



Ahşap Sütunlu Camilerin Taşıyıcı Sistem Performansı: Hanönü Yukarı Küreçayı Cami Örneği

Gülşah ÇELİK BAŞOK¹, Aslı ER AKAN², Sevilay ZAMUR KOÇAK³, Hilal Tuğba ÖRMECİOĞLU⁴

gulsahcelik@cankaya.edu.tr, aslierakan@cankaya.edu.tr, sevilay.kocak@teias.gov.tr, ormecioglu@akdeniz.edu.tr,

¹Department of Architecture, Faculty of Architecture, Çankaya University, Ankara, 06530, Turkey.

²Department of Architecture, Faculty of Architecture, Çankaya University, Ankara, 06530, Turkey.

³Construction Directorate, Department Chairmanship of the Transformer Centers' Facility, General Directorate of the TEİAŞ (Turkish Electricity Transmission Corporation), Ankara, Turkey. E-mail:

⁴Department of Architecture, Faculty of Architecture, Akdeniz University, Antalya, 07070, Turkey.

Corresponding author: Aslı ER AKAN, aslierakan@cankaya.edu.tr

ÖZET

Kültür mirasımızın en önemli parçası olan tarihi yapıların korunarak sürdürülebilirliğinin sağlanması strüktürel davranışlarının bilinmesini zorunlu kılar. Özellikle deprem kuşağında yer alan ülkemiz için tarihi yapıların deprem performansları oldukça önemlidir. Bu yapıların gelecek nesillere sağlıklı bir şekilde aktarılabilmesi için, yeni nesil simülasyon teknikleri ile yapısal olarak hassas noktalar saptanabilmektedir. Bu kapsamda bu çalışmada tarihi yapılar arasında yapım tekniği ve özgünlük açısından önemli bir yer tutan ahşap sütunlu camilerden bir örnek incelenmiştir. Alan çalışması olarak çok sayıda ahşap sütunlu camiye ev sahipliği yapan ve deprem bölgesinde yer alan Kastamonu-Hanönü Yukarı Küreçayı Cami seçilmiş ve Camii'nin yapısal davranışlarını ve depreme karşı dayanımlarını belirlemek için yapısal analizler yapılmıştır. Yapılan 3 boyutlu sonlu elemanlar analizlerinin değerlendirilmesiyle caminin yapısal performansı ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Ahşap Sütunlu Camii, Küreçayı Cami, Sonlu Elemanlar Yöntemi

Structural Performance of Timber Hypostyle Mosques: Hanönü Yukarı Küreçayı Mosque

ABSTRACT

Preserving and ensuring the sustainability of historical buildings, which are the most important part of our cultural heritage, requires knowledge of their structural behavior. Especially for Turkey, which is located in an earthquake zone, earthquake performances of historical buildings are very important. In order to transfer these structures to future generations in a healthy way, structurally sensitive points can be determined with new generation simulation techniques. In this context, an example of timber hypostyle mosques, which have an important place among historical buildings in terms of construction technique and authenticity, was examined in this study. Kastamonu-Hanönü Yukarı Küreçayı Mosque, which is located in the earthquake zone and hosts many timber hypostyle mosque, was selected as the case study. Structural analyzes have been made to determine the structural behavior of the mosque and its resistance to earthquake. The structural performance of the mosque was revealed with the evaluation of the 3 dimensional finite element analysis.

Keywords: Timber Hypostyle Mosques, Earthquake Performance, Hanönü Yukarı Küreçayı Mosque, Finite Element Analysis

1. GİRİŞ

Tarihi değeri olan yapıların gelecek kuşaklara güvenle aktarılabilmesi için günümüz teknolojik olanakları kullanılarak analiz ile değerlendirilmesi için çok sayıda bilimsel çalışma yapılmıştır. Bu araştırmalar özünde yapının mevcut durumunu uygun bir matematiksel model haline getirerek olası sismik hareketlere karşı performansının



ölçülmesi esasına dayanmaktadır.

Tarihi yapıların matematiksel model haline getirilmesi oldukça zor olmakla birlikte var olan yapının birebir dijital modelinin yapılması çoğu zaman mümkün değildir. Özellikle malzeme karakteristiklerinin muntazam olmaması ve bu malzemelerin zamanla maruz kaldıkları etkenlere karşı oluşacak fiziksel ve kimyasal dönüşümlerin tam olarak belirlenememesi hayati bir modelleme sorunudur. Ayrıca, ayrı mekanik karakteristiklere sahip yapı malzemelerinin birlikte kullanılmasıyla oluşturulan kompozit yapı elemanlarının (taş duvar = doğal taş + harç) son durumlarındaki mekanik karakteristiklerinin belirlenmesi de diğer bir modelleme sorunu olarak karşımıza çıkmaktadır (Çavuş, 2013).

Kültürel mirasımız olan bu eserlerin restorasyonu için yapılacak en detaylı modellemelerin bile, var olan yapının inşa edildiği tarihi dönemdeki teknolojik olanaklar dikkate alındığında geometrik biçimdeki düzensizlikleri ve yapım hataları başta olmak üzere materyal kalitesindeki rastgele seçimleri de dahil edecek şekilde belirlenmesi olası görünmemektedir. Ancak tarihi eser üzerinde yapılacak detaylı röleve ve ölçüm çalışmaları ile yapı geometrik biçimi büyük ölçüde belirlenebilmekte ve dijital model için altlık oluşturacak ölçüler çıkarılabilmektedir. Benzer şekilde materyal özelliklerin ortaya çıkarılması için de yapım sırasında kullanılan farklı cinsteki materyallerden örnek alınarak laboratuvar şartlarında temel mühendislik nitelikleri saptanabilmektedir.

Tarihi yapıların taşıyıcı sistem dayanımlarını analiz etmek amacıyla kullanılan üç boyutlu sonlu elemanlar tekniği yapının gerçek davranışını saptamak için yararlanılan en uygun hesap yöntemidir. Kompleks bir geometrik biçim çözümlemesi ve kullanılan materyal özellikler belirlendikten sonra tarihi ahşap sütunlu ve yığma yapıların yapısal davranışını analiz etmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır (Can ve Erkul, 2019).

Sonlu Elemanlar Metodu ya da Sonlu Elemanlar Yöntemi, kısmi diferansiyel denklemlerle açıklanan veya işlevsel minimizasyon olarak formüle edilen sorunları çözmek için yararlanılan bir sayısal yöntemdir. Sonlu Elemanlar Metodu uçak gövdesinin gerilme analizi için ilk kez 1956'da geliştirilmiş olup, takip eden on yıl içerisinde mühendislik ve uygulamalı bilimler sorunlarının çözümünde kullanılmaya başlanmıştır. Sonraki yıllarda bu yöntem ve ona bağlı çözüm teknikleri daha da geliştirilmiş ve bugün birçok mühendislik probleminin çözümü amacıyla kullanılan en yaygın yöntemlerden biri haline gelmiştir. Bugün dijital teknolojilerdeki ilerlemelere paralel olarak, yetkinleşen yapısal hesaplama ve analiz programları bu yöntemden yararlanarak kompleks modellerin tanımlanan yüklemeler altında gerçekliğe en yakın davranış biçimlerini bulmak için kullanılmaktadır (Can ve Yıldızoğlu, 2018).

Tarihi yığma yapıların matematiksel modeli tarihi yapının bütünü veya bazı bölümlerinin sonlu elemanlara ayrıştırılmasıyla modellenir. Modelleme sırasında tarihi yapıyı oluşturan strüktürel sistemler;


- Yapıya etkiyen yüklemeler
- Yapının geometrik boyutları
- Mesnet noktalarının rijitliği gibi öğelere ayrılarak modellenir.

Tarihi yapıların inşası sırasında kullanılan tarihi malzemeler net bir şartnameye göre üretilmediği için yapıda kullanılan aynı tür malzeme bile farklı özellikler gösterebilmektedir. Malzemenin fiziksel ve kimyasal nitelikleri taşıyıcı sistemin dayanım sınırlarını belirlemektedir. Zaman içerisinde tamirat ihtiyacı olan tarihi yapılara eklenen elemanlar kullanılan ilk materyalin özgün niteliklerinde olmadığı için materyalde zamanla aşınma ve korozyona sebep olur. Üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde tarihi yapının;

- Görelî yerdeğiştirmeleri
- Eğilme momenti
- Kesme kuvveti
- Burulma momenti gibi değerleri çok sayıda düğüm noktası kullanılarak hesaplanabilir

2. HANÖNÜ YUKARI KÜREÇAYI CAMİ GENEL ÖZELLİKLERİ

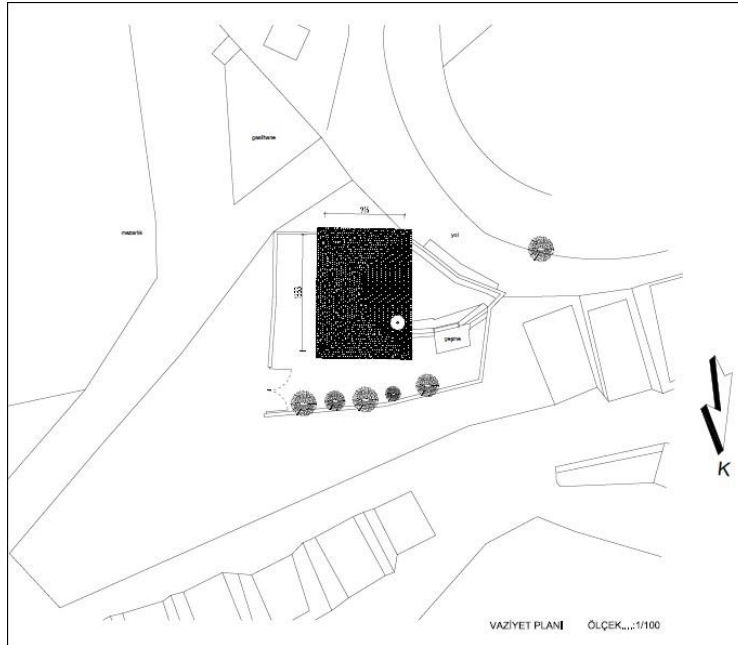
Bu araştırmada Selçuklular ile birlikte Anadolu'ya geldiğinde özgün bir mimari nitelik kazanan Orta Asya ahşap sütunlu yapı tipolojisinin dönüşmüş hali olan ahşap direkli camilerden, Kastamonu'da fay hattına yakınında konumlanan Hanönü Yukarı Küreçayı Camisinin sonlu elemanlar metodu ile sismik analizleri yapılarak strüktürel dayanımı incelenmiştir.

Yapı Adı: Hanönü Yukarı Küreçayı Cami	
Adres: Hanönü ilçesi, Yukarı Küreçayı Köyü	
Yapım Tarihi:1285	
Yapı Tipi: Dikdörtgen planlı camii	
Yapı Malzemesi: Ahşap.	
Yapı Kullanım Durumu: İbadete açıktır.	
İnceleme Tarihi: Ocak,2020	

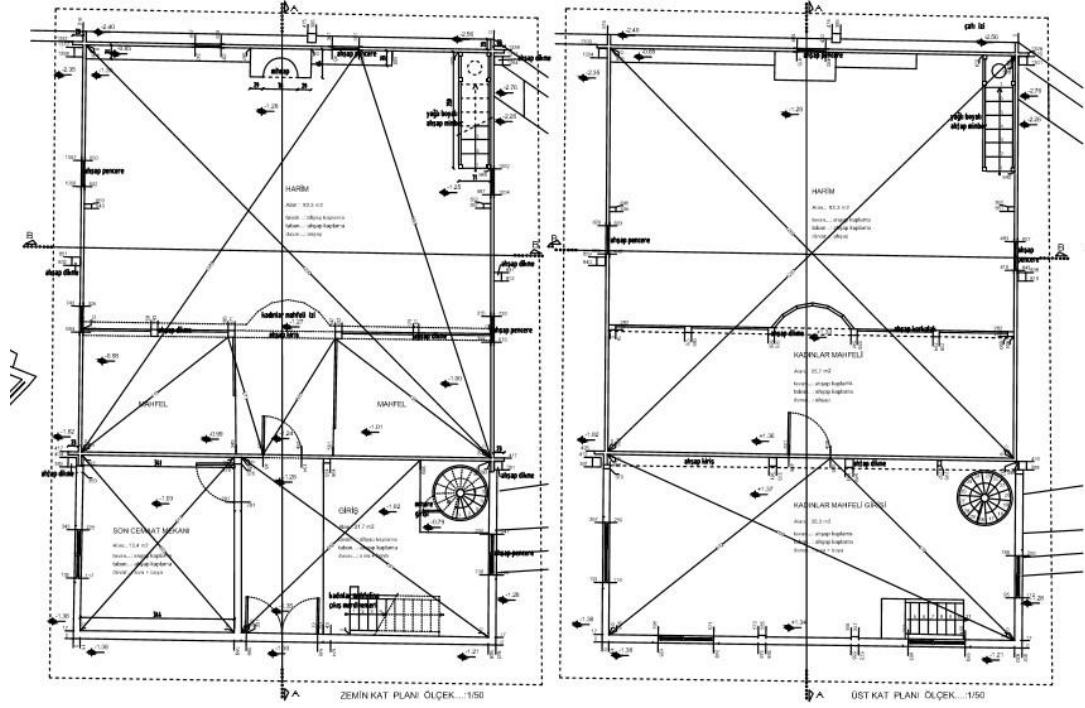
Şekil 1: Hanönü Yukarı Küreçayı Cami genel görünüm (Zamur Koçak, 2019)

Giriş kapısı üzerindeki bulunan yazıya göre 1285 yılında inşa edilen ve tamamı ahşap olan cami, Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nce 2012'de restore edilmiştir. Köy merkezindeki Hanönü Yukarı Küreçayı Cami halen kullanımdadır. Cami Kastamonu'dan ilçeye 80 km, Hanönü'nden ise Yukarı Küreçayı köyüne 15 km uzaklıktadır (Tunçay,2018). Çanti sistemi ile inşa edilen caminin beden duvarları 7 cm ahşap kalastan yapılmıştır (V.B.M.). Çatı sistemi Kuban tarafından ağaç kütükleriyle inşa edilen ve orman yakınlarındaki yerleşimlerde yaygın olarak rastlanan bir yapım tipi olarak tanımlanmıştır (Kuban,2013). Kısaca çanti sistemi ahşap elemanların yontulmadan ya da kereste olarak geçme yöntemiyle (çivisiz şekilde) birbiri üzerine dizilmesi (yığma olarak) ile yapılan bir yapım tekniğidir (Nefes,2019).

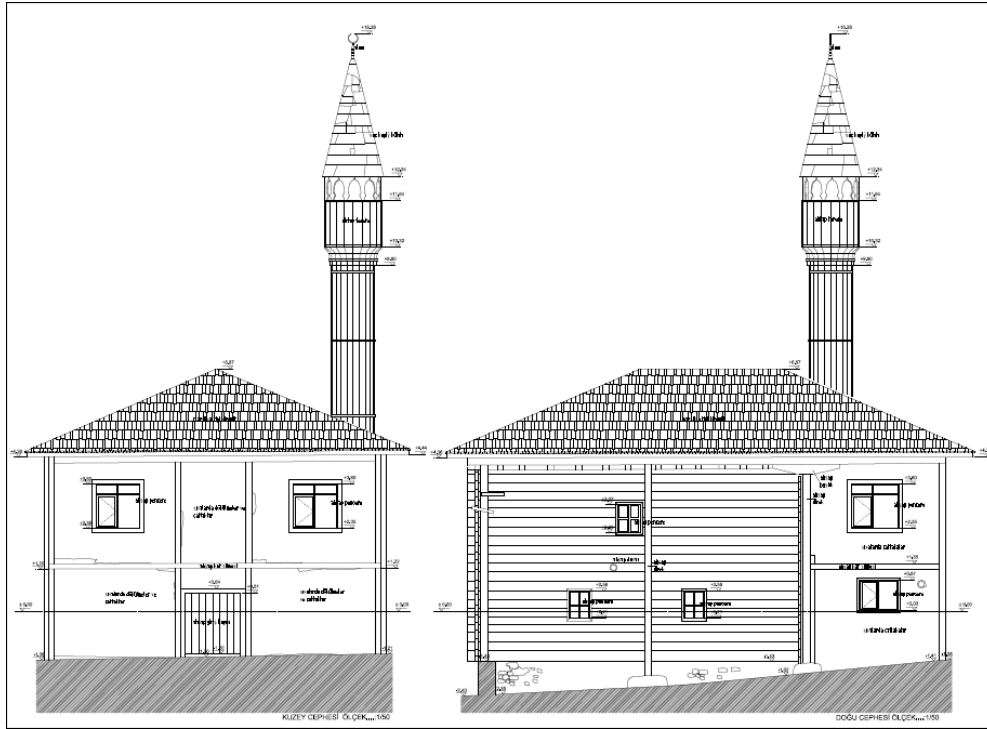
Caminin beden duvarları ile zemin döşemesi moloz taş duvarlar ile bağlanmaktadır. Harim bölümünün zeminini taşıyan kirişlerin başında bağlandığı ana ahşap kirişler her cephede, köşelerde ve ortada olmak üzere üç adettir. Böylece çatı örtüsünün yükü ahşap beden duvarları ile duvarları taşıyan kiriş ve ahşap dikmeler aracılığıyla temeldeki moloz taşlara iletilmektedir.



Şekil 2:Hanönü Yukarı Küreçayı Cami Vaziyet Planı (V.B.M.,2020).



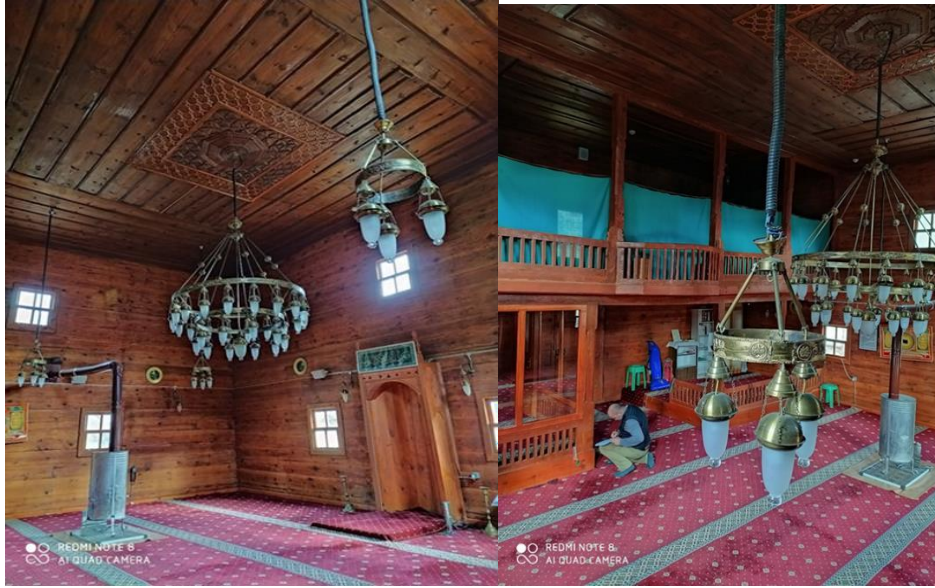
Şekil 3: Hanönü Yukarı Küreçayı Cami Zemin Kat ve Mahfil Kat Planları (V.B.M.,2020).



Şekil 4: Hanönü Yukarı Küreçayı Cami Kuzey ve Doğu cephesi görünüşleri (V.B.M.,2020).



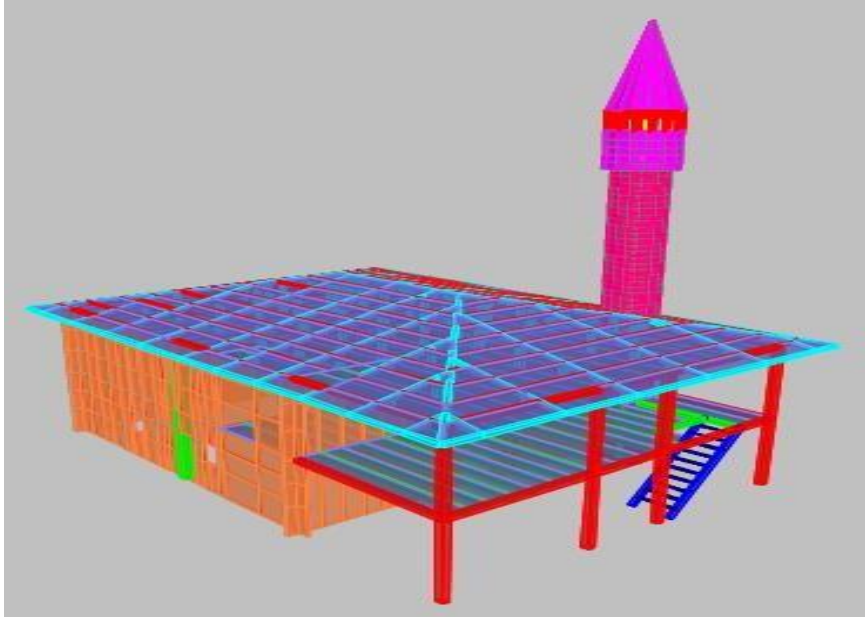
Şekil 5: Hanönü Yukarı Küreçayı Cami genel görünüm (Zamur Koçak, 2019).



Şekil 6: Kastamonu Hanönü Yukarı Küreçayı Cami harim ve tavan göbeği (Zamur Koçak, 2019).

3. HANÖNÜ YUKARI KÜREÇAYI CAMİSİ'NİN SONLU ELEMANLAR MODELİ VE ANALİZİ

Sonlu Elemanlar Yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde, yapıların farklı yük ve çevre etkilerine göre yer değiştirmeleri, burulma momentleri, eğilme momenti ve kesme kuvvetleri hesaplanabilir. Sonlu elemanlar yönteminde binanın veya yapı elemanlarının geometrisi sonlu sayıda düğüm noktası ile tespit edilmektedir. SAP2000 programının modelleme biçimi ve kuralları ile Yukarı Küreçayı Camisi sonlu elemanlar modeli üretilmiştir (Şekil 7). Bu tarihi binanın sonlu elemanlar analizinde, yapısal davranışının doğru olarak belirlenebilmesi için bu kez de çok sayıda düğüm noktasından yararlanılmıştır. Üretilen sonlu eleman modelinde 1858 adet SHELL (Kabuk) elemanı ve 771 adet FRAME (Çubuk) elemanı 2205 adet düğüm noktası kullanılarak oluşturulmuştur. Modellemede sırasında yararlanılan değişkenler ve kabuller maddeler halinde belirtilmiştir. Buna göre;



Şekil 8:Hanönü Yukarı Küreçayı Camisi'nin sonlu elemanlar modeli

Caminin harim bölümünü oluşturan beden duvarları 7 cm kalınlığında olan ahşap kalasların çatı tekniği ile harim yüksekliği kadar üstü üste yerleştirilmesiyle inşa edilmiştir. Ahşap kalaslar duvarların köşelerinde uçları çentik şeklinde şekillendirilerek dik olarak gelen diğer ahşap kalaslarla geçme yöntemiyle birbirine birleştirilmektedir. Fakat beden duvarını oluşturan her bir kalasın diğer kalas ile arasında fiziksel olarak birleşme oluşturması için kenet ve çivilerin gereken kadar sık kullanılmadığı belirlenmiştir. Bu durumu karşılayan bir matematiksel model yapmanın imkansız olması sebebiyle beden duvarları 7 cm kalınlığında ahşap kalasların tek parça olarak birbirine kenetlendiği fikri esas alınarak SHELL elemanlar ile modellenmiştir.

Harim bölümünü oluşturan 7 cm kalınlığındaki ahşap kalasları desteklemek ve çatıyı taşımak için yapıya daha sonra eklendiği düşünülen üç adet dikme ve aralarındaki ahşap kirişler ise beden duvarının bünyesinde olacak şekilde FRAME elemanlar ile dijital modele eklenmiştir.

Camide kadınlar mahfeli şeklinde kullanılan bölüm, harim bölümünde bir ara kat şeklinde inşa edilmiştir; ve kible cephesi dışındaki tüm cepheleri mahfilin 7 cm kalınlığındaki ahşap beden duvarları ile çevrilidir. Kible cephesinde ise 4 adet ahşap sütun ile bunları birbirine ve yanlardaki beden duvarlarına yapısal olarak bütünleştiren ahşap kirişler bulunmaktadır. Mahfel katının ahşap strüktürü harimin son kotuna kadar uzatılmış ve aynı zamanda kadınlar mahfelinin çatı tabliyesini oluşturmuştur. Modelde ahşap dikmeler 150/150, ahşap birincil kirişler 150/140 ve ahşap ikincil kirişler 120/140 boyutunda, ahşap tabliye de 20 mm kalınlığında modellenmiştir.

Yapıda hem kadınlar mahfeli girişi hem de son cemaat kısmı olarak kullanılan bölüm; cephenin üç yönünde ahşap kolon ve kirişlerin teşkil ettiği çerçeve sistemi kible cephesinde ise harim beden duvarı ile oluşturulmuştur. Bu bölümün kuzey batı cephesinde kadınlar mahfeline bağlanan bir merdiven güney-batı cephesinde ise minare vardır. Bu bölümdeki ahşap dikmeler 150/180, ahşap birincil kirişler 180/140, 150/140 ve ahşap ikincil kirişler 120/140 ebadında, ahşap tabliye ise 20 mm kalınlığında modellenmiştir.

Son cemaat bölümünün güney batı yönündeki minare merkezde 170 mm çapında dairesel bir ahşap kütük etrafında 4 cm et kalınlığındaki ahşap kalaslar ile 120 cm çapında oluşturulmuş bir dış kabuğun 2 cm kalınlığındaki ahşap merdiven basamakları ile bağlanması ile inşa edilmiştir. Ana taşıyıcı ahşap dikmenin çevresinde spiral şekilde şerefe

kotuna kadar ulaşan minare strukturu bu kotta genişleyerek 160 cm çapına gelir ve buradan minare külahı alt kotuna kadar bu çapta devam eder.

Modelde caminin üst örtüsü ahşap bir oturtma çatı şeklinde oluşturulmuş ve %30'luk bir çatı eğimi ile harimin en üst noktasından ahşap taşıyıcı sisteme ve beden duvarlarına dikmelerle oturtulmuştur. Harim duvarlarından 80 cm saçak ile oluşturulan ahşap çatıda dikmeler ve birincil kirişler 100/100 ve 100/150 ahşap elemanlarla, aşıklar 50/100 ahşap kirişlerle modellenmiştir.

Ahşap birleşim noktalarında yeterli miktarda civata, çivi gibi rijit birleşim yöntemleri kullanılmamış olmasına karşın ahşap kirişlerin çantı tekniğine uygun olarak bağlanması nedeniyle modelde bu durum sürekliliği olan tüm birleşimlerin moment aktaran birleşim olarak yansıtılmıştır.

Cami yapısının temel sistemiyle bağlantısında harim bölümünün taban tabliyesini taşıyan ve harim beden duvarlarının -1.30 m altında bulunan birincil ahşap kirişler kullanılmıştır. Temel strüktürü bu kirişlerin mütemadi taş temel olarak inşa edilmiş olan sömellere paralel olarak oturtulması ile inşa edilmiştir. Ancak, yapının deprem davranışını belirleyen üst yapı tasarımı olduğundan taşıyıcının bu kısım modelleme dışında tutulmuştur.

Tarihi yapıdan malzeme numunesi olarak laboratuvar testlerine tabi tutma şansı bulunmadığından, ahşap elemanların materyal nitelikleri uluslararası literatürde benzer yapılar için daha önce yapılmış çalışmalarda kullanılmış değerlerden faydalanılarak belirlenmiştir. Bu değerler mevcut deprem yönetmeliğinin ahşap yapılar için önerilen rakamları esas alınarak modele yansıtılmıştır (Tablo 1).

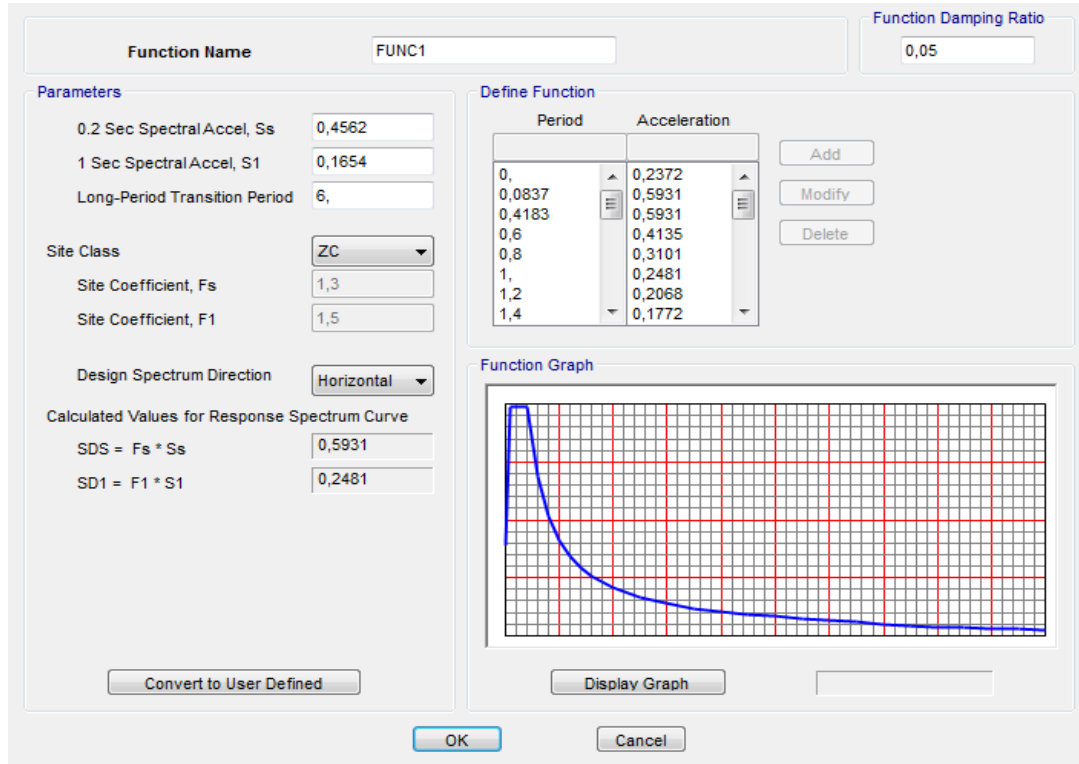
Tablo 1: Küreçay Camisi Sonlu Elemanlar Modelindeki Malzeme Özellikleri

Eleman Tipi	Elastisite Modülü E (kN/m ²)	Özgül Ağırlık (kN/m ³)	Kütle (t/m ³)
Ahşap Sütunlar	9000000 (9000 MPa)	5	0.50
Ahşap Kirişler	9000000 (9000 MPa)	5	0.50
Ahşap Duvar Elemanları	9000000 (9000 MPa)	5	0.50

Yapının beden duvarlarında kullanılan çantı tekniği sayesinde bütünleşen ahşap kalas yapı elemanlarının aralarındaki bağlantı elemanlarıyla tek bir malzeme gibi davrandığı varsayılarak makro modelleme prensibine uygun şekilde modellenmiştir.

Yapılan hesap modeline, sabit yükler ile sismik spektrum ile belirlenmiş yer hareketinin meydana getirdiği zorlamaların dikkate alındığı iki ayrı yükleme fazı uygulanmıştır. Deprem etkileri iki ayrı asal doğrultuda spektrum, EQx ve EQy yükleme olarak dijital modele üzerine uygulanmıştır. Sonuçların değerlendirilmesinde kolaylık sağlanabilmesi için, önce G + EQy (Sabit yükler + y ekseninde deprem yükleme) ve sonra G + EQx (Sabit yükler + x ekseninde deprem yükleme) olmak üzere iki farklı yük kombinasyonu tanımlanmıştır.

Sismik etkilerinin tanımlandığı spektral hesap sırasında ise ilk 50 mod hesaba dahil edilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8: Analizde Kullanılan Spektrum Eğrisi

4. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Hanönü Yukarı Küreçayı Camisi için bu çalışma kapsamında hazırlanan sonlu elemanlar modelinde literatürde yumuşak ahşaplara (köknar, ladin, karaçam, çam vb.) göre belirlenen materyal karakteristikleri kullanılarak gerilme kontrolleri yapılmıştır. Bu kapsamda C14 den başlayarak C50 ye kadar değişen yumuşak ahşap sınıflandırmasından C18 sınıfı masif ahşap değerleri çalışma konusu camide kullanılan düşük bir ahşap sınıfına karşılık gelmesi uygun bulunarak hesaplarda bu değer kabul edilmiştir. Bugün kullanılmakta olan Deprem Yönetmeliği ve TS EN 1995 standardına göre C18 sınıfı ahşap yapı elemanlarının en yüksek basınç dayanımı $f_{b,min} = 2.2$ Mpa olarak belirlenmiştir (Tablo 2). Aynı yönetmelikte güvenlik katsayısı masif ahşap için 1.3 olarak tanımlandığından;

en yüksek izin verilen basınç dayanımı $f_{b,min} = 2.2 / 1.3 = 1.7$ Mpa olarak alınmalıdır. Benzer şekilde;

en yüksek izin verilen eğilme dayanımı $f_{e,min} = 18 / 1.3 = 13.8$ Mpa en yüksek izin verilen çekme dayanımı $f_{ç,min} = 0.4 / 1.3 = 0.3$ Mpa

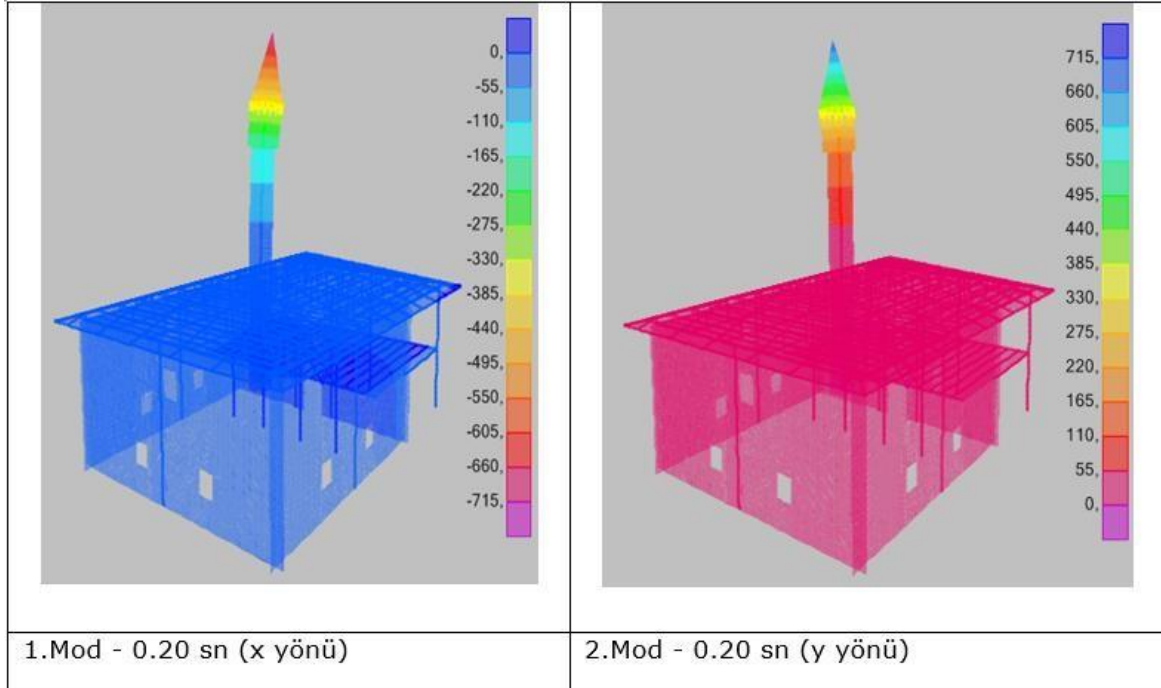
en yüksek izin verilen kayma dayanımı $f_{k,min} = 3.4 / 1.3 = 2.6$ Mpa olarak alınmalıdır.

Tablo 1: Ahşap Malzeme Grupları İçin Kabul Edilen Tasarım Dayanımları

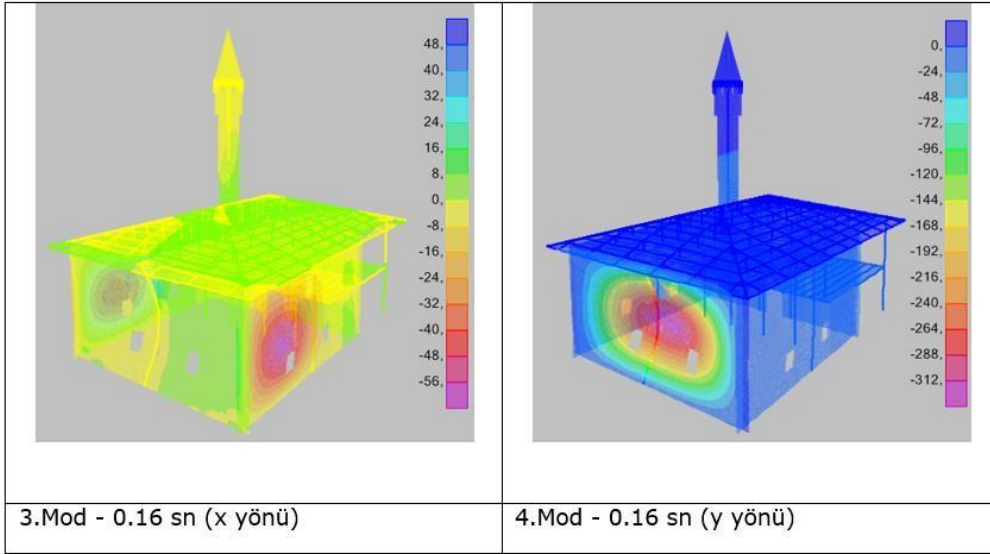
Ahşap Malzeme Sınıfı	:	C18
Malzeme Eğilme Dayanımı	:	18 Mpa
Malzeme Çekme Dayanımı (Liflere paralel)	:	11 Mpa
Malzeme Çekme Dayanımı (Liflere dik)	:	0.4 Mpa
Malzeme Basınç Dayanımı (Liflere paralel)	:	18 Mpa
Malzeme Basınç Dayanımı (Liflere dik)	:	2.2 Mpa
Malzeme Kayma Dayanımı	:	3.4 Mpa
Malzeme Elastisite Modülü	:	9000 Mpa

Caminin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi sonucu ortaya çıkan mod biçimlerinden bazı modeller aşağıda verilmiştir. Bu mod biçimleri analiz edildiğinde ilk olarak yapının kalanına oranlar daha düşük rijitliği olan minarenin ilk modlara hakim durumda olduğu tespit edilmiştir. Her iki deprem yönündeki minare hareketi sonrasında camide harim kısmının 7 cm kalınlığındaki beden duvarların düzlem dışı hareketleri ise 3. ve 4.mod biçimlerini meydana getirmiştir.

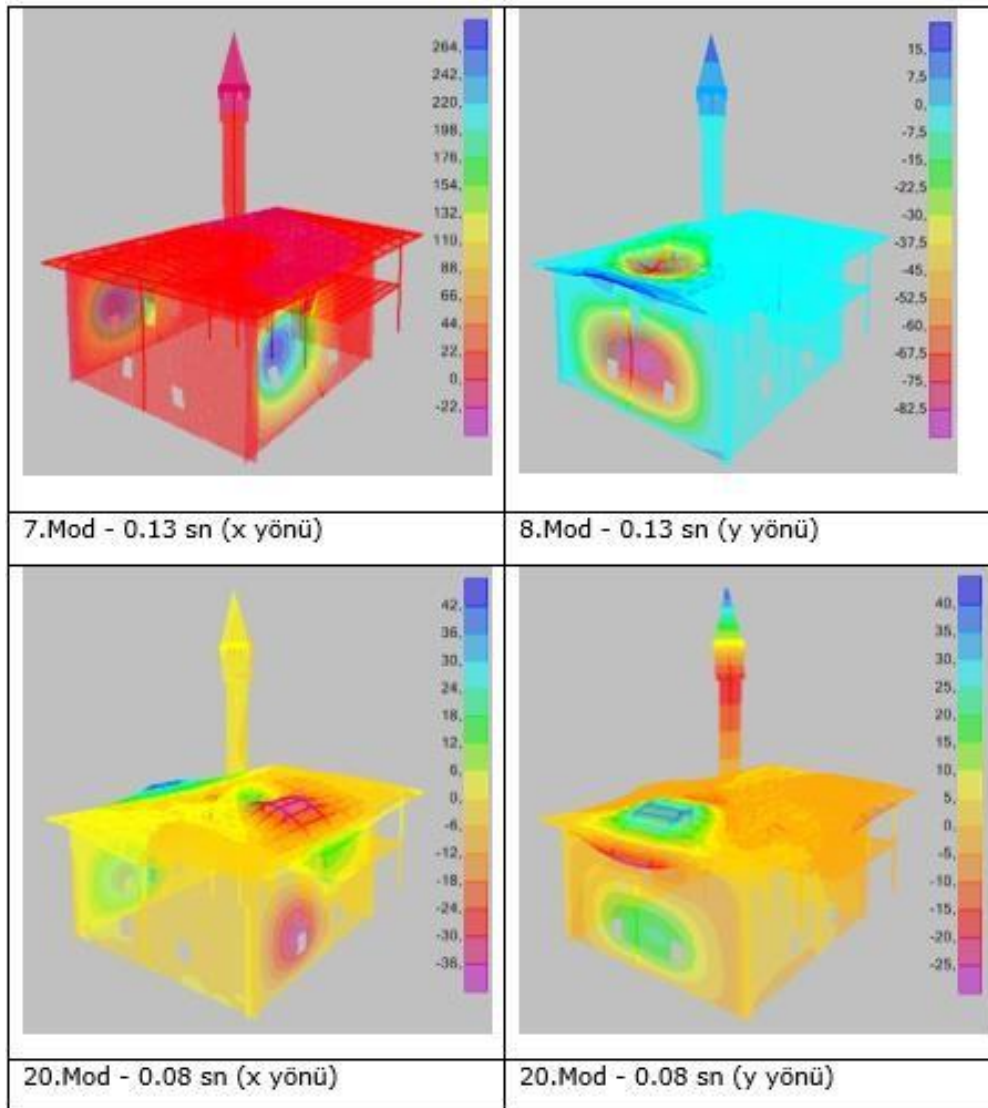
Bu durum harim kısmındaki bedeb duvarların kendi düzlemlerinde meydana gelen etkilere karşı beklenen derecede rijit olduğu fakat düzlem dışı dinamik ve statik kuvvetlere karşı diğer yapı elemanlarına kıyaslandığında daha az bir rijitliği olduğunu ortaya koymaktadır. Öteki mod biçimlerinde de bu durumun sonuçları izlenmekte, yapıda tüm mod biçimleri altında baskın bir çerçeve davranışı gözlenmemektedir.



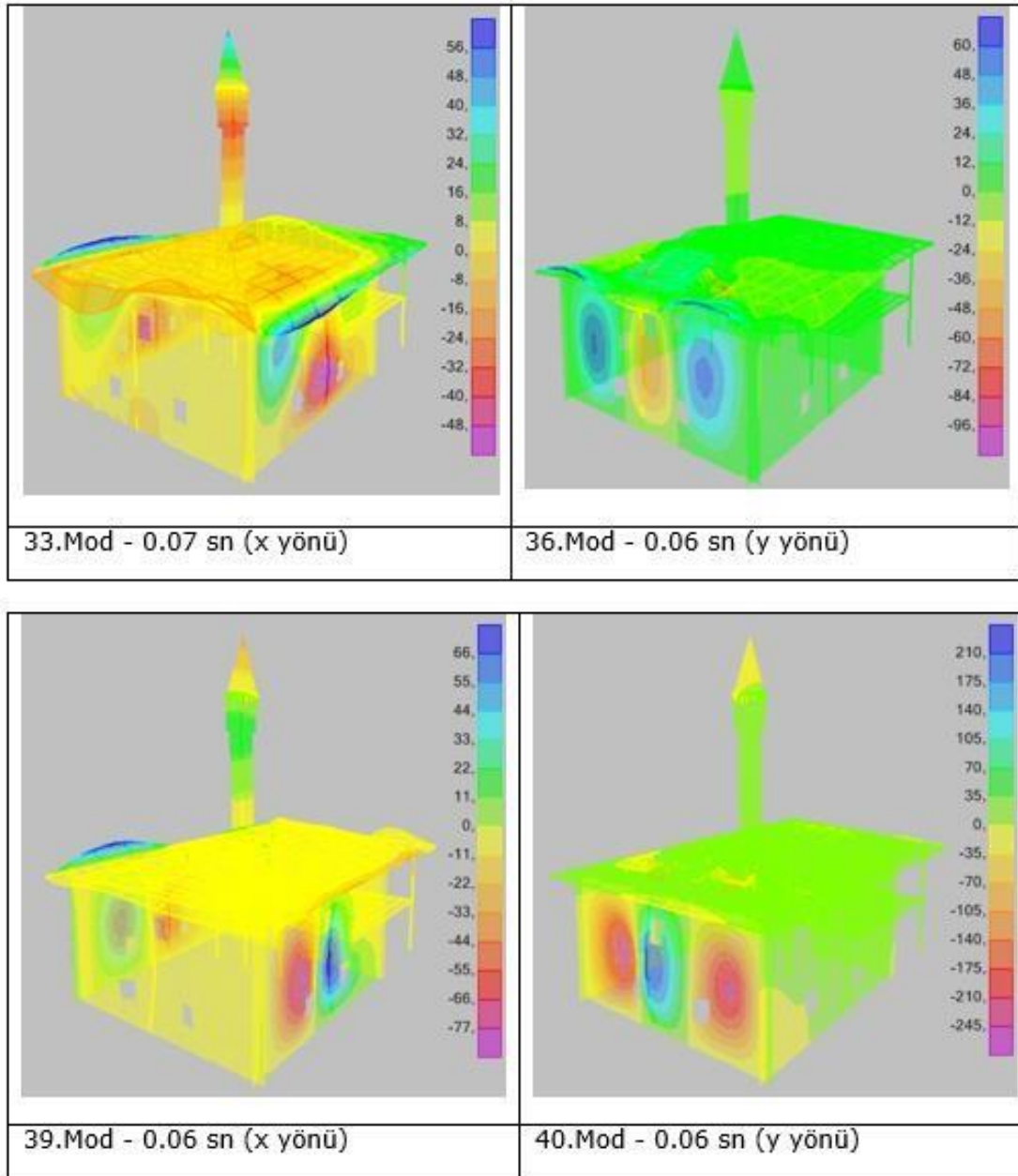
Şekil 9: Yapıya Ait 0.20.sn Meydana Gelen X ve Y Yönü Mod Şekli



Şekil 10:Yapıya ait 0.16.sn Meydana Gelen X ve Y Yönü Mod Şekli



Şekil 11: Yapıya ait 0.13 ve 0.008 sn. meydana gelen x ve y yönü mod şekli



Şekil 12:Yapıya ait 0.07 ve 0.006 sn. meydana gelen x ve y yönü mod şekli

Tablo 2:Modlara Göre Periyotlar ve Kütle Katılımları

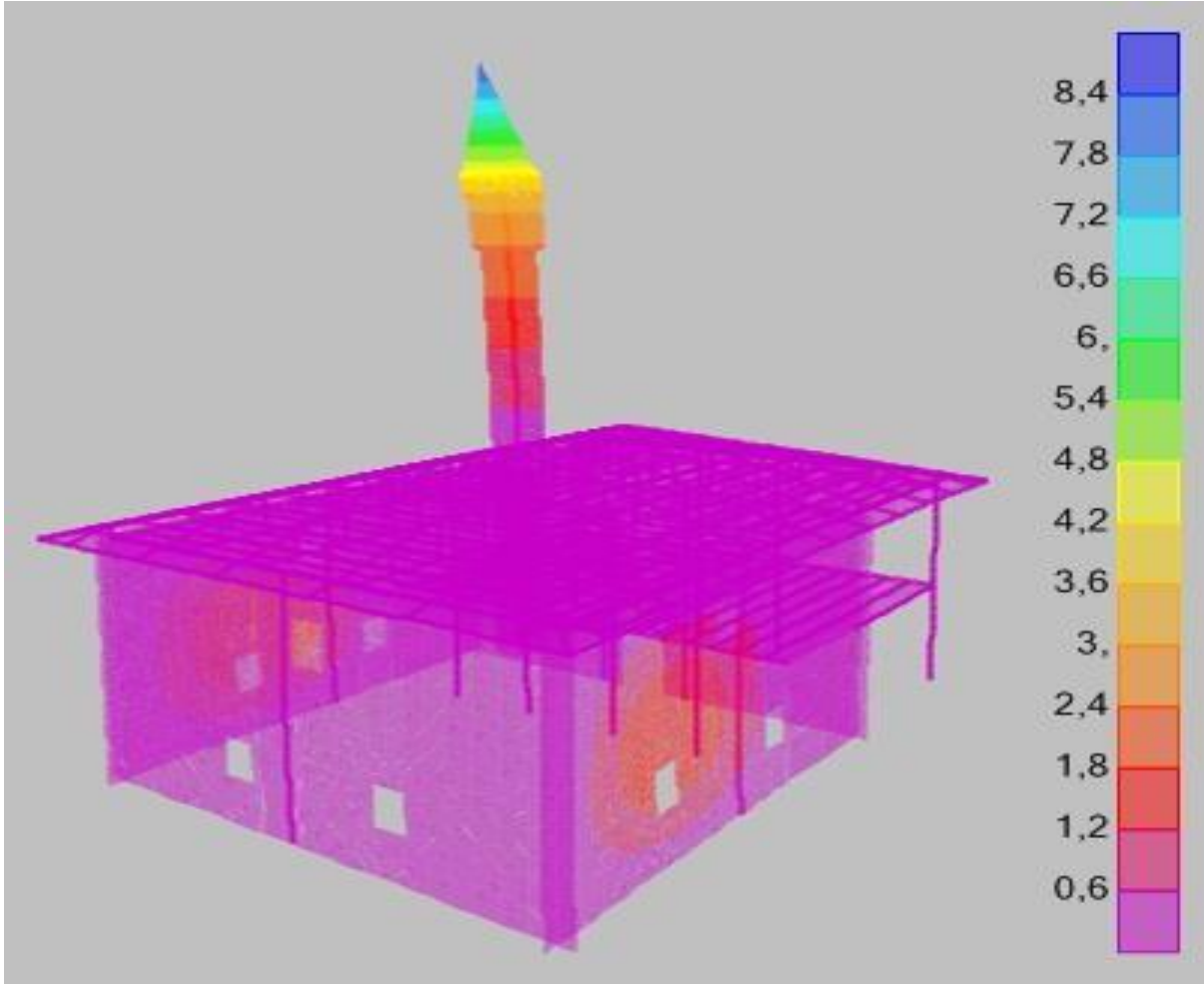
OutputCase	StepType	StepNum	Period	SumUX	SumUY
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	0.20	0.004	0.016
MODAL	Mode	2	0.20	0.025	0.019
MODAL	Mode	3	0.16	0.025	0.045
MODAL	Mode	4	0.15	0.027	0.045
MODAL	Mode	50	0.06	0.760	0.850

SEM analizlerinde caminin toplam ağırlığı 840 kN iken güneydoğu-kuzeybatı (modele göre Y yönü) doğrultusunda uygulanan deprem etkisi altındaki toplam taban kesme kuvveti 101 kN ve güneybatı-kuzeydoğu (modele göre X yönü) doğrultusunda uygulanan deprem etkisi altında meydana gelen toplam taban kesme kuvveti 82 kN, olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre caminin etkilendiği taban kesme kuvvetleri, X ve Y yönünde yapının toplam ağırlığının %10'una karşılık gelmektedir.

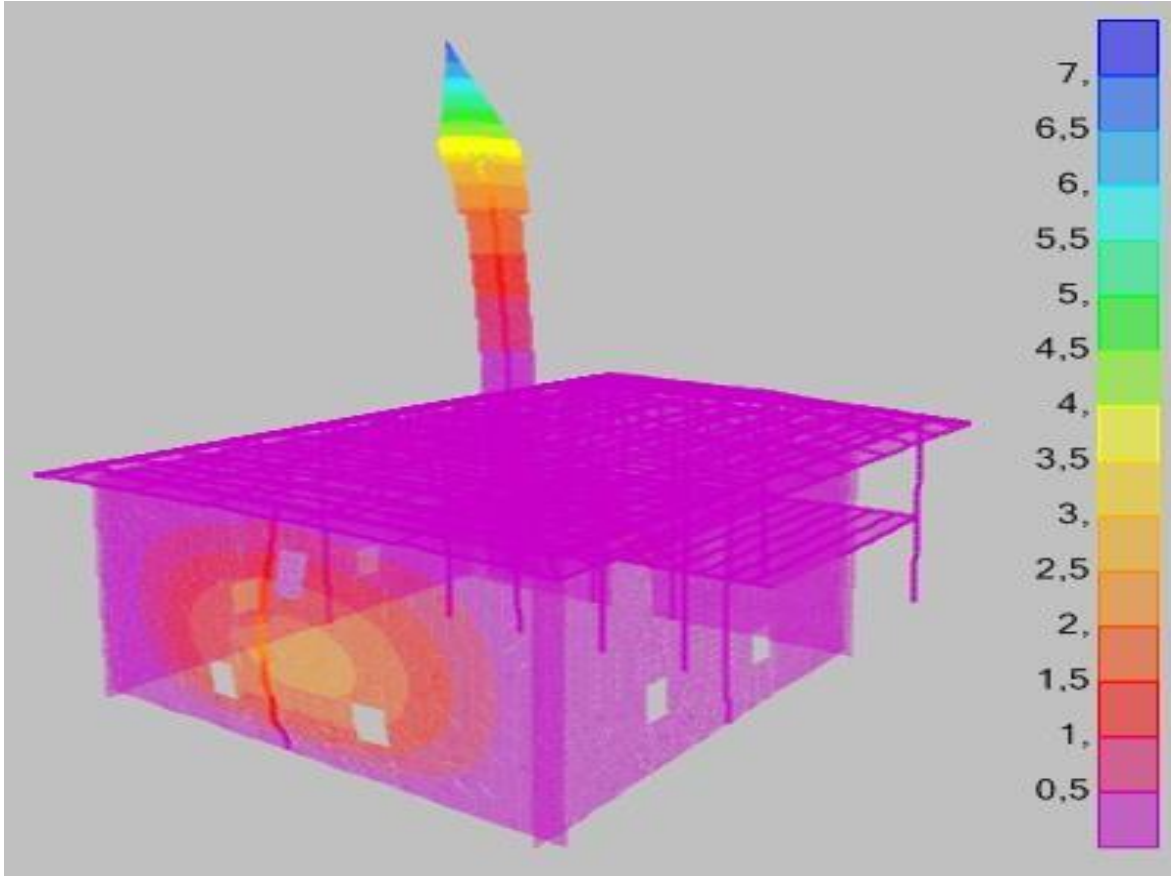
Elde edilen analiz sonuçları değerlendirilirken strüktürel açıdan en dikkat çekici kriterlerden biri görelî kat deplasmanının sınır değerden az olması gerektiğidir.

Analiz sonucunda camide X yönündeki deprem yüklemesi ile oluşan en büyük ötelenme minarede $\Delta x=8.6$ mm, harim duvarlarında $\Delta x=1.80$ mm olarak belirlenmiştir. Y yönündeki deprem yüklemesi ile oluşan en büyük ötelenme ise minare için $\Delta y=7.3$ mm, harim duvarları için $\Delta y=2.2$ mm şeklindedir (Şekil 13-14).

Yapıda oluşan en yüksek yer değıştirme (deplasman); minare için x yönünde $\Delta x=8.6$ mm, harim için ise $\Delta y=2.2$ mm şeklinde meydana geldiğı tespit edilmiştir. Deprem Yönetmeliğı'ne göre $(\delta_i / h_i) * (R / I) < 0.005$ olmalıdır.



Şekil 13: Deprem Yüklemesi Sonucunda X Yönünde Oluşan Ötelenmeler (mm)



Şekil 14. Deprem Yüklemesi Sonucunda Y Yönünde Oluşan Ötelenmeler (mm)

Üstte verilen denklemde;

δ_i : elde edilen en yüksek kat ötelenmesi değeri, h_i : Kat yüksekliği

R: Yapı davranış Katsayısı (Bu cami için 3.0 alınmıştır.) I: Bina Önem Katsayısı (Bu cami için 1.2 alınmıştır.)

Minarede ; $(8.6/16220) * (3.0/1.2) < 0.005$ $0.0013 < 0.005 \checkmark$ Sağlanmıştır.

Harimde ; $(2.2/3210) * (3.0/1.2) < 0.005$ $0.0017 < 0.005 \checkmark$ Sağlanmıştır.

Bu analizler, gündemdeki en güncel yönetmelik kısıtlamaları ile en düşük materyal dayanımları açısından alınarak yapılmalarına rağmen, incelenen camii strüktürünün genel bütünlüğü açısından istenilen rijitlik koşullarını sağladığını göstermektedir.

Bu genel yapısal davranış kontrolünün ardından sonra cami strüktürünü oluşturan materyallerdeki iç kuvvetlerin yönetmeliklerde izin verilen sınır değerlerin üzerine çıkmadığının kontrol edilmesi gerekir.

Bu kapsamda harim duvarlarını meydana getiren 7 cm kalınlığındaki ahşap kalasların bünyelerinde meydana gelen gerilme diyagramları incelenmiştir. MPa biriminde verilen bu gerilme değerleri için;

en yüksek eğilme dayanımı $18 / 1.3 = 13.85$ MPa

en yüksek basınç dayanımı $2.2 / 1.3 = 1.69$ MPa

en yüksek çekme dayanımı $0.4 / 1.3 = 0.31$ Mpa

en yüksek kayma dayanımı $3.4 / 1.3 = 2.62$ Mpa şeklinde belirlenmiştir.

Analiz sonucunda harim duvarında oluşan en yüksek basınç değeri $F_{22} = 40$ N olarak bulunmuştur (Şekil 15). Bu koşullar altında oluşan en yüksek basınç gerilmesi;

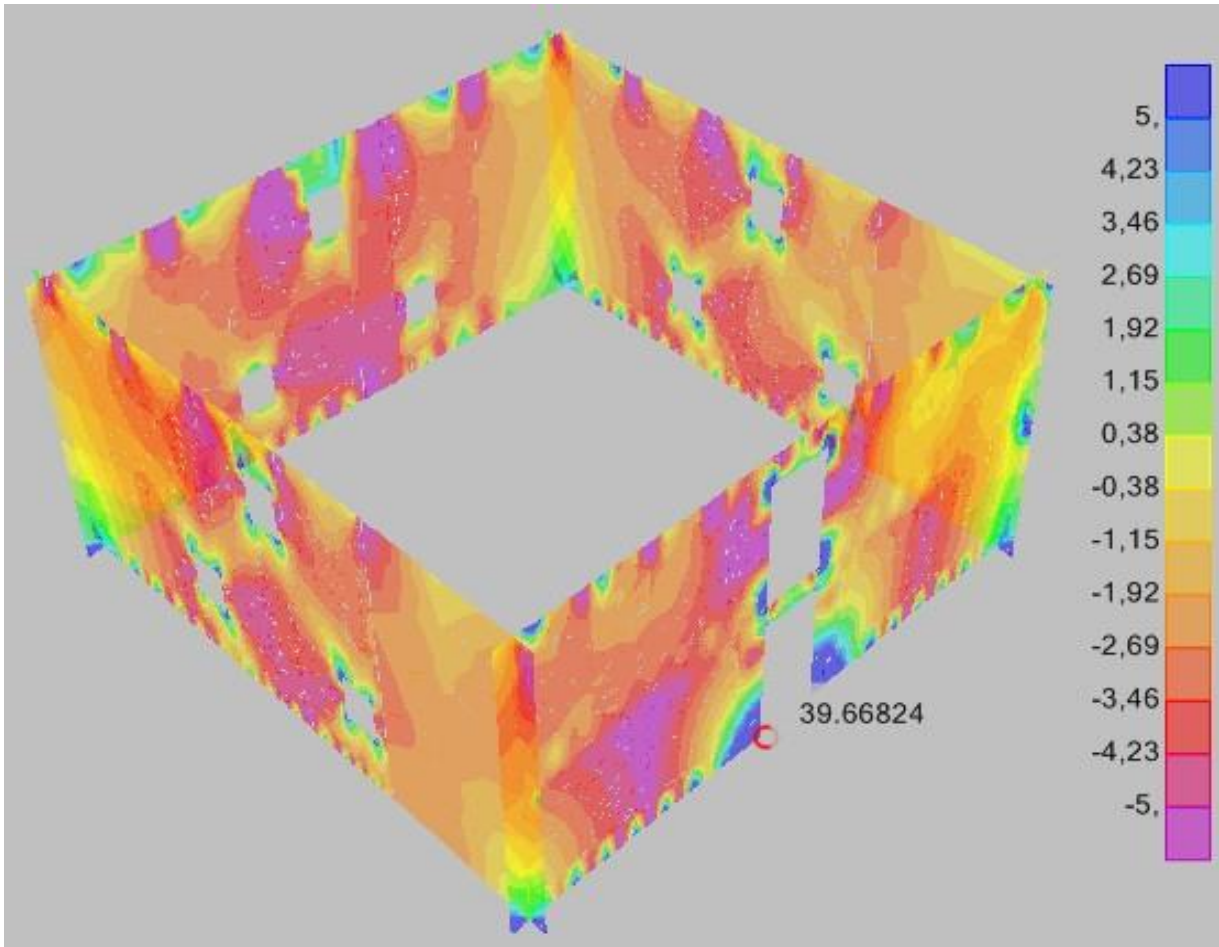
$f_b = F_{22} / A = 40/70 = 0.57$ Mpa < 1.69 Mpa'dir

Harim duvarında oluşan en yüksek çekme değeri $F_{11} = 18$ N olarak bulunmuştur (Şekil 16). Bu koşullar altında oluşan en yüksek çekme gerilmesi;
 $f_b = F_{22} / A = 18/70 = 0.26$ Mpa < 0.31 Mpa'dır.

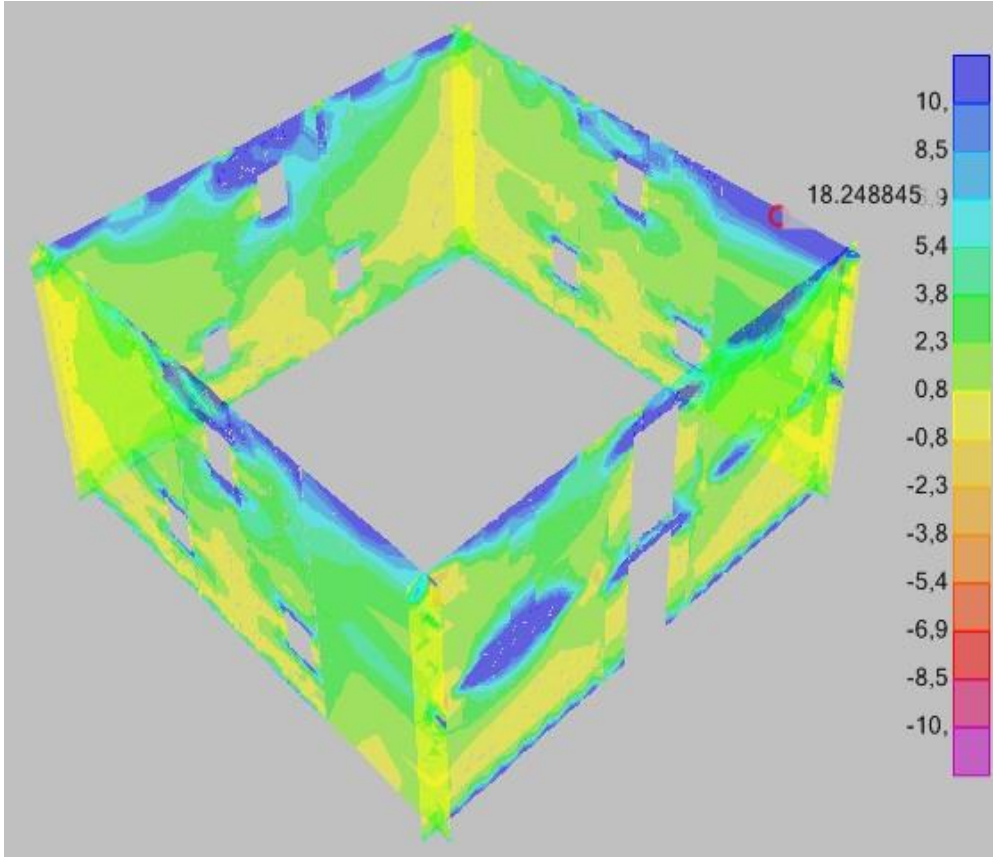
Harim duvarında 1-1 yönünde oluşan en yüksek eğilme momenti; $M_{11} = 1453$ N-mm olarak bulunmuştur (Şekil 17). Bu koşullar altında oluşan en yüksek eğilme gerilmesi;
 $f_e = M_{11} / W = 1453/(70^2/6) = 1.78$ Mpa < 13.85 Mpa'dır

Harim duvarında 2-2 yönünde oluşan en yüksek eğilme momenti; $M_{11} = 2328$ N-mm olarak bulunmuştur (Şekil 18). Bu koşullar altında oluşan en yüksek eğilme gerilmesi;
 $f_e = M_{11} / W = 2328/(70^2/6) = 2.85$ Mpa < 13.85 Mpa'dır

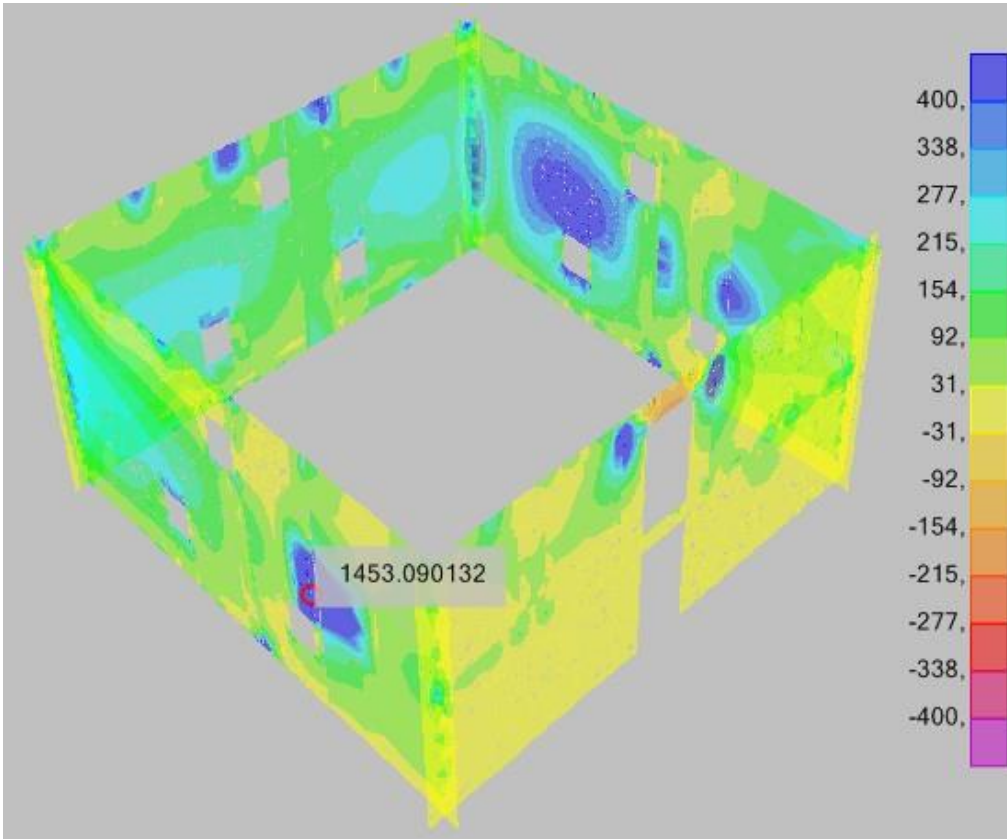
Harim duvarında oluşan en yüksek kayma değeri $F_{23} = 7.9$ N olarak bulunmuştur (Şekil 19). Bu koşullar altında oluşan en yüksek çekme gerilmesi;
 $f_b = F_{23} / A = 7.9/70 = 0.11$ Mpa < 2.62 Mpa'dır



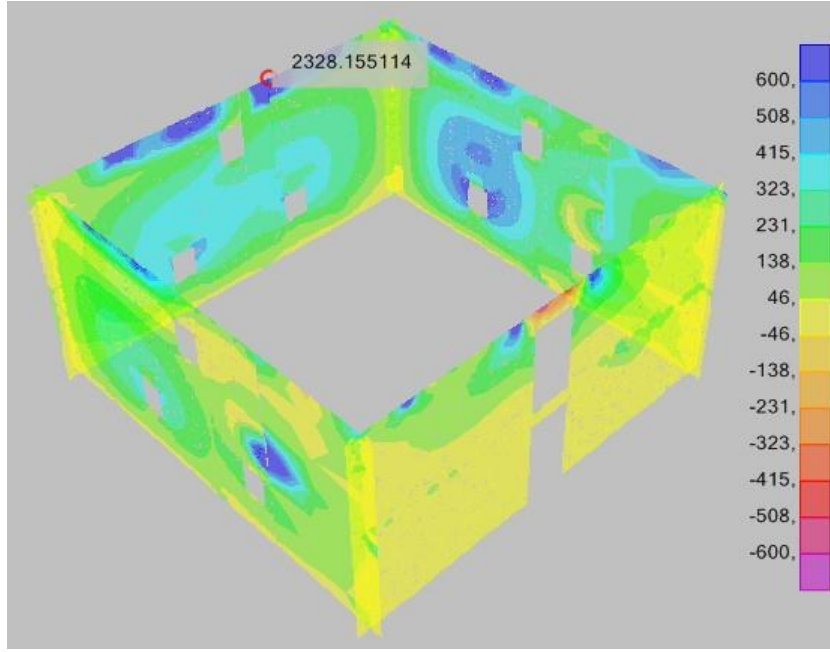
Şekil 15:Harim Duvarlarında Oluşan Basınç Kuvveti (N)



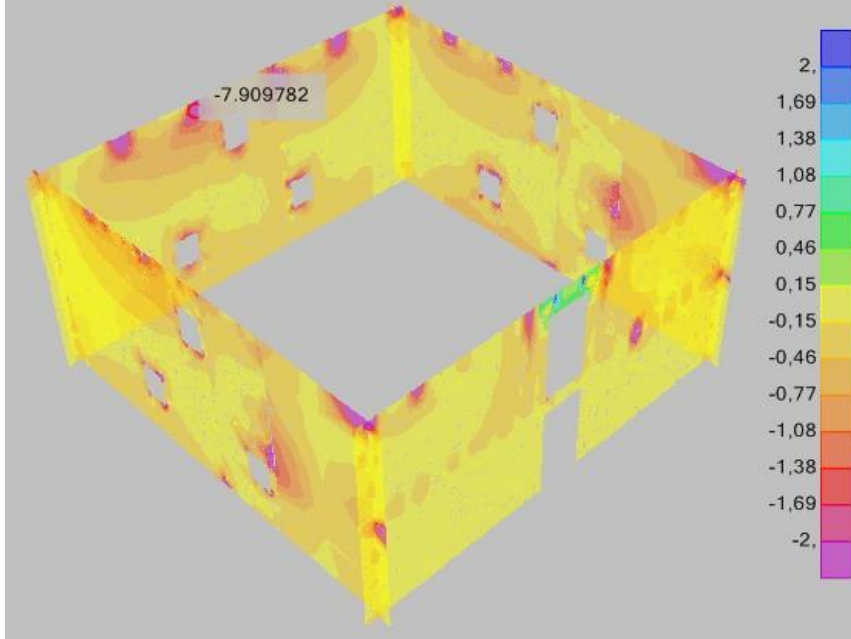
Şekil 16: Harim Duvarlarında Oluşan Çekme Kuvveti (N)



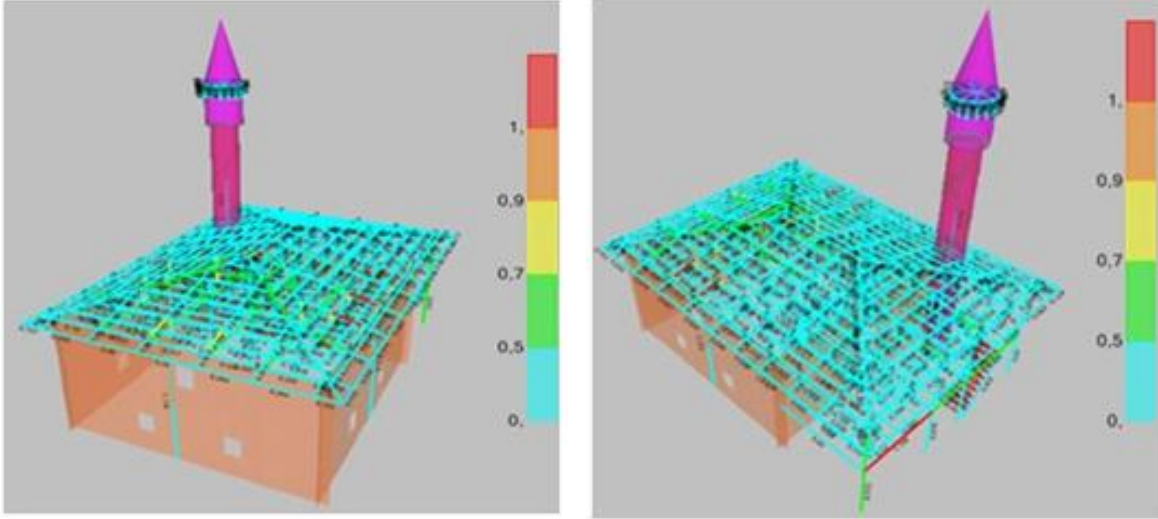
Şekil 17: Harim Duvarlarında Oluşan M_{1-1} Eğilme Momenti (N-mm)



Şekil 18: Harim Duvarlarında Oluşan M_{2-2} Eğilme Momenti (N-mm)



Şekil 19: Harim Duvarlarında Oluşan V_{2-3} Kesme Kuvveti (N)



Şekil 20: Frame Elemanların Gerilme Kontrolleri

Camide FRAME eleman olarak modellenen ahşap dikme ve kirişler ile çatı elemanlarının gerilme analizleri yapılmış (Şekil 20), ancak lokal gerilme aşımı belirlenen bazı yapı elemanları haricinde genel olarak camide kolon ve kirişlerin gerilme analizlerinde ve yer değiştirmelerinde sorun oluşturacak yetersiz bir dayanım tespit edilmemiştir.

Sonuçta, Hanönü Yukarı Küreçayı Camisi için yapılan sonlu elemanlar analizi neticesinde;

- Yazıda verilen gerilme diyagramlarında görüldüğü üzere mesnetlenmemiş plan duvar boyu büyük olan kısımlarda maksimum gerilme değerlerinin tipik döşemelerdeki gibi orta bölgede olduğu, gerilmelerin arttığı bölgelerin benzer şekilde pencere ve kapı boşluk kenarlarında olduğu görülmektedir. Kısaca; genel mühendislik kabulleri ile elde edilen analiz sonuçlarının uyumlu olduğu,
- Ahşap çatı için yapılan aksel yük ve kesme analizlerinde ise; caminin ilk yapıldığı dönemden kalan bırakma kirişi, bunun altındaki ahşap imalatlar ve her ikisini de taşıyan ahşap dikmeler ile bunların birleşim noktalarında yetersizlik olmadığı,
- Cami strüktürel performansı açısından en hayati kriterler sayılabilecek olan görece kat deplasmanı değerlerinin, güncel deprem yönetmeliğini bile sağlayabildiği için , genel yapı rijitliğinin iyi olduğu,
- Camide harim bölümünü oluşturan beden duvarların modellenmesinde moment aktaran mesnet tipi ve detaylar kullanılmasına rağmen şu anki durumda kalaslar arasında yük aktarımı için gereken bağlantı elemanı sayısının yetersiz olduğu,
- Her ne kadar analiz sonuçları yapının güvenli olduğunu gösterse de kalaslar arasında yük aktarımını sağlayan çivi kenet gibi bağlantı elemanlarının yeterli sıklıkta yeniden kullanılmasının yapı güvenliği için önemli olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Can, Ö., & Erkul, B.(2019). Ahşap Döşemeli Geleneksel Bayburt Evinin Deprem Performansının Belirlenmesi.
- Can, Ö., & Yıldızoğlu, H.(2018). Yığma Binalarda Deprem Performansının Belirlenmesi. Bayburt Üniversitesi.
- Çavuş, M.(2013).Tarihi Niksar Kulak Kümbetinin Deprem Altındaki Sismik Davranışının Değerlendirilmesi. Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi,7,80-90
- Kuban, D.(2013).Türk Ahşap Konut Mimarisi 17.-19.yüzyıllar. İş Bankası Kültür Yayınları. İstanbul
- Nefes, E.(2019). Sinop'ta Geleneksel Ahşap Köy Camileri. Kriter Yayınları. İstanbul.
- Tunçay, H.(2019). Anadolu'nun Ahşap Camileri. Tunçay Yayın. Ankara.