noktada ADD’nün başlangıcında elde edilen yaklaşım katsayıları  $A_{j_0, k, l}$  iyileştirilmiş katsayılarla  $A_i(m, n)$  değiştirilir. Ters ADD işleminden önce detay katsayılarında benzer şekilde değiştirilir. Bu amaçla detay katsayılar iyileştirilmiş ve orijinal yaklaşım katsayıları kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir;

$$D_{yeni}^i(m, n) = \frac{A_i(m, n)}{A(m, n)} D^i(m, n) \quad (i = y, d, diag) \quad (10)$$

İyileştirilmiş yaklaşım katsayıları ve modifiye edilmiş detay katsayıları bulunduğundan sonra iyileştirilmiş gri skalalı görüntüsü, bu katsayıların ters ADD alınarak elde edilir;

$$I_i(m, n) = \sum_{k, l \in \mathbf{Z}} (A_i)_{j_0, k, l} \Phi_{j_0, k, l}(m, n) + \sum_{i=h, d, v} \sum_{j \geq j_0} \sum_{k, l \in \mathbf{Z}} (D_{yeni}^i)_{j, k, l} \Psi_{j, k, l}^i(m, n) \quad (11)$$

DTGİ sürecinin son adımında renk restorasyonu gerçekleştirilir. Matematiksel olarak RGB resimler için renk restorasyonu aşağıdaki gibi ifade edilir,

$$S_j(m, n) = I_i(m, n) \frac{I_j(m, n)}{I(m, n)} \lambda_j \rightarrow j = r, g, b \quad (12)$$

Bu eşitlikte  $S_j$ , iyileştirilmiş resmin RGB değerleri,  $\lambda_j$  ise renk tonu ayar parametreleri olup, bu çalışmada RGB için eşit seçilmiş olup 0.9 olarak alınmıştır. Renk restorasyonu sonucunda gri skalalı çerçeve aşağıdaki şekilde elde edilir,

$$S(m, n) = \frac{S_r(m, n) + S_g(m, n) + S_b(m, n)}{3} \quad (13)$$

## 2.2. TSE süreci

Bu kısımda DTGİ uygulanmış video çerçevesine TSE (Ters piksel yoğunluğunun Sobel Eşiği) uygulanır. Bu adıma kadar uygulanan DTGİ süreci ile orijinal RGB video çerçevelerinin karanlık kısımlarındaki detayları arttırılmış, parlak bölgelerde aşırı bir baskılama yapılmamış, böylece dinamik menzil bir seviyeye kadar azaltılmıştır. Parlak kısımlarda baskılamanın az olmasının sebebi, halen parlak olan kısımların algoritmanın bu aşamasında elimine edilecek olmasıdır. Bu adımda DTGİ süreci sonunda elde edilen gri skalalı (genlik) çerçevenin ters piksel yoğunluğu (TPY) aşağıdaki gibi elde edilir;

$$I_T(m, n) = 255 \times \frac{1}{S(m, n)} \quad (14)$$

TPY verisinin kullanılmasıyla yüksek genlikli piksellerin genlik değerleri çok küçülürken, düşük genlikli piksellerin genlik değerleri çok yükselir. Sonuçta gökyüzü ve bulutlardan oluşan parlak arka fonun olduğu piksel genlikleri küçülür, arka fona göre daha koyu tonlarda olan hava araçlarının bulunduğu pikseller ile DTGİ işlemine rağmen bulutların koyu kalan kısımların ise genlik seviyesi yükselir. Böylece yerden havaya nesne tespiti için gerekli olan ortam hazırlanmış olur. Oluşan parazit yankıların azaltılması ve hedefin belirginliğinin arttırılması için Sobel kenar tespit operatörü [14] kullanılır. 3x3'lük komşuluk için merkez noktasının gradyan değeri, ortogonal vektör çiftlerinin vektör toplamları olarak bulunur. Her ortogonal vektör yönsel türev değeri ile türev yönünü belirleyen birim vektörün çarpımından elde edilir. Bu gradyan değerlerinin vektöryel toplamı, 8 yönlü türev vektörlerinin toplamı ile aynı sonucu verir. Bir nokta ve onun sekiz komşuluğunun genlik değerleri Şekil 1'de gösterilmektedir.

a	b	c
d	e	f
g	h	i

Şekil 1. Bir “e” noktası ve 8 komşuluğunun genliği

Yönlü türev vektörü  $G$  genlik farkı olarak tanımlanır. Bu vektör  $T$ 'nin yönünü ifade eder ve komşuya doğru olan birim vektör olarak verilir. Burada taban tabana zıt çiftler:  $(a, i)$ ,  $(b, h)$ ,  $(c, g)$  ve  $(f, d)$ 'dir. Bu gradyen değerlerin vektöryel toplamı:

$$G = \frac{(c-g)}{R} \cdot \frac{[1,1]}{R} + \frac{(a-i)}{R} \cdot \frac{[-1,1]}{R} + (b-h) \cdot [0,1] + (f-d) \cdot [1,0] \rightarrow \{R = \sqrt{2}\} \quad (15)$$

olarak yazılır. Bu işlemin sonucunda elde edilen vektöre ait genlik ağırlıklarının toplamı aşağıda verilen düşey ve yatay kerneller ile gösterilir.

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Bu kernellerin her biri ayrı ayrı gri skalalı çerçevenin TPY'si ile 2 boyutlu konvolüsyon işlemine tabi tutulur,

$$M_x(m, n) = I_T(m, n) * G_x \quad M_y(m, n) = I_T(m, n) * G_y \quad (17)$$

ve bu işlemin sonunda gradyen matrisleri elde edilir. Toplam gradyen matrisi ise,  $M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}$  olarak elde edilir. Sonuçta TPY verisi ile ifade edilen çerçevenin genlik geçişinin yüksek olduğu kenar bölgelerin genlik değerleri artmış olur. Ancak hedeften kaynaklı piksellerin yanında arka fon renk geçişlerinden kaynaklanan bölgelerden dolayı, parazit yankı kabul edilebilecek yüksek genlikli pikseller bulunmaktadır. Bunların elimine edilebilmesi için toplam gradyen matrisine eşik uygulanır ve parazit yankıların süzülmesi sağlanır. Böylece DTGİ-TSE süreci tamamlanmış ve yerden havaya tespit işlemi için kullanılabilir veri elde edilmiş olur.

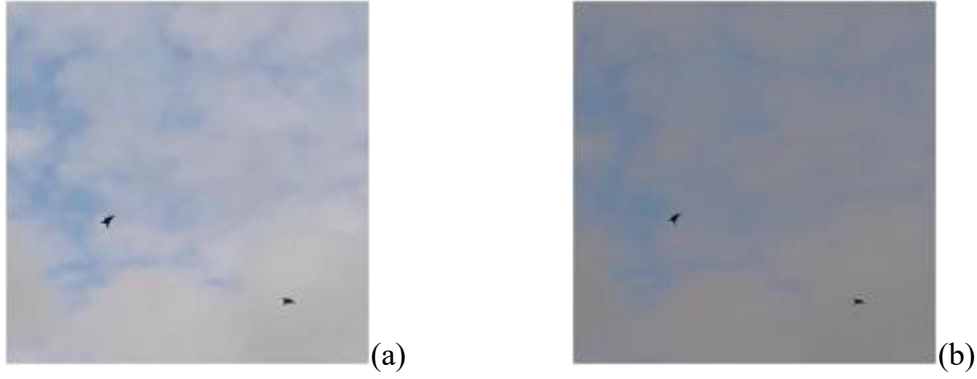
### 3. Simülasyon Sonuçları

Bu kısımda değişik tip kameralarla elde edilen çoklu hedefler içeren gerçek video verileri için ÇF, OA ve DTGİ-TSE algoritmalarının performansları karşılaştırılmıştır. Algoritmaların çalışması MATLAB ortamında simüle edilmiştir. Tüm denemeler birbirini takip eden 42 örnek çerçeve için yapılmıştır. Dengeli bir karşılaştırma yapabilmek için Sobel süreci ÇF ve OA algoritmalarına da uygulanmıştır. Ayrıca her üç algordimada da eşik geçen piksellere Eşitlik (1)'de verilen orijinal RGB çerçevenin gri skalaya çevrilmiş halinin Eşitlik (18)'deki gibi hesaplanan tersinin normalize edilmiş değeri atanmıştır. Böylece genlikte normalize sağlanmış olur.

$$I_{T\_normalize}(m, n) = 255 \times \frac{1}{I(m, n)} \quad (18)$$

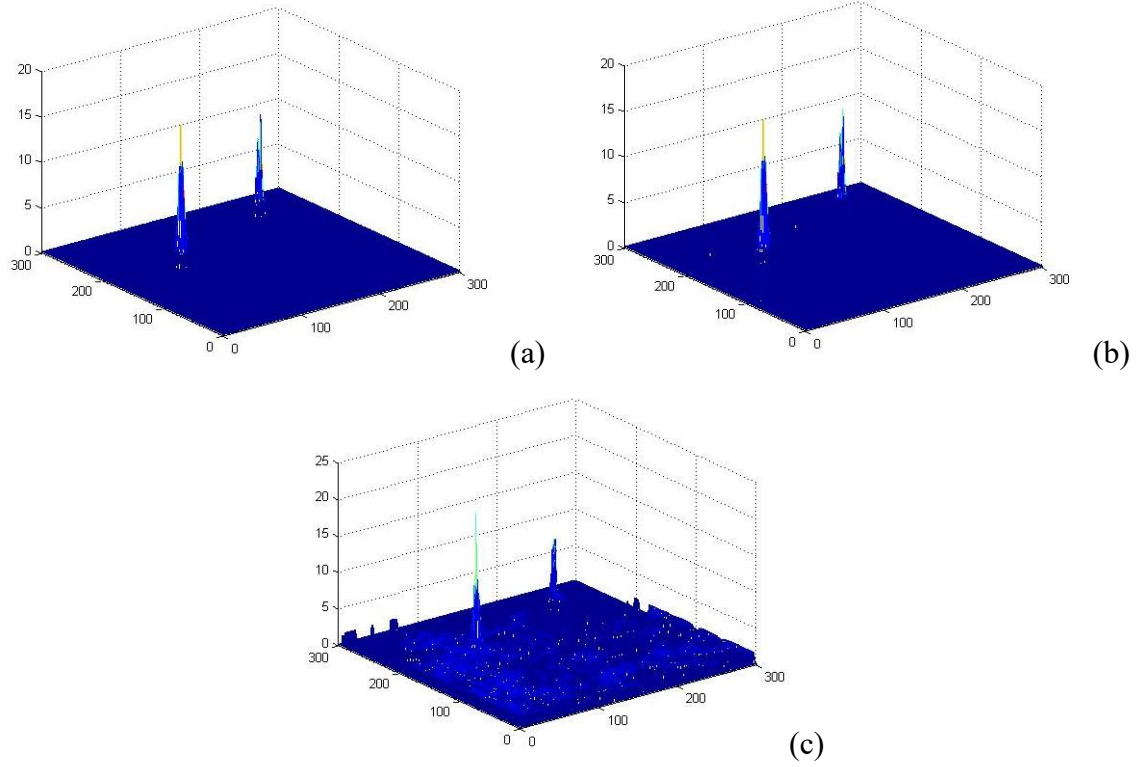
Burada değişik video verileri için algoritmaların performansları; şekil bütünlüğü, normalize değerler için sinyalin gürültüye oranı (SGO), parazit yankı miktarları, hedef

şeklindeki bozulma ve işlem süresi açısından değerlendirilmiştir. Böylece algoritmaların avantaj ve dezavantajları ortaya koyulabilecektir. İlk olarak 2 hedefli bir video verisinin tek bir örnek anı için RGB görüntüsü alınmış, bu çerçeveye DTGİ uygulanarak sonuçlar Şekil 2’de gösterilmiştir. Bu simülasyon için örnek alma oranı 2 çerçevede birdir. Çalışmalar 300x300 piksel’lik bir alanda gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 2.** (a) 2 hedefli RGB video verisinin bir çerçevesi, (b) DTGİ uygulanmış çerçeve

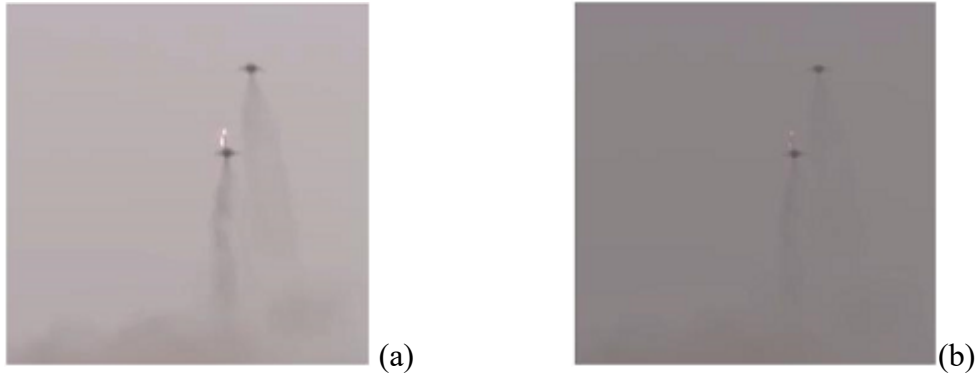
Aynı örnek anı için ÇF, OA ve DTGİ-TSE algoritmalarından elde edilen genlik görüntüsü, 3 boyutlu olarak Şekil 3’te sunulmuştur. Burada yatay düzlem hedeflerin  $x$  ve  $y$  koordinatlarındaki konumlarını, bunlara dik olan eksen ise genliği göstermektedir.



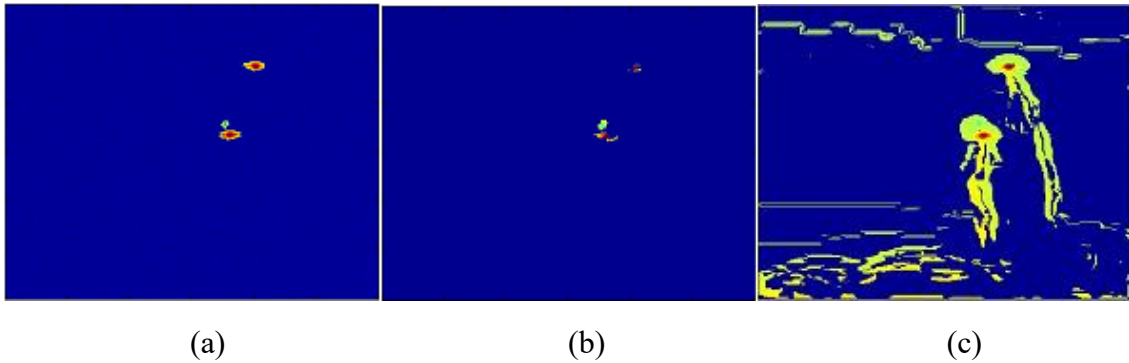
**Şekil 3.** Şekil 2’deki verinin aynı çerçevesi için 3 boyutlu genlik çizimleri  
(a) DTGİ-TSE, (b) ÇF ve (c) OA

Analizde hedef kaynaklı genliklere bakıldığında, genliklerin DTGİ-TSE ve ÇF'de birbirlerine çok yakın olduğu, OA'da ise hedeflerden büyüğünün genliğinin diğerlerine göre daha büyük olduğu, diğer hedefin ise daha küçük olduğu görülmektedir. DTGİ-TSE'de parazit yankı yoktur. Aynı genlikte olmak üzere ÇF'de az, OF'de ise oldukça fazla parazit yankı bulunmaktadır. Bu durumda küçük genlikli hedef için hesaplanan SGO DTGİ-TSE için 20.5 dB, ÇF için 7.4 dB, OA için ise 7 dB'dir. Tüm süreç için işlem süresi; DTGİ-TSE'de 2.5sn, ÇF'de 0.63sn, OA'da ise 171.7sn'dir.

İkinci simülasyon çalışmasında yine iki hedefin olduğu, hava araçlarının egzozlarından duman çıkardığı ve aydınlatma cephanesinin kullanıldığı video verisinin bir çerçevesinin RGB görüntüsü ve DTGİ görüntüsü Şekil 4'te verilmiştir. Örnek alma oranı 2 çerçevede birdir. Çalışmalar 300x300 piksel'lik bir alanda gerçekleştirilmiştir. Bu senaryo ile ilgili olarak elde edilen ÇF, OA ve DTGİ-TSE sonuçları ise skalalı genlik görüntüsü olarak Şekil 5'te sunulmuştur.



**Şekil 4.** (a) Aydınlatma cephaneli ve egzoz dumanlı RGB video verisinin bir çerçevesi, (b) DTGİ uygulanmış çerçeve

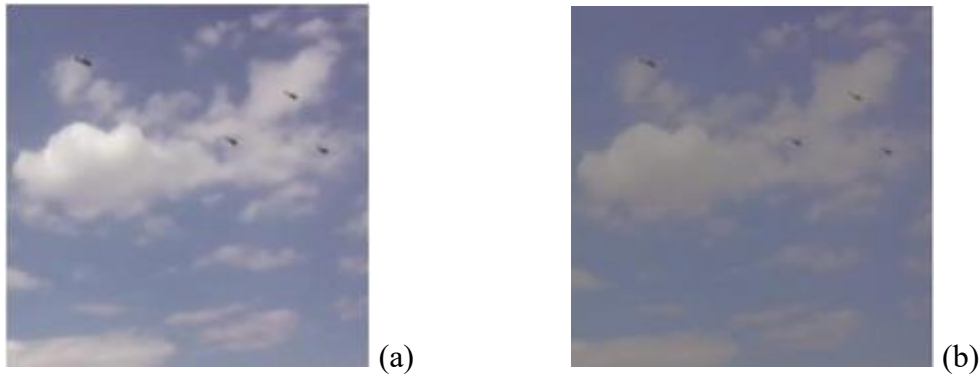


**Şekil 5.** Şekil 4'deki verinin aynı çerçevesi için skalalı genlik görüntüleri (a) DTGİ-TSE, (b) ÇF ve (c) OA

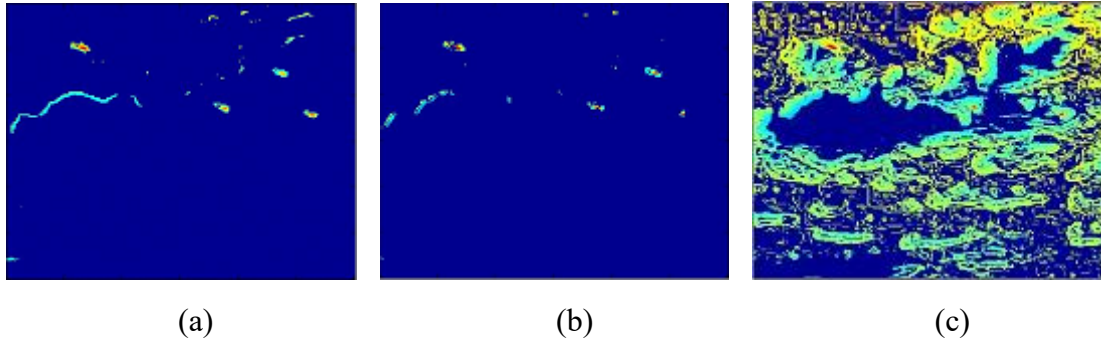
Şekillerden görülebileceği gibi OA işlemi sonucunda elde edilen görüntüde uçakların şekli büyük ölçüde aynı kalmış olmakla birlikte, oldukça fazla parazit yankı oluşmuştur. ÇF işlemi sonucunda oluşan görüntüde ise parazit yankı olmamasına karşılık, uçağın

şekli bozulmuş olup, normal formundan çok farklı bir hal almıştır. DTGİ-TSE’de parazit yankı oluşmamış ve nesnenin şekli bozulmamıştır. Tüm süreç için işlem süresi; DTGİ-TSE’de 2.5sn, ÇF’de 0.65sn, OA’da ise 189.2sn’dir. SGO; DTGİ-TSE için 14 dB, ÇF için 14 dB, OA için ise 2.2 dB’dir.

Bir diğer simülasyon çalışması parçalı bulutlu ortamda alınan video verisi üzerinde yapılmıştır. Video görüntüsü kapalı alanda ve cam arkasından alınmış olup, netliği bozuktur. Örnek alma oranı her bir çerçevede birdir, çalışmalar 300x300 piksel’lik bir alanda gerçekleştirilmiştir. Bir örnek anına ait RGB ve DTGİ görüntüsü Şekil 6’da, buradan elde edilen ÇF, OA ve DTGİ-TSE sonuçları ise Şekil 7’de verilmiştir.



**Şekil 6.** (a) 4 hedefli RGB video verisinin bir çerçevesi, (b) DTGİ uygulanmış çerçeve

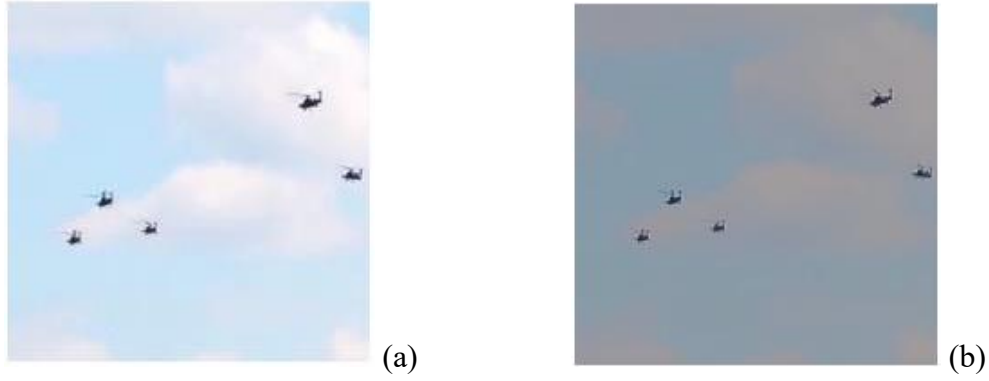


**Şekil 7.** Çerçevenin skalalı genlik görüntüleri (a) DTGİ-TSE, (b) ÇF ve (c) OA

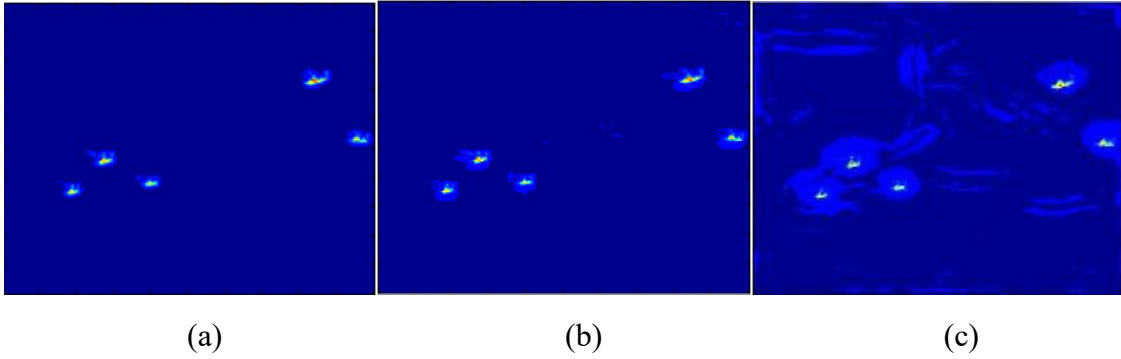
Burada da ÇF algoritmasının parazit yankı miktarının diğer algoritmalara göre az olduğu, ancak nesne şekillerinde bozulma olduğu görülmektedir. DTGİ-TSE algoritması sonucunda az bir parazit yankıya karşılık nesne şekillerinde bozulma olmadığı, OA’nın çok fazla parazit yankı ürettiği görülmektedir. Tüm süreç için işlem süresi; DTGİ-TSE’de 2.3sn, ÇF’de 0.7sn, OA’da ise 72sn’dir. SGO; DTGİ-TSE için 2.88 dB, ÇF için 2.65 dB, OA için ise 1.46 dB’dir.

Son simülasyon çalışması parlak, parçalı bulutlu bir arka fonda 5 hedef için, 200x200 piksel’lik bir alanda gerçekleştirilmiştir. Örnek alma oranı 3 çerçevede birdir. Bu deneme için RGB görüntüsü ve bundan elde edilmiş DTGİ görüntüsü Şekil 8’de, bundan elde edilen ÇF, OA ve DTGİ-TSE sonuçları ise Şekil 9’da verilmiştir.





**Şekil 8.** (a) 5 hedefli RGB video verisinin bir çerçevesi, (b) DTGİ uygulanmış çerçeve



**Şekil 9.** Çerçevenin skalalı genlik görüntüleri (a) DTGİ-TSE, (b) ÇF ve (c) OA

Şekillerden görüleceği üzere az bulutlu ortamda, oldukça net olarak alınan görüntüde tüm algoritmaların başarısı artmıştır. DTGİ-TSE’de parazit yankı yokken, ÇF’da az da olsa parazit yankı vardır. Diğer taraftan OA’da parazit yankı miktarı oldukça yüksektir. Tüm süreç için işlem süresi; DTGİ-TSE’de 1.32 sn, ÇF’de 0.3 sn, OA’da ise 122 sn’dir. SGO; DTGİ-TSE için 17.7 dB, ÇF için 7.36 dB, OA için ise 6.7 dB’dir.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada yerden havaya uygulamalarda hedef tespiti için kullanılabilecek yeni bir algoritma önerilmiştir. Bu algoritma gökyüzü arka fonun parlaklığı ile hava aracının buna göre oldukça düşük seviyedeki parlaklık seviyesi temel alınarak geliştirilmiştir. Gökyüzünde değişik parlaklık seviyesindeki bulutlardan veya uçak egzozundan çıkan dumanlardan dolayı oluşan parlaklık değişimlerinin oluşturacağı parazit yankılar dalgacık temelli bir DMB metodu ile elimine edilmiştir. Ortaya çıkan algoritma DTGİ-TSE olarak isimlendirilmiştir.

DTGİ-TSE algoritmasının çalışması değişik video verileri için simüle edilerek performansı incelenmiştir. Ayrıca hedef tespit için kullanılan ve yerden-havaya durumuna uygulanabilen ÇF ve OA algoritmalarının aynı video verilerindeki performansları simüle edilerek, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçta DTGİ-TSE

algoritmasının; az parazit yankı oluşturduğu, SGO'nın diğer algoritmalara göre yüksek olduğu, uçan nesnenin şekline yakın bir tespit yaptığı ve gerçek zamanlı çalışmaya yakın bir performans sunduğu görülmüştür. DTGİ-TSE parazit yankı oluşturma ve SGO anlamında ÇF ve OA'dan iyi olduğu, nesnenin şekli bakımından ÇF'den iyi, OA ile benzer olduğu, gerçek zamanlı çalışma anlamında ise ÇF'ye yakın, OA'dan ise iyi olduğu görülmüştür. Bu metodun otomatik olarak hedef tespitinde, alçak irtifa hava savunma sistemleri için bir seçenek olabileceği değerlendirilmektedir.

## 5. KAYNAKÇA

- [1] Hu, W., Tan, T., Wang, L. ve Maybank, S. (2004), A survey on visual surveillance of object motion and behaviors, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews) 34 (3), 334-352.
- [2] Singla N. (2014), Motion detection based on frame difference method, International Journal of Information and Computation Technology 4 (15), 1559-1565.
- [3] Kulchandani J. S. ve Dangarwala K. J. (2004), Moving object detection: review of recent research trends, 2015 International Conference on Pervasive Computing (ICPC), 1-5.
- [4] Piccardi, M. (2004), Background subtraction techniques: a review, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No.04CH37583), The Hague, Hollanda.
- [5] Cheung, S-C.S. ve Kamath C. (2003), Robust techniques for background subtraction in urban traffic video, IS&T/SPIE's Symposium on Electronic Imaging San Jose, CA, ABD.
- [6] Horn, B. ve Schunck, B. (1981), Determining optical flow, Artificial Intelligence 17 (1-3), 185-203.
- [7] Lucas, B. ve Kanade T. (1981), An iterative image registration technique with an application to stereo vision, International Joint Conference on Artificial Intelligence, 674-679.
- [8] Wang, W., Shen, J. ve Shao, L. (2018), Video salient object detection via fully convolutional networks, IEEE Transactions on Image Processing 27 (1), 38-49.
- [9] Chen, J., Cai, Z., Lai, J. ve Xie, X. (2018), Fast optical ow estimation based on the split bregman method, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology 28 (3), 664-678.
- [10] Pakfiliz, A.G. (2017), Automatic detection of aerial vehicle in cloudy environment by using wavelet enhancement technique, Radioengineering 26 (4), 1169-1176.
- [11] Erkanli, S. ve Rahman, Z. (2010), Enhancement technique for uniformly and non-uniformly illuminated dark images, In Proceedings of the 10th International Conference Intelligent Systems Design and Applications (ISDA), 850-854.
- [12] Gonzalez, R. C. ve Woods, R. E. (2002), Digital Image Processing. 2nd ed., Prentice Hall: New Jersey, ABD.
- [13] Hurlbert, A.C. (1989), The Computation of Color. Ph.D. Tezi. 210 sayfa. MIT, Cambridge, MA, ABD.
- [14] Gupta, S. ve Mazumdar, S.G. (2013), Sobel edge detection algorithm, International Journal of Computer Science and Management Research, 2 (2), 1578-1583.

## HAVACILIK VE UZAY BENZETİMLERİNİN ETMEN TABANLI YAKLAŞIM KULLANILARAK TASARLANMASI VE GELİŞTİRİLMESİNE YÖNELİK BİR SÜREÇ ÖNERİSİ

**Bilge Kaan Görür<sup>(a)</sup>, Hilal Arslan<sup>(a)</sup>, Özgür Ateşoğlu<sup>(a)</sup>**

<sup>(a)</sup> ROKETSAN A.Ş., Kemalpaşa Mah. Şehit Yüzbaşı Adem Kutlu Sk. No: 21, Elmadağ  
Ankara, {kaan.gorur, hilal.arslan, ozgur.atesoglu}@roketsan.com.tr

### ÖZ

Modelleme ve benzetim, havacılık ve uzay problemlerinin çözümünde uzun yıllardır kullanılan, ürün geliştirme, doğrulama geçirme süreçlerinin öncesinde kullanımı yaygın ve güvenilir yöntemlerden birisidir. Son yıllarda yazılım mühendisliğindeki gelişmelerle, model tabanlı geliştirme (MTG) teknikleri havacılık ve uzay araştırmacıları arasında yaygınlaşmış ve sıklıkla başvuru yapılan yaklaşımlardan birisi olmuştur. Ancak, geleneksel MTG yaklaşımları, çok etmenli benzetimlerde yetersiz kalabilmektedir. Benzetim modellerinin sürdürülebilir, yeniden kullanılabilir ve yüklü sayıda benzetimlerin kabul edilebilir sürelerde tamamlanabilir olmaması bu yetersizliklerden bazılarıdır. Bu sorunları aşabilmek adına nesneye yönelik programlama ve etmen tabanlı modelleme ve benzetim yaklaşımlarının havacılık ve uzay alanında kullanılması çözüm önerilerinden birisidir. Ancak bu yaklaşımların havacılık ve uzay araştırmacılarınca bilinen ve sık başvuru yapılan yöntemler olmadığı gözlenmektedir. Dolayısıyla bu yöntemlerle model geliştirmek, geliştiriciler için karmaşık ve alışlagelmişin dışında bir yöntem olarak görülmektedir. Bunun sonucunda belirtilen yaklaşımlarla kurgulanacak model geliştirme süreçleri kabul görmemekte veya yavaş ilerlemektedir. Bu bildiride, geliştiricilerin tasarımlarını ve benzetim mimarisini etmen tabanlı yaklaşımla oluşturarak hızlı bir şekilde geliştirme aşamasına geçebilmesi için bir süreç önerisi ortaya konmaktadır.

Önerilen süreç, MTG tekniklerini kullanarak etmen tabanlı modelleme ve benzetimin getirilerinden yararlanmayı amaçlamaktadır. Bu süreç etrafında geliştirilmekte olan araçların, geliştiricileri modeldeki ilgilenmedikleri kısımlardan soyutlayarak asıl işlerine odaklanmalarını sağlaması amaçlanmaktadır. Böylece sistem tasarımına yönelik benzetimlerin hızlı ve etkin şekilde ortaya konması beklenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Etmen tabanlı modelleme ve benzetim, havacılık ve uzay, model tabanlı tasarım ve geliştirme, modelleme ve benzetim süreçleri, nesneye yönelik programlama.

## **A PROCESS PROPOSAL FOR DESIGN AND DEVELOPMENT OF AEROSPACE SIMULATIONS USING AGENT BASED APPROACH**

### **ABSTRACT**

Modeling and simulation is one of the common and reliable methods that are used before product development and validation & verification processes to solve aerospace problems for many years. In the recent years, model-driven development techniques became very popular and widespread among aerospace researchers. However, traditional model-driven simulation development approaches can be insufficient for multi-agent simulations. Lack of maintainability, reusability, and ability to run large number of simulations in acceptable time periods are some of those insufficiencies. To overcome these problems, one of the suggestions is promoting object-oriented programming and agent-based modeling and simulation approaches in aerospace. However, these approaches are not well-known and widely used among aerospace researchers. Therefore, creating models by using these approaches are really complicated and unusual from the viewpoint of developers. As a result, modeling with these approaches is not welcome by aerospace researchers and slows down the development process. In this paper, a process that allows developers to design and construct the simulation architecture by using agent-based approach is proposed to speed up transition from design to development.

The proposed process benefits from the advantages of agent based modeling and simulation by using model-driven development techniques. Some of the tools, which are being developed with the proposed process, make irrelevant parts of models transparent to developers and allow developers to focus their own tasks. Therefore, it is expected that simulations for system design are being constructed efficiently.

**Keywords:** aerospace, agent based modeling and simulation, model driven design and development, modeling and simulation process, object oriented programming.

## **1. GİRİŞ**

Günümüzde modelleme ve benzetim, havacılık ve uzay çalışmalarında yoğun olarak kullanılan, ürün geliştirme, test ve doğrulama geçerleme süreçlerinin öncesinde mutlaka başvurulması gereken, güvenilirliği yüksek en temel teknolojilerden biri haline gelmiştir. Havacılık ve uzay çalışmalarının oldukça karmaşık yapısından dolayı bu

alandaki modelleme ve benzetim süreçleri de karmaşık olabilmektedir. Model geliştirme süreçlerini hızlandırmayı ve geliştiriciler için bu süreçleri kolaylaştırmayı amaçlayan yaklaşımlar hali hazırda endüstride yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar arasında en sık başvuru alan yaklaşımlardan birisi de model tabanlı geliştirme (MTG) yöntemlerinin kullanılmasıdır. MTG yaklaşımı ile geliştiriciler derin bir programlama bilgisine sahip olmaya gerek kalmadan blok diyagramları kullanarak modellerini geliştirebilmektedir. Blok diyagramlar kullanılarak geliştirilen benzetimlerin çalıştırılmasını sağlayan yazılımların başında ticari bir ürün olan Matlab/Simulink [1] gelmekle beraber, Scilab/Xcos [2] gibi açık kaynak ürünlere de rastlanmaktadır.

MTG yaklaşımı, modellerin geliştirme süreçlerini hızlandırırsa da birtakım önemli sorunları da beraberinde getirmektedir. Bu sorunlardan bir tanesi ölçeklenebilirlik konusunda ortaya çıkmaktadır. Yaygın olarak kullanılan MTG araçlarıyla geliştirilen modeller, C++ gibi temel programlama dilleri ile geliştirilen modellere göre daha yavaş kalabilmektedir. Modelin büyümesi durumunda da her iki yaklaşımın başarımları arasındaki fark gittikçe artmaktadır. MTG araçlarıyla geliştirilen modellerin C++'a dönüştürülerek koşturulmasını sağlayan bazı araçlar da mevcuttur [3]. Ancak bu dönüşüm sonucunda genellikle okunabilirliği düşük kodlar ortaya çıktığı ve kodların sürdürülebilirliğinin düşük olduğu endüstrideki deneyimler ile gözlenmiştir. Ayrıca bu dönüşüm için gerekli olan Rafta Hazır Ticari (RAHAT) ürünlerin de getirdiği ek bir lisans maliyeti söz konusu olabilmektedir.

Havacılık ve uzay projelerinde MTG yaklaşımının bir diğer sorunu da çok sayıda varlığın benzetiminin yapıldığı çalışmalarda ortaya çıkmaktadır. Modellerin tek bir varlığı içerdiği durumlarda MTG yaklaşımı geliştiricilerin işlerini kolaylaştırdığı için geleneksel dillere göre çok daha tercih edilebilir durumdadır. Birden çok etmenin kullanıldığı çalışmalarda (örneğin; hava savunma modelleri, sürü davranışı modelleri, vb.) ise MTG yaklaşımının kullanım kolaylığı avantajını kaybetmeye ve performans sorunlarıyla karşılaşmaya başladığı görülmektedir. Çok etmenli modellerin blok diyagramlarla geliştirildiği durumlarda bir etmenin birden çok örneğini oluşturmak için geliştiricilerin yaygın olarak kullandıkları yöntem etmeni ilgilendiren tüm blok diyagramın kopyalanması olmaktadır. Blokların çok sayıda kopyasının bulunduğu modellerde de benzetim yazılımının performansının hızla düşmesi ve modellerin sürdürülebilirliğinin kaybolması gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Örneğin; bir modelde geliştiricilerin küçük bir değişiklik için dahi birçok kopyayı tutarlı bir şekilde güncellemesi gerekebilmektedir. Performans ve sürdürülebilirlik sorunlarından dolayı MTG yöntemlerinin mühendislik benzetimleri için tek başına en iyi seçenek olmadığı; ancak birtakım farklı yaklaşımlarla beraber kullanıldığında daha başarılı sonuçlar elde edilebildiği görülmektedir [4]. Bu amaçla, mühendislik benzetimlerinin geliştirilmesinde nesneye yönelik programlama (NYP) yaklaşımının da kullanılması

gerektiği değerlendirilmektedir. Örneğin; Zipfel'in çalışmalarında NYP yaklaşımının yörünge hesaplama benzetimleri için sağladığı getirilerden bahsedilmiştir [5, 6].

Bahsi geçen sorunlar havacılık ve uzay benzetimleri için NYP ve etmen tabanlı modelleme yaklaşımlarına geçmeyi ön plana çıkarsa da bu geçişin kolay olmadığı değerlendirilmektedir. Çünkü model geliştiriciler genellikle yazılım mühendisliği alanı dışından gelen ve özel bir alanda uzmanlık bilgisine sahip kişilerdir. Dolayısıyla bu geliştiricilerin NYP ve etmen tabanlı modelleme yaklaşımları konusunda bilgi sahibi olmaları beklenmemektedir. Ayrıca, MTG araçlarını kullanan mühendislerin tamamen NYP yaklaşımı kullanarak benzetim geliştirmesini beklemek de geliştirme süreçlerinin uzamasına ve MTG'nin getirilerinden yeterince yararlanılamamasına neden olacaktır.

Bu bildiriye, alan uzmanlarının asgari seviyede yazılım mühendisliği bilgisine sahip olarak NYP yaklaşımına geçmelerini hedefleyen bir süreç endüstriyel tecrübeler göz önünde bulundurularak önerilmiştir. Önerilen süreç; MTG araçlarından kopmayı, benzetim mimarisi geliştirme işinin farklı disiplinlerden gelen araştırmacılarca birlikte yapılabilmesini sağlamaktadır.

## 2. BENZER ÇALIŞMALAR

Modelleme ve benzetim süreçlerinin tanımlanması ve bu süreçlere uygun bir şekilde geliştirme faaliyetlerinin yapılması benzetimlerin tasarım ve geliştirme çalışmalarının etkin bir şekilde sürdürülebilmesini sağlar. FEDEP [7] ve DSEEP [8] dağıtılmış benzetim uygulamaları için süreçlerin tanımlandığı ve literatürde yaygın olarak kullanılan standartlar arasında yer almaktadır. HLA [9] tabanlı olan FEDEP ve daha genel amaçlı olan DSEEP dağıtılmış benzetim uygulamalarını oluşturmak ve yürütmek için geliştirilmiş birer sistem mühendisliği süreci sunar.

FEDEP ve DSEEP gibi genel amaçlı ve dağıtılmış benzetimlere yönelik süreçlerin yanı sıra belli bir alana özgü olarak geliştirilen süreç tanımlarına da rastlamak mümkündür. Bu tarz çalışmalarda etmen tabanlı benzetim geliştirme süreçlerine yönelik önerilerin de yer aldığı görülmektedir. Örneğin; dağıtılmış benzetim geliştirme faaliyetleri ile yöneylem araştırmaları ve yönetim bilimlerine yönelik uygulama pratiklerini bir araya getiren ve etmen teknolojilerini içeren bir yöntem çatısı [10]'da önerilmiştir. Scerri ve çalışma arkadaşlarının makalesinde ise büyük ölçekli benzetimlerin geliştirilmesi ve ayrı olarak geliştirilen modüllerin bu benzetimlere entegre edilebilmesi için bir mimari ihtiyacı olduğu ortaya konmuştur [11]. Bu kapsamda da çok etmenli benzetimleri tek bir altyapıda çalıştırabilen bir mimari ve uygulama çatısı önerilmiştir. Bir başka alandaki süreç önerisi de [12]'de bulunabilir. Bu çalışmada da kablosuz algılayıcı ağları (İng. *wireless sensor networks*) ve karmaşık uyarlamalı sistemlerin (İng. *complex adaptive systems*) etmen tabanlı modellenmesi ve benzetimine yönelik bir süreç önerisi yer almaktadır. Havacılık ve uzay alanındaki çalışmalarda da etmen tabanlı modelleme ve

benzetim örnekleri mevcuttur. Hava ulaşımındaki acil durumları ele almayı hedefleyen [13] çalışması; havacılık ve uzay ürünlerinin tasarımı için geliştirilen operasyonel benzetimlerde etmenler ve ortam arasındaki karmaşık etkileşimi ele alan çalışması [14] bu örneklerden birkaçıdır.

Havacılık ve uzaya yönelik benzetim tasarım ve geliştirme süreçleri oldukça kısıtlıdır. Bunun öncesinde modelleme ve benzetim yazılımlarının da oldukça kısıtlı olduğu görülmektedir. MTG araçları dışında kalan ve en dikkat çeken yazılımın Zipfel tarafından geliştirilen CADAC++ olduğu söylenebilir [15]. CADAC++, benzetimleri C++ diliyle ve NYP yaklaşımıyla geliştirmeyi önermekte olup; insansız hava araçları ve uzay araçları gibi çok sayıda etmenin tanımlanabildiği ve betik dili kullanan RAHAT ürünlerle geliştirilen benzetimlere oranla kayda değer hızlanmalar sağladığı bir benzetim ortamıdır. CADAC++ aslında bir etmen tabanlı modelleme ve benzetim aracı olarak ortaya çıkmamış olsa da, bu yaklaşım için önemli bir potansiyeli olduğu değerlendirilmektedir. CADAC++'ın en belirgin dezavantajı, havacılık ve uzay benzetimlerinin yapılabileceği bir alt yapı olarak tasarlanmayıp sadece belli modellere özgü oluşturulmuş olması; bu nedenle genişletilebilirliğinin de düşük olmasıdır. Ayrıca CADAC++ çatısının genelleştirilebilir bir benzetim geliştirme süreci tanımlamadığı da görülmektedir. [4] çalışmasında, havacılık ve uzay benzetimleri için gerekli modellerin NYP ve etmen tabanlı modelleme yaklaşımları ile ele alınabileceği; bu sayede yeniden kullanılabilir ve gevşek bağlı modellerin ortaya çıkarılabileceği gösterilmiştir.

Hem havacılık ve uzaya yönelik modelleme ve benzetim alanındaki eksiklikler, hem de model geliştiricilerin alışkanlıkları geliştiricileri çeşitli betik dilleri ve MTG araçlarını kullanmaya yöneltmekte; ancak bu noktada ortaya çıkan performans, yeniden kullanılabilirlik ve sürdürülebilirlik sorunlarının ise henüz çözülmediği görülmektedir. Bu çalışmada ise betik dilleri veya MTG araçlarına aşına olan geliştiricilerin, etmen tabanlı modelleme ve benzetim yaklaşımına geçişine ön ayak olmayı öneren bir süreç tanımı verilmektedir. Ayrıca etmen tabanlı modellemeden önce benzetim geliştiricilerinin NYP için de yeterli araç desteğine sahip olmadığı görülmektedir. Önerilen sürecin, modellerin NYP ve etmen tabanlı modelleme yaklaşımları ile tanımlanmasını kolaylaştıracağı ve bu yaklaşımlar hakkında sınırlı bilgiye sahip olan araştırmacıların hızlı bir şekilde tasarım aşamasından geliştirme aşamasına geçmesini sağlayacağı öngörülmektedir.

### 3. ÖNERİLEN SÜREÇ

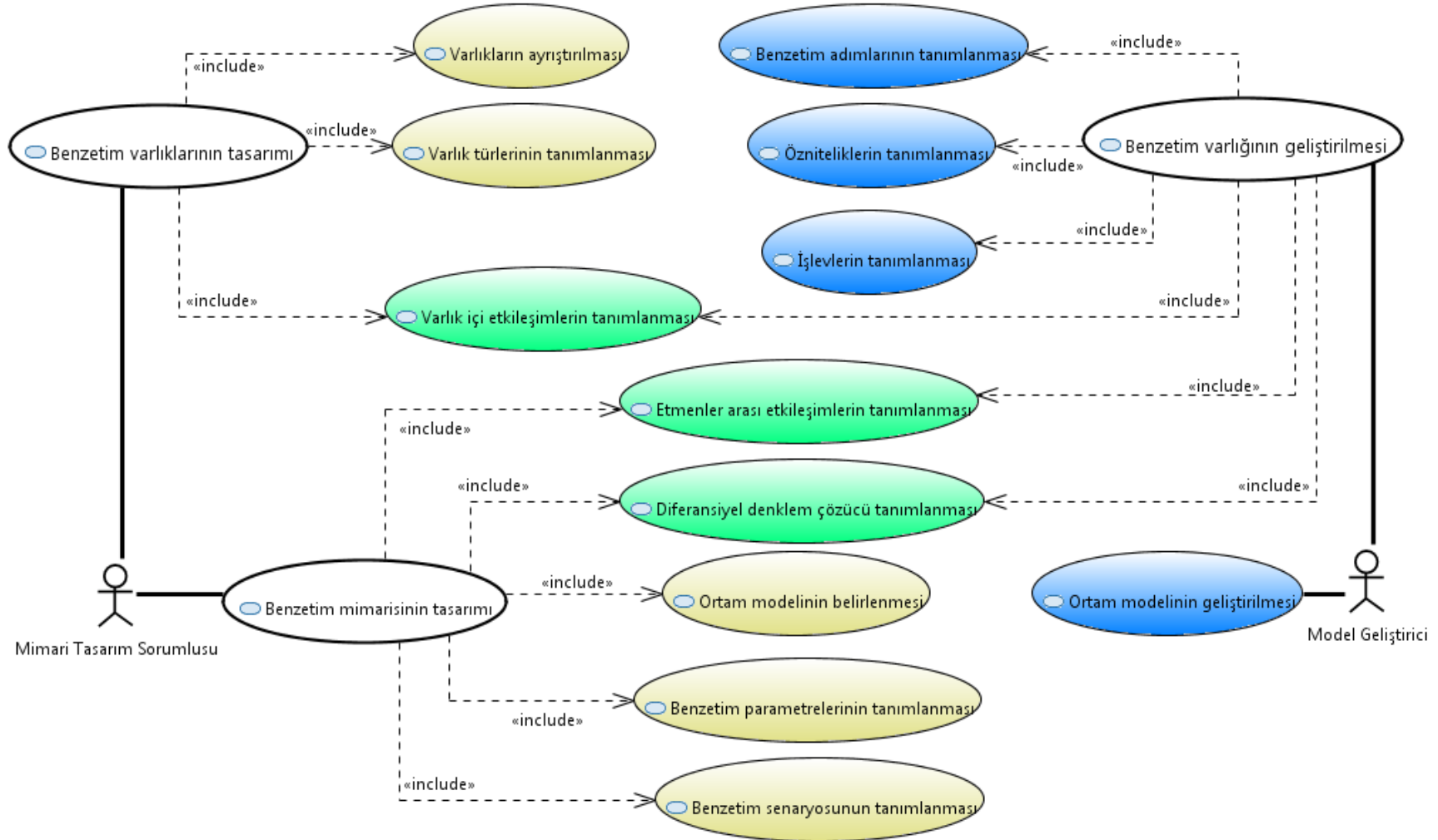
Havacılık ve uzay benzetimlerinin etmen tabanlı yaklaşım kullanılarak tasarım ve geliştirilmesine yönelik olarak önerilen süreç üç farklı bakış açısıyla ele alınmıştır. Böylece sorumluluk tanımlarının farklı bakış açılarına sahip paydaşlar arasında paylaşılması ve ilgi alanlarının ayrıştırılması (İng. *separation of concerns*)

sağlanmıştır. Bu bakış açıları sırasıyla çatı (İng. *framework*) geliştirme, mimari tasarım ve model geliştirme bakış açılarıdır. Çatı geliştirme bakış açısı benzetim altyapısının geliştirilmesi, bakımı ve idame ettirilmesini kapsayan yazılım geliştirme görevlerinden sorumludur. Mimari tasarım bakış açısı, benzetim mimarisinin kurgulanmasından, benzetim varlıklarının üst düzey tasarımından ve sistem mühendisliği çalışmalarından sorumludur. Model geliştirme bakış açısı ise sorumlu olunan modellerin mühendislik tanımlarını geliştirmekten sorumludur. Mimari tasarım ve model geliştirme bakış açılarının temel sorumlulukları Şekil 1’de verilmiştir.

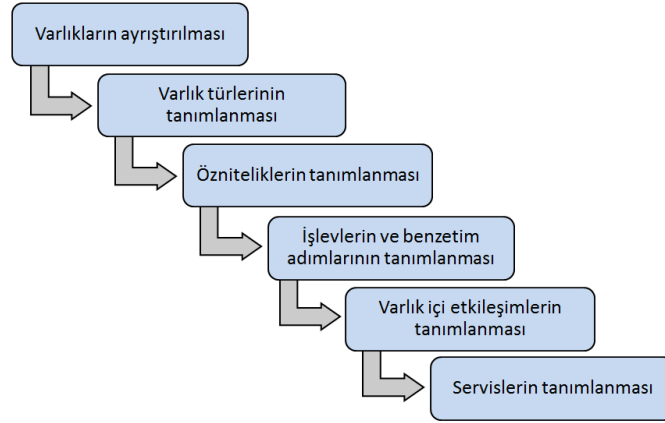
### 3.1. Benzetim varlıklarının tasarımı

Önerilen süreçte benzetim tasarımının ilk adımı benzetim varlıklarının tanımlanmasıdır. Benzetim varlıklarının tanımlanması için önerilen süreç aşamaları Şekil 2’de gösterilmiştir. Bu sürecin ilk adımı varlıkların ayrıştırılmasıdır. Bu aşamada modelde birbirinden bağımsız şekilde geliştirilebilecek varlıklar belirlenerek bu varlıklara karşılık gelen sınıf veri yapıları belirlenir. Ardından varlık türlerinin tanımlanması aşamasına geçilir. Benzetim varlıkları, bir etmene (İng. *agent*) veya bir modüle (İng. *module*) karşılık gelecek şekilde ayrıştırılmalıdır. Etmenler “otonom bir davranışı olan, bulunduğu ortamı ve diğer etmenleri algılayarak eylemini gerçekleştiren ve ortama etkiye bulunan yazılım varlıkları” olarak tanımlanabilir [4, 16, 17]. Bu açıdan bakıldığında benzetimdeki füzeler, hava ve kara araçları etmenlere örnek olarak verilebilir. Diğer yandan modüller ise etmenlerin içerisinde olan ve bağımsız olarak geliştirilebilen benzetim varlıkları olarak tanımlanmaktadır. Bu yönüyle modüller etmenlere göre daha özelleştirilmiş bir yapıya sahiptir. Benzetimdeki modülleri belirlerken, modüllerin herhangi bir varlık içermemesine ve atomik bir yapıya sahip olmasına dikkat edilmelidir. Bu açıdan, modüllerin üst seviye bir blok diyagramda yer alan bloklara karşılık geldiği düşünülebilir. Örneğin, güdüm (İng. *guidance*), itki (İng. *propulsion*), uçuş mekaniği (İng. *flight mechanics*) gibi bağımsız geliştirilebilen varlıklar modüllere örnek olarak verilebilir (Şekil 3). Benzetimdeki varlıklar ayrıştırıldıktan sonra üçüncü aşama olan özniteliklerin tanımlanması aşamasına geçilir. Bu aşama, benzetim çatısındaki her bir varlık için kendisini diğer varlıklardan ayırt edebilecek özniteliklerin belirlendiği aşamadır. Örneğin, uçuş mekaniği modülü bir hava aracının özneliği iken, benzetimin herhangi bir anındaki füzenin konum bilgisi de uçuş mekaniği modülü için bir öznitelik olarak tanımlanabilmektedir. Bir sonraki aşama olan işlevlerin ve benzetim adımlarının tanımlanması aşamasında, özniteliklerin değerlerinin her benzetim adımında güncellenmesini sağlayan atomik fonksiyonlar ve yardımcı fonksiyonlar tanımlanır. Atomik fonksiyonlar benzetim varlıklarının temel davranışlarını sergilediği kod kesimleridir. Bu fonksiyonların ne sıklıkla çağırılacağı da yine bu aşamada belirlenir. Varlıklara ait bu atomik fonksiyonlar benzetim esnasında, benzetim çatısı tarafından mantıksal bir akış içerisinde ardışık ya da koşut bir şekilde çağırılır. Varlıkların çağırılma sırası bir sonraki aşama olan varlık içi etkileşimlerin

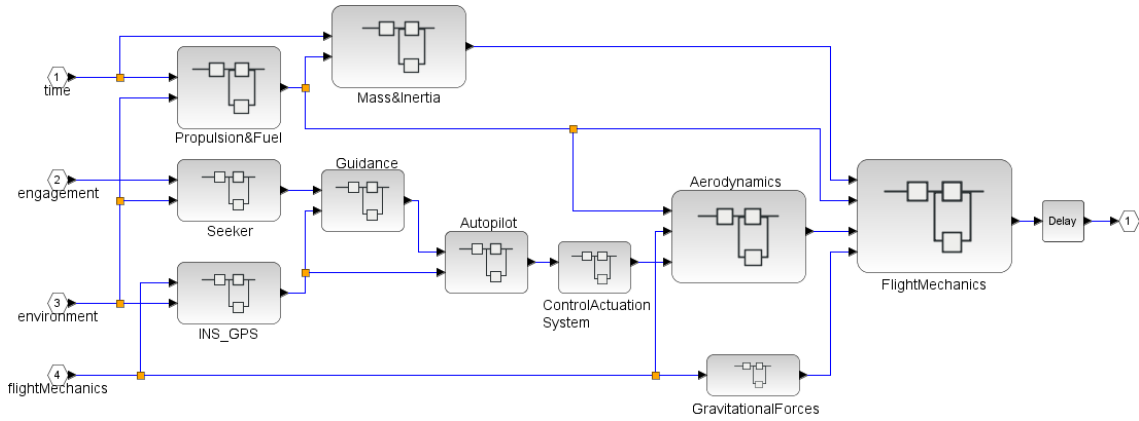




Şekil 1. Benzetim tasarım sorumlusu ve model geliştirici rollerinin temel sorumlulukları



Şekil 2. Benzetim varlıklarının tanımlanma süreci



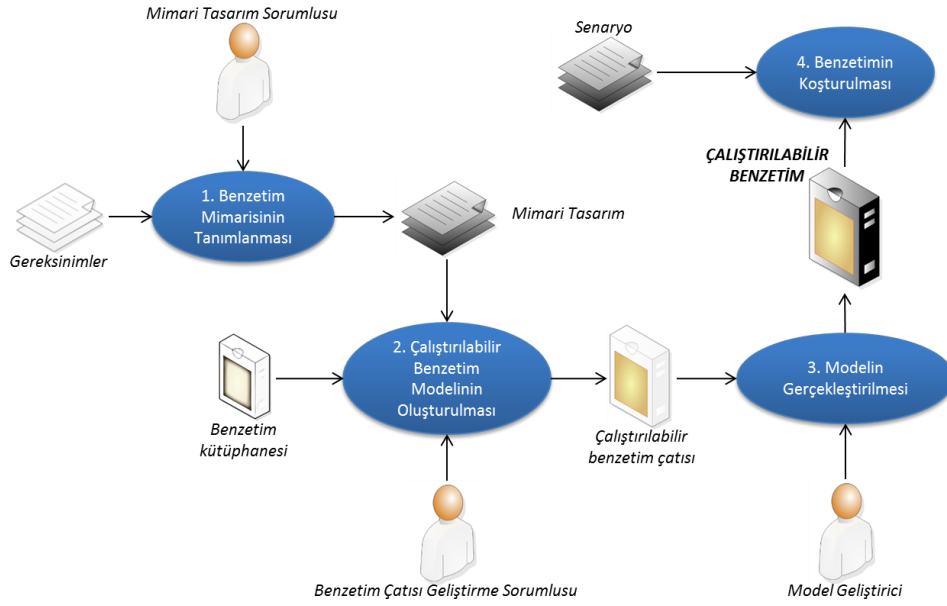
Şekil 3. Bir blok diyagramında, modül olabilecek benzetim varlıkları örneği [18]

belirlenmesi aşamasında ortaya çıkar. Bu aşamada bir etmen içerisindeki her bir varlık için diğer varlıklardan alacağı girdiler ve vereceği çıktılar belirlenerek etmen içerisindeki varlıkların akışı belirlenmiş olur. Varlık içi etkileşimlerin belirlenmesinin ardından, benzetimde birden çok etmen varsa etmenler arasındaki etkileşimler, tanımlanacak servisler aracılığıyla sürecin son aşamasında tanımlanır.

### 3.2. Benzetim mimarisinin tasarımı

Benzetim mimarisini oluşturma sürecinin farklı bakış açılarına sahip aktörler arasındaki akışı Şekil 4'te gösterilmiştir. Buna göre mimari tasarım sorumlusunun gereksinimleri göz önünde bulundurarak benzetimin tasarım çalışmalarına başlaması sürecin ilk adımıdır. Bu adım sonucunda ortaya çıkan mimari tasarım başta blok diyagramlar olmak üzere çeşitli tasarım dokümanlarını, varlık tanımlarını, etmenler arası etkileşim tanımlarını ve fonksiyon arayüzlerini içerir. Benzetim çatısı geliştirme sorumlusu bu tasarım kalemlerini ve benzetim kütüphanesini kullanarak mimari tasarımın koda dökülmüş olduğu, projeye özgü bir kod üreterek bu kodu model geliştiricilere sunar. Bu aşamada ortaya çıkan kodlar aslında çalıştırılabilir durumdaki temsili (İng. *dummy*) bir

benzetim çatısıdır ve modelin gerçekleştirim ayrıntıları henüz kodlanmamış durumdadır. Uçuş denklemleri, kontrol algoritmaları, ortam modelleri gibi ayrıntılar model geliştiricilere bırakılmıştır. Model geliştiriciler bu benzetim çatısı üzerine kendi algoritmalarını inşa ederek çalıştırılabilir bir benzetim kodu elde ederler. Elde edilen bu çalıştırılabilir benzetim kodu, başlangıç koşullarını, diferansiyel denklem çözme tercihlerini, benzetim zamanında gerçekleşecek olayların bilgilerini ve diğer gerekli benzetim parametrelerini bildiren senaryo dosyalarını girdi olarak alıp çalışabilecek durumdadır.



Şekil 4. Benzetim geliştirme sürecinin farklı türdeki aktörler arasındaki akışı

## 4. YAZILIM İHTİYACI

Havacılık ve uzay bilimleri oldukça yoğun bir alan uzmanlığı gerektirmesi dolayısıyla araştırmacıların kendi işlerine odaklanmasını sağlayabilmek için belli başlı noktalarda kullanıcı dostu yazılım desteği sağlamak oldukça önemlidir. Bu amaçla, Şekil 4'te verilen süreçteki bazı adımların otomatikleştirilerek model geliştirme süreçlerinin hızlandırılması mümkündür. Bu kapsamda ihtiyaç duyulan araçlar aşağıda verilmiştir.

### 4.1. Blok diyagramlardan taslak kod üretimi

Blok diyagramlar havacılık ve uzay alanındaki araştırmacılar tarafından en sık kullanılan MTG yöntemlerinden biridir. Mimari tasarımdan sorumlu kişilerin işlerini kolaylaştırmak amacıyla etmen tasarımlarının blok diyagramlarına benzer bir kullanıcı arayüzüyle yaptırılması ile benzetimlerin daha hızlı bir şekilde ortaya çıkması sağlanacaktır. Bu amaçla platform bağımsız bir dil sunan sistem modelleme dilleri ile benzetimin üst düzey tasarımını ifade etmek mümkündür. SysML ve FMI gibi dil ve

standartların da bu iş için uygun olduğu değerlendirilmektedir. Mevcut durumda, önerilen süreçte mimari tasarım sorumlularının ortaya koyduğu tasarım altyapı geliştirme sorumlularınca koda dökülmekte ve model geliştiricilere fonksiyonlarını kodlayabilecekleri bir çatı sunulmaktadır. Bu sürecin otomatikleştirilerek altyapı geliştirme sorumlularının devreden çıkarılması mümkündür. Mimari tasarım sorumlularının SysML’de hazırladığı modellerden otomatik olarak taslak kodların üretimini sağlamak model geliştirme sürecini çok hızlandıracaktır. Bu aşamada üretilen kodlar çalıştırılabilir modeller olmayacaktır; bunun yerine yalnızca üst düzey tasarımı içerecek ve NYP yaklaşım ilkelerine uygun şekilde kodlar üretilecek ve geliştiricilere içleri boş kod şablonları sağlanacaktır. Üretilen bu kod üzerinde, geliştiriciler kendi fonksiyonlarını ve modüllerini (örneğin, otopilot algoritması, aerodinamik katsayı hesaplamaları, vb.) gerçekleştirebileceklerdir. Bu sayede geliştiricilerin çalışmalarına en hızlı şekilde başlaması planlanmaktadır. İş süreç diyagramlarından etmen tabanlı benzetimleri otomatik olarak üreten benzer bir çalışma [19]’da görülebilir.

#### 4.2. Senaryo tanımlama ve harici koşturma araçları

C++ gibi mühendislik benzetimleri için sık kullanılan NYP dilleri bir derleme aşaması gerektirmekte olup basit değişiklikler için kodun yeniden derlenmesi oldukça zahmetli olabilmektedir. Geliştirilen benzetimleri farklı parametrelerle veya farklı koşturma seçenekleri ile yeniden derlemeye gerek kalmadan çalıştırabilmek için de birtakım harici yazılımlara ihtiyaç duyulabilmektedir. Örneğin; benzetimin farklı ilk durumlarla başlatılması veya benzetim zamanında ortaya çıkacak olayların tanımlanması gibi benzetim senaryosunu ilgilendiren durumların tanımlanabileceği senaryo tanımlama araçlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktada standart senaryo tanımlama dillerinin kullanılması, farklı platformlarda geliştirilmiş benzetimler için ortak bir arayüz sağlanması açısından önemlidir. Havacılık ve uzay alanına yönelik olarak geliştirilmekte olan standart bir benzetim senaryo tanımlama dili [20]’de bulunabilir.

Geliştirilen modellerin Monte Carlo veya optimizasyon gibi ihtiyaçlar doğrultusunda farklı koşullarla birçok defa çalıştırılması da havacılık ve uzay benzetimleri için çok sık karşılaşılan bir ihtiyaçtır. Bu tarz araçların modelden bağımsız bir şekilde geliştirilmesi ve farklı modellerde kullanılabilir genel amaçlı çözümler sunması her koşul için modelin değiştirilmesini ve yeniden derlenmesini önleyecektir. Modellerin yeniden derlenmesi kabul edilebilir bir süreç olarak görülse bile, doğrulanmış ve geçerlenmiş modellerin değiştirilmesi tercih edilebilir bir durum olmamaktadır. Monte Carlo koşullarını geliştirilen modelden bağımsız bir şekilde koştur veya dağıtılmış bir şekilde çalıştıran bir araç hali hazırda geliştirilmiş olup [21] çalışmasında ayrıntıları görülebilir.

#### 4.3. Gömülü yazılım desteği

Havacılık ve uzay çalışmalarında benzetim çalışmaları tamamlandıktan sonra döngüde donanım (İng. *hardware in the loop*) testleri ve canlı test aşamalarına geçilir. Bu

aşamada benzetimde gerçekleştirilen algoritmaların bir kısmının uçuş bilgisayarlarına yüklenmesi gerekecektir. Bu amaçla güdüm, navigasyon, otopilot gibi bilgisayarda çalıştırılacak kontrol algoritmaları uçuş mekaniği, aerodinamik ve çevresel hesaplamalar gibi fiziksel hesaplamalardan ayrıştırılarak hedef bilgisayara geçirilmelidir. Bu aşamada bazı RAHAT ürünler hedeflenen donanıma uygun kod üretimi sağlayabilmektedir. Ancak bu ürünlerin kullanılmadığı durumlarda benzetim için yazılan kodun gömülü bilgisayarlarda da çalışabilecek hale getirilmesi gerekmektedir. Bu geçiş sırasında doğrulama ve geçerliliği yapılmış modeli yeniden düzenlemeye ihtiyaç bırakmadan veya bu düzenlemeyi en aza indiren çözümlere ulaşmak testlerin sağlığı açısından oldukça önemlidir. Dolayısıyla kullanılan benzetim çatisıyla bütünleşik bir şekilde çalışabilen ve geliştirilen kontrol algoritmalarını hedef bilgisayarlarda çalıştırmayı amaçlayan yazılım desteğine ihtiyaç vardır.

## 5. SONUÇ

Havacılık ve uzay bilimleri oldukça karmaşık bir alan olup, ihtiyaç duyulan benzetimlerin hazırlanması uzun zamanlar gerektirebilmektedir. Bu zamanları kısaltmak adına MTG gibi geliştiricilerin işlerini kolaylaştıran araçlar ortaya çıkmaktadır. Mevcut MTG araçlarının maliyet, başarımları ve ölçeklenebilirlik konusunda birtakım dezavantajları bulunmaktadır. Özellikle çok etmenli benzetimlerin gerçekleştirilmesinde ortaya çıkan sorunlar, bu alandaki araştırmacıları etmen tabanlı modelleme ve bunun da öncesinde NYP yaklaşımlarına yöneltmektedir. Bu iki yaklaşım genellikle alan uzmanlarına uzak ve zorlayıcı bir yaklaşım olarak görülebilmektedir. Bu sorunları aşabilmek adına, havacılık ve uzay benzetimlerinde etmen tabanlı modelleme yaklaşımına hızlı bir şekilde geçebilmek için bir süreç önerilmiştir. Bu süreç tasarım ve geliştirme ekiplerine kılavuzluk yapmakta ve izlenecek adımları sırayla sunmayı amaçlamaktadır. Önerilen süreç literatürdeki çalışmaları ve endüstriyel tecrübeleri göz önünde bulundurarak geliştirilmiştir.

Önerilen sürecin hızlandırılması için bazı süreç adımlarını otomatikleştirmenin mümkün olduğu ve bu kapsamda ihtiyaç duyulan yazılım desteği incelenmiştir. Gelecek çalışmalar kapsamında platform bağımsız MTG dillerinden, benzetim altyapısıyla uyumlu bir şekilde çalıştırılabilir koda dönüşümü gerçekleştiren bir aracın geliştirilmesi planlanmaktadır. Ayrıca geliştirilen algoritmaların gömülü bilgisayarlara hızlı bir şekilde adapte edilmesi için ihtiyaç duyulan araçlar da gelecek çalışma planları arasındadır.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] Matlab/Simulink, <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>, Accessed 29 May 2019.
- [2] Scilab/Xcos, <https://atoms.scilab.org/categories/xcos>, Accessed 29 May 2019.

- [3] Matlab/Simulink Coder, <https://www.mathworks.com/products/simulink-coder.html>, Accessed 29 May 2019.
- [4] Görür, B. K. ve Çallı, A. N. (2018), An Object Oriented Agent Based Framework for Modeling and Simulation in Aerospace, *2018 AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*, Kissimmee, Florida, Amerika Birleşik Devletleri.
- [5] Zipfel, P. H. (2007), A C++ Architecture for Unmanned Aerial Vehicle Simulations, AFRL-MN-EG-TP-2007-7415.
- [6] Zipfel, P. H. (2000), Modeling and Simulation of Aerospace Vehicle Dynamics, *AIAA Education Series*, AIAA, Virginia.
- [7] IEEE Standard 1516.3 (2003), IEEE recommended practice for high level architecture (HLA) Federation Development & Execution Process (FEDEP).
- [8] IEEE Standard 1730 (2010), IEEE Recommended Practice for Distributed Simulation Engineering and Execution Process (DSEEP).
- [9] IEEE Standard 1516 (2010), IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA)- Framework and Rules.
- [10] Anagnostou, A. ve Taylor, S. J. E. (2017), A Distributed Simulation Methodological Framework for OR/MS Applications, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 70, 101-119.
- [11] Scerri, D., Drogoul, A., Hickmott, S. L. ve Padgham, L. (2010), An Architecture for Modular Distributed Simulation with Agent-Based Models, *9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2010)*, Toronto, Canada.
- [12] Muaz, A. N. ve Hussain, A. (2011), A Novel Agent-Based Simulation Framework for Sensing in Complex Adaptive Environments, *IEEE Sensors Journal*, 11(2), 404-412.
- [13] Bouarfa, S., Blom, H. A. P., Curran, R. ve Everdij, M. H. C. (2013), Agent-Based Modeling and Simulation of Emergent Behavior in Air Transportation, *Complex Adaptive Systems Modeling*, 1(1).
- [14] Schumann, B., Scanlan, J. ve Fangohr, H. (2012), Complex Agent Interactions in Operational Simulations for Aerospace Design, *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)*, Berlin, Germany.
- [15] Zipfel, P. H. (2012), CADAC: Multi-use Architecture for Constructive Aerospace Simulations, *The Journal of Defense Modeling & Simulation*, 9(2), 129-145.
- [16] Ören, T. ve Yılmaz, L. (2012), Synergies of Simulation, Agents and Systems Engineering, *Expert Systems with Applications*, 39(1), 81-88.
- [17] Macal, C. M. ve North, M. J. (2009), Agent-Based Modeling and Simulation, *Proceedings of Winter Simulation Conference (WSC'09)*, 86-98.
- [18] Görür, B. K. ve Çallı, A. N. (2017), Semi-Automatic Parallelization of Simulations with Model Transformation Techniques, *Proceedings of the Symposium on Model-driven Approaches for Simulation Engineering (SpringSim, Mod4Sim'17)*, Virginia Beach, Virginia, USA.
- [19] Kang, D., Bing, Z. C., Song, W., Hu, Z., Chen, S., Zhang, J. ve Xi, H. (2017), Automatic Construction of Agent-based Simulation Using Business Process Diagrams and Ontology-based Models, *16th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2017)*, São Paulo, Brazil.
- [20] Jafer, S., Chhaya, B., Durak, U. ve Gerlach, T. (2016), Formal Scenario Definition Language for Aviation: Aircraft Landing Case Study, *2016 AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*, Washington, D.C., Amerika Birleşik Devletleri.
- [21] Demirtaş, Ö. ve Görür, B. K. (2017), Koşut ve Dağıtık Monte Carlo Koşturucusu, *Yedinci Ulusal Savunma Uygulamaları Modelleme ve Simülasyon Konferansı (USMOS 2017)*, Ankara, Türkiye, 484-495.

## KOŞUT VE DAĞITILMIŞ ETMEN TABANLI BENZETİMLERDE ZAMAN YÖNETİM MEKANİZMALARININ BAŞARIMINI ETKİLEYEN ETKENLER

**Bilge Kaan Görür <sup>(a)</sup>, Kayhan M. İmre <sup>(b)</sup>, Halit Oğuztüzün <sup>(c)</sup>**

<sup>(a)</sup> ROKETSAN A.Ş., Kemalpaşa Mah. Şehit Yüzbaşı Adem Kutlu Sk. No:21, Elmadağ  
Ankara, bkaangorur@gmail.com

<sup>(b)</sup> Hacettepe Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, ki@hacettepe.edu.tr

<sup>(c)</sup> Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü,  
oguztuzn@ceng.metu.edu.tr

### ÖZ

Hesaplama teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte hem araştırmacıların hem de kullanıcıların modelleme ve benzetim teknolojilerinden olan beklentileri gün geçtikçe artmaktadır. Gerçekçiliği daha yüksek ve daha doğru sonuçlar üreten benzetimler için koşut ve dağıtılmış işlem gücü kaynaklarından yararlanmak neredeyse zorunlu bir hale gelmiştir. Koşut ve dağıtılmış benzetimlerin başarımını etkileyen faktörlerin başında zaman yönetim mekanizmaları gelmektedir. Bu nedenle geliştirme çalışmalarından önce zaman yönetim mekanizmalarının başarımını etkileyen etkenlerin iyi bilinmesi ve çok yönlü bir şekilde analiz edilmesi gerekir. Bu bildiride zaman yönetim mekanizmalarının başarımına etki eden etkenler uzamsal-koşut etmen tabanlı benzetimler özelinde ele alınmıştır. Daha önceki çalışmalar kapsamında yapılan deneylerin sonuçları analiz edilmiş ve geliştiriciler için birtakım öneriler sunulmuştur. Böylece; mantıksal işlemleri benzetim zamanını zaman uyumlu bir şekilde ilerletmeye zorlayan sakıngan zaman yönetim mekanizmasının ve mantıksal işlemlerin benzetim zamanını zaman uyumsuz bir şekilde ilerletmesine izin veren iyimser zaman yönetim mekanizmasının seçimi konusunda geliştiricilere yol gösterebilecek bir çalışma sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Etmen tabanlı modelleme ve benzetim, iyimser zaman yönetim mekanizması, koşut ve dağıtılmış benzetim, sakıngan zaman yönetim mekanizması, zaman uyumlama.

## THE FACTORS THAT AFFECT THE PERFORMANCE OF TIME MANAGEMENT MECHANISMS IN PARALLEL AND DISTRIBUTED AGENT-BASED SIMULATIONS

### ABSTRACT

In parallel with developments in computing technologies, expectations of researchers and users from modeling and simulation technologies increases. Leveraging parallel and distributed processing became inevitable for high fidelity and high accuracy simulations. Time management mechanism selection is one of the primary factors that determine the performance of a simulation. Therefore, the factors that affect the performance of time management mechanisms should be well-understood and analyzed in a multifaceted way before the development phase. In this paper, the factors that affect the performance of time management mechanisms are examined in the context of spatially parallel agent-based simulations. The experiments that are performed in our previous studies are analyzed, and some recommendations are made for simulation developers. Thus, a study is presented that guides the developers in selecting between the conservative time management mechanism that forces logical processes to advance the simulation time synchronously and the optimistic time management mechanism that allows logical processes to advance simulation time asynchronously.

**Keywords:** Agent based modeling and simulation, conservative time management, optimistic time management, parallel and distributed simulation, synchronization.

### 1. GİRİŞ

Araştırmacıların modelleme ve benzetim dünyasından beklentileri her geçen gün artmakta ve benzetimlerin daha gerçekçi olması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Gerçekçiliği yüksek benzetimlerin elde edilmesi için de yüksek sadakat seviyeli modellerin ortaya çıkmasına ihtiyaç vardır. Modellerin sadakat seviyeleri arttıkça benzetimlerin koşum sürelerinin artması kaçınılmazdır. Koşum sürelerini makul seviyelere çekebilmek güncel hesaplama teknolojilerinin gücünden azami derecede yararlanarak mümkündür. Bu amaçla çok sayıda hesaplama kaynağını koşut veya dağıtılmış şekilde bir arada kullanarak benzetimleri daha kısa sürede tamamlama ihtiyacına yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Etmen tabanlı modelleme ve benzetim, karmaşık olguları özerklik sahibi elemanlar ve etkileşimleri cinsinden modellemek için araştırmacılar tarafından sıklıkla başvuru bir yaklaşımdır. Etmen kavramı literatürdeki birçok kaynakta farklı şekillerde tanımlanmakta olup, bu kaynaklar göz önünde bulundurularak amacımıza uygun bir tanım şu şekilde verilebilir: “otonom bir davranışı olan, bulunduğu ortamı ve diğer etmenleri algılayarak eylemini gerçekleştiren ve ortama etkide bulunan yazılım varlıkları” [1, 2, 3]. Etmen



tabanlı benzetimlerde de gerçekçiliğin artırılması açısından çok yüksek sayıda etmen kullanılması veya her bir etmenin işlem yükünün kayda değer seviyede yüksek olması gerekebilmektedir. Bu nedenle yüksek başarımlı hesaplama sistemlerinden yararlanmak etmen tabanlı benzetimler için de bir ihtiyaç haline gelmiştir. Koşut ve dağıtılmış çok etmenli benzetimlerin YBH sistemlerinde geliştirilmesi konusundaki geniş bir literatür taraması [4] çalışmasında görülebilir.

Koşut ve dağıtılmış benzetim (KDB) çalışmalarındaki önemli sorunlardan bazıları koşut kaynakların nasıl kullanılacağı, bu kaynaklardan en yüksek verimin nasıl elde edileceği, hangi zaman uyumlama mekanizmaları kullanıldığında en iyi sonuçların alınacağı gibi üzerinde özenli bir çalışma gerektiren sorunlardır. Aksi takdirde koşut kaynaklardan yeterince yararlanılamayacak ve koşut işlem için harcanan ek iş yükü boşa gidecektir. Hatta zaman uyumlama gibi görece maliyetli işlemler dolayısıyla koşut benzetimlerden hızlanma elde edememek bile söz konusu olabilir. KDB'deki bu sorunlar etmen tabanlı geliştirilen benzetimlerin koşut veya dağıtılmış olarak çalıştırılmasında da geçerlidir. Buna ek olarak etmen tabanlı koşut benzetimlerde başarıma etki eden birtakım farklı etkenlerden de söz etmek mümkündür. Bu bildiride uzamsal-koşut etmen tabanlı benzetimlerde zaman yönetim mekanizmalarının başarımlı etkileyen etkenler incelenmiştir. Bu inceleme [5, 6, 7] çalışmalarında kullanılan deney sonuçlarının analiz edilmesiyle yapılmıştır. Böylece benzetim geliştiricilerinin benzetimi koşut kaynaklarda çalıştırma aşamasından önce zaman yönetim mekanizmasıyla ilgili dikkat etmesi gereken konulara yönelik öneriler sunulmuştur.

## **2. TEMEL KAVRAMLAR VE BENZER ÇALIŞMALAR**

Bu bölümde, bildiri boyunca sıkça söz edilen temel kavramlar gözden geçirilmiş ve etmen tabanlı koşut benzetimlerin başarımlı etkileyen etkenleri inceleyen benzer çalışmaların kısa bir özeti verilmiştir. Çalışmanın kalan kısmında, koşut veya dağıtılmış bir benzetime katılarak benzetimin bir bölümünü gerçekleştirme görevini üstlenen işlemler mantıksal işlem adıyla anılacaktır [3, 8]. Mantıksal işlemler birbirine koşut olarak çalışıp benzetimi birlikte yürütürler.

### **2.1. KOŞUT VE DAĞITILMIŞ ETMEN TABANLI BENZETİMLER**

Etmen tabanlı modellerin koşut kaynaklarda çalıştırılmasına yönelik iki temel yaklaşım mevcuttur: etmen-koşut yaklaşım, uzamsal-koşut (ortam-koşut) yaklaşım [9]. Etmen-koşut yaklaşımda işlemciler benzetimdeki etmenlerin belli bir kısmının sorumluluğunu üstlenerek bu etmenleri yönetir. Uzamsal-koşut yaklaşımda ise benzetim uzayı alt uzaylara bölünür ve işlemciler bu alt uzayda yaşayan etmenleri yönetirler. Bu yaklaşımlardan birinin diğerinden üstün olduğunu söylemek mümkün değildir; her iki yaklaşımın da artıları ve eksileri bulunmaktadır. Örneğin; eğer etmenler arası etkileşim komşuluk tabanlı (uzaklık tabanlı) olarak modelleniyorsa etmen-koşut yaklaşım tercih



çıkmasına izin vermez. İyimser zaman yönetim mekanizmaları ise mantıksal işlemlerin benzetim zamanını zaman uyumsuz bir şekilde ilerletmesine izin verir. Böylece mantıksal işlemler, diğer mantıksal işlemlerin benzetim zamanını gözetmeksizin sadece kendi işlerini yapmaya odaklanırlar. Bu yönüyle iyimser zaman yönetim mekanizmaları maliyetli zaman uyumlama işlemlerinden kurtulmuş olurlar. Ancak mantıksal işlemler bu zaman uyumlamanın bozulmasından dolayı diğer mantıksal işlemlerden geçmiş zaman damgalı ileti alabilirler. Bir başka deyişle bir mantıksal işlemin benzetim zamanı diğerlerinin ilerisinde seyredebilir ve bunun sonucunda da nedensellik hataları ortaya çıkabilir. İyimser zaman yönetim mekanizmaları bu hataları düzeltmek üzere benzetim zamanını geri sarma işlemleri (İng. *rollback*) başlatmak durumunda kalır [8].

Sakıngan ve iyimser zaman yönetim mekanizmalarının özet bir karşılaştırması Tablo 1’de verilmiştir. Bu zaman yönetim mekanizmalarından birinin diğerinden üstün olduğunu söylemek mümkün değildir. Ancak benzetimi yapılacak modelin özellikleri, benzetimin koşut kaynaklara dağıtılması ve zaman yönetim mekanizmalarının kullandığı yöntemler göz önünde bulundurularak uygun zaman yönetim mekanizmasını tercih etmek mümkündür [3].

**Tablo 1.** Sakıngan ve iyimser zaman yönetim mekanizmalarının karşılaştırması [3]

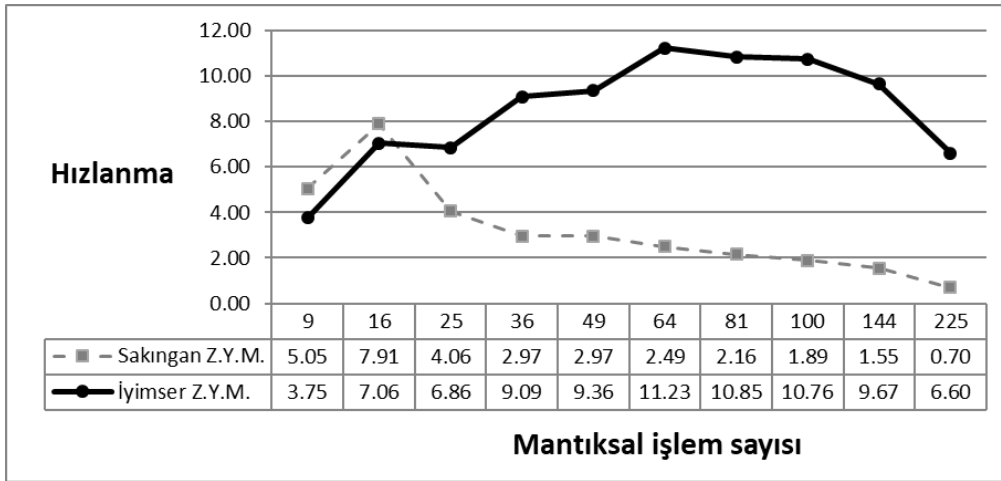
Sakıngan Zaman Yönetim Mekanizması	İyimser Zaman Yönetim Mekanizması
Sıkı zaman uyumlama	Gevşek zaman uyumlama
Güvenli olay işletimi	Hızlı olay işletimi
Basit gerçekleştirim	Gelişmiş mekanizmalara gereksinim duyulması
Ağdaki maliyetlerden kaynaklı pahalılık	Çok sayıda geri sarma işlemi olması durumunda ortaya çıkan pahalılık
Tekrarlanabilirliğin kolay sağlanması	Olayların tekrar işletilmesi gerektiği durumlarda tekrarlanabilirliğin bozulması

### 3. ZAMAN YÖNETİM MEKANİZMALARININ BAŞARIMINA ETKİ EDEN ETKENLER

KDB’lerin başarımını etkileyen en önemli konulardan bir tanesi zaman yönetim mekanizmalarıdır. Bununla birlikte zaman yönetim mekanizmasının nasıl seçileceği de önemli bir sorundur. Bu seçim sırasında öncelikle Tablo 1’de verilen karşılaştırma göz önünde bulundurulmalıdır. Ancak tek başına zaman yönetim mekanizmalarının teorik özelliklerini bilmek yeterli değildir. Yapılan deneyler göstermiştir ki zaman uyumlama mekanizmalarının başarımı donanımsal özelliklerden model özelliklerine kadar birçok farklı parametreden etkilenmektedir. Daha önce yapılan deneylerden elde edilen sonuçların analizi yapılarak bu parametrelerin başarıma etkisi aşağıda incelenmiştir.

### 3.1. Donanım mimarisi

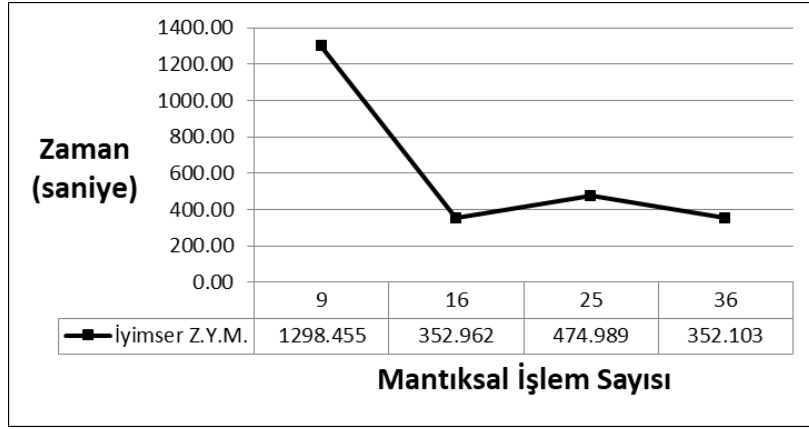
Koşut ve dağıtılmış sistemlerde hesaplamalara ve iletişime harcanan zaman arasındaki oran başarımı kayda değer bir şekilde etkiler [12]. Zaman uyumlama yöntemlerinin seçiminde, kullanılacak sistemin hesaplamalara ve iletişime ayırabileceği iş yükü göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin paylaşımlı bellek kullanan bir sistemde mantıksal işlemler arası iletişim için ağ üzerinden bir iletişim gerekmeyecek, dolayısıyla iletişim maliyeti oldukça düşük olacaktır. Ancak dağıtılmış bir mimari kullanıldığında mantıksal işlemler arasındaki iletişim MPI (A Message-Passing Interface Standard) [13] gibi standartları kullanan kütüphaneler aracılığıyla ağ üzerinden gerçekleştirilebilir. Dolayısıyla dağıtılmış bir mimari kullanıldığında benzetime katılan mantıksal işlemler arasındaki zaman uyumlama maliyeti de artacaktır. Bu durum pahalı zaman uyumlama maliyetlerinden kaçınan iyimser zaman yönetim mekanizmalarının dağıtılmış bellekli mimarilerde daha tercih edilebilir olacağına yönelik bir ipucu vermektedir. Örneğin; [5] çalışmasında yapılan deneylerde elde edilen sonuçlardan bir tanesi Şekil 2’de verilmiştir. Bu deneyler bir Beowulf kümesi (geçici olarak kurulmuş bir dağıtılmış hesaplama kümesi) üzerinde yapılmıştır. Dolayısıyla deney sonuçlarından da anlaşılacağı üzere, işlemci sayısı arttıkça iyimser zaman yönetim mekanizması sakıngan zaman yönetim mekanizmasına göre daha hızlı ve ölçeklenebilir sonuçlar vermiştir.



Şekil 2. Geçici bir dağıtılmış hesaplama kümesinde yapılan zaman yönetim mekanizmalarının karşılaştırılması deneyi [5].

[6] çalışmasında yapılmış deneyler incelendiğinde donanım mimarisindeki küçük değişimlerinin benzetimlerin başarımına olan etkisi açıkça görülmektedir. Bahsi geçen çalışmada yapılan deneylerden bir tanesinin sonucu Şekil 3’te verilmiştir. Deneylerin yapıldığı YBH sisteminde her biri 16 çekirdek içeren 4 fiziksel işlemci bulunmaktadır. İyimser bir zaman yönetim mekanizmasının kullanıldığı benzetimlerde benzetimlerin çalışma sürelerinin çekirdek sayısı arttıkça doğrusal bir şekilde azalmadığı görülmektedir. Çalışma sürelerinin çekirdek sayısına bağlı olarak bu düzensiz değişimi Amdahl

Yasasının [14] olumsuz etkisiyle açıklanabilir bir durum da değildir. Çünkü en hızlı koşumlar 16 çekirdek kullanıldığında alınmış ve çekirdek sayısı 25'e çıkarıldığında koşum süresi düşmüştür; ancak çekirdek sayısı artırılmaya devam ettiğinde yeniden bir hızlanma gözlenmiştir. Bu düzensizliğin nedeni aynı işlemcinin sahip olduğu çekirdekler arasındaki iletişim yükü ile farklı işlemciler üzerindeki çekirdekler arasındaki iletişim yükünün farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bir başka deyişle; 16 çekirdek kullanıldığında çekirdekler arasındaki iletişim yükü görece az olduğu için benzetimler hızlı çalışmıştır; ancak çekirdek sayısı 25'e çıkarıldığında çekirdekler arası zaman uyumlama maliyetlerinin pahalı olması işlem yüküne göre baskın gelmiş ve benzetimlerin bir miktar yavaşlaması söz konusu olmuştur. Çekirdek sayısı 32'ye çıkarıldığında ise koşut kaynakların artmasıyla birlikte yeniden bir hızlanma görülmüştür. İlgili çalışmadaki diğer deneylerde de benzer durum gözlenmiştir.



**Şekil 3.** Her biri 16 çekirdek içeren 4 işlemcinin kullanıldığı bir YBH sisteminde iyimser zaman yönetim mekanizmasının koşuturulması [6].

### 3.2. İşlemlerin koşut kaynaklara dağıtılması

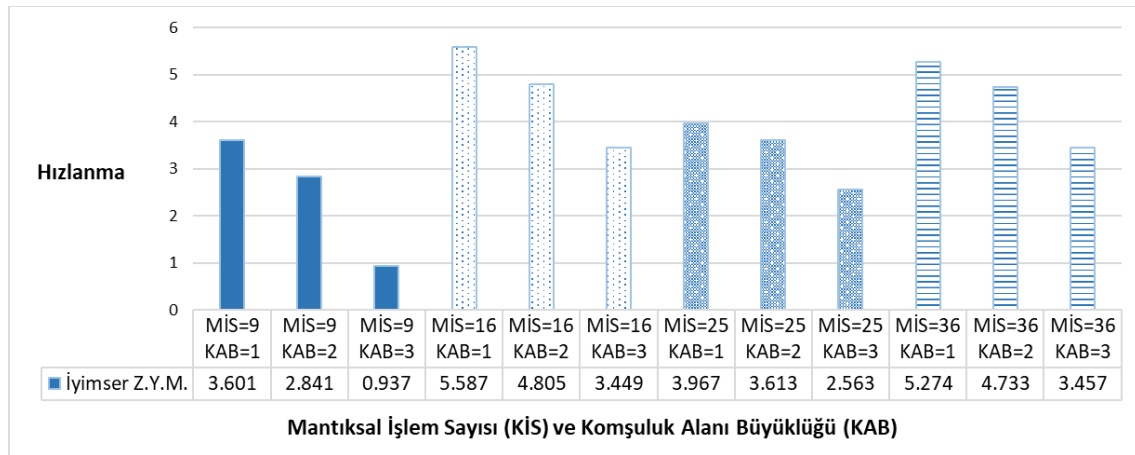
KDB'lerden iyi bir başarımla elde edebilmek için işlemlerin kaynaklara uygun bir şekilde dağıtılması oldukça önemlidir. Çünkü işlemlerin kaynaklara dağıtılması, mantıksal işlemler arasındaki iletişim maliyetini ve bunun sonucunda da benzetimlerin başarımlarını ciddi bir şekilde etkiler [15]. Bir önceki bölümde bahsedildiği üzere iletişim maliyetleri zaman uyumlama mekanizmalarının başarımlarını üzerinde de bir etkiye sahiptir. Uzamsal-koşut etmen tabanlı benzetimler açısından bakıldığında etmenler arasındaki etkileşim komşuluk ilişkisi üzerinden ele alınmaktadır. Mantıksal işlemler arasındaki iletişim ihtiyacı da tampon alanda bulunan etmenlerin komşuluk ilişkisinden kaynaklı olarak ortaya çıkar. Dolayısıyla komşu alt uzayları yöneten mantıksal işlemler arasındaki iletişim yükünün en aza indirilmesi zaman yönetim mekanizmalarının başarımlarını artıracaktır. Sakıngan zaman yönetim mekanizmalarında mantıksal işlemler arasında daha sık zaman uyumlama, dolayısıyla mesajlaşma, yapılmaktadır. Bu nedenle, işlemlerin koşut kaynaklara daha verimli olacak şekilde dağıtılmasının sakıngan zaman yönetim mekanizmalarına daha da olumlu etkide bulunacağı değerlendirilmektedir.

### 3.3. Etmenler arası etkileşim olasılığı

Etmen tabanlı benzetimlerde mantıksal işlemleri zaman uyumlamaya zorlayan şey etmenler arasında gerçekleşen etkileşimin doğru ve zamanında yapılabilmesidir. Bu nedenle etmenler arası etkileşimin yoğun olduğu benzetimler daha sık zaman uyumlamaya ihtiyaç duyacaktır. Etmenler arası etkileşim olasılığı komşuluk alanı büyüklüğü ve etmen yoğunluğu parametrelerine bağlı olarak ele alınabilir.

#### 3.3.1. Komşuluk alanı büyüklüğü

Uzamsal koşut benzetimlerde tampon alanlarda etmen bulunması mantıksal işlemler arası etkileşimi, yani zaman uyumlamayı tetikler. Çünkü komşu alt uzayda tampon alandaki etmenlerle etkileşime girebilecek bir etmenin bulunup bulunmadığını öğrenebilmek, ancak ve ancak bir zaman uyumlama işlemiyle gerçekleşebilir. Bu nedenle zaman uyumlama tampon alandaki etmenlerden kaynaklı olarak ortaya çıkar. Bunun bir sonucu olarak da mantıksal işlemler arası etkileşim olasılığı tampon alanlarda etmen bulunma olasılığı ile doğru orantılıdır denilebilir. Tampon alanı büyüklüğü arttıkça etkileşim olasılığı ve zaman uyumlama ihtiyacı artacak; bunun sonucunda da koşut kaynaklardan alınan verim düşecektir. [6] kaynağındaki çalışmada farklı komşuluk alanı büyüklüğü değerleri için yapılan bazı deney sonuçları Şekil 4'te verilmiştir. Bu deneylerde komşuluk alanı büyüklüğü arttıkça iki farklı iyimser zaman yönetim mekanizmasının başarımının düştüğü görülmektedir.



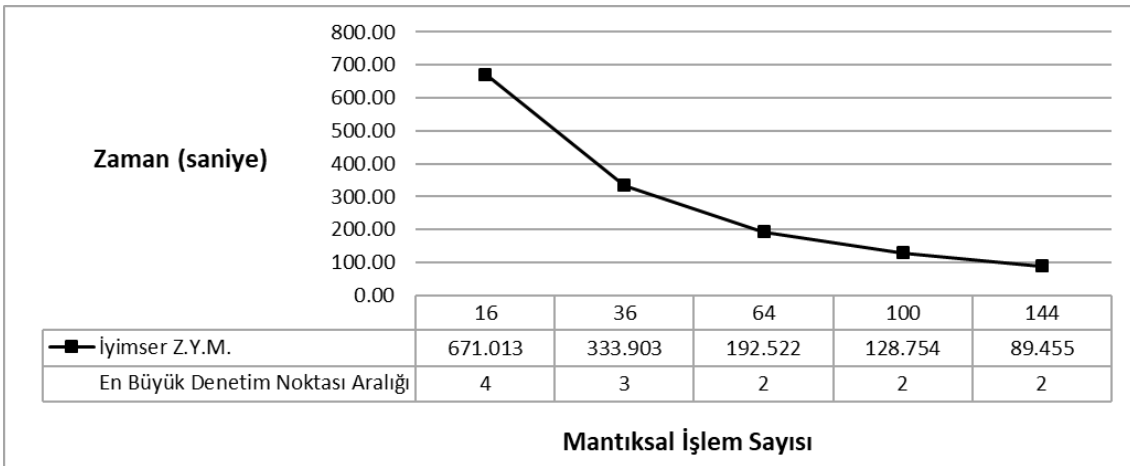
**Şekil 4.** Komşuluk alanı büyüklüğünün iyimser zaman yönetim mekanizmasının başarımına etkisi [6].

Koşut hesaplamasının doğru bir şekilde yapılabilmesi için tampon alanı büyüklüğünün en az etmenlerin etkileşime girebileceği komşuluk alanı kadar seçilmesi gerekir. Dolayısıyla daha genel bir şekilde ifade etmek amacıyla etkileşim olasılığı komşuluk alanı büyüklüğü ile ilişkilidir denilebilir.

### 3.3.2. Etmen yoğunluğu

Mantıksal işlemler arası etkileşim olasılığını etkileyen bir diğer etken de etmen sayısı ve alt uzay büyüklüğüdür. Etmen sayısı arttıkça doğal olarak tampon alanda etmen bulunma olasılığı artacak; bunun sonucunda da daha çok zaman uyumlama ihtiyacı ortaya çıkacaktır. Etmen sayısının sabit olup alt uzay büyüklüğünün arttığı durumlarda ise tampon alanda etmen bulunma olasılığı azalacağı için zaman uyumlama ihtiyacı da azalacaktır. Dolayısıyla etmen sayısı ve alt uzay büyüklüğünü daha genel şekilde etmen yoğunluğu olarak ifade etmek mümkündür. Mantıksal işlemlerin etmen yoğunluğunu göz önünde bulundurarak etkileşim olasılığına dair kestirimler yapılabilir.

[7] çalışmasında yapılan deneylere ait örnek bir sonuç Şekil 5'te verilmiştir. Bu deneylerde tüm uzay büyüklüğü ve etmen sayısı sabit tutulup, benzetimin daha fazla mantıksal işlem tarafından paylaşılması sağlanmıştır. Bir başka deyişle etmen sayısı sabit tutulurken alt uzay büyüklüğü azaltılmış, yani etmen yoğunluğu artırılmıştır. Deney sonuçlarında mantıksal işlem sayısı arttığı için benzetimlerin daha hızlı çalıştığı görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan iyimser zaman yönetim mekanizmaları kendiliğinden uyarlanan (İng. *self-adaptive*) denetim noktası mekanizmaları kullanmakta, böylece zaman uyumlama mekanizması benzetimin durumuna göre daha sakıngan veya daha iyimser davranabilmektedir. Bu deneylerde elde edilen en büyük denetim noktası aralığı değerlerine bakıldığında, zaman yönetim mekanizmalarının etmen yoğunluğu arttıkça daha sakıngan davranarak daha sık zaman uyumlama yaptığı görülmektedir.



Şekil 5. İyimser zaman yönetim mekanizması kullanıldığında elde edilen en büyük denetim noktası aralıkları [7]

### 3.4. Model özellikleri

Zaman uyumlama mekanizmalarının başarımını etkileyen bir diğer etken de modelin anlamsallığıdır (İng. *model semantics*). Etmenlerin uzay üzerindeki hareket sıklığı, komşu işlemler arasındaki transferi, birbiriyle etkileşime girme olasılığı gibi parametreler ne sıklıkla zaman uyumlama yapılması gerektiğini belirler. Dolayısıyla zaman yönetim

mekanizması seçilirken modelin anlamsallığı da mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin; hücresele özdevinir (İng. *cellular automaton*) modellerinde uzaydaki her hücre komşu hücrelerle sürekli olarak etkileşim halinde olduğu için mantıksal işlemlerin de komşularıyla zaman uyumlu olarak ilerlemesi gereklidir. Dolayısıyla bu tür modeller için sakıngan zaman yönetim mekanizmalarının daha tercih edilebilir olacağı değerlendirilmiştir. Zaman yönetim mekanizmalarının model anlamsallığına bağılı olarak seçimine dair ayrıntılı bir değerlendirme [3] çalışmasında verilmiştir.

### 3.5. Gelişmiş mekanizmaların kullanımı

En temel sakıngan zaman yönetim mekanizmaları [16, 17] ve iyimser zaman yönetim mekanizmaları (Jefferson tarafından geliştirilen Time Warp mekanizması [18]) 30 yıldan fazla bir süredir çalışılmaktadır. Dolayısıyla bu mekanizmalara geliştirilen uzantılar ile zaman yönetim mekanizmalarının başarımını iyileştiren bir çok çalışmaya rastlamak mümkündür. Ölçeklenebilir yapısından dolayı araştırmaların önemli bir kısmı özellikle iyimser zaman yönetim mekanizmalarına yönelik iyileştirmeler önermiştir. Örneğin; iyimser zaman yönetim mekanizmasının başarımının denetim noktası alma mekanizmalarının seçimine sıkı bir şekilde bağımlı olduğu bir çok çalışmada gösterilmiştir [19]. Denetim noktaları, iyimser zaman yönetim mekanizmalarında mantıksal işlemlerin zaman uyumlamasının yapıldığı noktalardır. Bir çok denetim noktası mekanizması, zaman uyumlama yaptıktan sonra benzetim durumunu da kaydeder ve ileride gerekebilecek geri sarma işlemleri için bir geri yükleme noktası oluşturur. Denetim noktalarının ne zaman alınacağını belirlemek iyimser zaman yönetim mekanizmalarının başarımını ciddi anlamda etkiler. Denetim noktalarının sık alınması durumunda mantıksal işlemler sürekli olarak durum kaydetme ve zaman uyumlama işlemleri ile boğuşmak durumunda kalabilir. Daha seyrek alındığı durumlarda ise geri sarma işlemlerinin çok maliyetli olmasına neden olunabilir. Dolayısıyla benzetim zamanında kendisini uyarlayabilir (İng. *self-adaptive*) denetim noktası mekanizmalarının daha tercih edilebilir olduğu ve iyimser zaman yönetim mekanizmasının başarımını iyileştirdiği görülmüştür [7, 19].

İyimser zaman yönetim mekanizmalarını iyileştirmeyi amaçlayan bazı çalışmalar ise oldukça pahalı olan geri sarma işlemlerinin maliyetini azaltmayı amaçlar. Bu amaçla geri sarmaların sayısını azaltmaya çalışan [7] veya benzetimlerin doğruluğundan taviz vererek geri sarmalardan kaçınan çalışmalara [20, 21] rastlamak mümkündür. Yazılımsal çözüm sunan bir çok çalışmanın yanı sıra donanımsal özellikleri kullanarak başarımı artırmayı amaçlayan çalışmalara [22] da rastlanmaktadır.

## 4. SONUÇ

Bu çalışmada uzamsal-koşut etmen tabanlı benzetimlerde zaman yönetim mekanizmasının başarımını etkileyen etkenler incelenmiştir. Bu inceleme daha önceki



çalışmalarda yapılan deneylerin sonuçları ve literatürdeki çalışmalar gözden geçirilerek gerçekleştirilmiştir. Kullanılan donanım mimarisinin, işlemlerin koşut kaynaklara dağıtım stratejisinin, mantıksal işlemler arasındaki etkileşim olasılığının ve benzetimi yapılan model özelliklerinin zaman yönetim mekanizmalarının başarımı üzerinde önemli etkileri olduğu görülmüştür. Ayrıca zaman yönetim mekanizmalarının birtakım uzantılarla genişletildiği durumlarda da benzetimlerin hızlandırılabilirdiği bir çok çalışmada görülmüştür. Bu bildiride yapılan incelemeler, koşut benzetim geliştiricilerinin benzetim geliştirme aşamasına geçmeden önce hangi zaman yönetim mekanizmasını kullanabileceğine dair bir kılavuz sağlamaktadır. Dikkat edilmesi gereken nokta, zaman uyumlama mekanizmalarının başarımını etkileyen parametrelerin tek başına değerlendirilmesinin yeterli olmayacağıdır. Örneğin ilk bakışta paylaşımlı bellekli bir sistemde sakıngan zaman yönetim mekanizmasının daha başarılı sonuçlar vereceği öngörülebilir. Ancak gerek modellerin özellikleri gerekse iyimser zaman yönetim mekanizmasına eklentiler sağlayan gelişmiş mekanizmalarla birlikte iyimser zaman yönetim mekanizmalarının bu mimarilerde de başarılı sonuçlar vermesinin mümkün olduğu görülmüştür [3]. Dolayısıyla en iyi zaman uyumlama mekanizmasının seçimi için bu çalışmada verilen parametrelerin bir arada değerlendirilerek benzetim başlamadan önce çok yönlü bir analiz yapılması gerekmektedir.

## 5. TEŞEKKÜR

Bu bildiriye konu olan araştırmalar ODTÜ-TSK MODSİMMER, ODTÜ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü ve TÜBİTAK ULAKBİM tarafından sunulan farklı koşut veya dağıtılmış hesaplama altyapıları kullanılarak yapılan deneyler sonucu elde edilmiştir. Bu kurumlara sağladıkları destekler için teşekkür ederiz.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] Ören, T. ve Yılmaz, L. (2012), Synergies of Simulation, Agents, and Systems Engineering, *Expert Systems with Applications*, 39(1), 81-88.
- [2] Macal, C.M. ve North, M.J. (2009), Agent-Based Modeling and Simulation, *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, 86-98.
- [3] Görür, B.K. (2019), Uzamsal Koşut ve Dağıtılmış Benzetimler için İyimser bir Zaman Yönetim Mekanizması, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi.
- [4] Rousset, A., Herrmann, B., Lang, C. ve Philippe L. (2016), A survey on parallel and distributed multi-agent systems for high performance computing simulations, *Computer Science Review*, 22, 27-46.
- [5] Görür, B.K., İmre, K.M., Oğuztüzün, H. ve Yılmaz, L. (2016), Repast HPC with Optimistic Time Management, *Proceedings of the 24th High Performance Computing Symposium (SpringSim, HPC '16)*, 398-406.

- [6] Görür, B.K., İmre, K.M., Oğuztüzün, H. ve Yılmaz, L. (2017), Improving the Performance of Optimistic Time Management Mechanism with Sub-State Saving, *Proceedings of the 25th High Performance Computing Symposium (SpringSim, HPC '17)*, 590-601.
- [7] Görür, B.K., İmre, K.M., Oğuztüzün, H. ve Yılmaz, L. (2019), Predetermined Rollbacks: An Extension to Time Warp for Spatially Parallel Agent-Based Simulation, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 95, 60-77.
- [8] Fujimoto, R.M. (2000), *Parallel and Distributed Simulation Systems*, 1. Baskı, John Wiley and Sons, Inc.
- [9] Parry, H.R. ve Bithell, M. (2012), Large Scale Agent-Based Modelling: A Review and Guidelines for Model Scaling, *Agent-Based Models of Geographical Systems*, Springer, Dordrecht, 271-308.
- [10] Fachada, N., Lopes, V.V., Martins, R.C. ve Rosa, A.C. (2017), Parallelization Strategies for Spatial Agent-Based Models, *International Journal of Parallel Programming*, 45(3), 449-481.
- [11] Jafer, S., Liu, Q. ve Wainer, G. (2013), Synchronization Methods in Parallel and Distributed Discrete-Event Simulation, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 30, 54-73.
- [12] Grama, A., Gupta, A., Karypis, G. ve Kumar, V. (2003) *Introduction to Parallel Computing*, 2. Baskı, Pearson Education – Addison Wesley.
- [13] MPI: A Message-Passing Interface Standard, Version 3.1 (2015), <https://www.mpi-forum.org/docs/mpi-3.1/mpi31-report.pdf>, Erişim tarihi: 31.05.2019.
- [14] Amdahl, G.M. (1967), Validity of the single processor approach to achieving large scale computing capabilities, *Proc. of the April 18-20, 1967, Spring Joint Computer Conference*, 483-485.
- [15] Çelik, T. (2013), *Federe Tabanlı Koşut ve Dağıtılmış Benzetim Sistemlerinin Mimari Modellemesi*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi.
- [16] Chandy, K.M. ve Misra, J. (1979), Distributed simulation: a case study in design and verification of distributed programs, *IEEE Transactions on Software Engineering*, 5(5), 440-452.
- [17] Bryant, R.E. (1977), *Simulation of packet communication architecture computer systems*, Teknik Rapor, Massachusetts Institute of Technology.
- [18] Jefferson, D.R. (1985), Virtual Time, *ACM Transactions on Programming Languages and Systems (TOPLAS)*, 7(3), 404-425.
- [19] Fleischmann, J. ve Wilsey, P.A. (1995), Comparative Analysis of Periodic State Saving Techniques in Time Warp Simulators, *Proceedings of the 9th Workshop on Parallel and Distributed Simulation*, 50-58.
- [20] Fujimoto, R.M. (1999), Exploiting Temporal Uncertainty in Parallel and Distributed Simulations, *Proceedings of the Thirteenth Workshop on Parallel and Distributed Simulation*, 46-53.
- [21] Quaglia, F. ve Beraldi, R. (2004), Space uncertain simulation events: some concepts and an application to optimistic synchronization, *18th Workshop on Parallel and Distributed Simulation*, 181-188.
- [22] Child, R. ve Wilsey, P. (2012), Dynamically Adjusting Core Frequencies to Accelerate Time Warp Simulations in Many-Core Processors, *Proceedings of the 2012 ACM/IEEE/SCS 26th Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation*, 35-43.

# ARTIRILMIŞ GERÇEKLIK TABANLI VERİ ANALİZ SİSTEMLERİNİN H-ARF ALTYAPISI İLE ASKERİ ALANDA KULLANIMI

**Diren Düzgünoğlu<sup>(a)</sup>, Damla Aslan<sup>(a)</sup>, Abdullah Alphan Erten<sup>(a)</sup>**

**<sup>(a)</sup> ARGE, Teknoloji ve Ürün Yönetimi Direktörlüğü, HAVELSAN**

{dduzgunoglu, daslan, aerten}@havelsan.com.tr

## ÖZ

Günümüzde büyük veri ve artırılmış gerçeklik en hızlı gelişim ve yaygınlaşma gösteren teknolojiler arasındadır. Savunma sanayii başta olmak üzere fabrikalardaki kullanımı da oldukça revaçtadır. Askeri alanda eş zamanlı tatbikatlarda ve endüstri 4.0'da üretim süreçlerinde sensörlerden toplanan verinin zenginleştirilerek artırılmış gerçeklik teknolojisi ile görselleştirilmesi için söz konusudur. Dijital dönüşümün savaş ve meskûn mahal alanlarına taşınması ile komuta merkezi ve sahadan alınan kamera görüntüleri, kolluk kuvvetleri veri tabanlarında arşivlenen veriler ve anlık gerçekleşen olaylara dair toplanan veriler gibi tüm veriler; eş zamanlı ortamda bilgi alışverişine imkân tanımaktadır. Artırılmış verilerin sahadaki askerin önüne bilgi olarak yansımaları, karar almayı kolaylaştırarak operasyonu hızlandırıcı rol oynamaktadır. Şüphesiz ki böyle bir komuta kontrol karar destek sisteminin en güçlü yönü, artırılmış gerçeklik tabanlı veri aktarımı altyapısıdır. Bu sistemin barındırdığı ağ ve haberleşme altyapısının performansı büyük önem taşımaktadır. Çalışmamızda, buna benzer yüksek miktarda veri içeren bir gösterim ortamı simüle edilmiş olup esnek bir modüler mimariye sahip H-ARF artırılmış gerçeklik platformu üzerinden kaynak yöneticisi, ağ iletişimi ve görüntü aktarımı bileşenleri ile çalışma mantığı anlatılmaktadır. Tasarım ve çalışma prensipleri, gözlenen performans verileri ile açıklanmakta olup farklı kullanım alanlarında uygulamaya yönelik en iyi pratikler sunulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** artırılmış gerçeklik, tatbikat, operasyon, veri aktarımı, karar destek, komuta kontrol

# THE USAGE OF AUGMENTED REALITY BASED DATA ANALYSIS SYSTEMS WITH H-ARF PLATFORM IN MILITARY AREA

## ABSTRACT

Nowadays, large data and augmented reality are among the technologies that show the fastest growth and expansion. The use in the factories, especially in the defense industry, is quite popular. For simultaneous exercises in the military field and for production process in industry 4.0, the data collected from the sensors can be enriched and visualized with augmented reality technology. As a result of the transfer of digital transformation to war and residential areas, all data such as camera images taken from the command center and the field; archived data in law enforcement forces databases and data collected from the actual events occurred, allows simultaneous exchange of information. The visualization of the augmented data in sight of the soldier in the field plays a role in finalizing the operation by making decision easier. Undoubtedly, the most powerful aspect of such a command control decision support system is the augmented reality based data transfer infrastructure. The performance of the network and communication infrastructure of this system is of great importance. In this study, a demonstration environment with a high amount of data is simulated and the logic of working with the resource management, network communication and video streaming components is explained over the H-ARF augmented reality platform which has a flexible modular architecture. The design and operating principles are explained by the observed performance data and the best practices for different applications are presented.

**Keywords:** augmented reality, military operation, military exercise, data transfer, decision support, command control

## 1. GİRİŞ

İçinde bulunduğumuz büyük veri çağında her bir kullanım alanında analizler ve veriyi anlamlandırma ihtiyacı doğmaktadır [1, 2, 3]. Dijitalleşme çağı ile veri yönetimi, hesaplama ve analiz yöntemlerinde çalışmalar yoğun olarak devam etmektedir. Büyük verinin doğru işlenmesi halinde stratejik karar alma konusunda avantajlı duruma gelinebilmektedir [4]. Büyük veride gizlenmiş ilişki ve örüntülerin açığa çıkarılması ile

veriye dayalı karar almanın ne denli önemli olduğu konusunda uzmanlar hemfikirdir. Karar alıcılar, ham verinin yönetiminden çok aksiyon alabilir özet bilgilerin görselleştirildiği ortamlara ihtiyaç duymaktadır. Bu amaçla analiz yöntemlerinin yeni gelişim göstermeye başladığı dönemlerde analiz çıktılarını anlamlandırmak için 2 boyutlu ortamlar yeterli idi. Şu an ise veri işleme ve analiz yöntemlerinde kat edilen mesafe sonucunda, 2 boyutlu görselleştirmenin yetersiz kaldığı görülmektedir [5]. Bu noktada, sanal ve artırılmış gerçeklik teknolojilerinin artan görselleştirme yetenekleri ve bu yeteneklerin gelişme hızının gerçek veri ile beslenmeye duyduğu açlık sonucu oluşan boşluk doldurulmaktadır.

Bu ihtiyacın en yoğun görüldüğü alanlardan biri ise askeri operasyon ortamlarıdır. Bu ortamlarda sahadan gelen verinin komuta seviyesinde karar verme amaçlı kullanımı büyük önem taşımaktadır. Akan verinin işlenebilir hale gelmesi, verilere coğrafi anlamlar kazandırılabilmesi, toplanan verinin analizleri sonucunda yalın manalardan çevresel mana yaratmanın mümkün hale gelmesinde artırılmış gerçekliğin kullanımına yönelik kullanıcı hikâyeleri oluşturmaktadır. Bu hikâyeler ile verinin kirlilik yaratmadan hızlı ve harekete geçirebilen özet ve anlamlı çıktıların görsel olarak paylaşılması sağlanmaktadır.

Artırılmış gerçeklik desteği ve büyük veri analitiği ile savunma sektöründe yeni ortaya atılan kavramlardan en önemlisi kestirimci analitiklere dayalı karar destek mekanizmalarıdır [16]. Kestirimci analitikler, geçmişte olan olayların sonuçlarını kullanarak geleceğe dair öngörülerde bulunmayı sağlamaktadır. Bu yaklaşım tarzının yaygınlaşmasındaki en önemli faktörler: teknolojik olarak yapılabilir olmaları, uygulamaya dökmesi kolay çıktılar sağlaması ve mevcut yöntemlere nazaran daha maliyet etkin olmalarıdır. Kestirimci analitiklere dayalı karar destek mekanizmalarının etkin kullanımında, farklı kaynaklardan toplanan farklı formattaki verilerin anlamlı hale gelmesi ve görselleştirilmesi hem sahadaki personel hem de komutanlar için süreçte etkili rol oynamaktadır. Bu açıdan veri transferi ve görselleştirme için artırılmış gerçeklik ile büyük veri işleme yöntemleri modelleme ve simülasyon alanında kullanılmaktadır. Bu entegre teknolojilerin askeri alana yansımalarını çok yakında tatbikat ortamlarında görüyor olacağız [6, 7, 8]. Olay analizleri, geriye yönelik örüntü analizleri ve gizli kalmış ilişkilerin ortaya çıkarıldığı durumlarda artırılmış gerçeklik desteği ile sahadaki personele ciddi avantajlar sağlanmakta olacaktır. Yine benzer şekilde sahadan toplanan ilave bilgilerin yeni istihbarat bilgilerinin üretilmesine fayda sağlaması da artırılmış gerçeklik ile büyük verinin görselleştirilmesinin önemine dair bir göstergedir.

Konsept çalışmalar dışında henüz dünyada artırılmış gerçeklik teknolojisinin gerçek operasyon ve tatbikatlarda tam bir sistem olarak kullanımına rastlanmamaktadır. Ancak, özellikle Hololens artırılmış gerçeklik gözlük firmasının Amerikan ordusu ile

geçtiğimiz iki ay önce gerçekleştirdiği sözleşme sonrası sahalarda kullanıma yönelik uygulama çalışmalarına başladığı gözlenmektedir. Amerikan ordusu artırılmış gerçeklik kullanımına yönelik konsept bazı videoları internet üzerinden paylaşmaktadır. Geçtiğimiz yıllarda ise artırılmış gerçeklik konusunda Dünya’da gibi projeler gerçekleştirilmiştir.

H-ARF Artırılmış gerçeklik platformu ile sağlanacak ağ iletişimi, veri transferi, görüntü işleme, görüntü aktarımı çözümleri askeri alanlarda büyük veri modelleme ve simülasyon gerektiren uygulamaların altyapısını güçlendirmek üzere kullanılabilir. Bu makalede yazılım geliştirme kiti seviyesinde bir altlık olan H-ARF sisteminin gerçekleştirilen bir gösterim (demo) çerçevesinde bir komuta kontrol sistemi konsepti içerisinde çalıştırılırken büyük veri aktarımı konusundaki kullanımı, analiz edilmektedir. Buna göre çalışmanın Bölüm 2’inde H-ARF sistemi tanıtılmakta, Bölüm 3’te H-ARF altyapılı gösterim çerçevesi açıklanmaktadır. Bölüm 4’te gösterimin sayısal analizi ile değerlendirmesi yapılmaktadır. Bölüm 5’te ise çalışmanın sonuç ve önerileri detaylandırılmaktadır.

## 2. H-ARF SİSTEMİ

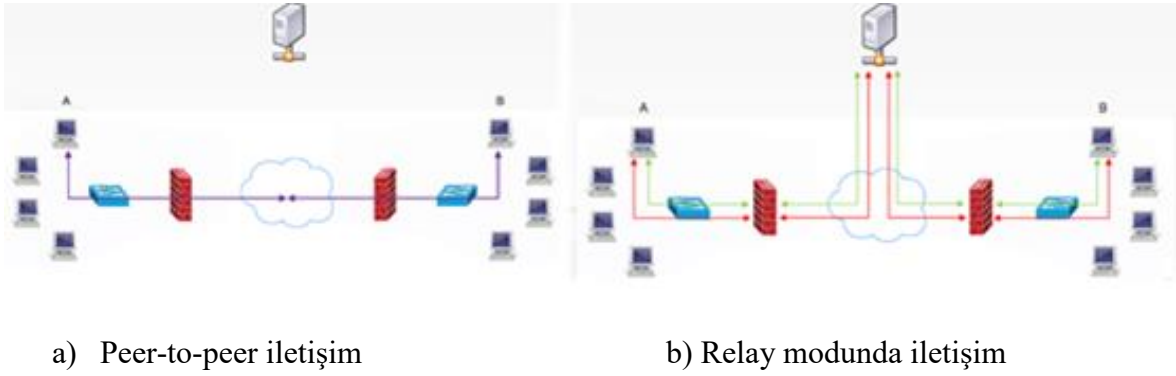
H-ARF Artırılmış Gerçeklik Platformu, barındırdığı hazır bileşenler ile hızlı ve maliyet etkin bir geliştirme ortamı sağlamaktadır. Yazılım Geliştirme Kiti (SDK) olarak kullanılan bu platform, kod yazma gereksinimini en aza indirmektedir.

H-ARF, uygulama geliştirirken karşılaşılan farklı farklı problemlere yönelik, performansı yüksek çözümler sunmaktadır. Aşağıda sıralanan her bir bileşen tek başına çalışabilir durumda müşterilere sağlanabilmektedir. Bu durum ürünün sadece artırılmış gerçeklik uygulamaları için değil;

- ağ iletişimi (networking),
- görüntü aktarımı (video streaming),
- görüntü işleme (image processing),
- çok kullanıcı platform desteği (multi user platform support),
- sentetik nesne çizimi (synthetic object drawing),
- çalışma sırasında takip (run time tracking),
- 3B nesne veritabanı (3D object database) ve
- 2B/3B takip (2B/3B tracking) çözümlerine ihtiyaç duyan komuta kontrol ve bilgi iletişim teknolojileri ürün ve projelerinde de kullanılabilir.

## 2.1. H-ARF Güvenilir ağ altyapısı ve gerçek zamanlı veri aktarımı

İki kullanıcının direkt birbiri ile veri paketleri gönderme alma şeklinde peer-to-peer olarak iletişim kurması Şekil 1-a'daki gibi sağlanmaktadır. Peer-to-peer iletişimin sağlanmadığı durumlarda sunucu üzerinden aktarım (relay) olarak iletişim kurulması Şekil 1-b'deki gibi sağlanmaktadır.



Şekil 1. Ağ İletişim Altyapısı

H-ARF ağ altyapısı, tüm formatlardaki veri paketlerini AES şifreleme özelliği ve güvenli şekilde haberleşme sağlayan veri transferi altyapısı ile firewall olan ortamlarda bile farklı protokolleri (UDP, HTTPS) destekleyerek sağlayabilmektedir. Ayrıca HTTPS altyapısı ile UDP'nin açık olmadığı durumlarda da sürdürülebilir ve sürekli iletişim imkanı sunmaktadır. İsteğe bağlı olarak farklı veri kanallarında farklı veri gönderim stratejileri (kayıpsız ve sıralı, sırasız, en hızlı) uygulanabilmektedir. İlgili altyapı, sızma testlerine de tabi tutulmuş ve siber saldırılara karşı güvenilir olduğu da ispatlanmıştır. IP altyapısını destekleyen her türlü kablolu - kablosuz ağ donanımı, platformumuzda desteklenebilmektedir.

Uzak ağ ve lokal ağ senaryolarında çalışabilen canlı görüntü, ses aktarımı ve ekran paylaşımı modüllerimiz mevcut bulunmaktadır.

Görüntü aktarımı modülümüzde tercihe bağlı olarak işlenmemiş görüntü ve kodlanmış (encode edilmiş) görüntü aktarımı seçeneklerimiz mevcuttur. Kodlayıcı (encoder) olarak birden fazla destek sunulmaktadır. Örnek olarak güncel kod çözücülerden (codec) H264 ve VP8 video kod çözücülerini aktif olarak desteklenmektedir [9, 10]. Farklı donanımlardaki donanım video kodlayıcıları da (hardware encoder) kullanılabilir. Kodlayıcı ayarları ile istenirse düşük işlemci kullanımı, istenirse daha yüksek kalite seçenekleri seçilebilmektedir. Örneğin 1920x1080p

çözünürlüğündeki 30fps bir video akışının yeterli bir kalitede aktarımı için 1.2Mbit yeterli olmaktadır.

Veri akışı (stream) altyapısının modüler olması sebebiyle, görüntü işleme teknolojisi kullanan yazılım senaryolarında da işlenmiş görüntü verileri güvenli bir şekilde uzak ağlara canlı olarak aktarılmaktadır. Özetle, donanım fark etmeksizin altyapının desteklediği her yerde canlı görüntü, ses aktarımı yapılabilmektedir. Bu donanımlara artırılmış gerçeklik gözlükleri, web kameralar, harici kameralar ve İHA (insansız hava aracı) örnek olarak verilebilmektedir.

Akan görüntü verilerinin operatör tarafından talep edilmesi halinde IP'den RTSP ile dosya sistemine kayıt edilmesi ve kayıt edilen görüntü verileri arasından, operatör tarafından istenilen zaman aralıklarındaki görüntü verilerinin dosya sistemine farklı kayıt edilebilmesi imkânı bulunmaktadır. Önceden kayıt edilen görüntülerin de FTP üzerinden paylaşılabilmesi mümkün olmaktadır. Kayıt edilmiş tüm görüntü verileri büyük veri konsepti kapsamında sonradan analiz ve değerlendirmeye açık olacak ve bilgi füzyonunun gerçekleştirilebilmesine imkân tanınmış olmaktadır.

## **2.2. H-ARF RAHAT donanım desteği**

Altyapı pek çok donanımı desteklemektedir. Başta görüntüleme aygıtları olarak üzere farklı markalardaki akıllı gözlükler (Majic Leap, Hololens, Epson, Vuzix vb.) elde kullanılarak etkileşim sağlayacak haptiklerle de birlikte çalışmaya uyumlu bir yapı mevcuttur.

AG (artırılmış gerçeklik) uygulaması çalıştırmak üzere kullanılması öngörülen ve farklı sensör kabiliyetlerinin yanı sıra farklı mimarilerdeki mobil cihazların tümü H-ARF yazılım geliştirme kiti tarafından desteklenmektedir. Örnek mimariler açısından;

- Gündüz kamerası,
- IMU sensörü ve gündüz kamerası füzyonu,
- Derinlik sensörleri,
- Derinlik sensörü + Gündüz kamerası + IMU sensörü füzyonu

Yukarıda örneği listelenen pek çok donanım açısından donanım farklılıkları H-ARF kapsamında desteklenmekte ve gerekli algoritmalar bu organizasyona göre inşa edilebilmektedir.

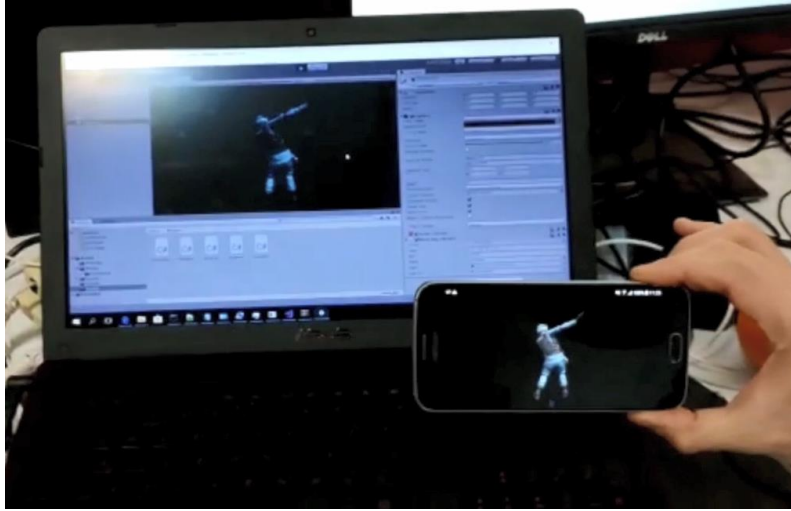
Örneğin çok farklı sensörlerden toplanan veriler büyük veri için önemli kaynak oluşturmaktadır. Sentetik veri katmanında kullanılmak üzere sensör verileri işlenebilmektedir.



Bunların yanı sıra, x86, x64, armv7, arm64\_v8 gibi donanım mimarilerine sahip mobil cihazların tamamı H-ARF kapsamında desteklenmektedir.

### 2.3. H-ARF Görüntü üretici

Büyük verinin görselleştirilebilmesi için işleme süreçlerinde oldukça fazla sayıda teknik vardır. Platform, görselleştirme amacıyla aşağıdaki şekillerdeki farklı alternatiflere sahip algoritmaları içermektedir. Bu alternatifler, geliştirilecek uygulamanın isterlerine göre en uygun olanı seçilerek kullanılabilir. Bu zengin altyapı sayesinde kullanıcılar avantaj ve dezavantajlarına göre kendi isterlerine en uygun olan çözümü uygulamaya dâhil etmektedir. Eldeki verinin son halinin ne olacağına göre tabi tutulacağı ETL (Extract, transform, load) süreci ve oluşturulan veri küpleri üzerinde koşullar analitiklerin çeşitleri değişkenlik göstermektedir.



Şekil 2. Görselleştirme

### 2.4. H-ARF Üçüncü parti kütüphaneler

Üçüncü parti kütüphanelerin kullanımı konusunda esneklik sağlayan platform, kullanıcıların kütüphane tercihleri konusunda özgür olmasını sağlamaktadır. Bu durum çeşitliliği artırarak platform kullanımında büyük rahatlık sağlamaktadır. H-ARF barındırdığı belirli bir fonksiyonel özelliği için arayüz tanımlamalarına uygun olacak şekilde harici donanım ve yazılımları dâhili olarak kullanabilme imkânı sağlamaktadır.

Mevcut artırılmış gerçeklik uygulama platformlarında, 3. Parti uygulamalar maliyetli ve kısıtlı olmasına rağmen H-ARF'in esnek dış arayüz tanımlamaları ile hem bulunan bir özelliğin iyileştirilmesine veya var olmayan bir özelliğin harici olarak eklenmesine imkân tanınmış olacaktır.

## **2.5. H-ARF Oyun motoru eklentileri**

En sık kullanılan oyun motorları olan Unity ve Unreal desteklenmektedir. Unity ile hazırlanmış sanal gerçeklik tabanlı uygulamalar H-ARF altyapısı ile artırılmış gerçeklik ortamına otomatik olarak taşınabilmektedir.

## **2.6. H-ARF Çapraz derleme desteği**

İşletim sistemi bağımsız olarak tanımlanan altyapı; Microsoft, Macintosh, iOS, Android ve Linux işletim sistemlerini desteklemektedir. Böylelikle H-ARF modülleri, belirtilen işletim sistemlerinde yazılım geliştirme kiti olarak kullanılabilir.

Çok farklı yazılım dilini (C++, Java, .NET) ve OpenGL'i destekleyen platform, bu özelliği sayesinde tek bir dilde uzmanlık gerektirmemektedir.

Büyük veri analitiği söz konusu olduğunda, nesne yönelimli, fonksiyonel programlama ve yapısal programlama dil paradigmasını desteklemesi sebebiyle Python kullanılmaktadır.

## **3. H-ARF ALTYAPISININ KOMUTA KONTROL AMAÇLI KULLANIM GÖSTERİMİ**

Tatbikat/operasyon ortamlarında stratejik, taktiksel ve operasyonel seviyede kullanılmak üzere geliştirilen artırılmış gerçeklik tabanlı komuta kontrol sistemleri yeni nesil karar destek sistemleri olma yolunda ilerlemektedir [11]. Bu ihtiyaca yönelik olarak hazırladığımız gösterim ortamında bir komuta kontrol sisteminde yer alan komut, kontrol, haberleşme ve bilgisayarın H-ARF modülleri ile entegrasyonu sağlanmıştır.

Toplanan istihbarat verilerinden yola çıkarak potansiyel tehlikelerin hesaplanıp bu verilerin sahadaki askerlere iletilmesi ve görselleştirilmesi sağlanmaktadır.

### **3.1. Komut – Artırılmış Veri Gönderimi Entegrasyonu**

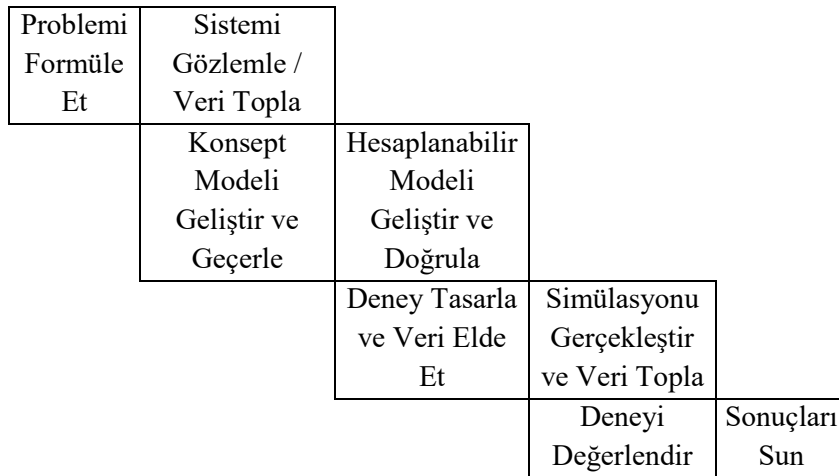
Komutanlar tarafından diğer personele iletilecek olan komutların farklı görsel içeriklerde sunumudur. Komut gösterimi, komutanın tablet üzerinden sahadaki askerlerin artırılmış gerçeklik gözlüklerine metin ve/veya ses olarak iletilen zenginleştirilmiş içeriklerden oluşmaktadır. Tablet ve benzeri ortamdaki alınan veriler sunucuya iletilmekte, sunucu üzerinde artırılmış gerçeklik gözlüğüne aktarılacak görsel içerik hazırlanmaktadır. Gözlük ve sunucu arasındaki kablosuz ağ trafiğinin aktarım hızı otomatik olarak ayarlanarak 200Kbps ile 1.2Mbps arası hızlarda görsel içerik, 8Kbps ile 128Kbps hızlarda ses aktarımı sağlanabilmektedir [12].

### 3.2. Kontrol – Veri Simülasyonu Entegrasyonu

Komutanın karar vermesini kolaylaştıracak şekilde sahadan toplanan veriler incelenebilmektedir. Komutan tableti üzerinden İHA kamerası görüntüsü, sahadaki askerin artırılmış gerçeklik gözlüğünün kamera görüntüsü, sahadaki askerlerin sağlık verileri, metin mesajları, ayrıca hareket sensörlerinden alınarak simüle edilen avatarları izlenebilmektedir. İHA görüntüsü ve gözlüğün kamera görüntüsü 200Kbps ile 1.2Mbps hızda peer-to-peer olarak direkt tablete şifreli olarak aktarılabilir. Askerin eş zamanlı hareketli avatar görüntüsü, sağlık durumu görselleri de sunucuda oluşturularak alfa kanallı video akışı olarak tablete aktarılmaktadır. Tablet üzerinde istenilen görüntüler ayrı veya alfa kanal üzerinden birleştirilerek görüntülenebilmektedir.

Burada bahsi geçen verilerin dağınık ve yapısal olmayan formatlarda olması büyük veri işleme yöntemlerinin henüz olgunlaşmadığı dönemler için mümkün değildi. Ancak büyük veri işleme ve analiz yöntemlerinde gelinecek teknolojik yetkinliklerin modelleme ve simülasyon alanlarında kullanımı sonucu elde edilen deneyimler gerçeğe oldukça yakın sonuçların alınmasını sağlamıştır. Simülasyon teknolojilerinin ilk adımı olan modelleme, temelde görev odaklı, amaca yönelik sadeleştirme ve gerçeklik algısının soyutlaştırılabilirliği sürecidir. Gerçeklik algısına dair iki önemli kısıt olan fiziksel ve algısal sınırlayıcılar endüstri 4.0 ile birlikte büyük ölçüde esnetilebilmiştir. Farklı uç noktalardan önceden toplanamayan sensör verilerinin merkezileştirebilmesi ve üzerinde doğru analitikler koşulabilir hale gelmesi ile birlikte modellemenin yürütülebilir hali olan simülasyon teknolojisinde de önemli ilerlemeler olmuştur.

Geleneksel simülasyon yaratma adımları olarak Şekil 3'teki görselde verilen adımların hemen hepsinde büyük veri analiz yöntemlerinin çıktılarının doğrudan pozitif etkileri vardır. Örneğin, 2. adım olan “Sistemi Gözlemle / Veri Topla” adımı yukarıda bahsi geçen uç nokta sensörlerinden akan verilerin işlenmesi ile daha zengin anlamların çıkarılmasına imkân sağlamıştır [13].



Şekil 3. Simülasyon Adımları [13]

### 3.3. Haberleşme – Veri Transferi Entegrasyonu

Komutanlar, diğer personel ve İHA gibi sahadaki tüm kaynaklar arasındaki iletişim büyük verinin alışverişi ile sağlanır. Komutan tableti, personellerdeki cep telefonu ve artırılmış gerçeklik gözlüğü ve İHA birbirine entegre olarak çalışmaktadır.

Direkt video aktarımı hariç tüm veriler merkezdeki lokal sunucu aracılığı ile toplanmakta ve dağıtılmaktadır. Bu şekilde gözlük veya tablet gibi donanım gücü düşük cihazlarda bile yüksek poligon sayısına sahip ortamlar görüntülenebilmektedir.

## 4. DEĞERLENDİRME

Yoğun verinin ilgili noktalara modelleme ve simülasyon ile artırılmış gerçeklik kullanılarak iletilen bu ortamda veri akışı hızı ve kalitesi, kritik öneme sahiptir. Görüntünün veya sesin kabul edilebilir düzeyin daha üzerinde geç gelmesi ölümcül kazalara bile neden olabilecektir. Bu açıdan sistemin performansını yüksek seviyelerde tutmak gerekmektedir. Yukarıda anlatılan gösterim sistemi ile gerçekleştirilen denemeler sırasında 720p görüntü kalitesi ve yüksek çözünürlüklü ses verisi ile veri aktarımında yaklaşık 120ms gecikme ile karşılaşılmaktadır. Bu performans değeri, çalışmamızdaki küçük çerçeveli gösterim ortamı ile kabul edilebilir gözükmektedir [14]. 5G teknolojisi ile bu hızın en az 40-60ms aralığına düşebileceği öngörülmektedir [15].

Çok kullanıcı ortamında, canlı görüntü alan 10 istemci (cep telefonu, tablet, gözlük, desktop PC ) ile wifi üzerinden yapılan denemelerde, sunucu üzerinden her client için ayrı şekilde üretilen artırılmış gerçeklik görüntü akışlarının (AR-Stream) , 1.2Mbit veri hızında, 120ms gecikme ile aktarılabilirdiği görülmüştür.

## 5. SONUÇ

Artırılmış gerçeklik, simülasyon, görüntülü görüşme için veri akışı hızı, gecikmesi ve kalitesi kritik öneme sahiptir.

Büyük verinin simüle edilmesi ile direkt ilişkili olan bu konuda H-ARF geliştirme altyapısı ürününün kullanımı ile hızlı ve maliyet etkin çözümlerin kısa sürede hazırlanıp kullanıma alınabileceği değerlendirilmektedir. Yüzde yüz yerli yazılım geliştirme mühendisliği ile sağlanan bu sistemin en büyük avantajı ağ iletişimi problemlerini esnek yapıda çözebilmesidir. Bir kaç alternatifin bile aynı anda kullanımı ile tam bir uçtan uca eş zamanlı operasyon hareket sisteminin gerçekleştirilmesi ileriki zamanlarda yaşanabilecek performans ve entegrasyon risklerini en aza indirmektedir.

Önümüzdeki dönem için servis odaklı geliştirme platformu olan H-ARF ile toplanan veriler, kestirimci analitikler, makine öğrenmesi ve derin öğrenme gibi gerçek zamanlı analiz yöntemleri ile işlenerek operasyonlarda saha üstünlüğü sağlamaya yönelik kullanımı konusunda gelecek çalışmalar gerçekleştirilebilir.

Ayrıca yapılacak optimizasyonlar, daha fazla donanım bazlı hızlandırıcıların kullanımı, network protokollerinde yapılabilecek forward error correction tarzı iyileştirmeler ile gecikmelerin daha da düşürülmesi hedeflenmektedir.

## 6. TEŞEKKÜR

Bu çalışmada emeği geçen H-ARF geliştirme ekibinin değerli mühendisleri Semih Kurt, Resul Aydoğan, Evren Öz, Tolga Aşansü, Sefa Nuri Ödemiş, Murat Mutlu ve geliştirme takım lideri Cem Murat Turgut'a teşekkürlerimizi sunarız.

## 7. KAYNAKÇA

- [1] Braud, T., Hui, P. (2017), When Augmented Reality Meets Big Data, Uppsala, Sweden, DOI: 10.1109/ICDCSW.2017.62.
- [2] Olshannikova, E., Ometov, A., Koucheryavy, Y., Olsson, T. (2015), Visualizing Big Data with Augmented and Virtual Reality: Challenges and Research Agenda, *Journal of Big Data*, 2:22, DOI: 10.1186/s40537-015-0031-2.
- [3] [https://www.ey.com/en\\_gl/aerpace-defense/how-digital-technologies-are-transforming-aerospace-and-defense](https://www.ey.com/en_gl/aerpace-defense/how-digital-technologies-are-transforming-aerospace-and-defense), Ernst&Young Global Limited, UK, Erişim Tarihi: Nisan 2019.
- [4] Rouhani, S., Ashrafi, A., Ravasan A. Z., Afshari, S. (2016), The Impact of Business Intelligence on Decision Support and Organizational Benefits, *Journal of Enterprise Information Management*, 29(1), DOI: 10.1108/JEIM-12-2014-0126.
- [5] Hassan, M. (2017), A Literature Study of Bottlenecks in 2D and 3D Big Data Visualization, Bachelor of Science in Computer Science, Faculty of Computing Blekinge Institute of Technology SE-371 79 Karlskrona Sweden.
- [6] Ponirakis, L. (2019), Developing an Intermediate Augmented Reality Capability for Infantry, Navy SBIR.
- [7] National Research Council (1999), Realizing the Potential of C4I: Fundamental Challenges, Washington, DC: *The National Academies Press*, 64-129, DOI: 10.17226/6457.

- [8] Piedimonte, P., Ullo, S. L. (2018), Applicability of the Mixed Reality to Maintenance and Training Processes of C4I Systems in Italian Air Force, 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Rome, 559-564. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace.2018.8453612.
- [9] Wiegand, T., Sullivan, G. J., Bjontegaard, G., Luthra, A. (2003), Overview of the H.264/AVC Video Coding Standard, IEEE Transactions On Circuits And Systems For Video Technology.
- [10] Cassidy, S. (2011), An Analysis of VP8, A New Video Codec for The Web, Rochester Institute of Technology, Thesis.
- [11] Maj, R.J.K. (2015), Augmented Reality at the Tactical and Operational Levels of War, US Naval War College, Newport, Rhode Island.
- [12] Geylani, M., Çıbuk, M., Çınar, H., Ağgün, F. (2016), Geçmişten Günümüze Hücresel Haberleşme Teknolojilerinin Gelişimi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt 18, No 3, Sayı 54, DOI: 10.21205/deufmd.2016185425.
- [13] Tolk, A. (2015), The Next Generation of Modeling & Simulation: Integrating Big Data and Deep Learning, Summer Simulation Multiconference, At Chicago, IL.
- [14] Kaknjo, A., Rao, M., Omerdic, E., Robinson, L., Toal, D., Newe, T. (2018), Real-Time Video Latency Measurement between a Robot and Its Remote Control Station: Causes and Mitigation, *Hindawi Wireless Communications and Mobile Computing*, Article ID: 8638019, 19p., Wiley, DOI: 10.1155/2018/8638019.
- [15] <https://www.opensignal.com/blog/2019/03/08/latency-is-the-new-5g-speed-battleground-which-will-enable-xr-and-ar>, Latency Is The New 5G Speed Battleground Which Will Enable XR and AR, Erişim Tarihi: Mayıs 2019.
- [16] <https://www.defenseone.com/assets/predictive-analytics-handbook-national-defense.pdf>, Erişim Tarihi: Eylül 2019.

# İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDAN ELDE EDİLEN GÖRÜNTÜLERİN ÜÇ BOYUTLU MESKÛN MAHAL SİMÜLASYONU VE ANALİZLERİNDE KULLANILMASI: ŞEREFİKOÇHISAR ÖRNEĞİ

Hüseyin ÇOBANOĞLU <sup>(a)</sup>, Özer CAN <sup>(a)</sup>, Bilal GÜZEL <sup>(a)</sup>, Burak GÜÇLÜ<sup>(a)</sup>,  
Umut UYSAL<sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Harita Genel Müdürlüğü, Cebeci,

{huseyin.cobanoglu, ozer.can, bilal.guzel, burak.guclu, umut.uyisal} @harita.gov.tr

## ÖZ

Günümüzde meydana gelen gelişmeler neticesinde mekânsal verinin üç boyutlu gösterimi, modellenmesi ve analiz edilmesi ön plana çıkmıştır. Söz konusu gelişmeler savunma teknolojilerinde de etkisini göstermektedir. Şehir modelleri üretim çalışmaları bu gelişmelere bir örnektir. Üç boyutlu şehir modelleri üzerinde özellikle meskûn mahal operasyonlarının öncesi ve icrası sırasında kara birliklerine taktik seviyede, bölge ile alakalı coğrafi analizler yapım imkanı sunan yazılımlar geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında Ankara ili Şereflikoçhisar ilçe merkezinde 670 m. irtifada mini insansız hava aracı ile uçuş yapılmış, elde edilen yüksek çözünürlüklü hava fotoğrafları ve sayısal yükseklik modelleri kullanılarak şehir modelleri üretilmiş ve meskun mahallere yönelik coğrafi analizlerin yapılması hedeflenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** İnsansız Hava Araçları, Meskûn Mahal, SYM, Üç Boyutlu Şehir Modelleri, Yüksek Çözünürlüklü Hava Fotoğrafları

## THE USAGE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES DATA IN 3D URBAN SIMULATION AND ANALYSIS: SEREFLIKOCHISAR EXAMPLE

### ABSTRACT

As a result of the developments that have occurred nowadays, three-dimensional representation, modeling and analysis of spatial data have come to the fore. These developments also affect the defense technologies. City models are an example of these developments. Software programs have been developed on three-dimensional city models that offer Geographic analyses related to the region at the tactical level of land units before and during the execution of operation on residential buildings. Within the scope of the study, an unmanned aerial vehicles have flied at Ankara and Şereflikoçhisar district center at an altitude of 670 meters. In this study, it was aimed to make urban models by using high resolution aerial photographs and digital elevation models.

**Keywords:** DEM, High Resolution Ortophoto, Residential Operations, Unmanned Aerial Vehicles, 3D City Models,

### 1. GİRİŞ

Günümüzde birçok alanda uzaktan algılama ve fotogrametri teknikleri ile üretilen veriler kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji ile bu verilerde, üretim platformu olarak insansız hava araçları kullanımı artmıştır. Düşük maliyet, hız, yüksek çözünürlük ve tekrarlı uçuş kabiliyeti sayesinde insansız hava araçları küçük alanlar için tercih edilmektedir [1]. Bununla birlikte yerleşim yeri merkezlerinin sürekli büyümesi, nüfusun ve trafikteki araç sayısının artması, çarpık kentleşme ve paralelinde kentsel dönüşümün son yıllarda yaygınlaşması, toplum güvenliği gibi sorunlara paralel olarak kentlerin yönetimi karmaşıklaşmış ve profesyonel çözümler üreten yerel yönetimlere gereksinim duyulmaya başlanmıştır. Bu ihtiyaçlardan yola çıkarak son zamanlarda pek çok bilim insanı ve şirket 3 boyutlu şehir modeli oluşturma ve sunma konularında çalışmaya başlamıştır [2-4].

Farklı uygulamalarda kullanılan 3 boyutlu şehir modellerinin, ihtiyaç ve özelliklerinin farklı olmasına rağmen standartlaştırılması ve aynı platformda sunulması ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu amaçla, 3 boyutlu şehir modellerinin standartlaşması ve gerçekleştirilen uygulamaların paylaşılabilmesi için CityGML standartları geliştirilmiştir. Open Geospatial Consortium (OGC) tarafından oluşturulan uluslararası CityGML standartları 3 boyutlu şehir modellerinin geometrik, topolojik ve semantik yönlerini kapsamaktadır [5]. CityGML standartlarına göre, çok ölçekli modelleme için mekansal ve semantik özellikler beş ardışık ayrıntı düzeyinde (LoD) tanımlanmıştır [5-7]. LoD0 2.5 boyutlu Sayısal Arazi Modelini içeren bölgesel model, LoD1 çatı yapıları olmayan bina bloğu, LoD2 çatı yapıları dahil bina modeli, LoD3 detaylı mimari dahil bina modeli ve LoD4 iç model dahil bina modelini ifade etmektedir [7]. 3 boyutlu şehir modelleri, derecesini



ve ölçeğini gösteren bir ölçü olan bu ayrıntı düzeyleri ile karakterize edilmektedir. Çalışma kapsamında LoD 2 seviyesinde 3 boyutlu şehir modeli oluşturulmuştur.



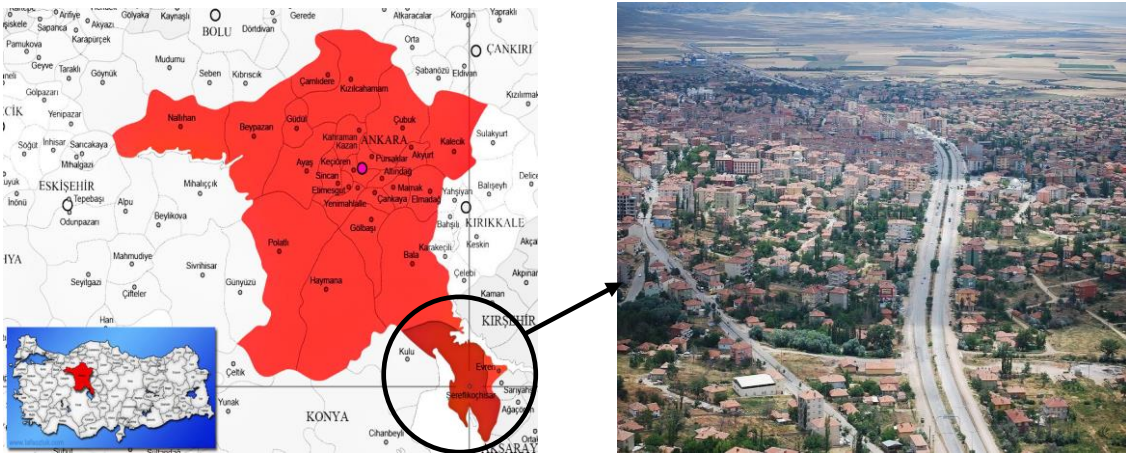
**Şekil 1.** CityGML LoD Seviyeleri[8]

3 boyutlu şehir modelleri fotogrametri ile Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) disiplinlerini bir arada kullanan, mekânsal verinin sunumunda yüksek görsellik ve doğru analizler yapma imkânı sağlayan platformlardır. Bu kapsamda savunma teknolojilerinde de etkisini güçlü bir şekilde göstermektedir.

Bu çalışmada Mini İHA ile çekilen yüksek çözünürlüklü görüntülerden 3 boyutlu şehir modellerinin oluşturulması, oluşturulan şehir modellerinden coğrafi sorgulamaların ne seviyede yapılabildiği, bu coğrafi sorguların meskûn mahal operasyonlarına yönelik taktik ve operasyonel uygulanabilirliği CitiGenius [9] yazılımı ile incelenmiştir.

## 2. ÇALIŞMA BÖLGESİ VE GÖRÜNTÜ ALIM FAALİYETLERİ

Ankara iline bağlı Şereflikoçhisar ilçesinin merkezini kapsayan 500 hektarlık bölge çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Bölge Ankara il merkezinin 130 km. güneydoğusunda yer almaktadır. İçerisinde bina yoğunluğu sıkı ve seyrek olan yerleşim alanları birlikte bulunmaktadır.



**Şekil 2.** Çalışma Alanı Şereflikoçhisar İlçesi

Çalışma kapsamında Şekil 3'te gösterilen ve Tablo 1'de genel özellikleri verilen ATLAS markalı Mini İHA ile görüntü alım faaliyeti gerçekleştirilmiş ve bölgenin yüksek çözünürlüklü hava fotoğrafları elde edilmiştir.

**Tablo 1.** ATLAS Mini İHA Teknik Özellikleri

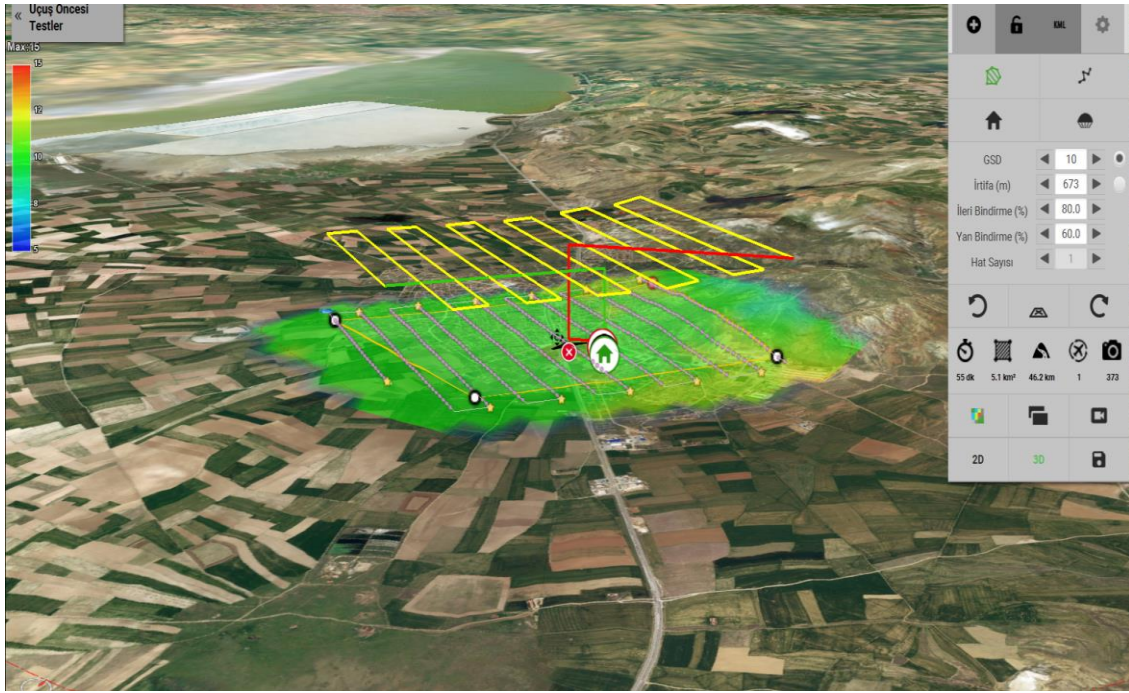
<i>AĞIRLIK</i>	2.3 kg
<i>KANAT AÇIKLIĞI</i>	120 cm
<i>BOYUT</i>	120 cm * 60 cm * 9 cm
<i>MALZEME</i>	EPP/KARBON FİBER
<i>DEĞİŞTİRİLEBİLİR OTOPILOT</i>	EVET
<i>UÇUŞ SÜRESİ</i>	50 Dakika (GÜVENLİ) / 70 Dakika (MAKSİMUM)
<i>MENZİL</i>	60 Km (GÜVENLİ) / 84 Km (MAKSİMUM)
<i>SEYİR HIZI</i>	72 Km/s
<i>İNİŞ</i>	PARAŞÜT



**Şekil 3.** ATLAS Mini İHA

Görüntü alım faaliyeti öncesinde bölge uydu görüntüleri ve arazi üzerinde incelenmiş, uçuş planlaması aşamasında gerekli ön çalışmalar gerçekleştirilmiştir. ATLAS yazılımı [10] kullanılarak yapılan uçuş planı Şekil 4’te gösterilmiştir. Uydu görüntülerinden düzenli bir şekilde yayılmış 40 adet YKN (Yer Kontrol Noktası) tesis edilmiştir.

Tek uçuş ile 55 dakikada kapatılacak 5 km<sup>2</sup>’lik alanda, yer örnekleme aralığının belirlenen değerden sapmaması amacıyla kolonlar arazi yüzeyinin durumuna göre oluşturulmuş ve 3 boyutlu bir uçuş sağlanmıştır. Her bir kolon arazi yüzeyinin eş yükselti eğrilerine paralel olacak şekilde planlama yapılarak; uçuş sonrası nokta bulutu, ortofoto görüntü ve sayısal yüzey modellerinin oluşturulması işlemlerinde doğru ve hassas sonuçların elde edilmesi sağlanmıştır. Uçuş irtifası 673 metre ve 10 cm. yer örnekleme aralığı, %80-%60 ileri ve yan bindirme değerleri ile uçuş gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. Uçuş Planı ve Bilgileri

### 3. GÖRÜNTÜLERİN İŞLENMESİ

Çalışma bölgesinin çekilen yüksek çözünürlüklü fotoğrafları, fotogrametrik görüntü eşleme yöntemleri kullanılarak birleştirilmiştir. Bu işlemler Pix4D yazılımı [11] ile gerçekleştirilmiş ve nokta bulutu, yüzey ağ modeli, DSM (Yükseklik Modeli) ve ortofoto verileri üretilmiştir. Sonuç üründe oluşan ortofoto da herhangi bir nesne üzerinde oluşan bozulmalar ise Pix4Dmapper yazılımında Mosaic Edit işlemi ile düzeltilmiştir. Yapılan işlemler ve düzenlemeler sonucunda Şereflikoçhisar bölgesinin yüksek çözünürlüklü (10 cm) ortofoto mozaik görüntüsü ve yüksek çözünürlüklü sayısal yüzey modeli oluşturulmuştur.



### 3.1. Ortofoto ve Ortofoto Mozaik

Hava fotoğrafları veya uydu fotoğraflarının, eğiklik ve dönüklüğünden ileri gelen hatalarının giderilmesi, ayrıca arazideki yükseklik farklarından ileri gelen nokta kaymalarının asgari düzeye indirilmesi suretiyle elde edilen; perspektif resimlerdeki resim eğikliği ve arazideki yükseklik farklarından dolayı oluşan görüntü kaymalarının giderilmesi sonucu, harita gibi belirli ve sabit bir ölçeğe sahip olan görüntüler ortofoto olarak adlandırılır [12].

Aynı ölçeğe sahip mozaik oluşturan yataylanmış (orto-rektifiye edilmiş) ortofoto görüntülerinin birbirleri ile birleştirilmesiyle oluşan görüntü ortofoto mozaik olarak adlandırılır [12]. Çalışma alanına ait ATLAS Mini İHA ile çekilen yüksek çözünürlüklü görüntülerden 10 cm. yer örnekleme aralığına sahip ortofoto mozaik oluşturulmuştur.

Ortofoto mozaik üretiminde kullanılan Pix4Dmapper yazılımı, fotogrametrik değerlendirme için yüklenen tüm görüntülerde nokta eşleştirmesi yapmak için “binary kod” sistemini kullanır. Bu sistem sayesinde yazılıma eklenen her yeni yer kontrol noktasının bir resimde işaretlenmesinin ardından geriye kalan görüntüler arasından hangilerinde olduğunu bulur. Yer kontrol noktalarının coğrafi konumlandırılmalarındaki doğrulukları bu sistem ile artmaktadır [13].

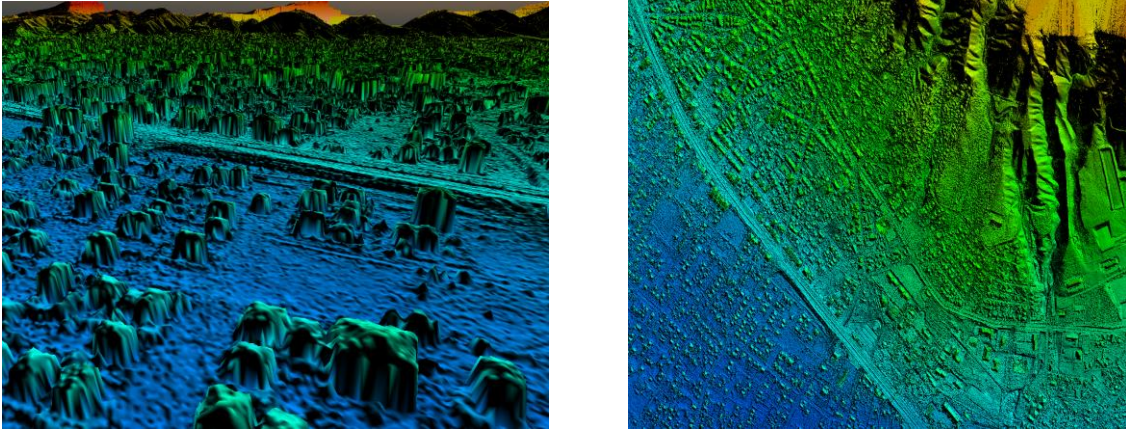


Şekil 5. Şereflikoçhisar 10 cm. Ortofoto Mozaik

### 3.2. Sayısal Yüzey Modeli (SYM)

Yeryüzüne ait konum ve yükseklik bilgilerinden elde edilen, yalnızca arazi yüzeyinin bitki örtüsü, ağaç, bina vb. diğer tüm objelerin de dâhil edildiği matematiksel bir yüzeydir. Bu modeller, 3 boyutlu şehir modeli, sivil havacılık, silüet analizleri, rüzgâr ve güneş enerjisi analizleri gibi çalışma alanlarının yanında topografya ile ilişkisi olan tüm

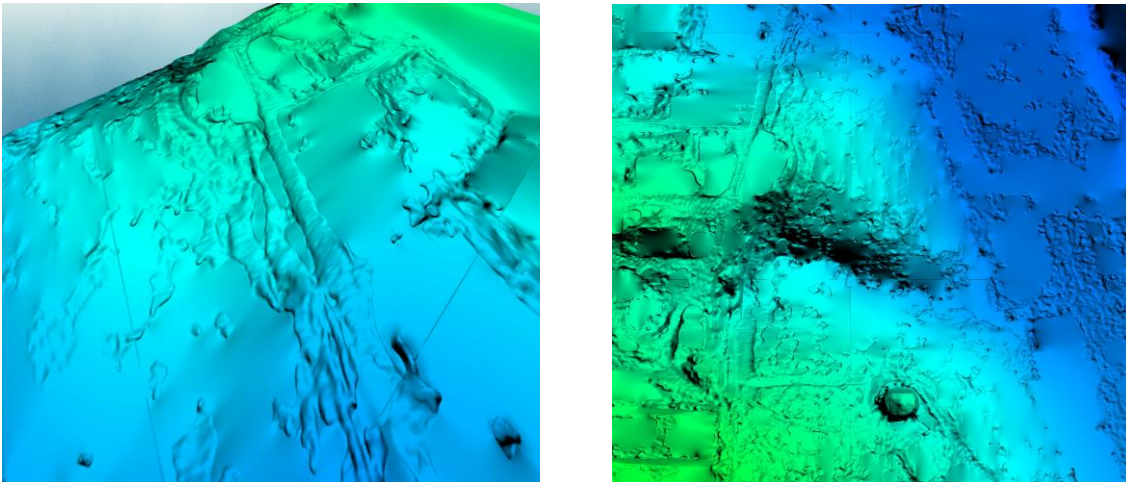
birimlerin temel ihtiyacını oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında elde edilen yüksek çözünürlüklü görüntüler, Pix4D yazılımı ile Inverse Distance Weighting-IDW (Ters Mesafe Ağırlıklı) metodu kullanılarak işlenmiştir. Bu metot noktalar arası enterpolasyon yaparak bilinmeyen noktaların tahminini gerçekleştirir. Bina yoğunluğunun fazla olduğu bölgelerde tercih edilir. SYM üretim sürecinde, Noise Filtering (Gürültü Filtresi) ve Yüzey Düzeltme (Surface Smoothing) kullanılarak, bozuk noktalar elimine edilmiş ve gerçeklik sağlanmıştır.



Şekil 6. Sayısal Yüzey Modeli (SYM)

### 3.3. Sayısal Arazi Modeli (SAM)

Sayısal yüzey modeli üzerinde yer alan ağaç, bina, bitki örtüsü ve diğer tüm objelerin kaldırılarak ham arazi yüzeyinin ortaya çıkarılması ile elde edilen sayısal modeldir. Çalışma alanına ait sayısal yüzey modeli üzerinde fotogrametrik algoritmalar kullanılarak sayısal arazi modeli oluşturulmuştur.



Şekil 7. Sayısal Arazi Modeli (SAM)



#### 4. ÜÇ BOYUTLU ŞEHİR MODELİ ÜRETİMİ

Üç boyutlu şehir modelleri üretim aşamasında ortofoto görüntü üzerinden sayısallaştırma işlemi gerçekleştirilerek binaların iki boyutlu izdüşümleri alan geometrisinde vektörel olarak elde edilmiştir. Bina alanlarına ait iki boyutlu (X, Y) vektörel veri, SYM grid değerleri ile ilişkilendirilmiş ve binaların izdüşümleri içerisinde kalan alanlara grid değerlerinde yer alan yükseklik bilgileri de eklenerek 3 boyutlu (X, Y, Z) vektörel veri ve sonrasında mesh dosyaları elde edilmiştir. Bölge %80-%60 ileri ve yan bindirme oranları ile uçulmuştur. Bu oranlar neticesinde her bir binaya ait farklı cephelerin, farklı açılardan görüntüleri elde edilmiştir. Görüntü alım faaliyetleri kapsamında elde edilen yüksek çözünürlüklü ham fotoğraflar, fotoğrafların kalibrasyon değerleri ve fotoğraf orta noktaları kullanılarak, bina objelerinin görüntü ve sayısal bilgileri birbirleri ile ilişkilendirilmiş ve otomatik olarak yan yüzeyleri kaplanmıştır.

SYM ve SAM modellerinin üzerine ortofoto görüntü giydirilme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonrasında elde edilen yeni SYM, 3 boyutlu vektör bina alanlarının düzenlenmesi aşamasında kullanılmış, yeni SAM ise şehir modelinin arazi yüzeyi katmanını oluşturmuştur.



(1)



(2)

**Şekil 8.** (Ortofoto Görüntü Giydirilmiş) Yeni SYM (1) ve Yeni SAM (2)

Bölgede yer alan ağaçlık alanlar SYM grid değerleri ve ortofoto renk değerleri (RGB) kullanılarak otomatik olarak üretilmiştir. Elektrik direkleri, hat ve diğer münferit engellere yönelik detaylar ise HGM tarafında sunulan Düşey Engel Veritabanı (DEVT) platformundan sağlanmıştır. Binalar, yeşil alanlar ve diğer detay grupları ile birlikte SAM arazi yüzeyi üzerinde bölgenin üç boyutlu şehir modeli elde edilmiştir.



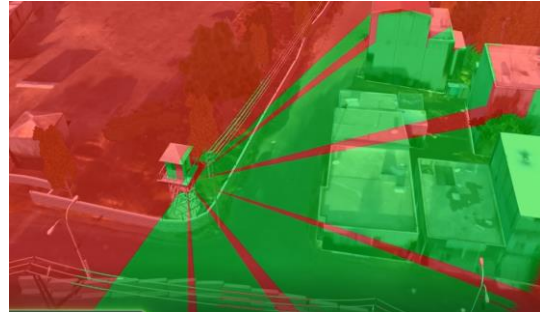
Şekil 9. Şereflikoçhisar İlçesi 3 Boyutlu Şehir Modeli

## 5. ANALİZLER

Yerleşim yerlerinde icra edilmesi zorunlu olan harekâtlar için gerekli coğrafi bilgi desteğini sağlamak ve operasyon öncesi taktik seviyede bölge ile ilgili mekânsal analizleri gerçekleştirmek amacıyla üretilen 3 boyutlu şehir modeli CitiGenius yazılımı kullanılarak incelenmiştir.

### 5.1. Gerçek Zamanlı Görünürlük Analizi

Bu analiz ile birlikte envantere yer alan her türlü araç ve silah, personel, insanlı veya insansız hava araçlarının arazi üzerinde bulunduğu ya da dinamik konumundan bölgede görüş alanına giren alanlar görselleştirilebilir ve etkinliği ölçülebilir.



Şekil 10. Gerçek Zamanlı Görünürlük Analizi



Şekil 10’da gerçek zamanlı görünürlük analizi yapılmıştır. Nöbet kulesinde yer alan bir personelin bölgede görüş alanına giren yerler yeşil, görüş alanı dışında kalan yerler kırmızı renk ile gösterilmiştir.

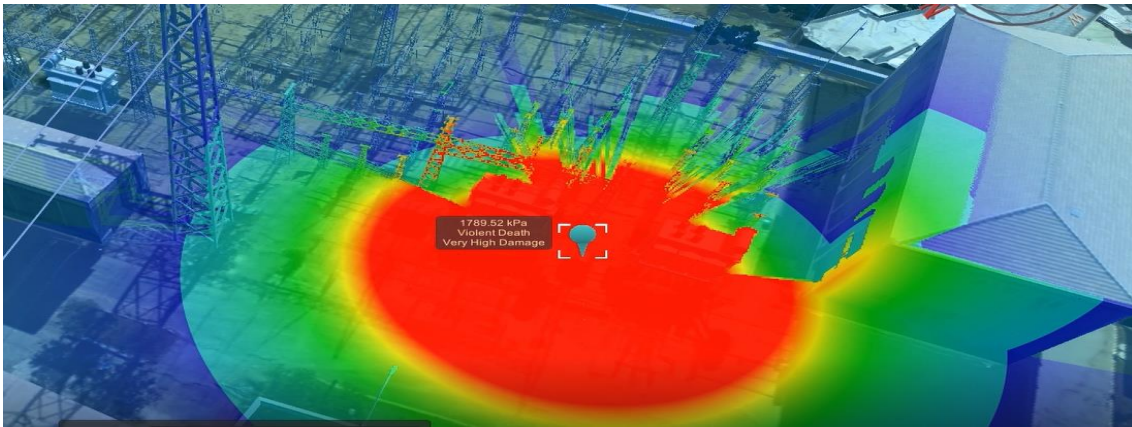
## 5.2. Gerçek Zamanlı Patlayıcı Analizi

Patlayıcı yüklü insan, araç veya diğer materyallerin etrafına tesir edebileceği alanların analizi sağlanmaktadır. Patlayıcının cinsi, yoğunluğu ve içerdiği şarapnel etkisi gibi değerler analiz öncesi girilerek gerçekçi sonuçlar sağlanmıştır.



Şekil 11. Patlayıcı Yüklü Araç ve Güzergâhı

Şekil 11’de patlayıcı yüklü bir araç ve alacağı yol gösterilmiştir. Görselde patlayıcının etkili alanı kırmızı olan yerlerde en yüksek, mavi olan kısımda ise düşük olarak gösterilmiştir. İçerisinde patlayıcı yer alan bir çantanın etki alanı yine aynı şekilde analiz edilmiş ve imlecin yer aldığı noktada patlama anında etki edeceği basınç ve zarar değerleri Şekil 12’de belirtilmiştir.

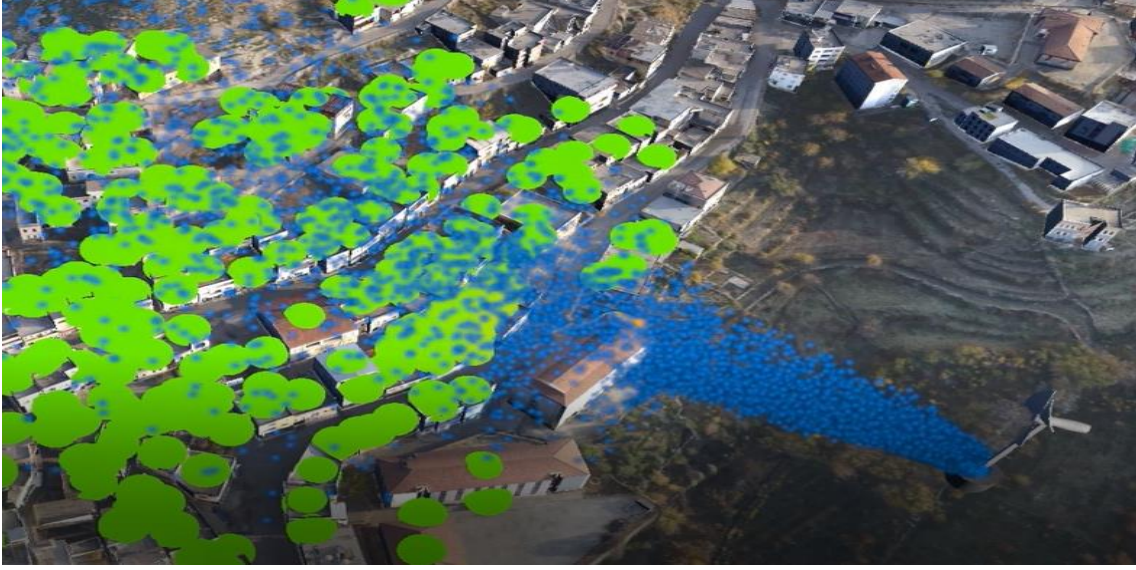


Şekil 12. Patlayıcı Yüklü Çanta ve Etki Alanı



### 5.3. Kimyasal Saldırı Analizi

Analiz ile birlikte olası bir kimyasal saldırı durumunda hava koşullarına da (rüzgar, yağış, sıcaklık vs.) bağlı olarak bölge üzerinde etki alanı gösterimi sağlanmıştır. Şekil 13'te gösterilen analizde, bu saldırı sonrası etkilenecek binalar yeşil kürelerin olduğu alanlardır.



Şekil 13. Kimyasal Saldırı Analizi

Örneklerde belirtilenler dışında, envanterde yer alan silah, araç, mühimmat ve askeri personelin donanımına bağlı olarak belirtilen parametreler ile birlikte meskûn mahal içerisindeki operasyonel faaliyetlere yönelik daha birçok analiz 3 boyutlu şehir modeli üzerinde sağlanabilmektedir.

## 5. SONUÇ

Gelişen teknolojiler ile birlikte muharebe kavramında da değişim yaşanmaktadır. Mekânsal verinin 3 boyutlu gösterimi bu gelişmeler ile birlikte önemini günden güne artırmaya devam ettirmektedir. Bu uygulama çalışması ile Şereflikoçhisar ilçe merkezini içeren 3 boyutlu şehir modelinin üretimi ve operasyonel faaliyetleri kapsayan analizlerin yapılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda proje alanında mini İHA ile uçuş faaliyeti gerçekleştirilmiştir. Elde edilen yüksek çözünürlüklü görüntülerden 10 cm. yer örnekleme aralığına sahip ortofoto mozaik ile SYM elde edilmiştir. Elde edilen bu verilerden 3 boyutlu şehir modeli üretilerek meskûn mahal operasyonlarına yönelik taktik seviyede planlama yapımına etki edecek analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler arazi birliklerinin karşılaşılabileceği zorlu durumları simüle ederek gerekli tedbirlerin alınmasını sağlamaktadır. CitiGenius yazılımı kullanılarak yapılan bu analizlerde yüksek görsellik, doğru ve hassas çözümlere ulaşılmıştır. Afet ve

kurtarma faaliyetleri kapsamında yapılacak 3B simülasyon yazılımlarında da, bu yeni nesil coğrafi verinin altlık olarak kullanılabilmesi değerlendirilmektedir.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] Eisenbeiss, H. (2009)., UAV Photogrammetry, ETH Zurich for the degree of Doctor of Science, ISSN 0252-9335 . ISBN: 978-3-906467-86-3
- [2] Singh, S. P., Jain, K., & Mandla, V. R., (2013), Virtual 3D City modeling: Techniques and Applications, ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 1(2), 73-91
- [3] Moser, J., Albrecht, F., Kosar, B., (2010), Beyond visualisation–3D GIS analyses for virtual city models,
- [4] Glander, T., Döllner, J., (2009), Abstract representations for interactive visualization of virtual 3D city models, Computers, Environment and Urban Systems, 33(5), 375-38
- [5] Kolbe T. H., Gröger G., Plümer L., (2005), CityGML – Interoperable Access to 3D City Models, van Oosterom, Zlatanova, Fendel (eds.), Geo-Information for Disaster Management (Proc. of the Int. Symp. on Geo-Information for Disaster Management GI4DM), Delft, Netherlands, March 21-23, Springer.
- [6] Gröger G., Plümer L., (2012), CityGML – Interoperable semantic 3D city models, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 71 (2012) 12–33.
- [7] Arefi H., Engels J., Hahn M. and Mayer H., (2008), Levels of Detail in 3D Building Reconstruction from LIDAR Data, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII-B3b
- [8] Kolbe, T. H., Gröger, G., Czerwinski, A. and Nagel, C. (2008): OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. Technical Report OGC 08-007r1, Open Geospatial Consortium Inc.,
- [9] 3, 2018 CITIGENIUS.,[https://citigenius.com/index\\_tr.html/](https://citigenius.com/index_tr.html/)
- [10] 5, ATLAS Unmanned Systems Ltd., <http://atlasus.com.tr/>
- [11] 5, Pix4D, <https://www.pix4d.com/>
- [12] Özbalmumcu, M., (2004), “Fotogrametrik Yöntemle Ortofoto Harita Üretiminin Temel Esaslari, Ortofotonun Yararlari Ve Kullanim Alanlari”, Harita Genel Müdürlüğü, Dikimevi, Ankara
- [13] Strecha,L.C. (t.y.), (2016), The Accuracy of Automatic Photogrammetric Techniques on Ultra-Light UAV Imagery,

## SIGMOTE: SAYISAL SİNYAL İŞLEME SENSÖR PLATFORMU

Nail Çadallı <sup>(a)</sup>, Reyhan Ergün <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Signalton Teknoloji, {nail.cadalli, reyhan.ergun}@signalton.com.tr

### ÖZ

Bu çalışmada, SigMote adını verdiğimiz yüksek işlemci kapasitesine sahip bir sayısal sinyal işleme (digital signal processing, DSP) sensör (duyarga/algılayıcı) platformu tasarlanmış ve geliştirilmiştir. SigMote, elektronik devre kartı yanında gömülü yazılım ve algoritma katmanlarını içermektedir. SigMote kartı üzerinde hazır sensörlerin yanında her türlü sensörün sisteme entegre edilebilmesi amacıyla konektör arayüzleri ve sistemin genel ağ (Internet) veya yerel kablosuz ağ erişimi için kablosuz iletişim modül seçenekleri bulunmaktadır.

Platform, sensör ağları içinde düğüm/geçit (node/gateway) olarak sensör sinyali/verisi toplama, sinyal analizi, platform üzerinde verinin yerinde işlenmesi (edge computing) veya verinin iletişim kanalları üzerinden merkezi sunucuya gönderilerek işlenmesi (bulut bilişim - cloud computing) uygulamalarında kullanılmaktadır.

Döngüde elektronik donanıma (hardware in the loop) dayalı benzetim (simulation) veya büyük veri (big data) işleme amaçlı olarak kablosuz ağ yapısı içinde sensör verisi toplanması önemli kullanım alanlarıdır. Platform üzerinde makine öğrenmesine dayalı akustik/ses sinyal analiz algoritmalarını içeren gömülü yazılım programları gerçek zamanda çalıştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Akustik, algılayıcı, akıllı ev/bina, akıllı kent, bulut bilişim, duyarga, Endüstri 4.0, nesnelerin Internet'i (IoT), sayısal sinyal işleme, sensör, ses sinyal analizi, yerinde veri işleme.

## SIGMOTE: DIGITAL SIGNAL PROCESSING SENSOR PLATFORM

### ABSTRACT

In this study, we have designed and developed a digital signal processing sensor platform called SigMote with high computing capability, which comprises an electronic circuit board, embedded software, and an algorithm layer. In addition to onboard sensors, the board is equipped with connectors and interfaces to facilitate integration of

external sensors, and with wireless modules to enable connection to the Internet or a local wireless network.

In a sensor network, as a node or gateway, the platform can be used for signal and data collection, processing of data right on the platform (edge computing) or transmitting data to central servers for further processing (cloud computing).

SigMote can be used for hardware-in-the-loop simulations or sensor data collection within a wireless network for big data processing. Embedded programs for acoustic/audio signal analysis based on machine learning have been run on the platform in real time.

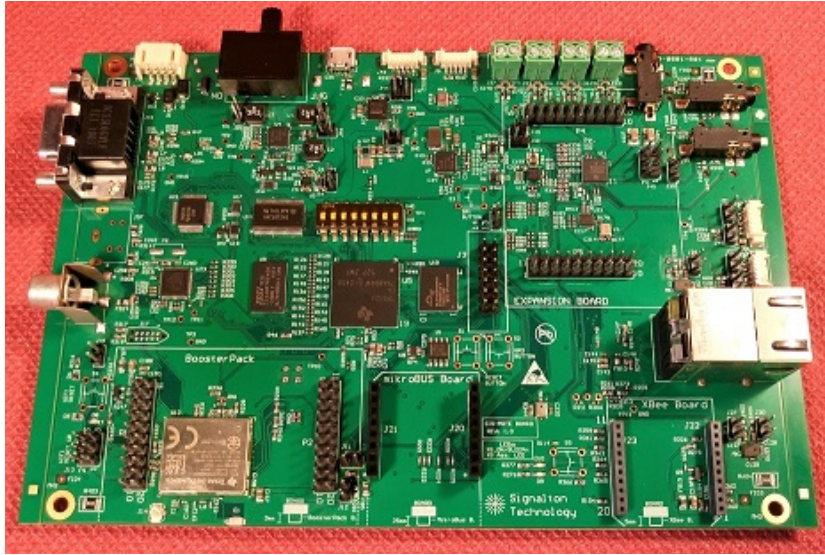
**Keywords:** Acoustics, audio signal analysis, cloud computing, digital signal processing (DSP), edge-computing, Industry 4.0, Internet of Things (IoT), smart city, smart home/building, sensor.

## 1. GİRİŞ

Sensörlerden gelen sinyal ve verinin hızlı ve etkin şekilde işlenerek faydalı bilgiye dönüştürülmesi günümüzde pek çok teknik alan ve sektörde ivme kazanan sayısallaşma (dijitalleşme) atılımları ile birlikte her zamankinden daha önemli hale gelmiştir. Akıllı kent, akıllı ev/bina, akıllı fabrika (Endüstri 4.0), nesnelerin İnternet'i (İnternet of Things, IoT), büyük veri (big data) gibi kavramlar bu ilerlemenin ortaya çıkardığı teknolojilerdir. Bu alanlardaki teknik araştırma ve geliştirme kapsamında çeşitli sensörlerin entegre edilebildiği, üzerinde sinyal ve veri analizi amaçlı ileri düzeyli algoritmaların gerçek zamanda çalıştırılabildiği, kablolu/kablosuz ağlara bağlanabilen donanımlar ve bunlara ilişkin yazılımlar hem simülasyon ve modelleme amaçlı olarak ağ yapısı içinde veri toplama açısından hem de döngüde donanım (hardware in the loop) benzetim uygulamaları için ihtiyaç duyulan altyapılardır.

Büyük veri genel olarak geniş bir sensör ağında ağ üzerindeki pek çok farklı noktadan alınan ve pek çok farklı sensörden gelen veriye atıfta bulunmaktadır. Sensörden gelen verinin akış yoğunluğunun (data rate) yüksek olduğu durumlarda sinyal analizinin ve veri işlemenin; tüm verinin merkezi bulut bilişim (cloud computing) sunucularına aktarılması yerine sensörün bulunduğu noktada yapılması (on-premise, edge/fog computing) tercih edilmektedir [1, 2]. Bunun nedenleri arasında sinyalin ses veya görüntü/video olduğu uygulamalarda kişisel mahremiyet veya ticari gizlilik ve veri güvenliği açısından sinyalin sensöre yakın noktada işlenmesi ve sadece faydalı bilginin merkezi sunuculara gönderilmesi gerekliliği sayılabilir [3]. Buna ek olarak sensöre yakın noktada yapılan sayısal sinyal işleme sonucunda ortaya çıkan işlem gecikmesi (latency) çok daha az olmakta ve veri iletimi için kablosuz kanalların gereksinim duyduğu bant genişliği (bandwidth) daha düşük düzeyde tutulabilmektedir.

Bu çalışmada, donanım, gömülü yazılım ve algoritma katmanlarından oluşan, özellikle yerinde veri işleme kapsamında sensör veri analizi için güçlü altyapı sağlayan bir platform geliştirilmiştir. SigMote adı verilen bu platformun ayrıntıları izleyen bölümlerde verilmektedir. Yukarıda değinilen IoT, Endüstri 4.0, akıllı kent gibi uygulama alanlarına özgü gömülü yazılımlar da dahil olmak üzere herhangi bir sayısal sinyal işleme (DSP) algoritması platform üzerinde gerçek zamanda işletilebilmektedir. Buna dair örnek bir gösterim olarak makine öğrenmesine dayalı ses sınıflandırma algoritması geliştirilmiş, platform üzerinde gerçek zamanda çalıştırılmıştır. Algoritmanın başarımı aşağıda ilgili bölümde sunulmaktadır. Ayrıca ses sınıflandırma uygulaması ve genel olarak sistemin kullanılabileceği diğer uygulama senaryoları hakkında bilgi verilmektedir.



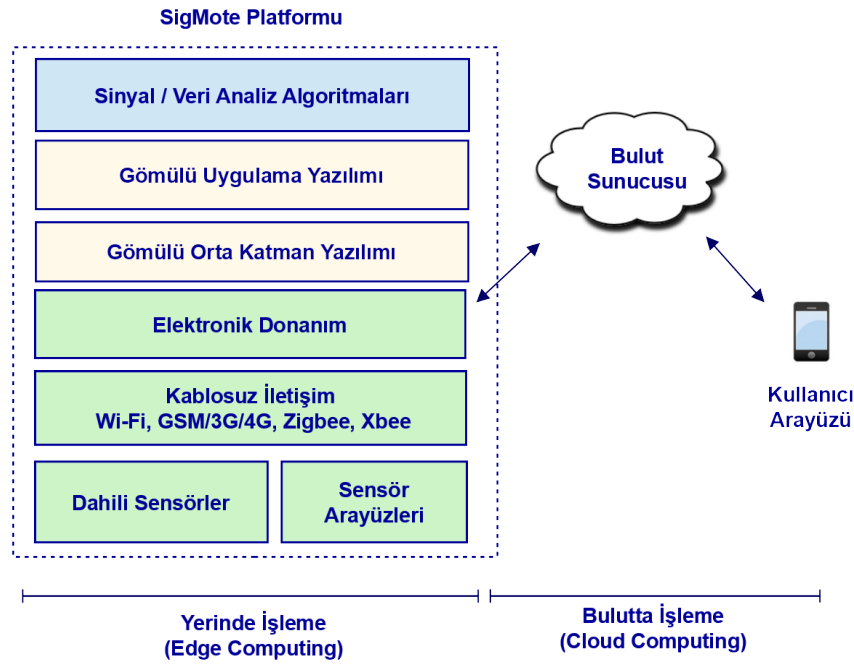
Şekil 1: SigMote kartı

## 2. SIGMOTE PLATFORMU

SigMote platformunun elektronik kartı Şekil 1’de gösterilmiştir. Kart üzerinde DSP işlemci, RAM, flash bellek, MEMS mikrofonlar, 3 eksenli ivmeölçer, video çözümleyici (decoder), ses çözümleyici (audio codec), güneş paneli ve pil uyumlu güç ünitesi ve diğer çevresel entegreler mevcuttur. Ayrıca kart üzerinde Mikrobus, Xbee, Texas Instruments BoosterPack modüllerinin takılabileceği konektörler, ek kartlar için genişletme konektörü, Ethernet, USB, video girişi (component/composite), VGA çıkışı, ses giriş çıkışları için konektörler görülmektedir. Kart üzerinde yer alan DSP işlemci, JTAG konektörü üzerinden bir programlama ve hata giderme cihazı aracılığı ile C/C++ dilinde programlanmaktadır. Mikrobus ve Xbee modülleri kullanılarak kartın yerel

ağlara veya şebekelere bağlantısı GSM, 3G, 4G, Zigbee, Bluetooth ve benzeri RF kanalları üzerinden yapılabilmektedir. Wi-Fi bağlantısı için kart üzerinde bir modül dahili anteni ile birlikte hazır olarak mevcuttur.

SigMote'un platform yapısı ise Şekil 2'de gösterilmiştir. Platform, elektronik donanımın üzerinde işleyen gömülü orta katman (middleware) yazılımını, gömülü uygulama yazılımını ve sinyal veri işleme/analiz algoritmalarını kapsamaktadır. Elektronik donanım üzerinde isteğe göre seçilebilecek iletişim modülleri, dahili sensörler ve her türlü sensörün entegre edilebilmesi için arayüzler yer almaktadır.



Şekil 2: SigMote platform mimarisi

### 3. BENZER PLATFORMLARLA KARŞILAŞTIRMA

IoT (Nesnelerin İnternet'i) konusunda öne çıkan platformlardan biri WaspMote adı verilen sensör kartıdır [4]. Pek çok farklı sensöre uygun arayüzlere sahip olan bu kart sağlık, tarım, çevre, akıllı kent, akıllı fabrika, eğitim gibi sektörlerde akıllı enformatik uygulamalarda kullanılmaktadır. Örneğin bu kart kullanılarak akıllı kent kapsamında hava kalitesi denetim sistemi geliştirilmiştir, [5]. Kart üzerindeki işlemci Atmel ATmega1281 adlı 8-bit mikro denetleyicidir. Dolayısıyla bu kart düşük yoğunluklu veri akışı için uygundur, ancak ses veya görüntü gibi yoğun verilerin bu platformda gerçek zamanda işlenebilmesi mümkün değildir. Tablo 1'de SigMote, WaspMote ve ARM

işlemcili genel bir IoT cihazı işlemci kapasitesi MIPS (saniyede milyon sayıda işlemci komutu) açısından karşılaştırılmıştır. IoT amaçlı kullanılan cihazlarda ARM yapılı işlemciler yaygın olarak kullanıldığı için bu tür bir işlemci de karşılaştırmaya dahil edilmiştir.

**Tablo 1:** İşlem kapasitesi açısından SigMote, Waspote ve ARM işlemcili genel IoT cihazı karşılaştırması.

	SigMote	ARM işlemcili IoT Cihazı	Waspote (Libelium)
CPU	DSP (TI-C67xx)	ARM (Cortex M4)	ATmega1281
CPU özellikleri	32 bit FPU, Sayısal sinyal işlemci (DSP)	32 bit FPU, mikro denetleyici	8 bit mikro denetleyici
Clock (MHz)	375 (456 max.)	80 (max)	16 (max)
MIPS	3648	100	16

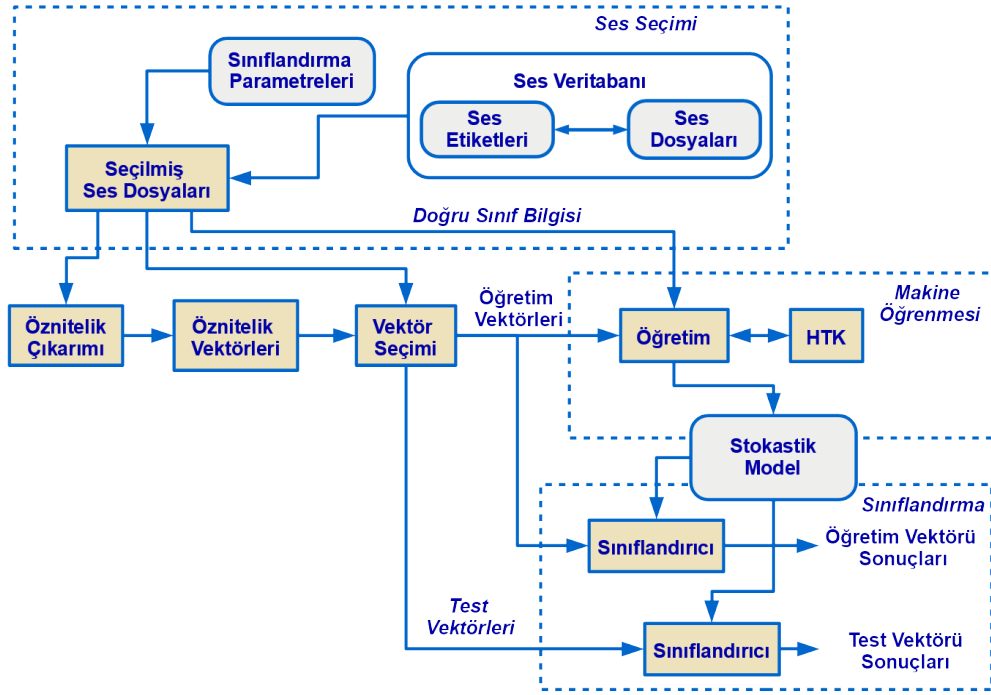
#### 4. SIGMOTE ÜZERİNDE SES SINIFLANDIRMA UYGULAMASI

Şekil 2’de gösterilen SigMote platformunun algoritma katmanı, sistemin kullanılacağı akıllı uygulamaya özgü olarak programlanmakta, böylece sistemin birbirinden görünüşte çok farklı uygulama senaryolarına uyarlanması mümkün olmaktadır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen sinyal işleme algoritması makine öğrenmesine (machine learning) dayalı ses ortam analizi ve sınıflandırması (audio scene analysis, acoustic environment classification) yapmaktadır [6, 7].

Yöntemde, öncelikle örüntü tanımayı (pattern recognition) sağlayacak stokastik model olarak kullanılan hidden Markov model (HMM); önceden kaydedilmiş gerçek ses sinyalleri kullanılarak öğrenme/egitim (training) sürecinden geçirilmektedir [8]. Bu amaçla ses sinyallerinin zaman-frekans boyutlarındaki birçok öznelik (feature) değerleri çeşitli analiz yöntemleri ile çıkarılmakta, daha sonra öznelik vektörleri sınıflandırma işleminden geçirilerek doğru sınıflandırmayı sağlayan HMM modelinin parametre değerleri bulunmaktadır. Böylece öğrenme aşamasından geçirilen HMM modelin parametreleri daha sonra gömülü yazılıma aktarılarak SigMote üzerinde yer alan DSP işlemci üzerinde çalıştırılmaktadır. Böylece gerçek hayatta verilen herhangi bir test sinyalinin gerçek zamanda analiz edilmesi ve sınıflandırılması sağlanmaktadır. Bu yapı Şekil 3’te gösterilmektedir.



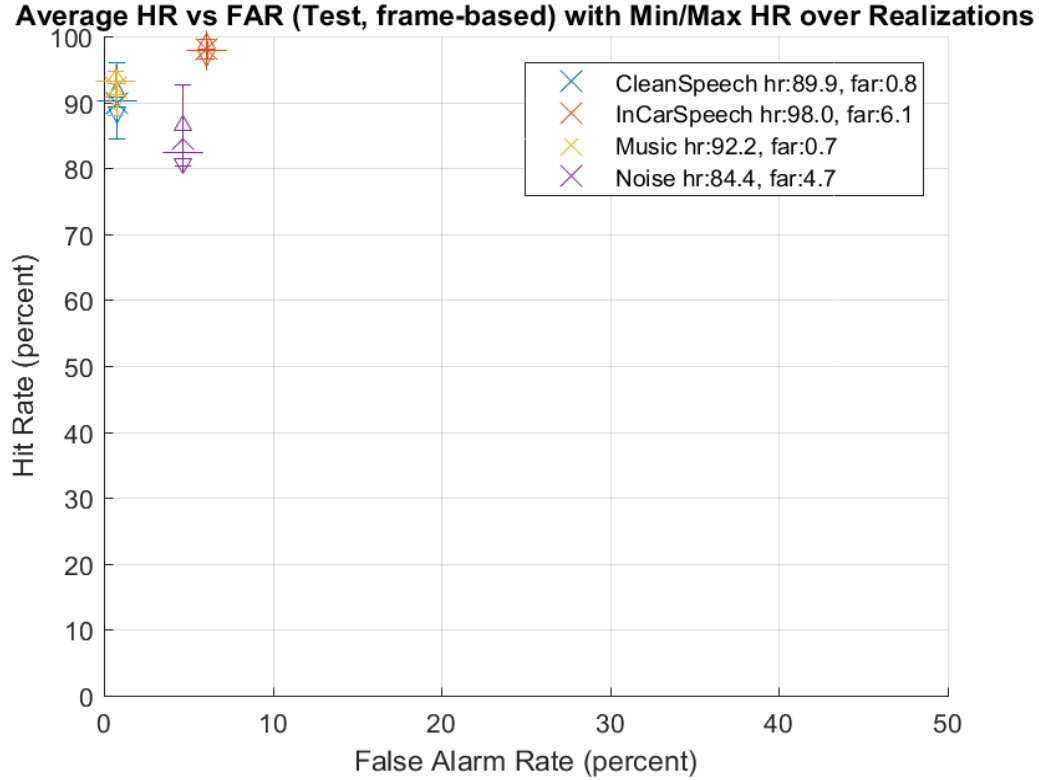
Sistemin ses sinyali dosyalarını içeren ses veri tabanı üzerinde eğitilmesi ve test edilmesini sağlamak için her sınıfa ait sesler rastlantısal olarak eğitim ve test için gruplara ayrılmaktadır. Bu rastlantısal veri seçim yöntemi pek çok kere tekrar eden döngüler içinde kullanılarak algoritmanın başarımı kullanılan sınıflara ve öznitelik setlerine göre belirlenmektedir.



**Şekil 3:** Ses sınıflandırması için makine öğrenmesi veri akışı

Zaman ve frekans boyutlarında geniş çeşitlilik gösteren bir öznitelik seti ve belli bir sınıf tanımı için alınan sonuçlar Şekil 4'te gösterilmiştir. Sınıf tanımında kullanılan 4 sınıf; yalın konuşma, otomobil içinde motor ve yol gürültülü ortamda konuşma, müzik ve yalın gürültüdür. Başarım, şekilde doğru tespit oranı (hit rate) ve yanlış alarm oranı (false alarm rate) eksenlerinde pek çok kez tekrar edilen rastlantısal veri seçim döngülerinde farklı ses dosyası setleri için elde edilen sonuçların bir ortalaması olarak (çarpı işareti ile) verilmiştir. Grafikte döngü içinde ulaşılan en az ve en çok değerler ile 25 ve 75 yüzdelerlik dilimleri de gösterilmiştir.





**Şekil 4:** Ses ortam sınıflandırması doğru tespit oranı (hit rate, HR) ve yanlış alarm oranı (false alarm rate, FAR) sonuçları. Yalın konuşma, otomobilde konuşma, müzik ve yalın gürültü olmak üzere 4 ses sınıfı.

## 5. DİĞER POTANSİYEL UYGULAMALAR

Önceki bölümde verilen sonuçlar, kullanılan sınıf tanımıyla ve makine öğrenmesi ve testlerde kullanılan ses veritabanıyla bağıntılıdır ancak yöntemin ortalama başarımını doğru bir yöntemle göstermektedir. Testlerde kullanılan sınıf tanımları doğrudan bir uygulama amacıyla değil sistemin başarımının ortaya konması bakımından kullanılmıştır. Ancak kullanılan özniteliklerin geniş bir çeşitlilikte olması dolayısıyla sistem, başka ortam ve sınıflara ait ses kayıtlarıyla eğitilip kullanılabilir. Örneğin, algoritma, bu çalışma kapsamında Endüstri 4.0 alanında elektrik motoru fabrika üretim hattında motor seslerinin hatalı veya hatasız olarak sınıflandırılması için uyarlanmış ve başarılı sonuçlar alınmış, daha geniş bir veri seti üzerinde test edilmesi için veri toplama çalışmaları planlanmıştır.

Benzer şekilde, sistemin farklı çevresel seslere ve sınıf tanımlarına kolaylıkla uyarlanması mümkündür. Cam kırılması, çığlık, silah sesi gibi ses olaylarının tespitine dayalı olarak akıllı kent/ev/bina alanında güvenlik veya düşme, imdat çağrısı gibi

seslerin belirlenmesine dayalı olarak sağlık alanında hasta/yaşlı takibi uygulamaları üzerinde çalışılan çözümlerdir, [9, 10, 11].

SigMote platformu kapsamında geliştirilen algoritmada örüntü tanıma amacıyla kullanılan stokastik model, konuşma tanıma (speech recognition) amacıyla da kullanılan bir yapıdır, [8]. Bu özelliğiyle SigMote, konuşma tanıma dayalı uygulamalara uyarlanabilecek durumdadır.

SigMote platformunun her türlü sensörün entegre edilmesine uygun olması nedeniyle ses sinyali dışındaki sinyaller de platform üzerinde algılanıp analiz edilebilmektedir. Platform, akıllı fabrika (Endüstri 4.0) alanında önleyici bakım (preventive maintenance) amaçlı olarak fabrika ortamında makine seslerini ve titreşim sinyallerini sürekli algılayıp analiz ederek bakım ihtimali yüksek makineler hakkında bildirimde bulunacak şekilde kullanılabilir, [12].

Platform, akıllı kent alanında sisteme entegre edilecek elektrokimyasal gaz sensörleri ve fosil yakıt partikül sensörleri ile kent genelinde kablosuz bir sensör ağı oluşturarak hava kalitesi ölçümü yapabilecek durumdadır, [5].

## 6. SIGMOTE'UN MODSİM ALANINDA KULLANIMI

Bir sistemin benzetimi için veriyi oluşturan fiziksel alt sistemlerin modellenmesinin mümkün olmadığı veya hassas yapılamayacağı durumlarda doğrudan sensörden veri toplanarak gerçek veri üzerinden sistemin bileşenleri ve genel işleyişi modellenmekte, veri analizi için kullanılan algoritma ve tekniklerin simülasyon ve testleri bu veri üzerinden yapılmaktadır, [13].

Bir sensör ağı içinde yer alan her bir sensör tarafından algılanan sinyal ve verinin merkezi bir sunucuya aktarılmadan önce yerinde yapılabilecek analiz ve işlemlerden geçirilmesi, böylece merkezi sunucuya boyutlarının indirgenerek ve sadece sinyal içinde saklı faydalı bilginin ortaya çıkarılarak gönderilmesi; hem sensör ağındaki bant genişliği (bandwidth) gereksinimlerini azaltmakta hem de işlem gecikmesini (latency) azaltarak gerçek zamanlı simülasyonları mümkün kılmaktadır.

Bu çalışmada geliştirilen SigMote platformu, sözü edilen gereksinimleri karşılayacak, özellikle akıllı kent, Endüstri 4.0 gibi teknoloji sektörlerinde simülasyon ve modelleme açısından kullanılabilir bir altyapı sağlamaktadır. Kablosuz ağ yapısı içinde ağ düğümleri (node) olarak kullanıldığında farklı pek çok noktadan gelen ve toplamda büyük veri boyutuna ulaşacak nitelikte ham veya işlenmiş veri elde edilmektedir.

SigMote, sadece pasif bir sensör verisi algılayıcı olarak değil aynı zamanda devindirici (actuator) olarak üst karar alma mekanizmalarından gelecek komutları yerine getirebilecek işlemci düzeyinde hızlı arayüzlere sahiptir. Bu nedenle modsım uygulamalarının bir alt bileşeni olarak döngüde donanım (hardware in the loop)

kapsamında SigMote hem sensör hem de devindirici olarak kullanılabilir. Böylece sensörden gelen verinin SigMote tarafından algılanmasından başlayan, kablosuz iletişim kanalları tarafından merkezi sunucuya ulaşan verinin simülasyona dahil edilmesiyle devam eden süreç; merkezi sunucudan gönderilen komutların SigMote tarafından devinime dönüştürülmesiyle tamamlanmış olmaktadır.

SigMote platformu üzerinde işletilen makine öğrenmesine dayalı algoritmaların sinyalin stokastik modelini içerdiği, böylece sinyal üzerinde örüntü tanıma yapıldığı önceki bölümlerde anlatılmıştır. Modellemenin her sensör düğümünde (sensor node) yapıyor olması dolayısıyla gerçek sensör verisine ve yerinde işlemeye dayalı modsim uygulamaları esasen tüm sensör ağına dağıtık bir modelleme kullanmaktadır.

Bunun ötesinde bir takım veri analiz işlemleri; veri kablosuz iletişim kanalları üzerinden merkezi bir sunucuya gönderilmeden tamamıyla sensör düğümü olarak görev yapan SigMote üzerinde algıla-işle-devindir adımlarıyla yürütülebilmektedir, [14].

Akıllı fabrika (Endüstri 4.0) kapsamında öne çıkan bir uygulama gerçek sensör verisi kullanarak bir fabrikanın dijital ikizinin oluşturulması, böylece modelleme ve simülasyon ile üretim planlamasının en iyi şekilde yapılması, sistem parametrelerinin optimize edilmesi ve hataların öngörülmesidir. Bu tür uygulamalarda sayısal veri toplanmasının, verinin yerinde işlenmesinin ve bunun en az işlem gecikmesi ile yapılmasının önemi vurgulanmaktadır, [15, 16, 17].

Dijital ikize benzer şekilde akıllı kent kapsamında trafik akışının gerçek sensör verisine dayalı olarak modellenmesi, simülasyon üzerinden öngörülerin oluşturulması ve buna bağlı olarak trafik altyapısında optimizasyonların yapılması önemli bir modsim uygulamasıdır. Örneğin, araçların kamera görüntüleri üzerinden tespiti ve sayılması gibi sensör verileri ile trafik simülasyonu ve dolayısıyla trafik ışıklarının ve altyapının optimizasyonu yapılabilmektedir, [18, 19].

## **7. SONUÇ**

Bu çalışmada, SigMote adını verdiğimiz sayısal sinyal işleme sensör platformu tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Platformun başarımı makine öğrenmesine dayalı algoritmaların platform üzerinde gerçek zamanda çalıştırılması ile gösterilmiştir. Sensör ağları içinde özellikle verinin yerinde işlenmesine yönelik olarak tasarlanan platform IoT, akıllı kent, akıllı fabrika (Endüstri 4.0) başta olmak üzere pek çok akıllı sayısal uygulamada, aynı zamanda modsim kapsamında kullanılabilir yapıdadır.

## **8. TEŞEKKÜR**

Bu çalışma TÜBİTAK 1512 programı ve KOSGEB Ar-Ge İnovasyon programı tarafından desteklenen projeler kapsamında yapılmıştır.

## 9. KAYNAKÇA

- [1] Wang, S., vd. (2018), A survey on service migration in mobile edge computing, *IEEE Access*, Vol. 6 (Special Issue on Mobile Edge Computing), p. 23511.
- [2] Yu, W., vd. (2018), A survey on the edge computing for the Internet of things, *IEEE Access*, Vol. 6 (Special Issue on Mobile Edge Computing), p. 6900.
- [3] Zhang, J., vd. (2018), Data security and privacy-preserving in edge computing paradigm: survey and open issues, *IEEE Access*, Vol. 6 (Special Issue on Mobile Edge Computing), p.18209.
- [4] Waspnote, Libelium (2019), <http://www.libelium.com/products/waspnote>.
- [5] Mansour, S., vd. (2014), Wireless sensor network-based air quality monitoring system, *International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, Honolulu, HI., pp. 545-550.
- [6] Theodoridis, S. ve Koutroumbas, K. (1999), *Pattern Recognition*, Academic Press.
- [7] Bühler, M. C. (2002), *Algorithms For Sound Classification in Hearing Instruments*, doctoral dissertation, Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- [8] Rabiner, L. R. ve Juang, B. H. (1993), *Fundamentals of Speech Recognition*, Prentice-Hall, 1993.
- [9] Lojka, M., vd. (2016), Efficient acoustic detector of gunshots and glass breaking, *Multimedia Tools and Applications*, 75 (17), pp. 10441-10469.
- [10] Istrate, D., vd. (2006), Information extraction from sound for medical telemonitoring, *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 10(2), pp.264-274.
- [11] Nef, T., vd. (2015), Evaluation of three state-of-the-art classifiers for recognition of activities of daily living from smart home ambient data, *Sensors*, 15(5), pp.11725-11740.
- [12] Henriquez, P., vd. (2014), Review of automatic fault diagnosis systems using audio and vibration signals, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 44(5), pp. 642-652.
- [13] Kim, B. S., vd. (2017), Data modeling versus simulation modeling in the big data era: case study of a greenhouse control system. *SIMULATION*, vol. 93, no. 7, pp. 579–594.
- [14] Gupta H., vd. (2017) iFogSim: A toolkit for modeling and simulation of resource management techniques in the Internet of Things, Edge and Fog computing environments. *J. Software: Practice and Experience*. Vol. 47 pp. 1275–1296.
- [15] Uhlemann, T. H.-J., Lehmann, C. ve Steinhilper, R. (2017), The digital twin: realizing the cyber-physical production system for Industry 4.0, *Proc. 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, vol 61, pp. 335-340.
- [16] Alam, K. M. ve Saddik, A. E. (2017), C2PS: A Digital Twin Architecture Reference Model for the Cloud-Based Cyber-Physical Systems, *IEEE Access*, vol. 5, pp. 2050-2062.
- [17] Negri, E., Fumagalli, L. ve Macchi, M. (2017), A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems, *Proc. 27<sup>th</sup> Int. Conf. Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, Modena, Italy.
- [18] Bowman, C. (2014), Big data simulation: traffic simulation based on sensor data, *Proc. IEEE Winter Simulation Conference*, p. 4123.
- [19] Cruz-Piris, L., vd. (2018), Optimized sensor network and multi-agent decision support for smart traffic light management, *Sensors*, vol. 18(2), p. 435.

## OTOMATİK TESTLERİN YAZILIM SİMÜLASYONLARI İLE ENTEĞRE BİÇİMDE ETKİN KULLANIMI

Volkan Erleblebici <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Ekinoks Yazılım Ltd.Şti.,  
volkan.erleblebici@ekinoksoftware.com

### ÖZ

Günümüzde yazılım ihtiyacının artması, bu ihtiyacı karşılayan sektör büyüklüğünün bu artışa ayak uyduramaması ve gelişen teknolojiler sonucu, daha hızlı ve hatasız aynı zamanda da kaliteli yazılım geliştirme ihtiyacı vazgeçilmez bir konuma gelmiştir. Bu noktada test otomasyonunun kritik önemi olduğu değerlendirilmiş, sektörde hızla kullanılmaya başlanmış ve süreçlere dahil edilmiştir. Mevcutta yürütmekte olduğumuz projelerimizden biri olan radar kullanıcı arayüzü yazılımı ve ilgili yazılımı test etmek üzere geliştirdiğimiz bir radar simülatörü üzerinde otomasyon altyapısı oluşturulmuş ve bu kapsamda ihtiyaç duyulan uygulamalar tarafımızdan geliştirilmiştir

Otomatik test çalışmalarımızda izlenen tüm adımlar, kullanılan metot ve metrikler dünya genelinde ISTQB ve TMMI gibi otoriteler tarafından tanımlanmış ve bilişim teknolojileri üzerinde faaliyet gösteren kuruluşlar tarafından kabul görmüş metot ve metriklerdir. Test otomasyonunun bilinen kazanımlarının yanında, otoritelerin yayımladığı metot ve metrikler baz alınarak yaptığımız çalışmalarımız sonucunda; kalite süreçlerinde iyileşmeler, test kapsama oranında artış, geliştirme maliyetlerinde düşüş, erken hata tespiti, teslimat sürelerinde isabet, ürünlerimizin 7/24 teste tabi tutulabilmesi gibi kazanımları elde etmiş bulunmaktayız.

Bu bildiri; kullandığımız metotlar, çalışmalarımızın kilometre taşları, analizlerimiz, kullandığımız metrikler, karşılaştırmalı ölçümlerimiz ve kazanımlarımız detaylarıyla sunulacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Otomatik Test, Radar Simülatörü, Test Metot ve Metrikleri, Test Otomasyonu, Test Süreçleri

### EFFECTIVE INTEGRATED USAGE OF AUTOMATED TEST METHODS WITH SOFTWARE SIMULATIONS

## ABSTRACT

As the need of software increases, an increase of number arises for companies who can keep up with the new technology by producing faster and error-free desired level of high quality software. At this point the critical importance of test automation is evaluated. The rapid shift in test automation has been included in the process of software development. For a current project of ours we developed an automation infrastructure on a radar simulator that tests the radar user interface software.

Testing steps, methods and metrics used in our automatic testing are defined by the authorities worldwide and recognized by organization operating on information technologies including ISTQB and TMMI.

As a result of our study based on methods and metrics defined and published by the authorities we achieved improvement; in the quality process, increase in test coverage, decrease in development cost, early bug detection, on-time project/product delivery and our products can be subjected to 7/24 tests.

In this statement: the method and metrics we used, milestones of our work, analyzes, comparative measurements and lastly our achievement will be presented in detail.

**Keywords:** Automated Test, Radar Simulator, Test Automation, Test Methods and Metrics, Test Process.

## 1. GİRİŞ

Bilişim teknolojileri sektörü gün geçtikçe büyümekte, toplumun ihtiyaçlarını karşılamaya çalışmakta, teknolojik gelişmelere paralel olarak ürün yelpazesi genişlemekte ve sektörel rekabetin getirdiği baskının da etkisiyle daha hızlı yazılım geliştirmek yönünde evrilmektedir. Ürün geliştirme süreçlerinde zaman kavramı en önemli değerlerden birisi olup, hızlı geliştirme yaparken, kaliteden, bir başka deyişle, mümkün olduğunca hatasız ürün geliştirmeden de ödün verilmemesi gereklidir. Bu dengenin sağlanamadığı projelerin yaşattığı maddi – manevi kayıplar ise söz konusu projenin başarılması durumunda elde edilecek kazanımların dahi çok üzerindedir [1].

## 2. TEST OTOMASYONU İHTİYACI

Sektör gelişmeye ve ihtiyaçlara karşılık yaratmaya çalışırken bir yandan ihtiyaçlar artmaya devam etmekte, yeni fikir ve teknolojiler ortaya çıkmakta, diğer yandan da bilgi teknolojileri sektörüne olan ilgi de artmaktadır [2]. Daha fazla geliştiricinin daha fazla ürünü servis edeceği orantısı ile düşünüldüğünde, bir noktada arz-talep buluşması yaşanacağı öngörülebilir. Ancak bir geliştirici için ürün geliştirmeye ayıracağı zamanın

kısıtlı olmasıyla, her iki artış (ihtiyaç ve geliştirici) birbirini takip etmekte, ancak yine de zaman, ürün geliştirme aşamalarında yine en değerli kavram olarak yerini korumaktadır.

Bir başka bakış olarak, geliştirilen ve servis edilen ürünlerde hatalar bulunması (kalite, itibar düşüşü, maddi kayıplar) günümüz rekabet ortamında kabul edilebilir bir durum değildir [4,5]. Yazılım geliştirmenin üç ana süreci analiz, geliştirme ve testtir. Sektörde en az önem verilen, proje dinamikleri ve diğer pek çok sebepten dolayı, öncelikli olarak göz ardı edilebilen, gerektiğinde işletilmeyen süreç test sürecidir. Zaman kısıtı, projelerde test süreçlerinin gerçekleştirilmemesinin ya da eksik olarak gerçekleştirilmesinin en önemli sebeplerinden birisidir.

Halbuki günümüzde, geliştirme süreçleri arasında otomatik olarak gerçekleştirilebilecek tek süreç test sürecidir. Otomatik testler bu özelliği ile projelere net bir biçimde zaman kazandırmakta ve bilişim teknolojileri sektöründe en ilgi çekici akımlardan biri olmaya devam etmektedir [3]. Test süreçlerinin otomatikleştirilmesi sonucunda ölçülebilir maddi kazançlar sağlamak mümkün olduğu gibi, manevi kazanımları da (ürüne olan güvenin artması, test körlüğünün engellenmesi, rutin işlerin getirdiği sıkıntılardan kurtulma vb.) olduğu bilinmektedir.

### 3. TEST OTOMASYONU ALTYAPISI

Otomatikleştirilmiş testlerde açık kaynak ve lisanslı ürünler dahil pek çok farklı altyapı kullanmak mümkündür. Kullanılacak altyapının ya da lisanslı ürünün;

- Projenin içeriğine / teknolojisine uygun olması,
- Maliyet yönünden katlanılabilir olması,
- Kolaylıkla kullanılabilir olması,
- Testlerin tekrarlanabilir olması,
- Sağladığı otomatik testlerin sağlam olması,
- Otomasyon kodlarının bakım maliyetlerinin uygun olması,
- Koşumlar sonrası detaylı rapor sunması vb.

gibi temel özelliklere sahip olması göz önünde bulundurulmalıdır.

Test otomasyon altyapısı geliştirirken, test edilecek uygulamanın/projenin özelliğine bağlı olarak farklı seçimler yapmak mümkün olup, gelişen teknoloji ve yenilikçi test yaklaşımlarına kolaylıkla adapte edilmesi durumu da göz önünde bulundurulmalıdır. Ancak proje ne tür bir proje olursa olsun, kaybedilmemesi gereken önemli noktalardan bir tanesi ise yazılım testi bakış açısı ve stratejisinin uygulanmış olmasıdır. Bir ürün test edilirken dünya genelinde kabul edilmiş test kriterlerinin ve otoriteler tarafından yayınlanmış metriklerin ışığında süreç işletmek, sürece test mentalitesini modelleyecek biçimde adapte olmak test sürecinin sonuçlarını etkileyebilecek kadar önemli bir konudur [6,7].

### 3.1 Test otomasyonu yaklaşımı

Test otomasyon projelerinde, test edilecek uygulamanın farklı uygulamalar (yan/entegre uygulamalar) ve/veya web servisler ile ilişkili ve entegre olarak çalışması sık karşılaşılan bir durumdur. Entegre uygulamalara ulaşılamaması, test kapsamının dışında kalması, entegre uygulamanın tetiklenmesi gerekliliğinin olması vb. gibi durumlarda sanallaştırma (virtualization, mock) işlemi yapılabilmektedir. Sanallaştırma işlemi temelde, ihtiyaç duyulan entegre uygulamadan gelmesi beklenen geri dönüşün (verinin, yanıtın, tepkinin vb.), geri dönmüş gibi davranmasını sağlamaktır. Bu sayede test edilecek ana uygulama dış etkilerden bağımsız olarak, sanallaştırılmış entegre uygulamaları ile birlikte bir bütün olarak çalışır ve erişimi diğer uygulamalara bağlı olan en uçtaki fonksiyonlara kadar erişim sağlar. Böylelikle entegre olmamış ana uygulama entegre olmuş gibi çalışarak, ana uygulamanın fonksiyonlitesi test edilebilir. Web projeler için entegre uygulamalara ek olarak web servislerinden bahsedilebilir ve genellikle bir web projesinde entegre uygulamadan daha fazla web servisi entegrasyonu bulunabilir. Servisin türüne bağlı olarak (SOAP / REST) sanallaştırma yapılarak ana uygulama uç noktalarına kadar test edilebilir.

Otomasyon ile testler çalışırken, aynı sanallaştırma mekanizması kullanılarak ilerlenir ve sonuçlar raporlanır. Eğer bir entegre uygulamaya erişim mümkün ve teste dahil edilmesi gerekiyorsa, entegre uygulama üzerinde de otomasyon yapılarak testler çalıştırılabilir. Eğer tüm entegre uygulamalar ulaşılabilir durumda ve üzerlerinde testler yapılarak ilerlenebiliyorsa bu duruma “uçtan uça entegrasyon”, otomasyon kullanılması halinde “uçtan uça otomasyon” denir.

Süreçin içerisinde, entegrasyonlardan bir veya daha fazlası herhangi bir donanıma (telefon, modem, radar vb.) ait olabilmektedir. Bu gibi durumlarda, yani bir donanımın entegrasyon hattında bulunması durumunda, insan müdahalesi gereken (bir anahtarın açıp kapatılması, yeniden başlatma işlemi vb.) test adımları da dahil olabilir. Ancak kimi zaman donanıma erişmek, müdahalede bulunmak ya da herhangi bir işlemi gerçekleştirmek mümkün olamamaktadır. Bu durumda projenin testi gerçek donanımla yapılamasa da - web projelerindeki entegre uygulama veya web servislerin sanallaştırılması gibi - bir simülatör yardımıyla yapılabilmektedir.

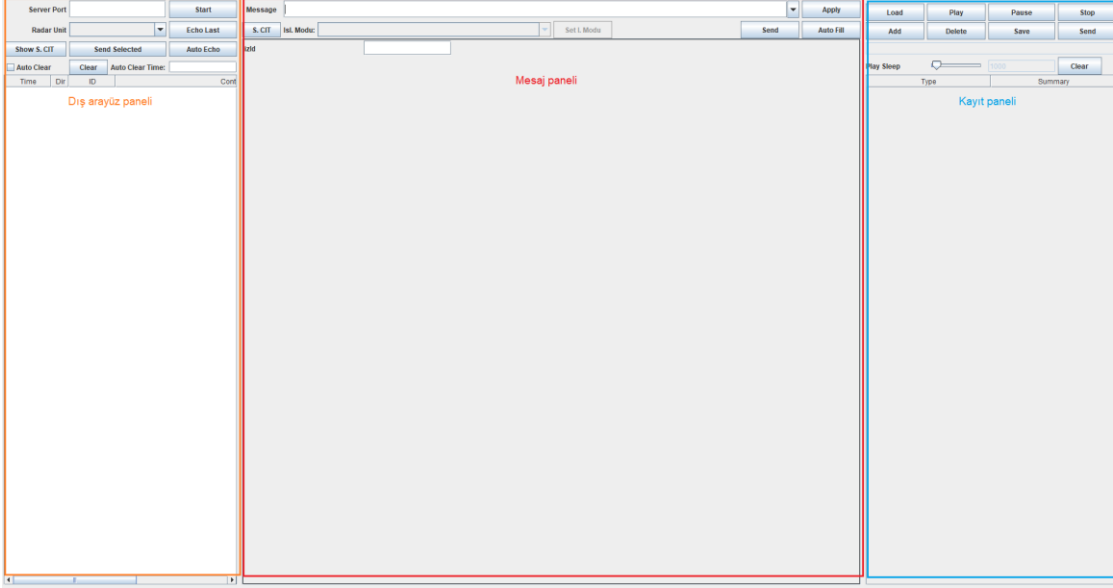
### 3.2 Radar kullanıcı arayüzü yazılımı

Radar kullanıcı arayüzü yazılımı, ASELSAN tarafından geliştirilmiş olan birden fazla alt sisteme sahip büyük ölçekli bir radar projesi için, farklı konfigürasyonlarla özelleştirilerek kullanılabilir, radar kontrol fonksiyonlarına arayüz sağlayan, radar çıktılarını görüntüleyen; mühendislik amaçlı kullanımında bakım, test ve radar verileri analiz ortamını sağlayan bir grafiksel kullanıcı arayüzü yazılımıdır.



### 3.3 Radar simülâtör yazılımı

Simülâtör uygulaması, yukarıda bahsedilen radar projesi için, ortamda alt sistem veya platform verisi sağlayan bir kaynak olmadığında bunların yerine kullanılabilen ve aynı mesaj akışlarını sağlayabilen bir simülâtördür. Simülâtör Şekil 1’de verilen üç ana panelden oluşur.



Şekil 1. Radar simülâtör yazılımı

#### 3.3.1 Dış arayüz paneli

Dış arayüz paneli, Simülâtör uygulamasının sol tarafında bulunur. Buradan hangi dış arayüzün bağlanacağı seçilir. Bağlantı sağlandıktan sonra gelen-giden mesaj akışı da yine bu panel üzerinde görüntülenir.

#### 3.3.2 Mesaj paneli

Mesaj paneli, Simülâtör uygulamasının ortasında bulunur. Dış arayüzden seçilen radar birimine uygun olarak burada mesajlar ve içerikleri bulunur.

#### 3.3.3 Kayıt paneli

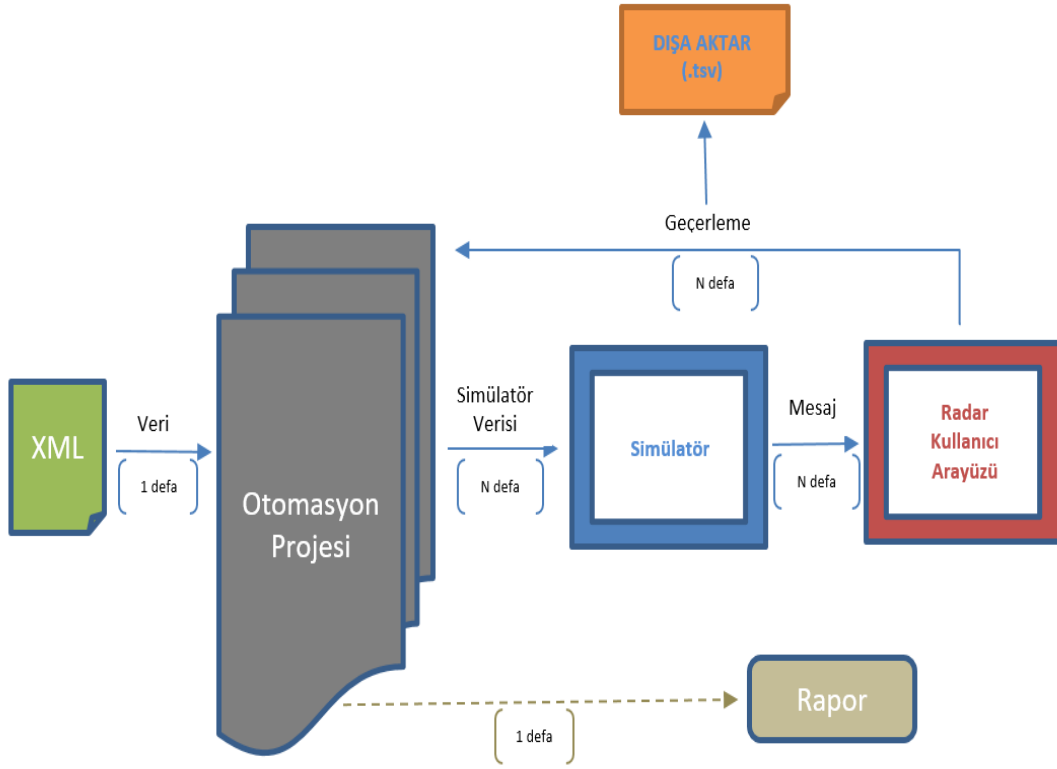
Kayıt paneli, Simülâtör uygulamasının sağ tarafında bulunur. Yeni senaryolar kaydetmeye ve eski kaydedilmiş senaryoları oynatmaya olanak sağlayan bir paneldir. Senaryo dosyalarının içeriği, öncesinde seçilmiş radar biriminin mesajlarından oluşur.

Radar kullanıcı arayüzü uygulamasının geliştirme, test edilme ve hatta kullanıcı tarafından gerçekleştirilen kabul testleri aşamalarında, Radar Simülâtör yazılımı aktif olarak kullanılmaktadır. Radar kullanıcı arayüzü uygulamasında yapılan her değişiklik, yeni geliştirme ve hata giderme çalışmalarının radar üzerindeki etkilerini görebilmek üzere Radar Simülâtör yazılımı üzerinde de gerekli güncellemeler yapılmakta ve radara

kazandırılan her özellik güncel olarak simülatöre de yansıtılmaktadır. Bu sayede simülatörün davranış biçimi radarla eş olarak tutulmaktadır.

### 3.4 Simülator ve test otomasyonu entegrasyonu

Temel olarak simülatörün otomatik olarak çalıştırılması ve radar kullanıcı arayüzü yazılımına tam kapsamlı olarak, istenilen sıra ve zamanda olması gereken veri kümesinin gönderilmesi, radar kullanıcı arayüzü yazılımı üzerinde oluşturulan durumun alınması, ardından ise mevcut durumun beklenen durum ile karşılaştırılması işlemi, otomatik testlerin kademeleridir. Radar kullanıcı arayüzü uygulamasının test edilmesinde Simülator uygulaması kullanımını gösteren şema, Şekil 2’de verilmiştir.



**Şekil 2.** Simülator ve otomasyon entegrasyonu

Teknik detaylardan bağımsız olarak simülator ile radar kullanıcı arayüz uygulaması arasındaki tüm işlemler ve sıralaması aşağıda belirtilmiştir.

- Verilerin uygulamalar üzerinde kabul edilebilir hale getirilmesi,
- Simülator'e tam kapsamlı ve sıralı verilerin doğru zamanlama ile verilmesi,
- Simülatorün durum değişikliklerinin yapılması,
- Verinin simülatorde işlenmesi,
- Yeni durumun simülatorden radar kullanıcı arayüzü uygulamasına iletilmesi,
- Radar kullanıcı arayüz uygulaması üzerinde oluşan durumun dışa aktarılması,

- Mevcut durum ile beklenen durumun karşılaştırılması,
- Test koşum raporunun oluşturulması.

Kontrol edilecek mesaja göre adım, test ve doğrulama sayısı Tablo 1’de belirtilmiştir.

**Tablo 1.** Test döngüsü verileri

Test Türü	Adım Sayısı	Döngü	Doğrulama Sayısı	Toplam
Tür 1	126		4.788	
Tür 2	36	38	1.368	10.412
Tür 3	48		1.824	
Tür 4	64		2.432	

Radar kullanıcı arayüzü uygulamasının sadece bir radara ait bir özelliğini test eden 4 farklı otomatik testin simülatör ile radar kullanıcı arayüz uygulaması arasında yaptığı veri alışverişi adedi 10.412’dir. Bu testin sonuçlanma süresi ise yaklaşık 9,5 saat olup, bir test mühendisi tarafından bu kapsamda bir testin aynı dikkatle yapılması oldukça maliyetli bir iştir.

### 3.5 Metot ve metrikler

Bir donanımın rolünün bulunduğu bir geliştirme bandı üzerinde yapılacak otomasyon çalışması planlanırken birçok açıdan konu irdelenmiştir. Otomasyon projelerinde büyük sıkıntılara hatta projelerin kapanmasına neden olan bakım maliyeti problemi gibi sorunlardan kaçınmak amacıyla projede Page Object Model (POM) kullanılmıştır [8].

Web projelerde geliştirmiş olduğumuz ve uzun süredir kullandığımız bir yeteneğimiz olması sebebi ile de POM tercih edilmiştir. Simülatör ve radar kullanıcı arayüzü uygulaması arasında saatler/günler süren testlerin bakımının yapılarak kaybedilen zamanın tekrar harcanması gibi bir kaybın önüne bu şekilde geçilmiştir.

Yapılan çalışmalarda alınan olumlu sonuçlar uçtan uça olarak genişletilmiştir. Radar kullanıcı arayüz uygulamasının çok kritik bir noktası olan ve manuel olarak koşulması durumunda harcanan eforun (manuel olarak, tam kapsam olmadan, 5-7 kişilik bir ekiple koşulması, yapılan teslimat raporlarında ortalama olarak 2 hafta olarak görülmüştür) belirtildiği cihaz içi testler kısmından başlanmıştır. Bu bildirinin yazıldığı an itibarı ile mevcutta gerçekleştirilmesi beklenen testlerin %20’lik kadar kısmı otomatize edilmiştir.

Test kapsamı olarak da tam kapsamlı (full-coverage) otomatik testler geliştirilmiştir. Simülatör ile radar kullanıcı arayüz uygulaması arasında olabilecek tüm veri çeşitleri kapsanacak biçimde çalışmalar yapılmıştır. Önceki durumla karşılaştırılacak olursak, 7 farklı veri türü için, 2 farklı veri türü ile koşulan manuel durum, otomasyon ile 7 farklı

veri ile de koşulmaktadır. Benzer durum daha fazla veri türü isteyen tüm testler için de geçerlidir.

#### 4. KAZANIMLAR

Manuel olarak koşulması sayısal olarak imkansız olmasa da çok fazla zaman alan testlerin aynı dikkatle koşulması mümkün olmamaktadır. Test koşum sayısı ve yarattığı maliyet arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 3'teki gibidir[9]. Test koşumu arttıkça manuel koşumların maliyeti artarken otomasyon koşumlarının maliyeti azalmaktadır.

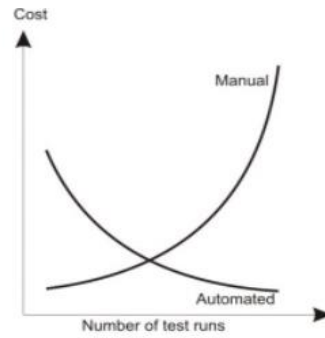


Figure 1. The cost of testing, by Hass [9].

#### Şekil 3. Manuel – otomatik test maliyet

Simülâtör odaklı ve simülâtörü de otomatik olarak kullanarak test ettiğimiz radar kullanıcı arayüz uygulaması geliştirmelerinde elde ettiğimiz kazanımlar ise Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir.

#### 4.1 Test verisi oluşturma otomasyonu kazanımı

Tablo 3. Test verisi otomasyonu kazanım

Aylık asgari veri ihtiyacı	Yıllık asgari veri ihtiyacı	Manuel veri oluşturma süresi*(dk)	Otomatik veri oluşturma süresi(dk)	Aylık manuel süre (dk)	Yıllık manuel süre (dk)	Aylık kazanç** (gün)	Yıllık kazanç* (gün)
220	2640	8,7	1,8	1.914	22.968	3,98	47,76
150	1800	11	2,1	1.650	19.800	3,44	41,28

*Not.* \* Test Ekibinden alınan ortalama süredir. \*\* Günde 8 saatlik çalışma üzerinden hesaplanmıştır.

## 4.2 Simülâtör ve radar kullanıcı arayüz uygulaması test otomasyonu kazanımları

Otomasyon çalışmalarımıza başlangıç olarak seçilen ve radar kullanıcı arayüzü uygulamasının sadece küçük ancak önem seviyesi çok yüksek olan kısım üzerinde yaptığımız çalışmalar ile elde ettiğimiz kazanımlar Tablo 4'te gösterilmiştir. İlgili kısmın manuel olarak, tam kapsam olmadan, 5-7 kişilik bir ekiple koşulması, yapılan teslimat raporlarında ortalama olarak 2 hafta olarak görülmüştür. İşgücü olarak bu kadar zaman alan koşulmanın otomasyonuna bu gibi nedenlerle karar verilmiş ve otomasyona geçirilecek ilk bölüm olarak seçilmiştir. Yapılan test planına göre toplamda 36 testin otomatize edilmesi öngörülmüştür.

**Tablo 4.** Test otomasyon kazanımı

Test sayısı	Manuel koşulım süresi*(dk)	Otomatik koşulım süresi(dk)	Aylık manuel/otomasyon süre(dk)	Yıllık manuel/otomasyon süre(dk)	Aylık kazanç** (gün)	Yıllık kazanç** (gün)
7	9,5	2,1	1.995/441	23.940/5292	3,23	38,85

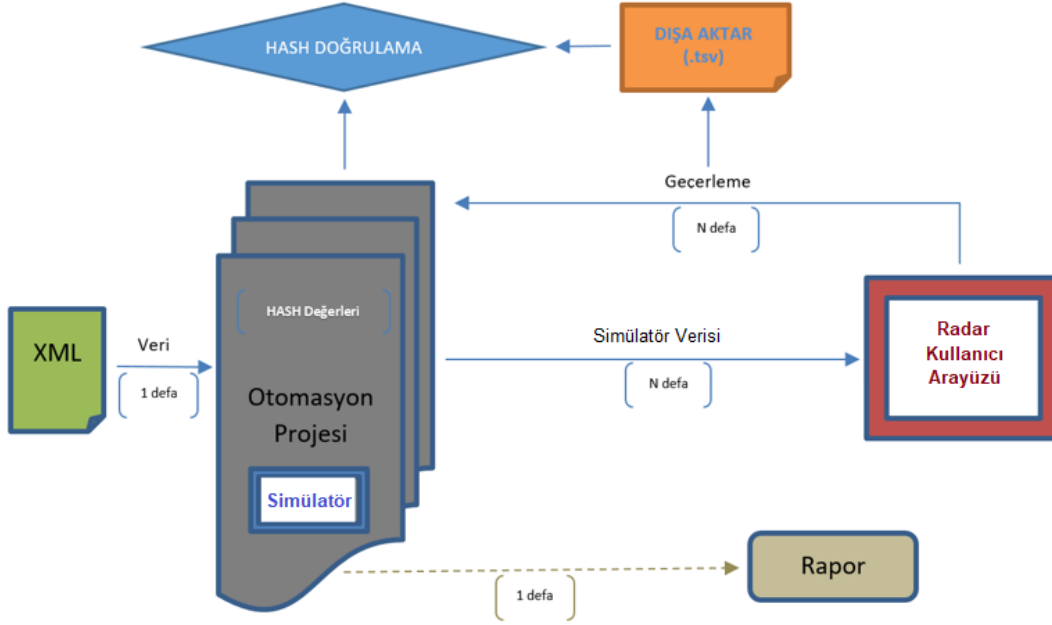
*Not.* \* Test Ekibinden alınan ortalama süredir. \*\* Günde 8 saatlik çalışma üzerinden hesaplanmıştır.

Simülâtör ve radar kullanıcı arayüz uygulamaları test otomasyonu kullanarak yedi adet otomasyon scripti kodlanmıştır. Bu sayı beklenen çalışmanın %20 lik bir kısmını oluşturmakla birlikte, manuel testlerden farklı olarak testlerde olası tüm verilerin kullanıldığı belirtilmelidir. Yani, otomasyonla koşan bu yedi adet otomasyon scripti veri olasılığı olarak tam kapsam olarak koşulmaktadır ve manuel koşulma ile kıyaslanırken bu farklılık göz ardı edilerek hesaplanmıştır. Ayrıca göz ardı edilen bir diğer nokta ise, manuel olarak 2-3 ayda bir teslimatlarda koşulan testler hergün koşulmaktadır. Bu durumda dahi, yıllık 38,85 günlük net kazanım sağlanmıştır. Tüm scriptler otomasyona dönüştürüldüğünde ise yaklaşık 200 günlük bir kazanım öngörülmektedir. Hergün koşulma yapıldığı ve tam kapsam olarak koşulduğu da düşünüldüğünde elde edilen kazanımın çok daha fazla olduğu açıktır.

## 4.3 Simülâtör ve radar kullanıcı arayüz uygulaması test otomasyonu efektifleştirme sonrası kazanımları

Otomasyon çalışmalarının geliştirilmesi ve daha verimli hale getirilmesi için geliştirmeler yapmak mümkündür. Test koşulım süresinin büyük kısmının doğrulama işleminde geçmesi, uzun bir metnin doğrulamasında oldukça mümkündür. Aynı zamanda eğer simülâtör uygulaması fiziki bir yapıda olmayıp, çalışmada kullanılan türde bir uygulama ise, simülâtör uygulamasının tamamı otomasyon projesi içerisine, proje içerisinde

çalışabilecek halde, fonksiyon kaybı olmadan uygun bir formatta alınabilir. Bu iki durumun uygulanması sonrası çalışmanın akışı Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Entegre simülör ve otomasyon entegrasyonu

Bu geliştirme sonrasında elde edilen kazanımlar tekrar hesaplanmış ve bir önceki durum ile (Tablo 4) karşılaştırılması yapılarak Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Entegre simülör sonrası kazanım

Test sayısı	Simülörlü Süre (dk)	Simülörlü Süre (saat)	Entegre Simülörlü Süre (dk)	Entegre Simülörlü Süre (saat)	Min Kazanım* (%)	Max Kazanım* (%)
7	2.002	22,1	515,6	8,58	36	86,5

Not. \* Koşumu yapılan testin uzunluğuna göre kazanım oranı değişiklik göstermektedir.

Söz konusu testlerin tamamı (36 adet) manuel olarak koşum maliyeti 3-4 hafta süreyle 5-6 kişilik bir (75 – 120 adam/gün) çalışan eforu söz konusu olup gelinen durumda 10-12 saat makine (1 – 1,5 adam/gün) eforu ile aynı test setinin koşulabildiği görülmüştür. Geceleri koşum planlaması veya sürekli sistemlere entegre edilerek insan gücünün sıfıra yaklaştırılması da mümkündür. İki durum arasındaki temel farklardan önemli bir nokta ise, otomasyon koşumlarının her girdi alanının alabileceği her değeri ile koşuluyor olmasıdır. Manuel eforla bu genişlikte bir setin koşumu durumu ise hesaba katılamamıştır.

## 5. SONUÇ

Simülâtör ve radar kullanıcı arayüz uygulamaları üzerinde yaptığımız çalışmalar sonucunda net bir biçimde görülmüş ve raporlanmış olan kazanım, maliyet kazanımıdır. Test kapsamında, olabilecek tüm veri setleri ile testlerin koşulması bir diğer önemli kazanıdır ki, radar kullanıcı arayüz uygulamasının davranışını kullanılabilece tüm veri değerleri ile görebilme imkanı sağlanmıştır.

Bu bildiri de aktardığımız ölçüm sonuçlarından yola çıkarak, simülâtörlerin otomasyonla birlikte kullanılmasının proje süreleri ve maliyetlerinde azalmaya yol açacağı değerlendirilmektedir. Aynı zamanda yedi gün yirmidört saat ürünün teste tabi tutulması sayesinde erken safhalarda hatalar yakalanabilecek ve sonuçta daha kaliteli ürünlere ulaşılabilecektir.

Sonuç olarak; simülâtör içeren projelerde -kısmen dahi olsa- test otomasyonunun verimli biçimde uygulanabilmesi durumunda, daha kısa sürede, daha az kaynakla, daha kaliteli ürünler geliştirilerek, gerek bilişim teknolojileri ve gerekse milli kaynaklarımıza önemli bir katma değer sağlanabilecektir.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] [https://www.standishgroup.com/sample\\_research\\_files/CHAOSReport2015-Final.pdf](https://www.standishgroup.com/sample_research_files/CHAOSReport2015-Final.pdf) (2019, Mayıs)
- [2] [https://slashdata-website-cms.s3.amazonaws.com/sample\\_reports/EiWEyM5bfZe1Kug\\_.pdf](https://slashdata-website-cms.s3.amazonaws.com/sample_reports/EiWEyM5bfZe1Kug_.pdf) (2019, Mayıs)
- [3] <http://www.turkishtestingboard.org/en/turkey-software-quality-report/> (2019, Mayıs)
- [4] <http://news.bbc.co.uk/2/hi/business/8505402.stm> (2019, Nisan)
- [5] <http://www.willamette.edu/~mjaneba/pentprob.html> (2019, Nisan)
- [6] Nirpal,P.B, Dr.Kale,K.V, (2011, Ocak). A Brief Overview Of Software Testing Metrics.
- [7] [https://www.mphasis.com/content/dam/mphasis-com/global/en/downloads/WhitePapers/Whitepaper\\_Software-Testing-Metrics.pdf](https://www.mphasis.com/content/dam/mphasis-com/global/en/downloads/WhitePapers/Whitepaper_Software-Testing-Metrics.pdf) (2019, Nisan)
- [8] Leotta, M., Clerissi, D., Ricca, F. ve Spadaro, C. (2013, Mart). Improving test suites maintainability with the page object pattern: An industrial case study. In 2013 IEEE Sixth International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops (pp. 108-113). IEEE.
- [9] A.Hass, “A Guide To Advanced Software Testing”, Artech House, 2008

## VÜCUT HAREKET ANALİZ SİSTEMİ

**İdil Gökalp<sup>(a)</sup>, Serdar Köse<sup>(a)</sup>, Ahmet Narman<sup>(b)</sup>, Elvin Hajizada<sup>(b)</sup>, Muzaffer Özbey<sup>(b)</sup>, Salih Can<sup>(b)</sup>, Çağlar Akman<sup>(a)</sup>, Tolga Sönmez<sup>(a)</sup>**

<sup>(a)</sup> HAVELSAN A.Ş., Mustafa Kemal Mahallesi 2120 Cd No: 39 Çankaya Ankara,  
{igokalp, serdarkose, cakman, tsonmez}@havelsan.com.tr

<sup>(b)</sup> Bilkent Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü,  
{ahmet.narman18@imperial.ac.uk, elvinhajizada97@gmail.com,  
muzafferozbey94@gmail.com, cansalih95@gmail.com}

### ÖZ

Bu bildiri, kablosuz ve giyilebilir 9 serbestlik dereceli MEMS ataletsel ölçüm birimleri ile insan vücudunun hareketlerini yakalayan bir vücut hareket analiz sistemi (VHAS) önermektedir. Bu sistem, veri toplama, filtreleme, füzyon ve kalibrasyon yöntemleri ile vücut hareketlerinin gerçek zamanlı ve yüksek doğrulukta modellenmesini ve kullanıcı arayüzü üzerinden 3 boyutlu gösterimini sağlamaktadır.

Ölçüm birimlerinin vücudun kafa, gövde, kollar ve bacaklar olmak üzere toplamda 10 farklı bölgesine yerleştirilmesi sonucunda giyilebilir teknolojinin bir parçası haline gelen VHAS, gövde ve eklem hareketlerini takip edebilmektedir. VHAS, ölçüm birimlerinin vücuda farklı doğrultularda takılmasından kaynaklanan hataları özgün kalibrasyon yöntemi ile gidererek kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Ayrıca, Bluetooth haberleşmesi ile ölçüm birimleri tarafından toplanan hareket verilerini ağ geçidi üzerinden bulut ortamına aktararak uzaktan erişim ve izleme olanağı sunmaktadır.

VHAS vücut hareketlerinin artırılmış gerçeklik ortamına uygun modellenerek dijital ikiz oluşturulmasında ve iyileşme sürecindeki hastaların tedavi süreçlerinin takibinde kullanılabilir. Sunduğu çeşitli rehabilitasyon egzersizleri ve biyoistatistik verileriyle uzaktan tedaviyi mümkün kılmaktadır. Bu bildiri, VHAS sistem mimari, modeli, donanım tasarımı, algoritma ve kalibrasyon yöntemlerinin yanı sıra sistem performansını içermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Artırılmış Gerçeklik, Ataletsel Ölçüm Birimi, Giyilebilir Teknoloji, Hareket Analiz ve Yakalama, Teletıp



## BODY MOTION ANALYSIS SYSTEM

### ABSTRACT

This paper proposes a wireless and wearable body motion analysis system (BMAS) that captures human body motion with 9 degrees of freedom MEMS inertial measurement units. This system provides a real time and highly accurate modelling and 3-dimensional demonstration of body motion on user interface, by data collection, filtering, fusion and calibration methods.

BMAS is able to track trunk and joint movements, as a part of wearable technology by placing measurement units to 10 different parts of the body namely head, trunk, arms and legs. BMAS fixes the inaccuracy due to unideal placement of measurement units by a genuine calibration method providing ease of use. It also proposes remote access and monitoring by sending the motion data collected by measurement units over Bluetooth to the cloud via a gateway.

BMAS can be used in digital twin generation by appropriately modelling body motions to augmented reality environment and tracking treatment process of recovering patients. It makes tele-rehabilitation possible by various rehabilitation exercises and biostatistics data. This paper includes BMAS architecture, model, hardware design, algorithm and calibration methods as well as system performance.

**Keywords:** Augmented Reality, Inertial Measurement Unit, Motion Analysis and Capture, Telemedicine, Wearable Technology

### 1. GİRİŞ

Hareket yakalama ve takip teknolojileri, biyomekanik ve biyoistatistik yöntemlerinin uygulandığı sağlık, spor, eğlence ve sinema sektörleri dâhil olmak üzere pek çok farklı sektörde yardımcı sistemler olarak kullanılmaktadır. Literatürde bu tür sistemler, tüm ya da kısmi vücut hareketlerini yakalamak ve takip etmek için vücuda sabitlenen ve giyilebilir MEMS ataletsel ölçü birimi temelli [1, 2, 3] ve optik temelli teknolojiler [4, 5] olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır.

Optik ve ataletsel algılayıcı tabanlı hareket yakalama sistemlerinin birbirlerine göre teknik açıdan sistematik karşılaştırmaları literatürde mevcuttur [6, 7, 8, 9]. Optik tabanlı sistemler kısıtlı bir mekân ve yüksek maliyetli donanım gerektirirken, ataletsel algılayıcı temelli sistemler daha uygun fiyatlı ve taşınabilir bir sistem sunmaktadır. Optik tabanlı hareket yakalama yardımcı sistemleri, film sektöründe tercih edilmektedir. Ancak vücut eklemleri ile uzuvlarının hassas pozisyon ve yönelim ölçümü gerektiren ve daha geniş mekânda esnek uygulanması gereken sağlık ve spor uygulamalarında giyilebilir ataletsel algılayıcılar ile hareket yakalama teknolojileri daha çok tercih edilmektedir. Birbirlerine

göre avantaj ve dezavantajları olan bu sistemler ayrı ayrı kullanılabilirdi gibi entegre edilerek birlikte kullanılabilir [10].

Özellikle spor, sağlık ve eğlence sektörlerinde katkı sağlayabilecek hareket algılama teknolojilerinin üretimi, ülkemizde yaygın olmamakla beraber, yurtdışından sağlanan çözümler de ancak yüksek maliyetlerle elde edilebilmektedir. Bu bildiride önerilen VHAS sistemi ile düşük maliyetli, üzerinde ileri veri analitiği uygulanabilen ve çeşitli uygulamalar ile kolay entegre olabilen giyilebilir ataletsel ölçü birimi tabanlı hareket yakalama teknolojisi ve ürünü hedeflenmektedir.

VHAS için sağlık, spor ve rehabilitasyon gibi uygulama alanları belirlenmiştir. Mekan serbestliği, kullanıcı hareket esnekliği, ölçüm hassasiyeti, düşük maliyet ve temin kolaylığı gibi konular göz önünde tutularak VHAS için MEMS IMU tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir. İnsan vücudunun on eklem bölgesine uygun bir şekilde yerleştirilen ataletsel algılayıcı birimlerinden elde edilen pozisyon ve yönelim verileri düşük güç tüketimli Bluetooth (BLE) ile haberleştikleri giyilebilir ağ geçidi ile Wi-Fi bağlantısı üzerinden buluta ya da yerel kullanıcı terminaline aktarılmaktadır. Elde edilen vücut modelleme verileri gerçek zamanlı olarak çeşitli kullanıcı arayüzleri (AR gözlük, 3B modelleme ve canlandırma programları) üzerinden gösterilmektedir. Birden fazla kullanıcı olması halinde, her kullanıcının modellemesi aynı arayüz üzerinden gösterilebilmektedir. VHAS, yatay ölçeklendirilebilir bir sistem olması nedeniyle, çoklu kullanım durumunda dahi kritik değişiklikler gerektirmemektedir; donanım setlerinin sayıları artırılarak birden fazla kullanıcı tarafından kolaylıkla kullanılabilir

Bu bildiride temel olarak kullanılan ataletsel ölçer tabanlı sistemlere en yaygın örnek olarak MVN Biomech-XSENS [11] ve F.A.B System-BIOSYN [12] ürünleri verilebilir. Bu bildiride önerilen VHAS bu ürünlerin temel özelliklerini ve literatürdeki tekniğin bilinen durumunu tamamen karşılamaktadır. Ayrıca, yerel kullanıcı terminali ile bağımsız ve tek başına kullanılabilen bir sistem sunmanın yanı sıra bulut entegrasyonu ile her yerden erişim sağlanabilen çok yönlü bir kullanım sunmaktadır. İleri veri analitiği algoritmaları ile biyoanaliz, biyoistatistik ve anomali tespiti yapılabilmektedir. Ayrıca, uygulama senaryosuna uygun olarak çeşitli kullanıcı arayüzlerinden gösterilebilmektedir.

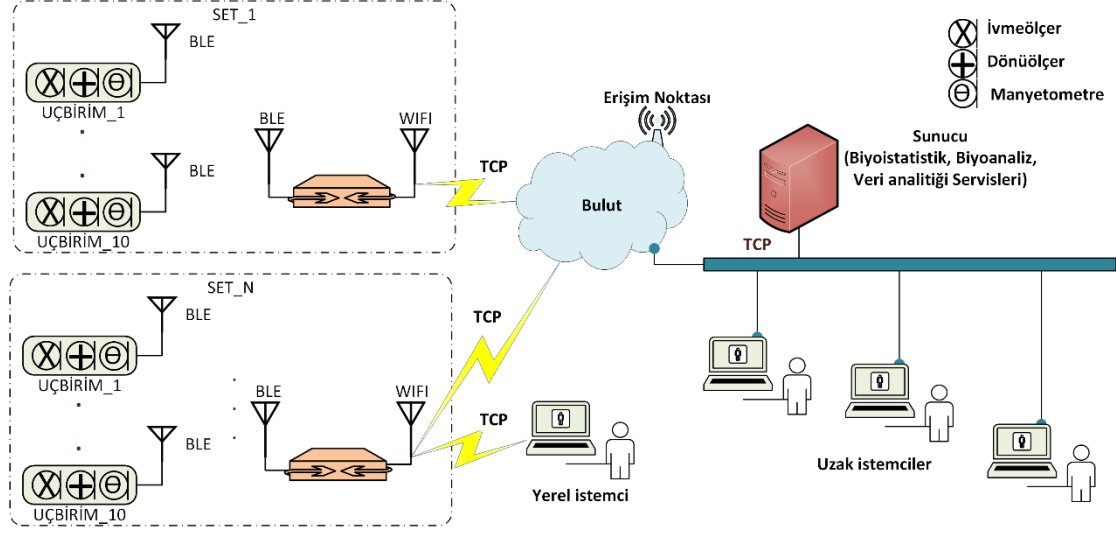
Bu bildiride, VHAS sistem mimari tasarımı ve hareket modelleme algoritması, sistem kalibrasyonu ve sistem kullanımı detaylı olarak anlatılmaktadır. Bunun yanı sıra, sistem performansı ve test sonuçları da bu bildiride sunulmaktadır.

## **2. YÖNTEM**

### **2.1. Sistem Mimari Tasarımı**

VHAS sistemi 10 adet uç birimden oluşan 1 set giyilebilir algılayıcılar, 1 adet giyilebilir ağ geçidi, 1 sunucu ve istemci terminallerinden oluşmaktadır. Uç birimlerden toplanan

veriler üzerinde biyoistatistik, biyoanaliz, anomali tespiti ve veri analizi algoritmaları koşturulmaktadır. Veri analitiği sonuçları sunucu üzerinden uzak istemcilere ya da kullanıcılara doğrudan yerel istemci terminali üzerinden gösterilebilmektedir. VHAS kavramsal sistem blok diyagramı Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. VHAS kavramsal mimari tasarım

### 2.1.1. VHAS Uç birimleri

VHAS uç birimlerinde eklem ve uzuvların pozisyon ve yönelimlerini ölçmek için 3'er serbestlik dereceli dönüölçer ve ivmeölçer kullanılmaktadır. Ayrıca, 3 serbestlik dereceli bir manyetometre ile dünyanın manyetik alanından yararlanarak ivmeölçer ve dönüölçer ölçümlerindeki hata ve kayma ortadan kaldırılmaktadır. Böylelikle, toplamda 9 serbestlik dereceli ataletsel ölçü birimi ile vücut uzuvlarının pozisyonu elde edilmektedir. VHAS uç birimleri, baş (1 adet), gövde (1 adet), kollar (sağ ve sol kol için 4 adet) ve bacaklar (sağ ve sol bacak için 4 adet) olmak üzere vücudun 10 bölgesine yerleştirilmektedir.

İnsan vücudunun hareket frekansının azami 10Hz olması [13], sistemin örnekleme hızının asgari 20Hz olmasını gerektirmektedir. Hareketlerin yüksek doğrulukta veri kaçırmadan modellenebilmesi için örnekleme frekansı yapılan laboratuvar testleri ile 25-50 Hz arası olarak belirlenmiştir. Uç birimlerdeki pozisyon ve yönelim verileri Madgwick filtresi [14] ile filtrelenip kuaterniyon verilerine çevrilerek VHAS ağ geçidine gönderilmektedir. Özenin hareket esnekliği VHAS uç birimlerinin kablosuz haberleşmeli ve bataryalı olması ile sağlanmaktadır. Düşük güç tüketimi için uç birimler ile ağ geçidi arasındaki kablosuz haberleşme protokolü olarak Bluetooth 4.0 (BLE) kullanılmaktadır [15].

### 2.1.2. Ağ geçidi

Her bir VHAS uç birimi setinde 1 adet VHAS ağ geçidi bulunmaktadır. Ağ geçidi birimi hareket esnekliği istenilen uygulamalar için vücut üzerinde giyilebilir ya da belirli bir alandaki uygulamalar için sabit olmak üzere iki farklı kullanıma sahiptir. VHAS ağ geçidi

BLE üzerinden uç birimlerden topladığı kuaterniyon açılarını birleştirip zaman damgası ile TCP protokolü üzerinden uygulama tipine göre yerel kullanıcı terminaline veya bulut ortamına veri analizi için iletmektedir.

### 2.1.3. Yerel Kullanıcı Terminali / Bulut entegrasyonu

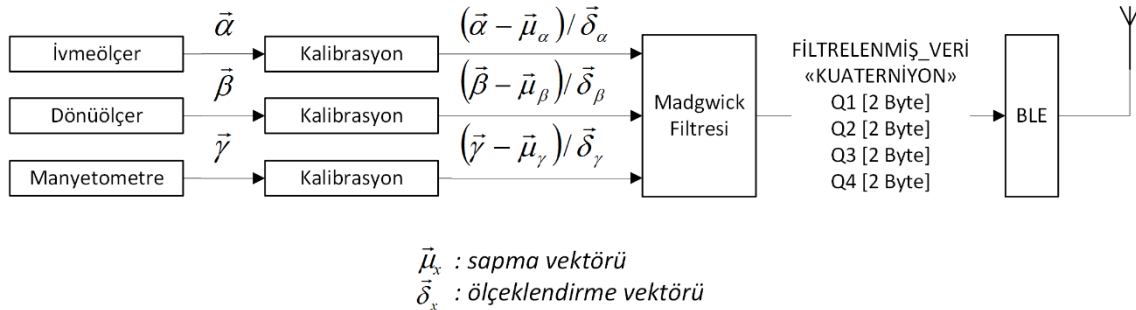
Bağımsız tek başına çalışan sistemlerde ağ geçitleri doğrudan yerel istemci terminali ile TCP haberleşmesi yapmaktadır. Terminal üzerinde koşan 3B modelleme programları üzerinde vücut hareketleri modellenmekte ve model üzerinde biyoistatistik ile biyoanaliz işlemleri çalıştırılmaktadır. Bu tip terminal kişinin kendi hareketlerini görmesini ve takip etmesini gerektiren spor ve fizik tedavi gibi uygulamalarda gerekli olmaktadır.

Bulut entegrasyonu uygulamaya bağlı olarak farklı konumdaki kullanıcılara veri aktarımı için ve her yerden veriye erişim için gereklidir. Bulut üzerinde birden fazla kullanıcıdan gelen kuaterniyon verileri işlenerek özne tarafından yapılan hareketler bir vücut modeli üzerinde gösterilmektedir. İstemci özelliklerine uygun (ör: rehabilitasyon, egzersiz, spor hareketleri vb.) kullanıcı arayüzü ile uzak kullanıcıya (ör: doktor) sunulmaktadır.

## 2.2. Vücut Hareket Yakalama ve Takip Yazılımları

### 2.2.1. Uç Birim Algılayıcı Füzyonu ve Filtreleme Algoritması

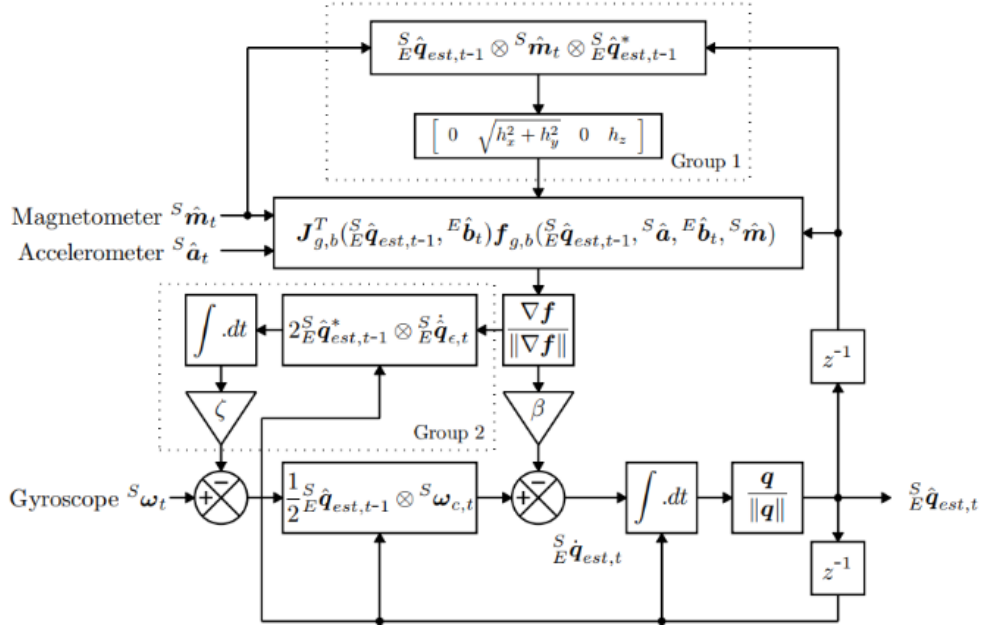
VHAS uç birimlerde ivmeölçer dünyanın yerçekimi ivmesinden ve manyetometre dünyanın manyetik alanından yararlanarak referans oluşturmakta ve dönüölçer ölçümlerindeki eksen kaymalarını önlemektedir. Bu sebeple ivmeölçer, dönüölçer ve manyetometrenin füzyonu doğru ölçüm için büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, füzyon çıktısının daha doğru sonuç vermesi için ölçüm verilerinin bir önceki verilere göre filtrelenmesi gerekmektedir. VHAS sisteminde, algılayıcı füzyonu ve filtreleme işlemleri için, ataletsel ölçüm birimleri ile kullanılmak üzere özel olarak geliştirilmiş olan Kalman tabanlı Madgwick filtresi uygulanmaktadır [14]. Madgwick filtresi sonucunda işlenmesi daha kolay olan kuaterniyon verisi [16] elde edilip BLE ile ağ geçidine gönderilmektedir. VHAS uç birim veri akış diyagramı Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. VHAS uç birim veri akışı

Güncel dönüölçer ( $\vec{\beta}$ ) verilerine göre hesaplanan kuaterniyon verileri önceki kuaterniyon verileri ile güncel manyetometre ( $\vec{\gamma}$ ) ve ivmeölçer ( $\vec{\alpha}$ ) verilerinin geri beslemesi yolu ile

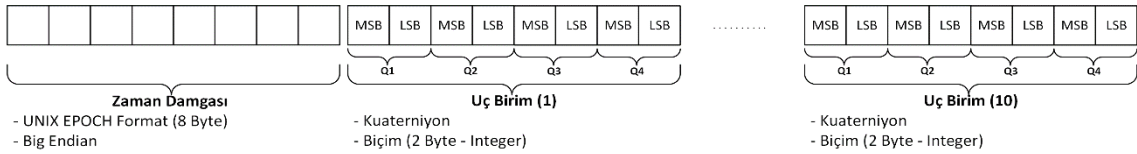
tekrar güncellenmektedir. Bu sayede daha doğru ve güvenilir kuaterniyon verileri elde edilmektedir. Atalet ölçümlerinde kullanılan ve güncel verinin tahminini önceki verilere göre gerçekleştiren Madgwick filtresinin [14] blok diyagramı Şekil 3’de gösterilmektedir.



Şekil 3. Madgwick filtresi blok diyagramı [14]

### 2.2.2. Ağ geçidi üzerinde veri birleştirme

Her bir VHAS uç biriminden gelen 25-50 Hz arasında toplanan kuaterniyon verileri zaman damgası ile birlikte paketlenip TCP üzerinden kullanıcıya gönderilmektedir. Uç birim veri biçimleri ve ağ geçidinde birleştirilmiş veri biçimi Şekil 4’te gösterilmektedir.



Şekil 4. VHAS (1 set) veri birleştirme biçimi

VHAS uç birim ölçümlerinin 25 Hz ile örneklenme ile ağ geçidi üzerinde birleştirilmesi sonucunda oluşan veri büyüklüğü ( 1 ) ve bant genişliği ( 2 ) sırasıyla gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Veri büyüklüğü} &= \text{kuaterniyon } x \# \text{ uç birim} + \text{zaman damgası} \\ &= 10 \times 8 \text{ Bayt} + 8 \text{ Bayt} = 88 \text{ Bayt} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Bant genişliği} &= \text{veri büyüklüğü } x \text{ gönderme frekansı} \\ &= 8 \times 88 \text{ bit} \times 25 \text{ Hz} = 17.6 \text{ Kbps} \end{aligned} \quad (2)$$

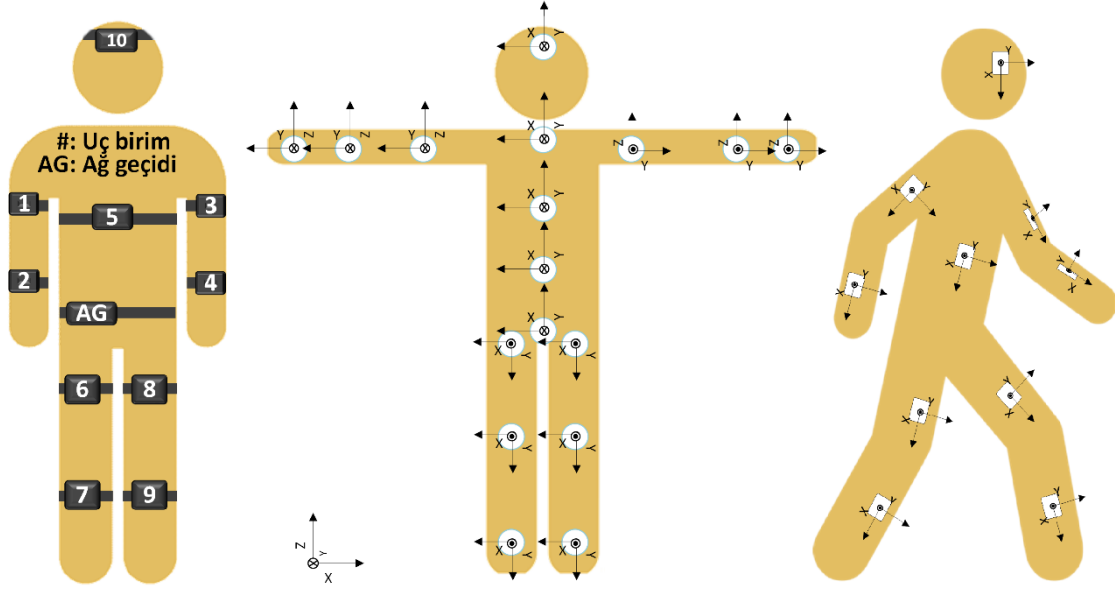
### 2.2.3. Vücut Hareket Modelleme ve Kuaterniyon Filtreleme Algoritması

VHAS ağ geçidinde birleştirilen kuaterniyon verileri istemci üzerinde çalışan modelleme yazılımına iletilmektedir. Verideki gürültünün 3B model hareketlerine ani atlamalara,

kopmalara ve kesik hareketlere sebebiyet vermemesi için toplanan verilere 500 ms'lik "Hareketli Ortalama Filtresi" ( 3 ) uygulanmaktadır.

$$y[n] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x[n-i], N = 500 \text{ ms} \times f_{\text{ölçüm}}, N \in Z \quad (3)$$

Bir uzvun, kendisiyle bağlantılı diğer uzva bağlı olarak hareket ettirebildiği vücut modelinde, her uzvun koordinat sistemi sağ el kuralına uygun olarak belirlenmektedir. Uç birimlerin yerleşimi ve modeldeki uzuvların eksenleri Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Algılayıcı yerleşimi ve vücut modeli (uzuv & eklem koordinat sistemi)

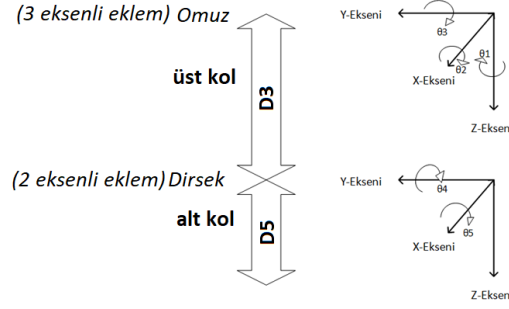
Uç birimlerden gelen veriye göre model üzerindeki uzvun yönelimi denklem ( 4 ) ile hesaplanmaktadır.  $q_R$  dönüş kuaterniyonunu,  $q_A$  uzvun güncel kuaterniyonunu,  $q_B$  ise uzvun dönü ile güncellenmiş olan kuaterniyonunu göstermektedir.

$$q_B = q_R q_A q_R^* = (q_0 + q_1 i + q_2 j + q_3 k)(x_i + y_j + z_k)(q_0 - q_1 i - q_2 j - q_3 k) \quad (4)$$

Şekil 6'da örnek olarak gösterilen kol için elde edilen kuaterniyonlardan ileri kinematik denklemleri ( 5 )-( 6 ) ile pozisyon kestirimi gösterilmektedir.

$$T_5^0 = A_1 \dots A_5 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & d_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & d_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} r_{11} &= c_1 c_3 c_4 c_5 - c_1 s_3 s_5 + s_1 s_4 c_5 & r_{13} &= c_1 c_3 s_4 - c_1 c_4 \\ r_{21} &= s_1 c_3 c_4 c_5 - c_1 s_3 s_5 - c_1 s_4 c_5 & r_{23} &= s_1 c_3 s_4 - c_1 c_4 \\ r_{31} &= -s_3 c_4 c_5 - c_3 s_5 & r_{33} &= -s_4 s_5 \\ r_{12} &= -c_1 c_3 c_4 s_5 - c_1 s_3 c_5 - s_1 s_4 c_5 & d_x &= c_1 c_3 s_4 d_5 - s_1 c_4 d_5 - s_1 d_3 \\ r_{22} &= -s_1 c_3 c_4 s_5 - s_1 s_3 s_5 + c_1 s_4 c_5 & d_y &= s_1 c_4 s_4 d_5 + c_1 c_4 d_5 + c_1 d_3 \\ r_{32} &= s_3 c_4 c_5 - c_3 c_5 & d_z &= -s_3 s_4 d_5 \end{aligned} \quad (6)$$



Şekil 6. Kol için (örnek) dönü kinematığı

## 2.3. Kalibrasyon Yöntemleri

### 2.3.1. Uç Birim Kalibrasyonu

İvmeölçer ve dönüölçer için hata karakteristiklerine bağlı kalibrasyonun matematiksel modellemesi sırasıyla denklem ( 7 )'de gösterilmektedir. Benzer şekilde manyetometre için kullanılan kalibrasyon denklemleri sırasıyla ( 8 )-( 12 ) gösterilmektedir.

$$\text{İvmeölçer: } \begin{bmatrix} \vec{\alpha}_X \\ \vec{\alpha}_Y \\ \vec{\alpha}_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\vec{\alpha}_{X'} - \vec{\mu}_X}{\vec{\delta}_X} \\ \frac{\vec{\alpha}_{Y'} - \vec{\mu}_Y}{\vec{\delta}_Y} \\ \frac{\vec{\alpha}_{Z'} - \vec{\mu}_Z}{\vec{\delta}_Z} \end{bmatrix} \quad \text{Dönüölçer: } \begin{bmatrix} \vec{\beta}_X \\ \vec{\beta}_Y \\ \vec{\beta}_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\vec{\beta}_{X'} - \vec{\mu}_X}{\vec{\delta}_X} \\ \frac{\vec{\beta}_{Y'} - \vec{\mu}_Y}{\vec{\delta}_Y} \\ \frac{\vec{\beta}_{Z'} - \vec{\mu}_Z}{\vec{\delta}_Z} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{Manyetometre: } \vec{\gamma}_{K'_{\min}} = \min(\vec{\gamma}_{K'_{\min}}, \vec{\gamma}_{K'}) \quad (8)$$

$$\vec{\gamma}_{K'_{\max}} = \max(\vec{\gamma}_{K'_{\max}}, \vec{\gamma}_{K'}) \quad (9)$$

$$\vec{S} = \frac{\vec{\gamma} - \vec{\gamma}_{\min}}{\max \min} \quad (10)$$

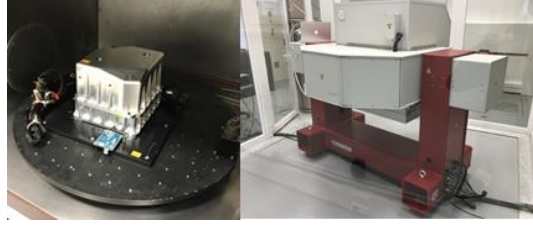
$$\vec{\beta} = \frac{\vec{\gamma} + \vec{\gamma}_{\min}}{2} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \vec{m}_X \\ \vec{m}_Y \\ \vec{m}_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\vec{m}_{X'} - \vec{\beta}_X}{\vec{S}_X} \\ \frac{\vec{m}_{Y'} - \vec{\beta}_Y}{\vec{S}_Y} \\ \frac{\vec{m}_{Z'} - \vec{\beta}_Z}{\vec{S}_Z} \end{bmatrix} \quad (12)$$

( 7 )-( 12 ) denklemlerinde  $\vec{\mu}$  sapma ve  $\vec{\delta}$  ölçeklendirme çarpan vektörleridir. Anlık ivmeölçer verileri  $\vec{\alpha}_{K'}$ , kalibre edilmiş ivmeölçer verileri  $\vec{\alpha}_K$ ; anlık dönüölçer verileri  $\vec{\beta}_{K'}$ , kalibre edilmiş dönüölçer verileri  $\vec{\beta}_K$  ve anlık manyetometre verileri  $\vec{\gamma}_{K'}$ , kalibre edilmiş manyetometre verileri  $\gamma_K$  olarak gösterilmektedir.

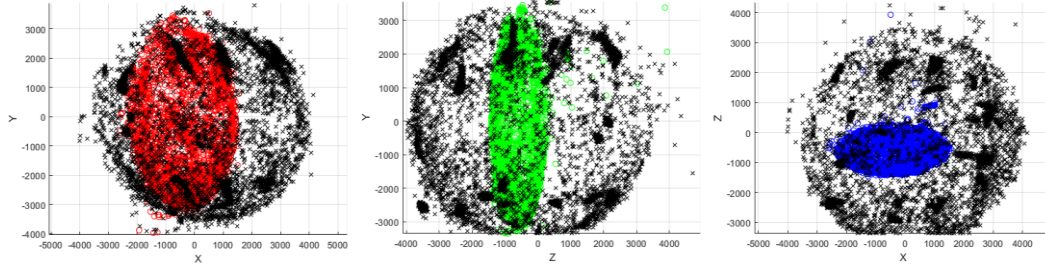
6 serbestlik dereceli dönüölçer ve ivmeölçer için kalibrasyon değerlerini elde etmek için testler yapılmıştır. İki eksen üzerinde sabit ivme ve açısal hızda hareket edebilen dönü cihazı kullanılarak TÜBİTAK SAGE tesislerinde Şekil 7 ile gösterilen test düzeneği kurulmuştur. Dinamik testte uç birimler tüm eksenlerde 10-100-200 °/saniye açısal hızla

döndürülerek dönüölçer kalibrasyon değerleri hesaplanmıştır. İvmeölçer kalibrasyon değerlerini hesaplamak için uç birimlere her ekseninde ( $\pm 1g$ ) uygulanmıştır.



Şekil 7. Dinamik test düzeneği [TÜBİTAK SAGE]

Her ekseninde manyetik alan ölçülüp modellendiğinde orijine merkezli küresel bir alan çıkarması gereken manyetometre kalibre edilmediğinde manyetik alan ölçümüne göre orijinden kaymış ve eliptik şekilde alan modellenmektedir. Manyetometre her ekseninde döndürülerek Şekil 8’de gösterildiği gibi kalibre edilebilmekte ve eliptik bir alana yayılan gerçek manyetometre verilerini, küresel hale getirebilmektedir.

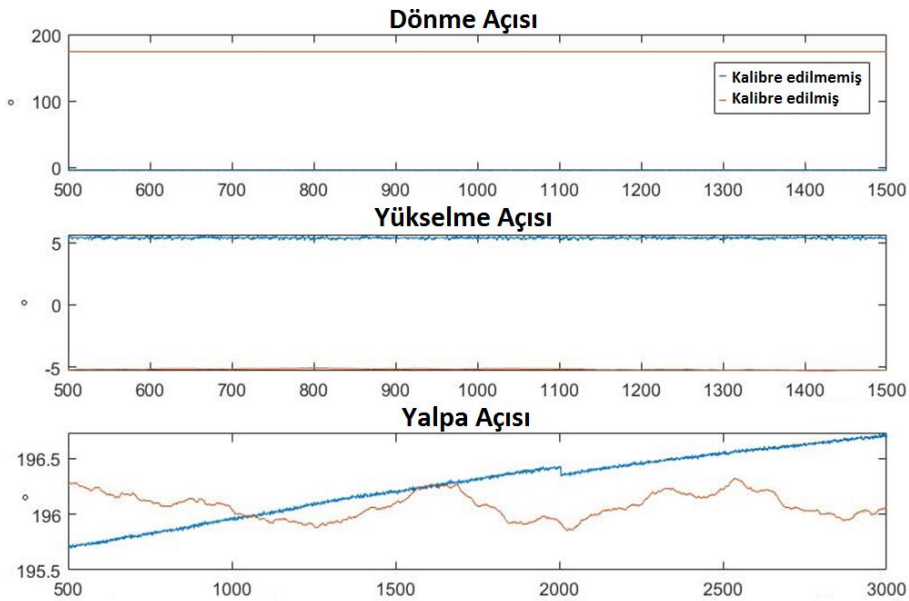


**Siyah:** Kalibre edilmiş veri

**Kırmızı, Yeşil, Mavi:** Kalibre edilmemiş veri

Şekil 8. Kalibre edilmiş ve edilmemiş manyetometre verileri

Kalibre edilmiş ve edilmemiş VHAS uç birimleri ölçümleri Şekil 9 ile gösterilmektedir.



Şekil 9. Kalibre edilmiş ve edilmemiş manyetometre verileri



## 2.4. Model Kalibrasyonu

VHAS uç birimlerinin vücuda farklı doğrultularda yerleştirilmesi ile oluşan modelleme bozukluklarının engellenmesi için bir kalibrasyon yöntemi geliştirilmiştir. Belirli bir referans duruşuna (kollar iki yanda kapalı, ayakta ve dik) göre kalibrasyon yapılmaktadır.

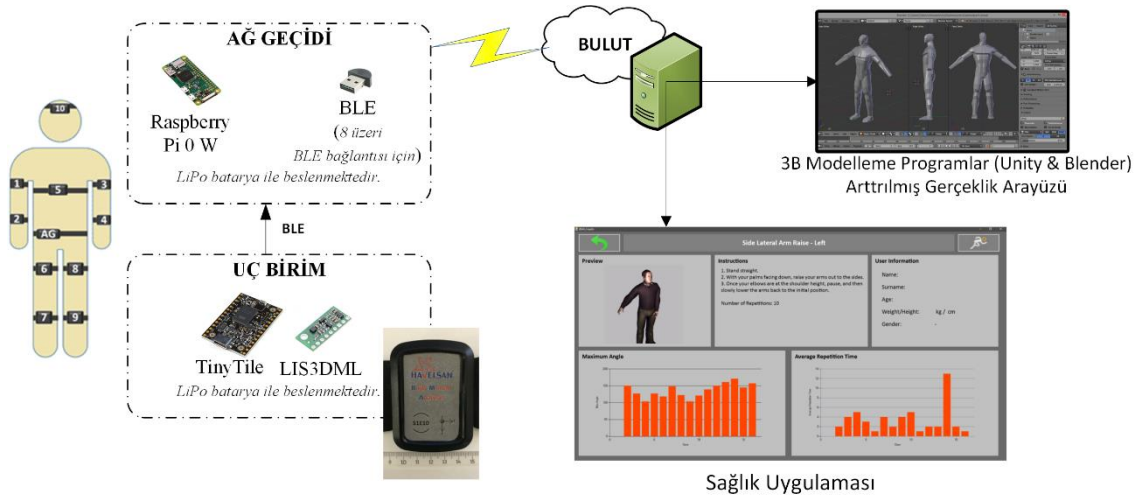
Uç birimlerin yerleşiminden kaynaklı bozuk duruşa ait dönü verisinden ( $Q_{init}^{3 \times 3}$ ) referans duruşa ( $S_R^{3 \times 3}$ ) olan dönüşün hesaplanmasıyla kalibrasyon matrisi ( $C^{3 \times 3}$ ) hesaplanmaktadır ( 13 ). Uç birimlerden gelen anlık dönü verisi ( $Q^{3 \times 3}$ ), ( $C^{3 \times 3}$ ) kullanılarak kalibre edilmiş dönü verisine ( $Q_e^{3 \times 3}$ ) dönüştürülmektedir ( 14 ).

$$C^{3 \times 3} = (Q_{init}^{3 \times 3})^{-1} * S_R^{3 \times 3} \quad (13)$$

$$Q_e^{3 \times 3} = (Q^{3 \times 3}) * C^{3 \times 3} \quad (14)$$

## 3. VHAS Prototipi ve Performans

VHAS uç birimlerinde ataletsel ölçü birimi ( ivmeölçer, dönüölçer) ve BLE haberleşme arayüzü içeren *tinyTile* [17], manyetometre olarak *LIS3MDL* [18] ve güç için Li-Po batarya bulunmaktadır. Ağ geçidi (BLE-WiFi) için *Raspberry-Pi-Wireless-Zero-W* [19] kullanılmaktadır. Öznenin vücudundan toplanan kuaterniyon verilerinin model üzerinde gösterilmesi için 3B modelleme programları olarak *Blender* [20] ya da *Unity* [21] kullanılmaktadır. Kullanıcı ara yüzleri 3B modelleme programları üzerinden doğrudan sağlanabileceği gibi artırılmış gerçeklik arayüzleri (gözlük, tablet) üzerinden de sağlanabilmektedir. VHAS uygulama alanı olarak dijital ikiz, sağlık ve spor alanları belirlenmiştir. Bu kapsamda vücut modelleme, fizyoterapi çalışmaları ve egzersiz veri analiz sonuçları ve arayüzleri VHAS tarafından sağlanmaktadır. VHAS prototipi Şekil 10 ile gösterilmektedir.



Şekil 10. VHAS Prototip Sistemi

VHAS prototipine ait verilerin zaman gecikmesi, uzuvların açısal ölçüm doğruluğu ve batarya kullanım süresine ait performans testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 1’de gösterilmektedir.

**Tablo 1.** VHAS Performans Değerleri

	Performans Değeri
Açısal Ölçüm Doğruluğu (Standart Sapma)	< 1°
Zaman Gecikmesi (Yapılan hareketin merkeze iletilmesindeki gecikme) *Ağ kaynaklı gecikmeler ihmal edilmiştir.	< 50ms
Batarya Süresi (3V7, 380 mAh) (BLE aktif, sürekli veri aktarımı @ 20 Hz)	10 saat

#### 4. SONUÇ

VHAS kablosuz giyilebilir ataletsel algılayıcı birimleri kullanılarak hareket yakalama ve takip işlemleri yapılabilmektedir. Bu sistem, algılayıcı kalibrasyonu ve filtreleme gibi veriyi iyileştiren algoritmaların yanı sıra kablosuz haberleşmenin de aktif kullanılmasıyla, kullanıcılara esnek hareket sağlamaktadır. VHAS ayrıca gerçek zamanlı ve doğruluk payı yüksek bir modelleme sağlamaktadır. Spor ve sağlık alanlarına yönelik uygulamaları ve 3B modelleme programları veya artırılmış gerçeklik arayüzleri ile entegre çalışabilmektedir. İlerleyen çalışmalarda VHAS, çeşitli sağlık algılayıcıları ile entegre edilerek, tümleşik bir sistem çözümü elde edilecektir.

#### 5. TEŞEKKÜR

Bu proje HAVELSAN AŞ tarafından Bilkent Üniversitesi Sanayi Odaklı Bitirme Projesi kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca, TUBİTAK 2209B Sanayi Odaklı Lisans Bitirme Destekleme Programı kapsamında da desteklenmiştir. Bu çalışmalar yürütülürken ataletsel ölçü birimlerinin kalibre edildiği TÜBİTAK SAGE çalışması başuzman araştırmacı Ali Galip Yıldırım’a teşekkür ederiz.

#### 6. KAYNAKÇA

- [1] G. Shi, Y. Wang and S. Li, “Development of human motion capture system based on inertial sensors 2125,” *Sensors & Transducers*, vol. 173, no. 6, p. 90, 2014.
- [2] I. Prayudi and D. Kim, “Design and Implementation of IMU-based Human Arm Motion Capture System,” in *Mechatronics and Automation (ICMA)*, 2012.

- [3] K. Aminian and B. Najafi, "Capturing human motion using body-fixed sensors: outdoor measurement and clinical applications," *Computer animation and virtual worlds*, vol. 15, no. 2, pp. 79-94, 2004.
- [4] T. B. Moeslund, A. Hilton and V. Krüger, "A survey of advances in vision-based human motion capture and analysis," *Computer vision and image understanding*, vol. 104, no. 2-3, pp. 90-126, 2006.
- [5] G. Guerra-Filho, "Optical Motion Capture: Theory and Implementation," *RITA*, vol. 12, no. 2, pp. 61-90, 2005.
- [6] J. H. Bergmann, R. E. Mayagoitia and I. C. Smith, "A portable system for collecting anatomical joint angles during stair ascent: a comparison with an optical tracking device," *Dynamic Medicine*, vol. 8, no. 1, p. 3, 2009.
- [7] A. Seaman and J. McPhee, "Comparison of optical and inertial tracking of full golf swings," in *Procedia Engineering*, 2012.
- [8] R. T. Solberg and A. R. Jensenius, "Optical or Inertial? Evaluation of two motion capture systems for studies of dancing to electronic dance music," in *Sound and Music Computing*, 2016.
- [9] H. Zhou and H. Hu, "Human motion tracking for rehabilitation—A survey," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 3, no. 1, pp. 1-18, 2008.
- [10] C. Kalkbrenner, S. Hacker, M. E. Algorri and R. Blechschmidt-Trapp, "Motion Capturing with Inertial Measurement Units and Kinect," in *Proceedings of the International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies-Volume 1*, 2014.
- [11] Xsens, "Xsens 3D Motion Tracking," Xsens, [Online]. Available: <https://www.xsens.com/products/xsens-mvn-analyze/>. [Accessed 31 January 2019].
- [12] Biosyn Systems, "Biosyn Systems Premier Leader In Wireless Motion Capture," Biosyn Systems, 2010. [Online]. Available: <http://www.biosynsystems.net/f-a-b-system/>. [Accessed 31 January 2019].
- [13] H. Zeng and Y. Zhao, "Sensing movement: Microsensors for body motion measurement," *Sensors*, vol. 11, no. 1, pp. 638-660, 2011.
- [14] J. Decuir, "Bluetooth 4.0: low energy," in *Cambridge, UK: Cambridge Silicon Radio SR plc*, 2010.
- [15] S. O. H. Madgwick, "An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays," Report x-io and University of Bristol (UK), 2010.
- [16] J. B. Kuipers, *Quaternions and rotation sequences*, vol. 66, Princeton: Princeton university press, 1999.
- [17] "tinyTile," ELeMent14, [Online]. Available: <https://www.element14.com/community/docs/DOC-82913/1/tinytile-intel-curie-based-miniaturised-adaptation-of-the-arduinogenuino-101-board>. [Accessed 2019].
- [18] "LIS3MDL," ST, [Online]. Available: <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lis3mdl.html>. [Accessed 2019].
- [19] "Raspberry Pi Zero W," [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-zero-w/>. [Accessed 2019].
- [20] "Blender," [Online]. Available: <https://www.blender.org/>. [Accessed 2019].
- [21] "Unity," [Online]. Available: <https://unity.com/>. [Accessed 2019].

## İÇ ORTAM KONUMLANDIRMA İÇİN HİBRİT RSSI VE PARMAK İZİ YÖNTEMİ

Serdar Köse<sup>(a)</sup>, İdil Gökalp<sup>(a)</sup>, Çağlayan Dökme<sup>(a)</sup>, Çağlar Akman<sup>(a)</sup>, Tolga Sönmez<sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> HAVELSAN A.Ş., Mustafa Kemal Mahallesi 2120 Cd No: 39 Çankaya Ankara,  
{serdarkose, igokalp, cdokme, cakman, tsonmez}@havelsan.com.tr

### ÖZ

Bu bildiri, hızla yaygınlaşmakta olan konumlandırma tabanlı sistemlere yönelik, düşük enerjili Bluetooth (BLE) tabanlı cihazlardan toplanan işaret gücüne (RSSI) bağlı laterasyon ve parmak izi (Fingerprinting) yöntemlerinin birleştirilmesiyle elde edilen hibrit iç ortam konumlandırma (HİOK) yöntemini önermektedir.

BLE tabanlı vericinin yaydığı sinyallerin RSSI değerlerinin BLE-WiFi ağ geçitlerinden toplanması ve merkez sunucu üzerinde işlenmesi ile verici konumlandırılabilir. Bu RSSI tabanlı konumlandırma daha önceden yapılan ölçümlerle oluşturulmuş parmak izi yöntemi ile birleştirilerek yüksek doğrulukta bir konum takibini mümkün kılmaktadır. HİOK yönteminde parmak izi öğrenme fazı bir alıcıdan diğerine yürünerek toplanan RSSI değerleri ile RSSI ağ kafesi oluşturulmasıyla hızlıca gerçekleştirilmektedir.

HİOK yöntemi, BLE tabanlı gerçek bir iç ortam konumlandırma sistemi üzerinden geliştirilmiş ve test edilmiştir. Parmak izi yönteminin öğrenme fazına yönelik veriler, bu sistem aracılığıyla toplanmakta olduğundan gerçek sistem tepkileri de hesaba katılarak, yalnızca teorik ve ideal koşullara uyumlu değil; pratik ve ideal olmayan koşullara da uyumlu bir algoritma geliştirilmiştir. Bu sisteme ait test ve performans değerleri bu bildiride sunulmaktadır.

Uygulama alanı olarak takım içi durumsal farkındalığın artırılması seçilmiştir. İç ortam konumlandırma ve artırılmış gerçeklik sistemi entegre edilerek önerilen sistem ile acil müdahale ekip üyeleri operasyonlarda birbirlerinin konumunu gerçek ortamda göremeseler bile artırılmış gerçeklik ortamında takip edebilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Bluetooth, Kalibrasyon, İç Ortam Konumlandırma, Konum Tabanlı Sistemler, Parmak izi, RSSI

## HYBRID RSSI AND FINGERPRINTING METHOD FOR INDOOR LOCALISATION

### ABSTRACT

This paper proposes a hybrid indoor localisation (HIL) method for wide spreading localisation-based systems, which is combining trilateration and fingerprinting methods based on received signal strength (RSSI) gathered from BLE devices.

A BLE transmitter's position can be tracked by collecting the RSSI values of the transmitted signal via BLE-WiFi gateways and processing them on the server. It is possible to acquire a highly accurate localisation with this RSSI based trilateration combined with Fingerprinting method that is formed by previous measurements. In HIL method, learning phase of Fingerprinting is performed by collecting RSSI data and forming a RSSI grid by walking from one anchor to another quickly.

HIL method is developed and tested on a BLE based real indoor localisation system. As Fingerprinting method's training data are collected by this system, algorithm is developed in a way that considering real system reactions and it is not only compatible with theoretical and ideal cases but also compatible with the non-ideal and real-life conditions. Test and performance results for this system is presented in this paper.

Increasing of team awareness is selected as an application. Indoor localisation and augmented reality system will be integrated with suggested system emergency response teams will be able to track locations of each other in augmented reality environment even if they will not be able to see each other in real environment.

**Keywords:** Bluetooth, Calibration, Fingerprinting, Indoor Localisation, Localisation Based Systems, RSSI

## 1. GİRİŞ

Hem sivil hem de askeri alanlarda GPS ve konumlandırma teknolojilerinin kullanımının yaygınlaşması ile birlikte konum bilgisinin kullanıldığı uygulamalar artmıştır [1, 2, 3]. Ancak, GPS teknolojisinin kullanılmadığı iç ortamlarda konumlandırma teknolojilerine duyulan ihtiyaç artmaktadır. İç ortam konumlandırma çalışmalarının bir arada derlendiği çok çeşitli çalışmalar [4, 5] ve bunların karşılaştırılmaları literatürde mevcuttur [6, 7]. Ancak, iç ortam konumlandırma hala çözüm bekleyen bir problemdir [8, 9].

İç ortam konumlandırma sistemleri varış zaman bilgisini ve sinyalin geliş açısını [10] ya da alınan sinyal güç endeksi (RSSI – *received signal strength index*) [11] kullanarak konum hesaplamaktadır. Varış zamanına dayalı yöntemleri zaman eşleme sorunundan etkilenmektedir ve varış açısına dayalı yöntemler ise özel bir anten gerektirdiği için

maliyeti artırmaktadır. RSSI temelli düşük maliyetli ve hızlı kullanıma sahip çeşitli sistemler bulunmaktadır [12, 13]. Bu yöntem, iç ortam yansımalarından etkilenmektedir.

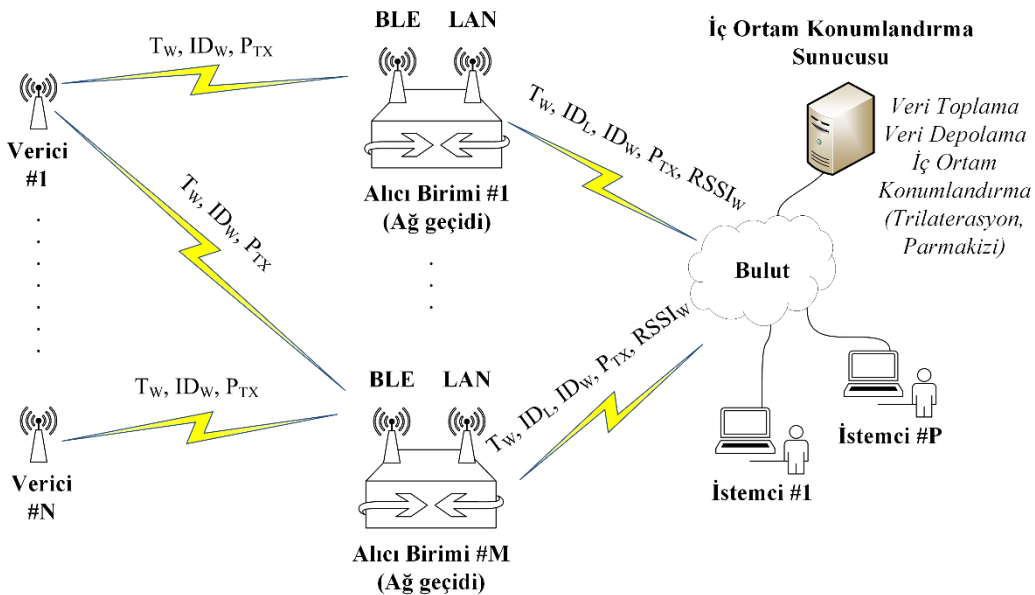
Bu çalışmada önerilen yöntemde iç ortam konumlandırma teknolojisi BLE tabanlı RSSI olup yansılardan ve gürültüden kaynaklı ve hataları gidermek için laterasyon [11, 14] ve parmak izi [15] yöntemlerini birleştirmektedir. Parmak izi yöntemi veri tabanına kontrollü kaydedilen RSSI ve verici konumu bilgisinin çevrimiçi durumda alınan RSSI bilgileri karşılaştırılmasını; laterasyon yöntemi birden farklı noktadan ölçülen RSSI değerlerine karşılık mesafelerin kesiştirilmesini kullanarak konumlandırma yapmaktadır.

Bu bildiride önerilen RSSI tabanlı laterasyon ve parmak izi yöntemlerini birleştiren hibrit yöntem yüksek doğrulukla konum tespiti yapabilmektedir. Ayrıca, literatürde parmak izi için mevcut olan uzun veri tabanı güncelleme işlemleri yerine hızlı bir kalibrasyon yöntemi önerilmektedir.

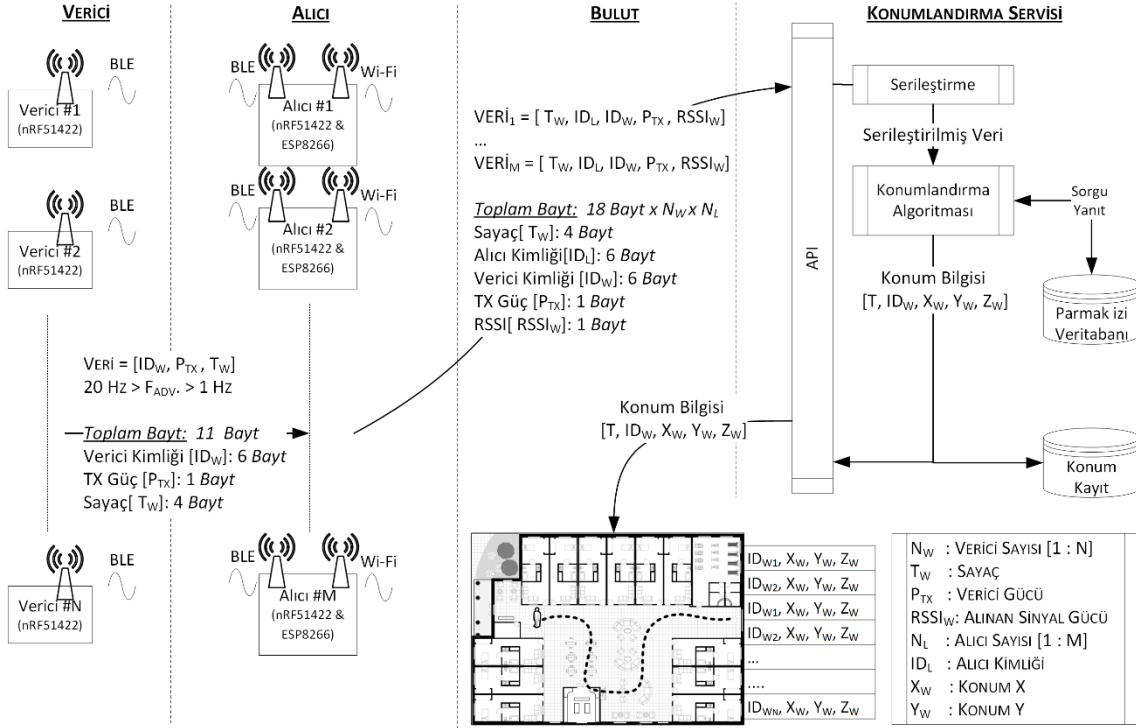
## 2. YÖNTEM

### 2.1. Sistem Modeli

BLE verici, kendisine ait zaman ( $T_W$ ), kimlik bilgisi ( $ID_W$ ) ve sinyal gücünü ( $P_{TX}$ ) [0dBm +4dBm] 1-20Hz frekansla etrafına yaymaktadır. Bilinen konumlara yerleştirilmiş ve sürekli ortamı tarayan BLE alıcılar geçerli kimlikteki vericiden gelen BLE sinyalini tespit ettiğinde, bu bilgiye kendi alıcı kimlik bilgisini ( $ID_L$ ) ve alıcıya ulaşan sinyal gücü ölçümünü ( $RSSI_W$ ) ekleyerek TCP üzerinden buluta aktarmaktadır. Buluttaki servis alıcı konum tahminini yapar ve sonucu istemcilere sağlar. HIOK sistem blok diyagramı ve detaylı sistem mimari sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Kavramsal sistem blok diyagramı



Şekil 2. HIOK sistem mimari tasarımı

HIOK sisteminde, BLE vericisi olarak NRF51DK kullanılmıştır. NRF51DK ve ESP8266 kitleri ile BLE alıcı ve ağ geçidi elde edilmiştir. Bulut altyapısı, erişim noktasının sağladığı LAN ile sağlanmıştır. Ağa bağlı bir sunucuda HIOK algoritma ve çalışmaktadır. HIOK bu sistem mimari üzerinde geliştirilmiş ve test edilmiştir.

## 2.2. HIOK Algoritması

HIOK algoritması RSSI laterasyon ve parmak izi yöntemlerini birleştirmektedir. RSSI laterasyon yöntemi, temel konumlandırma algoritması olarak kullanılmaktadır. Ancak, BLE sinyalleri çoklu yol etkisinden ve yansımalarından etkilenmektedir. Bu sebeple, yine BLE tabanlı bir yöntem daha ihtiyaç duyulmuş ve çoklu yol etkisinden ya da yansımadan en az etkilenen BLE tabanlı parmak izi yöntemi tercih edilmiştir.

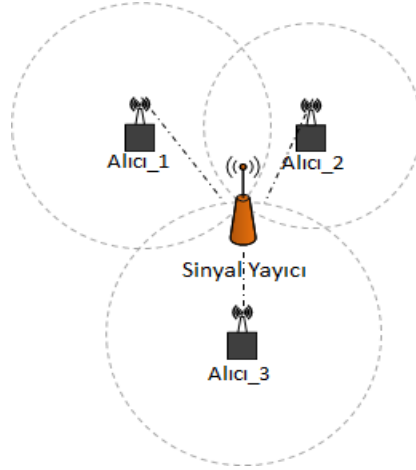
### 2.2.1. Çoklu Laterasyon Yöntemi

Çoklu laterasyon algoritması, konumu bilinen alıcılar tarafından ölçülen RSSI bilgisinden elde edilen mesafelerin yarıçap olduğu çemberlerin kesiştirilmesi ile verici konumunu tespit etmektedir. Alıcı tarafından ölçülen RSSI değeri ile sinyal verici-alıcı arasındaki mesafe ideal durumlarda “sinyal yol kaybı” denklemi (1) ile hesaplanır [16].

$$RSSI(d) = -10\beta \log_{10}(d) - \mu \quad (1)$$

(1)'de ortam sabiti ( $\mu$ ) ve yol kaybı üsteli ( $\beta$ ) ve alıcıdan gönderilen güç (RSSI) bilindiğinde sinyal verici ve alıcı arasındaki uzaklık ( $d$ ) bulunabilmektedir. Bu elde edilen

uzaklığın doğrultusu bilinmediğinden, vericinin alıcıya olan uzaklığını gösteren tüm olası noktalar bir çember olarak ifade edilmektedir. Vericinin konumunun tahmin edilebilmesi için en az 3 (doğruluğun artması için daha fazla) farklı alıcı tarafından elde edilen uzaklık bilgisine dayalı çemberler geometrik olarak kesiştirilmelidir. Bu çemberlerin kesişim bölgesinde vericiye ait konum tahmin edilebilmektedir. Örnek olarak, üç alıcının kullanılmasıyla elde edilen, RSSI laterasyon yönteminin basit geometrik görsel anlatımı Şekil 3 ile gösterilmektedir.



Şekil 3. RSSI trilaterasyon yöntemi

Yalnızca 3 alıcıya ait RSSI değerlerinin kullanılması durumunda katsayı matrisinin birbirinden bağımsız 3 satırı olmadığı takdirde olumsuz sonuç vermektedir. Bu sebeple sonuç elde etme oranı yüksek değildir. Bu bildiride bir vericiye ait sinyalin 3'ten fazla alıcı tarafından ölçülen RSSI değerine dayalı çoklu laterasyon yöntemi kullanılmaktadır.

$$\begin{aligned}
 (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 &= s_1^2 \\
 (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 &= s_2^2 \\
 (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 &= s_3^2 \\
 &\vdots \\
 (x - x_N)^2 + (y - y_N)^2 + (z - z_N)^2 &= s_N^2
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -2x_1 & -2y_1 & -2z_1 \\ 1 & -2x_2 & -2y_2 & -2z_2 \\ 1 & -2x_3 & -2y_3 & -2z_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & -2x_N & -2y_N & -2z_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^2 + y^2 + z^2 \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 \\ s_2^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 \\ s_3^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 \\ \vdots \\ s_N^2 - x_N^2 - y_N^2 - z_N^2 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$Ax = B$$

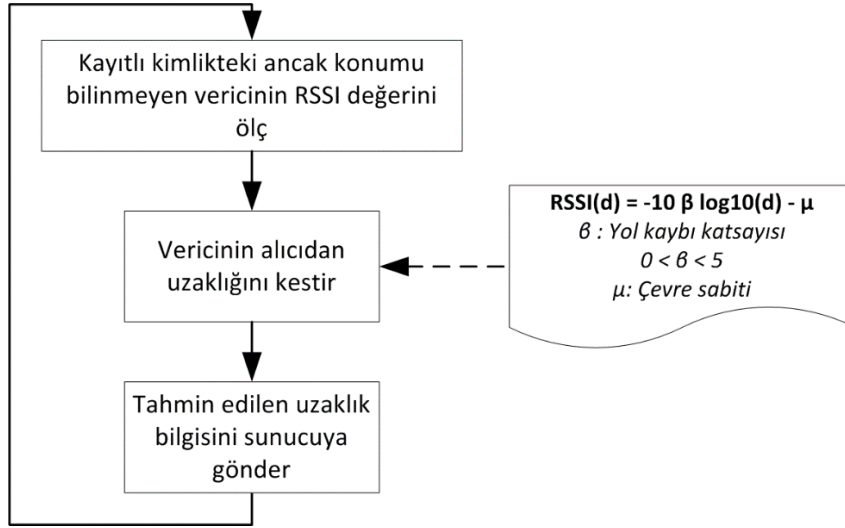
$$x = (A^T(AA^T)^{-1})B \tag{4}$$

Denklem (2), bir kürenin denklemini ifade etmektedir, kürenin merkez koordinatları  $(x_N, y_N, z_N)$  alıcıların bulunduğu koordinatları ifade etmektedir, denklemde yarıçapı



ifade edilen  $s_N$  ise alıcı ve konumun bulunacağı nokta arasındaki uzaklık değerlerini temsil etmektedir. Bu uzaklık değeri, alıcının o konumdaki vericiden elde ettiği RSSI verisinin denklem (1)'in tersine yerleştirilmesiyle bulunmaktadır.

(3) ve (4) denklemlerindeki işlemler ise lineer sistem çözümünü ifade etmektedir. Bu denklemler, N eşitlik için uygulandığında ( $x^2 + y^2 + z^2$ ), x, y ve z sonuçları elde edilebilmektedir. N sayısı, uygulanan çoklu laterasyon derecesine göre değişmektedir. Alıcı tarafından bir verici için ölçülen tüm RSSI değerlerinin toplam sayısı M ise, N en büyük RSSI değerini veren ölçüm ile aralarındaki fark belli bir eşik değerinin (ör. -20dBm) altında kalan RSSI değerlerinin sayısıdır. Çoklu laterasyon ile konum bulma optimizasyon problemi “en küçük ortalama kareler” yöntemi ile kestirilmektedir. HIOK çoklu laterasyon algoritması akış diyagramı Şekil 4’te gösterilmektedir.



Şekil 4. RSSI algoritması akış diyagramı

### 2.2.2. HIOK Parmak İzi Yöntemi

Parmak izi yöntemi ön faz ve ana faz olmak üzere iki fazdan oluşmaktadır. Hazırlık fazı olan ön fazda iç ortam  $D \times D$  hücrelerden oluşan ızgaraya bölünür ve verici her bir ızgara hücresinde gezdirilir. Her bir ızgara hücresindeki verici için farklı alıcılar tarafından ölçülen RSSI değerleri veri tabanına kaydedilir. Kayıt yapılırken bilinen konumlardaki algılayıcılar ile çoklu RSSI ölçümü yapılarak ortalama değerlerden oluşturulan bir bant aralığı kaydı yapılır. Bu veriler toplanırken elde edilen bant aralığı kullanılarak, ortama bağlı gerçek bir RSSI modeli elde edilmektedir. Bu yöntem yansıma benzeri gürültülerden etkilenmeden konumlandırma yapılmasını sağlamaktadır.

Ana fazda, sistem çalışırken farklı alıcılar tarafından ölçülen aynı vericiye ait RSSI değerleri veri tabanında kayıtlı RSSI verileriyle karşılaştırılması sonucunda vericinin hangi ızgara hücresinde bulunduğu tespit edilmektedir. Ana fazda alınan RSSI değeri ile konumlandırma yapılabilmesini sağlayan çeşitli algoritmalar mevcuttur. HIOK parmak

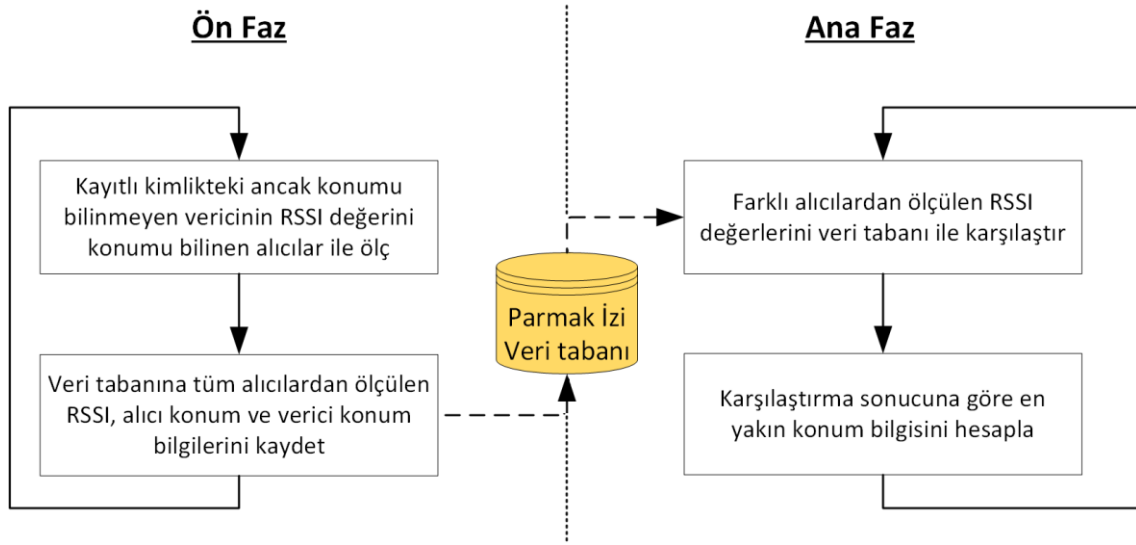
izi yönteminde EWKNN [17] ve KNN algoritmaları kullanılmaktadır. KNN algoritması (5)-(6) denklemleri kullanılarak uygulanmaktadır.

$$D_i = \sum_{j=1}^N \sqrt{(A_j - R_{i,j})^2} \quad , \quad i = 1, 2, 3, \dots, L \quad (5)$$

$$\hat{p}_e = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K p_i \quad , \quad K = 1, 2, 3, \dots, L \quad (6)$$

$A_j$ ,  $j$  alıcısından alınan RSSI değerini;  $R_{i,j}$  ise veri tabanındaki  $i$  referans noktasının  $j$  alıcısından alınan RSSI değerini temsil etmektedir. (6) denklemindeki  $p_i$  değeri tahmin edilen ölçüm noktası konumu,  $p_e$  ise konum tahminini temsil etmektedir. Ana fazda toplanan RSSI verisi ve ön fazdaki RSSI verisi arasındaki Euclid uzaklığı  $D_i$  (5) bulunup, bu değerlerden minimum sonucu oluşturan alıştırma noktalarının  $K$  tanesinin konum ortalaması (6) alınmaktadır.  $K$  değeri olarak 3 veya 4 kullanılmaktadır.

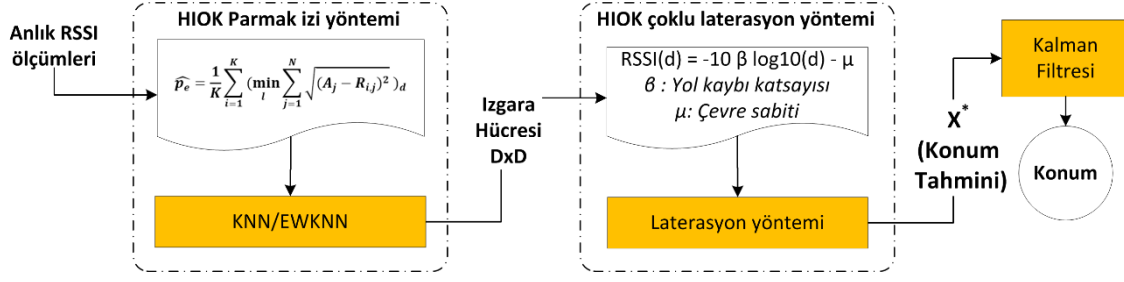
HIOK parmak izi algoritması akış diyagramı Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Parmak izi algoritması (ön / ana faz) akış diyagramı

### 2.2.3. Hibrit Çözüm

RSSI algoritması ve sinyal yayılım modelleri üzerinde simülasyon çalışmaları yürütülerek; iç ortam boyutları, gürültü (SNR), ölçüm mesafesi ve yansıma etkisi gibi parametreler arasından, en etkin parametrenin yansıma (çoklu yol etkisi) olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple sadece RSSI tabanlı çoklu laterasyon yöntemi ile konum kestiriminde hata payı büyük olmaktadır ancak parmak izi yöntemi ile birleştirilip hibrit bir yöntem ile düşük hata payı ile konum tespiti yapılabilmektedir. RSSI çoklu laterasyon ve parmak izi ana faz yöntemlerinin birleştiği hibrit çözüm Şekil 6 ile gösterilmektedir.



Şekil 6. Hibrit RSSI parmak izi konumlandırma algoritma akış diyagramı

HIOK yönteminde, alıcılar tarafından vericiye ait anlık RSSI değerleri HIOK parmak izi yöntemi ile işlenerek  $D \times D$  (ör:  $D = 3m$ ) ızgara hücresi konumu tespit edilir. Bu şekilde konumlandırma hatası  $D$  çapı ile sınırlandırılmaktadır. Daha sonra bu hücre içinde çoklu laterasyon algoritması ve çıkışına kalman filtresi uygulanarak düşük hatalı bir konum elde edilmektedir.

### 2.3. HİOK Parmak izi Ön Faz Kalibrasyonu

Parmak izi yönteminin sistem kalibrasyon için gerekli ön hazırlık fazı çok uzun sürmektedir ve çeşitli ölçüm ve kurulum zorlukları içermektedir. Bu bildiride bu fazın hızlandırılması, kurulum kolaylığının olması için yeni bir kalibrasyon yöntemi önerilmektedir. Yöntem kısaca optimum sayıda veri toplamayı ve veri tabanına kayıt yapmayı hedeflemektedir. Ön hazırlık kalibrasyon yöntemi basamakları listelenmektedir:

1. Kurulum ekibinde 1 adet gezici ve 1 adet merkezde olmak üzere en az iki üye olmalıdır.
2. Gezici yayın gücü bilinen bir verici taşımaktadır.
3. Merkez ise gezici vericinin rotasını ve kayıtlarını sürekli olarak takip etmektedir.
4. Gezici bilinen bir rota üzerinde bir alıcıdan diğer alıcıya yürüyerek tüm doğrusal noktaları gezer ve rotayı tamamlar. Gezici bu hareketi bir alıcıdan diğer bir alıcıya doğrudan yürüyerek yapar.
5. Merkez, gezicinin rotayı doğru takip ettiğini ve kayıtların doğruluğunu teyit eder.
6. Yeterli sayıda toplanan RSSI verilerinden tüm RSSI ızgara haritası çıkartılır.

Bu yöntemdeki ana amaç sabit rotalardan yürüyerek hızlı bir şekilde RSSI parmak izi haritasını çıkartmaktır. Bu yöntem ile kurulum zamanı ve zorlukları azalmaktadır.

## 3. SİSTEM PERFORMANSI

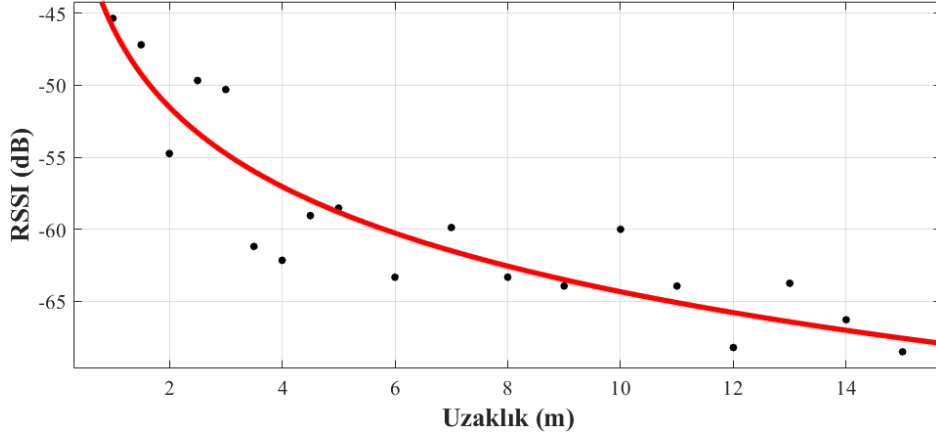
Sistem performansını gözlemlemek amacıyla gerçek ortamda birçok deney yapılmıştır. Deneylerde ilk olarak (1) denklemindeki ortam sabiti  $\mu$  ve yol kayıp çarpanı  $\beta$  hesaplanmaktadır. Bunun için kayıp denklemindeki (7) yol üstelini hesaplamak yeterli

olacaktır. Bu parametrenin bulunması ile farklı bir deney ortamı için de kullanılabilir temel bir kayıp üsteli değeri elde edilebilmektedir.

$$PL(d) = -PL(d_0) - 10\beta \log_{10}(d/d_0) \quad (7)$$

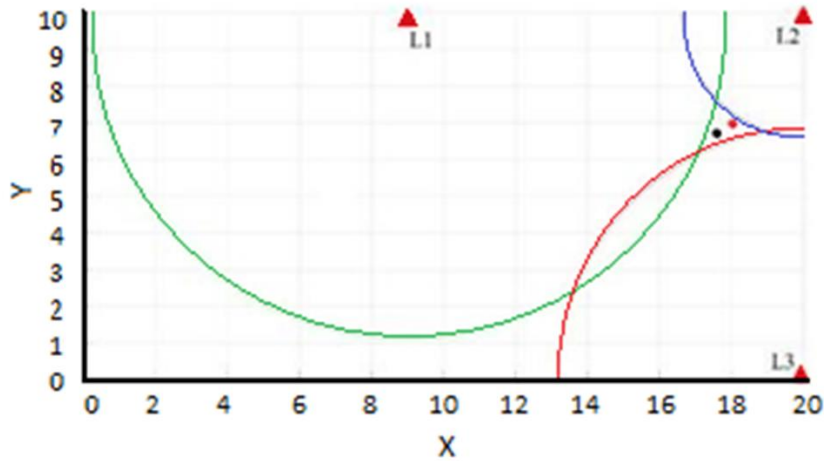
$d_0$ : Referans uzaklık

Kayıp üstelini bulurken herhangi bir verici ile alıcı çifti arasında eşit bölmelere ayrılmış mesafeler boyunca ölçümler yapılmıştır. Ölçümler iç ortamda 20 metre mesafe içerisinde 80 cm aralıklarla yapılmıştır. Şekil 7’de alınan güç verilerinin ortalamaları ve bu verilerden elde edilen en küçük kareler toplamı çizgisi görülmektedir. Elde edilen bu ölçümler kullanılarak çizdirilebilen en küçük kareler toplamı doğrusunun eğimi sisteme ait temel güç kaybı üsteli parametresini vermektedir. Literatürdeki iç ortam teorik kayıp üstellerine uyumlu olarak  $\beta = 1.833 < \beta_0 = 2$  (iç ortam) değeri bulunmuştur [18].



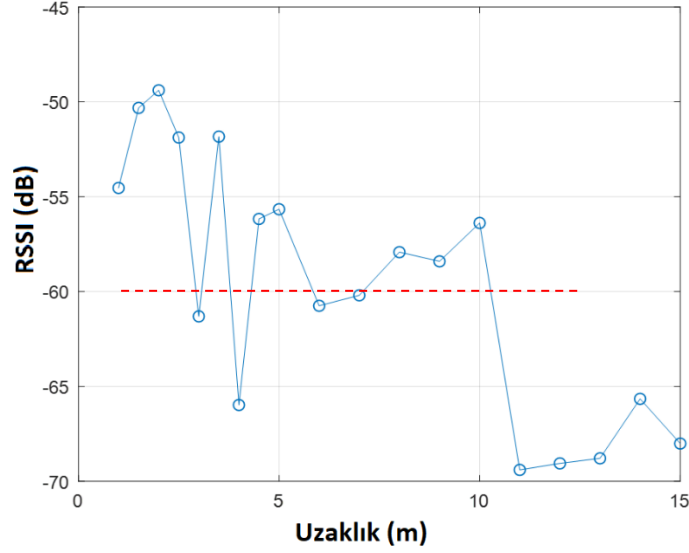
Şekil 7. Ortalama güç değerleri ve en küçük kareler toplamı çizgisi

Gürültüsüz ve düşük yansımali bir ortamda sadece laterasyon yöntemi ile konumlandırma mümkün olabilmektedir. 10m x 15m bir oda içinde 3 adet alıcı ile 1 adet vericinin konum tespiti (hata payı  $\sim 2$ m) örnek olarak Şekil 8’de gösterilmektedir.



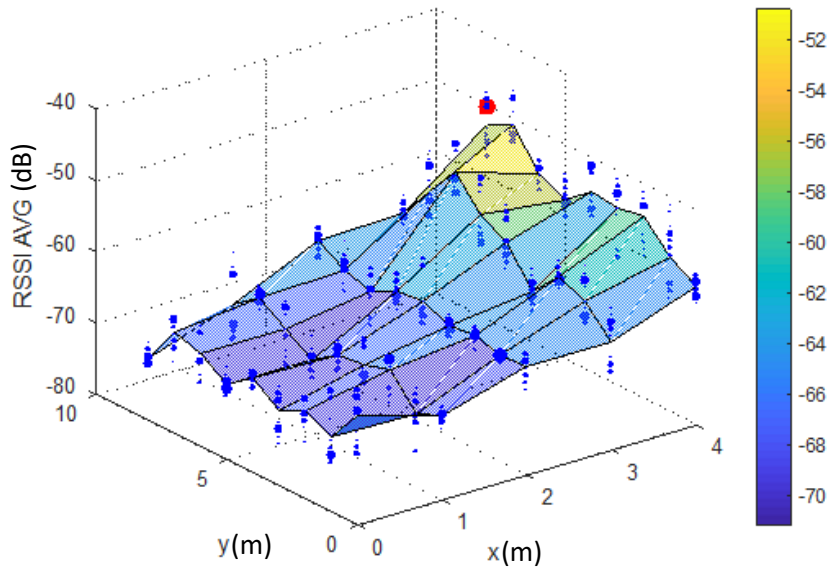
Şekil 8. RSSI laterasyon algoritmasıyla konumlandırma benzetimi

Ancak yansıma ve çoklu yol etkisi sebebiyle iç ortam gürültüsü arttıkça laterasyon yönteminin temeli olan RSSI mesafe eğrisi gittikçe bozulmaktadır. Şekil 9 yüksek yansımali RSSI mesafe eğrisine örnek olarak gösterilmektedir. Yüksek yansımali bir ortamda bir vericinin sinyaline ait RSSI ölçümlerine (ör: -60dB RSSI yatay çizgisi) karşılık birden çok mesafe hesaplanabilmektedir.



Şekil 9. Gürültülü deney ortamında RSSI uzaklık eğrisi

İç ortamın ızgara hücrelerine bölünmesi ve bu hücrelerde ( $D \times D$ :  $D=3m$ ) birden çok alıcı tarafından ölçülen RSSI değerlerine göre modelleme yapılması ile HIOK parmak izi ön fazında çoklu yol etkisi azaltılmaktadır.  $4m \times 10m$ 'lik bir alanda 1 alıcı tarafından 1 verici için ölçülen RSSI parmak izi değerleri ve dağılımı Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 10. Örnek alıcı konumu (kırmızı işaret [4, 8]) ve RSSI dağılımı

Bu dağılım her bir alıcı için HIOK parmak izi ön faz kalibrasyon yöntemi ile çıkartılır. Böylelikle her bir alıcı tarafından ölçülen RSSI değerleri ile ilgili ızgara hücre konumu tespit edilir ve bu hücre içinde laterasyon yöntemi ile daha düşük hata oranı ile konum tespiti yapılabilmektedir. Parmak izi yöntemindeki hücre büyüklüğüne göre ( $D = 3m$ ) hata kısıtlanmakta ve laterasyon yöntemi ile kalman filtre kullanımı sayesinde bu hata daha da azaltılabilmektedir.

#### 4. SONUÇ

Bu bildiriye açıklanan iç ortam konumlandırma yöntemi, konumu bilinen BLE alıcıların, hareketli bir BLE vericiye ait konum bilgisini bulabilme prensibi üzerine kurulmaktadır. RSSI çoklu laterasyon yöntemine özgün bir yaklaşımla geliştirilen adapte edilebilir çoklu laterasyon yöntemi ve yansımaya dayanıklı parmak izi yöntemlerinin birleştirilmesi ile hibrit bir yöntem elde edilmiştir. Ayrıca önerilen kalibrasyon yöntemi ile daha hızlı ve kolay parmak izi ön hazırlık fazı tamamlanabilmektedir. Önerilen HIOK iç ortam konumlandırma sistemi ile 1m konumlandırma hatası hedeflenmektedir. Bu çalışmanın devamı olarak canlı sistem ile gerçek ortamlardaki testlere devam edilecek ve mevcut sistemler ile karşılaştırılarak iyileştirme çalışmaları sürdürülecektir. Ayrıca takım içi durumsal farkındalık uygulamaları kapsamında arttırılmış gerçeklik uygulamaları ile entegre edilmesi planlanmaktadır.

#### 5. TEŞEKKÜR

Bu araştırma ITEA3 eWatch [19] projesi kapsamında yürütülmektedir. Bu araştırma ayrıca 9170018 no'lu proje olarak TUBITAK tarafından desteklenmektedir.

#### 6. KAYNAKÇA

- [1] G. Gartner and H. Huang, Eds., *Progress in Location-Based Services 2016*, Springer International Publishing, 2017.
- [2] A. Basiri, E. S. Lohan, T. Moore, A. Winstanley, P. Peltola, C. Hill, P. Amirian and P. F. e Silva, "Indoor location based services challenges, requirements and usability of current solutions," *Computer Science Review*, vol. 24, pp. 1-12, 2017.
- [3] L. Chen, S. Thombre, K. Järvinen, E. S. Lohan, A. Alén-Savikko, H. Leppäkoski, J. Lindqvist, M. Z. H. Bhuiyan, S. Bu-Pasha, G. N. Ferrara, S. Honkala, J. Lindqvist, L. Ruotsalainen, P. Korpisaari and H. Kuusniemi, "Robustness, security and privacy in location-based services for future IoT: A survey," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 8956-8977, 2017.

- [4] W. Sakpere, M. Adeyeye-Oshin and N. B. Mlitwa, "Sakpere, W., Adeyeye-Oshin, M., & Mlitwa, N. B. (2017). A state-of-the-art survey of indoor positioning and navigation systems and technologies," *South African Computer Journal*, vol. 29, no. 3, pp. 145-197, 2017.
- [5] W. Joanne, S. Taking, N. Isa and K. Chao, "Indoor navigation and localisation application system," in *2016 3rd International Conference on Electronic Design (ICED)*, 2016.
- [6] X. Luo, W. J. O'Brien and C. L. Julien, "Comparative evaluation of Received Signal-Strength Index (RSSI) based indoor localization techniques for construction jobsites," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 25, no. 2, pp. 355-363, 2011.
- [7] A. Yassin, Y. Nasser, M. Awad, A. Al-Dubai, R. Liu, C. Yuen, R. Raulefs ve E. Aboutanios, «Recent Advances in Indoor Localization: A Survey on Theoretical Approaches and Applications,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, cilt 19, no. 2, pp. 1327-1346, 29 November 2016.
- [8] D. Lymberopoulos, J. Liu, X. Yang, R. R. Choudhury, V. Handziski and S. Sen, "A realistic evaluation and comparison of indoor location technologies: Experiences and lessons learned," in *Proceedings of the 14th international conference on information processing in sensor networks*, 2015.
- [9] F. Potorti, S. Park, A. Jiménez Ruiz, P. Barsocchi, M. Girolami, A. Crivello, S. Y. Lee, J. H. Lim, J. Torres-Sospedra , F. Seco, R. Montoliu, G. M. Mendoza-Silva, M. D. C. P. Rubio, C. Losada-Gutiérrez , F. Espinosa and J. Macias-Guarasa, "Comparing the performance of indoor localization systems through the EvAAL framework," *Sensors*, vol. 17, no. 10, p. 2327, 2017.
- [10] A. Makki, A. Sidding, M. Saad, J. R. Cavallaro and C. J. Bleakley, "Indoor localization using 802.11 time differences of arrival," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 65, no. 3, pp. 614-623, 2015.
- [11] Y. Wang, X. Yang, Y. Zhao, Y. Liu and L. Cuthbert, "Bluetooth positioning using RSSI and triangulation methods," in *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2013 IEEE*, 2013.
- [12] Estimote, [Online]. Available: <https://estimote.com/>. [Accessed 31 January 2019].
- [13] "Infsoft Smart Connected Locations," infsoft, [Online]. Available: <https://www.infsoft.com/>. [Accessed 31 January 2019].
- [14] X. Zhu and Y. Feng, "RSSI-based Algorithm for Indoor Localization," *Communications and Network*, vol. 5, no. 02, p. 37, 2013.
- [15] R. Faragher and R. Harle, "Location fingerprinting with bluetooth low energy beacons," *IEEE journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 11, pp. 2418-2428, 2015.
- [16] G. Li, E. Geng, Z. Ye, Y. Xu, J. Lin and Y. Pang, *Indoor Positioning Algorithm Based on the Improved RSSI Distance Model*, China: MDPI Sensors, 2018.
- [17] B. Shin, J. H. Lee, T. Lee and H. S. Kim, "Enhanced weighted K-nearest neighbor algorithm for indoor Wi-Fi positioning systems," in *8th International Conference on Computing Technology and Information Management*, South Korea, 2012.
- [18] J. Miranda, R. Abrishambaf, T. Gomes, P. Gonçalves, J. Cabral, A. Tavares and J. Monteiro, "Path loss exponent analysis in wireless sensor networks: Experimental evaluation," in *Industrial Informatics (INDIN), 2013 11th IEEE International Conference*, 2013.
- [19] "ITEA3 15032 EWatch," [Online]. Available: <https://itea3.org/project/ewatch.html>. [Accessed 04 02 2019].

## COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMİ ÜRÜN AİLESİ İÇİN ÖLÇEKLENEBİLİR, MİKROSERVİS TABANLI YAZILIM MİMARİSİ VE YAZILIM ÜRÜN HATTI GELİŞTİRİLMESİ

Mustafa Mızrak <sup>(a)</sup>, Taylan Özgür Yıldırım <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> HAVELSAN A.Ş. KKST, Mustafa Kemal Mah. 2120. Cad. No:39 Çankaya Ankara,  
{mmizrak,toyildirim}@havelsan.com.tr

### ÖZ

Komuta Kontrol Sistemleri kapsamında geliştirilen taktik ve coğrafi durum sergilemeleri ile hareket planlanması, yönetimi, modellenmesi; karar destek için çeşitli analizlerin koşturulması, bu analizlerin ihtiyaç duyduğu verilerin büyüklüğü, analiz sürelerinin uzunluğu; jeodezi hesaplamaların ve projeksiyon yönetiminin karmaşıklığı; çeşitli kaynaklardan aktarılan verilerin askeri semboloji standartlarına uygun olarak eş zamanlı/eş zamanlıya yakın olarak yüksek performansta gösterimi; olay kaydı alma, rapor oluşturma ve diğer dış paydaş sistemler ile entegrasyon ara yüzleri arasındaki veri iletişimleri gibi altyapısal bileşenlerin sorumluluklarının/ilgilerinin ayrıştırılması, yazılım birimlerinin modüler hale dönüştürülmesi, oluşan yük ile otomatik olarak ölçeklenebilir bir yapıda modüllerin ideal sayıda oluşturulması mikroservis tabanlı bir yaklaşımı gerek kılmıştır. Çeşitli uygulamalara göre özelleşen isterler, ürün ailesinde yer alan yazılım bileşenlerinin ana/ortak bileşene eklenilip çıkartılması gibi değişiklikler yazılım ürün hattı prensibine yönelmeyi sağlamıştır. Bu bağlamda, HAVELSAN özelinde yapılan mikroservis tabanlı yazılım mimarisi tabanlı geliştirme çalışmaları anlatılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Coğrafi Bilgi Sistemi, Mikroservis, Yatayda Ölçeklenebilirlik, Komuta Kontrol, Yazılım Ürün Hattı.



# SCALABLE, MICROSERVICE-BASED SOFTWARE ARCHITECTURE AND SOFTWARE PRODUCT LINE DESIGN FOR GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM PRODUCTS

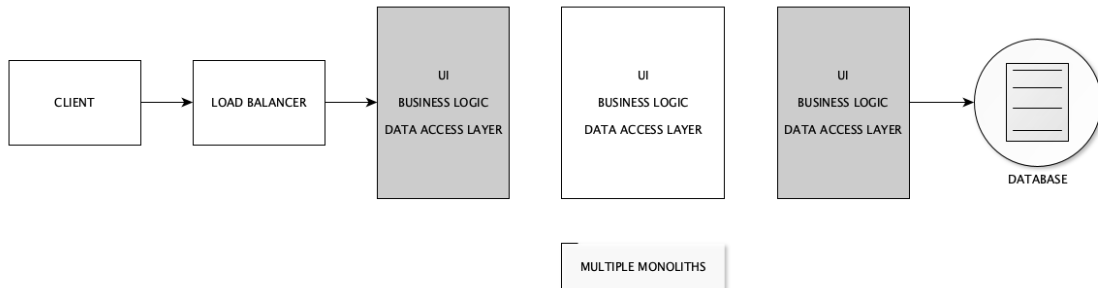
## ABSTRACT

On the behalf of Command Control and Combat Systems, tactical and geographical visualizations, management and modeling as well as various analyzes used for decision supports, size of data required for those analyzes, length of calculation time, to distinguish responsibilities of infrastructural components such as data communications, to convert core software into modular form, to create the ideally required number of modules in an automatically, to have horizontally scalable structure with load balancer, microservice-based approach is needed. Customized requirements according to various applications, changes in the product family, such as addition of software features (components) to the main/common component, necessitated to apply software product line (SPL) principle. In this context, ongoing development activities at HAVELSAN Inc. based on microservice-based software architecture are explained.

**Keywords:** Geographic Information Systems, Microservices, Horizontal Scalability, Command Control and Combat Systems, Software Product Line.

## 1. GİRİŞ

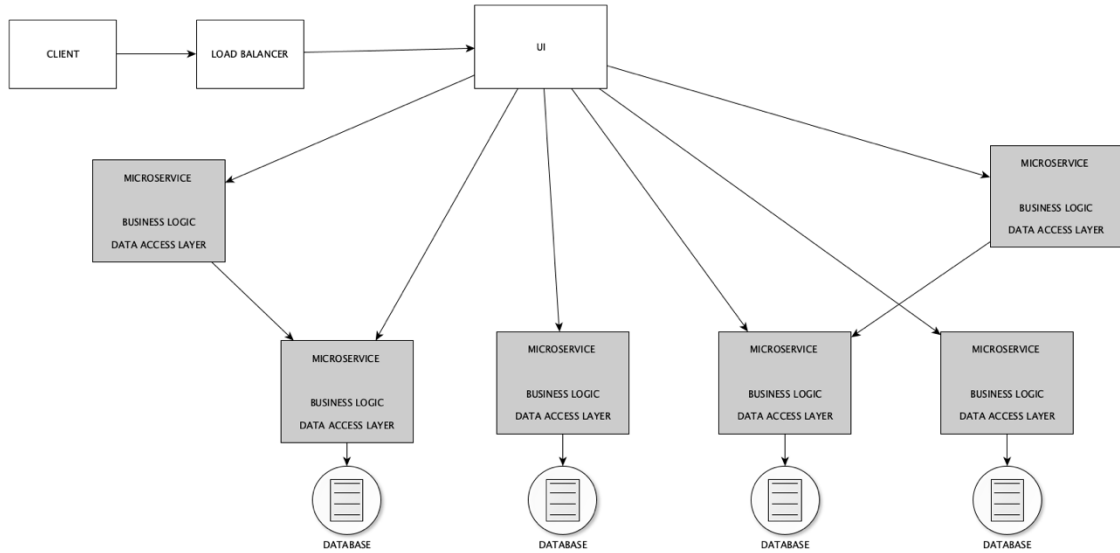
Monolitik Yazılım Mimarisi yazılımın kendi kendine yeten bir yapı olarak tasarlanmasına dayanmaktadır. Yazılımın “tek bir parça” olarak oluşturulması da denilebilir. Bu mimaride konfigürasyon, servisler, veri erişim, iş kuralları, testler tek bir uygulama içinde toplanmıştır. Servisler veya bileşenler ayrışık olması (loosely coupled) yerine birbirine bağımlıdır (inter-dependent), kullanılan/erişilen veri tabanı ve programlama dili aynıdır.



Şekil 1. Monolitik Yazılım Mimarisi

Monolitik uygulamalarda ölçeklenebilirlik “Yük Dengeleyicisi” arkasında bileşenlerin aksine tüm monolitik yapının kopyaları oluşturulur. Bu mimaride; tüm bileşenler aynı ana yapı iskeleti (framework), programlama dili ile geliştirmesinin gerekmesi ve bağlı kalınmak zorunda olunması, bir bileşende yapılan değişikliğin tüm yapı için yeni kurulumu neden olması, bileşenlerin birbirlerine olan bağımlılıklarından dolayı değişikliklerin diğer bileşenleri de etkilemesi, tek bir hata yüzünden tüm sistemin çalışmaması yani tek arıza noktası (single point of failure), oluşturma/yapılandırma (build), test ve kurulum (deploy) sürelerinin uzaması, ön bellekleme (cache) gibi uygulama büyüklüklerinin artması ve yönetiminin zorlaşması, geliştirme takımı büyüklüğü artmasına bağlı olarak, kodun ve versiyon yönetiminin zorlaşması gibi dezavantajlar bulunmaktadır.

Mikroservis Yazılım Mimarisi, tüm sistemin tek bir parça olarak geliştirilmesi yerine, sistemi alt parçalara, bileşenlere veya hizmetlere ayırıp, her parçanın kendi kendine yeten bir yapıda olacak şekilde tasarlanması tarzıdır. Bu tarzın yaygın olarak kabul edilen yararları arasında, çeviklikteki artış, geliştiricilerin tek bir uygulama üzerinde yoğunlaşması ile verimlilik artışı, ölçeklenebilirlik, ilgilerin ayrışması, oluşturma/yapılandırma test ve kurulumların bağımsızlaştırılması ile sürelerinin düşmesi, sürüm yönetiminin kolaylaşması sayılabilir [3].



Şekil 2. Mikroservis Tabanlı Yazılım Mimarisi

## 2. MEVCUT MİMARİ VE PROBLEMİN TANIMI

KAŞİF; Komuta Kontrol Yazılımları için harita sunma, görselleştirme ve konum bazlı analiz servisleri sağlayan, yüksek performanslı, ölçeklenebilir ve geliştirme ortamlarına

kolay uyarlanan bir Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ürünüdür. KAŞİF ürün ailesi 3 ana bileşenden oluşmaktadır:

KAŞİF-J: Masaüstü uygulamalar için Java Tabanlı kütüphane

KAŞİF-W: Tarayıcı üzerinde çalışan web tabanlı kütüphane

KAŞİF-S: Open Geospatial Consortium (OGC) uyumlu CBS hizmetleri sağlayan sunucu

### **2.1.1. KAŞİF-J**

Komuta Kontrol Sistemleri başta olmak üzere hareket tabanlı uygulamalar için tasarlanmış ve Java programlama diliyle geliştirilmiş bir masaüstü kütüphane olan KAŞİF-J, bu özellikleri nedeniyle komuta kontrol sistemine bir bileşen olarak eklenip kullanılabilirliği gibi, bağımsız bir uygulama olarak da çalışabilmektedir. Sağladığı ara yüz (API) sayesinde harita yetenekleri içerisinde bileşen olarak eklendiği uygulama tarafından fonksiyon çağrılmalarıyla kullanılabilen ve uygulama geliştirme sürecine dahil edilebilmektedir. KAŞİF-J OGC uyumlu bir sunucuya bağlı olarak çalışabildiği gibi sunucu bağımsız çalışabilme özelliğine de sahiptir.

Sunucu bağımlı ya da bağımsız çalışabilme, hüresel (raster) veya vektörel haritaların arazi üzerinde sergilenmesi, temel grafik çizimleri, ulusal ve uluslar arası askeri semboloji standartlarının desteklenmesi, coğrafi analizlerin yapılması, 2 boyutlu ve 3 boyutlu gösterim yeteneklerine sahiptir.

3 boyutlu gösterim için OpenGL Uygulama Programlama Ara Yüzü (API) kullanılmaktadır. Böylelikle grafik çizimleri ve gösterimi CPU'da değil grafik kartı işlemcisi (GPU) üzerinde yüksek performanslı olarak gerçekleştirilebilmektedir. OpenGL'e erişim bir soyutlama katmanı ile gerçekleştirilmektedir.

KAŞİF-J'nin temel bileşenleri şu şekildedir:

- Harita çizim kontrol
- Jeodezi hesaplamalar
- Semboloji editörü
- Coğrafi analiz
- Olay kaydı/günce

### **2.1.2. KAŞİF-W**

KAŞİF-J ile benzer olarak yine komuta kontrol sistemleri tasarlanmış Javascript tabanlı bir web kütüphanesidir. Web kütüphanesi olması harita verisinin sağlanması için bir sunucuyu zorunlu kılmaktadır.

Hücresel (raster) ve vektörel haritalar OGC servisleriyle sunucudan alınıp browser üzerinde sergilenmektedir. Bileşen (widget) yapısına sahip olan KAŞİF-W, bileşenler arasındaki veri iletiminde uluslararası bir standart olan Common Map API (CMAPI) mesaj formatını kullanmaktadır. Veri iletimi gerek “web-socket” bağlantısı ile gerek browser üzerindeki “iFrame” ve sekmeler arasında “post-message” yapısıyla yapılmaktadır.

KAŞİF-W, 3 boyutlu gösterim yapabilmekte ve bunu WebGL kütüphanesi kullanan bir bileşenle gerçekleştirmektedir. KAŞİF-J’nin tüm temel yetenekleri KAŞİF-W’da da içerilmiş durumdadır.

### **2.1.3. KAŞİF-S**

OGC uyumlu Java tabanlı bir sunucu uygulamasıdır. hücresel/vektörel harita görüntüsünü sunan Web Map Service (WMS); coğrafi özellikler üzerinde istemci tarafından sorgulama, yaratma, güncelleme ve silme işlemlerinin yapılabilmesini sağlayan Web Feature Service (WFS), kapsama bilgisi sağlayan Web Coverage Service (WCS), haritanın parçalı (tile) olarak sunulmasını sağlayan Web Map Tile Service (WMTS) standartlarının gerçekleştirimi yapılmaktadır. Bununla birlikte Web Process Service (WPS) üzerinden uygulama özelinde OGC standardına uygun özelleşmiş servis gerçekleştirmeleri de yapılabilmektedir.

OGC uyumlu sunucu erişimi doğrudan istemci üzerinden değil istemci ile sunucu arasında bir soyutlama olarak geliştirilmiş bir katman üzerinden yapılmaktadır. Bu katmana erişim Representational State Transfer (REST) servisleri üzerinden gerçekleşmektedir. Böylelikle mimari, mevcut sunucunun OGC uyumlu herhangi bir sunucuyla değişimini olanaklı kılmaktadır.

Sunucu bir uygulama sunucusu üzerinde çalışmakta, gerek web gerek masa üstü istemciye harita verisi ve servisi sağlamaktadır.

### **2.1.4. Karşılaşılan Sorunlar**

KAŞİF ürün geliştirme faaliyetleri sürerken aynı zamanda projelerin ihtiyaçları kapsamında ek geliştirmeler yapılabilmektedir. Ürün yaşam döngüsü ile birlikte projelerin ihtiyaçlarının geliştirimi eş zamanlı olarak yürütülmek durumundadır. Bu durum, savunma projeleri başta olmak üzere, ürüne ve projelere özgü ihtiyaçların belirlenmesi, ortaklaştırılması/ayrıştırılması ve geliştirilmesi sürecinde bazı sorunları da beraberinde getirmektedir:

1. Bir proje gereksiniminin ürün gereksinimi olup olmadığı gereksinim analizi sürecinde belirlenemediğinden,

- Ürüne eklenen bazı yeteneklerin tüm projelerde kullanılmıyor ve kullanılmayacak olması
  - Geliştirilen yeteneğin ürüne eklenmemiş olması ve başka bir proje özelinde yeteneğin tekrar geliştirilmesi ihtiyacı
2. Ürün sürümleri ile projelere verilen sürümlerin dallandırılması ve takibi
  3. Ürün ile projelere ait konfigürasyonların ayrı yönetilmek durumunda kalınması
  4. Geliştirme, test ve kurulum ortamlarının birbirinden farklılaşması ve bu ortamların yönetimi

KAŞİF, monolitik yazılım mimarisi ile geliştirilmiş olup ölçeklenebilirlik dikey olarak sağlanmaktadır. Ürün ve proje versiyonları tek bir sürüm hattından sağlanmaktadır.

### 3. GELİŞTİRİLEN MİMARİ ÇÖZÜM VE TASARIM

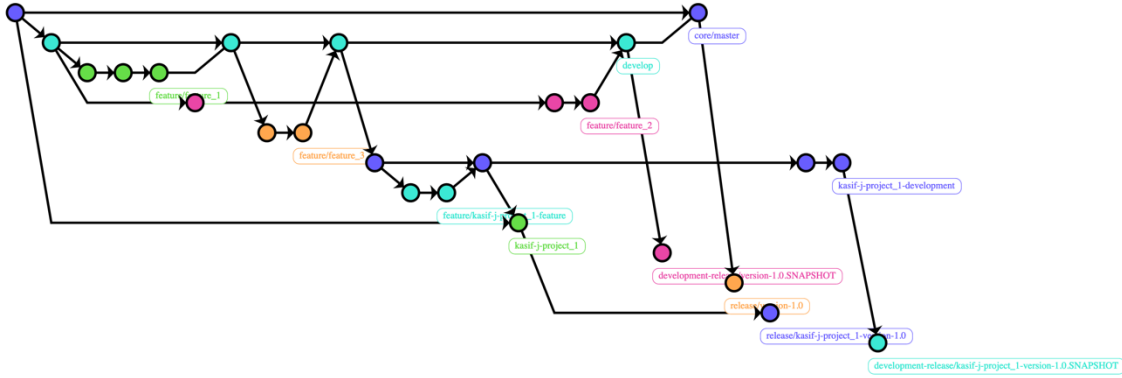
KAŞİF için monolitik mimariden vazgeçilerek mikro-servis tabanlı yazılım mimarisi tasarlandı, kod sürüm yönetimi için özellik, proje ve sürüm bazlı dallanmalar oluşturuldu, bileşenler için konteynerler (container) oluşturularak yalıtımlı bir yapı sağlandı, bileşenlerin kurulumu, otomatik yatayda ölçeklenebilmesi ve orkestrasyonları için kümeleme aracı olarak Kubernetes kullanıldı. Konteynerlerden toplanan çeşitli özelleşmiş metriklere göre analiz, izleme, görselleştirme ve uyarı/ikaz (alerting) işlemleri için de Prometheus ve Grafana sistemleri kullanıldı. Son olarak, KAŞİF Yazılım Ürün Hattı oluşturulması kapsamında proje ihtiyaçları için daha önceden geliştirilmiş özellik havuzundaki bileşenlerin proje gereksinimlerine göre seçilmesi[1] ve seçilen yeteneklerin/bileşenlerin yapılandırılarak doğru bir şekilde bir araya getirilmeleri için yetenek modeli, ürün ve proje aile modelleri oluşturulması[2] çalışmaları devam etmektedir.

#### 3.1.1. Kod Sürüm Yönetimi

Çok sayıda dosya içeren projelerde yapılan değişiklikleri kontrol altında tutmak, yapılan değişiklikleri ürünün/projenin sürümleri şeklinde depolamak ve gerekirse eski sürüme dönmek için sürüm kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Git, SVN, Mercurial, CVS, Perforce, Visual Studio Team Foundation Server, IBM Rational ClearCase, Bazaar, Darcs ve BitKeeper birer sürüm kontrol sistemidir. Git, her değişimde bütün dosyaların o anki halinin bir fotoğrafını çekip bu fotoğrafa referans vermektir. SVN'den farklı olarak dağıtık sistemdir.

KAŞİF Ürün Ailesi kaynak kodlarının yönetilmesinde Git kullanılmaktadır. Ailedeki KAŞİF-J, KAŞİF-W, KAŞİF-S bileşenleri ayrı bir kod depolarından yönetilmektedir. Bileşenler için özgün git dallanma modeli oluşturuldu. Ürünün ana bileşenler, yetenek bileşenleri, alt yapısal bileşenler, proje, gerçek ortam ile geliştirme ortamları için farklı

dallanmalar oluşturuldu. Bu sayede, ürüne ait sürüm yönetimleri ile projelere ait sürüm yönetimleri yönetimi sağlanmakla beraber proje özelinde seçilecek yeteneklerin belirlenmesi ve oluşturulması gibi ihtiyaçlara da çözüm sunuldu. Mikroservis yapısına uygun olarak oluşturulan bu dallanma modeli ile de özelliklerin farklı konteynerlar üzerinden sunuldu ve Yazılım Ürün Hattı çalışması ile de seçilecek konfigürasyona göre bu kod depolarından ve dallanmalardan ürün oluşturma sorunu da çözülmüş olacaktır.



Şekil 3. KAŞİF-J Git Dallanma Modeli

Şekil-3'te KAŞİF-J'ye ait git dallanma modeli yer almaktadır. Ürünün ana bileşenleri stabil/olgunlaşmış (product-ready) kodları barındıran (test edilmiş, statik kod analizleri yapılmış) “core/master” dalında, “core/master” dalından önde giden ve bu dalda yer almayan geliştirilmiş bazı özellikler/değişiklik/yetenek ise “develop” dalında ilerlemektedir. Proje dalları ise “core/master” ile “develop” dallarından oluşturulmakta, ürün/proje sürümleri ise “release” dalında, önde giden özellikler ise “development-release” dallarında yer almaktadır. Ürüne ait özellikler “core/master” dalından, projeye özgü geliştirmeler ise proje dallarından oluşturulmaktadır. Bu model ile hem test yapan kişiler için ürün ve proje sürümleri, müşteriler için de proje bazlı ürün versiyonları sunulabilmektedir, Yazılım Ürün Hattı için de özellik/yetenek tabanlı bir kod yapısı sunulmaktadır.

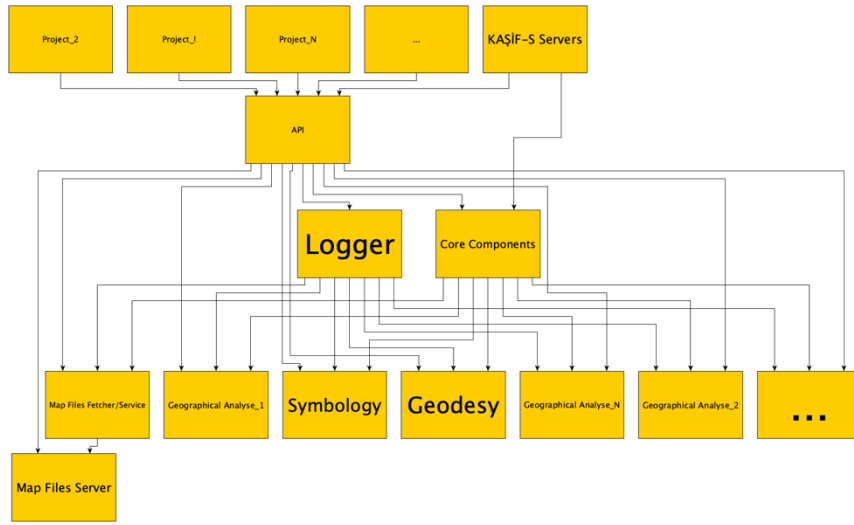
### 3.1.2. Bileşenler ve Mikroservisler

Monolitik bir yapıda olan KAŞİF Ürün Ailesi'ndeki bileşenlerin mikroservis tabanlı yazılım mimarisine geçilirken iki yöntem uygulandı:

1. Bileşenlerin paketler bazında ayrıştırılması. Bu yöntem, diğer paketler arasında sıkıca bağlantılı ilişkisi olan bileşenler için semantik olarak (ilgili sınıflar aynı paket altında toplandı) ayrıştırma işlemi yapıldı.
2. Yazılımdaki performans (CPU, Memory, I/O) olarak dar-boğaza (bottleneck) neden olan bileşenler tespit edilip, ayrıştırılarak ayrık bileşenler haline getirildi. Bu yöntem her bileşen ayrıldıktan sonra yinmeli olarak denendi. Bu sayede,

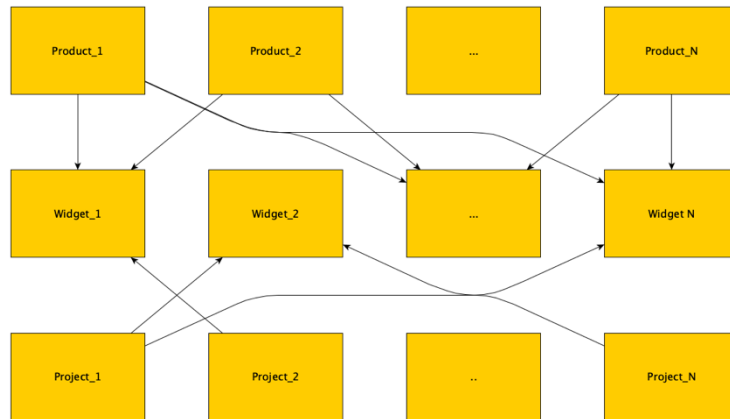
bileşenlerin otomatik yatay ölçeklenebilir haline dönüştürülerek optimizasyon kazanımı elde edildi.

Bu iki yöntem dışından tüm bileşenler tarafından kullanılan sınıflar Ana Bileşenler (Core Components) olarak ayrı tasarlandı. Olay Kaydı Oluşturucu, Harita Dosyaları Sunan Servisler ile Coğrafi Analizlerin tamamı ayrı bileşenler olarak yeniden oluşturuldu. Böylelikle yazılım modüler hale getirildi.



Şekil 5. KAŞİF-W Bileşen Yapısı

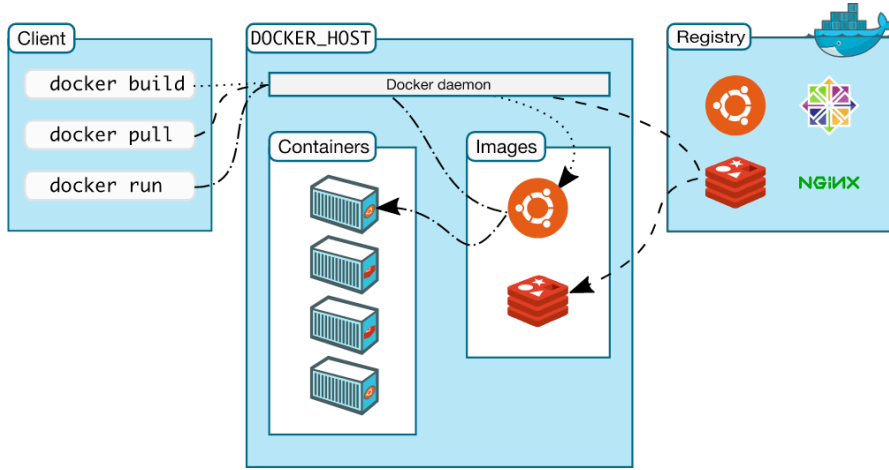
KAŞİF-W için de bileşenler ayrıştırıldı. İhtiyaca göre, belirlenen konfigürasyon ile istenilen bileşenler projelere eklenilebilmesi sağlandı.



Şekil 6. KAŞİF-J Modül Yapısı

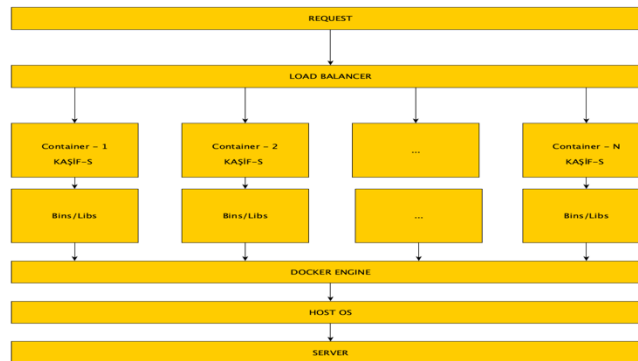
### 3.1.3. Konteyner Yapısı ve Orkestrasyon

Mikroservis yazılım mimarisine uygun olarak yeniden oluşturulan modüller ayrı ayrı konteynerler içinde kurulmuştur. Bunun için Docker kullanılmış, modüller için de Docker imajları oluşturulmuştur. Docker imajları ise versiyonlanarak bir iç “Docker Hub”ı üzerinde tutulmuş ve buradan erişilmiştir.



Şekil 7. Docker Mimarisi [4]

Konteynerler arasındaki iletişim ise REST üzerinden olacak şekilde iletişim yönetimi kullanılmıştır. Proje ve ürünlere özgü olarak kullanılan parametreler ile konfigürasyon bilgileri ayrı bir uygulama/konteyner üzerinden (Spring Cloud uygulaması) üzerinden sunulmuştur. İlk aşamada konteynerlerin kopyaları (replication) elle (manuel) yönetilmiştir. İlerleyen fazlarla ise Kubernetes ile ayrı ad uzayı (namespace) üzerinden yönetilmekte ve ölçeklenebilirlik işlemci ile hafıza kullanımı, saniyedeki istek sayısı, yanıt süresi gibi parametrelere bağlı olarak otomatik olacak şekilde yatayda kopyaları sağlanmıştır.



Şekil 8. KASIF-S Docker Yapısı



### 3.1.4. Mikroservisler Yönetimleri ve İzlenmesi

Modüllerin sayısı artması ile oluşturulan konteynerlerin fazlalığı yönetimi giderek zorlaşmaktadır. İdeal sayıda, oluşan yüke göre otomatik şekilde konteynerlerin sayılarının artıp azalması ile sunucunun yeniden başlatılması durumunda otomatik konteynerlerin oluşturulması veya konteynerlerin bir kısmının cevap vermemesi üzerine yenilerinin oluşturulması gibi nedenler Kubernetes gibi Platformun Servis Olarak Sunulması (Platform-As-A-Service/PaaS) çözümlerine yönelmektedir. Bu sayede, KAŞİF Ürün Ailesine özgü metrikler tanımlanmış bu metriklere göre “Pod”, “Node”, “Cluster”, “Replica Setler oluşturulmuş, servis keşfi (service discovery), kaydı (registry), yük dengeleyici (load balancer) gibi işlemler Kubernetes ile sağlanmıştır. “İşlemci Kullanımı”, “JVM Hafıza Kullanımı”, “Heap Hafıza Alanı Kullanımı”, “Saniyedeki İstek Sayıcı”, “Cevap Verilme Süresi”, “Giriş/Çıkış Aygıt Tepki Süreleri” gibi metrikler “Prometheus” ile toplanmış bu metrikler “Grafana” ile de görselleştirilmiştir.

### 3.1.5. Proje Bazlı Özellik Seçimi, Sürüm Oluşturma ve Takibi

HAVELSAN bünyesinde devam eden geliştirmelerde bir sonraki geliştirme fazında; yetenek-git dallanma modeli ilişkisi, yetenek-ürün aile ilişkisi, dallanma modeli-isterler ilişkisi, hiyerarşik yetenek ilişkisi oluşturulması, yeteneklerin seçimi ile ürün oluşturulması ve kurulum dosyalarının otomatik oluşturulması, oluşturulan projelerin proje deposunda saklanması gibi çalışmaların kavramsal tasarımları yapılmış ve gerçekleştirimi sağlanacaktır.

## 4. SONUÇ

Bu çalışma ile Coğrafi Bilgi Sistemleri için kod sürüm yönetimi aracına etkili kullanmak amacıyla dallanma modeli oluşturulmuş, mikro-servis tabanlı yazılım tasarımı ile de çeşitli ürün ve projelere özgü yeteneklerin havuzdan seçilip ürün oluşturulması ve ölçeklenebilir yapıda kurulum yapılması için gerçekleştirilen çalışmalar anlatılmıştır.

## 5. KAYNAKÇA

- [1] Lee, K., Kang, K.C. ve Lee, J. (2002), Concepts and guidelines of feature modeling for product line software engineering, In: Gacek, C. (ed.) ICSR 2002. LNCS, 2319, 62-77. Springer, Heidelberg.
- [2] Beuche, D. ve Dalgarno, M., Software Product Line Engineering with Feature Models, [www.pure-systems.com/fileadmin/downloads/pure-variants/tutorials](http://www.pure-systems.com/fileadmin/downloads/pure-variants/tutorials)
- [3] Sill, A. (2016), The Design and Architecture of Microservices, IEEE Cloud Computing, 3(5), 76-80.
- [4] Docker architecture, <https://docs.docker.com/engine/docker-overview/>

## SİNÜZOİDAL HAREKET EDEN HEDEF İÇİN HEDEF TAKİP ÇALIŞMASI

Fırat Yılmaz Cevher <sup>(a)</sup>, M. Kemal Leblebicioğlu <sup>(b)</sup>

<sup>(a)</sup> Roketsan AŞ, Ankara-Samsun Karayolu 40. Km 06780 Elmadağ, ANKARA,  
firat.cevher@roketan.com.tr

<sup>(b)</sup> Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü,  
kleb@metu.edu.tr

### ÖZ

Sinüzoidal olarak hareket eden hedeflerin takibi zorlu hedef takibi problemlerinden birisidir. Manevra frekansı kestirim özellikle güdüm algoritmalarında kullanılmaktadır. Güdüm algoritmaları kapsamındaki kaçırma mesafesi hedefe ait pozisyon kestiriminin yanı sıra sinüzoidal harekete ait frekansa da bağlıdır. Literatürde hedefe ait manevranın frekansı Kalman Filtresi çatısı altında etkileşimli çoklu model ve uyarlamalı çoklu model kestiricisi kullanılarak elde edilmiştir. Bu yöntemlerde doğrusal ve doğrusal olmayan hareket modelleri kullanılmış olup, kestirim durum değişkenleri arasında hedef manevra frekansı da bulunmaktadır. Bu çalışmada periyodik hareket eden hedeflerin manevra frekansının hesaplanması için yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde farklı dönüş oranlarına sahip koordineli dönüş hareket modellerinde oluşan etkileşimli çoklu model algoritması kullanılmıştır. Çalışma sonucunda önerilen yöntem mevcut yöntemler ile benzetim ortamında karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Etkileşimli çoklu model, Hedef takibi, Hızlı Fourier dönüşümü, Kalman süzgeci, Sinüzoidal hareket

## A STUDY OF TARGET TRACKING FOR SINUSOIDAL MANEUVERING TARGET

### ABSTRACT

Target tracking for sinusoidal moving target is one of the most difficult problem in target tracking. Estimation of maneuvering frequency is used guidance algorithm in particular. Miss distance is influenced by not only position error but also maneuvering frequency error. In literature interacting multiple model (IMM) and multiple model

adaptive estimator (MMAE) are used to estimate maneuvering frequency. These methods are derived in the Kalman filter framework. Nonlinear and linear motion models are used in these methods, maneuvering frequency is also a state variable. In this study, a new method are proposed to estimate maneuvering frequency. In this method IMM filter is used. Motion models used in IMM filter are coordinated turn model with varying turn rates. At the end of the study, the proposed method is compared with methods in literature as simulation.

**Keywords:** Fast Fourier transform, Interacting multiple model, Kalman filter, Sinusoidal maneuvering, Target tracking

## 1. GİRİŞ

Manevra yapan hedeflerin takibi performans [1], [2] ve gözlenebilirlik [3] açılarından da olmak üzere yoğun bir şekilde çalışılmıştır. Manevra modellerinin büyük bir kısmı sabit hareket ya da sabit dönüş modellerinden oluşmaktadır ve bu modeller beklenen hedef manevraları ile uyumlu olduğu ispatlanmıştır. Ancak manevra sinüzoidal olduğunda manevra frekansının kestirimine de ihtiyaç duyulmuştur. Ek olarak sinüzoidal manevra yapan hedefler için geliştirilen güdüm algoritmaları da hedefin manevra frekansına ihtiyaç duyar [4]. Bu kapsamda son yıllarda manevra yapan hedeflerin takibinde kullanılan çoklu model yapıları ile hedefin manevra frekansı elde edilmiştir. Kalman süzgeci çatısı altında geliştirilen etkileşimli çoklu model (IMM) [5] ve uyarlamalı çoklu model kestiricisi (MMAE) [6] yaklaşımları bu konudaki etkin uygulamalardır. Bu çalışmalarda sinüzoidal hareketi benzeten 3, 4 ve 5 durum değişkenli doğrusal ve doğrusal olmayan modeller kullanılır. Modellerin içerisinde manevra frekansları önden tanımlanır. Hedefin manevrası bu modellerden hangisine istatistiksel olarak yakınsa manevra frekansı o modelin frekansı olur.

Bu çalışmada IMM süzgeci kapsamında sinüzoidal hareket için özelleşmiş model kullanmak yerine negatif ve pozitif dönüşü benzeten koordineli dönüş modelleri kullanılarak manevra frekansının elde edilmesi hedeflenmiştir. Koordineli dönüş modellerinde kullanılan açısız hız değerleri, hedefin pozitif ya da negatif dönüşünü kapsayacak şekilde seçilmiştir. IMM süzgeci bünyesinde olan mod olasılıklarından manevra bilgisi elde edilmiş ve bu manevra bilgisi frekans ekseninde incelenerek hedefin manevra frekansı hesaplanmıştır.

Çalışmanın kalan kısmı şu şekilde planlanmıştır. 2. Bölümde IMM süzgeci hesaplama adımları verilmiştir. IMM süzgeci bünyesindeki süzgeç modelleri doğrusal ve normal gürültü dağılıma sahiptir. Bu yüzden IMM süzgeci içerisindeki süzgeçlerde Kalman süzgeci (KF) kullanılmıştır. 3. Bölüm’de bu çalışmada geliştirilmiş olan yöntemin detayları verilmiştir. 4. Bölüm’de ise benzetim çalışması sonuçları paylaşılmış olup 5. Bölüm’de sonuç kısmı ile bitirilmiştir.

## 2. IMM SÜZGEÇİ İLE HEDEF TAKİBİ

Manevra hedef takibi için model uyumsuzluğu probleminde sebep olmaktadır. Manevra yapan hedeflerin durum kestiriminde çoklu süzgeç modelleri kullanılır. Çoklu süzgeç modellerinin etkin yönetimi başarılı bir durum kestirimi için oldukça önemlidir. Bu gereksinim Etkileşimli Çoklu Model (IMM) süzgeci tarafından yerine getirilmektedir. IMM süzgeci çoklu süzgeç modellerinin değişen sistem dinamiği ile uyumuna bakan ve bu uyuma bağlı olarak durum kestirimi yapan bir algoritmadır. Bu çalışmada IMM süzgeci bir amaç değil araç olarak kullanılmaktadır. Bu yüzden IMM süzgeci ile ilgili detaylı teorik bilgileri [1] ve [7] ile verilmiştir ve bu çalışmanın kapsamı dışındadır.

Kesikli zaman doğrusal Gauss sistemi aşağıdaki şekilde ifade edilir [1].

$$x_{k+1} = A_k x_k + w_k, \quad w_k \sim N(w_k; 0; Q) \quad (1)$$

$$z_k = C_k x_k + v_k, \quad v_k \sim N(v_k; 0; R) \quad (2)$$

Burada  $A_k$  durum geçiş matrisini  $C_k$  ise ölçüm matrisini gösterir.  $w_k$  ve  $v_k$  sırasıyla süreç ve ölçüm gürültülerini modeller ve sıfır ortalamalı sırasıyla  $Q$  ve  $R$  hata kovaryans değerlerine sahip normal dağılımlı rastsal değişkenlerdir. IMM süzgeci bünyesinde  $N_r$  adet süzgeç modeli (toplam mod durum sayısı) olduğu kabul edildiğinde  $k - 1$  anında her bir filtre modeline ait durum kestirimi ve hata kovaryans değeri sırasıyla  $\{\hat{x}_{k-1|k-1}^j\}_{j=1}^{N_r}$  ve  $\{P_{k-1|k-1}^j\}_{j=1}^{N_r}$  olarak, mod durumları arasındaki olasılığın (mod olasılığı) ise  $\{\mu_{k-1}^j\}_{j=1}^{N_r}$  olarak ifade edilir. Ek olarak farklı mod durumları ( $r_k$ ) arasındaki geçiş olasılığı matrisi şu şekilde ifade edilir;  $\Pi = [\pi_{ji} \cong P(r_k = j | r_{k-1} = i)]$ . Bu varsayımlar altında IMM süzgecinin  $k$  anındaki durum kestirimi, hata kovaryansı ve mod olasılıkları,  $\{\hat{x}_{k|k}^j, P_{k|k}^j, \mu_k^j\}_{j=1}^{N_r}$  aşağıdaki şekilde hesaplanır.

İlk olarak  $k - 1$  anındaki geçiş olasılığı matrisi ve mod olasılıkları kullanılarak (3) ile gösterilen karışım olasılığı hesaplanır. Bu değere bağlı olarak her bir modele ait kestirim ve kovaryans değerleri sırasıyla (4) ve (5) ile gösterilen şekilde yeniden hesaplanır.

$$\mu_{k-1|k-1}^{ji} = \frac{\pi_{ji} \mu_{k-1}^j}{\sum_{l=1}^{N_r} \pi_{li} \mu_{k-1}^l} \quad (3)$$

$$\hat{x}_{k-1|k-1}^{0i} = \sum_{j=1}^{N_r} \mu_{k-1|k-1}^{ji} \hat{x}_{k-1|k-1}^j \quad (4)$$

$$P_{k-1|k-1}^{0i} = \sum_{j=1}^{N_r} \mu_{k-1|k-1}^{ji} \left[ P_{k-1|k-1}^j + \left( \hat{x}_{k-1|k-1}^j - \hat{x}_{k-1|k-1}^{0i} \right) \left( \hat{x}_{k-1|k-1}^j - \hat{x}_{k-1|k-1}^{0i} \right)^T \right] \quad (5)$$

(4) ve (5) ile elde edilen her bir modele ait kestirim ve kovaryans değerleri kullanılarak yine her bir model için tahmin değerleri hesaplanır. Bu adım KF'nin model güncelleme adımı ile aynıdır. İşlem adımları (6) ve (7) ile gösterilmiştir.

$$\hat{x} \quad )\hat{x} \quad (6)$$

$$(7)$$

Ölçüm hesaplama adımları ise yine her bir model için ayrı ayrı yapılır. Bu adımda Kalman kazancı,  $K_k$ , hesabı alınan ölçüm ve ölçüm varyansına bağlı olarak hesaplanır. Güncelleme adımında hesaplanan tahmini kovaryans ve durum değerleri bu adımda güncellenerek, her bir model için durum kestirimi ve kovaryans değeri hesaplanır.  $i$ 'nci model için ilgili işlem adımları (8)-(13) ile gösterilmiştir.

$$\hat{z} \quad )\hat{x} \quad (8)$$

$$\tilde{y} \quad \hat{z} \quad (9)$$

$$(10)$$

$$)(S \quad ) \quad (11)$$

$$\hat{x} \quad \hat{x} \quad \tilde{y} \quad (12)$$

$$(13)$$

(8) ve (10) ile belirtilen denklemler kullanılarak, alınan ölçüm ile bu değerler arasındaki benzerlik hesaplanır. Bu adım (14) ile sağlanır. Buradaki amaç alınan ölçümün ile süzgeç modelleri arasındaki benzerliğini nicelik olarak ortaya çıkarmaktır.

$$N(z \quad \hat{z} \quad ) \quad (14)$$

(15) ile de (14) kullanılarak mod olasılığı hesabı yapılır.

$$\frac{\Sigma}{\Sigma \quad \Sigma} \quad (15)$$

IMM süzgeci durum kestirimi ve kovaryans hesabını (12), (13) ve (15) kullanarak (16) ve (17) ile ifade edildiği gibi yapar.

$$\hat{x} \quad \sum \mu \quad \hat{x} \quad (16)$$

$$\sum \mu \quad [P \quad (\hat{x} \quad \hat{x}_{k|k})(\hat{x} \quad \hat{x}_{k|k}) \quad ] \quad (17)$$

IMM süzgeci kapsamında kullanılacak olan hareket modelleri ile ilgili olarak literatürde sabit hız, sabit ivme, açısal hızı sabit koordineli dönüş, açısal hızı bilinmeyen koordineli dönüş, Singer modeli gibi modeller mevcuttur [8]. Sinüzoidal hareket eden hedeflerin

takibi için yukarıda belirtilen modellere ek olarak 3, 4 ve 5 durum değişkenli doğrusal ve doğrusal olmayan modeller de geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında sabit hız ve açısal hızı sabit koordineli dönüş hareket modeli kullanılmıştır. Hareket modelleri aşağıdaki şekilde ifade edilir.

### 2.1. Sabit Hız Hareket Modeli (CV)

Bu model aynı zamanda kesikli zaman beyaz gürültülü ivmelenme modelidir [8]. Durum vektörü pozisyon ve hız değişkenlerinden oluşur ve ikinci derecedendir.  $x_k = [x \dot{x} y \dot{y}]^T$  için kesikli zaman durum uzay denklemi aşağıdaki şekilde yazılır.

$$x_k = F x_{k-1} + G w_{k-1} = \text{diag}[F_{cv}, F_{cv}] x_{k-1} + \text{diag}[G_{cv}, G_{cv}] w_{k-1} \quad (18)$$

$$F_{cv} = \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, G_{cv} = \begin{bmatrix} 0.5T_s^2 \\ T_s \end{bmatrix} \quad (19)$$

Burada  $T_s$  örnekleme periyodudur.  $w_{k-1} = [w_x, w_y]^T$  kesikli zaman beyaz gürültü dizisidir ve gürültülü ivmeyi tanımlar. Buna bağlı olarak (18) ile belirtilen ifadedeki gürültünün kovaryansı aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\text{cov}(G w_{k-1}) = \text{diag}[\text{var}(w_x) Q_{cv}, \text{var}(w_y) Q_{cv}], \quad Q_{cv} = \begin{bmatrix} T_s^4/4 & T_s^3/2 \\ T_s^3/2 & T_s^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

### 2.2. Koordineli Dönüş Hareket Modeli (CT)

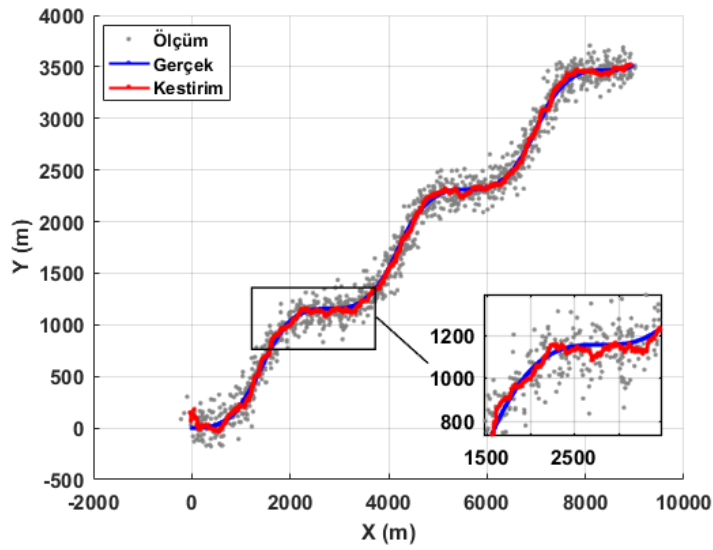
Koordineli dönüş hareketi için bir cismin sabit bir sürat ve sabit bir açısal hızda hareket ettiği varsayımı üzerine kurulmuştur [8]. Bu modelde açısal hız,  $\omega$ , bilinen ve sabit olduğu kabul edilmiştir.  $x_k = [x \dot{x} y \dot{y}]^T$  için kesikli zaman durum uzay denklemi aşağıdaki şekilde yazılır. Gürültünün kovaryans değeri (20) ile ifade edilen sabit hız modeli ile aynıdır.

$$x_k = F x_{k-1} + w_{k-1} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sin \omega T_s}{\omega} & 0 & -\frac{1 - \cos \omega T_s}{\omega} \\ 0 & \cos \omega T_s & 0 & -\sin \omega T_s \\ 0 & \frac{1 - \cos \omega T_s}{\omega} & 1 & \frac{\sin \omega T_s}{\omega} \\ 0 & \sin \omega T_s & 0 & \cos \omega T_s \end{bmatrix} x_{k-1} + w_{k-1} \quad (21)$$

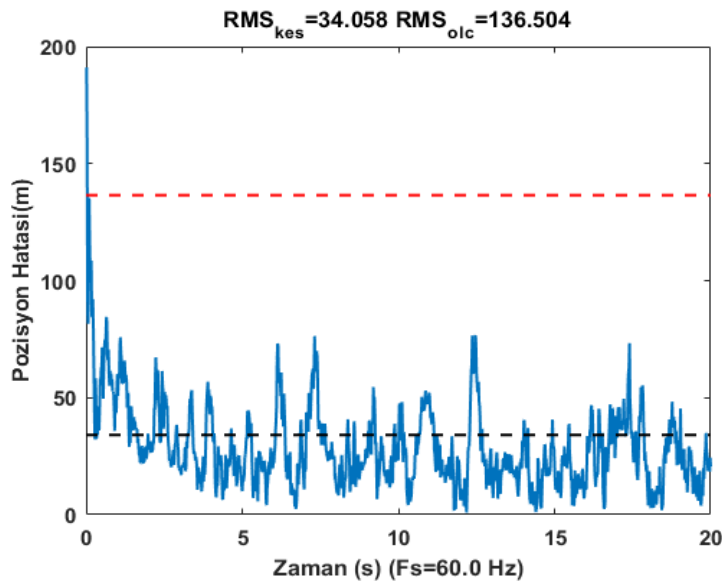
## 3. MANEVRA FREKANSININ ELDE EDİLMESİ

Literatürde manevra frekansını kestirmek için IMM süzgeci içerisinde farklı manevra frekansına sahip sinüzoidal hareket modelleri bulunmaktadır. Bu çalışmalarda manevra frekansları önden tanımlanır ve hedefin manevrası bu modellerden hangisine istatistiksel olarak yakınsa manevra frekansı o modelin frekansı olur.

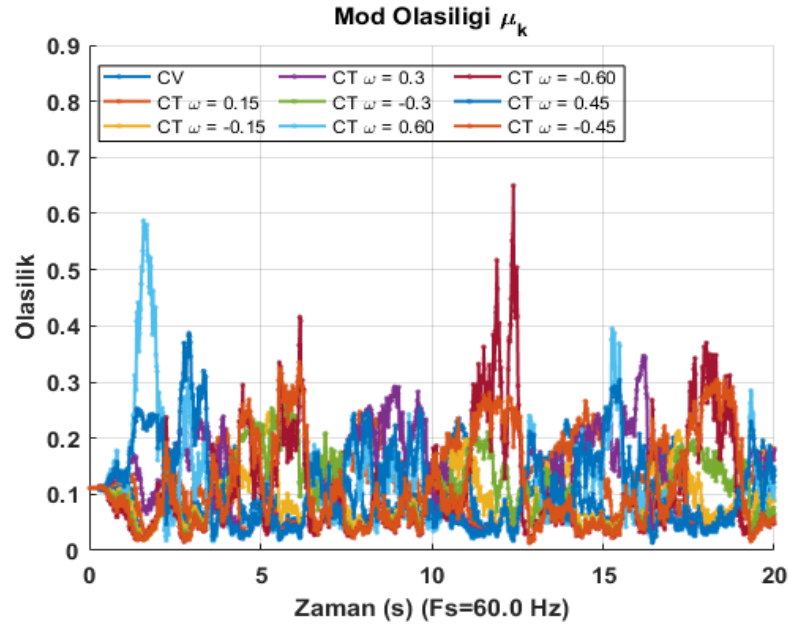
Bu çalışmada ise IMM süzgeci içerisinde kullanılacak olan koordineli dönüş modellerinin açısal hızları pozitif ve negatif olarak seçilerek sinüzoidal hareket eden hedefin pozisyon kestirimi yapılır. Kestirim sonucunda hedef pozitif açısal hıza uygun hareket ettiğinde ilgili modele ait mod olasılığının artması ve diğerlerinin azalması, negatif açısal hıza uygun hareket ettiğın ise negatif açısal hızı ifade eden mod olasılığının artması ve diğerlerinin azalması beklenmektedir. Örneğın hızı 500 m/s olan bir hedefin 1.0 rad/s frekans ve 20g yanal ivme ile manevra yaptığı kabul edilsin. Bu hedefe ait hedef kestirim sonucu ve mod olasılıkları aşağıdaki gibidir. Hedef hareket modellemesi ile ilgili bilgiler benzetim çalışması başlığında detaylı olarak verilecektir.



Şekil 1 Pozisyon kestirimi sonucu

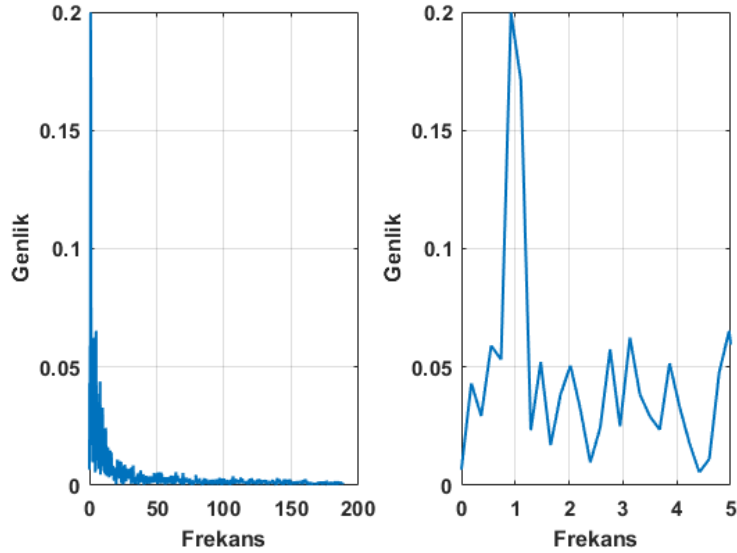


Şekil 2 Pozisyon hatası



Şekil 3 Mod olasılıkları

Şekil 1 ile pozisyon kestirimi sonucu görünmektedir. Şekil 2 ile zaman ekseninde gerçek ile kestirim arasındaki pozisyon hatası sonucu verilmiştir. Bu sonuçlara göre hedefin başarılı bir şekilde takip edildiği görünmektedir. Şekil 3 ile IMM içerisindeki hareket modellerine ait olasılık değerlerinin hedefin manevrasını tanımlayan açısal hız değerlerine uygun olarak değer aldığı görünmektedir. Bu kapsamda mod olasılıkları değerlerinin toplam değişimi kullanılarak hedefin manevra frekansı elde edilebilir.



Şekil 4 FFT sonucu



Her bir zaman adımında her bir modele ait olasılık değerinin açısal hızı ile çarpılarak o zaman adımındaki manevra bilgisi,  $\beta_k$ , aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\beta = \sum \mu \quad (22)$$

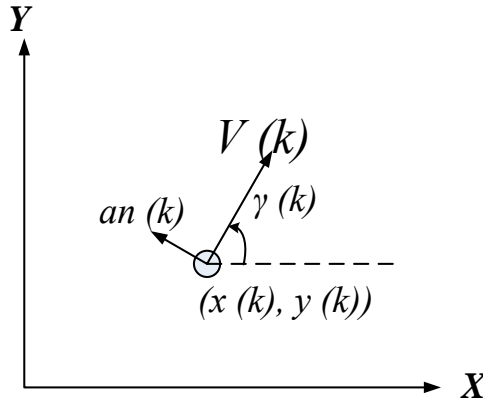
için zamana bağlı manevra bilgisi vektörü şu şekilde ifade edilir.

$$(23)$$

(23) ile ifade edilen zaman eksenindeki manevra bilgisi FFT (Hızlı Fourier dönüşümü) kullanılarak frekans ekseninde ifade edilebilir. Frekans eksenindeki en büyük genliğin olduğu frekans temel frekans olarak adlandırılır. Hedefin manevra frekansı FFT sonucunda elde edilen temel frekansa eşittir. Yukarıdaki örnekte verilen senaryoya ait manevra bilgisinin FFT sonucu Şekil 4 ile gösterilmiştir.

#### 4. BENZETİM ÇALIŞMASI

Hedefin birinci derece manevra modeline sahip olup yuvarlanma kararlılığına sahip olduğu varsayılmıştır. Şekil 5 ile gösterilen iki boyuttaki hareket geometrisinde zaman adımı  $k$  ile belirtilmiştir. Hız, yanal ivme ve yönelim açısı sırasıyla  $V$ ,  $an$  ve  $\gamma$  ile gösterilmiştir.  $x$  ve  $y$  hedefin  $x$  ve  $y$  eksenindeki konumunu belirtmektedir.



Şekil 5 Hedef parametre tanımları

Hedefe ait durum vektörü aşağıdaki (24) ile ifade edilmiştir.

$$(24)$$

Hedefin hızı sabit kabul edildiğinde hareket denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\cos(\gamma) T \quad (25)$$

$$\sin(\gamma) T \quad (26)$$

$$\gamma(k+1) = \gamma(k) + \frac{an(k)}{V} T_s \quad (27)$$

$$an(k+1) = an(k) + \left( \frac{-an(k) + u(k)}{\tau} \right) T_s \quad (28)$$

Burada  $u$  ivme komutunu,  $\tau$  zaman katsayısını,  $T_s$  ise örnekleme zamanını gösterir.

Hedeften alınan ölçüm sadece hedefin x-y düzlemindeki koordinatlardır. Ölçüm her bir eksende 100m standart sapmaya sahiptir. Süzgeçlerde kullanılan hareket modellerine ait süreç gürültüsü standart sapması 50m'dir. Koordineli dönüş modellerinde açısal hız değerleri  $\pm 0.15$  rad/s,  $\pm 0.30$  rad/s,  $\pm 0.45$  rad/s ve  $\pm 0.60$  rad/s olarak alınmıştır. Böylelikle IMM süzgecinin pozitif ve negatif dönüşleri kapsamı sağlanmıştır. IMM süzgecindeki geçiş olasılığı matrisinin çapraz değerleri 0.992, kalan değerler ise 0.002 olarak alınmıştır. Benzetim boyunca her model için örnekleme frekansı 60 Hz'dir.

Hedefin başlangıç pozisyonu 0,0 olarak alınmıştır. Başlangıç yönelim açısı ise 0 derecedir. Hedefin hızı sabit olup 500 m/s'dir. Hedef 20g manevra yapabilmektedir. Hedefin manevra frekansı 0.50, 1, 2, 3, 4rad/s olarak alınmıştır. Her bir manevra değeri için 50 adet benzetim yapılmıştır. Benzetim sonucunda pozisyon kestirim hatası, frekans kestirim hatası ve frekans kestirim süresi bilgileri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

**Tablo 1.** Benzetim çalışması sonucu

Manevra (rad/s)	Pozisyon kestirim hatası (m,rms)	Frekans kestirim hatası (rad/s)	Frekans kestirim süresi (s)
0.5	35.25	0.031	13.07
1	34.28	0.052	6.26
2	34.95	0.102	4.05
3	34.92	0.121	3.11
4	34.82	0.172	2.82

Tablo 1 ile verilen sonuçlarda pozisyon kestirim hatası manevra frekansından bağımsızdır. Frekans kestirim hatası ise manevranın %5'i kadar hatalıdır. Bu oran tüm manevra modelleri için aynıdır. Frekans kestirim süresinin manevra frekansına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Manevra frekansı arttıkça kestirim süresi azalmaktadır. Manevra bilgisi hedefin manevrasına bağlı olarak elde edilmiştir. Bu kapsamda manevra frekansı ne kadar düşükse FFT sonucunun doğru değeri vermesi de o kadar uzun zaman alacaktır. Bu durum 0.5 ve 1 rad/s için Tablo 1'de ortaya çıkmıştır. 1 rad/s ve düşük manevra frekanslarında kestirim süresi [4] ve [5]'te elde edilen sonuçlara göre yüksektir. Ancak manevra frekansının 2, 3 ve 4 rad/s olduğu durumlarda ilgili referanslara göre kestirim süresi oldukça kısadır.

## 5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında sinüzoidal hareket eden hedeflere ait manevra frekansı IMM süzgeci bünyesinde koordineli dönüş modelleri kullanılarak elde edilmiştir. Koordineli dönüş modellerine ait açısal hız değerleri pozitif ve negatif dönüşü benzetecek şekilde seçilmiştir. IMM mod olasılıkları kullanılarak elde edilen manevra bilgisine FFT uygulanarak manevra frekansı elde edilmiştir. Önerilen yöntem özellikle 2 rad/s ve üzeri manevra frekansları için literatürdeki çalışmalar göre daha üstündür. Manevra frekansının yüksek olduğu durumlar için önerilen yöntemin kullanılması fayda sağlayacaktır. Bu çalışmanın 3 boyutlu spiral şeklindeki manevralar için geliştirilmesi planlanmaktadır.

## 6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK Doktora Burs Programı kapsamında desteklenmiştir. Bu vesile ile TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi arz ederiz.

## 7. KAYNAKÇA

- [1] Bar-Shalom, Y. Li, R., ve Kirubarajan, T. (2004), Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software, John Wiley & Sons
- [2] Bar-Shalom, Y, Willett, P. K. ve Tian, X, Tracking and data fusion. YBS publishing, 2011.
- [3] Klein, I, Bar-Shalom, Y. ve Rusnak, I, "Observability analysis for tracking of coordinated turn maneuvers," in *Electrical & Electronics Engineers in Israel (IEEEI), 2014 IEEE 28th Convention of. IEEE*, 2014, s. 1–5.
- [4] Zarchan, P. ve Musoff, H. Progress In Astronautics and Aeronautics: Fundamentals of Kalman Filtering: A Practical Approach, 4th yayın. AIAA, 2015, cilt. 246.
- [5] Zarchan, P. ve Alpert, P. "Using filter banks to improve interceptor performance against weaving targets," in *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2006, s. 21–24.
- [6] Marks, G.M. "Multiple models adaptive estimation (mmae) for improving guidance performance against weaving targets," in *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, 2006, s. 21–24.
- [7] Bar-Shalom, Y., Challa, S., ve Blom. H.A. (2005), IMM Estimator versus Optimal Estimator for Hybrid Systems, *Aerospace and electronic Systems, IEEE Transactions on*, 41(3):986-991
- [8] Li, X.R., ve Jilkon, P. (2003), Survey of maneuvering target tracking, Part I: Dynamic models, *Aerospace and electronic Systems, IEEE Transactions on*, 39(4):1333-1364

## ZAYIAT ESASLARI ÇERÇEVESİNDE İNSAN GÜCÜ PLANLAMASI VE BÜYÜK VERİ: ASKERİ SAĞLIK HİZMETLERİ AÇISINDAN KAVRAMSAL BİR DEĞERLENDİRME

Hüseyin Abuhanoğlu <sup>(a)</sup>, Mevlüt Karadağ <sup>(a)</sup>

(a) Kara Kuvvetleri Komutanlığı, {habuhanoglu, mkaradag75}@gmail.com

### ÖZ

Sağlık sistemindeki yeniden yapılandırma çalışmaları neticesinde askeri ya da askere sağlık hizmeti sunumunun; disiplinler arası bir yaklaşımın yanında kurumlar arası bir işbirliği modeline dönüştüğü görülmektedir. Bu işbirliği kapsamında; personel devri ve zayıat faktörleri dikkate alınarak ulusal sağlık sisteminden talep edilecek askere sağlık hizmeti miktarı ve çeşidi ile harekât kapsamında üretilmesi gereken askeri sağlık hizmetlerinin doğru tahmin edilebilmesi; kaynakların etkin kullanımı ve harekâtın plan başarısı açısından önem kazanmaktadır. Farklı kurum ve kuruluşlar tarafından üretilecek askeri/askere sağlık hizmetleri neticesinde ortaya çıkan büyük veri, insan kaynakları planlamacılarına yol gösterecek önemli enstrümanlardan biri olacaktır. Bu çalışmanın amacı, insan kaynakları planlamacısı açısından personel devri ve zayıat faktörleri çerçevesinde askeri sağlık hizmetleri insan gücü planlamasında büyük verinin kullanımına yönelik kavramsal yönleri ortaya koymaktır. Askeri ve sivil sektör insan kaynakları planlama yaklaşımlarında farklılıklar olduğu, devir hızının bir problem olarak görülmesinden itibaren sivil sektörde iş tatmini, örgütsel bağlılık ve örgütsel adalet kavramlarını temel alan, askeri anlamda ise arazi, hava, güç, taktik gibi temel savaş prensiplerini esas alan personel devir ve/veya zayıat tahmin modelleri üretildiği görülmektedir. Farklı kurum ve kuruluşlarca üretilen askeri/askere sağlık hizmetleri sonucunda ortaya çıkan verilerin toplanması, depolanması, analiz edilip bilgiye dönüştürülerek dağıtılabilmesi ve bu bilgilerin eğitim ve tatbikatlarda kullanılabilmesi amacıyla personel devir/zayıat tahminine yönelik, sürekli olarak güncellenebilen dinamik modelleme ve simülasyonlara ihtiyaç duyulabileceği değerlendirilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Büyük Veri, İnsan Kaynakları, Personel Devri, Sağlık Hizmetleri, Zayıat.

# **HUMAN RESOURCE PLANNING AND BIG DATA WITHIN THE FRAME OF CASUALTY GUIDELINES: A CONCEPTUAL EVALUATION FROM THE POINT OF MILITARY HEALTH SERVICES**

## **ABSTRACT**

As a result of the restructuring efforts in the health system, it is observed that the provision of military or military health service has turned into an inter-institutional cooperation model as well as an interdisciplinary approach. Within the scope of this cooperation; considering the personnel turnover and casualty factors, the amount and type of military health services to be demanded from the national health system and the correct estimation of the military health services to be produced within the context of the operation will gain importance in terms of the effective use of resources and success of the operation plan. The big data which emerge as a result of the military health services to be produced by different institutions and organizations will be one of the most important instruments to guide the human resources planners. The aim of this study is to reveal the conceptual aspects of the use of large data in the planning of manpower in military health services within the frame of personnel turnover and casualty factors for human resources planner. It is seen that there are differences in military and civilian human resources planning approaches and also personnel turnover and / or casualty estimation models based on job satisfaction, organizational commitment and organizational justice concepts in the civil sector and based on the principles of basic warfare such as land, air, power, tactics in the military sense are produced beginning from turnover rate has seen as a problem. In order to collect, store, analyse and distribute the data resulting from the military health services produced by different institutions and organizations, and to use this information in education and training, it is considered that dynamic modeling and simulations that can be continuously updated for personnel turnover / casualty estimation may be needed.

**Keywords:** Big Data, Human Resource, Personnel Turnover, Health Care, Casualties

## **1. GİRİŞ**

Ülke savunmasına yönelik askeri kurumlara verilen görevlerin doğru yetkinlikler ile yerine getirilmesi amacıyla, bu kurumlar bünyesinde diğer sivil sektör organizasyonlarına benzer birtakım hiyerarşik iş pozisyonları tanımlanır. Ancak askeri kurumlar içerisindeki hiyerarşik süreçler diğer organizasyonlara nazaran daha katı (daha bürokratik, standartlaştırılmış, disiplin kurallarının daha fazla olduğu) yapılara sahiptir [1]. Hem bu katı hiyerarşik yapı hem de alınan savunma görevinin kendine özgü doğası,

askeri organizasyonların personel gerekliliklerini ve personele yönelik insan kaynakları yönetim (İKY) uygulamalarını, sivil sektörden veya kamu sektöründeki diğer organizasyonlardan ayıran farklılıklar ortaya çıkarmaktadır. Bununla birlikte sivil sektörde İKY'deki farklılıkları ortaya koyan birçok araştırma olmasına rağmen, askeri alanlara uygulanmasıyla ilgili akademik araştırmaların sınırlı sayıda olduğu görülmektedir [2].

Ramirez'e göre; eğer bir kuruluş, üretimde bir çeşitlenme, artış ya da düşüş öngörüyorsa; insan kaynakları (İK) planlamacıları çalışan portföyündeki olası değişikliklere de cevap verebilmelidir. Üretimdeki bu gelişmelere yönelik İK planlamacılarının sadece toplam personel sayılarında değişiklikler önermeleri yeterli değildir, aynı zamanda personelin iş becerileri ve görev sürelerine yönelik uygun stratejiler belirlemeleri de gerekmektedir [3]. Ayrıca İK planlamacılarının talepte meydana gelebilecek değişikliklere karşı proaktif karar mekanizmaları geliştirmeleri gerekebilir. Çünkü, günümüzde artan küreselleşme, rekabet, teknolojide ortaya çıkan gelişmelere bağlı olarak insan gücü daha da önemli bir konuma gelmiştir. Kurum ve kuruluşlar verimli, başarılı olmak ve yüksek düzeyde fayda sağlayabilmek için insan kaynağını temel unsur olarak görmek zorundadır [4]. Bu durum askeri kurum ve kuruluşlar için de geçerliliğini korumaktadır. Nitekim Ulu Önder Gazi Mustafa Kemal Atatürk'ün "Bir ordunun değeri, subay ve komuta kurulunun değeri ile ölçülür" [5] sözü ile İkinci Dünya Savaşı sırasında ABD ordularının önde gelen komutanlarından biri olan George S. Patton Jr.'nin "Asker ordudur. Hiçbir ordu askerinden daha iyi olamaz" [6] sözü, İKY'nin askeri organizasyonlar için ne denli önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

Özaltın'ın aktardığına göre, insan kaynakları arz ve talebinin planlanması çerçevesinde; çalışanların örgüt amaçlarını benimsemesi, işini isteyerek yapması ve düşük personel devri, kurumsal etkililiğe olumlu bir katkı yapmaktadır [7]. Personel devri literatürde çalışanların çeşitli nedenler ile işten ayrılmaları olarak tanımlanmıştır. Personel devir hızının yüksek olduğu işletmelerde iyi bir personel seçim sisteminin olmadığı, ücret ve terfi ile ilgili eksikliklerin ya da adaletsizliklerin bulunduğu, çalışma koşullarında sıkıntıların yaşandığı görülmektedir [8]. Askeri anlamda personel devri ise literatürdeki tanımlamalara ilave olarak, özellikle muharebe alanında gerçekleşen personel zayıyatı olarak algılanmaktadır. Askeri anlamda personel zayıyatı sivil literatürdeki personel devrine neden olan işten ayrılma nedenlerine ilave olarak; muharebe alanında şehit olanlar, yaralanlar, kaçaklar ve enterne edilen askerleri kapsamaktadır. Personel devrinin, örgütlerin etkililik ve verimliliğindeki öneminden dolayı, yöneticilerin personel devri hakkında bilgi sahibi olmaları ve bu bilgilerden hareketle önlem almaları gerekmektedir [9].

Personel devrini etkileyen faktörlerin değerlendirilmesine yönelik veriler, gerek çalışan, gerek işletme, gerekse işletme dışındaki etmenler tarafından oldukça fazla üretilmektedir. Günümüzde geleneksel veri işleme araçları ile analizi yapılamayan ve yönetilemeyecek kadar büyük miktardaki veri setleri olarak tarif edilen “Büyük Veri” İK planlamacısının yapacağı planlarda ona yol gösteren önemli enstrümanlardan birisi olarak görülmektedir. Birçok otorite tarafından çağımızın petrolü olarak ifade edilen büyük veri sayesinde artık devasa büyüklükteki veriler analiz edilerek insanların, şirketlerin, devletlerin, araştırmacıların hayatlarında değişiklikler meydana getirmektedir. Eldeki verilerle yeni iş sahalarının keşfi, araştırma sonuçlarının daha kısa sürede ortaya çıkması, hastalıkların önlenmesi gibi birçok faydaları ortaya çıkmaya başlamıştır [10].

Muharebe alanlarında sunulan askeri sağlık hizmetleri, askerin sevk edildiği kamu ve özel sağlık teşkillerinde üretilen büyük veriler sayesinde oluşturulacak modellerde simüle edilebilir. Ayrıca sayısallaştırılmış bu büyük verileri sivil-asker işbirliği yoluyla erişilebilir kılmamanın yollarını bulmak, askeri ve sivil toplumların sağlığını ve refahını etkileyen kritik tıbbi ve davranışsal sorunların çözülmesinde yardımcı olabilir [11].

Büyük veriler sayesinde oluşturulan sağlık hizmetlerindeki simülasyonlar, dünya çapında popülerlik kazanmaktadır. Muharebe alanının ileri hatlarında çalışan tıbbi personelin karşılaştığı zorluklar, iş yükü, vaka karmaları ve teknik olmayan konular hakkında çok az şey bilinmektedir. Bunları daha iyi inceleyebilmek için konunun uzmanları ve simülasyon eğitmenleri tarafından güvenli ve kontrollü bir ortamda sağlanan eğitim, belli risklerin önüne geçerken, potansiyel bir öğrenme şansı da sağlayabilir [12].

Yukarıda bahsedilenlere ilave olarak, günümüz askeri sağlık hizmetleri, disiplinler arası bir sunum modeli olmakla birlikte, yapılan reorganizasyon çalışmalarında kurumlar arası işbirliğini de zorunlu hale getirmiştir. Bu zorunluluk göz önüne alındığında, askeri harekâtlar kapsamında, ulusal sağlık sistemlerinden talep edilecek askere sağlık hizmeti miktarı ve çeşidi ile harekât kapsamında üretilmesi gereken askeri sağlık hizmetlerinin doğru tahmin edilebilmesi; kaynakların etkin kullanımı, harekâtın plan başarısı ve askeri sağlık hizmetlerinin geliştirilerek sürdürülebilirliğinin artırılması açısından önem arz etmektedir.

Her ne kadar bir savaşın sonucunu önceden bilmek mümkün olmasa da, savaşın sayısal olmayan, konsepte dayalı ve entellektüel bazı yönleri, zaman içinde tutarlı bir seyir göstermeye ve savaşın nasıl gerçekleşeceğine ve ne gibi sonuçlar doğuracağına ilişkin bize ipuçları vermeye başladığı da göz önünde bulundurulması gereken bir husustur.

Bu çalışmanın amacı; hem ulusal hem de askeri sağlık hizmetleri alanında gerçekleştirilen reorganizasyon çalışmalarında, zayıfların, askeri sağlık hizmetlerine yönelik insan gücü planlamalarındaki etkileri ve bu planlamalarda büyük verinin

kullanılmasının kavramsal yönleriyle ortaya konulmasıdır. Ayrıca müteakip süreçlerde, araştırmacıların zayıat tahminlerine yönelik modelleme ve simülasyon çalışmalarına teşvik edilmeleri amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, askeri anlamda personel zayıatı konusunun sivil sektör uygulamalarından farklı olduğu yönler; İK planlamacıları açısından önemi, büyük verinin süreç üzerinde etkileri ilgili literatür bağlamında incelenmiştir. Çalışmadaki görüşler tamamen yazarların kişisel fikir ve değerlendirmelerini içermekte, çalıştıkları kurum ya da kuruluşlara yönelik herhangi bir sorumluluk doğurmamaktadır.

## 2. İNSAN KAYNAKLARI PLANLAMASININ ÖNEMİ

Küreselleşme ve bilişim teknolojilerindeki hızlı gelişmelerin ortaya çıkarttığı yoğun değişim ve rekabet ortamında işletmelerin gereksinim duydukları nitelik ve yeteneklerin farklılaşması iş yapılarında ve süreçlerinde meydana gelen farklılaşmalar insan kaynakları planlaması (İKP) işlevinin önemini artırmıştır [13]. Bu esas çerçevesinde İKP'nin; iş stratejilerini desteklemesi, genel anlamda İKY'yi desteklemesi ve önceliklerin belirlenmesi gibi faydalarından bahsetmek mümkündür [14]. Ayrıca yönetim ve komuta kademelerine; insan gücü eksik ve fazlalığının belirlenmesi, görev ve rollerin değerlendirilmesi, eğitim gereksinimlerinin saptanması, insan gücü dinamiklerinin (devamsızlık, zayıat vb.) belirlenmesi [15] gibi faydalar sağlar.

Askeri anlamda ise iyi bir İKP, aşağıda sıralanan tehdit ve değişen durumlarda ortaya çıkabilecek olumsuz durumların kötü etkilerini azaltabilecektir.

a. Terör olayları gibi ortaya çıkan tehditler, var olan tehditleri (mevcut düşman hasım ülke problemi gibi) ortadan kaldırmamış, aksine yeni bir tehdit olarak ortaya çıkmıştır.

b. Geçmişte, düşük yoğunluklu çatışmalarda, zayıat ve mülkün imhası küçük çapta olmasına rağmen, bugün küçük, iyi eğitilmiş ve finanse edilmiş, örgütlü bir düzensizlik veya terörist bir grubun olağanüstü yıkıcı saldırıları olabilmektedir.

c. Günümüzde, bir harekâtı ordunun tek başına (sivil-askeri işbirliği olmaksızın) gerçekleştirmesi mümkün görülmemektedir [16].

## 3. SAĞLIK İNSANGÜCÜ KAYNAKLARI PLANLAMASI

Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ)'ne göre sağlık insan gücü planlaması; önceden belirlenmiş sağlık hedef ve amaçlarını başarmak için gerekli tutum, beceri ve bilgiye sahip insan gücü sayısını tahmin etme sürecidir. Bu süreç kimin, hangi toplum grubu için, neyi, nerede, nasıl yapacağını ve önceden belirlenmiş sağlık amaçları için insan gücünün sahip olması gereken beceri ve bilgiyi belirlemeyi içerir [17]. DSÖ aynı zamanda sağlık insan gücü planlamanın kapsayıcı ve çoğulcu bir anlayış ile ele alınması gerektiğini, bunun da farklı sektörlerin iş birliği ile olabileceğine değinmektedir [18].



Sağlık insan gücü planlaması, gelecekte ihtiyaç duyulacak sağlık hizmetlerini tahmin ederek ve mevcut duruma göre oluşabilecek insan kaynağı durumunu analiz ederek yapılır. Bu iki durum, birçok faktörden (sisteme yeni çalışanların girmesi ve işten ayrılmalar, sağlık hizmetlerinin kullanım durumu, demografi, sağlık harcamaları gibi) etkilenir [19].

Ayrıca, İKP, mali anlamda değerlendirildiğinde, sağlık işletmeleri açısından en büyük maliyetlerden biri olarak görülmektedir. Çok fazla sayıda uzmanlık alanının yer aldığı ve uzmanlık alanlarından kaynaklı, özellikle hekimler bazında bağımsız çalışma anlayışının varlığı, sağlık kurumlarında insan kaynakları anlayışını farklılaştırmak durumundadır. Sağlık hizmetleri sunum şekli, diğer sektörlere nazaran daha fazla işbölümü ve karşılıklı bağımlılık anlayışı ile karakterizedir. Matriks yapı olarak adlandırılan bu sistemde klasik hiyerarşik yapılar, yerini çoğu zaman işlevsel ve proje yönetimine dayalı yapılara bırakmakta, kimi zaman ikili otorite anlayışı mevcutken, kimi zaman da otokratik yönetim tarzları vuku bulabilmektedir [15].

#### **4. İNSAN KAYNAKLARI PLANLAMASINDA ZAYİAT**

Çalışanların bir işletmede istihdam edildikten sonra herhangi bir nedenle ayrılmaları ya da işten uzaklaştırılmalarını ifade eden işgücü devri, gelişmiş ülkelerde işletme yönetimlerinin en önde gelen sorunlarından biri olarak görülmektedir. İnsan gücündeki sürekli değişimler, işletmede verimlilik ve etkinlik açısından kayıplara neden olmaktadır. Yetişmiş elemanını kaybeden işletme, kurum kültürünü oluşturmakta zorlanmakta, kurulu sistemlerini işletmemekte ve böylece de işletmede süreklilik sağlanamamaktadır [20].

Sivil sektör açısından tanımlanan ve birçoğunun askeri insan gücü zayıyatında da geçerli olduğu değerlendirilen devir hızını etkileyen faktörleri üç grupta toplayabiliriz.

- a. İş görene bağlı faktörler: yaş, cinsiyet, hizmet süresi, yapılan işten duyulan doyum, aile içi nedenler, öğrenim ve eğitim durumu, sağlık durumu gibi.
- b. İşletmeye bağlı faktörler: yetersiz ücretlendirme ve terfi, iş ve çalışma koşulları, personel yönetiminin kötü olması, yönetici ile fikir uyuşmazlığı, sorumlulukların net bir şekilde belirlenmeyişi, bilgi ve haberleşme eksikliği, kaza gibi.
- c. İşletme dışı faktörler: ülke ekonomisi, otomasyon ve makineleşme nedeniyle işlere uyum sağlayamama, başka iş olanaklarının çekici olması gibi [20].

Askeri anlamda devir hızının ve zayıyatın en yüksek olduğu ve olmasının beklendiği noktalar ise muharebe zamanlarıdır. Muharebelerde dost ve düşman birliklerinin durumu değişebileceği için zayıyatların/personel devrinin günlük olarak hesaplanması önem arz etmektedir. Bu aşamada, muharebe zayıyatlarının tahminlenmesine yönelik farklı modifikasyonların devreye girmesi gerekebilir. Emekli bir albay olan Trevor N. Dupuy tarafından farklı faktörler bu tahminlerin geliştirilmesinde ortaya atılmıştır. Bu faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir [21].

- a. Risk altındaki nüfus: birliğin mevcut personel sayısı,
- b. Arazi faktörü: görev yapılan arazi şartları (dağlık, düz, kayalık gibi),
- c. Hava faktörü: görev sırasındaki hava şartları (güneşli, yağmurlu, kuru, karlı gibi)
- d. Durum faktörü: birliğin personel ve teçizat yönünden nicelik ve niteliği,
- e. Rekabet faktörü: birliğin muharebe etkinliği,
- f. Süpriz faktörü: birliğin düşman ve çevresel tehditlere yönelik hazırlıklı oluşu,
- g. Harekâtın çeşidi: savunma, taarruz, hava harekatı gibi.

Sivil sektör ve askeri anlamda sağlık sisteminin zayıf/personel devir kapasitesinin belirlenmesi, tüm etkileşimli değişkenlerin karmaşık bir hesaplamasıdır. Askeri personel; önleme, tespit ve koruma yoluyla aldığı görevlerde çeşitli sağlık tehditlerine maruz kalmaktadır. Son on yılda, sağlık hizmetlerinde ve sağlık tehditlerine karşı korunma ve korumadaki gelişmeler, hastalık ve savaş dışı yaralanma oranlarını önemli ölçüde azaltmıştır. Ancak, bir muharebe için hazırlanırken, yalnızca dost kuvvetlerin zayıf tahminlerine göre değil, tıbbi kapasiteye odaklanmak önemlidir. Kuvvetlerin zayıf tahminlerine odaklanırken, boşta kalabilecek tıbbi kapasite ile tıbbi kapasite fazlalığını karıştırmamak gereklidir [22].

## **5. ASKERİ VE SİVİL İNSAN KAYNAKLARI PLANLAMASI ARASINDAKİ FARKLILIKLAR**

Sivil sektör organizasyonları pazar konumunun korunması, yeni bir teknoloji sunabilmek, organizasyonel bilgi geliştirebilmek, müşteri hizmetleri ve ürün kalitesini artırabilmek gibi nedenlerle “insan gücü”nü daha da dikkate almaya başladılar[23].

Askeri ve sivil sektör kuruluşları arasında birçok benzerlik olsa da, İKY işlevlerinin yerine getirilmesiyle ilgili bazı önemli farklılıklar da vardır. Askeri İKY ile sivil sektör İKY’si arasındaki en önemli fark, bazı kamu kuruluşları gibi özellikle askeri kuruluşların yalnızca giriş düzeyinde işe alım yapması ve ardından kendi organizasyonları içerisinde yukarı doğru bir hareketlilik olmasıdır. Bu durum uzun vadeli etkilere neden olmaktadır. Bu etkinin nedeni; asker alımından sonra, çalışanın içerden terfi etmesi ve yalnızca rütbe ile sınırlanması, terfilerin hizmet süreleri, önceki görevler ve deneyim ile ilgili olmasıdır.

Bir diğer farklılık ise askeri organizasyonların diğer organizasyonlardan daha net ve daha kararlı iş tanımlarına sahip olmasıdır [23]. Bu durum askeri İKP açısından esnekliği azaltabilmektedir.

Sivil sektörde insan kaynaklarına yönelik sahip olduğu iş kolu için çeşitli stratejiler belirlenmektedir. Askeri insan kaynaklarının planlamasında sivil sektörde belirlenen kriterlere ilave olarak, savaş prensipleri de göz önünde bulundurulur. Söz konusu savaş

prensipleri bir savaş dehası olan Sun Tzu tarafından kaleme alınmış ve bugün dahi genel anlamda büyük oranda geçerliliğini koruyan; plan yapma, savaşı sürdürme, savaşta strateji, taktik, enerji, gücün kullanımı, manevra, taktik değiştirme, ordunun ilerlemesi, arazi faktörü, arazi de dokuz konum, ateşle saldırı, casusluk ve istihbarat kriterleridir [24].

Sun Tzu'nun bu prensipleri günümüz şartlarına uyarlanıp Van Avery tarafından güncelleştirilerek; amaç, hız, savaş alanı, etki ekonomisi, yaygın farkındalık, sürekli planlama, esneklik, sürdürülebilirlik, komuta etkinliği, güvenlik, paydaşlarla entegrasyon, sürpriz faktörü, geri bildirim ve değerlendirme şeklinde aktarılmıştır [16].

Kurum ve kuruluşlar günümüzün gittikçe artan karmaşık ve hızla değişen ortamında rekabet edebilmek için, personeli elinde tutmak ve çalışanların refahını desteklemek zorundadır [25]. Bu anlamda kurumsal İKY ve askeri İKY tamamen zıt değil, birbirini etkileyen sürekli bir faaliyet olarak algılanmalıdır. Askerlik teşkilatının bir şirkete giderek daha fazla benzediği söylenebilir. Gönüllü olarak işe başvuran kişiler, personel motivasyonuna yönelik çoğunlukla sivil sektör şirket dünyasında kullanılan alternatif İKY uygulamaları; ödüller, esneklik ve organizasyon kültürü açısından gelişmelere yol açacaktır. Bu durum, çoğunlukla komuta ilişkilerinin zayıflaması ve ordunun kültürüne özgü toplumsal değerlerin zayıflaması gibi etkiler de yaratabilecektir [26].

## **6. SAĞLIK İNSANGÜCÜ PLANLAMASINA YÖNELİK TAHMİNLEME YAKLAŞIMLARI**

Sağlık insan gücü ihtiyaçlarının planlanmasına yönelik birçok tahminleme yöntemi kullanılmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanlar arasında işgücü-nüfus oranı yöntemi, hedef sağlık hizmeti tabanlı yöntem, kullanıma dayalı sağlık hizmet ihtiyacı yöntemi ve iş yükü analizi yöntemidir [15].

Bu yöntemleri kullanan insan gücü planlamacıları, kuruluşun ilerleyen yıllardaki talebini karşılamak için, yetkinlik mantığı ve yasal mantık olmak üzere iki insan gücü planlama yaklaşımından yararlanmaktadır. Yetkinlik mantığı, operasyonel hedeflere ve en uygun yetkin insan gücüne ulaşmak için her iş pozisyonunda gerekli özelliklere sahip personel görevlendirilmesi ile ilgilidir. İstenilen personel farklı iş pozisyonlarında gruplandırılır. Bu genellikle kısa süre alır. Öte yandan, yasal mantık, personelin miktarını belirleyen kadro dağılımının, genellikle uzun vadeli olarak farklı seviyelerde stratejik evrimini tahmin etmek için kullanılır [1].

Bu yaklaşımlar çerçevesinde, ihtiyaç duyulacak insan gücü talebi, genel itibari ile iki grup tahminleme aracı kullanılarak belirlenir. Bunlardan ilki sezgisel araçlardır. Bu araç

gruplarında, yönetici ve uzman durumunda bulunan kişilerin örgüt planlarına, geçmiş deneyimlerine ve sezgilerine dayanarak işgücü talebi konusunda tahminde bulunmayı öngörür. Bu araçlar kullanıldığında, gelecekteki değişiklikler ile geçmiş deneyimler arasında bir benzerlik söz konusu değilse yetersiz kalabilir ve doğru tahminde bulunma olasılığı; subjektif olması nedeniyle azalır. Bu grupta tabandan tavana öngörümleme, nominal grup tekniği, Delphi tekniği gibi tahmin araçları kullanılabilir. İkinci grup ise matematiksel araçları içerir. Matematiksel araçlar geçmişe ait bilgilerin geleceğe yansıtılmasını sağlar. Bu grupta trend analizleri, regrasyon analizi, doğrusal programlama gibi tahmin araçları kullanılabilir [27].

Sivil sektörde personel devir hızı; iş tatmini, örgütsel bağlılık ve örgütsel adalet kavramlarını temel alan ve literatürde sıkça rastlanan işgücü devir modellerinden yararlanılarak belirlenir. Bu modellerden bazıları; March ve Simon Modeli, Mobley Modeli, Price Modeli, Steers ve Mowday Modeli, Rusbult ve Farrell Modeli, Hom ve Griffeth Modeli, Allen, Shore ve Griffeth Modeli, Peterson Modeli olarak sayılabilir [4].

Askeri insan gücü zayıflarının tahmininde ise iki temel yöntemin kullanılmasına yönelik yaklaşımlar bulunmaktadır. İlk yaklaşım; geçmiş insan gücü tarihini inceleyip, tarihsel veriler kullanarak, askeri insan gücü stratejilerinin en iyi şekilde belirleneceği inancına dayanmaktadır. Bu inanç çerçevesinde Amerika Birleşik Devletlerinin kuruluşundan bu yana üç temel bakış açısı görülmektedir. Birincisi; 1789'dan 1929'a kadar kısa vadeli ulusal acil durumların bir fonksiyonu olarak silahlı kuvvetler büyüklüğü, ikincisi; 1930'dan 1980'e kadar siyasi krizler ve genel ekonomik planlamanın bir işlevi olarak silahlı kuvvetler büyüklüğü, üçüncüsü; 1981'den başlayarak günümüze uzanan insan gücü gereksinimlerinin belirlendiği, teknolojik eşdeğerlikler ve kamu/özel sektör karmalarını içeren silahlı kuvvetler büyüklüğüdür [28]. Askeri insan gücü zayıflarının tahminine yönelik ikinci yaklaşım ise bu tür senaryolarda, matematiksel modellerin kullanılması, iş özelliklerine göre personel önerileri veya teşvik yöntemleri geliştirilmesi gibi insan gücü planlama uygulamalarıdır [3].

Literatür incelendiğinde, askeri anlamda zayıfların tahminlenmesinde kullanılan bazı yabancı model ve simülasyonlar; FM 101-10-1/2 Staff Officer's Field Manual-Organizational Technical, and Logical Data Planning Factors (Volume 2), ST 4-2 (ST 101-6) Theater Sustainment Battle Book, Medical Course of Action Tool (M-COAT), Benchmark Rate Structure (BRS), Combat Sample Generator Model (COSAGE) olarak gösterilebilir [21,22,29,30,31,32].

## **7. BÜYÜK VERİ VE İNSAN KAYNAKLARI PLANLAMASI**

Bilgi ve iletişim teknolojilerine bağlı olarak üretilen, depolanan ve işlenen veri miktarı her geçen gün artmaktadır. Bu artış neticesinde toplanan devasa büyüklükteki veriler "büyük veri" kavramını ortaya çıkarmıştır. Kısaca büyük veri teknolojisi, karar vermeyi

desteklemek için bilgiyi büyük miktarda veriden ortaya çıkaran bir bilgi teknolojisi [33]. Yapılan araştırmalar neticesinde veriye dayalı olarak karar veren şirketlerin kârlarını %5 - %6 civarında artırdıkları görülmektedir. Büyük veri şirketlerin üretimlerinde artış sağlarken, devletlere de kamu yönetimini geliştirme ve dünya çapındaki organizasyonların bilgilerinin analiz edilerek stratejik planlama yapmalarına olanak sağlamaktadır. Temelde büyük veride yapılanı ‘veriyi bilgiye dönüştürmek’ şeklinde tanımlayabiliriz [10].

Büyük veri insan kaynakları açısından değerlendirildiğinde; yetenekli personelin seçilmesinde, yetenek eğitimlerinin geliştirilmesinde, yeteneklerin değerlendirilmesinde, performansa dayalı ödüllendirmelerde ve çalışanın kariyer geliştirilmesine yönelik planlamaların zamanında ve eksiksiz yapılmasında kullanılmaktadır [34].

Sağlık alanında da bir hekimin muayenehanesinden, çoklu hizmet veren poliklinikler, sağlık merkezleri ve büyük hastane ağlarına kadar değişen ölçeklerdeki kurum ve kuruluşlarda önemli miktarlarda veri üretilmektedir. Sağlıkta büyük veriler, sağlık ve sağlık sistemi performansını artırmak amacıyla elektronik olarak üretilen ve saklanan, rutin veya otomatik olarak toplanan veri kümelerini ifade eder [35]. Sağlık sisteminde biriken bu inanılmaz ölçekteki veriyi işlemek için tahmine dayalı analizler, karar destek uygulamaları, veri madenciliği, algılayıcılardan gelen verilerin toplanması gibi birçok farklı teknolojinin bir arada çalışmasına ihtiyaç olabilir [10]. Çünkü büyük veri oldukça yüksek hacimli, çeşitli, süratli ve düşük yoğunluklu olarak karşımıza çıkmaktadır [34]. Bununla birlikte, bu zengin veri setinin çoğu şu anda etkinliğini artırmak için merkezi bir varlık yerine, sağlık hizmetinin bir yan ürünü olarak algılanmaktadır [36].

Sağlık hizmetlerinde büyük verinin; klinik uygulamalar ve araştırmalarda, hastalık sürveyansı ve toplum sağlığı yönetiminde, tıp eğitimi ve öğretiminde, kurumsal öğrenmede, yönetim ve komuta kademelerinde ve genomik ve biyoinformatikte kullanıldığı görülmektedir [35].

Askeri alanda da büyük veri uygulamaları oldukça ilgi görmektedir. Amerika Birleşik Devletleri savunma yeteneklerini geliştirmek için bir dizi büyük veri programı (örneğin, XDATA) yürütmektedir. Genel olarak, askeri uygulamalarda; istihbarat, gözetleme ve keşif sensörleriyle büyük miktarda veri üretilmektedir. Gerçek alanda üretilen bu verilere sanal anlamda simülatörler ile üretilen veriler de ilave edilmektedir. Bu verilerden, silah sistemleri kazanımı, savaş analizi ve askeri eğitim gibi karmaşık sorunları incelemek amacıyla yararlanılmaktadır [33].

Askeri sağlık hizmetlerinde de özellikle Rol-1 seviyesindeki (muharebe sahası birinci basamak sağlık hizmeti) sağlık tesislerindeki doktorların karşılaştıkları zorluklar, iş yükü, vaka karmaları ve teknik olmayan konuların belirlenmesine yönelik bir simülasyon modeli üzerinde çalışıldığı raporlanmaktadır [12].

Günümüzde askeri ve/veya askere sağlık hizmetlerinin kurumlar arası işbirliği modelleriyle yürütülmesi gerekliliği nedeniyle çok çeşitli kurum ve kuruluşlarca veri üretimi yapılmaktadır. Bu çeşitlilik veri tabanlarına da yansımakta, üretilen verilerin bir araya getirilmesini zorlaştırabilmektedir.

## 8. SONUÇ

Askeri/askere sağlık hizmetleri, sivil sektör sağlık sistemine entegre bir şekilde sürdürülmesi nedeniyle, personel devir hızlarından da sivil sektör gibi etkilenecektir. Ancak bu etki, muharebe zamanlarında çok daha fazla hissedilebilir. Zira savaş prensiplerinin hakim olduğu muharebe alanlarında sağlık hizmetlerinin “zaman” ve “beklenmezlik” ilkeleri, personel devir hızı, zayıyat tahmini ve bunlara bağlı sağlık insan gücü tahminlerini daha da önemli kılacaktır.

Askeri sağlık sistemlerinde personel devir hızları ya da zayıyat tahminlerine bağlı iş gücü planlamalarında; sivil sektörde yoğun olarak kullanılan iş tatmini, örgütsel bağlılık ve örgütsel adalet kavramlarını temel alan, askeri anlamda ise arazi, hava, güç, taktik gibi savaş prensiplerini temel alan modeller oluşturulabilir. Bu modellerin gelişen şartlara anında uyum sağlayabilmesi amacıyla dinamik bir şekilde inşa edilmesi verimliliği artırabilir. Örneğin, model içerisinde Kimyasal Biyolojik Radyolojik ve Nükleer (KBRN) tehditinin olması, sivil sektörden görevlendirilen sağlık personelinin askeri nosyon eğitimlerinin olması, askeri birliklerin sivil sektör sağlık tesislerine uzaklıkları, sivil sektör sağlık lojistiği gibi değişkenlerin ilave edilmesi plan başarılarını artırabilecektir.

Oluşturulan modeller çerçevesinde, özellikle Rol-1 seviyesinde askeri sağlık hizmeti sunacak personelin muharebe alanına gitmeden eğitilmeleri, sivil sektör ile entegre bir şekilde verilmesi planlanan Rol-2 (muharebe sahaalarındaki seyyar sağlık teşkilleri verilen sağlık hizmet desteği), Rol-3 ve Rol-4 (ikinci ve üçüncü basamak sağlık hizmet desteği) seviyesinde askere sağlık hizmeti sunacak kurum ve kuruluşların etkin planlama yapabilmeleri, her türlü ve boyuttaki harekâttan, askeri sağlık hizmetlerine yönelik alınan derslerin anında işlenerek büyük verinin oluşturulması ve analiz edilerek bilgiye dönüştürülmesini ve tek elden kontrolünü sağlayabilecek mevcut model ve bu modellere ilişkin simülasyonların geliştirilmesi ya da yeniden oluşturulmasının faydalı olabileceği değerlendirilmektedir.

Ayrıca söz konusu modellerin muharebede sağlık insan gücü planlaması yanında sağlık lojistiğinin de planlamasına önemli katkılar sağlayacağı kıymetlendirilmektedir.

## 9. KAYNAKLAR

- [1] Abdessameud Q.M. , Utterbeeck F.V., Kerckhoven J.V., Guerry M.A, (2018) “Military Manpower Planning Towards Simultaneous Optimization Of Statutory And Competence Logics Using Population Based Approaches” In Proceedings of the 7th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems (ICORES 2018).
- [2] Sofar P., (2016) “Human Resource Management in the Armed Force Transition of a Soldier to a Second Career”. Institute for Defence Studies on Analyses.
- [3] Ramirez J.A., (2015), “Essays on Military and Civilian Manpower Planning”, University of Colorado, Boulder CU Scholar yayımlanmamış doktora tezi.
- [4] Demirkıran, M., Erdem, R., (2014), “Personel Devrinin Nedenlerine İlişkin Geliştirilen Modellerin İncelenmesi” Süleyman Demirel Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, C.19, Sayı 3.
- [5] İnternet Erişimi (15.07.2019), <http://www.atam.gov.tr/duyurular/milli-savunma-ve-askerlik-sanati>
- [6] İnternet Erişimi (05.05.2019), <https://www.goodreads.com/quotes/143214-the-soldier-is-the-army-no-army-is-better-than>.
- [7] Özaltın, H., Kaya,S., Demir, C., Özer, M.,(2002), “Türk Silahlı Kuvvetlerinde Görev Yapan Muvazzaf Tabiplerin İş Doyum Düzeylerinin Değerlendirilmesi”, Gülhane Tıp Dergisi, 44 (4).
- [8] Eren, E., (2010), “Örgütsel Davranış ve Yönetim Psikolojisi”, İstanbul, Beta Basım Yayım Dağıtım.
- [9] Erigüç, G.,(1999), “Ankara Metropolitan Alanda Sağlık Bakanlığı Hastanelerinde Personel Devir Oranları ve Personelin İşten Ayrılma Nedenleri”, Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi Cilt:4.
- [10] Doğan, M., (2014), “Büyük Veri'nin Kişiler ve Kurumlar Üzerindeki Etkileri” İstanbul Bilgi Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Bilişim ve Teknoloji Hukuku Yüksek Lisans Programı, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.
- [11] Vie L.L., Scheier M.L., Lester P.B., Ho T.E, Labarthe D.R., Seligman M.E.P., (2015), “The U.S. Army Person-Event Data Environment: A military-Civilian Big Data Enterprise” Big Data, Volume 3, Number 00.
- [12] Mercer, J.,S., Howel, M., Simpson, R., (2010) “Simulation Training For The Frontline-Realistic Preparation For Role 1 Doctors” Journal of the Royal Army Medical Corps. 156(2).
- [13] Arslan, M.L., (2012), “İnsan Kaynakları Gereksinimine Sürek Yaklaşımı; Stratejik İnsan Kaynakları Planlaması”, Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Öneri Dergisi, Cilt 10.
- [14] Esen, Ş., Adatepe, E., “İnsan Kaynakları Planlama Araç ve Yöntemleri: Sakarya Otomotiv Yan Sanayi Firmaları Üzerine Bir Araştırma”, Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi, Cilt 10, Sayı 53.
- [15] Cavmak, D., (2017), “Sağlık Hizmetlerinde İnsan Kaynakları Planlaması: Türkiye Değerlendirmesi” Sağlık Yönetimi Dergisi, Cilt 1, Sayı 2.

- [16] Van Every, C., E., (2007), “12 New principles of Warfare” Armed Forces Journal, <http://armedforcesjournal.com/12-new-principles-of-warfare/>(Erişim Tarihi:07.05.2019).
- [17] Şantaş, F., Özer, Ö., Çıraklı, Ü. (2012) “Türk Kalkınma Planlarında Sağlık İnsan Gücü Planlaması. Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, Cilt 2, Sayı 2
- [18] WHO (2010) Models and Tools for Health Workforce Planning and Projections. Human Resources for Health Observer, Issue No 3
- [19] OECD (2013) Directorate for Employment, Labour and Social Affairs Health Committee. OECD Health Working Paper No 62.
- [20] Özer, E., (2007), “Akreditasyon Belgesine Sahip Özel Hastanelerdeki Yönetici Hemşirelerin Liderlik Tarzlarının, Hemşirelerin İşten Ayrılma nedenleri Üzerine Etkileri” Marmara Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.
- [21] İnternet Erişimi (18.05.2019), “Medical Course Of Action Tool Basics Of Using M-Coat.” <https://dokumen.tips/documents/medical-course-of-action-tool-basics-of-using-m-coat.html>
- [22] İnternet Erişimi (18.05.2019), Nolan D.L., “Sustainment Command and Casualty Capacity”, [https://alu.army.mil/alog/issues/janfeb05/c\\_casualty.html](https://alu.army.mil/alog/issues/janfeb05/c_casualty.html)
- [23] İnternet Erişimi (06.05.2019), Research And Technology Organisation, Technical Report - NATO Human Resources (Manpower) Management, February 2012, <http://www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=ADA560294>
- [24] Ayteş, T.,(2015), “Sun Tzu Savaş Sanatı”, Sis Yayıncılık.
- [25] Dupré K. E., Day A L. L., (2007) “The effects of supportive management and job quality on the turnover intentions and health of military personnel” Human Resource Management, Volume 46, Issue 2.
- [26] Patrichi M.E.,(2015), “General Military Human Resource Management And Special Forces Human Resource Management. A Comparative Outlook”, Journal of Defense Resources Management, Vol.6, Issue 2.
- [27] Bingöl D., (2013) “İnsan Kaynakları Yönetimi” 8. Baskı, Beta Basım.
- [28] Horowitz I.L., (1986), “Human Resources and Military Manpower Requirements” Armed Force and Society, Volume: 12 issue: 2.
- [29] İnternet Erişimi (18.05.2019), “FM 101-10-1/2 Staff Officer’s Field Manual-Organizational Technical, and Logical Data Planning Factors”, <https://archive.org/details/FM101-10-12>
- [30] İnternet Erişimi (18.05.2019), “ST 4-2 (ST 101-6) Theater Sustainment Battle Book U.S. ARMY Command And General Staff Collegefort Leavenworth, Kansas 2012” <https://tr.scribd.com/document/179104048/Theater-Sustainment-pdf>
- [31] İnternet Erişimi (18.05.2019), FM 1-0 (FM 12-6) Human Resources Support, Headquarters, Department of the Army, Washington DC 2007 <https://tr.scribd.com/document/146238532/fm-1-1-Human-Resources-Support-pdf>



- [32] İnternet Erişimi (18.05.2019), “Combat Sample Generator Model (COSAGE)” [http://www.simsript.com/solutions/military/Combat\\_Sample\\_Generator.html](http://www.simsript.com/solutions/military/Combat_Sample_Generator.html)
- [33] Song X., Wu Y., Ma Y., Cui Y., Gong G., (2015) “Military Simulation Big Data: Background, State of the Art, and Challenges” Mathematical Problems in Engineering.
- [34] Zang S., Ye M., (2015) Human Resource Management in the Era of Big Data Journal of Human Resource and Sustainability Studies.
- [35] Altındış S., Kıran Morkoç İ., (2018) “Sağlık Hizmetlerinde Büyük Veri” Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi Cilt-Sayı: 11(2).
- [36] Murdoch T.B., Detsky A.S., (2013) “The Inevitable Application of Big Data to Health Care”, JAMA, April 3, 2013—Vol 309, No. 13

# ELEKTRON HIZLANDIRICILAR İÇİN PARAMETRİK DÖRT KUTUPLU ELEKTROMANYETİK LENS MODELİ VE MANYETİK ALAN DAĞILIMI SİMÜLASYONU

Emre Durna <sup>(a)</sup>, Mustafa Gökhan Şanal <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> ASELSAN SST,  
{edurna, mgsanal}@aselsan.com.tr

## ÖZ

Elektron hızlandırıcılarda hızlandırılan elektronların istenilen doğrultuda yönlendirilmesi, odaklanması ve şekillendirilmesi önemlidir. Dört kutuplu elektromanyetik lensler hızlandırıcılarda elektronların odaklanması için yaygın olarak kullanılan bir lens çeşididir. Bu bildiride dört kutuplu elektromanyetik lenslerin tasarımını optimize etmek için önerilen parametrik bir model anlatılmıştır. Lensin kritik boyutlarının parametrik olarak modellenmesiyle her bir boyutun lensin performansına olan etkisi değerlendirilebilecek ve tasarım optimize edilebilecektir. Önerilen model ile parametrik lens boyutlarında kolaylıkla tarama yapılabilecek ve boyutların tasarıma olan etkisi gözlemlenebilecektir. Bunun yanında, parametrik lens modeli ile tasarım esnasında yapılması gereken ufak boyutsal değişiklikler için külfetli işlemler yapılmasının önüne geçilecektir. Bildiride modellenen dört kutuplu elektromanyetik lens için manyetik alan dağılımı simülasyonları yapılmış ve sonuçlar gösterilmiştir. Lensin kutbunun fiziksel şeklinin doğrusal manyetik alan dağılımına olan etkisi teorik olarak gösterilmiş ve bulgular simülasyonlarla desteklenmiştir. Son olarak, önerilen parametrik model ile örnek bir elektron demetinin etkileşimi CST çoklu fizik simülasyon programı kullanılarak gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çoklu Fizik Analizi, Dört Kutuplu Lens, Elektromanyetik Lens, Elektron Hızlandırıcılar, Parametrik Model

# PARAMETRIC QUADRUPOLE ELECTROMAGNETIC LENS MODEL AND MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION SIMULATION FOR ELECTRON ACCELERATORS

## ABSTRACT

Bending, shaping and focusing of electrons in an electron accelerator system are vital. Electromagnetic quadrupole lenses are one of the widely used devices for focusing the electron beams. In this paper, a parametric quadrupole model is proposed to optimize the design of electromagnetic quadrupole lenses. By the parametric modeling approach, it is made possible to evaluate effects of each geometric shape on lens performance and optimize the design. The parametric variables can be easily swept between defined values and their effect on the design can be easily revealed. Moreover, the parametric modeling approach prevents the designer from the excessive drawing burden in case of small shape modifications. The magnetic field simulations of the proposed model are conducted and the results are presented in this paper. Effect of the geometric shape of lens pole on the linear magnetic field distribution is theoretically derived and the findings are verified by simulations. Finally, an interaction between a sample electron beam and designed electromagnetic quadrupole lens model is shown by using CST multi physics simulation tool.

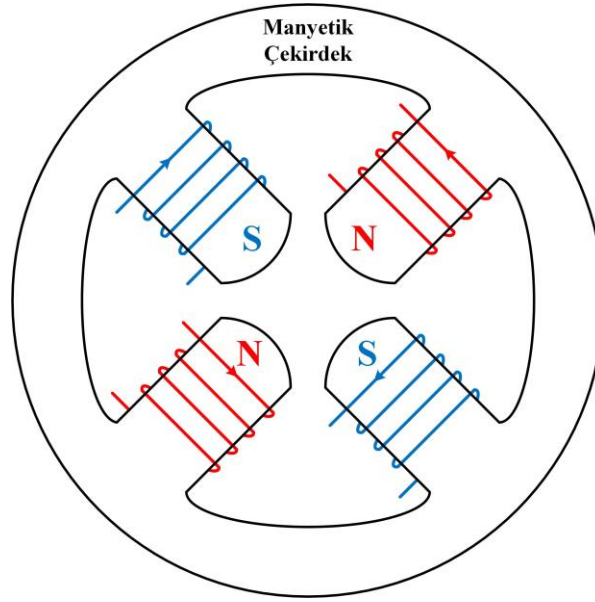
**Keywords:** Electromagnetic Lens, Electron Accelerator, Multi Physics Simulation, Parametric Model, Quadrupole.

## 1. GİRİŞ

Dört kutuplu elektromanyetik lensler, birden fazlası bir araya gelerek, parçacık hızlandırıcılarda demeti odaklamak [1] veya demet dinamiğindeki şekilsel bozulmaları gidermek amacıyla [2], [3] kullanılmaktadır. Kullanılacağı sistemin özelliklerine bağlı olarak dört kutuplu elektromanyetik lenslerin kutup geometrileri, kutup ve manyetik çekirdek boyutları değişebilmektedir. Bu bildiride, elektron demetlerinin şekillendirilmesi amacıyla kullanılacak olan farklı dört kutuplu elektromanyetik lens tasarımlarının kolayca modellenebilmesi ve optimize edilebilmesi için parametrize edilmiş bir model önerilmiştir. Bildirinin devamında dört kutuplu elektromanyetik lens yapısı, teorik manyetik alan dağılımı hesapları, simülasyon modeli ve modelin örnek bir elektron demetiyle olan etkileşimi anlatılmıştır.

## 2. DÖRT KUTUPLU ELEKTROMANYETİK LENS YAPISI

Dört kutuplu elektromanyetik lens, birbirinden eşit açısal uzaklıkta (90°) konumlanmış kolları olan manyetik çekirdek üzerine bobin sarılması ile elde edilir, örnek bir görsel Şekil 1’de verilmiştir. Kutupların doğru oryantasyonda olması için karşılıklı duran çekirdek kolları lensin merkezine doğru veya merkezinden dışarı yöne doğru manyetik alan oluşturacaktır, bu şekilde sırasıyla kuzey (N) ve güney (S) kutupları ortaya çıkacaktır.



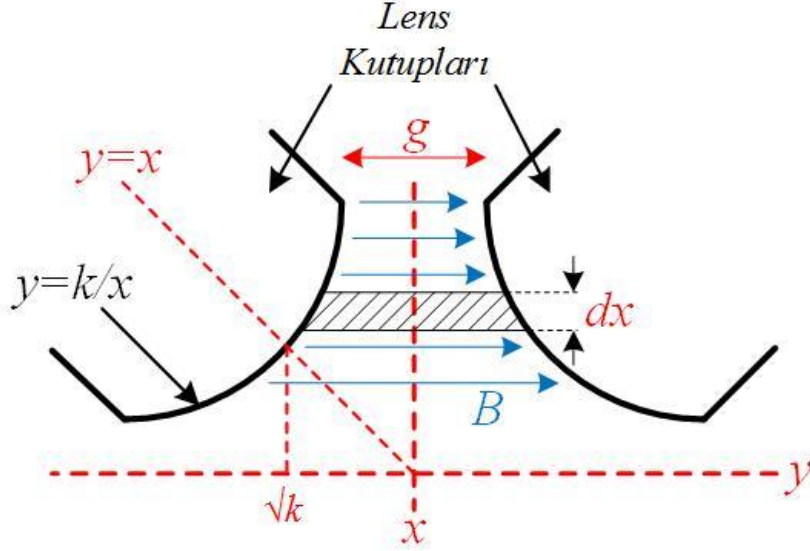
Şekil 1 Dört kutuplu elektromanyetik lens yapısı

### 2.1. Teorik Manyetik Alan Dağılımı Hesaplaması

Bu bildiriye konu olan elektromanyetik lensin demet yolu açıklığında oluşturacağı manyetik alan büyüklüğünü teorik olarak hesaplamak için Şekil 2’deki görsel kullanılmıştır. Manyetik alan dağılımını bulabilmek için kutuplar arası açıklığın manyetik direncini (“reluctance”) hesaplamak gerekmektedir. Manyetik malzemenin manyetik geçirgenliğinin (“permeability”) vakuma oranla çok büyük olduğu varsayımı altında, herhangi bir  $x$  koordinatındaki manyetik direnç yeterince küçük bir kesit için (1)’deki gibi hesaplanabilir.

$$R(x) = \frac{2k/x}{\mu_o \cdot dx \cdot h} \quad (1)$$

Bu denklemde  $h$  lens kalınlığını,  $\mu_o$  vakumun manyetik geçirgenliğini,  $k$  kutup geometrisi parametresini ve  $dx$  kullanılan kesit alanının  $x$  eksenindeki miktarını ifade etmektedir. Denklem (1) düzenlendiğinde (2) şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 2 Manyetik direnç hesabı için örnek lens kutupları görseli

$$R(x) = \frac{2k}{\mu_o \cdot h \cdot x \cdot dx} \quad (2)$$

Tüm açıklığın manyetik direnci,  $R_g$ , ise yeterince küçük kesitlerin manyetik dirençlerinin paralel bağlanması ile (3) kullanılarak (4)'teki gibi bulunabilir.

$$\frac{1}{R_g} = \int_{g/2}^{2k/g} \frac{\mu_o \cdot h \cdot x \cdot dx}{2k} \quad (3)$$

$$R_g = \frac{2k}{\mu_o \cdot h \cdot \left( \frac{2k^2}{g^2} - \frac{g^2}{8} \right)} \quad (4)$$

Herhangi bir  $x$  koordinatındaki manyetik akı yoğunluğu,  $B(x)$ , ise paralel bağlandığı varsayılan ilgili manyetik direncin üzerine büyüklüğü ile ters orantılı olarak paylaşacağı manyetik akının,  $\Phi_{total}$ , kesit alanına,  $A_{dx}$ , bölünmesi ile (5)'deki gibi bulunur.

$$B(x) = \frac{\Phi_{total} \cdot R_g}{R(x) \cdot A_{dx}} \quad (5)$$

Toplam manyetik akı yoğunluğu ise bobinlerin yarattığı elektromotor kuvvetinin toplam manyetik dirence oranı ile (6)'daki gibi gösterilebilir.

$$\Phi_{total} = \frac{2 \cdot N \cdot I}{R_g} \quad (6)$$

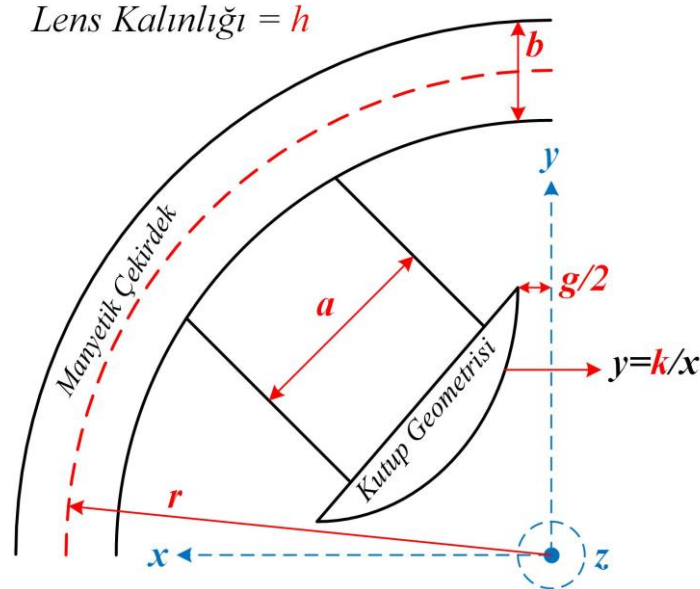
Denklem (6)'da  $N$  bobin tur sayısını,  $I$  bobin akımını göstermektedir. Bu durumda herhangi bir  $x$  koordinatındaki manyetik akı yoğunluğu (7)'deki denklem ile ifade edilebilir ve çekirdek geometrisinden bağımsızdır.

$$B(x) = \frac{N \cdot I \cdot \mu_0 \cdot x}{k} \quad (7)$$

Diğer bir dikkat çekici husus ise manyetik akı yoğunluğunun doğrusal artış gösterdiğidir, bu durum ancak ve ancak  $y=k/x$  şeklinde tanımlanan kutup geometrisi ile mümkündür. Doğrusal manyetik alan değişimi parçacıkların lensin etkisindeki davranışlarını açıklamak açısından ciddi kolaylık getirmektedir.

## 2.2. Önerilen Parametrik Dört Kutuplu Lens Modeli

Farklı gerekleri sağlayacak şekilde kolaylıkla modifiye edebilmek, tanımlanan bir boyut değişkeninin simülasyon sonuçlarına etkisini gözlemleyebilmek ve gerektiğinde ilgili değişkeni spesifik bir sonuç için optimize edebilmek amacıyla dört kutuplu elektromanyetik lensin parametrik bir şekilde tasarlanması önem arz etmektedir.

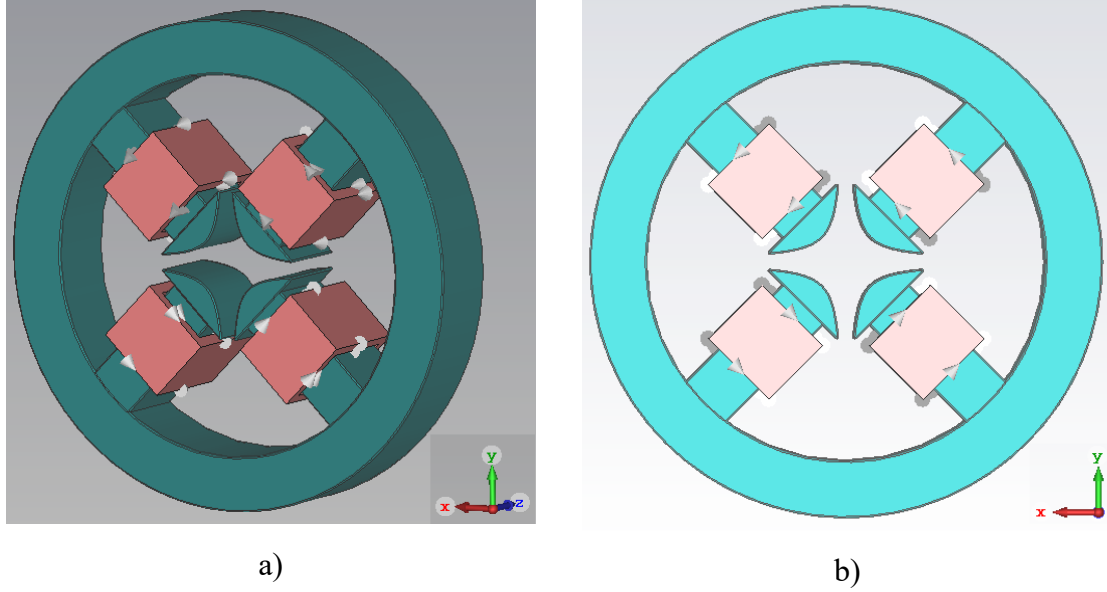


Şekil 3 Dört kutuplu lens modeli parametreleri

Bu amaçla Şekil 3'te gösterilen geometrik boyutlar çoklu fizik analizi yazılımında parametrik olarak modellendi. Bu parametrik model sayesinde geometrideki herhangi bir değişiklik için modelin tekrar çizilmesine veya zorlu modifikasyonlara gerek kalmamıştır. Bunun dışında parametrik olarak tasarlanmış değişkenlere bir aralıkta değerler vererek belirli bir sonucu optimize etmek için özel tanımlanmış fonksiyonlar da bulunmaktadır.

### 3. ÇOKLU FİZİK ANALİZ PROGRAMI SİMÜLASYONLARI

Önerilen dört kutuplu elektromanyetik lens modeli parçacık fiziği modülünü de entegre edebildiği için CST çoklu fizik analizi programında modellenmiştir. Çizilen parametrik model Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4 Parametrik dört kutuplu lens CST modeli a) diagonal görünüm ve b) ön yüz görünümü

Bildirinin bu kısmında uygulanan parametrik model kullanılarak yapılan bir tasarımın manyetik alan dağılımı ve elektron demeti ile etkileşimine yer verilecektir.

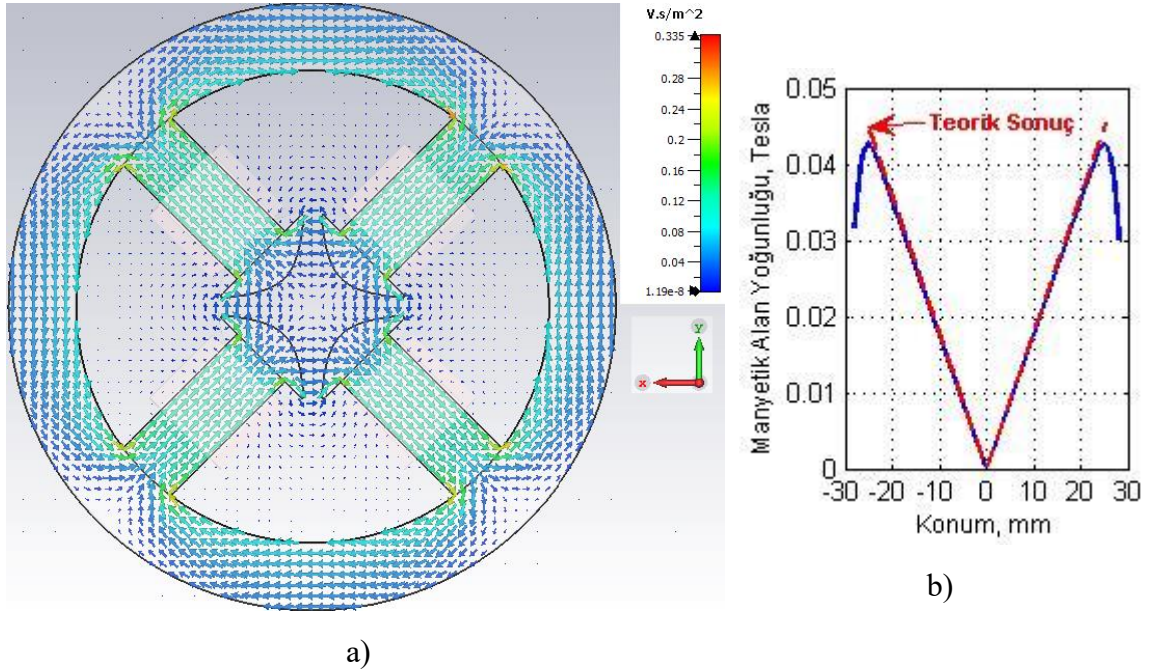
#### 3.1. Manyetik Alan Dağılımı Simülasyonları

Tasarlanan parametrik dört kutuplu lens modelinin teorik hesaplar ile olan uyumunu gözlemlemek için manyetik akı yoğunluğu dağılımı simülasyonu yapılmıştır. Örnek simülasyonda kullanılan parametrelerin değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Elde edilen manyetik akı yoğunluğu çizgileri Şekil 5.a’da verildiği gibidir ve beklenen şekilde bir dağılım göstermiştir. Bunun yanında x eksenindeki manyetik akı yoğunluğunun mutlak değerinin koordinata göre değişimi ise Şekil 5.b’de verilmiştir. Aynı grafiğe (7)’deki denklem ve Tablo 1’deki veriler kullanılarak yapılan teorik eğri de çizdirilmiştir. Şekil 5.b’de görüldüğü üzere parametrik model ile yapılan manyetik alan dağılımı simülasyonu ile (7)’deki teorik hesap önemli ölçüde örtüşmektedir.

Şekil 5.b'den çıkarılacak diğer bir sonuç ise manyetik akı yoğunluğunun geometrinin dış kısmına geldiğinde hatalı sonuçlar vermesidir. Bu durum ise geometri dışındaki kaçınılmaz kaçak manyetik alanların (“fringing fields”) varlığı yüzündendir [4] ve beklenen bir sonuçtur.

**Tablo 1** Örnek simülasyonda kullanılan parametreler

Parametre	Değer	Birim
Bobin Tur Sayısı, $N$	10	-
Bobin Akımı, $I$	10	A
Lens Kalınlığı, $h$	30	mm
Kutup Genişliği, $a$	20	mm
Kutup Geometri Katsayısı, $k$	70e-6	-
Çekirdek Yarıçapı, $r$	80	mm
Çekirdek Genişliği, $b$	20	mm
Kutuplar arası uzaklık, $g$	5	mm



**Şekil 5** Manyetik alan dağılımı simülasyonu a) manyetik alan çizgileri ve b) x eksenini üzerindeki manyetik alan dağılımının mutlak değeri

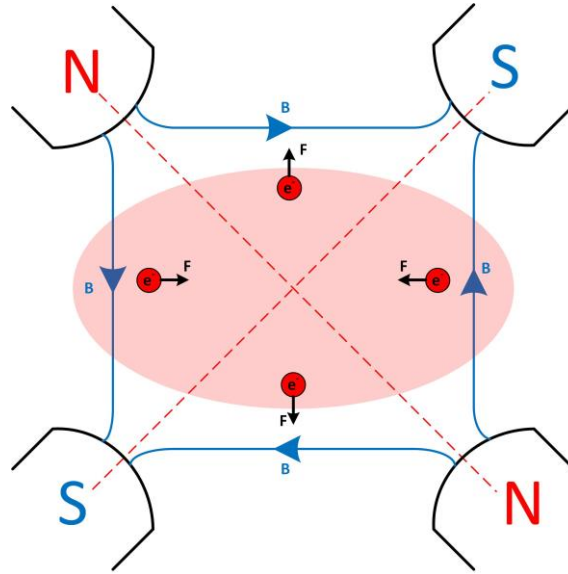


### 3.2. Elektron Demeti Etkileşimi

Dört kutuplu lens manyetik alan dağılımı Şekil 6'da gösterildiği gibi bir elektron demetiyle etkileştiğinde, elektronlar üzerinde yine aynı şekilde ifade edilen Lorentz kuvvetleri (8)'deki gibi ortaya çıkar. Bu kuvvetler elektron demetini bir eksende odaklarken odaklanan eksene dik olan diğer eksende ise demeti genişletecek şekilde davranış gösterir.

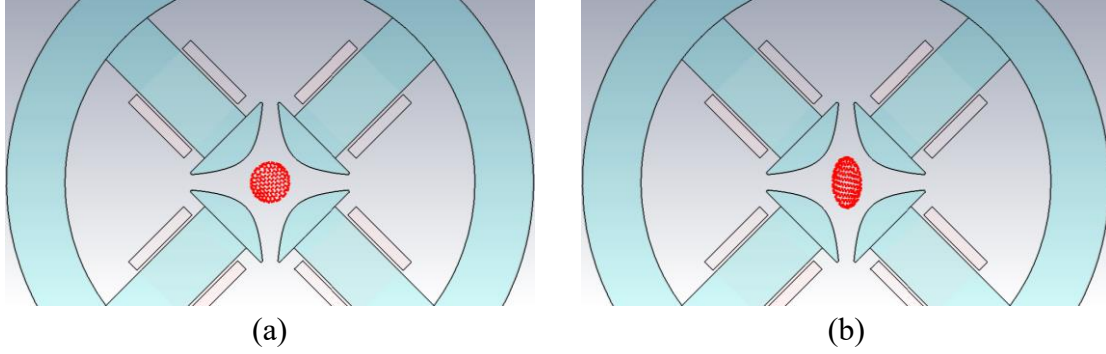
$$\vec{F} = e^- \vec{v} \times \vec{B} \quad (8)$$

Denklem (8)'de  $F$ ,  $v$ , ve  $B$  sırasıyla kuvvet, hız ve manyetik alan yoğunluğu vektörlerini,  $e^-$  ise bir elektronun yükünü göstermektedir.



Şekil 6 Dört kutuplu lensin örnek elektron demetine olan etkisi

Örnek bir elektron demetiyle dört kutuplu lensin etkileşimini göstermek için CST çoklu fizik simülasyon programında parçacık takip modülü kullanılarak benzetim çalışmaları yapılmıştır. Örnek elektron demetinin dört kutuplu lense girdikten sonraki davranışı Şekil 7'de gösterilmiştir. Beklenildiği gibi elektron demeti bir eksende odaklanırken diğer eksende genişleme eğilimindedir.



**Şekil 7** Dört kutuplu lens ile örnek bir demetin etkileşimi (a) lens öncesi ve (b) lens sonrası elektron demetinin kesiti

#### 4. SONUÇ

Önerilen parametrik dört kutuplu elektromanyetik lens modeli ile kolay modifiye edilebilir, parametreleri optimize edilebilir ve parametrelerin sonuca olan etkisi gözlemlenebilir bir tasarım elde edilmektedir. Bunun yanında, bildiriye konu olan çalışma kapsamında yapılan teorik manyetik alan dağılımı hesapları ile CST simülasyonları örtüşmektedir. Bu durum mevcut modelin doğruluğunu ve gereksinimlere göre kolaylıkla optimize edilebileceğini göstermektedir.

Modellenen dört kutuplu elektromanyetik lens tasarımı ile örnek bir elektron demetinin etkileşimi simülasyon ortamında gösterilmiş ve beklenen elektron demet davranışı gözlemlenmiştir.

#### 5. KAYNAKÇA

- [1] Grime, G. W. (2013), A compact beam focusing and steering element using quadrupoles with independently excited poles, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 306, 12-16.
- [2] Lebed, S. ve Ponomarev, A. (1997), Field reconstruction technique for testing magnetic quadrupole lenses, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 130, 90-96.
- [3] Dymnikov, A. D., Rout, B. ve Glass, G. A. (2007), Combination of magnetic and electric quadrupole lenses as zoom Sextuplet ion microprobe focusing system with minimum spherical aberration, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 261, 447-451.
- [4] Moloney, G. R., Jamieson, D. N. ve Legge, G. J. F. (1997), Analysis of the fringe field region of magnetic quadrupole lenses: field measurements and ion optical calculations, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 130, 97-103.

# HİYERARŞİK HAVA MUHAREBESİ MODELLERİNDE HATA YAYILIMIN ANALİZİ

Salih İLASLAN <sup>(a)</sup>

(a) Naval Postgraduate School, silaslan@tsk.tr

## ÖZ

Askeri karar vericilere karar verme süreçlerinde destek olabilmek için yöneylem araştırması analistleri hiyerarşik muharebe modellerini kullanırlar. Bu modelleme yönteminde, daha düşük seviyeli ve daha yüksek çözünürlüklü modeller koşturulduktan sonra elde edilen çıktılar ile daha yüksek seviyeli ve daha düşük çözünürlüklü modellere girdi sağlanır. Amaç, mühendislik ve taktik seviyesindeki değişkenlerde yapılan değişikliklerin, yüksek seviyede harekâtın etkinliğini nasıl etkileyebileceğini keşfetmektir. Bu çalışmada, az çözünürlüklü hava muharebesi düzeyindeki modele girdi olarak angajman/mühendislik seviyesindeki modelin çıktıları kullanılmıştır. Söz konusu çıktıların dağılımlarını etkin bir şekilde kullanabilmek için sadece ortalama değerler kullanmak yerine çeşitli örneklem alma yöntemleri incelemektedir. Bu amaçla, mühendislik düzeyi modelle muharebe düzeyi modelin verisel olarak direk bağlanması gibi çeşitli örneklem alma yöntemleri uygulanarak karşılaştırılmıştır. Önceki araştırmalar göstermiştir ki; alt seviye model çıktılarının sadece ortalama değerlerinin kullanılması ile koşulan hiyerarşik muharebe modellerinde, model düzeyi artıkça hata yayılımının da beraberinde arttığı ve bu nedenle ortaya çıkan nihai sonuçların yanılmaya neden olduğu ve var olan riskin göz ardı edilmiş olmaktadır.

Bu çalışmada, Stokastik bir Lanchester 100 uçağın 4 paket halinde karşılaştığı muharebe modeline bir veri kütüphanesini oluşturabilmek için, 2 uçağa karşı 2 uçağın hava muharebesi gerçekleştirdiği angajman seviyesindeki bir modeli geliştirildi. Angajman seviyesi modelinin koşular ile elde edilen veri kütüphanesinden çeşitli örnekleme yöntemleri kullanılarak muharebe modeline veri aktarımı sağlanmış ve muharebe modeli koşturulmuştur. Sonuçlar değerlendirildiğinde, angajman ve muharebe modellerinin veri aktarımı için kullanılan örneklem alma yöntemlerin operasyonel etkinlik ve risk tahminleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hiyerarşik Modelleme, Deney Dizayını, Hata Yayılımı, Hava Muharebesi Modellemeleri, Lanchester Denklemleri

## ANALYSIS OF ERROR PROPAGATION WITHIN HIERARCHICAL AIR COMBAT MODELS

Operations research analysts often use a hierarchy of combat models to provide insight to military decision makers. Briefly, lower-level, higher-resolution models provide input to higher-level, lower-resolution models. This allows analysts to explore how engineering and tactics changes can affect campaign effectiveness. This thesis builds upon previous research and examines various methods for employing distributions of engagement-level model outputs as input to campaign-level models, instead of just using the average. We contrast methods for “linking” the engagement-level model to the campaign-level model. Previous research indicates that when expected values alone are propagated through layers of combat models, the final results will likely be biased, and risk underestimated.

An air-to-air engagement model is developed to generate a data library that is used as input in a stochastic Lanchester campaign model. A variety of sampling methods are employed to sample from the engagement model’s output data library to provide input to the campaign model. The results indicate that the manner in which the engagement and campaign models are linked has substantial impact on the estimates of operational effectiveness and risk. Additionally, our research illustrates how running a designed experiment on the engagement-level model, to generate a library of data that can be linked to the campaign-level model, can support robust decision making.

**Keywords:** hierarchical combat modeling, air combat modeling, sampling methods, metamodeling, error propagation, Lanchester equations.

### 1. GİRİŞ

Modelleme ve simülasyon, hava muharebesinin planlanması aşamasında önemli bir unsurdur. Söz konusu hava muhaberesi modeli; bir diyagram, bir diferansiyel denklem seti veya bir bilgisayar simülasyonu şeklinde olabilir. Yapılan koşullar veya hesaplamalar sonucu elde edilen çıktılar ile olası muharebe sonuçları hakkında öngörü üretmemize imkân sağlar.

Bahse konu öngörülerini sağlamak ve çözüm üretmek amacıyla tutarlı modellere ihtiyaç duyduğumuz için, bilgisayarda hava muharebesi modellemesinde kullanılan verilerin olabildiğince kesin ve doğru olması gerekmektedir. Muharebenin sonunda kazanan veya kaybeden taraf olmayı ön görebilmek, olası uçak ve personel kaybı sayısını ortaya koyabilmek için modelleme ve simülasyon araçlarının sağladığı bu büyük imkanı iyi değerlendirmesi adına önemlidir. Hava muharebelerinin modellemesinde kullanılan yöntemlerden bir olan hiyerarşik muharebe modellemesi, mühendislik ya da angajman

seviyesi değişikliklerinin bir muharebenin sonuçları üzerindeki etkilerini tahmin etmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.

## 2. HAVA MUHABERESİ MODELLEMESİ

Bir analiz aracı olarak savaşın modellenmesinin başlangıcından itibaren, hava savaşını modelleyen birçok araştırma çalışması olmuştur. Frederick W. Lanchester'in çabaları en eski hava savaşı modelleme çalışmalarından biridir. Lanchester, "Savaşta Uçak: 1916'da Dördüncü Kolun Şafağı" adlı bir kitap yayınladı ve hava savaşı hakkındaki fikirlerini paylaştı (Lanchester, 1916). Kitapta Lanchester, iki askeri gücün birbiriyle mücadelede nasıl etkileneceğini modelleyen bir diferansiyel denklem ailesini anlattı. Lanchester iki farklı model geliştirdi; Model denklemlerinden biri olan "square law"ın, "modern" hava savaşını tanımlayacağına inanıyordu.

Yıllar boyunca Lanchester yasalarının çeşitli biçimlerinin geçerliliği hakkında birçok çalışma yapılmıştır; örneğin, Engel (1954), Hartley (2001) ve Lucas ve Dingel (2004). Genel olarak, bu araştırmacılar tek başına Lanchester yasasının tutarlı bir sonuç sağlamadığını, fakat Lanchester yasalarının bir kombinasyonunun uygun bir sonuç verebileceğini savundu. Son zamanlarda, York Üniversitesi'ndeki üç akademisyen, Ian Horwood (Tarihçi), Niall MacKay (Matematiksel Fizikçi) ve Christopher Price (Tarihçi), çeşitli hava muharebelerinin tarihsel verilerini analiz etti (İngiltere Savaşı, 1940; Pasifik Hava Savaşı, 1941–1945) Kore Savaşı, 1950–1953). Ve Lanchester'in inandığına karşı çıkan sonuçları buldular. Onların başlangıç hipotezi, hava savaşının en Lanchester "linear" yasasına göre rastgele modellenmiş bir düello seti olduğu idi. Hava muharebesinin, tarihsel hava muharebe verileri analizlerine dayanarak, "square law" yasasına uymadığını iddia etmişlerdir. Analizler sonucunda, hava muharebesinin % 80 doğrusal "linear" ve % 20 asimetrik olduğu sonucuna varmışlardır (Horwood, Mackay, & Price, 2014). Bu çalışmada daha geleneksel "square law" yerine, muhabere düzeyindeki modelde doğrusal (linear) bir yasa kullanılmıştır.

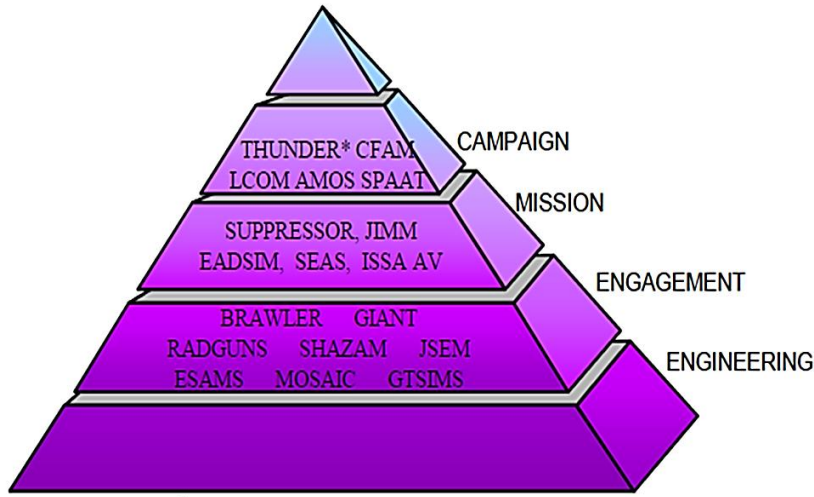
Lanchester'in araştırmalarından sonra, Lanchester'in orijinal iki yasasının türevlerine dayanarak birçok hava savaşı modelleme denklemleri, araçları ve simülasyon programları geliştirilmiştir.

## 3. HİYERARŞİK HAVA MUHABERESİ MODELLEMESİ YAKLAŞIMI

Bir tür modellemesi olarak, hiyerarşik modelleme, çevre bilimi, sosyal bilimler ve askeri bilimler vb. gibi farklı bilim alanlarında birçok bilimsel çalışmada kullanılmıştır. Örneğin, hiyerarşik modelleme epidemik hastalık analizinde yaygın olarak

kullanılmıştır. Model muhtemel yönü ve hastalıktan potansiyel olarak etkilenen insan sayısını haritalandırabilmektedir (AB Lawson, 2013).

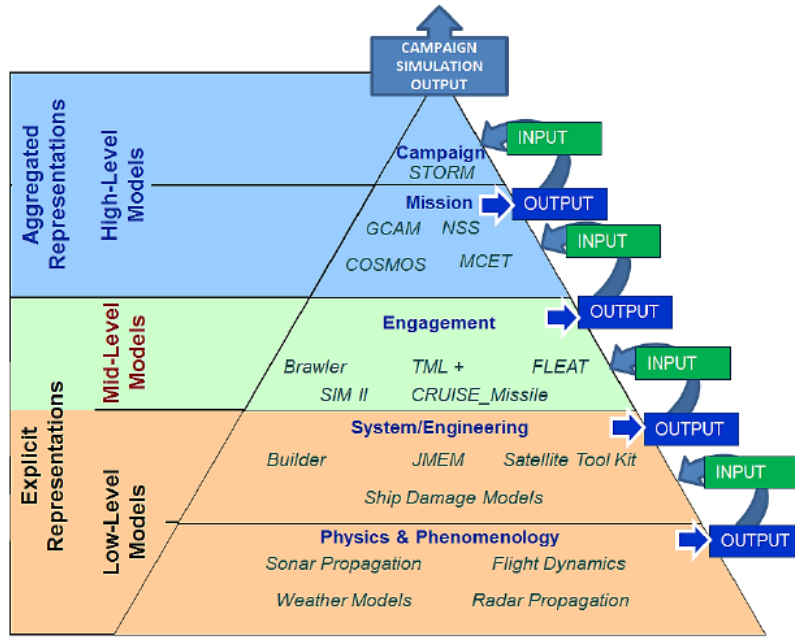
Askeri karar vericiler hiyerarşik savaş modellemesi kullanarak, silah platformlarındaki değişikliklerin taktiksel performans ve kampanya etkinliği üzerindeki etkilerini gözlemleyebilmek için hiyerarşik modelleme yöntemini kullanmaktadırlar. Diğer birçok ülkede olduğu gibi ABD Hava Kuvvetleri ve ABD Donanması da gelecekteki askeri ihtiyaçları karşılamak için gereken güç yapısını belirlemek için hiyerarşik savaş modellemesinden yararlanmaktadır. ABD Hava Kuvvetleri Kuvvet Analiz Panelinde yapılan bir sunumda, modelleme ve simülasyon amacıyla kullanılan programlar ve enstrümanlar hiyerarşik modelleme üzerinde gösterilmiştir.(Şekil 3). (Cerniglia-Mosher, 2009).



**Şekil 1. Simülasyon Modellerinin Hiyerarşi Piramidi.**

Taktik seviyeden stratejik seviyeye kadar çeşitlilik gösteren muharebe simülasyonları askeri karar vericilere öngörü kazandırmak için modern dünya ordularının yaygın şekilde kullandığı enstrümanlardır. Söz konusu simülasyonlar içerdikleri detay ve ayrıntı miktarına göre değişiklik gösterirler. “Düşük seviyede ve daha yüksek çözünürlüklü” veya “daha yüksek seviyede ve daha az çözünürlüklü” olarak sınıflandırılırlar. Düzeyi ne kadar yüksek olursa, ayrıntı o kadar azdır ve bir o kadar da bir araya getirilmiş operasyonların bütünü modellenildiği simülasyonlardan oluşur. Savaş modellemeleri, bazen canlı testlerin veya tatbikatların sonucunu girdi olarak kullanırken, bazen de daha düşük seviyeli muharebe simülasyonlarının çıktıları girdi olarak kullanılmaktadır. Daha düşük seviyeli simülasyon modellerinin çıktıları daha yüksek seviyeli bir simülasyon modellerine girdi olarak kullanılması süreci, modeller hiyerarşisi olarak adlandırılır. Bu hiyerarşik modelleme sistemi, analistin mühendislik ve taktik seviyedeki yaptığı değişikliklerinin muharebenin etkinliğini nasıl etkileyebileceğini

keşfetmesini sağlar. Birçok ülkenin (harekat) yöneylem araştırma analistleri komuta katına karar verme süreçlerinde yardımcı olabilmek için bu simülasyon hiyerarşisini kullanmaktadırlar. Hangi savaş platformunun tedarik edileceğine karar vermek için gerçek testler yapmak yerine, maliyet ve can kaybı endişesinin duyulmadığı hiyerarşik simülasyon modelleri mühendislik seviyesindeki değişimlerin görev ve muharebe sonuçları üzerindeki etkiyi araştırmak için yararlı bir araçtır. Türk Hava Kuvvetleri, hiyerarşik simülasyon yöntemini kullanarak “ radar veya silah sistemlerinin hangisi tercih edilmelidir ki, söz konusu sistemin fark yaratan performansı ile hava muharebesinin sonucunu nasıl etkilenebilir?” gibi sorular hakkında fikir edinebilirler. Komuta katına sunulan bu bilgiyle hava hakimiyetini sağlamak ve sürdürmek için belirli bir bütçe dahilinde en iyi yatırımların hangileri olduğu belirlemeye çalışılır. Savaş modelleri, karar vericilere milyarlarca doların harcanmasını içeren ve birçok insan yaşamını etkileyen kararları alma ve gerekçelendirme konusunda yardımcı olan bilgileri sağlar (Thomas W. Lucas, Turker Turkes, 2004, p. 1).



**Şekil 2. Simülasyon Modellerinin Hiyerarşi Primadi.**

Yararlı ve makul bir muharebe analizi yapmak için muharebenin amacı, alt görevleri ve ölçüm kriterleri iyi tanımlanmalıdır. Görevin temel detayları dikkate alınmalı, analiz edilmeli ve muharebe analiz sürecine bir varsayım olarak dahil edilmelidir. Bu nedenle, bir çok gelişmiş ordu, muharebe öncesi çalışmalarında hiyerarşik savaş modellerini kullanmaktadır. Simülasyonlar arasındaki bu hiyerarşik durum, genellikle bir piramit olarak gösterilir. Piramidin temeli, çok detaylı ve fiziksel verilere dayalı modellerden oluşurken, piramidin tepesi tipik olarak muharebe seviyesi bir modelden oluşur. Söz

konusu hiyerarşik modelleme piramidinin bir versiyonu, ABD Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Değerlendirme Bölümü (Office of Chief of Naval Operation, Assessment Division - OPNAV N81) tarafından oluşturulmuştur ve Şekil 1'de gösterilmektedir.

#### **4. SENARYO VE MODEL TANIMLAMASI**

Bu çalışma, daha önce ABD Donanmasında görevli Yüzbaşı Russell Pav (Pav,2015) tarafından yürütülen hata yayılımı araştırması çalışmasının üzerine inşa edilmiştir. Söz konusu çalışmanın ötesinde, angajman seviyesi simülasyon modellerinin çıktılarının muharebe seviyesi simülasyon modellerine girdi olarak kullanılırken, sadece ortalama değer kullanmak yerine çeşitli örneklem yöntemlerinin kullanılması incelenmiştir. Oluşturulan angajman seviyesi modelle muharebe seviyesi modeli direkt olarak “ilişkilendirmek” amacıyla da ortaya koyulan yöntemlerden elde edilen karşılaştırılmıştır. Önceki araştırmalarda, sadece ortalama değerlerin kullanılmasının savaş simülasyon modellerinin düzeyi artıka hata yayılımının da beraberinde arttığı ve bu nedenle ortaya çıkan nihai sonuçların yanılmaya neden olacağını ve riskin göz ardı edildiği belirtilmiştir.

##### **4.1. Angajman Seviyesi Model**

Bu çalışmada ilk olarak, Yeni Zelanda Ordu mensupları tarafından geliştirilen ve stokastik muharebe simülasyonu koşullarının yapılabildiği “Map Aware Non-uniform Automata” (MANA) (MANA,2009) adlı programda, avcı uçakları arasında ikiye karşı iki uçağın karşı karşıya geldiği angajman seviyesinde bir model oluşturulmuştur. Bu modelde; jet avcı uçaklarının hız, menzil ve füze vuruş-başarı olasılıkları gibi performans ölçütleri (Measure of Performance -MOP) açık kaynak verilerinden elde edilen değerlerden alınmıştır. Ve bu veriler, MANA simülasyonuna girdi olarak kullanılmıştır. Tablo-1’de gösterilen etkinlik ölçütleri (Measure of Effectiveness - MOE) olarak; angajman sonrası kaybedilen uçak sayısı, angajman süresi ve her iki tarafın da kazanma olasılığı belirlenmiş olup; bunlar angajman seviyesindeki modelin sağladığı çıktıları olarak değerlendirilmiştir.



FACTORS	DESCRIPTION	LOW	HIGH
RED FIGHTER AIRCRAFT WEAPON EFFECTIVE RANGE (AC-EffRng)	Maximum effective range that a red fighter aircraft missile hits an enemy aircraft. It is varied since an enemy aircraft will have different directions , manoeuvres, etc.	50,000 meters	80,000 meters
RED AIRCRAFT WEAPON PROBABILITY OF HIT (AC-EffRng-Phit)	Probability that a missile fired from a red fighter aircraft hits an enemy aircraft. It is varied since enemy aircraft will have counter maneuvers, flares and missile has its own probability of hit.	0.8	0.9
RED AWACS RADAR RANGE (AWACS-Rng)	Maximum range that a red AWACS can detect an enemy fighter aircraft. Variation is generated based on enemy counter measures and radar detection capabilities.	320,000 meters	400,000 meters
RED AWACS PROBABILITY OF CLASSIFICATION (AWACS-Pclass)	Probability that red AWACS classifies correctly an enemy aircraft after AWACS detects that enemy aircraft by its radar. It is varied since enemy will have counter measures such as jammer system etc.	0.8	1
COMMUNICATION LATENCY (CommLat)	Organic communication between red aerial assets may have small amount of time delay in transferring information to each other after radar detecting an enemy aircraft in radar.	0 second	2 seconds
RED AIRCRAFT STEALTH ACstealth	Red fighter aircraft stealth is the amount of protection from view that the entity has, and ranges from 0 to 100%, where 100% is invisible.It is partial and varied based on the idea that new fighters have partial stealth capabilities.	0%	30%
BLUE AIRCRAFT WEAPON EFFECTIVE RANGE (EnAC-EffRng)	Maximum range that a blue fighter aircraft can fire a missile. It is varied since an enemy aircraft will have different directions , maneuvers, etc.	50,000 meters	80,000 meters
BLUE AIRCRAFT WEAPON PROBABILITY OF HIT (EnAC-EffRng-Phit)	Probability that a missile fired from a red fighter aircraft hits an enemy aircraft. It is varied since enemy aircraft will have counter maneuvers, flares and missile has its own probability of hit.	0.8	0.9
BLUE STATIONARY RADAR RANGE (EnRadarRng)	Maximum range that a Blue stationary radar can detect an enemy fighter aircraft. Variation was generated based on enemy counter measures and radar detection capabilities.	220,000 meters	280,000 meters
BLUE STATIONARY RADAR PROBABILITY OF CLASSIFICATION (EnRadar-Pclass)	Probability that Blue stationary radar classifies correctly an enemy aircraft after radar detects that enemy aircraft by its radar. It is varied since enemy will have counter measures such as jammer system etc.	0.8	1

**Tablo-1 Kırmızı ve Mavi Ordulara Ait Değişken Entkinlik Ölçütleri (MOE)**

MOP'lardaki değişkenlikleri, iki farklı deney tasarımı (Design of Experiments - DOE) kullanılarak oluşturulan MOP kombinasyonları (Data Farming) ile modelle dahil edilmiştir. Çalışmada, MOP'lardan kombinasyonlar oluşturma amacıyla “Nearly Orthogonal Latin Hypercube” (NOLH) ve “Resolution V Fractional Factorial” (R5FF) deney tasarım yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler ile oluşturulan MOP kombinasyonları, elde edilen sonuçların nasıl etkilediğini ortaya konmasına olanak sağlamıştır. MANA model koşulları çıktıları, muharebe seviyesi model için girdi kütüphanesi oluşturmuştur.

#### 4.2. Muharebe Seviyesi Model

Sonrasında, Python yazılım dilinde, Şekil-2’de görülen Lanchester Lineer Denklemlerinin (Lanchester ,1916) kullanıldığı muharebe seviyesi stokastik bir model oluşturulmuştur.

$$\frac{dx}{dt} = -ay \quad \frac{dy}{dt} = -bx$$

### Şekil-3, Lanchester Denklemleri (linear)

Bu modelde, 25'e karşı 25 jet avcı uçağının paket olarak savaştığı dört ayrı muharebe simüle edilmiştir. Her muharebe paketinde, herhangi bir tarafın uçak sayısı angajman sonucu dörtte bir seviyesinin altına düştüğünde, o muharebe koşusu sonlandırılmıştır. Şekil-3'de görüldüğü gibi, stokastik Lanchester muharebe modelinde yıpratma katsayıları hesaplanırken, angajman seviyesi MANA modelinden elde edilen uçak kayıpları ve angajman süreleri kullanılmıştır. MANA gibi stokastik bir simülasyon programı kullanıldığı için, elde edilen sonuçlar bir dağılım olarak karşımıza çıkmıştır.

$$a = \frac{x \text{ casualties}}{(\text{time}) \cdot (\text{one } x \text{ participant}) \cdot (\text{one } y \text{ participant})}$$

$$b = \frac{y \text{ casualties}}{(\text{time}) \cdot (\text{one } x \text{ participant}) \cdot (\text{one } y \text{ participant})}$$

### Şekil-4 Lanchester denklemleri muharebe modeli yıpratma katsayıları formülizasyonu

Ancak, muharebe düzeyindeki model, girdileri skalar olarak almaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada araştırma sorusu olarak; “MOP kombinasyonları sonucu elde edilen varyansı iki modeli nasıl en iyi şekilde ilişkilendirerek aktarabiliriz?”i belirledik.

## 5. ARAŞTIRMA SORULARI

Farklı örnekleme yöntemlerinin kullanılması, belirsizliği azaltabilir; bununla birlikte, dünyada kullanılan hiç bir hiyerarşik modelinde, varyansı tam olarak yaymanın yani verideki dağılımın bir modele eksiksiz aktarmanın yolu ortaya konulamamıştır. Sonuç olarak, hata yayılımı hakkında bir fikir vermek ve muharebe modellerinin sonuçlarına yönelik belirsizliği azaltabilmek için alternatif yollar üretmek amacıyla bu araştırma aşağıdaki sorularla cevap aranmıştır:

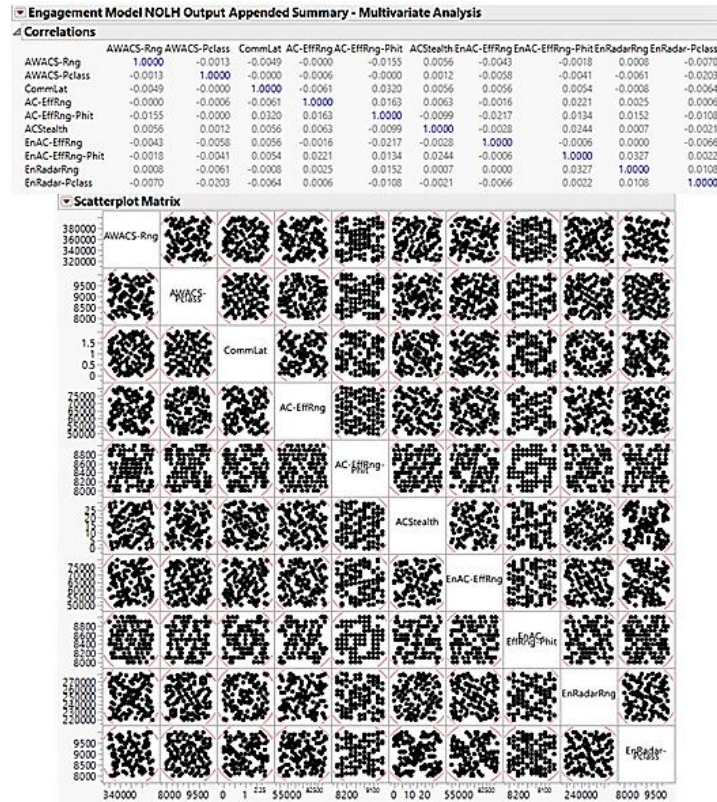
- Düşük seviyeli bir hava angajman modelinin çıktılarından, muharebe seviyesindeki modele veri kütüphanesi oluşturmak amacıyla farklı yöntemler kullanmanın bize sağladığı sonuçları (ör. Ortalama, rastgele örnekleme, meta modelleme vb.) nelerdir?

- Düşük seviyeli bir hava angajman modelinin çıktılarının muharebe seviyesindeki modele veri kütüphanesi oluşturmak için kullanmak, hava muharebe modelleri için makul bir yaklaşım mıdır?
- NOLH ve R5FF yöntemlerinden üretilen deney tasarımlarının (kombinasyonlarının) kullanılması sonuçlarda önemli bir değişikliğe neden olmaktadır mıdır?

## 6. VERİ ÜRETİMİ VE VERİ ANALİZİ

### 6.1. Veri Üretimi

MANA’da koşulan model için değişken faktörleri NOLH ve R5FF deney tasarım yöntemleri ile belirli aralıklarda üretilmiş ve koşular sonucu veri kütüphanesi oluşturulmuş, oluşturulan veri kütüphanesinin veri analizi yapılmıştır. Şekil-4’de, yöntemlerden biri olan NOLH yöntemi ile elde edilen, değişken faktör kombinasyonlarının analizi görülmektedir.

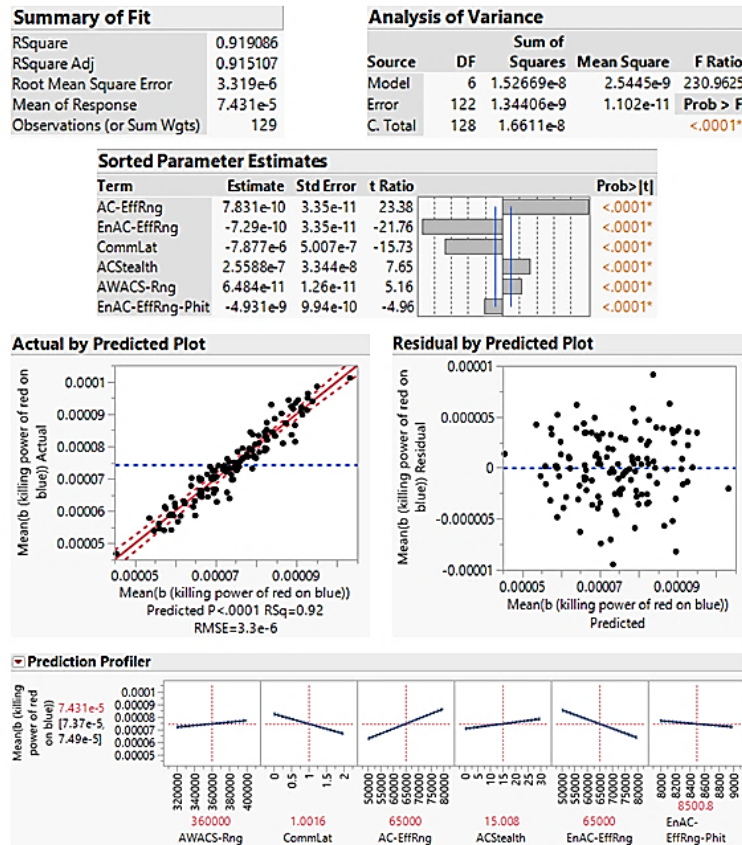


Şekil-5, NOLH Veri Uzayı Analizi

Değişken faktörlerin tasarım alanını bir küp içerisindeki veri uzayı olarak düşünüldüğünde, elde edilen kombinasyonların söz konusu tasarım uzayının büyük bir kısmını kapladığı görülmektedir. Bu da değişken faktörlerin tüm kombinasyonlarının koşulması yerine, NOLH ve R5FF yöntemlerinden birisi kullanılarak daha az koşu ile yaklaşık sonuçların elde edilmesine, zaman ve koşu tasarrufuna imkan sağlamaktadır.

## 6.2. Veri Analizi

Her iki modelde de edilen verilen çeşitli veri analizi gereçleri ve teknikleri kullanılarak analiz edilmiş, elde edilen verilerin mantıklı ve tutarlı olup olmadığı yorumlanmıştır. Şekil-5’de görüldüğü gibi, regresyon analizi uygulanarak, Lanchester denklemleri yıpratma katsayıları değişken faktörler cinsinden denklemler edilmiştir.



Şekil-6, Kırmızının maviye olan yıpratma katsayısı (b) regresyon analizi

Bu çalışmada, klasik olarak, girdi olarak ortalama değer kullanılması dışında, rastgele örneklem alma ve faktörlere göre örneklem alınmıştır. Bunun yanı sıra regresyon analizi yaparak iki farklı seviye model arasında bir bağlantı oluşturulmak hedeflenmiştir. Yapılan regresyon analizi sonrasında Lanchester Denklemleri içinde yer alan yıpratma katsayıları, Şekil-6’da görüldüğü gibi değişken faktörler olarak formülize edilmiş ve sonrasında elde edilen veriler muharebe modeline çıktı olarak kullanılmıştır.

$$\begin{aligned}
 a = & 0.00002139730028 \\
 & + 0.00000804262402 * CommLat \\
 & + -8.200272952e-10 * AC-EffRng \\
 & + -2.8180536759e-7 * ACStealth \\
 & + 8.458263398e-10 * EnAC-EffRng \\
 & + 5.261192657e-9 * EnAC-EffRng-Phit \\
 & + 4.899557241e-11 * EnRadarRng \\
 & + \left( \frac{AC-EffRng - 65000.0620155039}{AC-EffRng - 65000.0620155039} \right) \\
 & * -1.151705944e-14 \\
 \\
 b = & 0.00009339991368 \\
 & + 6.4841118473e-11 * AWACS-Rng \\
 & + -0.0000078766007 * CommLat \\
 & + 7.831284439e-10 * AC-EffRng \\
 & + 0.00000025587656 * ACStealth \\
 & + -7.286605462e-10 * EnAC-EffRng \\
 & + -4.9313410182e-9 * EnAC-EffRng-Phit
 \end{aligned}$$

**Şekil-7, Lancherter denkleminde yer alan yıpratma katsayılarının (a,b) değişken faktörler olarak formülize edilmesi**

Bir diğer yöntem olarak; angajman seviyesi elde edilen veri kütüphanesi muharebe seviyesi modele direk bağlanmış, regresyon analizi uygulanarak muharebeyi kazanma olasılığı (P(Win)) değişken faktörler ile Şekil-7’de olduğu gibi formülize edilmiş ve analizi yapılmıştır.

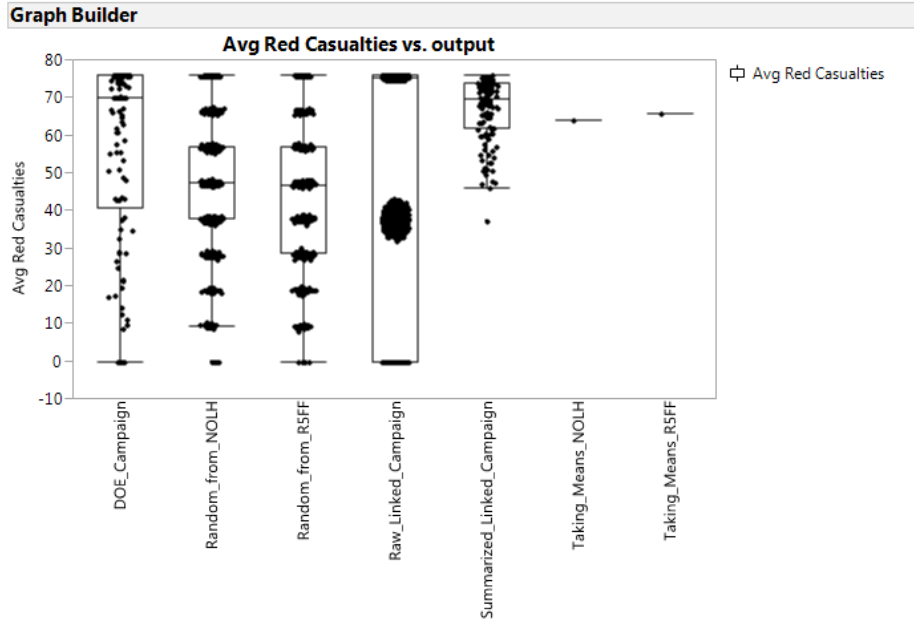
$$\begin{aligned}
 P(Win) = & 0.8714884828115 \\
 & + 0.00000031104138 * AWACS-Rng \\
 & + -0.0833238239368 * CommLat \\
 & + 0.00000759785425 * AC-EffRng \\
 & + 0.00238844817407 * ACStealth \\
 & + -0.0000072704439 * EnAC-EffRng \\
 & + -0.0000466547205 * EnAC-EffRng-Phit \\
 & + -0.0000004030273 * EnRadarRng \\
 & + \left( \frac{AC-EffRng - 65000.0620155039}{AC-EffRng - 65000.0620155039} \right) \\
 & * 1.0008899595e-10
 \end{aligned}$$

**Şekil-8, Kazama olasılığı (P(Win)) formülizasyonu**

## 7. SONUÇ

Analiz sonuçları, örnekleme metodolojisinin, modellerinin birbirine bağlanma şeklinin, operasyonel etkinlik ve riskin tahmini üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

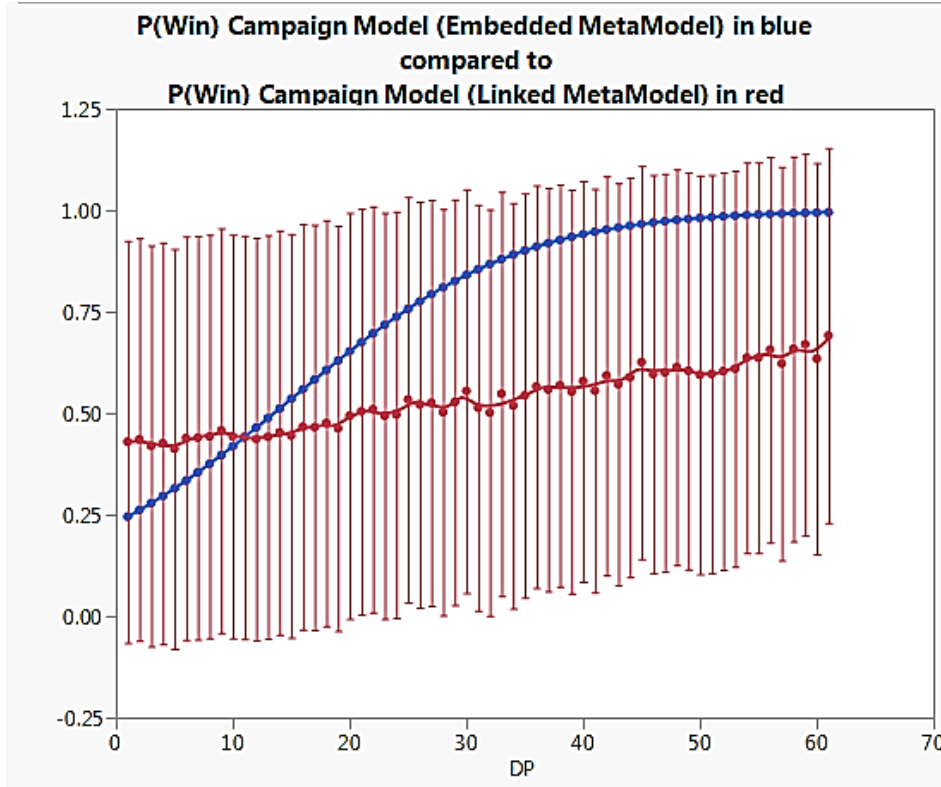




**Şekil-9, Farklı Örneklem alma ve modeller arası bağlantı sağlama yöntemleri sonrasında koşulan muharebe seviyesi model sonucu elde edilen veri dağılımları**

Şekil-8’de görüldüğü gibi, angajman seviyesi model çıktılarından sadece ortalama değer alınarak yapılan bir koşu sonucu sadece bir değer elde edilirken, kullanılan diğer yöntemler ile varyansın nasıl üst modele taşınabildiği ortaya konulmuştur. Muharebe modeli koşuları sonucu elde edilen değerler, bazen değişken faktörlere göre kümelenmiş, bazen de bir tarafa yığılmıştır. Bu durum ayrı bir çalışma konusudur.

Kullanılan senaryodan farklı bir senaryoda rastgele örnekleme yapmanın ötesinde, bu çalışmada alt seviye angajman seviyesi modelden örnek alma veya modeller arası bağlantı kurulması için ek teknikler kullanılmıştır. Özellikle, gömülü meta-modelleme ve bağlantılı meta-modelleme yaklaşımlarını uygulanmış ve karşılaştırılmıştır. İki yaklaşım arasında önemli bir fark ortaya çıkmıştır; gömülü meta-modelleme tekniğinin hata yayılımına, dolayısıyla sonuçlara ve riskin göz ardı edilmesine yol açabildiği gözlenmiştir.



**Şekil-10, Deterministik Gömülü Metamodel sonuçlarının (mavi) ve Bağlantılı Metamodel sonuçlarının (kırmızı) karşılaştırılması.**

Şekil 9’de, deterministik gömülü meta modelleme yaklaşımı ve bağlantılı meta model yaklaşımı arasındaki farkı gösterilmektedir. Daha yumuşak bir çizgiyle birbirine bağlanan mavi noktalar, değişkenlerin bir fonksiyonu olan kazanma olasılığı  $P(\text{Win})$  için deterministik bir formülün sonucunu temsil eder. Formüller, her bir modelleme düzeyinde bir regresyon sonucu bulunarak geliştirilmiştir. Bu örnekte, sadece faktörlerden (değişkenler) birini değiştiriliğinden, diğer değişkenler başlangıç seviyelerinde sabitlenmiştir.  $P(\text{Win})$  tahminindeki varyansı, standart sapma hata çubukları (kırmızı noktalar) ile doğrudan bağlantılı modelde gösterilmektedir. Diğer bir deyişle, birçok faktör kombinasyonu ile stokastik Lanchester muharebe modelinin birçok koşumu yapılmıştır. Ayrıca sonuçlar, deterministik gömülü metamodelin genellikle  $P(\text{Win})$  fazla tahmin etmesine ve düşük tahmin riskine yol açacağını göstermiştir.

Son olarak, senaryodaki belirsizlikleri sistematik olarak araştırmak için mükemmel bir yöntemin deney tasarımı olduğunu vurgulanmıştır. Sonuç olarak ortaya çıkan çıktı, değişkenliği ve riski yeterince karakterize edebildiği gözlenmiştir. Bu çalışmada, hem Near Orthogonal Latin Hypercube (NOLH) hem de Resolution 5 Fraksiyonel Factorial (R5FF) faktör tasarım yöntemleri kullanılmıştır. Eğer mümkün olsa, boşluk doldurucu

NOLH'nin, dizayn uzayındaki köşe kısımları R5FF ile takviye edilmesiyle tüm faktör dizayn tasarım alanının kapsanabilmesi arzu edilmektedir.

## 8. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Amerikan Donanması Yüksek Lisans Okulu (Naval Postgraduate School) Yöneylem Araştırması Programında geçirmiş olduğum uzun, zahmetli ama eğlenceli bir yolculuğun sonucudur. Öncelikle, buradaki eğitimim için gerekli kaynağı sağlayan tüm Türk vatandaşlarına en içten teşekkürlerini sunmak isterim. Daha sonra tez danışmanım Profesör Thomas W. Lucas ve ikinci okuyucum Dr. Jeffrey Applegate'a rehberliklerinden dolayı kendilerine teşekkürü bir borç bilirim. Onlarla çalışmak benim için bir onurdu. Ek olarak, bu çalışmadaki bilgi ve uzmanlığımı paylaştığı için Araştırma Görevlisi Mary McDonald'a teşekkür ediyorum.

## 9. KAYNAKÇA

- [1] Lanchester, F. W. (1916). *Aircraft in Warfare: The Dawn of the Forth Arm*. Edited by J.R. Newman and Simon and Schester, Vol. 4. Charleston, SC: BiblioLife.
- [2] Engel, J. H. (1954). A verification of Lanchester's law. *Journal of the Operations Research Society of America*, 2(2), 163–171.
- [3] Hartley III, D. S. (2001). Battle modeling BATTLE MODELING. In *Encyclopedia of Operations Research and Management Science* (pp. 53–57). New York: Springer.
- [4] Lucas, T. W., & Dinges, J. A. (2004). The effect of battle circumstances on fitting Lanchester equations to the Battle of Kursk. *Military Operations Research*, 9(2), 17–30.
- [5] Horwood, I., Mackay, N., & Price, C. (2014). *Concentration and asymmetry in air combat: Lessons for the defensive employment of air power*. York, UK.: University of York.
- [6] Cerniglia-Mosher, M. (2009) Retrieved from Air Force Agency for Simulation Modeling: Retrieved from: <http://www.afams.af.mil/shared/media/document/AFD-090416-077.pdf>
- [7] Lawson, A. B. (2013). Bayesian disease mapping: Hierarchical modeling in spatial epidemiology. CRC press.
- [8] Lucas, T. W., & Turkes, T. (2004). Fitting Lanchester equations to the battles of Kursk and Ardennes. *Naval Research Logistics (NRL)*, 51(1), 95–116.



- [9] Pav, R. (2015). Experiments in Error Propagation Within Hierarchical Combat Models. Master's thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA. Hamilton, J.A., Nash, D.A. ve Pooch, U.W. (1997), Distributed Simulation, CRC Press: Boca Raton, Florida, ABD.
- [10]McIntosh, G. C. (2009). *MANA-V (Map aware non-uniform automata – Vector) supplementary manual*. Auckland, New Zealand: New Zealand Defence Technology Agency

Abuhanoglu, Hüseyin	476
Akan, Tuna	193
Akça, Tamer	162
Akgül, Mehmet	85
Akman, Çağlar	432, 444
Aksoy, Ahmet Özgün	303
Aksoy, Serkan	4
Ankaralı, Mustafa Mert	94
Aribal, Arzum Berrak	293
Arslan, Hilal	363
Aslan, Damla	387
Atasay, Nehir	75
Ateşoğlu, Özgür	349, 363
Avşar, Selman Fatih	260
Aydın, Güneş	85
Ayyıldız, Hanife	118
Balaban, Muzaffer	106
Bedir, Said	55
Boran, Emre	172
Bülbül, Abdullah	315
Can, Abdülkadir	129
Can, Özer	399
Can, Salih	432
Canberi, Haluk	237
Candan, Muhammed Yusuf	94
Cevher, Fırat Yılmaz	466
Çadallı, Nail	411
Çakıcı, Ferit	272
Çekinel, Recep Fırat	140
Çınar, Göktuğ	303
Çilden, Erkin	140, 226, 237, 248
Çobanoğlu, Hüseyin	399
Doğan, Aydın	172
Doğru, Ali Hikmet	129
Dökme, Çağlayan	444
Durna, Emre	490
Düzgünoğlu, Diren	387
Ekiz, Yusuf Kürşat	183
Erdik, Atıl	55
Ergezer, Halit	152
Ergün, Reyhan	411
Erleblebici, Volkan	421
Erten, Abdullah Alphan	387
Gökalp, İdil	432, 444
Gökçen, Dinçer	193
Gökçe, Harun	226
Görür, Bilge Kaan	363, 375
Güç, Ahmet Furkan	284

Güçlü, Burak	399
Gültekin, Emre	140
Güngen, İbrahim	183
Gür, Özlem	162
Güzel, Bilal	399
Hajizada, Elvin	432
İlaslan, Salih	499
İmre, Kayhan M.	375
Karadağ, Mevlüt	476
Karagöz, Pınar	140
Kavak, Halil	94
Kaya, İbrahim	183
Köklücan, Semih	43
Köktürk, Tolga	31
Köse, Serdar	432, 444
Köse, Songül	55
Küçüker, Faruk Umut	327
Leblebicioğlu, M. Kemal	43, 260, 272, 466
Mızrak, Mustafa	456
Muhiddinoğlu, Abdullah Alp	339
Muratoğlu, Simge Melis	75
Narman, Ahmet	432
Oğuztüzün, Halit	140, 375
Özbey, Muzaffer	432
Özbilge, Kubilay	152
Özçakmak, İsa	162
Özdemir, Onur	204, 215
Özkan, Ayşe Dilek	215
Özkan, Gökçe	226, 237
Özkaymak, Serkan	293
Pakfiliz, Ahmet Güngör	351
Poyraz, Doğan	140
Saydam, Talha	4
Sayın, Merve Büşra	293
Sever, İzel	260, 272
Sezer, Ahmet	237, 248
Shabani, Raha	260, 272
Sönmez, Tolga	432, 444
Suat, Yunus	204
Şahin, Kaan	284
Şakar, Hilal	162
Şanal, Mustafa Gökhan	490
Tatar, Ahmet Burak	16
Tekinalp, Ozan	339
Temiz, Yusuf Ziya	172
Tola, Ceyhun	75
Turhan, Hasan İhsan	162
Ural, Gökçen	129

Uysal, Umut	399
Yakut, Oğuz	16
Yargıçoğlu, Ahmet Utku	65
Yayla, Koray	339
Yet, Barbaros	327
Yıldırım, Baran	31, 118
Yıldırım, Taylan Özgür	456
Yılmaz, Büşra	248
Yumrukçal, Zafer	284
Zorba, Hürkan Orkun	293