STOKASTİK MODELLEME YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN TARİHİ ERZURUM DEPREM KAYITLARI KULLANILARAK TARİHİ YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Dursun Burak ÖZDOĞAN

Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU
Eş Danışmanı: Prof. Dr. Ayşegül ASKAN GÜNDOĞAN

2024
Her hakkı saklıdır.

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

STOKASTİK MODELLEME YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN TARİHİ ERZURUM DEPREM KAYITLARI KULLANILARAK TARİHİ YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Dursun Burak ÖZDOĞAN

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU

Eş Danışman: Prof. Dr. Ayşegül ASKAN GÜNDOĞAN

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2024

Her hakkı saklıdır

T.C.

ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEZ ONAY FORMU

STOKASTİK MODELLEME YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN TARİHİ ERZURUM DEPREM KAYITLARI KULLANILARAK TARİHİ YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU danışmanlığında ve Prof. Dr. Ayşegül ASKAN GÜNDOĞAN eş danışmanlığında, Dursun Burak ÖZDOĞAN tarafından hazırlanan bu çalışma 27 / 11 / 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oy birliği (5/5)** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Habib UYSAL	*İmza*	:
Üye	: Prof. Dr. İlker KAZAZ	*İmza*	:
Üye	: Prof. Dr. Oğuz Akın DÜZGÜN	*İmza*	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU	*İmza*	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Muhammet GÜRBÜZ	*İmza*	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Doç. Dr. Bünyamin ÖZGERİŞ
Enstitü Müdürü

*Bu tez çalışması ……. tarafından ……. nolu proje ile desteklenmiştir.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

27 / 11 / 2024

İmzası

Dursun Burak ÖZDOĞAN

ÖZET

DOKTORA TEZİ

STOKASTİK MODELLEME YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN TARİHİ ERZURUM DEPREM KAYITLARI KULLANILARAK TARİHİ YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Dursun Burak ÖZDOĞAN

Erzurum Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU
Eş Danışman: Prof. Dr. Ayşegül Askan GÜNDOĞAN

Erzurum deprem tehlikesi bakımından Türkiye'nin en riskli şehirlerinden biridir. Şehir geçmişten bugüne büyük depremlere maruz kalmış ve bu depremlerden önemli ölçüde hasar almıştır. 2 Haziran 1859 tarihinde gerçekleşen 6,1 büyüklüğündeki deprem, Erzurum tarihinin en hasar verici depremi olarak arşiv kayıtlarına geçmiştir. Aletsel dönem öncesi gerçekleşen depremin ivme kaydının olmayışı bu yıkıcı depremi yorumlamayı oldukça zor hale getirmiştir. Literatürdeki hasar kayıtları incelendiğinde Erzurum'daki bazı tarihi camilerin ve çok sayıda mülkün bu depremde hasar almıştır. Bu tez çalışmasında Erzurum'un depremselliğinin inşaat mühendisliği açısından daha iyi anlaşılması gayesiyle 2 Haziran 1859 Erzurum depreminin stokastik modelleme tekniği kullanılarak sentetik deprem kaydının üretilmesi amaçlanmıştır. Üretilen sentetik deprem kaydının doğrulanması için bu depremi birebir yaşayan tarihi camilerin şahitliğine başvurulmuştur. Öncelikle literatürde 2 Haziran 1859 Erzurum depreminde hasar kayıtları net olarak bilinen ve hasar almış olma ihtimalinin yüksek olduğu düşünülen toplam 9 adet tarihi yığma cami seçilmiş ve bu yapıların sonlu eleman modelleri oluşturularak teorik modal analizleri yapılmıştır. Sonrasında bu analizler doğrultusunda camilerde operasyonel modal analiz uygulaması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra elde edilen dinamik davranış parametreleri kullanılarak camilerin sonlu eleman modelleri kalibre edilmiştir. Stokastik sonlu fay yöntemiyle üretilen 2 Haziran 1859 depreminin sentetik ivme kaydı camilerin sonlu eleman modellerine etkitilmiştir. Bu dinamik analizler neticesinde elde edilen performans değerlendirme sonuçları literatürde beyan edilen hasar kayıtlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu yöntemle sağlaması yapılan 2 Haziran 1859 Erzurum depremi için üretilen sentetik kayıt için PGA 0,19g, PGV 8,8 cm/sn ve PGD 2,5 cm olarak hesaplanmıştır. Depremin MMI şiddet ölçeği değerinin IX mertebesinde olduğu sonucuna varılmıştır.

2024, 416 sayfa

Anahtar Kelimeler: Erzurum, Sentetik deprem kaydı, Operasyonel modal analiz, Tarihi yığma cami, Stokastik yöntem

ABSTRACT

Ph.D

INVESTIGATION of THE DYNAMIC BEHAVIOR of HISTORICAL BUILDINGS USING HISTORICAL ERZURUM EARTHQUAKE RECORDS GENERATED BY STOCHASTIC MODELING METHOD

Dursun Burak ÖZDOĞAN

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Dilek OKUYUCU
Co.Advisor: Prof. Dr. Ayşegül ASKAN GÜNDOĞAN

Erzurum is one of the most risky cities in Turkey in terms of earthquake hazards. The city has been subjected to major earthquakes from past to present and has suffered significant damage from these earthquakes. The 6.1 magnitude earthquake that occurred on June 2, 1859 is recorded in the archives as the most damaging earthquake in Erzurum's history. The lack of acceleration records of the earthquake, which occurred before the instrumental period, made it very difficult to interpret this destructive earthquake. When the damage records in the literature are examined, some historical mosques and many properties in Erzurum were damaged in this earthquake. In this thesis, it is aimed to produce a synthetic earthquake record of the June 2, 1859 Erzurum earthquake using stochastic modeling techniques in order to better understand the seismicity of Erzurum in terms of civil engineering. In order to verify the generated synthetic earthquake record, the testimony of historical mosques that experienced this earthquake firsthand was used. First of all, a total of 9 historical masonry mosques, whose damage records are clearly known in the literature and which are considered to be highly likely to have been damaged in the June 2, 1859 Erzurum earthquake, were selected, and theoretical modal analyses were performed by creating finite element models of these structures. Then, operational modal analysis was performed on the mosques in line with these analyses. Then, the finite element models of the mosques were calibrated using the obtained dynamic behavior parameters. The synthetic acceleration record of the June 2, 1859 earthquake generated by the stochastic finite fault method was applied to the finite element models of the mosques. The performance evaluation results obtained as a result of these dynamic analyses were compared with the damage records reported in the literature. For the synthetic record produced for the June 2, 1859 Erzurum earthquake, PGA 0.19g, PGV 8.8 cm/sec, and PGD 2.5 cm were calculated. It was concluded that the MMI intensity scale value of the earthquake was IX.

2024, 416 pages

Keywords: Erzurum, Synthetic ground motion, Operational modal analysis, Historical masonry mosque, Stochastic modeling technique

TEŞEKKÜR

Doktora eğitim süresi ve doktora çalışması boyunca her türlü desteğini ve yardımını esirgemeyen değerli danışman hocalarm Dr.Öğr.Üyesi Dilek OKUYUCU ve Prof. Dr. Ayşegül ASKAN GÜNDOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitesinde yer alan, yapıcı ve yönlendirici katkılarıyla tez çalışmasına katkılarını sunan değerli hocalarım Prof. Dr. İlker KAZAZ ve Prof. Dr. Habib UYSAL'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, zamanlarını ayırıp doktora tez savunma sınavında jüri üyesi olan ve tez çalışmasını detaylı bir biçimde inceleyip tavsiyeler veren Prof. Dr. Oğuz Akın DÜZGÜN ve Dr. Öğr. Üyesi Muhammet GÜRBÜZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmaları sırasında değerli katkıları ve yardımlarıı benden esirgemeyen Doç.Dr. İrfan KOCAMAN'a teşekkür ederim.

Doktora eğitim süresince ve doktora çalışmasında yardımlarının yanı sıra manevi desteklerini de benden esirgemeyen başta Ar. Gör. Burak GEDİK, inşaat yüksek mühendisleri Muhammet ŞAHİN ve Burak ŞAHİN olmak üzere tüm kıymetli arkadaşlarıma ve meslektaşlarıma çok teşekkür ederim.

Tarihi camilerde deneysel çalışmalar için gerekli izinleri sağlayan Erzurum Vakıflar Bölge Genel Müdürlüğüne ve Röleve Anıtlar Müdürlüğüne teşekkür ederim. Ayrıca çalışmada gerekli dokümanlar konusunda yardımını esirgemeyen Erzurum Büyükşehir Belediyesi Deprem ve Zemin İnceleme Şube Müdürlüğüne teşekkür ederim.

Doktora eğitimim süresince YÖK 100/2000 Doktora Burs Projesi "Yapı" alanında bursiyer statüsünde desteklenmeme olanak sağlayan Yüksek Öğretim Kurumu (YÖK)'na teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak hayatım boyunca her daim yanımda olan ve her zaman bana destek olan anneme, ağabeyime ve hayatta her zaman yol gösterici olan rahmetli babama teşekkür ederim.

Dursun Burak ÖZDOĞAN
Kasım 2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i

ABSTRACT ii

TEŞEKKÜR iii

İÇİNDEKİLER iv

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ viii

ŞEKİLLER DİZİNİ xi

ÇİZELGELER DİZİNİ xxv

1. GİRİŞ 1

1.1.Tezin Amacı 2

1.2.Tezin Kapsamı 2

2. KAYNAK ÖZETLERİ 6

2.1. Sentetik Deprem Kayıtlarıyla İlgili Çalışmalar 6

2.2. Tarihi Yığma Yapıların Yapısal Davranışını Konu Edinen Çalışmalar 16

3. ERZURUM ve DEPREMSELLİĞİ 26

3.1. Tektonik Yapı 26

3.2. Erzurum Fay Zonu 28

3.3. Erzurum'un Jeolojik Yapısı 29

3.4. Erzurum Tarihinde Depremler 32

3.4.1. 17. yüzyıl depremleri 32

3.4.2. 18. yüzyıl depremleri 33

3.4.3. 19. yüzyıl depremleri 34

3.4.3.1. 27 Ekim 1843 depremi 34

3.4.3.2. 14 Temmuz 1852 depremi 34

3.4.3.3. 2 Haziran 1859 depremi 35

4. STOKASTİK GÜÇLÜ YER HAREKETİ YAKLAŞIMI 37

4.1. Yer Hareketi Simülasyon Yaklaşımları 37

4.1.1. Deterministik yer hareketi yaklaşımı 37

4.1.2. Stokastik yer hareketi yaklaşımı 38

4.1.3. Hibrit yer hareketi yaklaşımı 38

4.2. Stokastik Kuvvetli Yer Hareketi Simülasyon Metodolojisi 38

4.2.1. Stokastik nokta kaynak modeli 38
4.2.2. Kaynak fonksiyonu ($EM_0(\omega)$) 41
4.2.3. İz fonksiyonu ($P(R,\omega)$) 47
4.2.4. Yer fonksiyonu ($G(\omega)$) 49
4.2.4.1. Genişleme faktörleri ($A(\omega)$) 50
4.2.4.2. Azaltma faktörleri ($P(\omega)$) 52
4.2.5. Yer hareketi tipi ($I(\omega)$) 53
4.3. Stokastik Sonlu Fay Yöntemi 53
5. 2 HAZİRAN 1859 DEPREMİ ve ETKİLERİ 57
5.1.Depremin Niteliği ve Önemi 57
5.2. Depremin Etki Alanı 58
5.3. Depremin Tarihi Yapılar Üzerindeki Etkileri 59
5.3.1. Hasar kaydı bilinen tarihi yapılar 60
5.3.1.1. Pervizoğlu Camii 60
5.3.1.2. Lala Mustafa Paşa Camii 61
5.3.1.3. Erzurum Ulu Camii 62
5.3.1.4. Erzurum Kalesi 64
5.3.1.5. Morgov Kışlası 65
5.3.1.6. Surp Asdvadzadzin Kilisesi 66
5.3.1.7. Mudurga Surp Lusavorich Manastırı 67
5.3.2. Hasar alma ihtimali olan tarihi yapılar 68
5.3.2.1. Murat Paşa Camii 70
5.3.2.2. Yeğenağa Camii 71
5.3.2.3. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii 71
5.3.2.4. Kadana Camii 72
5.3.2.5. Yukarı Habip Efendi Camii 73
5.3.2.6. Hacıcuma Camii 74
6. DENEYSEL MODAL ANALİZ 76
6.1. Geleneksel Deneysel Modal Analiz 78
6.2. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi (OMA) 79
6.3. Temel Prensipler ve OMA Uygulamaları 81
6.4. OMA Hesaplama Tekniklerinin Sınıflandırılması 84
6.4.1. Frekans alanında metotlar 86

6.4.1.1. Temel frekans alanı (BFD) metodu 86
6.4.1.2. Frekans alanında ayrıştırma (FDD) Metodu 88
6.4.2. Zaman alanında metotlar 91
6.4.2.1. Stokastik alt alan tanımlama (SSI) metodu 91
7. SONLU ELEMAN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI 99
7.1. Pervizoğlu Camii 105
7.1.1. Pervizoğlu Camii teorik modal analiz uygulaması 109
7.1.2. Pervizoğlu Camii operasyonel modal analiz uygulaması 113
7.1.3. Pervizoğlu Camii sonlu eleman model kalibrasyon çalışması 123
7.2. Lala Mustafa Paşa Camii 128
7.2.1. Lala Mustafa Paşa Camii teorik modal analiz uygulaması 131
7.2.2. Lala Mustafa Paşa Camii operasyonel modal analiz uygulaması 134
7.2.3. Lala Mustafa Paşa Camii sonlu eleman model kalibrasyon çalışması 142
7.3. Muratpaşa Camii 146
7.3.1. Muratpaşa Camii teorik modal analiz uygulaması 148
7.3.2. Muratpaşa Camii operasyonel modal Analiz uygulaması 152
7.3.3. Muratpaşa Camii sonlu eleman model kalibrasyon çalışması 160
7.4. Ulu Camii 164
7.4.1. Ulu Camii teorik modal analiz uygulaması 167
7.4.2. Ulu Camii operasyonel modal analiz uygulaması 171
7.4.3. Ulu Camii sonlu eleman model kalibrasyon çalışması 179
7.5. Yukarı Habip Efendi Camii 184
7.5.1. Yukarı Habip Efendi Camii teorik modal analiz uygulaması 186
7.5.2. Yukarı Habip Efendi Camii operasyonel modal analiz uygulaması 190
7.5.3. Yukarı Habip Efendi Camii sonlu eleman model kalibrasyon çalışması 198
7.6. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii 202
7.6.1. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii teorik modal analiz uygulaması 205
7.6.2. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii operasyonel modal analiz uygulaması 208
7.6.3. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii sonlu eleman model kalibrasyon çalışması 217
7.7. Yeğenağa Camii 220
7.7.1. Yeğenağa Camii teorik modal analiz uygulaması 223
7.7.2. Yeğenağa Camii operasyonel modal analiz uygulaması 226
7.7.3. Yeğenağa Camii sonlu eleman model modül kalibrasyon çalışması 234

7.8. Kadana Camii 238
7.8.1. Kadana Camii teorik modal analiz uygulaması 240
7.8.2. Kadana Camii operasyonel modal analiz uygulaması 243
7.8.3. Kadana Camii sonlu eleman model kalibrasyon çalışması 252
7.9. Hacıcuma Camii 255
7.9.1. Hacıcuma Camii teorik modal analiz uygulaması 258
7.9.2. Hacıcuma Camii operasyonel modal analiz uygulaması 261
7.9.3. Hacıcuma Camii sonlu eleman model kalibrasyon çalışması 269
8. 2 HAZİRAN 1859 ERZURUM DEPREMİ YER HAREKETİ SİMÜLASYONUNUN OLUŞURULMASI ve DOĞRULANMASI 274
8.1. 2 Haziran 1859 Depreminin Yer Hareketi Simülasyonun Oluşturulması 274
8.2. Camilerin Deprem Analizlerinin Değerlendirilmesi 284
8.2.1. Ulu Camii dinamik analiz sonuçları 288
8.2.2. Pervizoğlu Camii dinamik analiz sonuçları 297
8.2.3. Lala Mustafa Paşa Camii dinamik analiz sonuçları 305
8.2.4. Muratpaşa Camii dinamik analiz sonuçları 313
8.2.5. Yukarı Habip Efendi Camii dinamik analiz sonuçları 322
8.2.6. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii dinamik analiz sonuçları 331
8.2.7. Yeğenağa Camii dinamik analiz sonuçları 339
8.2.8. Kadana Camii dinamik analiz sonuçları 348
8.2.9. Hacıcuma Camii dinamik analiz sonuçları 356
8.3. Bulgular ve Tartışma 364
8.4. 2 Haziran 1859 Depremi Sentetik Yer Hareketinin Değerlendirilmesi 378
9. SONUÇ ve ÖNERİLER 397
KAYNAKLAR 402
EKLER 415
EK 1 415
EK 2 416

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
cm/s^2	ivme
d	Maksimum yanal öteleme deplasmanı
E	Elastisite Modülü
f_0	Uzak alan kayma dalga frekansı
f_b	Taş basınç mukavemeti
f_c	Taş basınç mukavemeti
f_k	Duvar basınç mukavemeti
f_m	Harç basınç mukavemeti
f_{max}	En yüksek frekans
h	Duvar yüksekliği
K	Denklem sabiti
g	Yerçekimi ivmesi
Hz	Frekans
kN	Kilonewton
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
M_0	Sismik moment
RW	Fay yırtılma genişliği
T_d	Faylanma süresi
$\Delta\sigma$	Gerilim düşümü
β	Kayma dalgası hızı
W	Fay genişliği

Kısaltmalar

AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetim Müdürlüğü
BFD	Temel Frekans Alanında Ayrıştırma
CMIF	Karmaşık Mod Gösterme Fonksiyonu
CVA	Kanonik Varyant Analiz
ÇSDS	Çok Serbestlik Dereceli Sistemler
EMA	Geleneksel Deneysel Modal Analiz
FDD	Frekans Alanında Ayrıştırma
FRF	Frekans Tepki Fonksiyonu
GÖ	Göçmenin Önlenmesi
İRAP	İl Afet Risk Azaltma Planı
KH	Kontrollü Hasar
LS	En Küçük Kareler
MAC	Modal Güvence Kriteri
MASW	Geliştirilen Çok Kanallı Dizi Yüzey Dalgaları Yöntemi
MMI	Değiştirilmiş Mercalli Şiddeti
KDAFZ	Kuzeydoğu Anadolu Fay Zonu
ODS	Operasyonel Sapma Şekli
OMA	Operasyonel Modal Analiz
PC	Temel Bileşen
PEER	Pasifik Deprem Araştırma Merkezi
PGA	Maksimum Yer İvmesi
PGD	Maksimum Yer Deplasmanı
PGV	Maksimum Yer Hızı
PSA	Sözde Maksimum Yer İvmesi
PSD	Güç Spektral Yoğunluğu Matrisi
RMS	Ortalama karekök spektrumu
SASW	Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi
SD	Spektral Yoğunluk
SH	Sınırlı Hasar
SHM	Yapı Sağlığı Görüntüleme
SPT	Standart Penetrasyon Deneyi

SSI	Stokastik Alt Alan Tanımlama
SVD	Tekil Değer Ayrıştırma
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TSDS	Tek Serbestlik Dereceli Sistemler
TYİDRYK	Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu
UPC	Ağırlıksız Temel Bileşen
USGS	Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmalar Merkezi
YHM	Yer Hareketi Modelleri

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Türkiye Deprem Tehlike Haritası (Anonim 2021a) 26
Şekil 3.2. Erzurum diri fayları (Anonim 2021b)..... 27
Şekil 3.3. Erzurum en yüksek ivmesi (PGA) haritası (Anonim 2021d) 27
Şekil 3.4. Erzurum Fay Zonu (Demirtaş 2019)..... 28
Şekil 3.5. Erzurum jeoloji haritası (Anonim 2021d)..... 30
Şekil 3.6. Erzurum jeoloik ve tektonik birimler haritası (Özer et al. 2019) 31
Şekil 3.7. Erzurum basitleştirilmiş jeolojik haritası (Özer 2019) 32
Şekil 4.1. Stokastik nokta kaynak modeli aşamaları (Boore 2003; Uğurhan 2010)…...40
Şekil 4.2. Stokastik Sonlu Fay Metodu (Uğurhan 2010)..... 54
Şekil 5.1. 19. Yüzyıl Erzurum Şehir Haritası (Sağlam 2021)…….. 58
Şekil 5.2. Erzurum diri fay haritası (Anonim 2021b)..... 59
Şekil 5.3. Pervizoğlu Camii 61
Şekil 5.4. Lala Mustafa Paşa Camii..... 62
Şekil 5.5. Erzurum Ulu Camii..... 63
Şekil 5.6. Ulu Camii tamirat kitabesi..... 64
Şekil 5.7. Erzurum Kalesi..... 65
Şekil 5.8. Morgov Kışlası (Anonim 2021f) 66
Şekil 5.9. Surp Asdvadzadzin Kilisesi ve plan görünümü (Anonim 2021g)..... 67
Şekil 5.10. Mudurga Surp Lusavorich Manastırı (Tarbassian 1975)..... 68
Şekil 5.11. Murat Paşa Camii 70
Şekil 5.12. Yeğenağa Camii..... 71
Şekil 5.13. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii 72
Şekil 5.14. Kadana Camii (Özdoğan 2018) 73
Şekil 5.15. Yukarı Habip Efendi Camii..... 74
Şekil 5.16. Hacıcuma Camii 75
Şekil 6.1. Deneysel modal analiz yöntemi şematik gösterimi……77
Şekil 6.2. Geleneksel deneysel modal analiz yöntemi şema gösterimi..... 78
Şekil 6.3. Operasyonel modal analiz yöntemi şema gösterimi 79
Şekil 7.1. Solidworks (2022) yazılımında oluşturulan örnek bir cami katı modeli…..100
Şekil 7.2. SOLID65 eleman geometrisi (Kocaman 2022) 101
Şekil 7.3. William Wranke malzeme modeli göçme eğrisi (Kazaz 2010)..... 102

Şekil 7.4. William Warnke tek eksenli gerilme hali (Kazaz 2010) 103
Şekil 7.5. Pervizoğlu Camii 106
Şekil 7.6. Pervizoğlu Camii konumu (Anonim 2022b) 106
Şekil 7.7. Pervizoğlu Camii iç görünüşü 107
Şekil 7.8. Pervizoğlu Camii girişi 108
Şekil 7.9. Pervizoğlu Camii rölevesi 109
Şekil 7.10. Pervizoğlu Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli 111
Şekil 7.11. Pervizoğlu Camii a) x yönde öteleme b) y yönünde öteleme c)burulma d) kubbe düşey hareketi. 113
Şekil 7.12. Pervizoğlu Camii cami içi ve kubbe ivmeölçer yerleşim krokisi 114
Şekil 7.13. Pervizoğlu Camii cami içi ivmeölçer yerleşimi 115
Şekil 7.14. Pervizoğlu Camii ivmeölçerin kubbeye sabitlenmesi 115
Şekil 7.15. Pervizoğlu Camii veri toplama sistemi kurulumu 116
Şekil 7.16. Artemis Modal Pro yazılım ekran görüntüsü 117
Şekil 7.17. Pervizoğlu Camii opersyonal modal analize esas geometrisi 118
Şekil 7.18. Pervizoğlu Camii titreşim kayıtlarının ivme-zaman grafiklerine dönüşümü 119
Şekil 7.19. Pervizoğlu Camii ivmeölçerlerin ve yönlerinin geometrik modele tanımlanışı 119
Şekil 7.20. Pervizoğlu Camii spektral yoğunluk fonksiyonu 120
Şekil 7.21. Pervizoğlu Camii MAC değerler grafiği 122
Şekil 7.22. Pervizoğlu Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli 124
Şekil 7.23. Pervizoğlu Camii OMA ve kalibre edilmiş teorik modal analiz sonuçlarının şematik olarak karşılaştırılması. 127
Şekil 7.24. Lala Mustafa Paşa Camii 128
Şekil 7.25. Lala Mustafa Paşa konumu (Anonim 2022c) 129
Şekil 7.26. Lala Mustafa Paşa Camii iç görünümü 130
Şekil 7.27. Lala Mustafa Paşa Camii rölevesi 131
Şekil 7.28. Lala Mustafa Paşa Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli. 132
Şekil 7.29. Lala Mustafa Paşa Camii a) x yönde öteleme b) y yönünde öteleme c) kubbe düşey hareketi d) burulma. 133
Şekil 7.30. Lala Mustafa Paşa Camii cami içi ve kubbe ivmeölçer yerleşim krokisi 134
Şekil 7.31. Lala Mustafa Paşa Camii cami içi ivmeölçer yerleşimi 135
Şekil 7.32. Lala Mustafa Paşa Camii ivmeölçerin kubbeye sabitlenmesi 136

Şekil 7.33. Lala Mustafa Paşa Camii veri toplama sistemi kurulumu 137
Şekil 7.34. Lala Mustafa Paşa Camii Artemis yazılımındaki geometrisi 138
Şekil 7.35. Lala Mustafa Paşa Camii titreşim kayıtlarının ivme-zaman grafiklerine dönüşümü. 138
Şekil 7.36. Lala Mustafa Paşa Camii ivmeölçerlerin ve yönlerinin geometrik modelde tanıtılması. 139
Şekil 7.37. Lala Mustafa Paşa Camii spektral yoğunluk fonksiyonu 139
Şekil 7.38. Lala Mustafa Paşa Camii güney duvar çatlağı 141
Şekil 7.39. Lala Mustafa Paşa Camii MAC değerleri grafiği 142
Şekil 7.40. Lala Mustafa Paşa Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli 143
Şekil 7.41. Lala Mustafa Paşa Camii OMA ve teorik modal analiz sonuçlarının şematik olarak karşılaştırılması. 146
Şekil 7.42. Muratpaşa Camii 147
Şekil 7.43. Muratpaşa Camii konumu (Anonim 2022d) 147
Şekil 7.44. Muratpaşa Camii iç görünümü 148
Şekil 7.45. Muratpaşa Camii rölevesi 149
Şekil 7.46. Muratpaşa Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli 149
Şekil 7.47. Muratpaşa Camii a) x yönde öteleme b) y yönünde öteleme c) burulma d) kubbe düşey hareketi. 151
Şekil 7.48. Muratpaşa Camii cami içi ve kubbe vmeölçer yerleşim krokisi 152
Şekil 7.49. Muratpaşa Camii cami içi ivmeölçer sabitleme işlemi 153
Şekil 7.50. Muratpaşa Camii kubbeye ulaşım işlemi 154
Şekil 7.51. İvmeölçerlerin kubbeye sabitlenmesi 154
Şekil 7.52. Muratpaşa Camii veri toplama sisteminin kurulması 155
Şekil 7.53. Muratpaşa Camii deneysel modal analize esas geometrisi 156
Şekil 7.54. Muratpaşa Camii titreşim kayıtlarının ivme-zaman grafiklerine dönüşümü. 156
Şekil 7.55. Muratpaşa Camii'nin ivmeölçerlerin ve yönlerinin geometrik modele tanımlanışı. 157
Şekil 7.56. Muratpaşa Camii spektral yoğunluk fonksiyonu 157
Şekil 7.57. Muratpaşa Camii MAC değerleri grafiği 159
Şekil 7.58. Muratpaşa Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli. 160

Şekil 7.59. Muratpaşa Camii deneysel ve teorik modal analiz sonuçlarının şematik olarak karşılaştırılması. 163
Şekil 7.60. Erzurum Ulu Camii..... 164
Şekil 7.61. Erzurum Ulu Camii konumu (Anonim 2022e)..... 164
Şekil 7.62. Ulu Camii iç görünümü 166
Şekil 7.63. Ulu Camii hasarlı hali (Anonim 2022f)..... 167
Şekil 7.64. Ulu Camii kemer ve tonozların yeniden inşası (Anonim 2022f)..... 167
Şekil 7.65. Ulu Camii rölevesi..... 168
Şekil 7.66. Ulu Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli 168
Şekil 7.67. Ulu Camii a) uzun doğrultuda öteleme b) kısa doğrultuda öteleme c) duvar hareketi d) burulma hareketi. 170
Şekil 7.68. Ulu Camii cami içi ivmeölçer yerleşim krokisi..... 171
Şekil 7.69. Ulu Camii ivmeölçer sabitleme işlemi 172
Şekil 7.70. Ulu Camii veri toplama sisteminin kurulması..... 173
Şekil 7.71. Ulu Camii deneysel Artemis yazılım geometrisi..... 174
Şekil 7.72. Ulu Camii titreşim kayıtlarının ivme-zaman grafiklerine dönüşümü..... 174
Şekil 7.73. Ulu Camii ivmeölçerlerin ve yönlerinin Artemis geometrisinde tanımlanması 175
Şekil 7.74. Ulu Camii spektral yoğunluk fonksiyonu..... 175
Şekil 7.75. Ulu Camii kuzey duvar çatlağı 177
Şekil 7.76. Ulu Camii MAC değerleri grafiği 178
Şekil 7.77. Ulu Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli 179
Şekil 7.78. Ulu Camii deneysel ve teorik modal analiz sonuçlarının şematik olarak karşılaştırılması. 183
Şekil 7.79. Yukarı Habip Efendi Camii 184
Şekil 7.80. Yukarı Habip Efendi Camii konumu (Anonim 2022g) 185
Şekil 7.81. Cami içi görünümü 185
Şekil 7.82. Yukarı Habip Efendi Camii restorasyon öncesi hali (Anonim 2022h)..... 186
Şekil 7.83. Yukarı Habip Efendi Camii rölevesi 187
Şekil 7.84. Yukarı Habip Efendi Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli..... 187
Şekil 7.85. Yukarı Habip Efendi Camii a) x doğrultusunda öteleme b) y doğrultusunda öteleme c) burulma hareketi. 190
Şekil 7.86. Yukarı Habip Efendi Camii ivmeölçer yerleşim krokisi 191

Şekil 7.87. Yukarı Habip Efendi Camii ivmeölçer sabitleme çalışması 192
Şekil 7.88. Yukarı Habip Efendi Camii'nde veri toplama sistemi kurulması 192
Şekil 7.89. Yukarı Habip Efendi Camii Artemis yazılım geometrisi 193
Şekil 7.90. Yukarı Habip Efendi Camii titreşim kayıtlarının ivme-zaman grafiklerine dönüşümü. 194
Şekil 7.91. Yukarı Habip Efendi Camii'nin ivmeölçerlerin ve yönlerinin Artemis geometrisinde tanımlanması. 194
Şekil 7.92. Yukarı Habip Efendi Camii spektral yoğunluk fonksiyonu 195
Şekil 7.93. Yukarı Habip Efendi Camii'nde gözlemlenen hasar 197
Şekil 7.94. Yukarı Habip Efendi Camii MAC değerleri grafiği 197
Şekil 7.95. Yukarı Habip Efendi Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli 199
Şekil 7.96. Yukarı Habip Efendi Camii OMA ve teorik modal modal analiz sonuçlarının şematik olarak karşılaştırılması. 202
Şekil 7.97. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii 203
Şekil 7.98. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii konumu (Anonim 2022i) 203
Şekil 7.99. Cami iç görünümü 204
Şekil 7.100. Taş Camii restorasyon öncesi hali (Anonim 2022j) 205
Şekil 7.101. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii rölevesi 206
Şekil 7.102. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli . 206
Şekil 7.103. Taş Camii a) kısa doğrultuda öteleme b) uzun doğrultuda öteleme c) burulma hareketi. 208
Şekil 7.104. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii ivmeölçer yerleşim krokisi 209
Şekil 7.105. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii ivmeölçer sabitleme çalışması 210
Şekil 7.106. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii veri toplama sistemi kurulması 211
Şekil 7.107. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii Artemis yazılım geometrisi 212
Şekil 7.108. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii titreşim kayıtlarının ivme-zaman grafiklerine dönüşümü. 212
Şekil 7.109. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Cami'nin ivmeölçerlerin ve yönlerinin Artemis geometrisinde tanımlanması. 213
Şekil 7.110. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Cami'nin spektral yoğunluk fonksiyonu 213
Şekil 7.111. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii'ndeki gözlemlenen bazı hasarlar 215
Şekil 7.112. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Cami MAC değerler grafiği 216
Şekil 7.113. Taş Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli 217

Şekil 7.114. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Cami OMA ve teorik modal modal analiz sonuçlarının şematik olarak karşılaştırılması. 220
Şekil 7.115. Yeğenağa Camii 221
Şekil 7.116. Yeğenağa Camii konumu (Anonim 2022k) 221
Şekil 7.117. Cami iç görünümü 222
Şekil 7.118. Yeğenağa Camii restorasyon öncesi hali (Berkli ve Özsağlıcak 2019) 223
Şekil 7.119. Yeğenağa Camii rölevesi 224
Şekil 7.120. Yeğenağa Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli 224
Şekil 7.121. Yeğenağa Camii a) kısa doğrultuda öteleme b) uzun doğrultuda öteleme c) burulma 226
Şekil 7.122. Yeğenağa Camii ivmeölçer yerleşim krokisi 227
Şekil 7.123. Yeğenağa Camii ivmeölçer sabitleme çalışması 228
Şekil 7.124. Yeğenağa Camii veri toplama sistemi kurulması 229
Şekil 7.125. Yeğenağa Camii Artemis yazılım geometrisi 230
Şekil 7.126. Yeğenağa Camii titreşim kayıtlarının ivme-zaman grafiklerine dönüşümü 230
Şekil 7.127. Yeğenağa Camii ivmeölçerlerin ve yönlerinin Artemis geometrisinde tanımlanması. 231
Şekil 7.128. Yeğenağa Camii'nin spektral yoğunluk fonksiyonları 231
Şekil 7.129. Yeğenağa Camii MAC değerleri grafiği 233
Şekil 7.130. Yeğenağa Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli 234
Şekil 7.131. Yeğenağa Camii deneysel ve teorik modal analiz sonuçlarının şematik olarak karşılaştırılması. 237
Şekil 7.132. Kadana Camii 238
Şekil 7.133. Kadana Camii konumu (Anonim 2022l) 239
Şekil 7.134. Kadana Cami iç görünümü 239
Şekil 7.135. Kadana Camii restorasyon öncesi durumu (Özsağlıcak 2019) 240
Şekil 7.136. Kadana Camii rölevesi 241
Şekil 7.137. Kadana Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli 241
Şekil 7.138. Kadana Camii a) kısa doğrultuda öteleme b) uzun doğrultuda öteleme c) burulma hareketi. 243
Şekil 7.139. Kadana Camii ivmeölçer yerleşim krokisi 244
Şekil 7.140. Kadana Camii ivmeölçer sabitleme işlemleri 245

Şekil 7.141. Kadana Camii veri toplama sistemi kurulması 246
Şekil 7.142. Kadana Camii Artemis yazılım geometrisi 247
Şekil 7.143. Kadana Camii titreşim kayıtlarının ivme-zaman grafiklerine dönüşümü 247
Şekil 7.145. Kadana Camii ivmeölçerlerin ve yönlerin Artemis yazılımında tanımlanması. 248
Şekil 7.145. Kadana Camii spektral yoğunluk fonksiyonları 248
Şekil 7.146. Kadana Cami'nde gözlemlenen hasarlar 250
Şekil 7.147. Kadana Camii MAC değerler grafiği 251
Şekil 7.148. Kadana Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli 252
Şekil 7.149. Kadana Cami OMA ve teorik modal analiz sonuçlarının şematik olarak karşılaştırılması. 255
Şekil 7.150. Hacıcuma Camii 256
Şekil 7.151. Hacıcuma Camii konumu (Anonim 2022l) 256
Şekil 7.152. Hacıcuma Camii iç görünümü 257
Şekil 7.153. Hacıcuma Camii restorasyon öncesi hali (Özsağlıcak 2019) 258
Şekil 7.154. Hacıcuma Camii rölevesi 259
Şekil 7.155. Hacıcuma Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli 259
Şekil 7.156. Hacıcuma Camii a) kısa doğrultuda öteleme b) uzun doğrultuda öteleme c) gövde burulma hareketi. 261
Şekil 7.157. Hacıcuma Camii ivmeölçer yerleşim krokisi 262
Şekil 7.158. Hacıcuma Camii ivmeölçer sabitleme işlemleri 263
Şekil 7.159. Hacıcuma Camii veri toplama sistemi kurulumu 264
Şekil 7.160. Hacıcuma Camii için Artemis yazılımı geometrisi 265
Şekil 7.161. Hacıcuma Camii titreşim kayıtlarının ivme-zaman grafiklerine dönüşümü 265
Şekil 7.162. Hacıcuma Camii ivmeölçerlerin ve yönlerin Artemis yazılımında tanımlanması. 266
Şekil 7.163. Hacıcuma Camii spektral yoğunluk fonksiyonları 266
Şekil 7.164. Hacıcuma Camii gözlemlenen hasarlar 268
Şekil 7.165. Hacıcuma Camii MAC değerleri grafiği 269
Şekil 7.166. Hacıcuma Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli 270

Şekil 7.167. Hacıcuma Cami OMA ve teorik modal analiz sonuçlarının şematik olarak karşılaştırılması. 273
Şekil 8.1. Erzurum Fay Zonu ve 1859 depreminin fay koordinatları (Anonim 2023a) …….. 275
Şekil 8.2. 2 Haziran 1859 Erzurum depremi senaryo deprem ivme kaydı 279
Şekil 8.3. 2 Haziran 1859 Erzurum depremi yatay elastik tasarım ivme spektrumları 279
Şekil 8.4. 2 Haziran 1859 net deprem ivme kaydı 283
Şekil 8.5. Ulu Camii yıkılma mekanizması 283
Şekil 8.6. (a) Kütle sistemi, (b) yer hareketi etkisi, (c) Efektif deprem yükü (Kazaz et al.2006) 285
Şekil 8.7. ANSYS (2016) yazılımında gerçekleştirilen örnek doğrusal olmayan analiz ekran görüntüsü 286
Şekil 8.8. Tarihi yapıların performans düzeyleri (TYDRYK 2017; Kumbasaroğlu ve Çelik 2019). 288
Şekil 8.9. Ulu Camii hasar mekanizması(a),(b),(c),(d) 289
Şekil 8.10. Ulu Camii 1859 depremi ivme kaydı ile elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi. 291
Şekil 8.11. Ulu Camii güney duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi 292
Şekil 8.12. Ulu Camii doğu duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti -yer değiştirme eğrisi 293
Şekil 8.13. Ulu Camii kuzey duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti -yer değiştirme eğrisi 293
Şekil 8.14. Ulu Camii batı duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi. 294
Şekil 8.15. Ulu Camii güneybatı duvar köşesinde yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 294
Şekil 8.16. Ulu Camii güneydoğu duvar köşesinde yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 295
Şekil 8.17. Ulu Camii kuzeybatı duvar köşesinde yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 295
Şekil 8.18. Ulu Camii kuzeydoğu duvar köşesinde yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 296

Şekil 8.19. Pervizoğlu Camii hasar mekanizması(a),(b),(c),(d),(e),(f) 297
Şekil 8.20. Pervizoğlu Camii 1859 depremi ivme kaydı ile elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi..... 300
Şekil 8.21. Pervizoğlu Camii güney duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi..... 300
Şekil 8.22. Pervizoğlu Camii doğu duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi..... 301
Şekil 8.23. Pervizoğlu Camii kuzey duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi..... 301
Şekil 8.24. Pervizoğlu Camii batı duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban keseme kuvveti- yer değiştirme eğrisi..... 302
Şekil 8.25. Pervizoğlu Camii güneybatı duvar köşesinde yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi..... 302
Şekil 8.26. Pervizoğlu Camii güneybatı duvar köşesinde yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi..... 303
Şekil 8.27. Pervizoğlu Camii kuzeydoğu duvar köşesinde yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi..... 303
Şekil 8.28. Pervizoğlu Camii kuzeybatı duvar köşesinde yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi..... 304
Şekil 8.29. Lala Mustafa Paşa Camii hasar mekanizması (a),(b),(c),(d),(e),(f)..... 305
Şekil 8.30. Lala Mustafa Paşa Cami ile 1859 depremi ivme kaydı ile elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi. 308
Şekil 8.31. Lala Mustafa Paşa Camii güney duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi. 309
Şekil 8.32. Lala Mustafa Paşa Camii doğu duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 309
Şekil 8.33. Lala Mustafa Paşa Camii kuzey duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 310
Şekil 8.34. Lala Mustafa Paşa Camii batı duvarı yer hareketi sonucu elde edilen tanan kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 310
Şekil 8.35. Lala Mustafa Paşa Camii güneybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi..... 311

Şekil 8.36. Lala Mustafa Paşa Camii güneydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 311
Şekil 8.37. Lala Mustafa Paşa Camii kuzeydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 312
Şekil 8.38. Lala Mustafa Paşa Camii kuzeybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 312
Şekil 8.39. Muratpaşa Camii hasar mekanizması (a),(b),(c),(d),(e),(f) 314
Şekil 8.40. Muratpaşa Camii 1859 depremi ivme kaydı ile elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi. 317
Şekil 8.41. Muratpaşa Camii güney duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi..... 318
Şekil 8.42. Muratpaşa Camii doğu duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi. 318
Şekil 8.43. Muratpaşa Camii kuzey duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi..... 319
Şekil 8.44. Muratpaşa Camii batı duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi. 319
Şekil 8.45. Muratpaşa Camii güneybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi..... 320
Şekil 8.46. Muratpaşa Camii güneydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi..... 320
Şekil 8.47. Muratpaşa Cami kuzeybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi..... 321
Şekil 8.48. Muratpaşa Camii kuzeydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi..... 321
Şekil 8.49. Yukarı Habip Efendi Camii hasar mekanizması (a),(b),(c),(d),(e),(f)..... 323
Şekil 8.50. Yukarı Habip Efendi Camii 1859 depremi ivme kaydı ile elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi. 326
Şekil 8.51. Yukarı Habip Efendi Camii güney duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi..... 327
Şekil 8.52. Yukarı Habip Efendi Camii doğu duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi..... 327

Şekil 8.53. Yukarı Habip Efendi Camii kuzey duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 328
Şekil 8.54. Yukarı Habip Efendi Camii batı duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 328
Şekil 8.55. Yukarı Habip Efendi Camii güneybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 329
Şekil 8.56. Yukarı Habip Efendi Camii güneydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 329
Şekil 8.57. Yukarı Habip Efendi Camii kuzeybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi 330
Şekil 8.58. Yukarı Habip Efendi Camii kuzeydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 330
Şekil 8.59. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii hasar mekanizması (a),(b),(c),(d),(e),(f) .. 331
Şekil 8.60. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii 1859 depremi ivme kaydı ile elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi. 334
Şekil 8.61. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii güney duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 335
Şekil 8.62. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii doğu duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 335
Şekil 8.63. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii kuzey duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 336
Şekil 8.64. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii batı duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 336
Şekil 8.65. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii güneybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 337
Şekil 8.66. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii güneydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 337
Şekil 8.67. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii kuzeybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 338
Şekil 8.68. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii kuzeydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 338
Şekil 8.69. Yeğenağa Camii hasar mekanizması (a),(b),(c),(d),(e),(f) 340

Şekil 8.70. Yeğenağa Camii 1859 depremi ivme kaydı ile elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.....343
Şekil 8.71. Yeğenağa Camii güney duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.....343
Şekil 8.72. Yeğenağa Camii doğu duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.....344
Şekil 8.73. Yeğenağa Camii kuzey duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.....344
Şekil 8.74. Yeğenağa Camii batı duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.....345
Şekil 8.75. Yeğenağa Camii güneybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.....345
Şekil 8.76. Yeğenağa Camii güneydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.....346
Şekil 8.77. Yeğenağa Camii kuzeybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.....346
Şekil 8.78. Yeğenağa Camii kuzeydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.....347
Şekil 8.79. Kadana Camii hasar mekanizması (a),(b),(c),(d),€,(f).....348
Şekil 8.80. Kadana Camii 1859 depremi ivme kaydı ile elde edilen taban kesme kuvveti -yer değiştirme eğrisi.....351
Şekil 8.81. Kadana Camii güney duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti -yer değiştirme eğrisi.....351
Şekil 8.82. Kadana Camii doğu duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.....352
Şekil 8.83. Kadana Camii kuzey duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.....352
Şekil 8.84. Kadana Camii batı duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.....353
Şekil 8.85. Kadana Camii güneybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 353
Şekil 8.86. Kadana Camii güneydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.....354

Şekil 8.87. Kadana Camii kuzeybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 354
Şekil 8.88. Kadana Camii kuzeydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi. 355
Şekil 8.89. Hacıcuma Camii hasar mekanizması (a),(b),(c),(d),(e),(f) 356
Şekil 8.90. Hacıcuma Camii 1859 depremi ivme kaydı ile elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi. 359
Şekil 8.91. Hacıcuma Camii güney duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.....360
Şekil 8.92. Hacıcuma Camii doğu duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.....360
Şekil 8.93. Hacıcuma Camii kuzey duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.....361
Şekil 8.94. Hacıcuma Camii batı duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.....361
Şekil 8.95. Hacıcuma Camii güneybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.....362
Şekil 8.96. Hacıcuma Camii güneydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.....362
Şekil 8.97. Hacıcuma Camii kuzeybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.....363
Şekil 8.98. Hacıcuma Camii kuzeydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.....363
Şekil 8.99. Camilerin TYİDRYK (2017)'deki limit değerlerine göre hasar durumları 366
Şekil 8.100. Camilerin Kocaman and Kazaz (2023) limit değerlerine göre hasar durumları 366
Şekil 8.101. Camilerin literatürdeki hasar limitlerine göre hasar durumları 369
Şekil 8.102. AFAD veritabanından alınan ZD sınıfı zemine ait ve 1859 deprem spektrumları…….....370
Şekil 8.103. Rize ilinin PGA deprem tehlike haritasındaki yakınlaştırılmış konumu (Anonim 2024c). …….380
Şekil 8.104. 2 Haziran 1859 Erzurum depremi için üretilen sentetik a) ivme b)hız c) yer değiştirme grafikleri…… 381

Şekil 8.105. Yönelim etkileri içeren yakın saha deprem kayıt örnekleri (Numanoğlu 2023)……384
Şekil 8.106. Erzurum ili zemin büyütme katsayısı haritası (Aydın vd 2021)…….. 386
Şekil 8.107. Erzurum ili hakim zemin titreşim periyot haritası (Aydın vd 2021)……386
Şekil 8.108. Erzurum ili diri fay haritası ve olası yıkıcı (Ms>5) deprem üretebilecek kuşaklar (Anonim 2021d)…….395

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Tarihi Erzurum depremlerinin şiddetleri (Özer vd 2019)..... 35
Çizelge 5.1. 2 Haziran 1859 Erzurum depreminde ağır hasar alan mahalleler (Tozlu 2000)..... 69
Çizelge 7.1. Pervizoğlu Camii teorik modal analiz sonuçları..... 112
Çizelge 7.2. Pervizoğlu Camii OMA Sonuçları..... 121
Çizelge 7.3. Pervizoğlu Camii MAC değerleri tablosu 123
Çizelge 7.4. Pervizoğlu Camii ilk teorik modal analiz ile OMA sonuçlarının karşılaştırılması. 125
Çizelge 7.5. Pervizoğlu Camii sonlu eleman modeli kalibrasyonu öncesi ve sonrası elastisite modülü değerleri. 126
Çizelge 7.6. Pervizoğlu Camii kalibre edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanan teorik modal analiz ve OMA sonuçlarının karşılaştırılması.. 126
Çizelge 7.7. Lala Mustafa Paşa Camii teorik modal analiz sonuçları 133
Çizelge 7.8. Lala Mustafa Paşa Camii OMA Sonuçları 140
Çizelge 7.9. Lala Mustafa Paşa Camii OMA sonuçlarına ait MAC değerleri..... 142
Çizelge 7.10. Lala Mustafa Paşa Camii OMA ve ilk teorik modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması. 144
Çizelge 7.11. Lala Mustafa Paşa Camii sonlu eleman modeli kalibrasyonu öncesi ve sonrası elastisite modülü değerleri. 145
Çizelge 7.12. Lala Mustafa Paşa Camii kalibre edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanan teorik modal analiz ve OMA sonuçlarının karşılaştırılması. 145
Çizelge 7.13. Muratpaşa Camii ilk teorik modal analiz sonuçları..... 151
Çizelge 7.14. Muratpaşa Camii OMA sonuçları..... 158
Çizelge 7.15. Muratpaşa Camii MAC değerleri tablosu..... 159
Çizelge 7.16. Muratpaşa Camii OMA ve ilk teorik modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması. 161
Çizelge 7.17. Muratpaşa Camii kalibrasyon elastisite modül değerleri..... 162
Çizelge 7.18. Muratpaşa Camii kalibre edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanan teorik modal analiz ve OMA sonuçlarının karşılaştırılması. 163
Çizelge 7.19. Ulu Cami ilk teorik modal analiz sonuçları..... 170
Çizelge 7.20. Ulu Camii cami gövdesi OMA sonuçları 176

Çizelge 7.21. Ulu Camii MAC değerleri tablosu.....178
Çizelge 7.22. Ulu Camii ilk teorik modal analiz ile OMA sonuçlarının karşılaştırılması……..178
Çizelge 7.23. Ulu Camii kalibrasyon elastisite modül değerleri 182
Çizelge 7.24. Ulu Camii kalibre edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanan teorik modal analiz ile OMA sonuçlarının karşılaştırılması 183
Çizelge 7.25. Yukarı Habip Efendi Camii ilk teorik modal analiz sonuçları 189
Çizelge 7.26. Yukarı Habip Efendi Camii OMA Sonuçları 196
Çizelge 7.27. Yukarı Habip Efendi Camii MAC değerleri tablosu 198
Çizelge 7.28. Yukarı Habip Efendi Camii ilk teorik modal analiz ile OMA sonuçlarının karşılaştırılması. 200
Çizelge 7.29. Yukarı Habip Efendi Camii kalibrasyon elastisite modül değerleri.....200
Çizelge 7.30. Yukarı Habip Efendi Camii kalibre edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanan teorik modal analiz ile OMA sonuçlarının karşılaştırılması199
Çizelge 7.31. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii ilk teorik modal analiz sonuçları.....208
Çizelge 7.32. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii OMA Sonuçları.....214
Çizelge 7.33. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Cami MAC değerleri tablosu.....216
Çizelge 7.34. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii ilk teorik modal analiz ile OMA sonuçlarının karşılaştırılması. 218
Çizelge 7.35. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii kalibrasyon elastisite modül değerleri .219
Çizelge 7.36. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii kalibre edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanan teorik modal analiz ile OMA sonuçlarının karşılaştırılması……217
Çizelge 7.37. Yeğenağa Camii ilk teorik modal analiz sonuçları.....226
Çizelge 7.38. Yeğenağa Camii OMA Sonuçları.....232
Çizelge 7.39. Yeğenağa Camii MAC değerleri tablosu.....233
Çizelge 7.40. Yeğenağa Camii ilk teorik modal analiz ile OMA sonuçlarının karşılaştırılması 235
Çizelge 7.41. Yeğenağa Camii kalibrasyon elastisite modül değerleri 236
Çizelge 7.42. Yeğenağa Camii Camii kalibre edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanan teorik modal analiz ve OMA sonuçlarının karşılaştırılması. 237
Çizelge 7.43. Kadana Camii ilk teorik modal analiz sonuçları.....243
Çizelge 7.44. Kadana Camii OMA sonuçları 249

Çizelge 7.45. Kadana Camii MAC değerleri tablosu 251
Çizelge 7.46. Kadana Camii ilk teorik modal analiz ile OMA sonuçlarının karşılaştırılması. 253
Çizelge 7.47. Kadana Camii kalibrasyon elastisite modül değerleri 254
Çizelge 7.48. Kadana Camii kalibre edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanan teorik modal analiz ve OMA sonuçlarının karşılaştırılması. 254
Çizelge 7.49. Hacıcuma Camii ilk teorik modal analiz sonuçları.....261
Çizelge 7.50. Hacıcuma Camii OMA Sonuçları.....267
Çizelge 7.51. Hacıcuma Camii MAC değerleri tablosu 269
Çizelge 7.52. Hacıcuma Camii ilk teorik modal analiz ile OMA sonuçlarının karşılaştırılması. 271
Çizelge 7.53. Hacıcuma Camii kalibrasyon elastisite modül değerleri 271
Çizelge 7.54. Hacıcuma Camii kalibre edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanan teorik modal analiz ve OMA sonuçlarının karşılaştırılması272
Çizelge 8.1. 1859 Erzurum Depreminin simülasyon parametreleri.....279
Çizelge 8.2. 2 Haziran Erzurum 1859 depremi sentetik yer hareketi özellikleri.....279
Çizelge 8.3. Ulu Camii deprem analizi yeni kalibrasyon elastisite modül değerleri....282
Çizelge 8.4. Camilerin yatay öteleme oranları.....364
Çizelge 8.5. Literatürde bazı tarihi yapılar için belirlenen malzeme özellikleri ve hasar limitleri. (Kocaman 2022).....367
Çizelge 8.6. Camilerin performans limit değerleri 368
Çizelge 8.7. Camilerin duvar oranları ve depreme karşı çalışan duvar yüzdeleri 371
Çizelge 8.8. Camilerin spektral ivmeleri 371
Çizelge 8.9. Cami elemanlarının elasitk birim şekil değiştirme sınır değerleri.....373
Çizelge 8.10. Deprem büyüklük sınıfları (Anonim 2024e)……...383
Çizelge 8.11. MMI şiddet sınıfları için PGA ve PGV değerleri eşleştirmesi (Wald vd 1996)…… 388
Çizelge 8.12. Deprem büyüklüğü ve MMI şiddeti eşleştirmesi (Polat 2015)……..389
Çizelge 8.13. Aletsel büyüklük– maksimum yer ivmesi/hız ilişkisi (Anonim 2024h**)** 390
Çizelge 8.14. Maksimum yer ivme değerleri tablosu…….. 392
Çizelge 8.15. Maksimum yer ivmesi – algılanan sarsıntı sınıflandırması (Putri et al. 2022)…… 393
Çizelge 8.16. Deprem büyüklük ölçeği (Anonim 2024i)……..393

1. GİRİŞ

Dünya üzerindeki her toplum kendi fikir, düşünce ve estetik gibi maddi ve manevî olguları ve duyguları bir araya getirerek medeniyet kavramını oluşturmuştur. İnsanlık tarihinin başlangıcından itibaren insanlar için barınma en temel ihtiyaçlardan biri olmuştur. İlk çağlarda ilk olarak mağaralar yaşam yeri olarak seçilmiştir. Zamanla tarımı ve hayvancılığı öğrenen topluluklar yerleşik yaşama geçiş yaparak yaşam alanlarını değiştirmiştir. Bu geçiş barınma durumunu da etkilemiştir. Mağaraların yerine insanların yerleşik hayata uygun yeni barınma şekilleri ortaya çıkmıştır. Bu yeni yapılar, çevredeki doğal kaynaklar kullanılarak inşa edilmiştir. Çeşitli bitkiler, ahşap ve diğer yerel malzemelerle daha sağlam ve uzun ömürlü yapılar oluşturulmuştur. Ahşap, özellikle kolay bulunabilirliği ve işlenebilirliği nedeniyle tercih edilmiştir. Yazının bulunup uygarlığın ilerlemesiyle birlikte insanların yaratıcılık ve mühendislik biçimlerinde de değişim yaşanmıştır. Bu dönemde yapı malzemeleri giderek daha fazla çeşitlenmiş ve taş gibi dayanıklı malzemelerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Tarihten bu zamana kadar birçok medeniyet tarafından taş malzemeyi kullanarak önemli yapılar inşa edilmiştir. Taş yığma yapıların uzun yıllar insanlara hizmet edebilecek statik dirence sahip olmakla birlikte yanal etkilere maruz kaldıklarında dayanımlarının yetersiz olduğu görülmüştür.

Türkiye, geçmişten günümüze birçok medeniyete ev sahipliği yapmış bir ülkedir. Bu ev sahipliğinin bir sonucu olarak tarihi eserler bakımından oldukça zengindir. Farklı medeniyetler, yapı malzemesi olarak taşı kullanarak mimari ve estetik açıdan önemli eserler inşa etmişlerdir. Bu eserler, ülkenin kültürel zenginliğine büyük ölçüde katkı sağlamıştır. Türkiye'nin kültürel zenginliğini artıran önemli tarihi yapılar arasında camiler de öne çıkmaktadır. Türkiye'nin hemen hemen her köşesinde tarihi camiler bulunmaktadır. Erzurum, tarihi camilerin varlığı bakımından Türkiye'nin önemli şehirlerindendir. Şehirde, farklı medeniyetlerden veya vakıflardan kalma farklı büyüklükte camiler bulunmaktadır.

Türkiye, jeolojik açıdan genç bir ülke olarak tanımlanabilir. Özellikle Türkiye'nin bulunduğu bölgede, Avrupa ve Asya levhalarının birbirine yaklaşmasıyla oluşan sıkışma ve çarpışmalar, ülkenin genç jeolojik yapısını oluşturmuştur. Bu durum, Türkiye'de sık sık depremlerin yaşanmasına neden olmaktadır. Doğu Anadolu Bölgesi'nde bulunan

Erzurum, deprem tehlikesi bakımından yüksek bir sınıfta yer almaktadır. Aktif bir fay olan Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde bulunan Erzurum, geçmişten bugüne büyüklüğü değişen bir çok depreme maruz kalmıştır ve bu depremlerden olumsuz şekilde etkilenmiştir. 2021 yılında yayımlanan Erzurum İl Risk Azaltma Planı'na (İRAP) göre Erzurum belirli bir zaman diliminde deprem yaşama ihtimali açısından tehlikeli bir bölgedir. Rapora göre, 10 yıl içinde Erzurum'da 6,0 büyüklüğünde bir depremin gerçekleşme ihtimali %75; 50 yıl içinde 6,5 büyüklüğünde bir depremin gerçekleşme ihtimali %89,5; 75 yıl içinde 7,0 büyüklüğünde bir depremin gerçekleşme ihtimali %68,9 dur (Anonim 2021d).Bu örnekler, Erzurum'un deprem tehlikesi oldukça yüksek bir bölgede olduğunu destekler niteliktedir.

1900'lerden sonra aletsel dönem adı verilen dönemde depremlerin her türlü nesnel verisi ölçülüp kaydedilmiştir ve bu depremlerin verisine kolaylıkla ulaşılabilmektedir. Ancak, 20. yüzyıl ve öncesinde, teknolojik imkan kısıtlığı nedeniyle, depremlerin ivme, büyüklük, vb. nesnel büyüklüklerine ulaşılamamakla birlikte hasar tespitlerinde de ortak bir görüş birliğine rastlamak mümkün olmamaktadır.

Deprem tehlikesi bakımından yüksek tehlikeli bir bölgede yer alan Erzurum, geçmişten bu zamana kadar büyük depremler yaşamıştır. Yapılan geniş literatür çalışmalarında, farklı zamanlarda şehrin bir çok büyük depreme maruz kaldığı ve hasarlar aldığı tespit edilmiştir (Tozlu, 2000;Ambraseys ve Finkel 2006). Bu depremler içerisinde, 19. yüzyılda gerçekleşen üç depremin yıkıcılığının, diğer depremlere oranla daha fazla olduğu literatürde yer almıştır. Bu depremler 27 Ekim 1843, 14 Temmuz 1852 ve 2 Haziran 1859 depremleridir. Özellikle 2 Haziran 1859 tarihinde gerçekleşen depremin, Erzurum tarihindeki en yıkıcı depremi olduğu belirtilmiştir. Bu depremlerin, şehirde bulunan tarihi yapılara önemli hasarlar verdiği literatürde belirtilmiştir (Curzon 1854; Tozlu 2000; Yapıcı 2015).

1.1.Tezin Amacı

19. yüzyılda gerçekleşen Erzurum depremleri şehre büyük hasar vermiştir. Özellikle 2 Haziran 1859 tarihinde gerçekleşen deprem, Erzurum tarihinde yıkıcılığın en büyük olduğu deprem olarak kayıtlara geçmiştir. Depremin şehirde neden olduğu hasarın

boyutuyla ilgili bilgiler sınırlı düzeydedir. Bu hasar kayıtları için Osmanlı Devleti'nin idari yöneticilerinin yazdıkları raporlar ana kaynak niteliğindedir. Bu raporlar resmi hasar olarak kabul edilerek depremlerin etkileri kaydedilmiştir. Bu raporlara ek olarak çeşitli nedenlerle Erzurum'da bulunan depremi yaşamış yabancı gezginlerin hatıratları ve bilim insanlarının çalışmaları da deprem hasarı için birinci derece kaynak bilgilerdendir.

Literatürde yıkıcılığı yüksek olarak belirtilen 19. yüzyıl depremlerinin deprem ivme kayıtları doğal olarak mevcut değildir. Bu nedenle depremlerin ivme kayıtlarına ulaşmak mümkün olmamaktadır. Depremler ile ilgili 20. yüzyılın ortalarından itibaren aletsel dönem içinde gerçekleşen depremlerin deprem kayıtları sismograflar yardımıyla kaydedilmektedir. 1960'lı yılların sonuna doğru sismik çalışmalar alanında yeni bir yöntem geliştirmek için çalışmalara başlanmıştır. İlerleyen zamanlarda stokastik sonlu fay yöntemi adı verilen yeni bir yöntemin bu dönemlerde temeli atılmıştır. Stokastik sonlu fay yöntemi, temel olarak herhangi bir noktada gerçekleşen bir depremin o yere özgü belirli parametreler yardımıyla yapay bir ivme kaydını oluşturmayı amaçlamaktadır. Literatürde ilk olarak Boore (1983) tarafından stokastik sonlu fay yönteminden bahsedilmiştir. İlerleyen zamanlarda yöntemin aksayan yönleri Beresnev and Atkinson (1997, 1998) ve Motazedian and Atkinson (2005) tarafından giderilerek yöntem geliştirilmiştir. Bu deprem kaydı üretme metodu, özellikle aletsel dönem öncesi deprem kaydı bulunmayan depremlerin kayıtlarını sentetik bir şekilde üretme ve bu depremlerin depremin gerçekleştiği bölgedeki etkilerini incelemek için önemli bir avantaj sunmaktadır. Bu yöntem sadece ivme kaydı bulunmayan depremler için değil, mevcut ivme kaydı bulunan depremlerin ivme kayıtlarını sentetik olarak üretilmesine de yardımcı olmaktadır. Literatürde stokastik yöntemlerle ilgili var olan çalışmalardan, tez çalışmasının Kaynak Özetleri ve Stokastik Yer Hareketi yaklaşımı bölümlerinde bahsedilmiştir.

Bu tez çalışmasının amacı, aletsel dönem öncesi gerçekleşen ve Erzurum'un tarihteki en yıkıcı depremi olarak belirtilen 2 Haziran 1859 depreminin stokastik yöntemler kullanılarak sentetik deprem kaydının oluşturulmasıdır. Oluşturulan depremin sentetik ivme kaydı, bu depremi bire bir yaşamış ve operasyonel modal analiz ile model kalibrasyonu yapılmış tarihi yığma camilerin dinamik analizlerinde kullanılmıştır. Analiz

sonucunda elde edilen hasarlar ile literatürde hasar kaydı bulunan camilerin hasarları karşılaştırılarak sentetik deprem kaydı doğrulanmaya çalışılmıştır. Çalışmanın Erzurum ilinin deprem tehlikesinin sayısal bir tabanda anlaşılmasına katkı sunması amaçlanmıştır.

1.2.Tezin Kapsamı

Tez çalışmasının temel amacı 2 Haziran 1859 Erzurum depremi için sentetik olarak ivme kaydının üretilmesidir. Aletsel dönem öncesi meydana gelmiş bu deprem için ivme kaydının farklı yöntemlerle üretilmesi pekala mümkündür. Ancak takdir edilecektir ki; çok fazla parametreye ve kabule dayalı olarak üretilebilecek bu sentetik kayıtlar doğrulanmaya muhtaçtır. Bu noktada; zamana meydan okuyan tarihi yapılar devreye girmiştir. Muhtelif kaynaklarda 2 Haziran 1859 Erzurum depreminde hasar almış tarihi camiler ve mahallerlere dair bilgi yer almaktadır. Bu bilgi ile; çalışma kapsamında üretilen sentetik ivme kaydının doğrulanmasında tarihi camilerin şahitliklerine müracaat edilmiştir.

Tez çalışması için öncelikle geniş kapsamlı literatür ve arşiv araştırması yapılmıştır. 2 Haziran 1859 Erzurum depremi için arşivlerde ve literatürde yer alan bilgiler bir araya getirilmiştir. Bu bilgiler üzerinden depremin hasar durumu ortaya çıkarılmıştır. Depremde hasar kaydı arşivde veya literatürde net olarak bilinen tarihi yığma camiler belirlenmiştir. Daha sonra hasar kaydı mevcut olan tarihi yığma camilere ek olarak, depremde net hasar kayıtları bulunmayan ancak depremde ağır hasar alan mahallelerde yer alan camiler de tez çalışmasının kapsamına dahil edilmiştir. Tez çalışması dahilinde toplam 9 tarihi yığma camii ele alınmıştır.

Tez çalışmasının kaynak özetleri bölümünde, sentetik deprem kayıtları üzerine ve tarihi yığma yapıların yapısal davranışını konu edinen çalışmalar kronolojik sırayla listelenerek ayrı ayrı özetlenmiştir. Tez çalışmasının üçüncü bölümünde, Erzurum'un jeolojisi ve depremselliği ayrı bir başlık altında incelenmiştir. Tez çalışmasının dördüncü bölümünde stokastik kuvvetli yer hareketi yaklaşımı, bütün terminolojisi ile ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Tez çalışmasının ana konusu olan 2 Haziran 1859 Erzurum depremi, detaylı bir şekilde ayrı bir bölümde anlatılmıştır. Deprem etki alanı, hasar kaydı, tarihi yapılara etkisi bakımından ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Yapıların dinamik

davranış parametrelerini yerinde deneysel bir şekilde belirlemek için kullanılan Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi, terminolojisi ile ayrı bir bölümde ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

Tez çalışmasının yedinci bölümünde, tez çalışması için seçilen camilerin sonlu eleman modellemeleri yapılmıştır. Öncelikle tez çalışması için seçilen 9 tarihi yığma cami ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir. Ardından camilerin sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Bu oluşturulan sonlu eleman modelleri üzerinde teorik modal analizler yapılarak camilerin teorik davranış parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra, camilerin OMA yöntemi yardımıyla dinamik davranış parametreleri belirlenmiştir. Camilerin OMA yöntemi ile dinamik davranış parametrelerinin belirlenmesinin ardından, deneysel dinamik davranış parametreleri ile teorik davranış parametreleri kıyaslanmıştır. Camilerin sonlu eleman modellerinin, camilerin dinamik davranış parametrelerini yansıtabilmesi için camilerin sonlu eleman modelleri üzerinde model kalibrasyon güncellemeleri yapılmıştır. Böylece camiler dinamik analiz için hazır hale getirilmiştir.

Tez çalışmasının sekizinci bölümünde, ilk olarak 2 Haziran 1859 depreminin sentetik deprem kaydı oluşturulmasından bahsedilmiştir. Sentetik deprem kaydı oluşturulurken kullanılan bütün parametreler detaylı bir şekilde verilmiştir. Oluşturulan sentetik deprem kaydı, camilerin kalibre edilmiş sonlu eleman modellerine etkitilmiştir. Camilerin bu dinamik analiz sonucundaki hasar durumları elde edilmiştir. Bu hasar durumları ile literatürde erişilebilen hasar kayıtları karşılaştırılarak, 2 Haziran 1859 depreminin sentetik ivme kaydı doğrulanmaya çalışılmıştır. Camilerin dinamik analiz sonucundaki hasar limitleri, literatürde belirtilen hasar limitleri ile karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasının dokuzuncu bölümünde, bu çalışmada ulaşılan sonuçlara yer verilmiştir. Tez çalışmasının ilgili bölümlerinde ulaşılan sonuçlar bu bölümde bir özet şeklinde sunulmuştur.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Tez çalışması süresince kapsamlı bir literatür tarama çalışması yapılmıştır. Literatür inceleme çalışmasında, sentetik deprem kaydı üretimi için yapılan çalışmalar ile tarihi yığma yapı davranışına yönelik çalışmalar derlenip bu bölümde aktarılmıştır.

2.1. Sentetik Deprem Kayıtlarıyla İlgili Çalışmalar

Yer hareketi simülasyonları bir bölgenin depremselliği, fay karakteristiği ve zemin parametreleri hakkında bilgi vermekle birlikte herhangi bir yer hareketi kaydı bulunmayan bölgelerde sismik tasarım ile analizler için potansiyel yer hareketi parametreleri hakkında bir fikir sağlamaktadır (Uğurhan 2010). Son yıllarda sentetik deprem kayıtlarının üretilmesi ve üretim yöntemleriyle literatürde önemli çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar, kronolojik bir şekilde sıralanarak çalışmaların içerikleri hakkında bilgi verilmiştir.

Aki (1967) sismik spektrum ve deprem kaynaklarının bazı dislokasyon modellerine göre depremin büyüklüğü arasında bir yaklaşım temeli oluşturmayı amaçlamıştır. Dislokasyon modelini belirlemek için parametreler önemli ölçüde düşürülmüştür ve bu düşürülmede büyük ve küçük depremlerin benzer koşulları sağladığı kabul edilmiştir. İlk olarak, fay düzlemine karşı bir noktada ve bir *t* anında bir dislokasyon bağıntısı belirlenmiştir. Fayın bu düzlem üzerinde genişlediği varsayılmıştır. Oluşturulan dislokasyon bağıntısı baz alınarak çeşitli bağıntılar yardımıyla iki teorik model oluşturulmuştur. Bu modeller, ω^{-2} ve ω^{-3} adı verilen deprem spektrumunun frekansının karesi ve küpü ile orantılı değiştiği deprem kaynağının dislokasyon hızının otokorelasyon fonksiyonun üstel azalan fonksiyonları olarak belirlenmiştir. Daha sonra bu modeller, gerçek sismolojik veriyle kıyaslanmıştır ve gerçeğe en yakın yüksek frekanslı deprem yaklaşımının ω^{-2} modeli olduğu belirtilmiştir.

Aki (1968) diğer bir çalışmasında bir fay yakınındaki sismik yer değiştirmeler üzerinde çalışmıştır ve kısa mesafelerdeki sismik hareketi kontrol eden en önemli parametrenin dislokasyon olduğunu belirtmiştir. Çalışmada, 28 Haziran 1956 Parkfield depremi esnasında San Andreas fayından 80 metre uzaklıkta yer alan ivmeölçerler

tarafından kaydedilen sismik hareketin yer değiştirmeleri elde edilmiştir. Daha sonra hareketli bir dislokasyon modeli oluşturmak için sismik yer değiştirmelerin yanında sentetik yöntemlerle yer değiştirmeler teorik olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar birbirleriyle karşılaştırıldığında, teorik yer değiştirmeler ile sismik yer değiştirmelerin birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Her iki durumda da fay dislokasyonunun 60 cm ile sınırlandığı belirtilmiştir.

Brune (1970) depremlerden kaynaklanan dislokasyon etkilerinin efektif gerilmelerle doğrudan ilgili olduğunu belirtmiştir. Çalışmada, fay kenarlarını hızlandıran efektif gerilmeler kullanılarak yeni bir deprem modeli tasarlanmıştır. Bu deprem modelinin, yakın, uzak-yakın, yer değiştirme-zaman fonksiyonlarını ve sürtünmeden kaynaklı gerilme düşüşlerini içerdiği belirtilmiştir. Aynı zamanda bu tasarlanan modelin depremler için gözlemlenen yakın ve uzak-yakın etkilerini başarıyla açıkladığı, efektif gerilmelerin ise 100 bar'dan sonra etkisinin kalmadığı ifade edilmiştir. Bu gerilme değeri için yakın fay parçacık hızının üst limitinin 100 cm/s, ivme değeri üst limitinin 10 Hz frekans değerinde 2g olduğu, daha düşük frekanslardaki titreşim değerleri için bu değerlerin daha da azalacağı belirtilmiştir. Yakın alan yer değiştirme değerlerinin rijitlik, efektif gerilme, kesme dalga hızı ve kesme dalga hızının böldüğü kullanım dışı fay boyutu kullanılarak bir bağıntı yardımıyla hesaplandığı belirtilmiştir. Oluşturulan teorik spektral bağıntılar ile seçilen gerçek deprem spektrumları karşılaştırıldığında efektif gerilme, gerilme düşümü ve kaynak boyutlarının tahmin edilebilir olduğu belirtilmiştir.

Hanks and Boore (1984) teorik ve deneysel olarak sismik moment büyüklük ilişkilerini incelemişlerdir. Moment büyüklük ilişkilerinin deprem mekanizmalarında önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir. Çalışma için Kaliforniya'nın merkezindeki ve güneyindeki veri setleri incelenmiştir. Sabit bir gerilim düşümünü belirlemek ve maksimum bir frekansta sismik momenti kullanarak bir noktadaki yerel deprem büyüklüğünü tahmini olarak belirlemek için çeşitli bağıntılar türetilmiştir.

Wells and Coppersmith (1994) tarihi deprem kayıtlarını kullanarak yeni ampirik formüller geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu formüller için dünya genelinde gerçekleşen tarihi depremler taranmış ve depremlerin parametreleri ayrı ayrı sınıflandırılmıştır. Bu parametrelerden deprem büyüklüğü ile fay yüzey yırtılma uzunluğu, alt yüzey yırtılma

uzunluğu, aşağı yırtılma genişliği, yırtılma alanı ve maksimum ortalama yer değiştirme arasında bağıntılar kurulmuştur. Bu bağıntıların regresyon analizleri yapıldığında, moment büyüklüğü ile yer değiştirme arasında tutarlı ve güvenilir bir ilişki bulunmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Deprem büyüklüğü ile diğer tüm yırtılma parametreleri arasında ise tutarlı ve güvenilir bir ilişki olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Boore and Joyner (1997) kaya zeminlerdeki zemin büyütmelerini incelemişlerdir. Zemin büyütmelerinin, stokastik deprem hareketi üretmede doğrudan kullanıldığı ifade edilmiştir. Zemin büyütmeleri, kesme hızı ve yoğunluğun derinliğe bağlı bir fonksiyonu şeklinde ifade edilmiştir. Çalışmada Kuzey Amerika'da bulunan farklı türdeki kaya ve sert kaya zeminlerdeki sondajlar yapılmıştır. Yüksek frekanslardaki zemin büyütmelerinin kaya zeminlerde 3,5, sert kaya zeminlerde ise 1,8 olduğu tespit edilmiştir.

Beresnev and Atkinson (1998a) 1994 yılında gerçekleşen 6,7 büyüklüğündeki Northridge depreminin stokastik sonlu fay yöntemiyle oluşturulan yer hareketi kaydının kaya zeminlerde doğrulanması üzerine çalışmışlardır. Depremin gerçekleştiği faya yakın 28 tane kaya zeminli istasyondan depremin nesnel verisi elde edilmiştir. Depremin sentetik ivme kaydı stokastik sonlu fay yöntemi ile oluşturulmuştur. Bu kayıt oluşturulurken fay her biri ω^{-2} açısal spektruma sahip alt faylara bölünmüştür. Depremin sentetik ivme kaydının 0,1 ile 15,5 Hz frekans aralığında %95 güvenilirlikte gerçek ivme kaydını yansıttığı görülmüştür. Bu doğrulama yardımıyla stokastik sonlu fay modellerinin kaya zeminlerde gözlemlenen yer hareketlerini yeniden üretmede genellikle iyi performans gösterdiğini göstermiştir.

Beresnev and Atkinson (1998b) sonlu faylardan simüle edilmiş zaman tanım alanında stokastik ivme kayıtları için bir yazılım üzerinde çalışmışlardır. Stokastik yer hareketi kayıtları elde edilirken kullanılan sonlu kaynak metodunu daha büyük faylara uygulamak için yeni bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılımla temel olarak, klasik stokastik yer hareketi tahmin metodu kullanılmak kaydıyla metot zemin koşulları, dalga yayılımı, alt fay genişliği ve alt fay uzunluğu gibi parametreler açısından genişletilmiştir. Yazılım oluşturulduktan sonra, 1985 yılında Meksika'da gerçekleşen 8,1 büyüklüğündeki Michoacan depreminin sentetik ivme kayıtları oluşturulmuştur ve yazılımın doğrulanması bu aşamada gerçekleştirilmiştir.

Beresnev and Atkinson (1999) stokastik sonlu fay yöntemini kullanarak Doğu ve Kuzey Amerika'daki gerçekleşen önemli depremlerin sentetik yer hareketi kayıtlarını üretmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada 8 adet 4,0'dan büyük modern cihazlarla kaydedilen depremler ile analog cihazların kaydettiği 3 adet büyüklüğü 5,8 ile 7,0 arasında depremler kullanılmıştır. Oluşturulan sentetik kaydın geniş bir frekans aralığına (0,1 Hz-50 Hz) uyum sağladığı ve sentetik kayıtlarda belirlenen alt fay boyutunun depremin büyüklüğü ile doğru orantılı bir şekilde arttığı sonuçlarına ulaşılmıştır.

Roumelouti et al. (2000) stokastik ve deterministik yöntemleri kullanarak, 1995 Kozani-Grevana depreminin kuvetli yer hareketi simülasyonunu üretmeyi çalışmışlardır. 13 Mayıs 1995 tarihinde gerçekleşen 6,5 büyüklüğündeki deprem ile aynı bölgede 19 Mayıs 1995 tarihinde gerçekleşen 5,1 büyüklüğündeki artçı şoku için sonlu fay metodu ile ampirik Green fonksiyonu birlikte kullanılarak depremlerin sentetik kaydı üretilmiştir. Her iki metot ile üretilen deprem simülasyon kayıtları ve sonuçlarına göre, depremlerin sentetik kaydının gerçek deprem kayıtları ile oldukça tutarlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca bu yöntemlerin 2 Hz'den büyük frekanslı yer hareketleri için oldukça uygun olduğu belirtilmiştir. Daha küçük frekanslı yer hareketleri için de daha fazla çalışma yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Atkinson and Beresnev (2002) New Madrid Fay Zonu'ndaki iki fay üzerinde gerçekleşen 7,5 ve 8,0 büyüklüğündeki depremlerin yer hareketi simülasyonlarını oluşturmuşlardır. Çalışmada bu fay zonuna yakın konumlarda bulunan St.Louis ve Memphis bölgelerinde oluşabilecek 7,5 ve 8,0 büyüklüğündeki depremlerin sentetik kayıtları stokastik sonlu fay yöntemi kullanılarak FINISM yazılımıyla oluşturulmuştur. Sentetik kayıtlar için kaya ve yumuşak zemin parametreleri yazılım ayrı ayrı tanımlanmıştır. Oluşturulan bu sentetik deprem kayıtlarının, doğruluğu için aynı fay zonu üzerinde gerçekleşen 1811-1812 depremlerinin MMI şiddetleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçların birbirleriyle tutarlı olduğu görülmüştür. Fakat bu fay zonu üzerinde 7,5 ya da 8,0 büyüklüğünde hangi depremin gerçekleşeceğinin ön görülmesinin zor olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Boore (2003) stokastik yöntemleri kullanarak yer hareketi simülasyonları üzerinde çalışmıştır. Bu yöntemlerin, yüksek frekanslı yer hareketlerinin simüle edilmesi

için kullanışlı olduğu belirtilmiştir. Bu duruma ek olarak, dünya üzerindeki yıkıcı potansiyeli yüksek olan fakat deprem kaydı mevcut olmayan bölgelerin yer hareketlerini tahmin etmek için uygun bir yöntem olduğu belirtilmiştir. Bu yöntemde; kaynak, iz, zemin gibi stokastik yöntemlerin temel ve önemli parametreleri basit matematiksel fonksiyonlar şeklinde ifade edilmiştir. Bu matematiksel ifadeler kullanılarak belirli bir bölgedeki rastgele titreşimin, çeşitli dönüşümlerle yer hareketi ivme kaydına dönüştüren adımlar ayrıntılı şekilde açıklanmıştır.

Kebeasy and Huseybe (2003), 22 Aralık 1759 Kattegat depreminin hasarlarını incelemişlerdir. Sentetik dalga alanı analizleri kullanılarak depremin İskandinavya ve çevresindeki etkileri incelenmiştir. Depremin bazı bölgelerde hasarı büyük olmasına rağmen deprem şiddeti daha az şiddetli şeklinde tanımlanmıştır. Bu durumda, depremin hasar durumu gözden geçirilmiştir. İki ve üç boyutlu sonlu fark dalga formu modellemeleri kullanılarak depremin büyüklüğü ve şiddeti yeniden değerlendirilmiştir.

Benetatos and Kiratzi (2004) *stokastik sonlu fay yöntemini* kullanarak 30 Mayıs 1990 tarihinde gerçekleşen 6,9 büyüklüğündeki Vrancea ve 22 Ocak 2002 tarihinde gerçekleşen 6,1 büyüklüğündeki Karpat Adaları depremlerinin sentetik deprem kayıtlarını oluşturmuşlardır. Sentetik deprem kayıtları için her iki depremin gerçekleştiği fay yakınında toplam 9 istasyon belirlenmiştir. Bu istasyonların zemin sınıfının kaya zeminler olduğu belirtilmiştir. Daha sonra stokastik sonlu fay metodu kullanılarak, depremlerin gerçekleştiği faylar farklı ölçülerde alt faylara bölünmüştür. Depremlerin gerçekleştiği ana faylar için stokastik sonlu fay yöntemindeki parametreler ayrı ayrı tanımlanarak depremlerin sentetik kayıtları üretilmiştir. Her iki ana deprem için de üretilen sentetik kayıtların gerçek deprem kayıtları ile oldukça uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Motazedian and Atkinson (2005) *stokastik sonlu fay modeli* üzerinde çalışmışlardır. Bu model oluşturulurken modellerin temeli dinamik köşe frekansı kavramına dayandırılmıştır. Bir fay küçük alt faylara bölünerek her bir alt faya küçük bir kaynak noktası atanmıştır. Her bir küçük kaynaktaki yer hareketi stokastik yöntemlerle hesaplanmıştır ve tüm noktalardaki hesaplanan bu hareketler toplanarak fayın bütün olarak yer hareketi hesaplanmıştır. Bu modelde köşe frekansı zamana bağlı bir fonksiyon

olarak tanımlanmıştır. Fayın kırılma geçmişinin ve her bir alt fayın simüle edilmiş zaman serisinin frekans içeriğini kontrol edildiği belirtilmiştir. Bu modelin, geçmiş modellere göre bazı avantajları olduğu ifade edilmiştir. Yüksek frekanslarda yayılan enerjinin saklanmasının alt fay uzunluğuna bağlı olmadığı bu avantajlar arasındadır. Ayrıca bu enerji saklanmasının daha büyük deprem büyüklüğü uygulamasına, yüksek ve düşük frekanslardaki ortalama genlik kontrolüne bağlı olmadığı belirtilmiştir.

Boore and Atkinson (2008) yer hareketi tahmin denklemleri üzerinde çalışmışlardır. Ortalama yer hareketi yatay bileşenleri için yer hareketi tahminlerini üretmek amacıyla deprem büyüklüğü; fay tipi, zeminden kaynağa olan uzaklık ve yerel ortalama kesme hızlarının bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Denklemlerin, periyot aralıkları 0.01 s ile 10 s arasındaki en yüksek yer hızı, en yüksek yer ivmesi ve %5 sönümlü yapay kesin ivme spektrumundan oluştuğu belirtilmiştir. Denklemleri oluşturmak için Pasifik depremleri veri tabanını kullanılıp 1 saniyenin altındaki periyoda sahip 0-400 km mesafedeki 1574 deprem kaydı ve 58 ana deprem şoku analiz edilmiştir. Ardından ana tahmin değişkenleri deprem büyüklüğü, fay yüzeyine en yakın yatay mesafe ve yüzeyden 30 m'ye kadarki zaman ortalamalı kesme dalgası hızı olarak belirlenmiştir. Denklemlerin 5 ile 8 büyüklüğü arasındaki depremlerde, 200 km altındaki yatay mesafede ve 180 ile 1300 m/s arasındaki kesme dalgası hızlarında uygulanabilir olduğu belirlenmiştir.

Campbell and Bozorgnia (2008) 0,01 s ile 10 s arasındaki periyot aralıkları için en yüksek yer hızı, en yüksek yer ivmesi, en yüksek yer değiştirme ve yüzde 5 sönümlü lineer elastik spektrum için yeni ampirik yer hareketi modeli oluşturmayı amaçlamışlardır. Pasifik Deprem Araştırma Merkezi (PEER) yer hareketleri veri tabanından aktif tektonik rejimlerde sığ deprem ana şoklarından serbest yer alan hareketini tahmin etmek için uygun olmayan deprem ve ana şok kayıtları çıkarılarak bir veri seti oluşturulmuştur. Veri setinden fay mekanizmasına bağlı olmak kaydıyla, 4,0 ile 8,5 arasındaki deprem büyüklüğünde ve 0-200 km mesafesi için geçerli, yer hareketinin geometrik ortalama yatay bileşeninin ortalaması ve standart sapması için bağıntılar geliştirilmiştir. Modellerinde deprem büyüklüğü doygunluğu, büyüklük bağımlı azalması, fay tipleri, yırtılma derinliği, asılı duvar geometrisi, lineer ve lineer olmayan

zemin tepkisi gibi parametreler yeni ampirik model oluşturmada kullanıp değerlendirilmiştir.

Akkar and Cağnan (2010) Türkiye için bir yer hareketi tahmin modeli üretmişlerdir ve bu modeli diğer bölgesel ve küresel yer hareketi modelleri ile kıyaslamışlardır. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD)'nın yer hareketi veri tabanı kullanılarak maksimum yatay yer ivmesi, maksimum yer hızı ve yapay spektral ivme için yer hareketi tahmin denklemleri türetilmiştir. Oluşturulan yer hareketi modeli, küresel yer hareketi modelleriyle kıyaslanmıştır. Küresel yer hareketi modellerinde bazı spesifik bölge ve ülkelerde sığ aktif sismik hareketliği yüksek iken, türetilen modellerde bu bölgelerdeki sismik aktifliğin düşük olduğu görülmüştür. Bu tutarsızlıkların küçük deprem büyüklüklerinde daha fazla olduğu ve büyük deprem büyüklüklerine doğru azaldığı tespit edilmiştir. Bu tutarsızlığa fay derinliğinin dikkate alınmamasının neden olabileceği ifade edilmiştir.

Sabegh and Lam (2010) stokastik yöntemleri kullanarak Tahran bölgesi için bir yer hareketi model yaklaşımı geliştirmişlerdir. Kuzeydoğu Tahran bölgesinde 1980 ile 2004 yılları arasında gerçekleşen en küçük deprem büyüklüğü 4,9, en büyük deprem büyüklüğü ise 7,4 olan 25 adet deprem belirlenmiştir. Bu depremler kullanılarak, sentetik deprem kaydı üretiminde kullanılacak parametreler belirlenmiş ve bu parametreler depremin büyüklüğü değişken olarak kullanılarak üretilen bağıntılar yardımıyla yer hareketi modelinin sentetik olarak üretiminde kullanılmıştır. Daha sonra 6,3 ve 7,4 büyüklüğündeki depremlerin elastik tepki spektrumları ile aynı depremlerin sentetik kayıtlarıyla hesaplanan elastik tepki spektrumları birbiriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçların birbiriyle uyumlu olmadığı görülmüştür.

Rota et al. (2010) yığma yapılar için stokastik doğrusal olmayan analizlere dayandırılarak yeni analitik kırılganlık eğrileri geliştirmeyi amaçlamışlardır. Yığma yapıların geniş topolojilerdeki mevcudiyetlerinden dolayı örnek yapıların malzeme özellikleri uygun değer aralıklarında varsayılan rastgele değişkenlerle belirlenmiştir. Monte Carlo simülasyonları, değişken veriyi mekanik parametrelerin olasılık yoğunluk fonksiyonlarından dönüştürmek için kullanılmıştır. Bu aşamadan sonra doğrusal olmayan analizler yapılarak yapıların hasar durumlarına göre kırılganlık eğrileri oluşturulmuştur.

Uğurhan (2010) sismik aktifliğin yoğun olduğu üç bölgede kuvvetli yer hareketi simülasyonları üzerinde çalışmıştır. Çalışmada Kuzey Anadolu Fay Hattı ve Orta İtalya'da stokastik kuvvetli yer hareketlerini doğrulamayı amaçlanmıştır. Çalışmada dinamik köşe frekansına dayanan stokastik sonlu fay yöntemi kullanılarak Düzce, L'Aquila ve Erzincan bölgelerindeki depremlerin kuvvetli yer hareketi simülasyonları çıkarılmıştır. Düzce bölgesindeki simülasyon yer hareketi kaydının doğrulamasında bölgesel deprem kaynağı, yayılma ve zemin parametreleri belirleyici unsurlardır. L'Aquila bölgesinin sentetik kaydında, bölgesel parametrelere ek olarak metodun doğrudan sınırlamaları belirleyici unsurdur. Erzincan bölgesinde kayıtlar diğer iki bölgeye göre az olduğundan uygun model parametreleri hata minimize şemasının da içinde olduğu çok sayıda simülasyonlar yardımıyla belirlenmiştir. Sonuç olarak, yakın alan bölgelerindeki büyük depremlerin simülasyon kayıtları için stokastik sonlu fay yaklaşımı uygun bir yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Uğurhan and Askan (2010) dinamik köşe frekans yaklaşımını kullanarak 12 Kasım 1999 Düzce depreminin kuvvetli yer hareketi simülasyonunu oluşturmayı amaçlamışlardır. Depremin gerçekleştiği faya yakın seçilen noktalarda dinamik köşe frekans yaklaşımına dayalı depremin stokastik sonlu yer hareketi simülasyonu oluşturulmuştur. Stokastik yer hareketi kaydı için depremin gerçekleştiği yere özgü model parametreleri yazılıma tanıtılmıştır. Sentetik yer kaydı oluşturulduktan sonra yer hareketinin doğrulama aşamasına geçilmiştir. Faya en yakın noktadaki en yüksek yer hareketi parametre değerlerinin, depremin hasar dağılımı ile tutarlılık gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Dinamik köşe frekansı yaklaşımına dayalı stokastik sonlu fay yönteminin, büyük depremlerin yer hareketi kayıtlarını yeniden üretmek için pratik bir yaklaşımı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Askan et al. (2013) seyrek izlenen bölgelerde stokastik kuvvetli yer hareketi simülasyonlarını incelemişlerdir. 13 Haziran 1992 tarihli Erzincan Depremi seçilerek bu deprem üzerinde bir doğruluk ve duyarlılık çalışması yapılmıştır. İlk bölümde yalnızca üç kuvvetli yer hareketi istasyonunda kaydedilen 13 Mart 1992 tarihli 6,6 büyüklüğündeki Erzincan Deprem kaydının stokastik sonlu fay metodu kullanılarak sentetik kaydı üretilmiştir. Sentetik kayıt üretimi için kullanılacak deprem kaynağı ve bölgesel zemin parametreleri, bu bölge için daha önceki çalışmaların doğruluğu kabul

edilerek daha önceki çalışmalardan türetilmiştir. İkinci aşamada ise, sentetik deprem kayıtları ile gerçek deprem kayıtları arasındaki duyarlılık sonuçları seçilen giriş parametrelerindeki küçük değişikliklere göre incelenmiştir. Duyarlılıklar için gerilme düşümü, kabuksal kesme dalgası kalitesi ve kappa operatörü parametrelerini içerecek şekilde hesaplanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Karimzadeh et al. (2017) sanal ve gerçek yer hareketlerini kullanarak Erzincan'daki yığma yapıların kırılganlık analizlerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, sanal yer hareketleri kullanarak yığma yapılar için kırılganlık eğrileri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu eğrilerin, gerçek yer hareketi kaydı sonucu oluşan kırılganlık eğrileriyle uygunluğu karşılaştırılmıştır.

Askan and Karimzadeh (2019) potansiyel deprem hareketleri için gerçeğe yakın güçlü yer hareketlerinin olduğu bir veri tabanı oluşturmayı amaçlamışlardır. Özellikle sismik hareket bakımından aktif olan Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın üretme ihtimalindeki depremler gerçeğe yakın oluşturularak, bu depremlerin temel özelliklerini gerçek deprem hareketlerindeki veri ile karşılaştırılmıştır.

Acito et al. (2020) çalışmalarında İtalya'daki yığma yapıların sismik kırılganlıklarını değerlendirmişlerdir. 24 Ağustos 2016 tarihinde gerçekleşen 6,0 büyüklüğündeki ve 30 Ekim 2016 tarihinde gerçekleşen 5,4 büyüklüğündeki Amartice depremlerinde Merkez İtalya'da çöken ve hasara uğrayan yığma yapıların, hasar nedenlerini araştırmak için depremlerin ivme kayıtları bilgisayar ortamındaki yığma yapıların sonlu eleman modellerine uygulanıp doğrusal olmayan analizlerle sonuçlar değerlendirilmiştir.

Karimzadeh et al. (2021) yer hareketi şiddet ölçümlerini kullanarak gerçek ve simüle edilmiş deprem kayıtlarını karşılaştırmışlardır. Kuzey Anadolu Fay Hattı'nda bulunan Düzce ve Erzincan bölgelerinde 8 adet büyüklüğü 7 üzeri deprem kayıtları seçilerek bu depremlerin stokastik yöntemlerle sentetik deprem kayıtları üretilmiştir. Her iki kayıt için geniş büyüklük değer aralıkları, kaynak-zemin etkileşimleri ve zemin özellikleri gibi parametreleri içeren büyük veri setleri oluşturulmuştur. Alternatif şiddet parametreleri gerçek ve simüle edilmiş setler için hesaplanmış ve istatiksel olarak

değerlendirilmiştir. Tek serbestlik dereceli modeller için farklı şiddet seviyelerinde şiddet ölçümleri ile maksimum elastik olmayan yer değiştirmeler ile oluşturulan korelasyonları incelenmiştir. Simüle edilmiş veri için daha iyi korelasyonlar olduğu belirtilmiştir.

Dang et al. (2023) sonlu fay yöntemi yaklaşımını kullanarak, Çin'de seçilen 16 yakın saha istasyonunda 2022 yılında gerçekleşen 6,6 büyüklüğündeki Ludig depremini sentetik olarak modellemişlerdir. Sonlu fay yöntemi yardımıyla modellenen depremin sentetik ivme kaydı, seçilen 16 istasyonun bulunduğu konumlarda etkitilmiştir. Sentetik ivme kaydı ile gerçek ivme kaydı, bölgesel sprektral karakteristikler, zemin etkileri ve kalite faktörleri açısından depremin maksimum yer ivme ve maksimum yer hız değerlerinin değişimi karşılaştırılmıştır.

Flores et al. (2023) Şili Santiago'da orta derinlikte gerçekleşen 7,8 büyüklüğündeki depremin güçlü stokastik yer hareketi kaydını oluşturmuşlardır. Bu depremin sentetik ivme kaydı oluşturulduktan sonra, bu yöntemle oluşturulan sentetik ivme kaydını doğrulamak için Santiago yakınlarında gerçekleşen 5,6 büyüklüğündeki başka bir depremin sonlu fay metodu kullanarak sentetik deprem kaydı üretilmiştir. Daha sonra bu deprem kayıtları kalibre edilerek 2005 yılında gerçekleşen 7,8 büyüklüğündeki Tarapaca Depreminin kuvvetli yer hareketi yeniden üretilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde Santiago'da en yüksek yer ivmesinin 1g, fay yırtılma mesafelerinin 100 km ve zemin sınıfının C sınıfı olduğunda, kuvvetli yer hareketi simülasyonları için önemli parametreler olduğu belirtilmiştir. Bu üretilen kuvvetli yer hareketi simülasyonlarının Santiago'nun gelecek sismik tehlike çalışmaları için önemli bir rol oynadığı ifade edilmiştir.

He and Pan (2024) yer hareketi tahmini için düzenlenmiş stokastik sonlu fay yönteminin doğrulanmasını ve uygulanmasını incelemişlerdir. 2008 yılında gerçekleşen 7,9 büyüklüğündeki Wenchuan depreminin 150 km içinde yer alan güçlü yer hareketleri simüle edilmiştir. Geleneksel sonlu fay yönteminden farklı olarak alt fay dinamik köşe frekansı üzerindeki yırtılma yayılma yönünün etkisini hesaba katmak için alt fay dinamik köşe frekansına alt fayın hiposantra yırtılma yayılma yönüne göre konumunun etkisini hesaba katan bir ayarlama getirilmiştir. Geliştirilen yöntem ile klasik yöntem maksimum yer ivmesi (PGA), sözde maksimum yer ivmesi (PSA) ve süre yönünden karşılaştırıldığında yeni geliştirilen yöntemin, fay yırtılma etkisini doğru bir şekilde

yansıttığı ve kuvvetli yer hareketi tahminleri için yeni geliştirilen yöntemin daha gerçekçi bir tahmin yöntemi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

2.2. Tarihi Yığma Yapıların Yapısal Davranışını Konu Edinen Çalışmalar

Bu çalışma kapsamında üretilen sentetik deprem kaydının doğrulanmasında tarihi yığma yapılar materyal olarak değerlendirilmiştir. 2 Haziran 1859 Erzurum depreminde hasar alan tarihi camilerin sonlu eleman modelleri üretilen sentetik deprem kaydı altında analiz edilmiştir. Bu nedenle, ilgili literatürde sürekli olarak tarama yapılmış ve çok sayıda çalışmaya ulaşılmıştır. Bu bölümde, ilgili çalışmaların en güncel olanlarına yer verilmiştir.

Doğangün and Ural (2007) Anadolu'da taştan inşa edilmiş kemer köprüleri incelemişlerdir. Malabadi Köprüsü'nün sonlu elemanlar yöntemiyle teorik sonlu eleman modelini oluşturarak köprünün yapısal davranışını incelemişlerdir.

Bayraktar vd (2009) Kömürhan Köprüsü'nün, teorik ve deneysel dinamik karakteristiklerini karşılaştırarak bu sonuçlara göre köprünün sonlu eleman model kalibrasyonunu güncelleştirmişlerdir. Yapının, önce SAP 2000 yazılımında sonlu elemanlar yöntemiyle teorik modeli oluşturulup köprünün teorik mod şekilleri ve modal frekans değerleri belirlenmiştir. Daha sonra Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi kullanılarak köprünün dinamik karakteristikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldıktan sonra köprünün sonlu eleman modelinin köprünün mevcut durumunu en iyi şekilde yansıtabilmesi için malzeme özellikleri ve sonlu eleman modelinin sınır şartları üzerinde iyileştirmeler yapılmıştır.

Sevim et al. (2011) tarihi köprülerin tahmini depreme karşı tepkileri için sonlu elemanlı modelleme kalibrasyonunun ve yerinde yapılan titreşim testinin önemini vurgulamışlardır. Çalışmada Rize Çamlıhemşin'de bulunan Osmanlı ve Şenyuva taş köprüleri önce üç boyutlu olarak ANSYS Workbench programında modellenmiş, köprülerin teorik mod şekilleri ve modal frekansları elde edilmiştir. Daha sonra köprülerde OMA yöntemi ile köprülerin deneysel olarak dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar yardımıyla köprülerin sonlu eleman modelleri üzerinde

model kalibrasyon işlemi yapılarak deneysel sonuçların sonlu eleman modelinde de tam olarak yansıtılması sağlanmıştır. En sonunda, köprülerin hem ilk sonlu eleman modellerine hem de kalibre edilmiş sonlu eleman modellerine 13 Haziran 1992 Erzincan Depremi ivme kaydı etkitilerek modellerin hasar durumları birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Bayraktar et al. (2012) operasyonel modal analiz yöntemiyle yapıların yakın saha patlama kaynaklı yer hareketlerine karşı güvenliklerini değerlendirmişlerdir. Bu araştırma için bir betonarme bina, bir yığma yapı, bir betonarme karayolu köprü ve yığma kemer köprü seçilmiştir. Öncelikle bu yapıların sonlu eleman modelleri ANSYS Workbench yazılımında oluşturularak yapıların teorik mod şekilleri ve modal frekans değerleri belirlenmiştir. Ardından, yapıların OMA yöntemiyle dinamik karakteristikleri deneysel olarak elde edilmiştir. Daha sonra, deneysel sonuçlar yardımıyla yapıların sonlu eleman modelleri üzerinde model kalibrasyon güncellemeleri yapılmıştır. En sonunda bir jeofon yardımıyla sanal patlama kaynaklı bir ivme kaydı oluşturularak yapıların sonlu eleman modellerine etkitilmiştir. Yapıların sonlu eleman modellerinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonucunda yapıların patlamaya karşı güvenlik durumları incelenmiştir.

Çalık et al. (2014) ortam titreşimleri yardımıyla hasar almış ve restore edilmiş yığma örtülerin yapısal dinamik davranışını belirlemişlerdir. Trabzon'daki Küçük Fatih Camii'nde bulunan örtüdeki üç yığma kemer üzerinde restorasyon öncesi belli hasarlar olduğu anda, restorasyon sırasında ve restorasyon sonrasında OMA yöntemi ile yapının üç farklı durumdaki deneysel mod şekilleri ve modal frekans değerleri elde edilmiştir.

Torres et al. (2017) Şili Santiago'da bulunan Metropolitan Kilisesi'nin, OMA yöntemiyle dinamik karakteristiklerini belirlemeyi ve bu sonuçlara göre kilisenin sonlu eleman modelini güncellemeyi amaçlamışlardır. Kilise üzerinde önce OMA uygulaması yapılıp deneysel dinamik parametreleri belirlenmiştir. Ardından kilisenin sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Kiliseyi oluşturan taş, harç ve betonarme malzemelerin mekanik özellikleri için OMA sonuçlarına göre elastisite modül değer aralıkları oluşturulmuştur.

Genç et al. (2018) 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (TBDY) göre tarihi bir saat kulesinin yerine özgü sismik karakteristikleri dikkate alarak dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Çorum'da bulunan tarihi yığma bir saat kulesinin önce ANSYS yazılımı kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulmuştur ve bu kulenin teorik mod şekilleri ile modal frekans değerleri elde edilmiştir. Ardından OMA yöntemi ile saat kulesinin dinamik karakteristik özellikleri deneysel olarak elde edilmiştir. Daha sonra deneysel sonuçlar baz alınarak, saat kulesinin sonlu eleman modelinde model kalibrasyon güncellemesi yapılmıştır. En sonunda Çorum iline özgü bölgenin sismik karakterini yansıtan bir ivme spektrumu oluşturularak saat kulesinin sonlu eleman modeli üzerinde doğrusal olmayan analizler yapılmış ve sonuçlar incelenmiştir.

Kızılpınar (2018) tarihi yığma yapılarda deprem davranışı ile yakın fay etkisindeki yığma yapıların deprem davranışlarını karşılaştırmıştır. Çalışmada yapı malzemeleri, fay hattına olan uzaklıkları, deprem bölgeleri farklı üç farklı türde yığma yapı seçilip, sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Bu yapılara normal deprem kayıtları ve yakın fay etkili deprem kayıtları etkiterek yapıların davranışları karşılaştırılmıştır.

Korkmaz et al. (2018) çok katlı donatısız yığma yapıların deprem performansını araştırmışlardır. Çalışmada tarihi Erzurum İmam Hatip Okulu ele alınmıştır. Bu yapının ANSYS Workbench yazılımında sonlu eleman modeli oluşturulmuştur ve numerik mod şekilleri belirlenmiştir. Daha sonra önce kapasite spektrum yöntemi kullanılarak yapı üzerinde yapılan itme analizi ile yapının kapasite eğrileri çizilmiştir. Daha sonra deprem analizi için yapının sismik durumunu yansıtan ortalama bir ivme spektrumu oluşturularak yapının deprem performansı incelenmiştir. Belirlenen hasar limitleri doğrultusunda yapının hasarları değerlendirilmiştir.

Özdoğan (2018) beton Schmidt çekici kullanarak doğal taşlardan imal edilen yığma duvarların mekanik özelliklerinin elde edilmesine yönelik bir yöntem geliştirmeyi amaçlanmıştır. Çalışmada, tarihi bir yığma yapıdan alınan doğal taşların fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra bu değerler beton Schmidt çekici sertlik değerleriyle ilişkilendirilip taşların basınç mukavemetine ve elastisite modüllerine ulaşılacak bağıntılar türetilmiştir. Bu bağıntılar kullanılarak, tarihi Erzurum Kadana Camii'nin duvar mekanik özellikleri elde edilmiştir. SAP 2000 yazılımındaki oluşturulan

caminin sonlu eleman modeline bu değerler tanıtılmıştır. Caminin bu değerlerle, teorik modal analizi gerçekleştirilerek caminin mod şekilleri ve modal frekans değerleri elde edilmiştir. Daha sonra cami üzerinde OMA yöntemi ile caminin deneysel mod şekilleri ve modal frekans değerleri elde edilmiştir. Caminin teorik modal analiz sonuçları ile OMA sonuçları karşılaştırılarak oluşturulan bağıntıların geçerliliği kontrol edilmiştir.

Pellegrini et al. (2018) tarihi yığma yapılarda modal analizler üzerinde çalışmışlardır. Yığma yapıların genellikle yüksek basınç mukavemeti ve düşük çekme mukavemeti altında klasik doğrusal olmayan davranış sergiledikleri bilinmektedir. Eski yığma yapıların ise kalıcı yükler veya bir takım yapıda hasara neden olan olaylar neticesinde yapı üzerinde çatlakların olduğunu belirtilmiştir. Bu çatlakların global dinamik yapı davranışında dikkate alınması gerekmektedir. Yapısal hasarlar altındaki yığma yapıların dinamik özelliklerinin tahmini için çeşitli nümerik yaklaşımlar oluşturulmuştur. Bu nümerik modeller üzerinde teorik modal analizler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle üç sonlu eleman model yaklaşımı, tarihi kemer köprüler üzerinde artan yükler altında denenmiştir. Daha sonra da çatlaklara sahip yığma bir kule olan Mogaduro Saat Kulesi'nde restorasyon öncesi ve sonrası yapı davranışı incelenmiştir. Yapı üzerinde OMA yöntemiyle hem restorasyon öncesi hem de restorasyon sonrası yapının deneysel dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Ardından, yapının hem restorasyon öncesi hem de restorasyon sonrası sonlu eleman modelleri üzerinde sonlu eleman model kalibrasyon güncellemeleri yapılmıştır. Model kalibrasyon güncellemeleri tamamlanan modellerde analizler yapılarak yapının doğrusal bozulma oranları karşılaştırılmıştır.

Tanganelli et al. (2018) Floransa'da sosyal tesis olarak kullanılan tarihi yığma yapıların sismik performansını incelemişlerdir. Çalışmada yerel etkileri, malzeme özellikleri, sismik ve zemin etkileri değerlendirilerek yığma yapılar üzerinde doğrusal olmayan statik analizler yapmışlardır.

Altunışık et al. (2019) restorasyon sonrasında OMA yöntemini tarihi ahşap köprülerin modal parametrelerini tanımlamayı amaçlamışlardır. Çalışmada, ahşaptan inşa edilmiş tarihi Buzlupınar Köprüsü'nün önce sonlu eleman modeli oluşturularak köprünün teorik modal parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra OMA yöntemi kullanılarak

köprünün deneysel dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, sonlu eleman modeli üzerinde model kalibrasyonu yapılmıştır.

Jaihoon (2019) 2018'de yenilenen Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY)'ne göre tarihi yığma bir caminin performans analizini çalışmıştır. Tarihi Konya Sille Ak Cami'nin üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP 2000 yazılımında oluşturularak caminin önce statik analizi, daha sonra ise deprem analizi gerçekleştirilerek yapı elemanlarındaki hasar durumları incelenmiştir.

Yıldızoğlu (2019) çalışmasında tarihi yığma yapıların yapısal performansını incelemiştir. Çalışmada, tarihi Bayburt Lisesi incelenerek yapının sonlu eleman modeli hazırlanmıştır. Yapının kendi ağırlığı altındaki davranışı incelendikten sonra bu modele farklı büyüklükte depremler etkitilerek yapının deprem altındaki davranışı ve olası hasar durumu incelenmiştir.

Aslay ve Okuyucu (2020) Erzincan Değirmenliköy Kilisesi'nin apsis hasarını teknik olarak araştırmayı amaçlamışlarıdır. 1939 Erzincan depreminde ana gövdesi ayakta kalan yapılardan biri olan kilisenin apsis kısmının depremde yıkıldığı rivayet edilmiştir. Kilise hakkında gerekli materyaller elde edildikten sonra kilisenin sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Kilise üzerinde OMA uygulaması yapıldıktan sonra kilisenin sonlu eleman modeli üzerinde model kalibrasyonu yapılmıştır. Yıkılan apsis kısmı sonlu eleman modeline eklenen kiliseye, 1939 deprem kaydına ulaşılamadığı için aynı bölgede gerçekleşen 1992 Erzincan depreminin ivme kaydı etkitilerek dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, kilise apsisinin yapı gövdesiyle birleştiği noktadan hasar almış ve yapıdan ayrılmış olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Aşıkoğlu et al. (2020) farklı model yaklaşımlarıyla güçlendirilmemiş yığma yapıların itme analizlerini incelemişlerdir. Bu tür yapıların burulma etkileri altındaki sismik tepkileri ve bu model yaklaşımlarının basitleştirilerek düzensiz yığma yapılar için kullanılması ana amaçlarındandır. Bu çalışma için yapılar üzerinde süreklilik esaslı, kaynak esaslı ve yayılım esaslı yaklaşımlara doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Her bir yaklaşım kapasite eğrileri ve genel hasar durumları açısından birbiriyle karşılaştırılmıştır.

Bilgin and Hysenlliu (2020) alçak ve orta yükseklikli binalarda yakın ve uzak fay yer hareketi etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada Arnavutluk'ta yaklaşık 50 yıllık 7 yığma yapı seçilerek bu binaların sonlu eleman modellerine yakın ve uzak fay yer hareketlerini etkiterek doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Bu binaların her iki yer hareketindeki sismik kapasiteleri ve performansları incelenmiştir.

Cui et al. (2020) ahşap çerçeveli bir yığma yapı olan Chuan-dou yapısının sismik performansını incelemişlerdir. Yapının hem orijinal hem de karbon fiberle güçlendirilmiş hali sismik performanslarını incelenmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Hacıefendioğlu (2020) yaptığı çalışmada trafik kaynaklı yer hareketinin, tarihi yığma yapılar üzerindeki dinamik davranışlarının tespitini amaçlamıştır. Çalışma için Samsun'daki tarihi Taşhan binası seçilmiştir. Yapının elemanlarının malzeme ve yapısal özellikleri belirlemek için tahribatsız yöntemler kullanılmıştır. Ardından, yapının dinamik analizleri için trafik kaynaklı yer hareketi modeli oluşturulmuştur. Daha sonra dinamik analizler yapının hasarlı ve hasarsız durumlarına ayrı ayrı yapılıp sonuçları karşılaştırılmıştır.

Halder et al. (2020) Kuzeydoğu Hindistan'daki var olan yığma yapıların hasar ve sismik kırılganlıklarını incelemişlerdir. Geçmişte iki büyük deprem geçiren bu bölgedeki depreme maruz kalan yapıların doğrusal olmayan sismik yaklaşımlar kullanılarak hasar ve kırılganlık analizleri yapılmıştır.

Hökelekli (2020) çalışmasında zemin ve yapı arasındaki etkileşimlerin yapıların deprem performansına etkisini araştırmıştır. Çalışmada üç farklı zemin türü altındaki tarihi yığma minarelerin, iki farklı mesnetlenme durumundaki deprem davranışı incelenmiştir.

Karalar ve Çavuşli (2020) tarihi bir yığma yapının performansını incelemişlerdir. Çalışmalarında 1941 yılında Zonguldak'ta inşa edilen Rombaki Konağı'nın yapısal performansı incelenmiştir. Konağın güçlendirilmemiş halinin performans analizi yapıldığında binanın yıkılma riski altında olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Daha sonra TBDY (2018)'ye göre bina üzerinde mantolama ve güçlendirme çalışması yapılmıştır.

Binanın en son halinin sonlu eleman modeli üzerinde performans analizi yapıldığında konağın yıkılma riskinin ortadan kalktığı görülmüştür.

Orlando et al. (2020) anıtsal bir İtalyan yığma yapı olan Rocca Strozzi yapısının yapısal davranışını ve sismik güçlendirmesini değerlendirmişlerdir. Bilgisayar ortamında sonlu eleman modeli oluşturulan yapıda statik ve modal analizler yardımıyla yapının dinamik davranış parametrelerini incelenmiştir.

Shi et al. (2020) tuğladan yapılmış eski yığma yapılar için yenilikçi sismik güçlendirme çözümü üstünde teorik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır Çalışmada binanın taban alanı yeni eklenen izole edilmiş katlarla yükseltilirken, daha düşük tuğla kısım ise prekast beton panellerle güçlendirilmiştir. Üç farklı çeşit güçlendirme şeması belirlendikten sonra bu güçlendirilmiş yapıların hem teorik hem de deneysel olarak sismik performansları belirlenmiştir.

Sözen ve Çavuş (2020) tek açıklıklı köprülerde geometrik şekil değişikliğinin köprü deprem davranışına etkisini araştırmışlardır. Çalışmada Tarihi Niksar Yılanlı Köprüsü'nün, yıllar içinde çeşitli nedenlerden dolayı özgün halini koruyamadığı belirtilmiştir. Analizler için köprünün özgün simetrik şekli ile bugünkü durumunu yansıtan asimetrik şeklinin sonlu eleman modelleri ANSYS yazılımında oluşturulmuştur. Her iki köprü modelinde de önce statik analizler yapılmış, en yüksek basınç gerilmelerinin köprünün tepe noktasına yakın bir kısımda olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Daha sonra köprülerde modal analizler yapılarak köprülerin mod şekilleri ve modal frekans değerleri elde edilmiştir. Modal analiz sonucunda olası bir hasarın kemerin orta noktasında oluşacağı sonucuna ulaşılmıştır. Köprülerin dinamik analizleri için, 13 Haziran 1992 Erzincan depreminin doğu-batı yönündeki yer hareketi kaydı köprülere etkitilerek köprüler üzerinde doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda, asimetrik köprü tipinin, deprem analizinde daha az zorlandığı ifade edilmiştir.

Uzdil (2020) çalışmasında tarihi bir yığma yapının deprem etkisi altındaki performansını incelemiştir. Çalışmasında, tarihi bir yığma yapı olan İstanbul Üniversitesi Rektörlük Binası'nın sonlu eleman modeli Midas Gen yazılımında oluşturularak yapının statik ve modal analizleri bu yazılımda yapılmıştır. Pro Cinem yazılımında ise deprem

etkileri altında doğrusal ve yerel göçme analizleri yapılarak yapının olası hasar durumları incelenmiştir. Analizler sonucunda yapının kapsamlı bir şekilde güçlendirilmesi önerilmiştir.

Çalayır et al. (2021) OMA yöntemini kullanarak yığma minarelerin sonlu eleman modelleme güncellemesini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma için Elazığ'daki Mustafa Paşa Camii minaresi seçilmiştir. Minarenin ANSYS yazılımında sonlu eleman modeli oluşturularak minarenin teorik mod şekilleri ve modal frekans değerleri belirlenmiştir. Daha sonra cami minaresi üzerinde OMA yapılarak minarenin deneysel dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Daha sonra teorik modal analiz sonuçları ile OMA sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda minarenin sonlu eleman modelinde güncellemeler yapılmıştır.

Mercuri et al. (2021) bir yığma yapı olan Medici Kulesi'nin çökme mekanizmasını incelemişlerdir. Faklı sonlu eleman modelleri ve doğrusal olmayan analizler, oldukça karışık olan kulenin çökme mekanizmasını ortaya çıkarmak için denenmiştir. Fakat bu yöntemlere rağmen istenilen sonuca ulaşılamamış sadece oldukça sınırlı çatlak dağılımı ve hasar mekanizmaları sonucuna ulaşılmıştır. Bu durumu çözmek için 'ayrık kafes parçacık modeli' adı verilen ve yığma yapıyı oluşturan her taş seviyesinde hasar kapasitesi ihtimalini ayrı ayrı simüle ettikleri bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem sismik titreşimler altındaki yığma kulenin tamamına uyarlanmıştır. Bu model sayesinde yığma kulenin tahmini çökme mekanizması ortaya çıkarılmıştır. Bu model oluşturulduktan sonra, model üzerinde kinematik analizler yapılmıştır. Kulenin 6 Nisan 2009 tarihinde gerçekleşen 6,2 büyüklüğündeki L'Aquila depremindeki tahmini çökme mekanizması elde edilmiştir.

Shabani et al. (2022) yığma bir kulenin sonlu eleman modelini güncellemek için kule üzerinde OMA uygulaması yapmışlardır. Çalışmada seçilen Norveç'teki kesme taştan yapılma Slottosfejl Kulesi'nin önce 3D lazer yazıcılar sayesinde sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Daha sonra kulenin sonlu eleman modeli üzerinde teorik modal analiz yapılarak kulenin teorik mod şekilleri ve modal frekans değerleri belirlenmiştir. Kule üzerinde OMA yapılarak kulenin deneysel mod şekilleri ve modal frekans değerleri elde edilmiştir. OMA sonuçları kullanılarak kulenin sonlu eleman modeli üzerinde

kalibrasyon güncellemesi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra da Pasifik Deprem Araştırma Merkezi (PEER) veri tabanından Norveç'in Manjil ve Northridge bölgelerindeki sismik ivme kayıtları seçilip kulenin güncellenmiş sonlu eleman modeline etkitilerek zemin-yapı etkileşimleri incelenmiştir.

Kocaman (2023) çalışmasında restorasyon çalışmalarının tarihi yığma yapılardaki sismik davranışa etkisini araştırmıştır. Çalışmasında Trabzon'daki Molla Siyah Cami'nin sismik davranışı araştırılmıştır. Yapı 11. yüzyılda kilise olarak kullanılmış daha sonra camiye çevrilmiştir. Caminin narteks kısmının özgünlüğünü koruduğu belirtilirken caminin çatı kısmının ise 2015 yılında tamamlanan restorasyonda betonarme örtü ile güçlendirildiği ifade edilmiştir. Betonarme kısmın caminin sismik davranışını nasıl etkilediği çalışmanın amacını oluşturmuştur. Caminin sonlu eleman modeli ANSYS yazılımında oluşturulduktan sonra, caminin teorik mod şekilleri ve modal frekans değerleri elde edilmiştir. Daha sonra, literatür taramasında aynı caminin OMA sonuçları için bulunan çalışma ışığında caminin sonlu eleman modeli kalibre edilmiştir. Ardından modellere 1992 Erzincan, 1992 Cope Medicono ve 1995 Kobe depremlerini etkiterek, yapının deprem davranışları ve yıkılma mekanizmaları belirlenmiştir.

Nguyen and Livaoğlu (2023) minarelerin hasar tespitleri için temel mod şeklini baz alan yeni bir model yaklaşımı üzerinde çalışmışlardır. "Model bazlı olmayan normalizasyon yaklaşımı" minare hasarlarının sadece az sayıda ivmeölçerler tarafından belirlenen temel mod şekli değişikliklerine dayanmaktadır. Yaklaşım yapılardaki gibi silindir minare ve kirişler arasında temel mod şekli açısından benzerlikler olduğu fikrine dayanmaktadır. Özellikle eğer spesifik normalizasyon düğüm noktasının altında hasar meydana gelirse, bu noktada modal genliğin önemli ölçüde değişeceğini ifade edilmiştir. Bu noktanın ise minare hasar tespitine öncülük edeceğini belirtilmiştir. Yaklaşımın doğrulanması için 1467 'de Bursa'da inşa edilen Hacılar Cami'nin 24,25 m yüksekliğindeki minaresi üzerinde analizler yapılmıştır.

Sacco et al. (2023) tarihi eserlerin yapısal hasar değerlendirmeleri için yer değiştirme ve yapısal analizleri birlikte kullanmışlardır. İtalya'nın Liguro bölgesinde toprak kaymasından az etkilenen San Carlo Borremeo Kilisesi'nde yapısal hasar değerlendirmesi üzerinde çalışılmıştır. Yapıdaki gözlenen hasarların kaydı ve zemin

kaymasının yapıda ne derece hasara neden olduğunun tespiti için yapının tarihi, zemin etkileri, lazer tarama ve yer değişme analizinin de içinde bulunduğu kapsamlı yapısal analiz yapılmıştır. Yapının lazer tarama yöntemiyle elde edilen hasarlardan arındırılmış sonlu eleman modeli üzerinde doğrusal olmayan statik analizler yapılmıştır. Bu analizler, toprak kayması ve tespit edilen bazı olaylar nedeniyle ortaya çıkan deformasyon analizlerinden elde edilen bir dizi yer değiştirme modelini baz alarak gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonucunda edilen tahmini hasarlar kilisede mevcut bulunan gerçek hasarlar ile karşılaştırılmıştır.

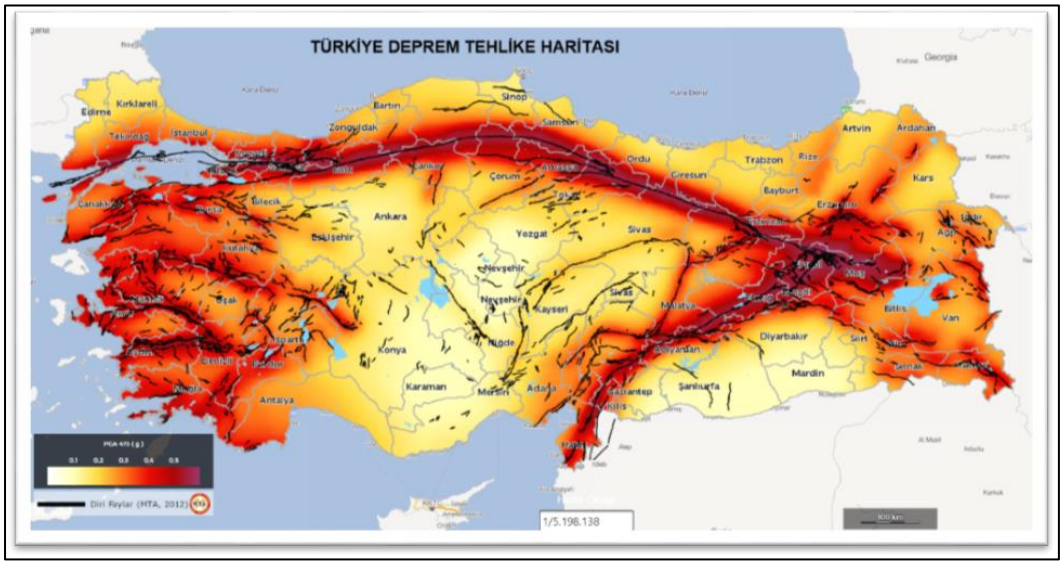
Ergün and Tayfur (2024) Bayburt'ta bulunan yığma bir saat kulesinin restorasyon öncesi ve sonrasındaki sismik performansını sonlu elemanlar yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Kulenin hem restorasyon öncesi hem de restorasyon sonrası sonlu eleman modelleri ANSYS yazılımında oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modeller üzerinde teorik modal analizler yapılarak kulenin teorik mod şekilleri ve modal frekansları belirlenmiştir. Daha sonra kulenin yerinde dinamik parametrelerini belirlemek için yapı üzerinde OMA uygulaması yapılmıştır. OMA sonuçları baz alınarak sonlu eleman modelleri üzerinde kalibrasyon güncellemeleri yapılmıştır. Daha sonra her iki sonlu eleman modeline de 11 farklı deprem kaydı etkitilerek kulenin restorasyon öncesi ve restorasyon sonrası sismik durumu incelenmiştir. Deprem analizleri sonucunda saat kulesinin depreme karşı güvenli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

3. ERZURUM ve DEPREMSELLİĞİ

Tez çalışmasının bu bölümünde, Erzurum'un depremselliği, Erzurum'un fayları, jeolojik yapısı ve zemin yapısı hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra literatür taraması sonucu elde edilen Erzurum'un geçmiş zamanlarda geçirmiş olduğu depremler kronolojik bir biçimde verilmiştir.

3.1. Tektonik Yapı

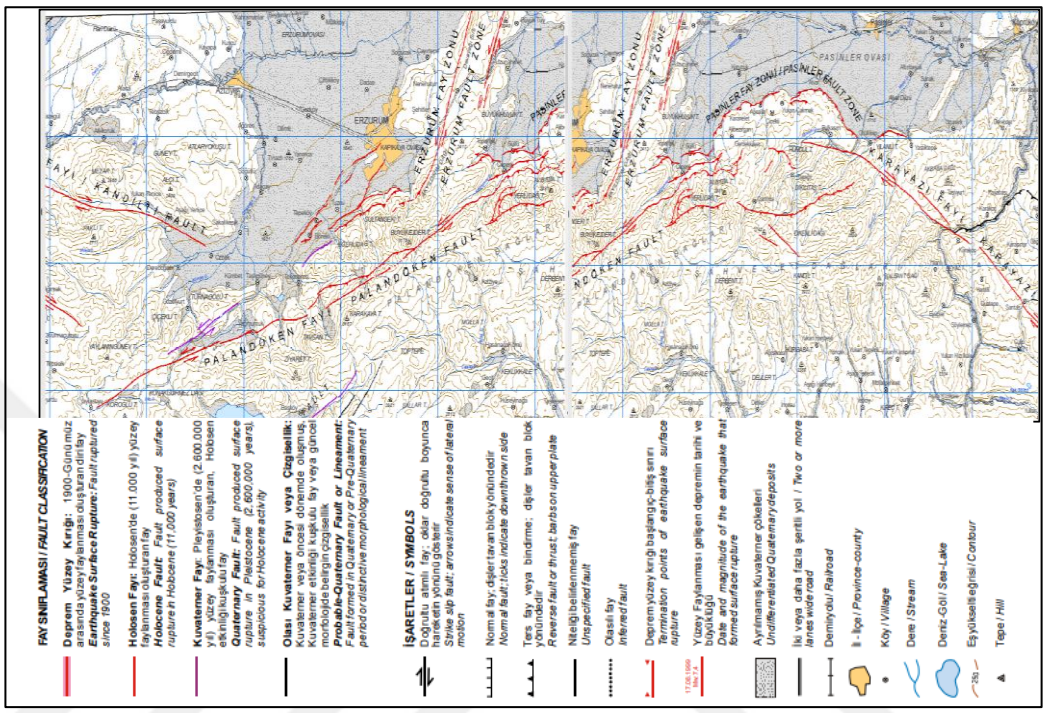
Doğu Anadolu Bölgesinde yer alan Erzurum, Kuzey Anadolu Fay Zonu üzerinde yer almaktadır. Bu fay, tarih boyunca sık sık ve yıkıcı depremler üretmiştir. Erzurum, deprem tehlikesi bakımından tehlikeli iller arasındadır. Şekil 3.1.'de gösterilen Türkiye deprem tehlike haritasında da Erzurum tehlikeli iller arasında gösterilmektedir (Anonim 2021a). Jeolojik açıdan Doğu Anadolu Sıkışma Sistemi'nin sonucu olan doğrultu atımlı fayların yoğun olduğu bir coğrafyada yer alan Erzurum, tarihsel ve aletsel dönemlerde yıkıcı depremler ile sarsılmış, bu depremler sonucunda önemli hasarlara uğramıştır.



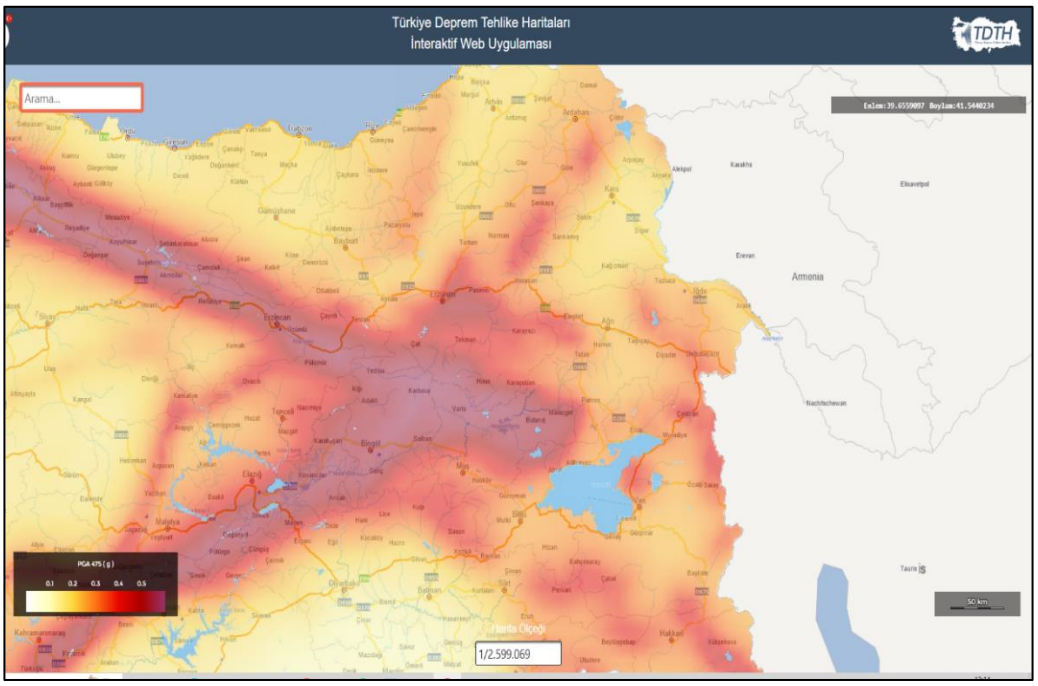
Şekil 3.1. Türkiye Deprem Tehlike Haritası (Anonim 2021a)

Doğu Anadolu Sıkışma Bölgesi'nin Karlıova ile Ermenistan arasında kalan bölümü Kuzeydoğu Anadolu Fay Zonu (KDAFZ) olarak bilinmektedir. Geniş bir kesme zonu olan KDAFZ, birbirlerine paralel olarak gelişmiş kuzeydoğu-güneybatı

doğrultusunda, sol yönlü ve ters bileşenli birçok kısa fay bölgelerine sahiptir. Şekil 3.2.'de Erzurum fayları gösterilmiştir (Anonim 2021b). Şekil 3.3'te ise Erzurum'un deprem tehlike haritası gösterilmiştir (Anonim 2021d).



Şekil 3.2. Erzurum diri fayları (Anonim 2021b)

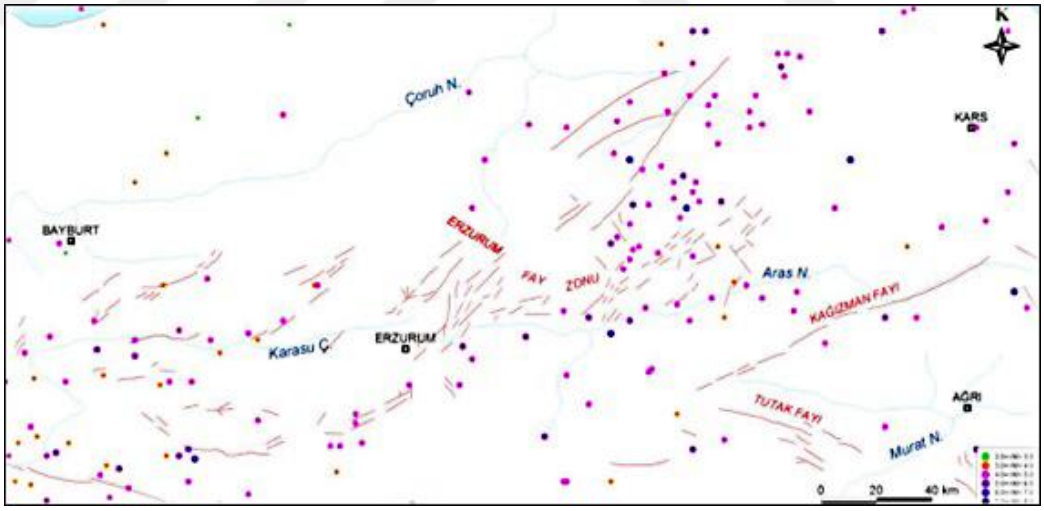


Şekil 3.3. Erzurum en yüksek ivmesi (PGA) haritası (Anonim 2021d)

Şekil 3.3 incelendiğinde, en yüksek yer ivmesi (PGA) haritasına göre Erzurum ilininin yüksek tehlike kategorsinde olduğu yorumu yapılabilir. Özeliikle şehrin güney ve güneydoğu kısmında en büyük ivme değerlerinin 0,4-0,5g arasında olduğu ve bu büyüklükteki depremlerin şehrin bu bölgelerine büyük hasarlar verebileceği yorumu yapılabilir.

3.2. Erzurum Fay Zonu

Doğu Anadolu Fay Zonu'nun Erzurum İli içinde kalan ve oldukça diri faylar içeren kısmı Erzurum Fay Zonu olarak adlandırılmaktadır. Bu fay zonu Erzurum'un doğusu ile kuzeyindeki Tortum arasında 38 km uzunlukta ve 23 km genişlikte bir alan içinde dağılmış olan çok sayıda birbirine paralel kuzeydoğu-güneybatı doğrultulu fay kırıklarına sahiptir (Şaroğlu vd 1987). Kırıklar, doğuda Erzurum havzasının doğusunu, kuzeyde Tortum yakınlarında dağlık bir alanı, güneyde ise Palandöken dağlarını içeren bir alan içindedir. Şekil 3.4.'te Erzurum Fay Zonu gösterilmiştir (Demirtaş 2019).



Şekil 3.4. Erzurum Fay Zonu (Demirtaş 2019)

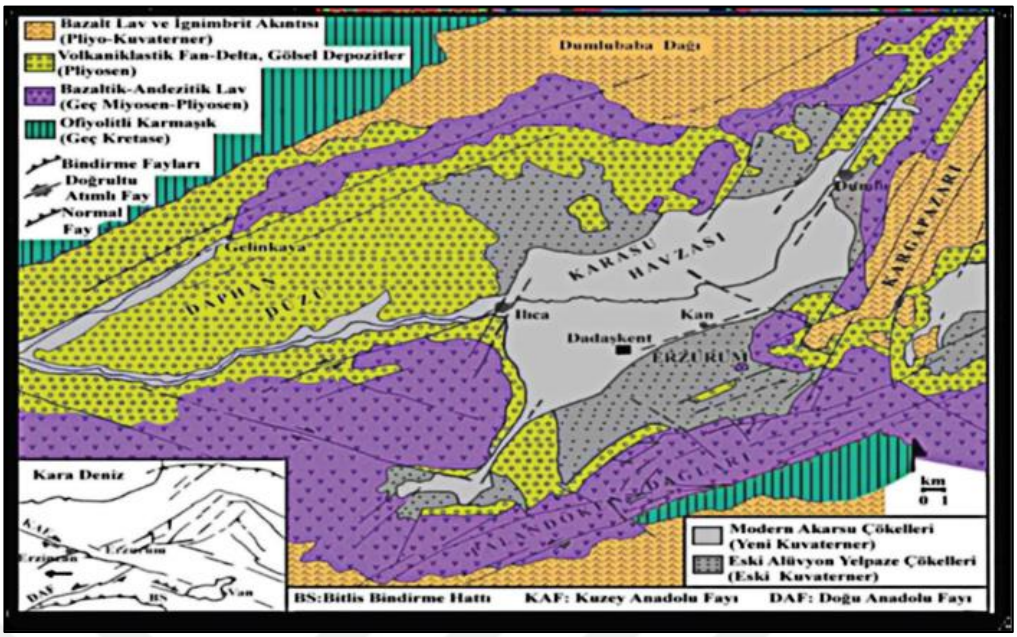
Bu fay zonundaki en uzun ve sürekli olan faylardan biri 35 km uzunluktadır. Erzurum fay zonunun sol yönlü doğrultu atımlı ve toplam atımının 25-30 km olduğu belirtilmektedir (Şaroğlu vd 1987). Fay zonunun arasında az da olsa sağ atımlı fay sistemleri de yer almaktadır. Erzurum Fay Zonu'na ait ikinci bir fay grubu Narman ile Horasan arasında dağılmıştır. Bu alanda uzunlukları 1-10 km arasında değişen çok sayıda

birbirine paralel güneybatı-kuzeydoğu doğrultulu faylar yer almaktadır. Narman'daki fayların kuzeydoğu doğrultulu olanlar düşey bileşenli sol yönlü; kuzeybatı doğrultulu olanlar ise sağ yönlü doğrultu atımlı faydır. Bu fay zonunun Erzurum'daki diğer önemli fayları Aşkale Fayı, Palandöken Fayı, Dumlu Fayı ve Çobandede Fayları'dır (Gülkan vd 1993). Bu faylardan Dumlu Fayı üzerinde 2 Haziran 1859 Depremi'nin dış merkezlerinin yer aldığı öne sürülmektedir. Ayrıca, Aşkale Fayı üzerinde gerçekleşen 1939 Tercan Depremi'nin dış merkezinin (episantr), Çobandede Fayı'nda gerçekleşen 1952 ve 1983 Pasinler ve Horasan Depremleri'nin bu fay kuşağında bulunduğu öne sürülmektedir (Anonim 2021c). Palandöken ve Dumlu Fayları'nın, kısa dönemde 4,0 ve 5,0; orta dönemde 5,0-6,0 ve uzun dönemde de 6,0-7,0 büyüklüğündeki depremleri üretme olasılıklarının olduğu belirtilmektedir (Aksu 2014).

3.3. Erzurum'un Jeolojik Yapısı

Erzurum, zemin durumu bakımından dezavantajlı illerdendir. Kent merkezi zeminin alüvyon zemin olmasından dolayı, deprem anında kent merkezi dezavantajlı bir durumdadır. Deprem hareketi sırasında oluşan dalgalar, bu tür zeminler sayesinde büyüyerek binalara iletilir ve bu dalgalar binalara depremin daha şiddetli bir şekilde aktarılmasına yol açarlar. Bu da deprem dalgalarının binalar üzerinde daha fazla hasar oluşturması anlamına gelmektedir. Bununla beraber yapı stoğunun da zayıf olmasıyla hasar daha da fazla olmaktadır.

Erzurum, Palandöken Dağı'nın güneylerinden başlayarak güney-kuzeybatı yönünde bulunan bir ova üzerinde bulunmaktadır. Jeolojik olarak yaşları 100 milyona dayanan yaşlı ve 15 milyona kadar dayanan volkanik yaşlı kayalar, şehrin güney bölümünü oluştururken, kuzeybatı yönünde ise eski ve yeni alüvyon topraklar bulunmaktadır. Şekil 3.5.'te Erzurum'un jeoloji haritası gösterilmiştir (Anonim 2021d). Konum olarak Erzurum volkanik kökenli etkileri nerdeyse tümüyle sağlamaktadır.

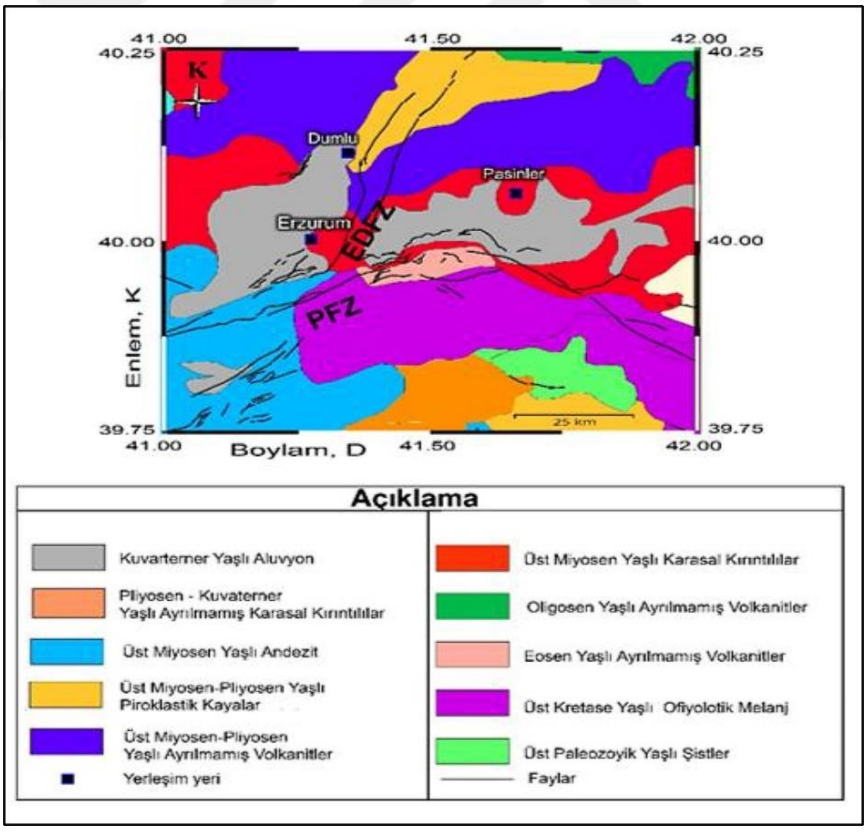


Şekil 3.5. Erzurum jeoloji haritası (Anonim 2021d)

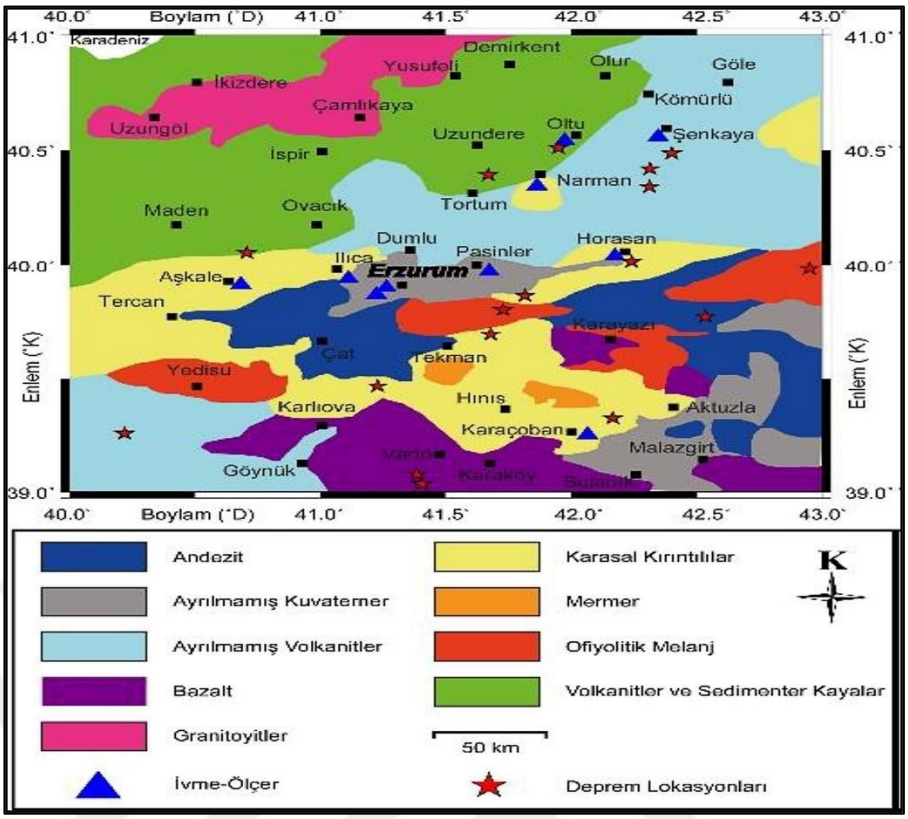
Özer (2019) çalışmasında, Erzurum'un jeolojisinin volkanizma izlerini taşıdığını belirtmiştir. Şehrin güneybatısının andezitlerle, kuzeybatısının ise volkanitlerle çevrili olduğunu belirtmiştir. Batı kısmında karasal kırıntılardan bahsederken, merkezde ise kalınlığı ortalama 1000 m olan alüvyallardan oluştuğunu belirtmiştir ve adeta şehrin jeolojik perspektifini ortaya koymuştur. Şekil 3.6.'da Erzurum'un jeolojik ve tektonik haritası ve Şekil 3.7.'de Erzurum'un basitleştirilmiş jeolojik haritası gösterilmiştir. Jeolojik olarak Erzurum'un şehir merkezinin eski alüvyon sınıfında olduğu belirtilmiştir. Şehrin batısında ve kuzeybatısında yeni alüvyon, şehrin güneyinde ve güneydoğusunda yamaç molozu jeolojik yapılarının olduğu belirtilmiştir. Eski alüvyon kısmındaki zeminlerin sık yapılı, iri taneli genellikle çakıl ve kum, daha az miktarda silt ve killi birimlerden oluştuğu; yeni alüvyon kısmındaki zeminlerin suya doygun ince taneli kum, silt ve killi birimlerden oluştuğu, yamaç molozundaki zeminlerin ise sık yapılı çamur, çakıl ve kum depolarından oluştuğu belirtilmiştir.

Erzurum'da tarihi yapıların olduğu zeminler tarihi sit alanı olduğundan bu alanlar üzerinde sondaj çalışması yapılamamıştır. Bu alanlar dışında kalan şehir merkezinin belirli noktalarında sondajlar yapılmıştır. Erzurum'da bu jeolojik formasyonlarda yapılan sondajlarda, eski alüvyon zemin biriminin 10 m derinlikte sondajına kadar silt karışımlı kil gözlenirken, 10 m'den sonra killi kum zemin türünün olduğu deneylerle belirlenmiştir.

Zemin sınıfları kil ağırlıklı yüzey kısımlarında düşük plastisiteli kil (CL), sondaj derinliğinin artmasıyla killi kum (SC) olarak sondaj deneyleriyle belirlenmiştir. Eski alüvyon birimleri genellikle iyi derecelenmiş kum, iyi derecelenmiş kum-siltli kum (SW-SM), killi kum (SC), çakıllı kum (GC), iyi derecelenmiş çakıl (GW), iyi derecelenmiş çakıl- siltli çakıl (GW-GM) ve kötü derecelenmiş çakıl- killi çakıl (GP-GC) grubu iri taneli zeminlerden oluşmaktadır. Bazı seviyelerde düşük plastisiteli kil (CL) ve düşük plastisiteli silt (ML) grubu ince taneli seviyeler de içermektedir. Jeofizik deneyleri yapıldığında zeminlerin V_s30 kesme dalgası hızları belirlendiğinde, eski alüvyon zemin olan Erzurum şehir merkezinin, 200 ile 240 m/s arasında değiştiği görülmüştür. Zemin üzerinde gerçekleştirilen Standart Penetrasyon Testi (SPT) sonuçlarına göre değerler 20 ile 50 arasında değişmektedir (Demirtaş vd 2010). Sayısal veri yardımıyla TBDY 2018'e göre Erzurum şehir merkezinin, DD-2 deprem hareket düzeyine sahip olduğu ve ZD yerel zemin sınıfına sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.6. Erzurum jeoloik ve tektonik birimler haritası (Özer et al. 2019)



Şekil 3.7. Erzurum basitleştirilmiş jeolojik haritası (Özer 2019)

3.4. Erzurum Tarihinde Depremler

Sismik olarak aktif bir coğrafya üzerine kurulu olan Erzurum ilinde, tarih boyunca büyük depremler meydana gelmiş ve bu depremlerin sonunda büyük hasarlar meydana gelmiştir. Takip eden bölümde 16. yüzyıldan başlayarak kronolojik olarak ve arşivlerde kaydedilmiş Erzurum depremleri sıralanmıştır.

3.4.1. 17. yüzyıl depremleri

2 Aralık 1685 tarihinde, merkez üssü kesin olarak bilinmeyen fakat Anadolu'nun doğusunda gerçekleştiği belirtilen büyükçe bir deprem olmuştur. Avrupalı bir gezgin, Erzurum'da bu depremi hissetmiş ve notlarına şöyle kaydetmiştir:

"Kasım 1685'te gece yarısından önce meydana gelen şok, aralıklarla 15 dakika sürdü. Bu deprem Erzurum'a 44 km uzaklıktaki köyleri yıktı ve yerin biçimi aşırı derecede bozuldu. Artçılar 8 gün boyunca devam etti." (Ambraseys ve Finkel 2006).

Gezginin Erzurum'dan sonraki durağı Erivan'da depremin hasara yol açmadığı belirtilmiştir. Ermeni kaynaklarında depremin Van'da da hissedildiği fakat herhangi bir hasarın oluşmadığı belirtilmiştir (Ambraseys ve Finkel 2006).

3.4.2. 18. yüzyıl depremleri

1712'de meydana gelen depremde herhangi bir hasar olup olunmadığı bilinmemektedir. Haziran 1719 tarihindeki Erzurum'da şiddetli bir deprem olduğu belirtilmiştir, fakat herhangi bir hasar kaydı bulunamamıştır. 9 Ekim 1766'da Erzurum'un kuzeyinde meydana gelen deprem; İspir, Hacin ve Tortum yörelerini etkilemiştir. Deprem sonucunda Aşağı Pasin'deki Karapungar köyü yakınlarında bulunan Karakilise Manastırı'nın kilisesi ile Çatak Köyü'nün yıkıldığı, Armutlu yakınlarındaki harabe durumda bulunan Tchuruk Kilisesi'nin de yerle bir olduğu belirtilmiştir. Yıkıma ek olarak çok sayıda toprak kayması oluştuğu ve hayvanların telef olduğu belirtilmiştir. Van Gölü'nde bulunan Artervirank Kadınlar Manastırı'nda 1766 yılında onarım çalışmalarının yapılması, manastırın bu depremde hasar aldığı ihtimalini oluşturmuştur (Ambraseys ve Finkel 2006).

26 Aralık 1769 tarihinde Anadolu'nun doğusundaki şiddetli bir deprem Erzurum'u etkilemiştir. Merkezdeki köylerin yıkılmasıyla beraber Hasankale'nin duvarlarının çöktüğü belirtilmiştir. Bu tarihli bir belgede şöyle denilmiştir:

"…Erzurum Kalesi uzun süredir onarılmamıştı ve kalenin büyük bir kısmı çökme aşamasındaydı, bundan başka arazide bu yıl meydana gelmiş olan deprem, kalenin bazı kısımlarının yıkılmasına yol açtı." (Ambraseys ve Finkel 2006).

18 Temmuz 1784 tarihinde Anadolu'nun doğusunda saat 23.17'de 7-8 dakika süren bir deprem, merkez üssü Kiğı'da meydana gelmiştir ve deprem Erzurum, Erzincan,

Muş dahil olmak üzere geniş bir alanı etkilemiştir. Depremden 3 gün sonra, Erzurum havalisinden Mustafa Efendi'den Babıali'ye gönderilen raporda depremden şöyle bahsedilmiştir:

"Erzurum ve çevresinde beş veya altı ay boyunca aralıklarla depremler olmuştur. Sonuncusu 7-8 dakika süren bu deprem Erzurum şehrindeki bazı ev ve ocaklarını yıktı, diğerlerini yana yıktı." (Ambraseys ve Finkel 2006).

Depremin, Erzincan'dan Muş'a kadar geniş bir bölgeyi etkilediği belirtilmiştir. Depremde can kaybı, mal kaybı ve hasar yönünden Erzincan çok ağır bir şekilde etkilenmiştir. Bunun yanında Erzurum'da da önemli hasara neden olmuştur. Bu depremin ardından altı ay boyunca Erzurum'da aralıklarla depremler olmuş bunun sonucunda Erzurum'daki tüm camiler, hanlar ve binalar yıkılmıştır (Demirtaş 2019).

3.4.3. 19. yüzyıl depremleri

3.4.3.1. 27 Ekim 1843 depremi

27 Ekim 1843 günü Erzurum'da korkutucu bir deprem meydana gelmiştir. Diplomatik ilişkiler için kentte bulunan İngiliz seyyah Robert Curzon anılarında kaldığı evin tavan kısmından toprakların döküldüğünü şehirdeki birçok evin, kale duvarlarının, bazı camilerin minarelerinin ve Erzurum'un simgesi olan Çifte Minareli Medrese'nin bir minaresinin yıkıldığını belirtmiştir (Curzon 1854). Erzurum'da bu depremi yaşayan halka göre ise bu tür bir felaketle ilk defa karşılaşılmıştır ve bu deprem halkı oldukça korkutmuştur (Tozlu 2000).

3.4.3.2. 14 Temmuz 1852 depremi

1852 yılında Erzurum tarihindeki en şiddetli ve yıkıcı depremlerden biri gerçekleşmiştir. 14 Temmuz'da öğle vaktinde gerçekleşen depremin akabinde 24 saat içinde üç deprem daha gerçekleşerek toplamda dört deprem gerçekleşmiştir ve bu depremler halkı oldukça korkutmuştur. Depremin bilançosuna bakıldığında; şehir

merkezinde 100'e yakın ev yıkılmıştır, can ve mal kayıpları gerçekleşmiştir. Deprem şehir merkezindeki birçok çeşme ve cami duvarlarını yıkmıştır. Hatta şehrin en büyük iki camisi Ulu Camii ve Lalapaşa Camii yıkılma tehlikesi altına girmiştir. Ek olarak, Ulu Camii ve Cennetzade Camii'nin minareleri de yıkılma tehlikesi altına girmiştir. Depremden etkilenen köylerin Palandöken dağ grubunun içinde bulunması, depremin merkez üssünün bu dağ grubuna yakın bir yerde olduğunun bir göstergesidir (Tozlu 2000).

3.4.3.3. 2 Haziran 1859 depremi

Bu depremin Erzurum tarihindeki en şiddetli deprem olduğu nitelendirilmiştir. Deprem, 1 Haziran günü gece yarısından başlayan bir deprem halkasının sonuncu ve en yıkıcı depremi olmuştur. İlk deprem şehrin batısından hissedilen şiddetli olmayan bir deprem olmasına rağmen, akabinde meydana gelen peş peşe 12 depremin sonucunda 2 Haziran gecesi 4 sularında şehrin kuzey ve güney yönünde büyük bir depreme dönüşmüştür. 15 dakika sonra meydana gelen ikinci depremle birlikte şehir yerle bir olmuştur. Deprem 15 saniye gibi kısa bir süre sürmesine rağmen yıkıcı etkisiyle oldukça güçlü bir deprem olmuştur. Depremin şehirde yarattığı hasar korkutucu şekildedir. Sayılar kesin olmamakla birlikte başkent İstanbul'a yazılan raporlarda 360 kişinin vefat ettiği belirtilmiştir. Hasar boyutunda ise 1462 ev tamamen yıkılmıştır. Yaklaşık 3500 ev ağır hasar almış, 6 cami tamamı ile yıkılmış, 20'ye yakın cami ve mescit de kısmen yıkılmıştır. (Tozlu 2000).

Tarihi Erzurum depremlerinin, MMI (Modify Mercalli Intensity) şiddet ölçüm değerlerine göre dağılımları Çizelge 3.1.'de gösterilmiştir

Çizelge 3.1. Aletsel dönem öncesi Erzurum'da meydana gelmiş depremlerin MMI ölçeğine göre şiddet değerleri (Özer vd 2019).

Tarih	Enlem	Boylam	Şiddet	Yer
M.S. 1268	40,00	40,00	IX	Erzincan, Erzurum
M.S. 1458	40,00	40,00	X	Erzincan, Erzurum
M.S. 1482	40,00	40,00	IX	Erzincan, Erzurum
M.S. 1584	40.00	40,00	IX	Erzincan, Erzurum

M.S. 1659	40,00	41,00	VI	Erzurum
M.S. 1781	40,00	41,00	VII	Erzurum
M.S. 1784	40,00	40,00	VIII	Erzincan, Pülümür, Erzurum
M.S. 1790	40,00	41,00	VIII	Erzurum
M.S. 1794	40,00	41,00	VI	Erzurum
M.S. 1844	40,00	41,00	VII	Erzurum
M.S. 1850	40,00	41,00	VII	Erzurum
M.S. 1852	40,00	41,00	IX	Erzurum
M.S. 1852	40,00	41,00	VI	Erzurum
M.S. 1859	40,00	41,00	VII	Erzurum
M.S. 1859	40,00	41,00	IX	Erzurum
M.S. 1859	40,00	42,00	VIII	Pasinler - Erzurum
M.S. 1860	40,00	41,00	VII	Erzurum
M.S. 1866	40,00	41,00	VIII	Erzurum
M.S. 1868	41,00	44,00	VIII	Kars, Erzurum, Ardahan, Tiflis
M.S. 1868	40,00	42,00	VIII	Pasinler - Erzurum
M.S. 1868	40,00	42,00	IX	Erzurum, Kars
M.S. 1875	40,00	41,00	X	Erzurum
M.S. 1877	40,00	41,00	VI	Erzurum
M.S. 1886	40,00	41,00	VI	Erzurum

4. STOKASTİK GÜÇLÜ YER HAREKETİ YAKLAŞIMI

Tez çalışmasının bu bölümünde, önce yer hareketi simülasyon yaklaşımlarından bahsedilmiştir. Daha sonra Stokastik Kuvvetli yer hareketi Simülasyon yaklaşım metodolojisi genel hatlarıyla açıklanmıştır.

4.1. Yer Hareketi Simülasyon Yaklaşımları

Bir bölgenin depremselliğinin belirlenmesi, depreme dayanıklı binaların tasarımı veya depreme karşı binaların güçlendirmesi için potansiyel deprem kayıtları önemli bir anahtar görevi görmektedir. Bu kayıtlar, bir bölgede daha önce gerçekleşen depremlerden elde edilmeye çalışılır. Bölgedeki aktif sismik istasyonlar sayesinde yeterli veri elde edilir. Ancak bazı durumlarda aktif sismik istasyon eksikliği, bölgedeki geçmiş deprem kayıtlarının yeterli olmaması ve periyodik olarak çok uzun süreli tekrarlanabilen depremlerin olması deprem kayıtlarında eksikliğe yol açmaktadır. Geçmiş depremlerden matematiksel modeller yardımıyla yer hareketi parametreleri elde edilse de bu modeller yeterli olmamaktadır. Bu da yer hareketi simülasyonlarının gerekliliğini ortaya çıkarmıştır (Ünal ve Askan 2015).

Yer hareketi simülasyon yaklaşımları, deterministik, hibrit ve stokastik yaklaşım olmak üzere üç grupta toplanmıştır.

4.1.1. Deterministik yer hareketi yaklaşımı

Dalga denklemlerinin analitik ve sayısal şekilde çözümlenmesi deterministik yöntemin baz aldığı noktadır. Bu yöntem gerçeğe en yakın yer hareketi sonuçlarını vermektedir. Bu yöntem, tüm dalga yayılımının analitik veya nümerik çözümünü içermektedir. Bu sismik dalgaların yüksek frekanslı kısımları, faz spektrumlarındaki tutarsızlık nedeniyle doğal olarak rastgele seçilmektedir. Dolaysıyla yüksek frekanslı yer hareketlerinin deterministik yöntemlerle modellenmesi zordur. Fakat bu yöntemin dezavantajı olan güçlü bilgisayar gerekliliği, yöntemin düşük frekans değerleri haricinde

uygulanmasını mümkün kılmamaktadır (Ünal ve Askan 2015; Gür 2018). Bu durum, stokastik ve hibrit yer hareketi yaklaşımlarını öne çıkarmıştır.

4.1.2. Stokastik yer hareketi yaklaşımı

Stokastik, kelime anlamı olarak raslantısal, değişken anlamına gelmektedir. Deprem mühendisliğinde ise deprem tehlikesinin belirlenebilmesi ve analiz yapılabilmesi için kullanılan bir yöntemdir. Stokastik yaklaşım, depremlerin raslantısallık durumunun zaman, mekân ve deprem büyüklüğüne göre gösterdiği değişiklik, kullanılan diğer yaklaşımların deprem analizlerindeki belirsizlikleri nedeniyle sismik tehlike analizinde en uygun tahmin yöntemi olarak görülmektedir (Yücemen ve Akkaya 1993).

4.1.3. Hibrit yer hareketi yaklaşımı

Deterministik ve stokastik yaklaşımların, düşük ve yüksek frekanslı yer hareketleri için bir araya getirilip uygulandığı yaklaşımlardır. Geniş bant yer hareketi simülasyonlarının geliştirilmesi için uygun bir yöntemdir (Uğurhan 2010).

4.2. Stokastik Kuvvetli Yer Hareketi Simülasyon Metodolojisi

Bu bölümde stokastik kuvvetli yer hareketi metodolojisinin aşamalarından detaylı bir şekilde bahsedilmiştir. Öncelikle stokastik nokta kaynak modelinden bahsedilmiş, daha sonra bu yer hareketi simülasyonunu oluşturan etmenlerin matematiksel formülleri terimleri literatürden faydalanarak detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bölüm 4.3.'te stokastik sonlu fay metodundan bahsedilmiştir.

4.2.1. Stokastik nokta kaynak modeli

Temel olarak frekansı 1 Hz'den büyük olan yüksek frekanslı yer hareketi kayıtlarının karmaşık karakter yapıları yer hareketi simülasyonlarının modellenmesinde yetersiz kalmıştır. Bu yetersizliğin nedeni, karmaşık karakter yapılarından kaynaklanan

faz tutarsızlıklarıdır. Bu faz tutarsızlıkları, analitik veya nümerik sismik dalga denklem çözümlerinin yüksek frekanstaki yer hareketlerinin simülasyonlarının modellenmesinde yetersiz kalmasına yol açmıştır. Bu durumun sonucu olarak stokastik nokta kaynak modeli geliştirilmiştir (Uğurhan 2010).

Hanks and Mcguire (1981) yüksek frekanslı yer hareketi simülasyonları için, bu hareketteki rastgele faz açılarını içine alan birden fazla stokastik parametreye gerek olduğunu ifade etmişlerdir. Bu yöntem için kendilerinin çalışmaları temel alınmıştır. Yüksek frekanslardaki kayma dalgası yer hareketinin, sonlu süreli, bant sınırlı beyaz Gauss gürültüsü olarak gösterileceği belirtilmiştir ve;

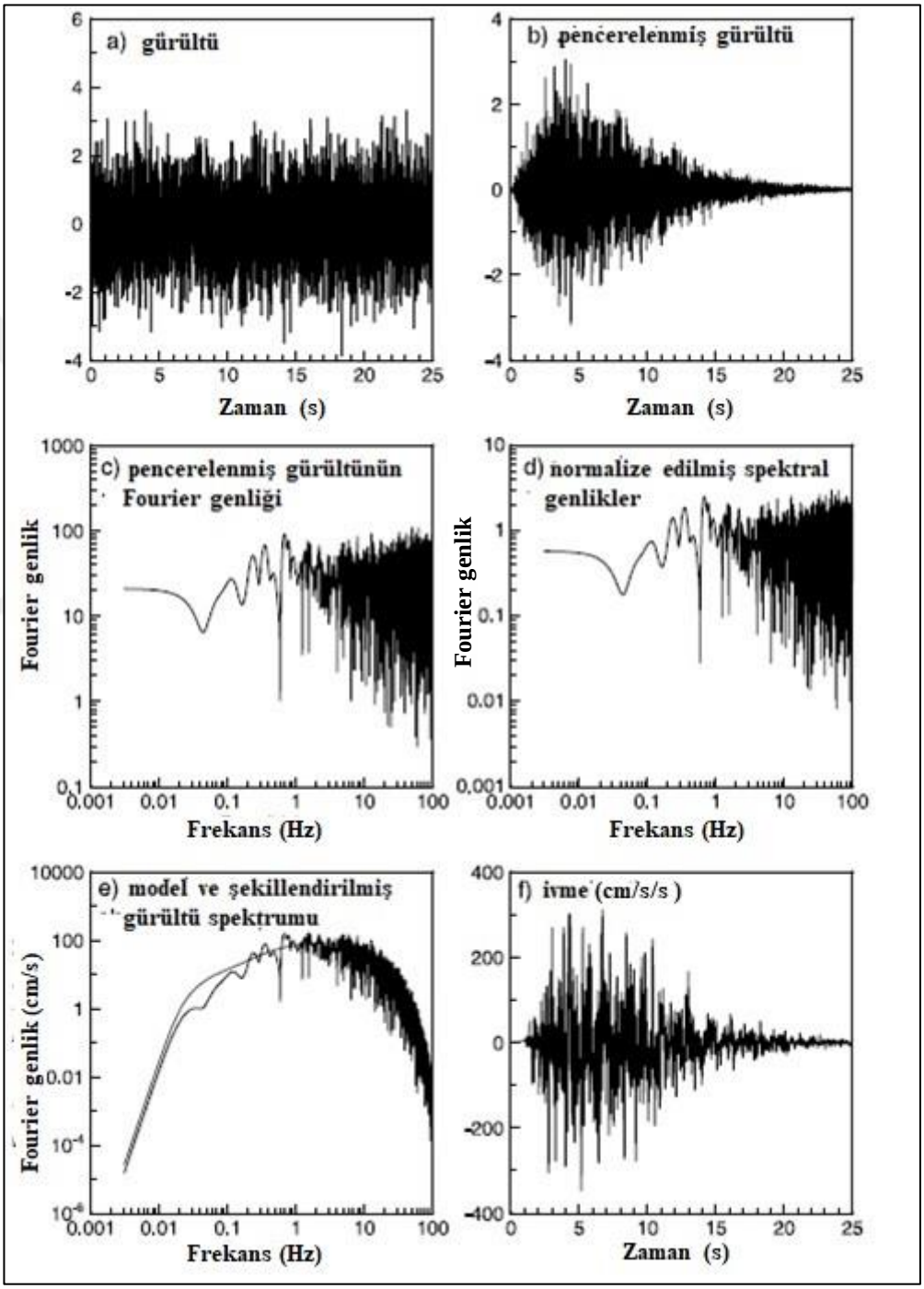
$$0 \leq t - \frac{R}{\beta} \leq T_d \tag{4.1}$$

$$f_0 \leq f \leq f_{max} \tag{4.2}$$

bağıntılarıyla matematiksel olarak belirtmişlerdir. Bu bağıntılarda R' kaynaktan alıcıya olan mesafe, β kayma dalgası hızı, T_d, faylanma süresi, f_0 uzak alan kayma dalgası radyasyonunun köşe frekansı, f_{max} ise sismometreler tarafından ölçülen en yüksek frekans olarak belirtilmiştir. Bu simülasyon metodolojisi ile amaçlanan genlik spektrumunun, istenilen bir spektrumla eşleşen bir geçici zaman serisi üretilmesidir. Boore (1983) bu çalışmayı baz alarak, noktasal kaynaklardan yayılan sismik dalgaların S dalgaları için ivme-zaman serilerini üretmek amacıyla bu yöntemi geliştirmiştir.

Stokastik nokta kaynak modeli belirli aşamalar içermektedir. İlk aşamada bir Gauss gürültüsü oluşturulur. Bu gürültü, belirli bir hareket süresi için rastgele bant sınırlı, sıfır ortalama ve birim varyansa sahip bir Gauss gürültüsüdür. İkinci aşamada, birinci aşamada oluşturulan gürültüye bir ivme-zaman serisinin daha gerçekçi şeklini vermek için pencereleme işlemi yapılır. Pencereleme yöntemi olarak Saragoni-Hart yöntemi ve vagonlama yöntemleri tercih edilir. Üçüncü aşamada, oluşturulan ivme-zaman serileri frekans alanına dönüştürülür. Dördüncü aşamada, bu frekans alanında ortalama karekök spektrumu (RMS) değerlerine eşit olacak şekilde gürültü spektrumunun normalleştirilme işlemi yapılır. Bu işlemden sonra teorik olarak hesaplanan deterministik spektrum,

rastgele sinyal spektrumunun ortalama karekök spektrum değerleriyle çarpılır. En son aşamada ise, oluşturulan bu yeni spektrumun stokastik ivme-zaman serilerinde zaman alan sonuçlarında dönüşümü yapılır. Şekil 4.1.'de bu aşamalar şematik olarak gösterilmektedir (Boore 2003; Uğurhan 2010).



Şekil 4.1. Stokastik nokta kaynak modeli aşamaları (Boore 2003; Uğurhan 2010)

Teorik yer hareketi spektrumu hesaplanırken, çeşitli kabullerden yararlanılmıştır. Haskell (1964), Green fonksiyonunun elastik dalga denklemini kullanarak, boyuna kayma fayının, dislokasyon fonksiyonunun fay düzlemi üzerindeki çift noktalı kaynakların dağılımına eşit olduğunu göstermiştir. Aki (1967) ise, Haskell (1964)'in yakın olmayan uzaklıklardaki P ve S dalgalarının deplasmanları için oluşturduğu denklemleri kullanmıştır. Bu denklemlerde belirli bir ω alanındaki yer değiştirme spektrumunun ($U(\omega)$); belirli kaynak ($E(\omega)$) ve yayılma etkilerinin ($P(\omega)$) çarpımına eşittir. Bu ifade;

$$U(\omega)= E(\omega).\ P(\omega) \tag{4.3}$$

bağıntısıyla ifade edilmiştir.

Gauss gürültüsünün normalize edilip çarpılmasıyla elde edilen deterministik yer hareketi spektrumu için yer etkilerinin eklenmesiyle kaynağın Denklem 4.3.'teki bağıntısı baz alınarak;

$$A(M_0,\ R,\ \omega)= E(M_0,\omega)P(R,\omega)G(\omega)I(\omega) \tag{4.4}$$

bağıntısı oluşturulmuştur. Bu bağıntıda, $A(M_0,\ R,\ \omega)$, bir sismik sinyaldeki Fourier Genlik Spektrumu sonuçlarını, $E(M_0,\omega)$ kaynağın filtrelenmiş fonksiyonlarını, $P(R,\omega)$ yayılım $G(\omega)$ alan etkilerini, $I(\omega)$ alet tepkilerini ifade etmektedir (Uğurhan 2010).

4.2.2. Kaynak fonksiyonu ($EM_0(\omega)$)

Bir noktanın kayma dislokasyonu nedeniyle homojen, izotropik sınırsız bir ortamda uzak alan kayma dalgası deplasmanı;

$$u(x,t)=\frac{R^{\theta y}}{4\pi\rho\beta^3}M'\left(t-\frac{R}{\beta}\right) \tag{4.5}$$

şeklinde ifade edilir. $R^{\theta y}$, kayma dislokasyonu nedeniyle yer değiştirme alanının değişimini gösteren radyasyon modeli, ρ kabuksal yoğunluğu, β kayma dalgası hızını, R dalganın oluştuğu kaynak noktasıyla alıcı noktası arasındaki uzaklığı $M'(t)$ ise sismik momentin zamana göre birinci türevi şeklinde ifade edilmektedir. Sismik moment M(t);

$$M(t) = \mu\bar{u}(t)A \tag{4.6}$$

bağntısıyla ifade edilmiştir. μ, belirli sabit bir kabuk seviyesindeki kayma modülü veya rijitliği, $\bar{u}(t)$ kaynak-zaman fonksiyonu ve A ise dislokasyon alanıdır.

Sismik deplasmanların en çok belirsiz olan kısmı kaynak-zaman fonksiyonlarıdır. Dislokasyon düzlemine karşı bu deplasmanları temsilen farklı yaklaşımlar belirtilmiştir. Bu deplasmanlar için Aki (1968) deplasmanların zamana bağlı artışını temsil etmek için adım fonksiyonunu tanımlarken, Haskell (1964) bu artış için basamak fonksiyonu kavramını tanımlamıştır. Stokastik modelleme için kullanılan kaynak-zaman fonksiyonu, fay üzerinde gerçekleşen dislokasyonun, fayın kenarlarını hızlandıran efektif gerilmesinin bir fonksiyonu olarak modellenmiştir (Brune 1970). Bu durum;

$$\sigma(x.t) = \sigma H\left(t - \frac{x}{\beta}\right) \tag{4.7}$$

bağıntısıyla ifade edilmiştir. $\sigma(x,t)$ deprem dislokasyonunun iç yüzeyden dış yüzeye uyguladığı teğetsel gerilme*yi,* σ , dislokasyon düzlemindeki efektif gerilmeyi, β kayma dalga hızını, t zamanı ve $H(t)$ ise zamana bağlı adım fonksiyonunu temsil etmektedir. H(t), zaman değerine bağlı olarak farklı değerler almaktadır. Bu durum;

$$H(t)= 0 \; t<0 \tag{4.8}$$

$$H(t)= 1 \; t>0 \tag{4.9}$$

parçalı fonksiyon şeklinde ifade edilmiştir. Lineer elastik izotropik malzeme için kullanılan gerilme-şekil değiştirme bağıntısı $\left(\sigma = \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}\right)$, teğetsel kayma gerilmelerinden kaynaklanan teğetsel deplasmanlar için yazılırsa;

$$\bar{u}(t)=0 \quad t<0 \tag{4.10}$$

$$\bar{u}(t)= \frac{\sigma}{\mu}\beta(t) \quad t>0 \tag{4.11}$$

bağıntıları elde edilir. $\bar{u}(t)$, dislokasyon merkezine yakın bir noktadaki ilk parçacık deplasmanı, μ kayma modülüdür (Uğurhan 2010).

Bu harekette yakın noktalarda beklenen şey dislokasyon etkisiyle parçacık hareketinde hız artışıdır. Dislokasyon etkilerinin azalmasıyla ve bitmesiyle beraber, parçacık hızının giderek azalması ve sonunda 0'a düşmesi beklenir. Parçacık hızının 0 olması, r/β oranından daha büyük zaman değerlerine bağlıdır. Burada r, dislokasyon düzleminin yakın noktası ile gözlem yapılabilen yakın noktası arasındaki mesafeye eşittir. Eğer bu nokta fay uzunluğunun yarısına yakın bir noktada ise, r değeri fay uzunluğunun yaklaşık yarısına eşittir (Brune 1970). Dislokasyon ve parçacık hareketinin etkilerini modellemek için, yer değiştirme fonksiyonuna, üstel bir bozulma fonksiyonu eklenir ve parçacığın deplasmanını hızı;

$$\bar{u}(t)= \frac{\sigma}{\mu}\beta\tau\left(1 - e^{\frac{t}{\tau}}\right) \tag{4.12}$$

$$\bar{u}'(t)= \frac{\sigma}{\mu}\beta\tau e^{\frac{t}{\tau}} \tag{4.13}$$

bağıntıları ile belirlenir. τ, zaman parametresi olarak tanımlanmıştır ve deplasman oranlarını temsil etmektedir (Uğurhan 2010).

Denklem 4.10'da tanımlanan ve düzleştirilmiş bir basamak fonksiyonu olan deplasman fonksiyonu, t =0 da süreksiz bir fonksiyondur. Bu fonksiyonun süreksizliği

fiziksel olmayan bir yırtılmanın ucunda sonsuz bir gerilmenin ihtiyaç olduğu anlamına gelmektedir. Bu süreksizlikte, stokastik modellemede kullanılan kaynak-zaman fonksiyonunu sınır koşullarını sağlamak için bir düzenleme yapılmıştır (Beresnev and Atkinson 1997). Buna göre düzenlenmiş parçacık deplasman ve hız bağıntıları;

$$\bar{u}(t)=\frac{\sigma}{\mu}\beta\tau\left[1-\left(1+\frac{t}{\tau}\right)e^{\frac{t}{\tau}}\right] \tag{4.14}$$

$$\bar{u}'(t)=\frac{\sigma}{\mu}\beta\tau\left(\frac{t}{\tau}\right)e^{\frac{t}{\tau}} \tag{4.15}$$

bağıntılarına dönüştürülmüştür Denklem 4.12 ve Denklem 4.13 kullanılarak toplam sismik moment;

$$M_0=\mu\bar{u}(\infty)A \tag{4.16}$$

bağıntısıyla hesaplanır.

Denklem 4.5 ve Denklem 4.6'daki denklemler, Denklem 4.10 ve Denklem 4.11 de elde edilen deplasman denklemine koyulup yeniden yazıldığında uzak alan kayma deplasmanı;

$$u(x,t)=\frac{R^{\theta y}M0}{4\pi\rho\beta^3R\tau}\cdot\left(\frac{t-\frac{R}{\beta}}{\tau}\right)e^{\frac{\left[t-\frac{R}{\beta}\right]}{\tau}} \tag{4.17}$$

bağıntısı haline gelir. Bu bağıntıya Fourier dönüşümü yapıldığında;

$$u(x,t)=\frac{R^{\theta y}M0}{4\pi\rho\beta^3R}\left[\frac{1}{1+\left(\frac{\omega}{\omega c}\right)^2}\right] \tag{4.18}$$

bağıntısına dönüştürülür.

Brune (1970,1971), dairesel bir dislokasyon alanı için $\omega_c=2\pi f_c$ bağıntısını türetmiştir. Bu bağıntıyı türetirken, düşük frekanslarda gerçekleşen dislokasyona neden olan kaynak momentini ve kaynak spektrumunu birbirine eşitlemiştir. Yüksek frekanslarda gerçekleşen dislokasyon için de enerji-yoğunluk akışını korumuştur. Köşe frekansı f_c ;

$$fc = 4{,}9x10^6\beta\left(\frac{\Delta\partial}{M0}\right)^{1/3} \tag{4.19}$$

bağıntısı ile elde edilir. $\Delta\partial$ gerilme düşümü (bar), M_0 sismik moment (dyne/cm), β kayma dalgası hızı (km/sn)'dir.

Denklem 4.14 ve Denklem 4.15 kaynak fonksiyonun temelleridir. Kaynak fonksiyonunun genel denklemi;

$$E(M_0, \omega)= CM_0S(\omega,\omega_c) \tag{4.20}$$

şeklinde yazılır. $S(\omega,\omega_c)$, kaynağı temsil eden yer değiştirme spektrumu, C sabit bir değerdir. C sabiti;

$$C = \frac{R^{\theta y}FSPRTITN}{4\pi\rho\beta^3} \tag{4.21}$$

bağıntısıyla hesaplanır. $R^{\theta y}$ radyasyon modelidir ve kayma dalgaları için genellikle 0,55 olarak seçilir. FS, yüzey genişletme faktörüdür ve 2 olarak kabul edilir. $PRTITN$, kesme dalgası enerjisini iki yatay bileşene ayırma faktörüdür ve genellikle $1/\sqrt{2}$ değerine eşit olduğu kabul edilir.

Depremin sismik momenti olarak ifade edilen M_0 genellikle $M_0= \mu\bar{u}A$ bağıntısıyla hesaplanır. μ kayma modülü, $\bar{u}$ ortalama kayma ve A fay alanıdır. Sismik moment yardımıyla depremin moment büyüklüğü;

$$log\ M_0 = 1.5\ log\ M_w + 16.1 \quad (4.22)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanmaktadır (Hanks and Kanamori 1979).

$S(\omega,\omega_c)$ ile ifade edilen depremden kaynaklı deplasman spektrumu, stokastik nokta kaynak modellemesinde ω^2 modelini kullanarak oluşturulur ve;

$$S(\omega, \omega_c) = \frac{1}{1+\left(\frac{\omega}{\omega c}\right)^2} \quad (4.23)$$

bağıntısıyla belirlenir. Yer hareketlerinin uzak alan deplasman spektrumu düşük frekanslar için sabit olarak gözlenirken, yüksek frekanslarda frekansların negatif gücüyle orantılı olarak asimptotik bir bozulmaya maruz kalmaktadır. Spektrum davranışı düşük frekans seviyesinde sismik momentin bir fonksiyonu; spektrumdaki düşük ve yüksek frekanslı asimptotların kesişim frekansı olan köşe frekansı, yüksek frekans asimptotun gücü olmak üzere üç farklı parametreden oluştur. Bu parametreler ω^{-2} spektrumlu yer hareketinin temellerini oluşturmuştur. Denklem 4.23'teki bağıntı deplasman spektrumu ω^{-2} modelidir. Bu modelde, düşük frekanslar için spektrum bozulması ω_c^{-2} tarafından baskılanır, yüksek frekanslarda ise ω^{-2} ile orantılı olarak düşer (Uğurhan 2010).

Deplasman spektrumu için diğer bir fonksiyon ise Atkinson and Silva (2000), tarafından geliştirilen iki köşe modelidir. Bu model;

$$S(\omega, \omega_c) = \frac{1-\varepsilon}{1+\left(\frac{f}{fA}\right)^2} + \frac{\varepsilon}{1+\left(\frac{f}{fB}\right)^2} \quad (4.24)$$

bağıntısıyla ifade edilmiştir. f_A ve f_B köşe frekanslarıdır. ε, çalışma yapılan bölgedeki ağırlaştırma parametresidir ve 0 ila 1 arasında bir değere eşittir. Yer hareketlerinin stokastik sonlu fay modellenmesinde tek köşe frekanslı ω^{-2} modeli kullanılır. Bu yaklaşım temel alınarak köşe frekansının zamana bağlı değişen bir dinamik model yaklaşımı geliştirilmiştir.

4.2.3. İz fonksiyonu (P(R,ω))

Sismik dalgalar dünya ekseni etrafındaki hareketlerinin sonucu olarak, genliklerini, frekanslarını, frekans yapılarını, hızlarını ve devamlılıklarını koruyamayacak duruma gelecek şekilde elastik ve inelastik süreçlere maruz kalmaktadır. Elastik süreçlerde geometrik yayılımın, dağılımın ve çok yönlülüğün korunduğu kabul edilirken, inelastik süreçlerde sismik enerjinin bir kısmı malzeme kusuru dolayısıyla ısı enerjisi şeklinde kayıp olmaktadır (Stein and Wysession 2003).

Dalga genliklerindeki mesafe hareketinden dolayı gerçekleşen düşüşler geometrik yayılım faktörü ile yansıtılır. Eğer dünya homojen bir yapıda olsaydı, dalga genlikleri mesafe (R) ile ters orantılı olarak düşmüş olacaktı. Fakat dünyanın kendine has geoid şeklinden ötürü geometrik yayılım ile mesafe arasındaki ters orantı ilişkisi kurulması doğru bir yaklaşım olamamaktadır. Dünyanın şekli dalgaların odaklanma durumlarını doğrudan etkilemektedir. Genelde düşük hızlı süreksizlik durumlarında dalgalar odaklanma eğilimindedir ve süreksizliğin yüksek hız durumlarından kaçınmaya çalışırlar. Dağılım ve çok yönlülük olarak da adlandırılan bu değişiklikler, dalga hızlarının homojen olmama durumundan kaynaklanmaktadır. Bu süreçlerin yokluğunda, sismogramlarda deprem dalgalarının kaynaklardan alıcıya doğrudan varışları gözlenebilmektedir (Stein and Wysession 2003).

Dünya tamamen elastik süreçlere maruz kalmadığından, dalgalar dünya çevresinde hareket ederken sönümlemeye maruz kalırlar. Dalgaların geçtiği yerlerdeki malzeme özelliklerinden dolayı dalgaların spektral genlikleri düşer. Bu tür sönümleme inelastik veya kısıtlayıcı olarak adlandırılır ve Q ile ifade edilir. Genellikle Q değeri, 1 Hz'den küçük frekans değerleri için frekanstan bağımsızdır. 1 Hz'den büyük frekans değerlerinden büyük frekans değerlerinde, frekans arttıkça Q değeri de artmaktadır ve;

$$Q=Q_0 \, x f^{n} \tag{4.25}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Q_0, ortamdaki homojen olmama durumunu yansıtan bir sabit, n ise bölgedeki süneklikle doğru orantılı bir sabittir. Bir bölgede Q değeri ne kadar küçük

ise, o bölgede hareket eden dalgalar yüksek kırılıma maruz kalır ve dalga genlikleri hızla azalır. Stokastik yer hareketi modellenmesinde, iz faktörleri;

$$P(R,\omega) = Z(R)e^{-\frac{\pi f R}{Q(f)R}} \tag{4.26}$$

bağıntısıyla ifade edilmektedir. Z(R), geometrik yayılımı ifade etmektedir ve;

$$Z(R) = \begin{Bmatrix} \frac{R_0}{R}, R \le R_1 \\ Z(R_1)\left(\frac{R_1}{R}\right)^{p_1}, R_1 \le R \le R_2 \\ . \\ . \\ . \\ Z(R_n)\left(\frac{R_n}{R}\right)^{n}, R \le R_n \end{Bmatrix} \tag{4.27}$$

parçalı fonksiyonlar ile ifade edilir. R ise kaynak ile alıcı arasındaki mesafeyi göstermektedir. $e^{-\frac{\pi f R}{Q(f)R}}$, inelastik kırılımı, Q_f ise frekansa bağlı kalite faktörünü ifade etmektedir (Motazedian 2006).

Kaynak ve ortam özellikleri sismik dalgaları kolayca ölçüp nitelendirememektedir. Yayılma karakteristikleri ve kaynakların tüm etkileri sismograflarda ölçülen ana kaynak bilgilerinden öğrenilmekledir. Sismograf analizleri ile bölgesel parametreler de elde edilebilmektedir fakat yeterince bilinmeyen kaynak ve yayılım etkileri bölgesel parametreler elendikten sonra varsayımlarla belirlenmektedir. İleri uygunluk, ters çözüm, regresyon gibi metotlar, sismograflarda kaydedilen deprem kayıtlarının Fourier spektrumlarında kullanılarak Q ve geometrik yayılım gibi parametrelerin en iyi tahmin değerleri türetilir. Literatürde bu yöntemler kullanılarak çalışılan bölgeler için tahmini değerler mevcuttur (Uğurhan 2010).

Yayılım etkilerini yansıtan yer hareketinin stokastik modellemesinde, mesafeye bağlı süre de önemli bir parametredir. Doğrudan deterministik spektrumu etkilemese de dalgaların tepe genlikleri artan süre ile düştüğünden sentetik sinyalin değerini temsil eder. Genel olarak;

$$T=T_0+ bR \tag{4.28}$$

genel denklemi ile ifade edilir. T_0 kaynak süresini temsil eder ve;

$$T_0=\frac{1}{\omega c} \tag{4.29}$$

bağınıtsı ile ifade edilir. bR mesafeye bağlı zaman terimidir ve yayılım,çok yönlülük nedeniyle artan süredir. R depremin odak nokta mesafesi. b değeri ise sabit bir değer olup 0,05 e eşittir (Beresnev and Atkinson 1997).

4.2.4. Yer fonksiyonu (G(ω))

Yer hareketi karakteristiklerinde yerel zemin koşullarının önemli bir etkisi vardır. Zemin katmanları, içinden geçen sismik dalgaların frekans içeriğini, genliğini ve süresini değiştirir. Zemin katmanları arasındaki sismik iç direnç farkı (empedans) yani ortamın parçacık hareketine karşı direnci dalga genliklerini etkiler ($Z=\rho\beta$) (Yalçınkaya 2004). Ana kayadan yüzeye doğru zemin tabakalarının yoğunlukları ve hızları genellikle azalmaktadır. Dalgalar dünya boyunca hareket ederken yükseldiğinde sismik empedansın azalır. Sismik empedansın azalması sonucu parçacık hızı ve dalga genlikleri elastik dalga enerjisini korumak için artmak durumundadır (Kramer 1996).

Yer hareketinin stokastik modellenmesinde yer etkileri:

$$G(\omega)= A(\omega).\ P(\omega) \tag{4.30}$$

bağıntısıyla ifade edilmiştir. *A(ω)*, zemin tabakaları arasındaki hız karşıtlığından oluşan sismik dalga genişlemesini, *P(ω)* enerji kaybını yansıtan azalma faktörünü göstermektedir (Uğurhan 2010).

4.2.4.1. Genişleme faktörleri (A(ω))

Yer hareketi simülasyonlarında temel adımlardan biri zemin türlerinin belirlenmesi ve yer genişlemesidir. Hız profilleri bilinen yer hareketlerinin zemin tepkileri belirlenebilmektedir. Hız profillerinin belirlenmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında en uygun yöntem seçilerek yer tepkisinin değerlendirilmesi yapılmaktadır. Bu yöntemler arasında en çok bilinenler sismik yansıma, kırılma ve sondaj kuyusu yöntemleridir. Bir bölgenin hız profilleri bilindiğinde yer genişleme faktörü, teorik transfer fonksiyonları kullanılarak hesaplanabilir. Bu transfer fonksiyonları zemin modelinin bir boyutlu, iki boyutlu veya üç boyutlu modelleri oluşturulduktan sonra kullanılabilmektedir (Uğurhan 2010).

Yukarıda belirtilen üç model kullanılarak S dalga hızlarını ölçmek pahalı ve zordur. Ayrıca derin havzalar için anakaya seviyesine kadar olan hız profilleri kolaylıkla belirlenememektedir. Yüzey dalgalarını ölçmek için diğer bir alternatif yöntem geniş bir frekans aralığından oluşan yüzey dalgalarını ölçmektir. Bu yöntemde yüksek frekans kısmı için daha sığ kısımlarda hızı profilleri kolaylıkla gözlenebilir. Düşük frekans kısmında ise daha derin katmanlara dalga nüfuz ettiğinde daha derindeki hız profilleri ölçülebilmektedir. Bu dalgaların kaynakları çekiçler, ağırlık düşüşleri, elektromekanik sarsma cihazları, sismik vibratörler ve buldozerler gibi aktif kaynaklardır. Bir zeminin hız profilinin teorik dağılım eğrisi ile iteratif şekilde gerçekleştirilen deneyler sonrası ölçülen deneysel hız dağılım eğrisinin eşleştirilmesi için en çok bilinen iki yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler yüzey dalgalarının spektral analizi (SASW) yöntemi ve geliştirilen çok kanallı dizi yüzey dalgaları (MASW) yöntemidir (Uğurhan 2010).

Yüzey dalgalarının diğer kaynağı mikro tremor ya da ortam gürültüsüdür. Dünyanın ortam gürültüsü ölçülüp analiz edildiğinde bu ölçümler pasif sismik yöntemler olarak adlandırılır. Pasif ölçümlerin değerlendirilmesi için, pasif kırılma mikro tremoru,

frekans dalga numarası ve pasif ölçümlerin belirttiği alansal ortalama tutarlılık metotları kullanılır. Alansal ortalama tutarlılık yöntemi, Aki (1957)'nin bulgularına dayanmaktadır. Bu yöntem, azimut açıları üzerinden ortalaması alınan tutarlılık spektrumunun birinci tür ve sıfır mertebeden Bessel fonksiyonunun şekline sahiptir. Bu teknikte, kayma dalga hız profilini elde etmek için teorik olarak belirtilen tutarlılık eğrileri, tekrarlı ölçümler sonucunda oluşturulan tutarlılık eğrileriyle uygunluk göstermelidir (Uğurhan 2010).

Yer tepkisini hesaplamak için alternatif metotlardan bir diğeri de çeyrek dalga boyu yaklaşımıdır. Belirli bir frekans değerine denk gelen genişleme, kaynak derinliğine denk gelen sismik empedansın,çeyrek dalga boyuna denk gelen bir derinlik üzerinden hesaplanan ortalama sismik empedans oranının karekköküne eşittir. Bu durum:

$$A[f(z)] = \sqrt{\frac{\rho_s \beta_s}{\bar{\rho}(z)\bar{\beta}(z)}} \tag{4.31}$$

bağıntısıyla ifade edilmiştir.

Eğer zemin hız profili bilinmiyorsa, yerel zemin genişlemesini belirlemek için sismik dalgaların yatay-dikey hız bileşen (H/V) oranları kullanılabilir. Bu yöntemde sismik dalgalarının düşey bileşenlerinin, yatay bileşenleri kadar yerel zemin etkilerine maruz kalmadığı gözlemlerle belirlenmiştir. Diğer bir ifadeyle yeryüzündeki yer hareketinin dikey bileşeni ile kaya seviyesindeki yer hareketinin dikey bileşeni neredeyse aynıdır. Yatay bileşen, her iki dikey bileşene bölündüğünde yayılma etkileri ile çözülemeyen kaynak etkilerini ortadan kaldırırken kalan kısım yatay bileşenin yerel zemin büyütmesini ifade etmektedir (Uğurhan 2010).

Hız profilinin bilinmediği durumlarda yer tepkisini ölçmek için standart spektral oran yöntemi kullanılır. Bu yöntem, yerel zemin etkilerini yok sayarak bir sert kaya sahasını referans alır. Herhangi bir zemin sahasının Fourier spektrumu, sert kaya sahasının Fourier spektrumuna oranlanarak zemin tepki spektrumu bulunur. Bu oranda kaynak ve yayılma etkileri ihmal edilir (Uğurhan 2010).

4.2.4.2. Azaltma faktörleri (P(ω))

Boore (1983), yüksek frekanslarda spektral değerlerin hızının düşüşünün, dalga yayılımı süresindeki zayıflamadan kaynaklanmayacağını belirtmiştir. Papageorgiu ve Aki (1983), bu hız düşüşünden gerçekleşen kaybın kaynak süreçlerinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Hanks (1982) ve Atkinson (2004), farklı zamanlarda belirttikleri çalışmalarında bu kaybın yakın yer koşullarından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Hanks (1982), bazı kayma frekansının üzerindeki frekanslarda spektral kaybı hesaba katan iki temel filtrenin olduğunu ve birincisinin kesme frekansını temsil eden f_{max} filtresi olduğunu belirtmiştir. Kayma frekansı kullanılarak oluşturulan azaltma faktörü:

$$D(f) = \left[1 + \left(\frac{f}{fmax}\right)^{8}\right]^{-\frac{1}{2}} \tag{4.32}$$

bağıntısı ile ifade edilmektedir. Yüksek frekanslarda spektral bozulmayı yansıtan κ_0 kullanıldığında alternatif azaltma filtresi:

$$D(f) = e^{-\pi\kappa 0 f} \tag{4.33}$$

şeklinde gösterilir.

Anderson and Hough (1984), kısa periyotlar içindeki spektral bozunmayı kappa değerlerinin (κ) değerlerinin üstel bir fonksiyonu olarak nitelendirmişlerdir. Farklı istasyonların kappa faktörlerini bulmak için her istasyonda kaydedilen yer hareketi kayıtlarının, Fourier ivme spektrumları ayrı yarı logartimik ölçeklerde çizilir. Spektrumun azalan kısmı için en uygun doğru belirlendikten sonra bu doğrunun negatif eğimi, π'ye bölünerek her istasyonların kappa faktörleri hesaplanır. Hesaplanan kappa faktörleri, istasyonların dış merkezlerine karşı çizilir ve dağılıma uygun çizilen doğrunun denklemi belirlenir. En uygun doğrunun ordinatı, bölgenin κ_0 değerine eşittir. Deprem simülasyonlarında κ_0 değerleri, yüzeyde dalga hareketinin aldığı mesafe nedeniyle iz fonksiyonunda mevcut bulunan zayıflama etkilerini ortadan kaldırmak için yüzeye yakın azaltma faktörü olarak kullanılırlar (Uğurhan 2010).

4.2.5. Yer hareketi tipi (I(ω))

Simülasyonların sonunda ortaya çıkan veri, titreşim kaynağının deplasman, hız, ivme veya tepkisi olabilmektedir. I(ω) terimi bu hareketin türünü kontrol eden terimdir (Uğurhan 2010). Gerekli yer hareketi serisini elde etmek için:

$$I(f) = (2\pi f_i)^n \tag{4.34}$$

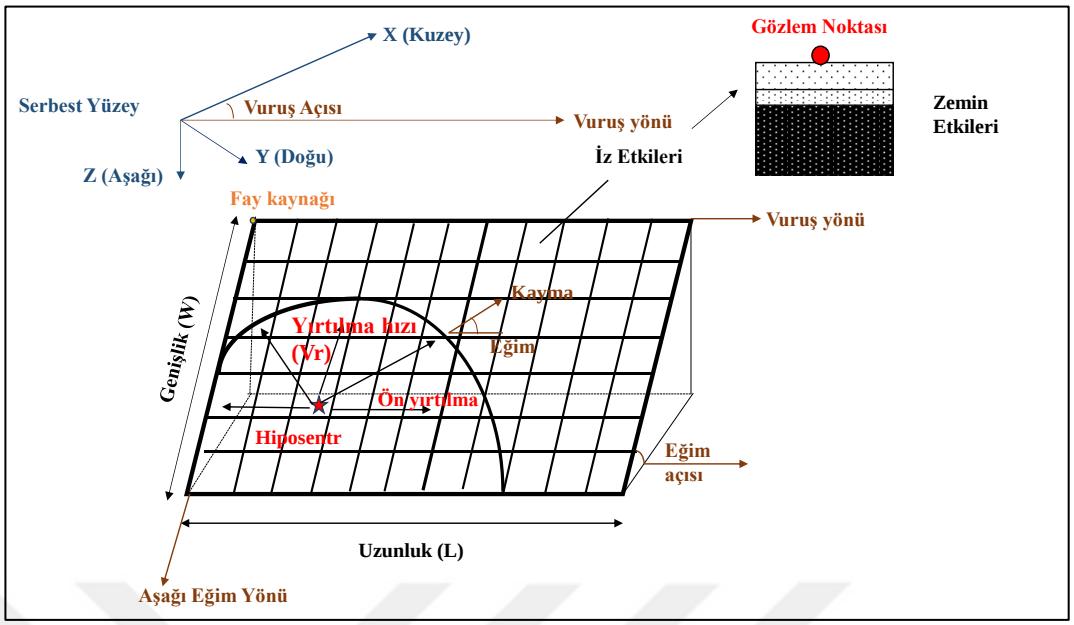
bağıntısı kullanılır. i hayali bir birim olmak kaydıyla bağıntıda n yerine 0,1 veya 2 değeri yazıldığında sırasıyla deplasman, hız ve ivme dğerleri için gerekli yer hareketi serisi elde edilir (Boore 2003). Titreşim kaynağının tepkisi için;

$$I(f) = \frac{-Vf^2}{(f^2 - f_r^2) - 2ff_r\zeta_i} \tag{4.35}$$

bağıntısı kullanılır. f_r titreşim kaynağının sönümsüz doğal frekansını, ζ, sönümlemeyi, ifade etmektedir. V, tepki spektrumu için 1 değerini almaktadır (Boore 2003).

4.3. Stokastik Sonlu Fay Yöntemi

Stokastik teknikler, rastgele bir faz spektrumu ile yer hareketinin spektral genliğinin birleştirilmesini ilke edinir (Boore 1983). Bu yöntemin, tam dalga yayılım etkilerinin yansıtmaması nedeniyle kendi yapısal sınırlamaları vardır, fakat yüksek ve orta frekanstaki yer hareketlerini elde etmeleri nedeniyle yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Karimzadeh et al. 2018). Şekil 4.2.'de stokastik sonlu fay yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Stokastik Sonlu Fay Metodu (Uğurhan 2010)

Bu yer hareketi yöntemi için, literatürde ilk olarak Boore (1983) tarafından nokta kaynak yöntemi önerilmiş fakat bu yöntem fay kırığı genişliğinin, kaynak ve saha arası mesafeden büyük olduğu durumlarda yakın saha etkilerini gösteremediği için kullanılması uygun bir yöntem olmaktan çıkmıştır. İlerleyen yıllarda, Beresnev and Atkinson (1998), nokta kaynak metodundaki bu eksikliği gidermek için fayı hayali bir dikdörtgen şekilde belirleyip bu büyük fayı kendi içinde küçük fay parçalarına bölüp her bir parçayı Boore (1983)'in önerdiği gibi noktasal bir fay olarak düşünerek bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yönteme sonlu fay eleman metodu adını vermişlerdir. Bu küçük faylar ω^{-2} spektrumlu noktasal kaynak olarak kabul edilir. Bu yöntemde, alt faylardan herhangi birisine deprem odağı yerleştirilir ve bu odaktan sabit hızla dalgalar yayılmaya başlar. Yayılırken yırtılma hareketine benzer şekilde dalgalar hareket eder ve her bir faydan yayılan dalgalar diğer fayı tetikler. Zamanla alt faylardaki kırılma hareketleri, ana fayı etkiler duruma gelir (Ünal ve Askan 2015). Bu etkilerin hepsi toplanır ve;

$$A(t)=\sum_{i=1}^{nl}\sum_{i=1}^{nw} Aij(t+\Delta tij) \qquad (4.36)$$

bağıntısı yardımıyla fayın ivme-zaman etkileri elde edilir.

A(t), tüm faydan elde edilen ivme kaydını, A_{ij}, ij. alt fayın ivme katkısını, n_l ve n_w, fayın uzunluğu ve fayın genişliği boyunca bulunan alt fay sayılarını, Δt_{ij}, her bir alt fay için hesaplanan gecikme süresini ifade eder. Bu süre, yırtılma yüzeyinin her bir alt faya ulaşma süresi ile dalganın gözlem noktasına ulaşma süresinin toplamıdır (Askan and Karimzadeh 2019).

Beresnev and Atkinson (1997) tarafından önerilen bu model, toplam alt fay sayısındaki kısıtlama ve faydaki enerjinin doğrudan alt fay boyutlarına bağlı olması nedeniyle tam olarak uygulanamamıştır. Bu kısıtlayıcı durum, Motazedian and Atkinson (2005) tarafından yeni bir metotla aşılmıştır. Dinamik köşe frekansı adı verilen bu yeni metot sayesinde, toplam enerji alt fay boyutuna bağlı olmaktan çıkmıştır. Enerjinin yanında düşük dalga frekansına sahip olan dalga genlikleri de alt fay boyutuna bağımlı olmaktan çıkmıştır (Askan and Karimzadeh, 2019).

Stokastik sonlu fay yöntemindeki bu güncellemeyle birlikte bu yöntem, kaynak, alt faylar için deterministik spektrum ve rassal faz açıları kavramlarını esas almıştır. Herhangi bir ij alt fayı için, f frekansındaki spektral ivme bağıntısı;

$$A_{ij}(f)=CM_{0ij}Hij\frac{(2\pi f)^2}{\left[1+\left(\frac{f}{fcij}\right)^2\right]}e^{-\frac{\pi fRij}{Q(f)\beta}}G(R_{ij})A(f)e^{-\pi kf} \quad (4.37)$$

bağıntısıyla ifade edilmiştir. $C=\frac{\Re^{\theta\varphi}.\sqrt{2}}{4\pi\rho\beta^3}$, bağıntısıyla ifade edilen ölçekleme katsayısı, $\Re^{\theta\varphi}$, ışınım örtüsü, ρ yoğunluk, β S dalga hızı, $M_{0ij}=\frac{M0Sij}{\sum_{i=1}^{nl}\sum_{i=1}^{nw}Skl}$ alt faya ait sismik moment, S_{ij} göreli kayma ağırlıkları, $f_{cij}(t) = N_R(t)^{-1/3}4.9x10^6\,\beta\left(\frac{\Delta\sigma}{M0ave}\right)^{1/3}$ alt faya ait dinamik köşe frekansıdır. $\Delta\sigma$ gerilim düşümü, $N_R(t)$ herhangi bir t zamanında kırılmış olan toplam alt-fay sayısı ve $M0ave=M0/N$ alt-fayların ortalama sismik momentidir. Rij gözlem noktasından uzaklık, $Q(f)$ sönüm kalite faktörü, $G(R_{ij})$ geometrik yayılım faktörü, $A(f)$ saha büyütme filtresi, $e^{-\pi kf}$ zeminlerin yüzeye yakın azalım özelliklerini ifade eden ve Kappa faktörü olarak da bilinen yüksek frekans filtresidir (Anderson and Kough 1984). Hij ise yüksek frekans filtresi olup,

$$H_{ij} = \left\{ N \frac{\Sigma\left[\frac{f^2}{1+fc^2}\right]}{\Sigma\left[\frac{f^2}{1+f_{ij}^2}\right]} \right\}^{1/2} \tag{4.38}$$

bağıntısı ile ifade edilmektedir (Karimzadeh and Askan 2019).

5. 2 HAZİRAN 1859 DEPREMİ ve ETKİLERİ

Bu başlıkta 2 Haziran 1859 Erzurum depremi, arşiv ve literatür taramaları bir araya getirilerek detaylı bir biçimde anlatılmıştır. Depremde hasar alan tarihi yapılardan bahsedilmiştir.

5.1.Depremin Niteliği ve Önemi

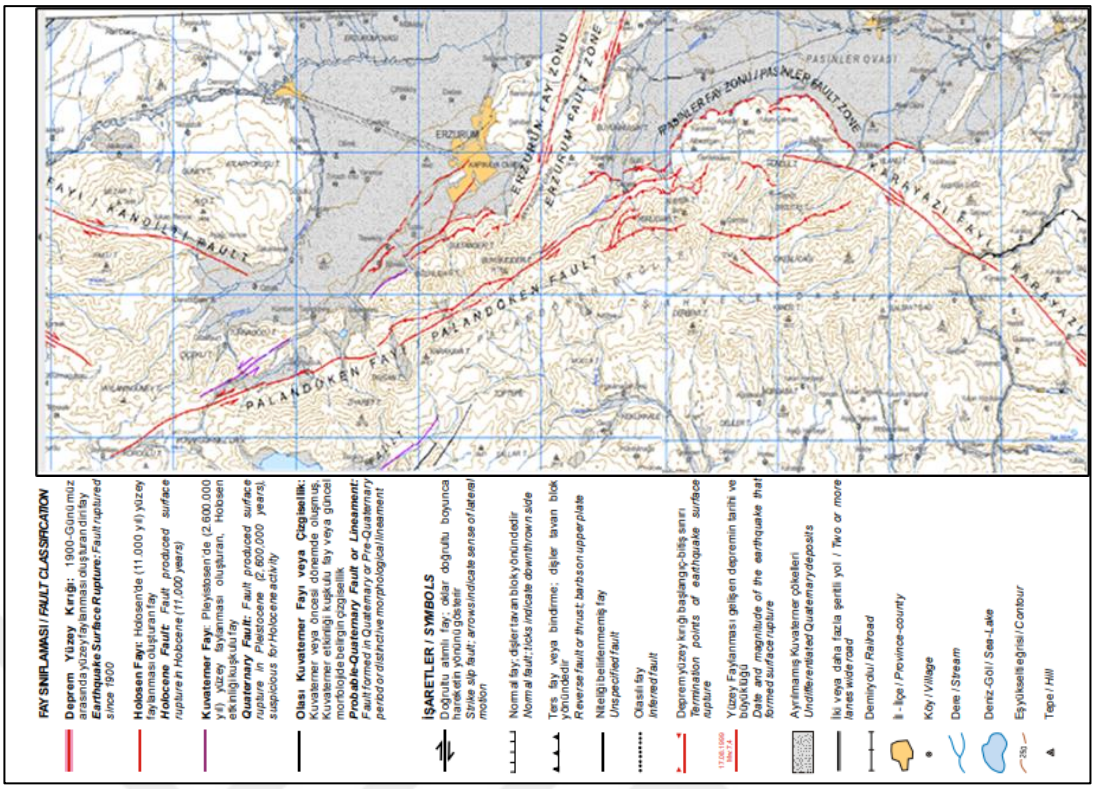
Tez çalışmasının 3. bölümü olan Erzurum ve Depremselliği bölümünde Erzurum depremlerinden bahsedilirken, Erzurum tarihinin en şiddetli depreminin 2 Haziran 1859 depremi olduğu belirtilmiştir. Deprem, 1 Haziran günü gece yarısından başlayan bir deprem halkasının en sonuncu ve en yıkıcı depremi olmuştur. İlk deprem, şehrin batısından hissedilen şiddetli olmayan bir deprem olmasına rağmen akabinde meydana gelen peş peşe 12 depremle birlikte 2 Haziran gecesi saat 4 sularında şehrin kuzey ve güney yönünde büyük bir depreme dönüşmüştür. Sonrasında 15 dakika sonra gerçekleşen ikinci depremle birlikte şehir yerle bir olmuştur. Deprem 15 saniye gibi kısa bir süre sürmesine rağmen yıkıcı etkisiyle oldukça güçlü bir deprem olmuştur. Mercalli şiddet ölçü (MMI) birimine göre depremin şiddeti 9 şiddet düzeyindedir (Özer et al. 2019).Depremin şehirde yarattığı hasar korkutucu şekildedir. Kesinliği net olmamakla birlikte başkent İstanbul'a yazılan raporlarda 360 kişinin vefat ettiği belirtilmiştir. Hasar boyutunda ise; 1462 ev tamamen yıkılmış, yaklaşık 3500 ev ise ağır hasar almış, 6 cami tamamı ile yıkılmış, 20'ye yakın cami ve mescit de kısmen yıkılmıştır (Tozlu 2000 ;Sağlam 2021). Şehrin 19. yüzyıldaki genel planını gösteren harita Şekil 5.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. 19. yüzyıl Erzurum Şehir Haritası (Sağlam 2021)

5.2. Depremin Etki Alanı

Depremin etki alanıyla çeşitli bilim adamları belirli görüşleri belirtmişlerdir. Bu görüşlerden en bilineni Rus Bilimler Akademisi üyesi Alman jeolog Hermann von Abich'in raporunda belirttiği görüşlerdir. Abich'in raporuna göre depremin merkez üssü Palandöken-Eğerlidağ arasında bir noktadan başlamıştır. Deprem dikey, yukarı aşağı yönlü ve aynı zamanda yatay bir şekilde gerçekleşmiştir. Deprem esnasında boğuk boğuk sesler meydana gelmiştir. Deprem, güneyden kuzeye doğru bir yayılım göstermiş ve güneybatıda bulunan Erzurum şehir merkezini çok şiddetli bir şekilde etkilemiştir. Şehrin kuzey ve batı kısımlarında deprem sarsıntısı giderek azalmıştır (Taşkesenlioğlu ve Taşkesenligil 2020). Bu veri ışığında Şekil 5.2.'de sunulan Erzurum Fay Haritası incelendiğinde depremin Erzurum Fay Zonu üzerinde gerçekleştiği tahmin edilmektedir (Anonim 2021b).



Şekil 5.2. Erzurum diri fay haritası (Anonim 2021b)

5.3. Depremin Tarihi Yapılar Üzerindeki Etkileri

Bölüm 5.1'de depremin Erzurum şehrinde yarattığı tahribattan genel olarak bahsedilmiştir. Deprem özellikle Erzurum şehir merkezinde oldukça ağır hasara neden olmuştur. Depremin 19. yüzyılda gerçekleşmiş olması, Erzurum'un o zamanlar Osmanlı Devleti başkenti olan İstanbul'a uzaklığı, teknolojik imkânsızlık gibi etmenler nedeniyle deprem ile ilgili bilgiler oldukça sınırlı düzeydedir. Dolayısıyla burada öncelikli bilgi kaynağı olarak Osmanlı Devleti arşiv kayıtları deprem ve depremin etkileri bakımından baz alınmıştır. Dönemin şehir yöneticilerinin arşiv kayıtlarında yer alan depremle ile ilgili yazışmaları ve raporları, 2 Haziran 1859 Erzurum Depremi hakkında temel bilgileri sunmaktadır. Buna ek olarak bazı bilim insanlarının bilimsel çalışmaları ve detaylı literatür okumaları da birleştirilerek bu depremin hasarları hakkında genel bir perspektif oluşturulmaya çalışılmıştır.

Tarihi yapı bakımından Erzurum çok zengin bir şehirdir. Özellikle depremin en çok tahribata yol açtığı şehir merkezinde tarihi camiler başta olmak üzere birçok tarihi yapı mevcuttur. Şehrin adeta simgesi olan bu eserlerin, depremde hasar alıp almadığı

konusunda detaylı bir literatür çalışması yapılmıştır. Bu derece yıkıcı bir depremi yaşayan tarihi yapıların o zamanki arşivlerdeki var olan hasar kayıtlarının, günümüz şartlarında depremin matematiksel modeliyle doğrulanması bu tez çalışmasının amaçlarındandır. Arşivler ve literatür çalışmaları baz alınarak deprem hasarları bakımından tez çalışması için çalışılan tarihi yapılar iki ana grupta sınıflandırılmıştır.

5.3.1. Hasar kaydı bilinen tarihi yapılar

Bu gruptaki tarihi yapılar, 2 Haziran 1859 depreminde Erzurum'da hasar kaydı devlet arşivlerinde bulunan, literatür çalışmalarında da depremde hasar aldığı belirtilen tarihi yapılardan oluşmaktadır.

5.3.1.1. Pervizoğlu Camii

Erzurum Yakutiye ilçesi Ayazpaşa Caddesi üzerinde bulunan Pervizoğlu Camii, 1715 yılında Pervizoğlu Hacı Mehmet tarafından yaptırılmıştır. Kesme taşla inşa edilen cami kare planlı, tek kubbeli ve küçüktür. Caminin son cemaat yerini dört taş sütun üstünde üç kubbe örtmektedir. Bu kubbeleri taşıyan kemerler bir yandan sütunlara, diğer yandan kuzey duvarındaki kemer konsüllerine oturmaktadır. Caminin iç mekanını örten kubbesi köşelere oturmaktadır. Cami, sade mukarnas kavsaralı taş mihraba sahiptir. Caminin giriş kapısı düz atkı taşlı olup sade bir düzenlemeye sahiptir. Cami minare gövdesi silindirik ve taş malzemeden yapılmıştır. Minarenin şerefe altı sarkıtlı iri mukarnaslı olup petek kısmının yarısı kesme taşla diğer yarısı da tuğla ile yapılmış ve sivri bir külahla sonlanmıştır. Caminin görünümü Şekil 5.3.'te gösterilmiştir (Anonim 2021e).



Şekil 5.3. Pervizoğlu Camii

Alman jeolog Abich'in raporlarına göre Pervizoğlu Camii 1859 depreminde yarı yarıya hasar almıştır ve cami kubbesi depremde yerinden hareket ederek kaymıştır. Sonraki artçı depremlerde kubbe tekrar eski yerine geri gelmiştir (Taşkesenlioğlu ve Taşkesenligil 2020).

5.3.1.2. Lala Mustafa Paşa Camii

Erzurum'da ilk inşa edilen Osmanlı yapısı olan Lalapaşa Camii, 1562 yılında Lala Mustafa Paşa adına Mimar Sinan tarafından yaptırılmıştır. Cami merkezi kubbeli ve kare planlı bir mimari yapıya sahiptir. İlk başta külliye formunda inşa edilmesine rağmen günümüze sadece cami ulaşabilmiştir. Orta kısımda bulunan dört adet sekizgen taş kolon üzerine yerleştirilmiş asıl kubbe, dört yandan yarım kubbeler ve payandalarla desteklenmiştir. Yan kısımlarda bulunan küçük kubbelerle simetrik bir görünüm elde edilmiştir. 24 m x 24 m boyutlarında kare plana sahip olan cami, 10 metre çapında ve 16 metre yüksekliğinde bir merkezi kubbeye sahiptir. Caminin kuzeybatı yönünde bulunan minare kare bir kaideye yerleştirilmiştir. Minare tamamen kesme taştan yapılmıştır ve diğer cami minarelerine kıyasla daha kısadır (Şeker et al. 2015).

Osmanlı arşivlerinde net bir hasar kaydı bulunmamasına rağmen, arşiv kayıtlarında tamiri için belirli miktarda ödenek istendiğinin geçmesi ve bu ödeneğin ağır hasar alan caminin tamiratı için kullanılmasının belirtilmesi, Lala Mustafa Paşa Camii'nin 1859 depreminde ağır hasar aldığını belirtmektedir (Tozlu 2000). Caminin genel görünümü Şekil 5.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Lala Mustafa Paşa Camii

5.3.1.3. Erzurum Ulu Camii

Saltuklu Emiri Ebul Feth Melik Muhammed tarafından 1179 yılında yaptırılmıştır. Yapının üst örtüsü mihrap duvarına dikey olarak inşa edilmiştir. Geniş bir orta nef ve bunun iki yanında üçer nefle birlikte toplam yedi neften oluşmaktadır. Yirmi sekiz serbest ve dikdörtgen şekilli paye üzerine oturtulan cami, 51 x 54 metre ölçülerindedir (Anonim 2022a). Caminin içerisinde toplam 40 sütun bulunmaktadır. Cami duvarları düzgün kesme taştan, cami minaresi tuğladan inşa edilmiştir. Cami çeşitli onarımlar geçirerek bugüne ulaşmıştır. Caminin genel görünümü Şekil 5.5.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Erzurum Ulu Camii

Osmanlı arşivlerinde, Ulu Camii'nin onarımı için hazineden para yardımı talep edilmiştir ve edinilen parayla Ulu Camii'nin 1861 yılında onarımının bitirilip ibadete açıldığı belirtilmiştir. Caminin 1861 yılında geçirdiği tamiratın kitabesi, caminin doğu duvar kapısında halen bulunmaktadır. Bu kitabede caminin hasar aldığı ve 1861 yılında tamiratının tamamlandığı yazılmaktadır (Yurttaş 2001). Bu kitabenin varlığı da Ulu Camii'nin bu depremde hasar aldığına dair önemli bir kanıt olarak değerlendirilmektedir. Caminin batı kapısında bulunan tamirat kitabesi Şekil 5.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Ulu Camii tamirat kitabesi

5.3.1.4. Erzurum Kalesi

Yapım tarihi M.S. 415'e kadar dayanan Erzurum Kalesi, Bizans İmparatoru II. Theodosius tarafından inşa edilmiştir. Kale, 50 m x 130 m dikdörtgen alana sabitlenmiş iç kale ve dış kale olmak üzere iki adet bölüme sahiptir. Düzgün kesme taş kullanılarak, kale yapıları kale burçları ve dış kapıları inşa edilmiştir (Gündoğdu 2018).

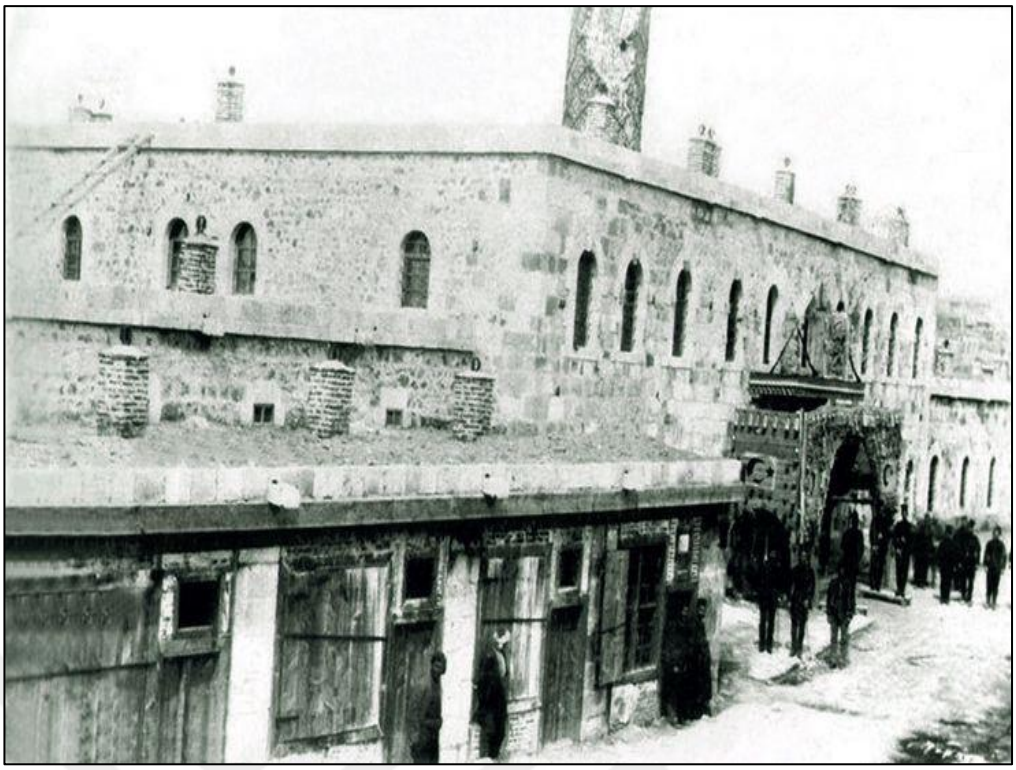
1852 depreminde hasar alan Erzurum Kalesi, 1859 depreminde daha da büyük hasar almıştır. Deprem sonucunda kale surları ile iç kalenin yarısı, askerlerin barınma alanları ve kışlalar yıkılmıştır. Kale dışındaki iki sur duvarı ile hendek yıkılmışken iç kaledeki surlar büyük hasar almıştır ve kısmen ayakta durmuştur (Küçükuğurlu 2013). Kalenin genel görünümü Şekil 5.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Erzurum Kalesi

5.3.1.5. Morgov Kışlası

Günümüzde bulunmayan Morgov Kışlası, bugünkü Cumhuriyet Caddesi'nde Yakutiye Medresesi'nin güney batı kısmında bulunmaktaydı. 1796 yılında askeri sürat topları, askeri arabalar gibi askeri mühimmatların korunması için yaptırılmıştır. (Küçükuğurlu 2013). Yapı malzemesi ve yapının ölçüleri kaynaklarda net bir bilgi bulunmamaktadır. Fakat kaynaklarda yapının kemerli bir kapıya sahip olduğu ve kışlanın genel yapısının arşivlerdeki fotoğraflara göre dikdörtgen şeklinde yapıldığı görülmektedir (Anonim 2021f). Kışlanın eski zamanlardan kalma görünümü Şekil 5.8.'de gösterilmiştir.

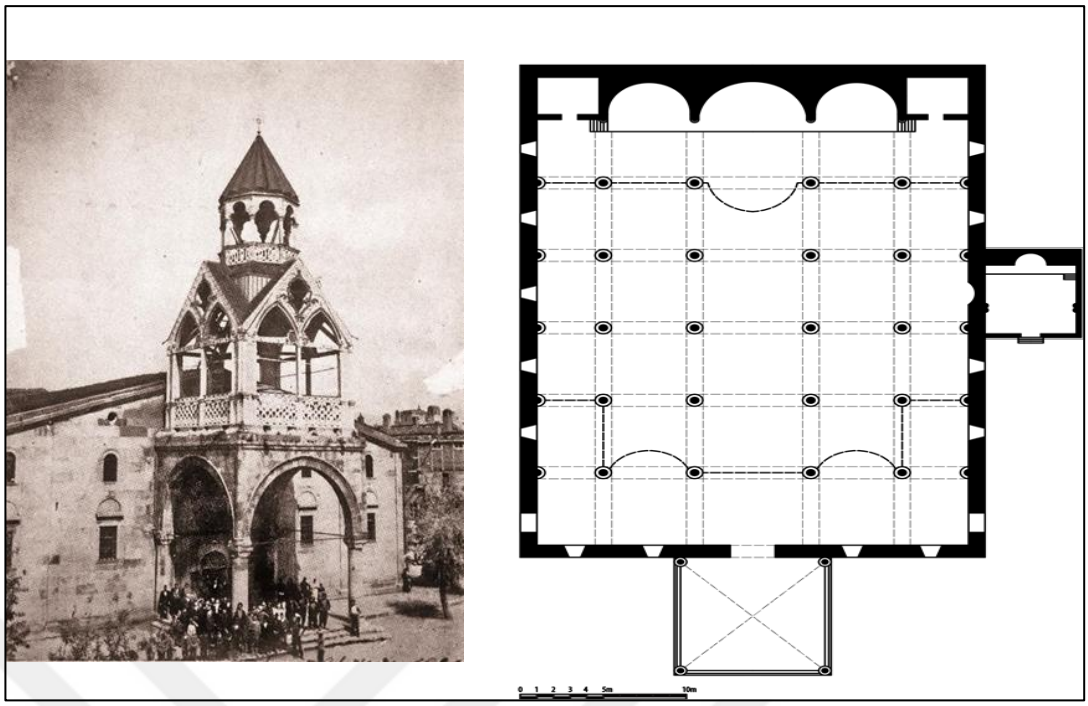


Şekil 5.8. Morgov Kışlası (Anonim 2021f)

1829 yılında Rus işgali sırasında hasar alan kışla, 1832 yılında yeniden inşa edilmiştir. 1859 depreminde ağır hasar alan ve yıkılan kışla, 1860 yılında yeniden inşa edilmiştir (Sağlam 2021). Kışla, 1974 yılında bir çevre düzenlenmesi sırasında yıkılmıştır ve günümüze ulaşamamıştır (Küçükuğurlu 2013).

5.3.1.6. Surp Asdvadzadzin Kilisesi

Erzurum Surp Asdvadzadzin Katedrali, 1838 ve 1844 yılları arasında, şehrin kuzeyinde, Veri Jam (Yukarı Kilise) ve Vari Jam (Aşağı Kilise) adlarıyla bilinen yıkılmaya yüz tutmuş durumda olan iki kilisenin yerine inşa edilmiştir. Bugünkü Erzurum Valiliği karşısında yer alan TRT müdürlüğü üzerinde yer alan kilise 27 m genişliğe ve 47 m uzunluğa sahip büyük bir kilisedir. Kilise temelleri kesme taşlardan yapılmıştır. Bu temeller üzerine inşa edilen kiliseyi 4,5 metre yüksekliğinde on adet gömme ayak ve yirmi adet sütun taşımaktadır (Anonim 2021g; Tarbassian 1975). Kilisenin fotoğrafı ve plan görünümü Şekil 5.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Surp Asdvadzadzin Kilisesi ve plan görünümü (Anonim 2021g)

Günümüzde var olmayan kilisenin 1859 depreminde batı kapısındaki çan kulesi ve altındaki kubbeli sundurması yıkılmıştır. Kilisenin diğer kısımlarında önemli bir hasar ya da göçme olmamıştır (Anonim 2021g).

5.3.1.7. Mudurga Surp Lusavorich Manastırı

Bu manastır, Erzurum'un Çayırtepe Köyü'nde inşa edilmiştir. Yapım yılı olarak kaynaklarda net bir tarih belirtilmemesine rağmen 17. yüzyılın ortalarında inşa edildiği tahmin edilmektedir. Duvarlarla çevrili bu yapı, iki katlı, içinde 60 odası bulunan, içinde iki şapel bulunan bir mimariye sahiptir (Tarbassian 1975). Manastırın yapı boyutları net olarak kaynaklarda mevcut değildir. Yapı 2 Haziran 1859 depreminde hasar almıştır, fakat bu hasarın ne boyutta olduğu kaynaklarda belirtilmemiştir. Manastır, Birinci Dünya Savaşı'nda tamamen yıkılmıştır. Manastıra dair plan vb. doküman yetersiz olduğundan bu çalışma kapsamında şahit yapı olarak değerlendirilememiştir. Manastırın literatürde var olan görüntüsü Şekil 5.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Mudurga Surp Lusavorich Manastırı (Tarbassian 1975)

5.3.2. Hasar alma ihtimali olan tarihi yapılar

2 Haziran 1859 depreminde, arşivlerden ve literatür çalışmalarından ulaşılabilen hasar almış tarihi yapılar Bölüm 5.3.1.'de hasar durumlarıyla birlikte açıklanmıştır. Şiddeti ve yıkıcılık etkisi bu kadar yüksek olan bir depremde, kayıtlara geçen hasar almış tarihi yapı sayısı sınırlı bir şekilde mevcuttur. Bu durum, depremde hasar alan yapıların daha fazla olabilme ihtimalini sorgulamaya yöneltmiştir. Öncelikle bu depremde literatürde ve arşiv kayıtlarında ağır hasar alan ve hasar kayıtları belli olan mahallelerden yola çıkılmıştır. Tozlu (2000) çalışmasında, bu mahalleleri Çizelge 5.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. 2 Haziran 1859 Erzurum depreminde ağır hasar alan mahalleler (Tozlu 2000).

Mahallenin Adı	Toplam Hasarlı Ev
Yeğenağa	140
Aşağı Habib Efendi	103
Yukarı Yoncalık	195
Cafer Efendi	115
Veyis Efendi	123
Yukarı Mumcu	100
Kadana	110
Taşmescid	142
Muradpaşa	210
Aşağıyoncalık	126
Hasanibasri	410
Sultan Melik	185
Topçuoğlu	110
Mehdi Efendi	133
Cedid	104
Cami-i Kebir	168
Eminkurbu	122
Dere	109
Vani Efendi	160

Çizelge 5.1.'de verilen ağır hasar alan mahallerdeki tarihi camiler belirlenmiştir. Ağır hasar alan mahallelerde bulunan bu camilerin de depremde hasar yaşama ihtimali fikri öne çıkarılmıştır. Bununla birlikte 1859 depreminde hasar kaydı net bilinen tarihi eserlere yakın konumda olan camilerin de depremde hasar alma ihtimali de ikinci bir fikir olarak öne sürülmüştür. Bu iki öngörü de göz önüne alınarak, belli başlı tarihi camiler seçilmiştir.

5.3.2.1. Murat Paşa Camii

Erzurum Yakutiye ilçesinde Muratpaşa Mahallesinde bulunan Muratpaşa Camii, 1572 senesinde Osmanlı sadrazamı Kuyucu Murat Paşa tarafından yaptırılmıştır. Muratpaşa Camii Erzurum'da bulunan ikinci Osmanlı eseridir. Cami, tipik Osmanlı camileri gibi tek kubbeli ve kare planlı şeklindedir. Caminin genel görünümü Şekil 5.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Murat Paşa Camii

Cami, başlangıçta minaresiz şekilde inşa edilmiştir. Caminin doğu yönünde 1314 yılında İlhanlılar tarafından inşa edilen Ahmediye Medresesi'nin minaresini cami minaresi olarak kullanmıştır. Kalın ve kısa olan bu minare 1928 yılındaki gerçekleşen depremde yıkılmıştır ve yerine şu anki minare inşa edilmiştir (Konyalı 1960). Caminin 1859 depreminde hasar kaydı olmamasına rağmen, caminin 1870 yılında bir onarımdan geçtiği kayıtlarda mevcuttur (Çelemoğlu 2015). Bu durumla beraber caminin ağır hasar alan Muratpaşa Mahallesi'nde bulunmasından ötürü caminin 2 Haziran 1859 depreminde hasar alma ihtimali olduğunu düşündürmektedir.

5.3.2.2. Yeğenağa Camii

1661 yılında Yeğenağa Mahallesi'nde Yeğen Hacı Ahmet tarafından yaptırılmıştır. Cami duvarlarında moloz taş kullanılmıştır. Plan olarak dikdörtgen ve kubbesiz olarak inşa edilmiştir. Cami minaresi tuğladan, kaidesi düzgün kesme taştan yapılmıştır. Caminin tavan ve direkleri ahşaptan, mihrap kısmı düzgün kesme taştan yapılmıştır (Anonim 2021h). Cami 2005 yılında restorasyon geçirerek son cemaat ve çatı kısımları değiştirilmiştir (Berkli ve Özsağlıcak 2019). Caminin genel görünümü Şekil 5.12.'de gösterilmiştir. Cami 1859 depreminde çok hasar alan Yeğenağa Mahallesi'nde olduğundan dolayı depremde hasar alması ihtimal dahilindedir.



Şekil 5.12. Yeğenağa Camii

5.3.2.3. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii

Cami, Aşağı Hasan-ı Basri (Gavurboğan) Mahallesinde Palandöken Caddesi üzerinde yer almaktadır. Önceleri bu caminin yerinde Karakullukçu Ömer Ağa tarafından yaptırılan bir cami bulunurken 1905 yılında harap olan bu cami yerine Erzurumlu Hacı

Cuma Zade Hacı Mehmet Efendi tarafından tamamen yıkılarak yerine Taş Camii inşa ettirilmiştir (Anonim 2021i).

Taş Camii dikdörtgen planlı kubbesiz bir yapıya sahiptir. Cami duvarları yığma taştan yapılmıştır. Cami minaresi tuğladan, kaidesi ve şerefesi düzgün kesme taştan inşa edilmiştir. Cami giriş kapısı düzgün kesme taştan bir kemer biçimindedir. Cami iç kısımdan ahşap desteğin üzerine oturan ahşap tavan oturtulmuştur. Cami yakın zamanda restorasyon geçirmiştir. Caminin genel görünümü Şekil 5.13.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii

5.3.2.4 Kadana Camii

Erzurum Kadana Mahallesi'nde bulunan camini yapım tarihinin M.S. 1751 olduğu tahmin edilmektedir. Bu tarihe caminin minberinde bulunan kitabeden ulaşılmıştır. Cami, Kadana Zade İsmail Efendi tarafından yaptırılmıştır. Yapının ilk olarak mescit olarak kullanıldığı daha sonraları camiye dönüştürüldüğü bilinmektedir (Anonim 2021j). Cami kubbesiz, kare planlı basit bir plana sahiptir. Cami duvarları yığma duvar, duvar köşeleri düzgün kesme bazalttan yapılmıştır. Caminin iç kısmında dört

ahşap desteğin üzerine oturan ahşap tavan oturtulmuştur. Cami en son 2017 yılında restorasyon geçirmiştir. Cami 1859 depreminde ağır hasar alan Kadana Mahallesi'nde bulunmaktadır (Özdoğan 2018). Caminin bir fotoğrafı Şekil 5.14'te gösterilmiştir.



Şekil 5.14. Kadana Camii (Özdoğan 2018)

5.3.2.5. Yukarı Habip Efendi Camii

Erzurum merkez Yakutiye ilçesi Mektep Sokak'ta bulunan cami 1702 tarihinde inşa edilmiştir. Cami plan olarak kare biçiminde olup dört ahşap destekli ve düz ahşap tavan örtülü bir cami tipindedir. Cami duvarları moloz taş malzeme ile inşa edilmiştir. Cami 2009 yılında bir onarım geçirmiştir (Anonim 2021k). 2016 yılına gelindiğinde cami aslına uygun bir şekilde kapsamlı restorasyona alınmıştır. Cami, 2 Haziran 1859 depreminde hasar alan tarihi camilere konum olarak yakın bir mevkidedir. Caminin genel görünümü Şekil 5.15.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Yukarı Habip Efendi Camii

5.3.2.6. Hacıcuma Camii

Erzurum Hacıcuma Mahallesi'nde bulunan cami, vakıf kayıtlarına bakıldığında 1630 yılında Karayazıcızade Seyyid Ahmet oğlu Abdullah tarafından yaptırılmıştır. Cami, daha önce bahsedilen küçük camiler gibi kubbesiz dikdörtgen planlı basit bir mimariye sahiptir. Cami kuzeyinde altı ahşap direk üzerine oturtulmuş son cemaat yeri bulunmaktadır. Cami kapısı üstü sivri kemerle çevrilmiş basık kemerden yapılmıştır. Cami kuzey cephesi düzgün kesme taştan inşa edilmişken diğer cepheleri kesme taştan ve moloz taştan inşa edilmiştir (Gündoğdu vd 2010; Berkli ve Özsağlıcak 2019). Caminin 2018 yılında restorasyonu tamamlanmıştır. Cami 1859 depreminde hasar alan ve ağır hasar alan mahallelere yakın bir konumdadır. Caminin genel görünümü Şekil 5.16.'da gösterilmiştir.



Şekil 5.16. Hacıcuma Camii

Tez çalışmasının bu bölümünde 2 Haziran 1859 Erzurum Depremi'nden etkilenen ve iki ayrı başlıkta belirtilen camiler üzerinde kısa bilgiler verilmiştir. Camiler hakkında daha detaylı bilgiler ve camiler üzerinde yapılan çalışmalar tez çalışmasının 7.bölümü olan Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması başlığı altında verilecektir. 2 Haziran 1859 depreminde hasar alan camiler ve bu camilere yakın ağır hasar alan mahallelerde bulunan seçilen tarihi camiler üzerinde bu tez çalışmasının amacı doğrultusunda gerekli çalışmalar yapılmıştır.

6. DENEYSEL MODAL ANALİZ

Bu bölümde deneysel modal analiz kavramı açıklanmıştır.Alt başlıklarda bir deneysel modal analiz türü olan Operasyonel Modal Analiz kavramı, hesaplama teknikleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

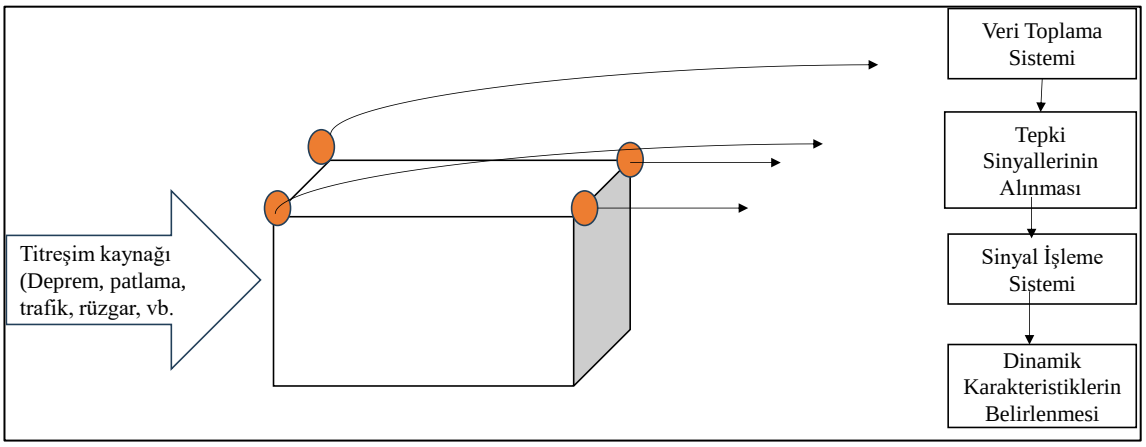
Her yapının kendine özgü belirli özellikleri bulunur. Bu özellikler, bir yapının karakteristik özelliklerini temsil ettiği gibi yapının yapısal özellikleri ve davranışları hakkında da bilgi sağlar. Bu özellikler mod şekilleri, modal frekanslar, sönüm oranı gibi yapıya has parametrelerdir. Genel adıyla dinamik davranış parametreleri olarak da adlandırılan bu parametreler, bir yapının dinamik kimliklendirmesi için kullanılırlar (Erkmen 2022).

Gelişen teknoloji inşaat mühendisliği alanında da pek çok yeniliği beraberinde getirmiştir. Özellikle yapıların dinamik kimliklendirilmesinin, yapının bulunduğu yerde yapılabilmesi imkanını da getirmiştir. Deneysel modal analiz adı verilen bu yöntem sayesinde yapıların yerinde dinamik davranışları tahribatsız olarak belirlenebilmektedir. Bu yöntem, temel olarak yapıdan deneysel olarak elde edilen titreşim kayıtlarını kullanarak mod şekli, modal frekans değerleri ve sönüm oranı gibi yapının dinamik davranış parametrelerini belirlemeyi esas almaktadır. Deneysel modal analiz yöntemi yapının dinamik kimliklendirmesinin yanı sıra hasar tespiti, kalite kontrolü, analitik model güncellemesi, yapı dinamiği modifikasyonu gibi yapının diğer çalışmalarında da değerlendirilebilmektedir (Zhang et al. 2005; Okuyucu 2020).

Yapıların tasarım aşamasında uzun süreli hizmet vermesi temel amacıdır. Tasarım aşamasında malzeme dayanımı, rijitlik, vb., yapı terimleri güvenli ve doğru bir biçimde tanımlanmıştır. Yapının inşa edildikten sonra tasarım aşamasında istenilen güvenliğin inşa edildikten sonra da devam etmesi istenir. Fakat doğal afetler, çevresel bazı şartlar, yapı malzemelerinin zamanla dayanımını kaybetmesi gibi durumlardan dolayı yapılar tasarlanan hizmet ömrüne ulaşamamaktadır. Bu durumları önlemek için gelişen teknolojinin yardımıyla yapıların izlenmesi, yapısal davranışlardaki olağandışı durumların belirlenmesi gibi işlemlerin yapılması gerekmektedir (Yetkin vd 2021). Tarihi yapılar için bu işlemlerin yapılması için son derece önem arz etmektedir. Çünkü

tarihi yapıların misyonu gereği korunması ve gelecek kuşaklara aktarılması çok önemlidir. Deneysel modal analiz yardımıyla tarihi yapılardaki olağandışı yapı davranışları belirlendikten sonra gerekli restorasyonlar ile onarımlar yapılarak yapılar korunacak ve gelecek kuşaklara aktarılacaktır.

Yapılar inşa edildikten sonra çevresel etmenler ve yapı içindeki kullanıma bağlı gerçekleşen rutin işlerin oluşturduğu titreşimlere karşı titreşerek tepki vermektedirler. Bu titreşimler insanların algılanması zor titreşimlerdir. Hassas ivmeölçerler yardımıyla bu titreşimler algılanıp ölçülebilmektedir. Bu titreşimler bir düzen içinde uzun bir süre zarfında ivmeölçerler yardımıyla ölçüldüğünde yapıların dinamik davranış parametreleri adı verilen mod şekilleri, modal frekansları, sönüm oranı, vb. parametreler belirlenebilmektedir (Okuyucu 2020). Deneysel modal analiz adı verilen bu yöntem, basit olarak bir etki-tepki olayı olarak tanımlanır. Geniş bir tanımla yapıya etkitilen bir titreşime karşı yapının verdiği tepki titreşiminin deneysel olarak ölçülüp bu titreşimlerin matematiksel olarak çeşitli yöntemlerle dönüştürülerek yapının deneysel dinamik parametrelerinin yapı üzerinde belirlenmesidir (Okuyucu 2020; Yetkin vd 2021). Şekil 6.1.'de deneysel modal analiz yöntemi şema şeklinde gösterilmiştir.



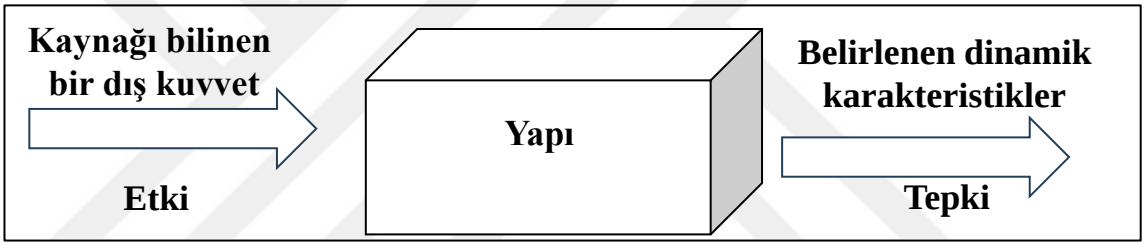
Şekil 6.1. Deneysel modal analiz yöntemi şematik gösterimi

Bu yöntem yapıların başlangıç koşul kabullerinin yapının uygulama aşamasında kontrolünün sağlanmasında, yapının sonlu eleman modellerinde yapılan teorik modal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılarak yapının model kalibrasyon güncellemesinde, teorik modal analizin mümkün olmadığı durumlarda yapıların dinamik davranış parametrelerini belirlemede ve hasarlı yapıların hasar durumlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır

(Yetkin vd 2021). Deneysel modal analiz yöntemleri, yapıya gelen dış etkinin bilinip bilinmemesine göre geleneksel ve Operasyonel modal analiz olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

6.1. Geleneksel Deneysel Modal Analiz

Zorlanmış titreşim testi adıyla da bilinen geleneksel deneysel modal analiz, belirli bir kaynaktan yapıya uygulanan titreşimin bilinmesi ve yapının bu etkiye verdiği titreşimin belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Genel anlamda geleneksel deneysel modal analiz yöntemi ölçüm esnasında uygulanan kuvvete karşı yapının verdiği titreşim tepkisini ölçme amacıdır (Yetkin vd 2021). Şekil 6.2.'de geleneksel deneysel modal analiz yöntemi şema şeklinde gösterilmiştir.

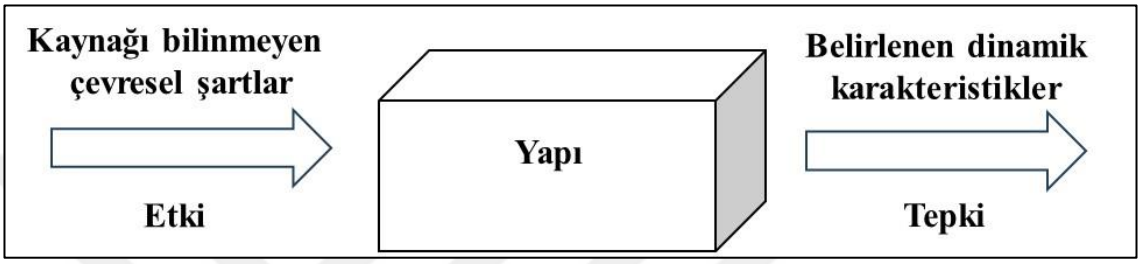


Şekil 6.2. Geleneksel deneysel modal analiz yöntemi şema gösterimi

20. yüzyılın ortalarında geliştirilen bu yöntem yapıların doğal davranış parametrelerinin yapının geometrisine, sınır koşullarına ve malzeme özelliklerine bağlı olduğu belirtilmiştir. Bu yöntemde titreşim kayıtları için zaman, frekans ve mekân alanında, kuvvet ve titreşim arasındaki girdi-çıktıların tek ya da çok olması değişkenleri baz alınarak sayısız modal tanımlama algoritmaları geliştirilmiştir. Fakat zamanla geleneksel deneysel modal analiz yönteminin bazı dezavantajları nedeniyle bu yöntemin uygulanması daha zor ve uğraştırıcı olmuştur. Ölçümler için kullanılan cihazların büyük boyutlu ve ağır olması, cihazların pahalılığı, cihazların sadece düşük frekans aralığındaki titreşimlerde kullanılması, laboratuvar ortamında uyarlanarak kullanılması, büyük yapılar için kullanıma uygun olmaması gibi nedenler deneysel modal analiz yönteminin uygulanmasında büyük zorluklar çıkarmıştır (Zhang et al.2005; Raineri and Fabrocinno 2014). Bunun yerine, yine bir deneysel modal analiz yöntemi olan Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi geliştirilmiştir.

6.2. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi (OMA)

Deneysel bir modal analiz türü olan OMA, çevresel titreşim testi adıyla da bilinmektedir. Bu yöntemde belirli bir kaynaktan yayılmayan çevresel etkilerin yapıda oluşturduğu titreşimler ölçülmektedir. Yapıya zorlaştırıcı bir titreşim verilmez, araç, rüzgâr, yaya hareketi gibi tepkilerin yapıda oluşturduğu titreşimler ölçülmektedir (Okuyucu 2020; Erkmen 2022). OMA'nın şema olarak gösterimi Şekil 6.3.'te verilmiştir.



Şekil 6.3. Operasyonel modal analiz yöntemi şema gösterimi

1990'ların başlarında yaygın kullanılmaya başlanılan bu yöntemin geçmişi daha eskilere dayanmaktadır. 1930'lardan itibaren çeşitli alanlarda kullanıldığına dair çokça bilgi literatürde mevcuttur. İlk titreşim tepki çalışmaları, ses üzerinde Yunan filozof Pisagor dönemine kadar uzanmıştır. Pisagor birbirine bağlanmış iki ipin, tek ipe göre daha fazla titreşip daha yüksek ses oluşturduğunu belirlemiştir. Modern fiziğin kurucusu kabul edilen Galileo, 17. yüzyılın ortalarında cisimlerin titreşimleri ile ilgili önemli çalışmalar yapmıştır. Bir cisimdeki üretilen titreşimlerin, diğer başka cisimde benzer titreşimleri üretebilmesi ortak titreşimler ya da rezonans olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, hangi frekans aralığında hangi seslerin kesin duyulabileceğinin belirlenmesi için ip ve sarkaçların titreşimleri birbiriyle karşılaştırılmıştır (Brincker and Ventura 2015).

Daniel Bernoulli'nin 1755 yılında Berlin Akademisi'nde yayımlanan çalışmasında, bir ipin titreşmesi için aynı anda basit harmonik salınımların çokluğu ile her bir salınımın sonuçta ortaya çıkacak titreşime bağımsız olarak katkıda bulunacak şekilde titreşmesinin mümkün olduğu ifade edilmiştir. Titreşen ipin herhangi bir andaki herhangi bir noktasındaki yer değiştirmenin, her bir basit harmonik düğüm noktasındaki yer değiştirmelerin cebirsel toplamı kadar olduğu ifade edilmiştir. Bu kavrama da Süperpozisyon ilkesi adı verilmiştir. Bugün modal süperpozisyon adı verilen bu teorem

daha geniş bir şekilde Joseph Fourier'in 1822 yılındaki Isının Analitik Teorisi eserinde de yer bulmuştur. Newton'un 1687 yılındaki Prensipler kitabında ilk kez dalga yayılımı teorisinden önemli ölçüde bahsedilmiştir. John Strutt ve III. Baron Rayleigh ses ve titreşim hakkındaki araştırmaları süresince, modern yapı dinamiğinin temelleri için katkı sağlamıştır. Çalışmalarında kütle, rijitlik ve sönümün nasıl ilişkilendirildiği ve bu terimlerin yapı dinamiğine entegresi araştırılmıştır (Brincker and Ventura 2015).

1930'lu yılların başlangıcında, titreşimlerin ve şokların, yapılara etkisi ve yapıların deprem esnasındaki davranışlarının geliştirilmesi konusunda ilk çalışmalar yapılmıştır. M. A. Biot, yapıların depremlere karşı tepkisini karakterize etmek ve şiddetlerini karşılaştırmak için şok spektrumu kavramını öne sürmüştür. G. Housner, bu kavramı sadeleştirerek şok tepki spektrumu adını vermiştir ve tek serbestlik dereceli sistemlerin yer hareketindeki tepkisini tanımlamıştır. 1933'teki California'daki Long Beach depremi sonrasında, 1935 yılında D. S. Carder ilkel OMA teknikleri kullanarak, 200'den fazla binanın doğal davranış parametrelerini çevresel titreşimler yardımıyla belirlemeye çalışmıştır. Bu sonuçlar yeni inşa edilen binaların doğal frekanslarını tahmin etmek için kullanılmıştır. 1972'de M. Trufinac'ın çalışmasında da çevresel ve zorlanmış titreşimlerin pratik mühendislik amaçlarında aynı sonuçlara neden olduğu belirtilmiştir (Brincker and Ventura 2015).

OMA yöntemi mühendislik açısından birçok avantajı içermektedir. Öncelikle düşük maliyetli olması ve hızlı kurulumu olması en büyük avantajlarından ilk sırada gelenlerdir. Ayrıca, yöntemin herhangi bir sınır koşuluna bağlı olmaması, bir parça yerine tüm sistemin dinamik karakteristiğinin elde edilmesi ve çalışılan noktaların tüm sistemi daha iyi temsil etmesi, Operasyonel modal kimliklendirmenin yapılar için sadece dinamik tasarım ve yapısal kontrol için değil aynı zamanda titreşime bağlı yapı izlemesi ve hasar tespiti için de uygun olması yöntemin diğer avantajlarındandır (Zhang et al 2005).

Geleneksel Deneysel Modal Analize (EMA) kıyasla OMA, daha hassas ölçümlere duyarlıdır. Özellikle deneysel modal analizde ölçülemeyen düşük frekanstaki titreşimler, OMA'da daha rahat bir şekilde ölçülebilmektedir. Ek olarak, büyük ve yüksek yapılarda da ölçümler için kullanabilmesi de OMA'yı, geleneksel deneysel modal analize göre daha avantajlı bir konuma getirmektedir. Geleneksel modal analizden türetilen yeni bir yöntem

olmasına ve temelde aynı teorik formülleri kullanmasına rağmen, OMA ile EMA arasında temel bir farklılık bulunmaktadır. EMA yönteminde, titreşim kayıtları ölçülürken, ana titreşim girdisi (input) biliniyorken, OMA'da ana titreşim girdisi yoktur. Bu titreşim, kaynağı bilinmeyen çevrede rastgele bulunan bir titreşimdir. Bu yüzden EMA'da deterministik bir çalışma metodu kullanılırken, OMA'da stokastik bir çalışma metodu kullanılmaktadır. (Raineri and Fabrocinno 2014).

6.3. Temel Prensipler ve OMA Uygulamaları

OMA yöntemi, yalnızca dinamik tepkileri kullanarak doğrusal zaman değişmez sistemlerin dinamik özelliklerini tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Bu nedenle kaynağı bilinmeyen çevresel ve operasyonel yüklerin, test anında ve sonraki modal analizlerde önemli bir rol oynadığı bilinmektedir. Büyük yapılar test edildiğinde çevresel titreşimler önemli bir avantajken veri toplama, veri işleme aşamalarında başarılı çıktılar elde etmek için azami dikkat içinde analizler yapılmalıdır. Başlangıç girdi titreşimi ölçülemediği için analiz altında titreşimin bazı karakteristik özellikleri yanlışlıkla yapının dinamik özellikleriyle karıştırılabilmektedir. Spesifik hareketler ve fonksiyonel kontroller, ölçülen veriden elde edilen mod şekilleri hakkında doğru bilgi alınması için dikkatlice kontrol edilmelidir (Raineri and Fabrocinno 2014).

Bu yöntem ve ara işlemler tamamen matematiksel denklemlere dayanmaktadır. Örnekle ifade edilecek olursa, girdi verisi ve çıktı verisi lineer matrislerdir. Çıktı matrisi olan *Güç Spektral Yoğunluğu* matrisi (PSD), yapının *Frekans Tepki Fonksiyonu* matrisi (FRF) ve girdi güç spektral yoğunluğu matrisi açısından elde edilebilmektedir. Sonuç olarak, çıktı matrisinin mertebesi (rank), üründeki diğer bireysel matrislerin mertebesinden daha büyük olamamaktadır. Eğer bu mertebe girdi güç spektral yoğunluk matrisi mertebe değerine eşit olursa, yakın aralıklı modların tahmin edilemeyeceği anlamına gelmektedir. Bu durum sadece tek veri girdisi veya tüm veri girdilerinin birbiriyle korelasyonlar oluşturulması durumunda olmaktadır. Dolayısıyla böyle bir durumun oluşmaması için çoklu veri setleri, yakın aralıklı modların tahmin edilebilmesi için başlangıç koşullarına uygun hale getirilmelidir (Raineri and Fabrocinno 2014).

Düşünülen yakın aralıklı modların yakınlığındaki sınırlı bir frekans bandı üzerindeki mertebe düşümü, yapının gerçek fiziksel özelliklerini kısmen gizleyebilir. Bu nedenle, tam bir sensör yerleşim planı ile yapı üzerindeki uyarıcı etkilerin bir ön çalışmanın, modal analizden elde edilecek yüksek kaliteli sonuç alma olasılığını artıracak önemli bir etken olduğu ifade edilmiştir. Genel bir kural olarak çok sayıda sensör en üst düzeyde FRF matrisinin mertebesini en üst seviyeye çıkarmayı sağlarken; birkaç birbiriyle ilişkisiz girdi, güç PSD matrisinin mertebesini artırmayı amaçlamaktadır. Bu durumun tam tersi, tek bir noktaya uygulanan ilişkili girdiler veya tek girdi titreşimi, PSD matrisinin mertebesinin sınırları, mod şekillerinin düğüm noktalarına yerleştirilen sensörler ya da aynı serbestlik derecesini ölçen çoklu sensörler FRF matrisinin mertebesini sınırlamaktadır. Girdi titreşimi ile ilgili olarak, yapıya etki eden hareketli yükler veya rüzgar ve trafik gibi çevresel yükler, giriş PSD matrisinin sırasını 1'den büyük değerlere zorlamaktadır (Raineri and Fabrocinno 2014).

Uyarıcı açısından farklılıklara rağmen, klasik girdi-çıktı modal analiz testi, temel olarak üç adımdan oluşmaktadır:

1) **Analiz planlanması ve yürütülmesi:** Bu adım deneysel kurulumun (metre zinciri, sensör düzenlemesi, algılama sensörleri, kablo yolları vb.) ve veri edinme parametrelerinin (kayıtların süresi, örnekleme sıklığı) belirlenmesinin içerildiği bir adımdır.
2) **Modal parametrelerin veri işlenmesi ve tanımlanması:** Bu adımda elde edilen verinin doğrulaması ve ön işlenmesiyle (filtreleme, onaylama, vb.) ilgilidir. Bazı sinyal işleme işlemleri (örneğin, korelasyon fonksiyonlarının hesaplanması için, PSD fonksiyonları, rastgele azalma fonksiyonları, aktarılabilirlik fonksiyonları vb.) ve modal parametrelerinin tahminini içermektedir.
3) **Modal parametre tahminlerinin doğrulanması.**

OMA'nın esas hedefi sadece tahmini modal parametreleri belirlemek değildir. Sonlu eleman model güncellemesi, en önemli hedeflerinden biridir. Sonlu eleman modelleriyle yapılan analizler model ayarlamasındaki bazı yetersizlikler nedeniyle güvenilir değildir. Sonuç olarak sonlu eleman modelinde gerçekleştirilen modal analiz,

genellikle yapının gerçek dinamik davranışını temsil etmemektedir. Bu modeli, deneysel gözlemlere daha fazla bağlı hale getirmek için sonlu eleman modelinde bir düzeltme gereklidir. OMA sayesinde sonlu eleman modelinde yapılan analiz sonuçları, deneysel sonuçlara yaklaştırılır. Böylelikle yapının sonlu eleman analizinden yapının dinamik davranış parametrelerine daha güvenli şekilde ulaşılabilir. Modelin doğrulanması ya da kalibreliği, karmaşık uyarılara verilen yapısal tepkiyi daha doğru bir şekilde tahmin etmeyi ve doğal veya insan kaynaklı yapı açısından tehlikeli olayların etkilerini daha güvenilir bir şekilde değerlendirmeyi sağlar.

Güncellenmiş modelin başka bir tipik uygulaması da hasar algılamasıdır. Belirtilen modal parametreler bazen sorun gidermek için kullanılır. Bu duruma genel bir örnek aşırı titreşimlerin nedeninin değerlendirilmesidir. Bu durumda, tahmini modal parametreler hassasiyet analizleri ve yapısal modifikasyonlar için de kullanılabilir. Tahmini modal parametreler, yüksek masraflara maruz kalmadan yapıların titreşim problemleri için yapısal modifikasyonların etkilerini tahmin etme ve çeşitli çözümler değerlendirme için kullanılırlar. Yapısal değişikliklerin yeterince küçük olduğu varsayılarak yapılan lineer hassasiyet analizi, yapısal modifikasyonun uygulanması ve titreşim sorununun çözümü için yapının en hassas kısımlarını tanımlamayı mümkün kılmaktadır (Raineri and Fabrocinno 2014).

Modal davranış parametrelerinin bir diğer saha uygulaması ise hasar belirleme ve yapı sağlığı izlemedir. Titreşim temelli hasar tespiti, yapının dinamik özelliklerinin hasardan kaynaklı değişiklerini baz almaktadır. Böylece sağlıklı koşullar altında yapının modal parametrelerinin referans tahminleri alınarak yapının bütünlüğü, ilke olarak sonraki modal parametre tahminlerini referanslarla karşılaştırarak değerlendirilebilir. Tahmini modal özelliklerdeki değişikliklerin analizine dayalı hasar algılama tekniklerinin ana dezavantajı tahminlere sınır koşullarının, işletme ve çevre faktörlerinin etkisidir. Böyle bir etki, modal parametrelerin tahminlerinde hasar nedeniyle meydana gelen değişikliklerle aynı büyüklükte değişiklikler meydana getirebilir. Ancak son yıllarda modal parametrelerin tahminlerinde çevresel faktörlerin etkisini ortadan kaldırabilecek bir dizi teknik geliştirilmiştir. Böylece titreşim tabanlı hasar algılama konusundaki yeni bir ilgi alanı ortaya çıkmıştır. Bu hasar algılama tekniklerinin yaygın olarak uygulanmasının bir diğer önemli kısıtlaması, denetlenen yapının modal parametrelerinin

tahmini için tam otomatik prosedürlerin olmamasıdır. Bu sorun, son birkaç yılda güvenilir ve sağlam otomatik OMA tekniklerini geliştirmek için büyük araştırma çabalarına yol açmıştır (Rainieri and Fabrocinno 2014).

Modal parametre tahminlerinin, titreşim tabanlı yapı sağlığı görüntüleme (SHM) ve OMA tekniklerinin içsel sınırlamalarıyla bir şekilde ilişkili bir uygulaması, modal kütlelerin tahminiyle ya da eşdeğer olarak mod şekillerinin ölçekleme faktörleriyle temsil edilir. Aslında, girdi verisi ölçülmediğinden yalnızca ölçeklenmemiş mod şekilleri operasyonel modal testlerden elde edilebilir. Bu nedenle, bilinen yapısal değişikliklerin uygulanmasına dayanan ölçekleme faktörlerinin tahmini için özel teknikler geliştirilmiştir. Ek uygulamalar yük tanımlaması ile ilgilidir. Bu durumda bilinen modal parametreler, ölçülen tepkiyi üreten bilinmeyen kuvvetlerin tanımlanması için ters bir sorunu çözmek için kullanılır (Rainieri and Fabrocinno 2014).

6.4. OMA Hesaplama Tekniklerinin Sınıflandırılması

Çoğu OMA teknikleri geleneksel girdi-çıktı modal tanımlama prosedürlerinden elde edilir ancak farklı bir matematiksel çerçeveye atıfta bulunur. Aslında OMA stokastik bir çerçevede geliştirilmiştir ve rastgele sinyallerin analizine dayanmaktadır. OMA teknikleri her zaman çoklu girdi türüdür. Böylece OMA yöntemlerinin (tek girdi, çoklu girdi) girdi sayısına göre sınıflandırılması, girdi-çıktı modal analizinde olduğu gibi uygulanamaz. OMA yöntemlerinin sınıflandırılması için farklı kriterler uygulanabilir. Her kriter farklı analiz yöntemlerinin ortak özel bir yönünü vurgulamaktadır. Bu kriterler, kullanıcıyı belirli varsayımlar veri işleme prosedürleri ile ilgili avantaj ve sınırlamalara bağlı en uygun analiz yöntemi seçimine yönlendirir (Raineri and Fabrocinno 2014).

Birincisi parametrik ve parametrik olmayan yöntemler arasındaki ayrımdır. Eğer bir model veri ile donatılmışsa, bu teknik parametrik olarak adlandırılır. Bu prosedürler, parametrik olmayanlara göre daha karmaşıktır ve hesaplamalıdır. Ancak genellikle daha hızlı ve kullanımı kolay olmayan parametrik tekniklere göre daha iyi performans gösterirler. Öte yandan, ölçümlerin etkinliği ve dinamik tanımlama sonuçları hakkında hızlı bir anlayış elde etmek için alan denemeleri sırasında özel olarak parametrik olmayan teknikler yararlıdır. Parametrik modellerin sınıfında düşük sırada ve yüksek sırada

modeller arasında bir ayrım yapılır. Fiziksel koordinat sayısı ölçülebilir özdeğerler sayısından daha büyük olan durumlar için düşük sıralama modeli kullanılır. Tam tersine, sistem alan alanında az örneklendirildiğinde genellikle yüksek sıralama modeli kabul edilir (Rainieri and Fabrocinno 2014).

Tek serbestlik dereceli (TSDS) ve çok serbestlik dereceli yöntemler (ÇSDS) arasındaki diğer bir farklılık ise belirli bir bant genişliğindeki yapısal tepkiyi belirleyen mod sayısının varsayımıdır. Eğer bu aralıkta sadece bir mod hâkim mod ise, bu frekans aralığında yapısal tepkinin yalnızca bu moda bağlı olduğu ve sadece bu modun tepki parametreleri ayrı olarak belirlenebildiği varsayılır. TSDS yöntemleri bu varsayım üzerine kurulmuştur. Bu yöntemler çok hızlı ve düşük hesap yükü ile karakterize edilirler; ancak TSDS varsayımı sadece yapının modları birbirinden tam olarak ayrıksa makul bir yaklaşımdır. Yakın mesafeli veya hatta eşzamanlı modlar olduğunda, genel yapısal tepkiye katkıda bulunan farklı modları doğru şekilde tanımlamak için ÇSDS yöntemleri uygulanmalıdır. Modal frekanslar ve sönümleme oranları çıktı yerinden bağımsızdır. Bu frekanslar yerel bazda yani bireysel tepki zamanlarının ayrı bir analizinden tahmin edilebilir. Bu durumda, her analiz edilen zaman geçmişi aynı modal parametrenin biraz farklı bir tahmini sağlayabilir. Sonuç olarak bir dizi yerel tahmin elde edilir. Aksine, eğer veri işlenmesi tüm tepki ölçümleri aynı anda etkilenirse, modal parametreler için genel tahminler elde edilir. Bir adımlı ve iki adımlı yöntemler arasındaki ayrım daha da artar. İlk durumda, doğal frekanslar, sönümleme oranları ve mod şekilleri aynı anda tahmin edilir; ikinci durumda bunun yerine seçilen parametreler (örneğin doğal frekans ve sönümleme oranları) ilk olarak tahmin edilir. Kalan farklı modların kendi değerleri genel yapısal tepkiye katkıda bulunur. Tam tersine, sistem alan alanında az örneklendirildiğinde genellikle yüksek sıralama modeli kabul edilir (Raineri and Fabrocinno 2014).

OMA yöntemleri arasında klasik bir farklılık uygulama alanı açısındandır. OMA yöntemleri zaman tanım alanında tepkileri veya korelasyon fonksiyonlarının analizine dayalı zaman alanı yöntemlerini referans almaktadır. Spektral yoğunluk fonksiyonlarına dayalı yöntemler, frekans alanı yöntemler olarak adlandırılır. Bu farklılık aynı sinyalin farklı temsillerini (zaman ve frekans) göz önünde bulundurdukları için yapay görünebilmektedir. Bununla birlikte, parametrik yöntemler dikkate alındığında, zaman ve frekans alanı arasındaki seçim, iki sınıf yöntemleri karakterize eden farklı gürültü

reddetme mekanizmaları ve sayısal koşullama kalitesi olduğundan pratik uygulamalarla ilgili olabilmektedir. Zaman alan yöntemleri genellikle frekans alanından daha iyi şartlara sahiptir. Bu durum temel olarak, frekans alanındaki denklemlerin frekans etki güçlerinin, herhangi bir z alanında formülasyonu yapılan temel polinom fonksiyonlarının geliştirilmesini sağlamıştır (Raineri and Fabrocinno 2014).

6.4.1. Frekans alanında metotlar

6.4.1.1. Temel frekans alanı (BFD) metodu

Sadece çıktı modal parametrelerinin tanımlanması için en tercih edilmeyen yöntem olan Temel Frekans Alanı (BFD) yöntemi, otomatik ve çapraz spektrumların hesaplanmasına dayalıdır. Bu yöntem, geçmişte modal tanımlama amaçları için yaygın olarak kullanılmıştır. BFD metodu, OMA için bir TSDS yöntemi olarak sınıflandırılabilir. Aslında bir rezonansın etrafında sadece bir modun hâkim olduğu varsayımına dayanmaktadır. Sonuç olarak, PSD matrisinin kutup kalıntı şekli sadece baskın modunun katkılarıyla yaklaşılabilir. Örneğin, eğer sadece r-inci mod baskın mod ise, yapısal tepki yaklaşık olarak;

$$\{y(t)\} \approx \{\Phi_t\} p_r(t) \tag{6.1}$$

bağıntısı ile elde edilir. Φ_t mod şekli $p_{r(t)}$ r. moddaki modal koordinat olarak ifade edilmektedir. Sonuç olarak, yaklaşık korelasyon fonksiyonu;

$$\left[R_{yy}(\tau)\right] = E[\{y+\tau\}\{y(t)\}^T] = R_{prpr(\tau)}\{\Phi_r\}\{\Phi_r\}^T \tag{6.2}$$

$$\left[R_{pr,pr}\right] = E[p_r(t+\tau)p_r(t)] \tag{6.3}$$

bağıntılarıyla ifade edilir. Denklem 6.3 modal oto korelasyon fonksiyonunu oluşturmaktadır. Spektral yoğunluk matrisi;

$$[G_{YY}(\omega)]=G_{Pr\ Pr}(\omega)\ )\{\Phi_r\}\{\ \Phi_r\}^H \quad (6.4)$$

bağıntısıyla ifade edilmiştir. $G_{Pr\ Pr}(\omega)$, modal koordinatın oto spektral yoğunluk fonksiyonudur ve güç spektral yoğunluk matrisinin mertebesidir. Böylece, rezonans durumunda PSD matrisinin herhangi bir sütunu, bir ölçekleme faktörüne kadar ilgili mod şekli tahmini olarak değerlendirilebilmektedir.

Her farklı frekans değerinde PSD matrisinin izi ilk olarak yapısal rezonanslara karşılık gelen zirve frekanslarını tanımlamak için hesaplanır. Ardından, belirlenen frekanslarla ilişkili mod şekilleri PSD matrisinin sütunlarından birinden elde edilir. Tüm diğer ölçüm kanalları ile çapraz spektral yoğunlukların hesaplanması için referans sensörü seçilmelidir. Referans sensörü çoğu mod şeklinin gözlemlenebilmesi için seçilmelidir. Mod şekillerinin düğüm noktalarına yakın sensörler referans sensör olarak kabul edilemez. İdeal referans sensör seçimi, PSD matrisinin tek bir sütununun (seçilen referans sensör ile diğer tüm sensörler arasındaki çapraz spektral yoğunluklar tarafından oluşturulan sütun) hesaplanmasıyla tüm mod şekillerinin tanımlanmasını mümkün kılmaktadır. Ancak, yapının geometrisi ve kabul edilen sensör düzenine bağlı olarak tek bir referans sensörü tüm modları tanımlamak için yeterli olmayabilir. Bu nedenle, farklı yönlendirmeye sahip en az bir çift referans sensör kabul edilmelidir. Örneğin, iki dikey (ortogonal) yönde-x ve y-ve bu yönlere paralel sensörler ile karakterize edilmiş bir binaya benzeyen bir yapının durumunda, referans olarak x boyunca ölçen bir sensör seçimi, x yönünde eğim modlarının ve son olarak burulma modların tanımlanmasına olanak sağlar; ancak y yönündeki eğimi tanımlamak için bu sensör yetersizdir. Bu modların tanımlanması yalnızca y boyunca ek bir referans sensör ölçüm seçimi ile gözlemlenebilir.

BFD yöntemi, modal özelliklerinin yerel tahminlerini sağlar. Ayrıca tahmin edilen kendi frekanslarının doğruluğu, spektrumun frekans çözünürlüğüne bağlıdır. İyi doğal frekans tahminlerini elde etmek için ince bir frekans çözünürlüğü çok önemlidir. Temel olarak, BFD sadece doğal frekanslar ve mod şekillerini değerlendirmek için uygulanmalıdır. Yarım güç bant genişliği yöntemi bazen spektrumlardan sönümleme tahminlerini almak için uygulanır. Ancak, bir dizi çalışma onların doğru olmadığını göstermiştir. Özetle BFD tekniği, düşük sönümleme ve modların tam ayrıklığı durumunda etkili olur. Bu koşullar ihlal edilirse yanlış sonuçlara yol açabilir. Aslında,

sadece bir mod göz önünde bulundurulan frekanslarda hakimse, yöntem gerçek mod şekilleri yerine operasyonel sapma şekilleri (ODS) tanımlar. Bu sapma şekilleri, genellikle tüm mod şekillerinin bir kombinasyonudur. Bunlar gerçek mod biçimlerinin iyi yaklaşımlarıdır. Yakın mesafeli modlar durumunda ODS çoklu modların yüklenmesidir. Bu dezavantajlara rağmen, yöntem hesaplama açısından çok basit ve talepsizdir. Dolayısıyla, özellikle alan testleri sırasında, ölçümlerin verimliliği ve dinamik tanımlama sonuçları hakkında hızlı bir anlayış elde etmek için temel fakat yararlı bir analiz aracıdır (Raineri and Fabrocinno 2014).

6.4.1.2. Frekans alanında ayrıştırma (FDD) Metodu

BFD metodunun temel dezavantajlarından ve yakın aralıklı modların kimliklendirilmesinde yetersiz kalmasından dolayı, frekans alanında ayrıştırma (FDD) metodu geliştirilmiştir. *Spektral yoğunluk* (SD) matrisinin *tek değer ayrıştırma* (SVD) FDD metodu, başlangıçta *Frekans Tepki Fonksiyonlarına* (FRF) uygulanmış daha sonra *Karmaşık Mod Gösterme Fonksiyonu* olarak (CMIF) bilinen çoklu kökleri tespit etme ve net bir frekans değerinde baskın mod sayılarının olasılığını belirlemek için kullanılmıştır. Daha sonra bu metot, tepki spektrum verisini kullanmak için sistematik hale getirilmiştir. Ek olarak FDD yaklaşımı frekans-alanında ayrıştırma tekniğini daha kullanıcı dostu hale getirir, çünkü tüm bilgileri tek bir grafikte toplar. Bu da SD matrisinin tek değerlerin grafiğidir (Raineri and Fabrocinno 2014; Brincker and Ventura 2015).

Metodun teorik kanıtı, yapısal tepkinin modal genişlemesine dayanır ve;

$$\{y(t)\}=[\Phi]\{p(t)\} \tag{6.6}$$

şeklinde ifade edilir.$[\Phi]$ modal matris, $\{p(t)\}$ modal koordinatların vektörüdür. Korelasyon matrisi;

$$\left[R_{yy}(\tau)\right] = E[\{y+\tau\}\{y(t)\}^T] = [\Phi][Rpp(\tau)][\Phi]^T \tag{6.7}$$

bağıntısıyla hesaplanır. Güç spektral yoğunluk matrisi (PSD) için Denklem 6.7'ye Fourier dönüşümü yapıldığında;

$$[G_{YY}(\omega)]=[\Phi]G_{PP}(\omega))[\Phi]^H \tag{6.8}$$

bağıntısına dönüştürülür.

Modal koordinatların PSD matrisi, eğer bir korelasyonda mevcut değilse diyagonaldir. Benzer bir ayrıştırma düz bir spektral yoğunluk fonksiyonu ile karakterize edilen korelasyon edilmemiş uyarma kuvvetleri durumunda da elde edilir. Belli bir ω frekansındaki PSD matrisinin tekil değer ayrıştırması (SVD);

$$[G_{YY}(\omega)]= [U][\Sigma][V]^H \tag{6.9}$$

şeklinde yapılır. [U] ve [V] sağ ve sol vektörleri matrisleri tutan birim matrisler, [Σ] tekil değerler matrisidir. [U] =[V] düzenlemesi yapılıp bağıntı;

$$[G_{YY}(\omega)]= [U][\Sigma][U]^H \tag{6.10}$$

haline dönüştürülür (Raineri and Fabrocinno 2014).

Denklem 6.8 ve Denklem 6.10 birlikte değerlendirildiklerinde tekil vektörler ve mod şekilleri arasında bire bir ilişki tanımlanması önerilmektedir. Buna ek olarak tekil değerler modal tepkilerle ilişkilidir. Araştırılan ÇSDS tepkilerine katkıda bulunan modlarla aynı modal parametrelerle karakterize edilen eşdeğer TSDS spektrumlarını belirlemekte kullanılabilirler. SVD tekil değerleri düşük mertebede düzenlediği için ilk tekil değer bu frekans değerindeki baskın modu belirtmektedir. Ayrıca, sıfır olmayan elementler (Σ), bu frekanstaki PSD matrisinin mertebesine eşit olduğu için bu özellik yakın mesafeli ya da rastgele modları tanımlamak için kullanılabilir. Net bir frekans değerindeki baskın tekil değerlerin sayısı, belirli bir frekansta yapısal tepkiye önemli katkı sağlayan modların sayısına eşittir (Raineri and Fabrocinno 2014). Sadece bir modun ω frekansındaki hâkim olduğu ve seçilen frekansın k. modunun rezonans

zirvesiyle ilişkilendirildiği varsayılıp, PSD matrisinin sadece bir terimle Denklem 6.10'un sağ tarafına bir sıralama matrisine yaklaştığı varsayılırsa;

$$[G_{YY}(\omega)] = \sigma_1\{u_1\}\{u_1\}^H \qquad \omega \longrightarrow \omega_k \tag{6.11}$$

bağıntısı oluşturulur. Bu durumda ilk tekil vektör $\{u_1\}$, k. modun tahmini mod şeklini temsil eder ve;

$$\{\phi_k\} = \{u_1(\omega_k)\} \tag{6.12}$$

şeklinde ifade edilir. Eşdeğer tekil değer σ_1, bu moda karşılık gelen eşit TSDS'nin otomatik PSD fonksiyonuna aittir. Eşdeğer TSDS'nin otomatik PSD fonksiyonu, benzer eşsiz vektörler tarafından karakterize edilen tekil değer grafiklerinin tepe noktasının etrafındaki eşdeğerlerin bir kümesi olarak tanımlanır. Zirvenin etrafındaki frekans çizgileri ile ilişkilendirilmiş tek vektörlerin zirvesinde mod şekli ($\{\phi_k\}$) tahmininin karşılaştırılması, tekil vektörlerin kullanıcının belirlediğinden daha yüksek bir ilişki gösterdiği tek değerlerin tanımlanmasına yol açar. Bu durum *MAC* reddedilme seviyesi olarak adlandırılır. Bu tür tek değerler eşdeğer tek serbestlik dereceli sistemlerin PSD fonksiyonunu tanımlar. *Modal Güvence Kriteri (MAC)*, iki modal vektör arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılır ve;

$$MAC=(\{u_j\},\{\phi_k\}) = \frac{|\{u_j\}^H,\{\phi_k\}|^2}{(\{u_j\}^H\{u_j\})(\{\phi_k\}^H\{\phi_k\})} \tag{6.13}$$

bağıntısıyla hesaplanır. Burada $\{u_j\}$, k-inci moda karşılık gelen değer grafiklerindeki tepe noktası civarındaki genel tekil vektördür. MAC değeri [0, 1] aralığında bir sayıdır; vektörler dikey (ortogonal) olduğunda 0, ve sadece bir ölçek faktörü ile vektörler birbirinden farklı olduğunda değeri 1'e eşittir. Genelde MAC Reddetme Seviye değerinin 0,8 olması tavsiye edilir. (Raineri and Fabrocinno 2014).

Belirlenen eşdeğer TSDS'nin PSD fonksiyonu, modal sönüm oranını belirlemek ve spektrum frekans çözünürlüğünden bağımsız olarak doğal modal frekansların tahmin edilmesi için kullanılır. Bunun için bu fonksiyonun ters Fourier dönüşümü yapılarak, eşdeğer fonksiyon ile yaklaşık bir korelasyon kurulması sağlanır. Bu sayede modal sönüm oranı, zaman alanında logaritmik bir düşüş üzerinde doğrusal bir regresyon yoluyla tahmini olarak belirlenir. Bağımsız doğal modal frekansların tahmini, eşdeğer sistemin sıfır geçişleri üzerinde doğrusal bir regresyon ile elde edilir. Sönümlü doğal frekans f_{dk}, sönümsüz doğal frekans f_k ve modal sönüm oranı ξ_k olmak üzere;

$$fdk = fk\sqrt{1 - \xi k^{2}} \tag{6.14}$$

bağıntısı oluşturulur.

FDD yöntemi yakın aralıklı modların tanımlanmasına izin verir. Ancak bu durumda mod şekli tahminlerinin beklenenden farklı olabileceğini belirtmek gerekir. Aslında SVD tekil vektörleri dikey olmaya zorladığından eğer deneysel mod şekilleri de dikey olursa, elde edilen mod şekli tahminleri beklenildiği gibi çıkar. Aksine eğer mod şekilleri dikey değilse, yakın aralıklı modlar için tahmini mod şekilleri beklenildiği gibi çıkmaz. Bu durum baskın mod tahmini için iyi bir durum iken, doğrudan zayıf modun tahminini etkiler. Oluşan bu tahmin dışı durum, birinci ve ikinci tekil değer arasındaki farklılığa bağlıdır. Bu farklılık ne kadar büyük olursa, hata o kadar düşük olur. Böylece mod şekli tahminleri, birinci ve ikinci tekil değeri arasındaki en büyük farkla karakterize edilen frekanslarda tekil vektörlerden alınmalıdır. Yakın mesafeli modların varlığında bu frekans zirvenin frekansından farklı olabilir (Raineri and Fabrocinno 2014).

6.4.2. Zaman alanında metotlar

6.4.2.1. Stokastik alt alan tanımlama (SSI) metodu

Stokastik alt alan tanımlama (SSI) Metodu stokastik uyarıya maruz kalan bir sistem için yalnızca çıktı ölçümleri kullanılarak uygulanmıştır. Durum vektörü gözlenemediğinden sistem tepkisini tahmin etmek için tahmini durum vektörü kullanılır. Gauss durumunda durum vektörünün en iyi tahmininin tüm önceki çıkış ölçümleri

dikkate alındığında durum vektörlerinin ortalaması olduğu kabul edilir. Bu tahminin lineer cebir açıklaması, statü vektörünün "daha önceki" çıktı veri vektörüne dikey tahminidir. Bu tahmin sistemin kullanmak doğrusal zaman sabiti (invaryans) Kalman filtresine yol açar ve;

$$\hat{x}(k+1)=A\hat{x}(k)+Ke(k) \tag{6.13}$$

$$y(k)=C\hat{x}(k)+e(k) \tag{6.14}$$

yenilikçi durum-alan denklemi adı verilen denklemler oluşturulur. Burada tahmin edilen $\hat{x}(k)$ durumu Kalman durumu olarak adlandırılır. *K,* Kalman Filtre Kazancı ve *e(k)* ise yeniliğe yani sıfır ortalama Gauss beyaz gürültü sürecidir. İki durum-alan denklemi arasındaki ana fark, durum vektörünün tahminiyle değiştirilmesidir ve iki giriş/gürültü süreci teke yani yenilik olarak dönüştürülmüştür (Zhang et al. 2005)

SSI tekniğinin ana prosedürü dört adımda özetlenebilir. "Gelecek" çıktıların satır boşluğunun, "daha önceki" çıktıdaki satır hızında güçlü sayısal teknikler kullanılarak tahmin edilmesinin hesaplanması, Denklem 6.13 ve Denklem 6.14 'teki matrislerin, SVD ile Kalman filtre durumunun tahmin edilmesi, en küçük kareler tekniğiyle ayrık zamanlı sistem matrislerinin tahmini ve daha önce olduğu gibi modal parametrelerin hesaplanması şeklinde özetlenebilir. (Zhang et al. 2005).

Temel prensipler matematiksel olarak irdelendiğinde, çıktı ölçümleri 2i satırlı ve j sütunlu ile bir blok Hankel matrisinde toplanır. Her blok l adet satırlardan oluşur. İstatiksel nedenlerden ötürü j nin sonsuza kadar gittiği varsayılır. Hankel matrisi geçmiş ve gelecek olmak üzere iki parçaya bölünebilir ve Hankel matrisi;

$$H=\frac{1}{\sqrt{j}}\begin{pmatrix} y_0 & y_1 & \cdots & y_{j-1} \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_j \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_i & y_i & \cdots & y_{i+j-2} \\ \hline y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{i+j-1} \\ y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{i+j} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ y_{2i-1} & y_{2i} & \cdots & y_{2i+j-2} \end{pmatrix}= \left(\frac{Y_{0|i-1}}{Y_{i|2i-1}}\right)=\left(\frac{Y_p}{Y_f}\right) \updownarrow \text{li} \left(\frac{Geçmiş}{Gelecek}\right) \tag{6.15}$$

şeklinde ifade edilebilir. Çıktı verisinin, tanımlanmış ortak değişkenleri (kovaryansları) ile tanımlı olması için $\frac{1}{\sqrt{j}}$ ölçek faktörü ile ölçeklendirilmesi gerekmektedir (Peeters and Roeck 2000). Bu ortak değişkenlere ulaşmak için Denklem 6.13 ve Denklem 6.14;

$$x_{(k+l)}=Ax_k+ w_k \quad , \quad E\left[\begin{pmatrix} w_p \\ v_p \end{pmatrix}\left(w_q^T \; v_q^T\right)\right]=\begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix} S_{pq} \tag{6.16}$$

$$y_{(k)}= Cx_k+ v_k \tag{6.17}$$

stokastik alan model üzerinde gösterilir. $y_{(k)}$ nxl boyutlarındaki bir matrisin elemanı olmakla birlikte ayrık anlık bir k zamanında l çıktılarının ölçüsü iken; x_k ise alan vektörüdür. Eğer durum alan modeli n_2 serbestlik dereceli bir yapıyı temsil ediyorsa, durum alanı vektörünün eleman sayısı durumunu tanımlamak için gereken bağımsız değişken sayısı olan $n=2n_2$ ye eşittir. w_k vektörü modelleme yetersizlikleri ve bozukluklarından kaynaklanan gürültü süreci girdisi; v_k lxl boyutunda sensörden kaynaklanan ölçüm gürültüsüdür. İvmelerin ölçülmesi durumunda modeller de beyaz gürültü girdilerinin doğrudan iletimidir. E beklenen değer operatörüdür. S_{pq} Kronecker deltasıdır. p, q iki adet rastgele zaman anıdır. A sistemin dinamiklerini tanımlayan durum matrisidir. C iç durumların dışarıya aktarıldığı çıktı matrisidir Her iki matris de lxn boyutlarındadır. Stokastik süreç sıfır ortalama ile sabit olarak kabul edilir ($\boldsymbol{E}[x_k\, x_k^T]=\Sigma$ $\boldsymbol{E}[x_k]=0$). Durum ortak değişkenler matrisi Σ, zamandan (k) bağımsızdır. w_k,v_k gerçek durumdan bağımsızdır ([$\boldsymbol{E}[x_k\, w_k^T]=0$, $\boldsymbol{E}[x_k\, v_k^T]=0$). Gecikme i'nin çıkış kovaryans matrisi Λ_i ve gelecek durum çıktısının ortak değişkenler matrisi G;

$$\Lambda_i= \boldsymbol{E}[y_{k+i}\; y_k^T], \qquad G= \boldsymbol{E}[x_{k+1}\; y_k^T], \tag{6.18}$$

şeklinde tanımlanır. Bu tanımlardan;

$$\Sigma=A\Sigma A^T+ Q, \;\; G= A\Sigma C^T + S, \; \Lambda_0= C\Sigma C^T+ R \tag{6.19}$$

$$\Lambda_i=CA^{i-1}G \tag{6.20}$$

özelliklerine ulaşılabilir. Denklem 6.19 önemli bir özelliktir. Çıktıdaki ortak değişkenler deterministik lineer zaman değişken sisteminin (A,G,C,Λ_0) itme tepkileri olarak değerlendirilebilir (Peeters and Roeck 2000).

Bu denklemlerle ortak değişkenlere ulaştıktan sonra Hankel matrisinin ilk satır ve ilk sütunları Y_f, Y_p^T ;

$$Y_f, Y_p^T \ (1:l, 1:l) = \sum_{k=0}^{j-1} \frac{1}{\sqrt{j}} y_{k+i} \frac{1}{\sqrt{j}} y_k{}^T = \frac{1}{j} \sum_{k=0}^{j-1} y_k + i y_k^T = \Lambda_i \quad (6.21)$$

şeklinde ifade edilir. Bu denklem, sonsuz sayıda veri ve ölçümkal bir süreçte geçerlidir. Eğer bu iki durumdan biri tam değilse, tam Λ_i ortak değişkenler değerleri değil sadece bir tahmini değişken değeri elde edilir. Bu algoritma, sıradaki çıktıların satır alanını önceki çıktıların satır alanına yönlendirir. Bu durum;

$$P_i = Y_f/Y_p = Y_f/Y_p{}^T (\ Y_p/Y_p{}^T)^\dagger \ Y_p \quad (6.22)$$

bağıntısıyla ifade edilmiştir. $(.)^\dagger$ terimi pseudo-ters matrisi temsil etmektedir. Temel amaç, önceki verinin toplanarak sonraki veri tahmini için uygun ve kullanışlı bir hale getirilmesidir. Stokastik alt alan kimliklendirme ana teoremi, yansıtma elemanı P_i'nin gözlemlenebilen matris O_i ve Kalman filtre durum sekansı X_i nin bir çarpımı olduğunu belirtir ve bu durum;

$$P_i = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \dots \\ CA^{i-1} \end{pmatrix} (x\hat{}_i \ x\hat{}_{i+1} \dots \ x\hat{}_{i+j-1}) = O_i X_i \quad (6.23)$$

bağıntısıyla matematiksel olarak ifade edilir (Peeters and Roeck 2000).

Kalman filtrelemesinin temel amacı, durum vektörü olan x_{k+1} için k anındaki çıktıların gözlemlerini ve mevcut matrislerle birlikte bilinen gürültü kovaryanslarının

kullanılarak en uygun tahminin üretilmesidir. En uygun tahminler $x\hat{}_{k+1}$ ile ifade edilir. Denklem 6.22'de SVD uygulanırsa;

$$P_i = USV^T = (U_1\ U_2)\begin{pmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{pmatrix} = U_1 S_1 V_1{}^T \tag{6.24}$$

bağıntısına dönüştürülür. U $l_i x l_i$ boyutundaki ve V $r_i x r_i$ boyutundaki birim dikey (ortonormal) matrisler olmak üzere, $U^T U = UU^T = I_{li}$ ve $VV^T = V^T V = I_{ri}$ eşitlikleri geçerlidir. S ise $l_i\ x\ r_i$ boyutundaki azalan sırada tekil değerler içeren diyagonal bir matristir. $OiXi$ 'nin iç boyutunun n olması ve $li \geq n$ kabülünden ötürü, $OiXi$ matrisinin mertebesi n' yi geçemez. Mertebe sıfırdan farklı tekil değerlere eşittir. Denklem 6.23'te 0'a eşit tekil değerler ve birbirlerine karşılık gelen vektörler çıkarılıp Denklem 6.22 ve Denklem 6.23 birlikte yazılırsa;

$$Oi = U_1 S_1{}^{1/2}\ X_i = O_i{}^{\dagger} P_i \tag{6.25}$$

şeklinde ifade edilir. Sonuçta sistemin derecesi, gözlemlenen O_i ve durum sekansı S_i nin derecelerinin n olduğu bulunmuştur. Fakat temel amaç sistem matrisleri olan A, C, Q, R ve S'nin kurtarılmasıdır. Eğer geçmiş ve gelecek çıktıları, Denklem 6.15'te bir satır aşağı kaydırılıp tekrar tanımlanırsa;

$$P_{i-1} = Y_f^-/Y_p^+ = Y_{i+1|2i-1}/\ Y_{0|i} = O_{i-1}\ X_{i+1} \tag{6.26}$$

denklemi oluşturulur. Bu eşitlik, Denklem 6.22'deki ana teoreme oldukça benzemektedir. O_{i-1} matrisi, O_i matrisinin son l satırı silinerek elde edilir. Kaydırılmış X_i sekansı;

$$X_{i+1} = O_{i-1}{}^{\dagger} P_{i-1} \tag{6.27}$$

bağıntısı ile elde edilir. Kalman alan sekansları $X_{i,}\ Xi_{+1}$ sadece Denklem 6.24 ve Denklem 6.25'teki çıktı verii kullanılarak hesaplanır. Daha sonra sistem matrisleri aşırı tanımlanmış lineer denklem sistemlerinden Denklem 6.16 genişletilerek ;

$$\begin{pmatrix} X_{i+1} \\ Y_{i|i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \\ C \end{pmatrix} (X_i) + \begin{pmatrix} W, \\ V_i \end{pmatrix} \quad (6.28)$$

yeniden tanımlanır. $Y_{i|i}$, tek satırlı Hankel matrisidir. $W_{i,}$, V_i en küçük kareler kalanlarıdır. Kalman alan sekansları ve çıktıları bilindiği ve kalanları (W_i^T V_i^T) Xi ile korelasyonu olmadığı için denklemlerin seti en küçük kareler mantığında A ve C ;

$$\begin{pmatrix} A \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{i+1} \\ Y_{i|i} \end{pmatrix} X_i^{\dagger} \quad (6.29)$$

bağıntısıyla çözülebilir. Son olarak gürültü ortak değişkenleri olan *Q*, *R* ve *S*, Denklem 6.26 kullanılarak kalıcı kovaryanslara dönüştürülür. Denklem 6.19 kullanılarak *A, C, Q, R* ve *S* matrisleri *A, G, C ve Λ0* matrislerine dönüştürülür. Bu noktada, teorik olarak kimliklendirme problemi çıktılar baz alındığında sistem derecesi n ve sistem matrisleri *A, G, C ve Λ0* bulunduğunda çözülmüştür (Peeters and Roeck 2000).

Stokastik alt alan tanımlama metodunda, modal parametrelerin tahmini, *A* alan matrisinin özdeğer çözümlemesiyle başlar. Bu durum;

$$A = \psi \Lambda \psi^{-1} \quad (6.30)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Λ, *nxn* boyutunda ayrık zamanlı öz değerleri içeren diyagonal bir matris, ψ *nxn* boyutunda sütunlar halindeki öz vektörlerdir. Sürekli zaman öz değerleri λ_i^c ayrık zamanlı olanlardan elde edilir ve bunların her biri;

$$\lambda_i^c = \frac{ln\lambda i}{\Delta t} \quad (6.31)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Bu öz değerler, eşlenik karışık çiftler halinde oluşurlar ve yeni bağıntı;

$$\lambda_i^c , \lambda_i^{c*} = -\xi_i \omega_i \pm j\omega_i \sqrt{1 - \xi i^2} \quad (6.32)$$

şeklinde yazılır. ξ_i, i. moddaki modal sönüm oranı, ω_i i. modun öz frekans (rad/sn) değeridir. Tahmin edilen sistem alanlarının x_k , fiziksel bir anlamı olmasına gerek yoktur. Bu sebeple alan matrisinin öz vektörlerinin "ψ" aktarılması gerekmektedir. Sensör konumlarının mod şekilleri olan lxn boyutundaki Φ matrisinde, her bir mod şekli matrisin sütunlarını oluşturur ve "Φ_i"ile gösterilir. Bu matrisler sistem öz vektörlerinin gözlemlenen parçalarıdır ve çıktı matrisi *C* alan matrisinin öz vektörleri ψ nin çarpımıyla oluşur. Matematiksel olarak;

$$\Phi = C\,\psi \tag{6 .33}$$

bağıntısıyla ifade edilmiştir (Peeters and Roeck 2000).

SSI yönteminde dinamik kimliklendirme için Temel Bileşen (PC), Kanonik Varyant Analiz (CVA) ve Ağırlıksız Temel Bileşen (UPC) olmak üzere üç ana yöntem kullanılmaktadır. Son zamanlarda Genişletilmiş Ağırlıksız Temel Bileşen (UPC-X) yöntemi de bu yöntemlere eklenmiştir. Hankel kovaryans matrisi doğrudan SVD için kullanılır. CVA ve UPC yöntemlerinde Hankel kovaryans matrisinin ağırlığı farklı ağırlıklar kullanılarak kabul edilir. UPC yönteminin, verilen kovaryansa karşılık gelen minimum faz modelinde dengeli model azaltımı gerçekleştirdiğini gösterebilir. Ek olarak UPC yöntemi, deterministik realizasyon/identifikasyon algoritmasının stokastik karşıtlığıdır (Zhang et al. 2005).

Üç yöntem de stokastik sistem gerçekliğinde fiziksel açıklamaları birbirinden farklıdır. Örnek olarak çıktı tahminine göre maksimum korelasyonlu parçalı alanların seçimi (PC) yönteminin; gelecek tepkiye göre karşılıklı bilgi (CVA) yönteminin; çıktılar için maksimum tahmin yeterliliğini korumak (UPC) yönteminin fiziksel açıklamalarıdır. Her bir metodun sonuçlanan Hankel matrislerinin temel bileşenleri farklı olmasına rağmen bilgisayar simülasyonlarında ve pratik uygulamalarda üç yöntem arasında önemli bir doğruluk farkı gözlenmemiştir. Stokastik bazlı modal kimliklendirme aşamaları;

- Ölçülen çıktı veriinden kovaryans matrislerinin tahmini
- Gözlem ve stokastik kontrol matrislerinin tahmini için Hankel kovaryans matrisinin tekil değer çözümlemesi (SVD)

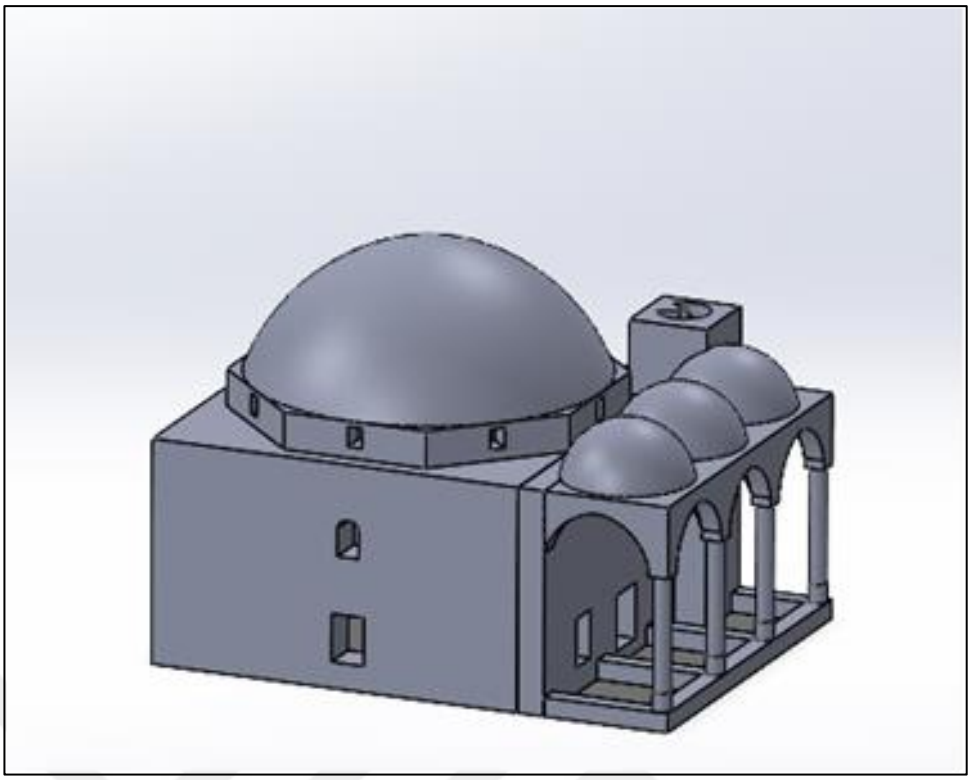
- En az kareler (LS) teknikleriyle ayrık zamanlı stokastik matrislerin hesaplanması
- Sistem matrislerinden modal parametrelerin hesaplanması

şeklinde dört maddede sıralanmıştır (Zhang et al. 2005)

7. SONLU ELEMAN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

Tez çalışmasının bu bölümünde 2 Haziran 1859 Erzurum depreminde arşivlerde hasar kaydı bulunan ve hasar kaydı bulunmamasına rağmen depremde ağır hasar alan mahallelerde bulunan tarihi camilerin üretilen deprem kayıtları ile analizi öncesinde sonlu eleman modellerinin oluşturulması konusunda yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir.

Öncelikle tarihi camilerde gerekli saha çalışmalarının yapılması için Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü'ne başvurularak gerekli yazılı izinler alınmıştır. Bu izin belgesi tez çalışmasının EKLER bölümüne eklenmiştir. Camiler ile ilgili doküman, röleve, vb. materyaller temin edildikten sonra camiler üzerinde keşif çalışmaları yapılmıştır. Camilerin boyutları ölçülüp krokiler çıkarılıp rölevelerle karşılaştırılmıştır. Böylece sonlu eleman modellemesi için kullanılacak camilerin nihai boyutları belirlenmiştir. Boyutların doğrulanmasının ardından camilerin üç boyutlu modelleri Solidworks (2022) yazılımında oluşturulmuştur. Camilerin sınır koşulları, geçmişte aldığı hasarlar, cami yapı malzeme karakteristikleri gibi bazı belirsizlikler sonlu eleman modelleme aşamasında zorluklar çıkarabilmektedir. Yapılan analizlerin bu handikaplara rağmen yapısal karakteristikleri bütünüyle ele alacak ve güvenilirliği tartışılmayacak şekilde olması çok önemlidir. Camilerin sonlu eleman modelleri oluşturulurken belirli unsurlara dikkat edilmiştir. Öncelikle mimari açıdan kayda değer olan ancak yapısal davranışa herhangi bir etkisi olmayan mimari süslemeler modellemelerde göz ardı edilmiştir. Ek olarak bu süslemelerin klasik türde bir yapısal modellemede modellemesi oldukça güçtür. İkinci dikkate alınan husus camilerin minareleridir. Cami gövdesine rijit bir kaideyle bağlanan ya da cami gövdesinden bağımsız bir şekilde inşa edilen cami minareleri, yapısal bakımdan kırılgan bir davranış sergilemektedir. Deprem anında cami minareleri ana gövdeden bağımsız lokal bir kırılma davranışı sergilemektedir ve cami ana taşıyıcı sistem davranışına etki etmemektedir. Bu sebeple, minarenin kaideden yukarı bölümü modellenirken dikkate alınmamıştır ve modellenmemiştir (Kocaman 2022). Solidworks yazılımında oluşturulan örnek bir cami katı modeli Şekil 7.1.'de gösterilmiştir.

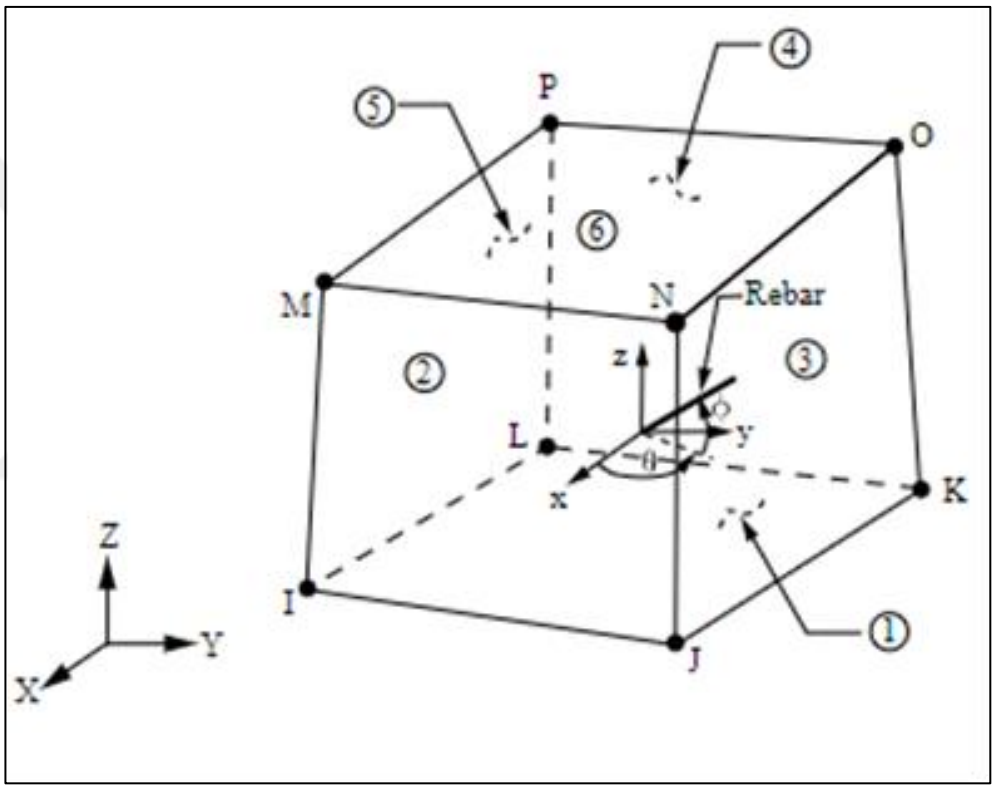


Şekil 7.1. Solidworks (2022) yazılımında oluşturulan örnek bir cami katı modeli

Camilerin Solidworks (2022) yazılımında oluşturulan katı modellerinde herhangi bir malzeme tanımlaması ve küçük sonlu elemanlara bölünme işlemleri yapılmamıştır. Bu işlemler, doğrusal olmayan deprem analizlerinin yapılacağı ANSYS Mechanical (2016) yazılımında gerçekleştirilmiştir. Solidworks yazılımında oluşturulan modeller, önce Workbench (2016) yazılımına aktarılmıştır. Modellerin küçük sonlu elemanlara ayrılma, sınır ve mesnet koşulları tanımlama işlemleri bu yazılımda yapılmıştır. Daha sonra bu model ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılarak cami modellerinin duvar malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Bu yazılımda yapılan teorik modal analizlerin sonucunda camilerin teorik davranış parametreleri elde edilmiştir. Ardından bu sonuçlara göre camilerin operasyonel modal analizleri yapılarak camilerin dinamik davranış parametreleri elde edilmiştir. Daha sonra bu iki sonuçlar karşılaştırılıp camilerin sonlu eleman modelleri üzerinde gerekli sonlu eleman model kalibrasyon güncellemeleri yapılmıştır. En sonunda ise camiler üzerinde deprem analizleri gerçekleştirilmiştir.

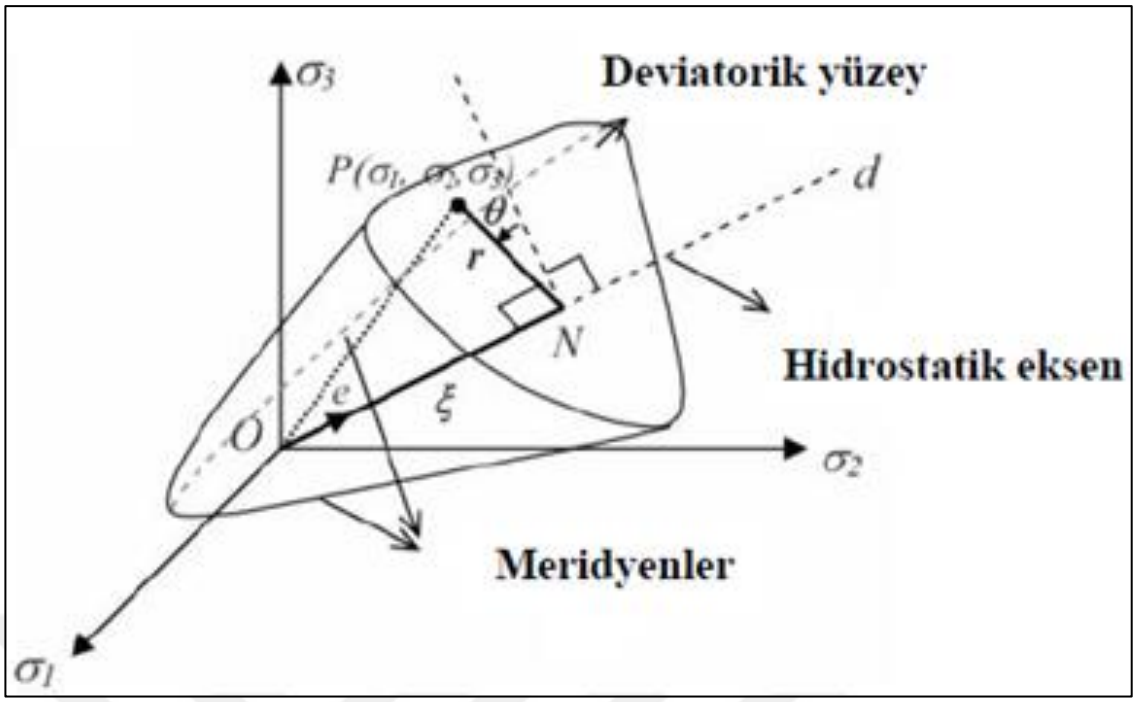
ANSYS Mechanical (2016) yazılımında sonlu eleman modeli olarak SOLID65 elemanı kullanılırken malzeme modeli olarak ise William-Warnke malzeme modeli kullanılmıştır. Yazılımda mevcut bulunan SOLID65 elemanı, sekiz adet düğüm

noktasından oluşan ve her bir düğüm noktası için üç adet öteleme serbestlik derecesine sahip bir eleman modelidir. Eleman modeli çekme gerilmeleri altında çatlama; basınç gerilmelerine maruz kaldığında da ezilme halinde davranış sergilemektedir. Temel olarak, betonarme elemanların modellemesinde de kullanılan bu eleman model kullanılırken beton malzeme izotropik olarak tanımlanır. Betonarme içindeki çelik donatılar da bu şekilde modellenir ve donatılar çekme-basınç kuvvetlerini taşır. Aynı zamanda, bu eleman şekil değiştirme özelliğine de sahiptir (Kocaman 2022). SOLID65 eleman geometrisi Şekil 7.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.2. SOLID65 eleman geometrisi (Kocaman 2022)

Bir malzeme modeli olarak belirlenen William-Warnke modeli, modellemede göçme kriteri olarak belirlenmiştir. Beton malzeme için kullanılan yöntemlerden olan William-Warnke modeli belli başlı özelliklere sahiptir. Göçme eğrisinin düzgün olduğu, basınç gerilmelerinde göçme eğrisinin dış bükeye doğru genişlediği, göçme eğrisinin enine kesitinin üç eksenli olduğu, çekme gerilmesinde veya küçük basınç gerilmelerinde eğrinin üçgen şeklinde olduğu malzeme modelinin özelliklerindendir (Kazaz 2010). William-Warnke malzeme modelinin göçme eğrisi Şekil 7.3.'te gösterilmiştir.



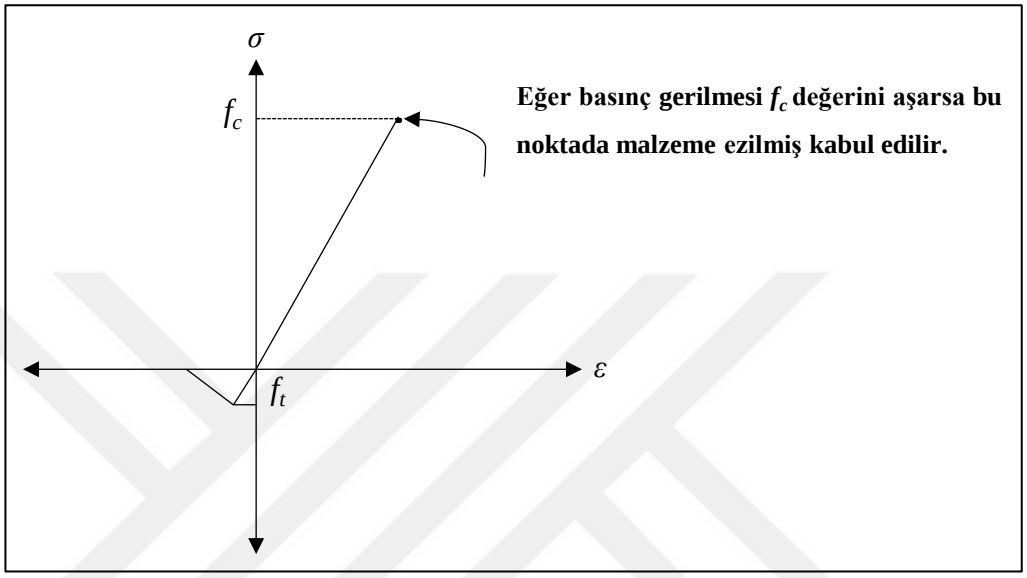
Şekil 7.3. William Wranke malzeme modeli göçme eğrisi (Kazaz 2010)

Malzeme modeli, beton malzemede ani ve gevrek bir göçme durumunu beklemektedir. Bu göçme durumları, çatlama, kırılma durumlarındaki göçmeleri içermektedir. Eğer, bu göçme durumu çok eksenli olursa;

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0 \qquad (7.1)$$

bağıntısı yeni göçme kriterini ifade etmektedir. F ,üç eksendeki asal gerilmeler yani σ_{xp}, σ_{yp}, σ_{zp}, durumlarını ifade eden genel bir fonksiyonu, f_c eksenel basınç mukavemetini, S beton malzemedeki beş adet parametrenin yanında asal gerilme parametreleriyle kırılma yüzeyini ifade etmektedir. Bu beş parametre, eksenel basınç mukavemetine ek olarak malzemenin tek eksenli çekme mukavemetini (f_t,), malzemenin tek eksenli basınç mukavemetini(f_c,) iki eksenli basınç mukavemetini (f_{cb}) hidrostatik gerilme durumunda iki ve tek eksenli basınç durumu için basınç mukavemetlerini (f_1, f_2) içermektedir. Kırılma yüzeyi ve hidrostatik gerilme durumunu belirtmek bu parametreler gereklidir ancak kırılma düzeyi için sadece f_t, ve f_c parametreleri de yeterlidir. Diğer parametreler, bu iki parametre üzerinden kabul esasıyla belirlenmektedir. Malzemede ezilme ve çatlamanın aynı anda meydana gelmesi için Denklem 7.1'deki şart sağlanmalıdır. Şart sağlanmadığı takdirde, asal gerilmelerin en az biri çekme durumunda malzeme çatlarken, bütün asal

gerilmelerin basınç olması durumunda ise malzeme ezilecektir. Bu malzeme modeli, plasitisite davranış ilkesinden ayrı tutulduğu takdirde, betonun kırılma davranışı doğrusal bir şekilde gerçekleşir ve malzeme ilk göçme anına ulaştığı anda kırılma gerilmesi eleman rijitliğini azaltır (Kazaz 2010). William Warnke tek eksenli gerilme hali Şekil 7.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.4. William Warnke tek eksenli gerilme hali (Kazaz 2010)

Literatürde deneysel çalışmalarla desteklenen çalışmalar ele alındığında SOLID65 elemanı ile William-Wranke malzeme modelinin, yığma duvarların ANSYS Mechanical (2016) yazılımında modellemelerinde kullanılmalarının uygun olduğu belirtilmiştir. William-Warnke modelinin, tek eksenli gerilme yaklaşımının yığma duvarlarda kullanıma uygun olması, deneysel analizler yardımıyla yığma duvar düzlem iç ve dış davranışlarının doğrulanması ve malzeme modeli ile elemanın her iki yükleme türü için de uygun olması, bu modeller kullanarak yapılan teorik duvar yıkılma analizlerinin, deneysel yıkılma mekanizması ile örtüşmesi, 0,50 MPa eksenel gerilme ve altında duvar davranış analizlerinin, doğru ve güvenilir sonuç vermesi gibi nedenlerden dolayı yığma duvar modellemesinde, SOLID65 elemanı ve William-Wranke göçme kriteri kullanılmıştır (Kocaman 2022).

Sonlu eleman modeli oluşturma aşamalarından sonra diğer aşama cami duvar mekanik özelliklerinin belirlenmesi işlemidir. Yapıların duvar mekanik özelliklerinden kastedilen yapıların duvar basınç mukavemeti ve duvar elastisite modülleridir. Bu

mekanik özellikler, tahribatlı ya da tahribatsız yöntemler kullanılarak elde edilir ve hesaplanan bu değerler yapısal analizlerde kullanılır. Tarihi yapılarda duvar mekanik özelliklerini belirlemek oldukça güç ve zor bir iştir. Sadece tahribatlı yöntem kullanma sınırlamasından değil, tahribatsız yöntemler kullanıldığında dahi bazı güçlükler yaşanmaktadır. Örneğin, bir tarihi yapıda tek bir taş malzeme türü kullanılsa dahi malzemelerin farklı jeolojik formasyonlardan getirilmesinden dolayı farklı duvar mekanik özellikleri hesaplanmaktadır. Ayrıca her bağımsız bölümde aynı taş malzemenin kullanılması dahi farklı duvar mekanik özelliklerine neden olmaktadır. Farklı taş türlerinin bir arada kullanıldığı tarihi yapılarda da farklı duvar mekanik özellikleri hesaplanması gerekmektedir. 2018 yılında yayımlanan "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY) (2018), yığma yapılar için duvar elastisite modülünün, duvar basıncının 750 katı olacak şeklinde hesaplanması gerektiği belirtilmiştir. Geniş çaplı bir literatür araştırması yapıldığında duvar mekanik özelliklerinin hesaplanması için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar deney türü, duvar inşa türü, vb., bir sürü parametre ve yönetmelikler ışığında ele alınmıştır. Deney yapılamayan durumlarda ise kabuller yolu tercih edilmiştir. Bütün bu çalışmaların ortalaması alındığında duvar basınç mukavemetinin 3 MPa, duvar elastisite modülü için ise 600-2.250 MPa arasında olduğu görülmüştür (Kocaman 2022).

Bu aşama tamamlandıktan sonra yapıların dinamik davranış parametrelerini belirleme aşamasına geçilmiştir. Duvar mekanik özellikleri camilerin sonlu eleman modellerine tanımlandıktan sonra camilerin teorik mod şekilleri ve modal frekans değerleri elde edilmiştir. Daha sonra bu modellerdeki mod şekilleri baz alınarak, camiler üzerinde tahribatsız deney yöntemlerinden biri olan OMA yöntemi kullanılarak camilerin yerinde dinamik davranış parametreleri belirlenmiştir. Bu yöntem ile sonlu eleman modellerinde gerçekleştirilen teorik modal analizlerin deneysel olarak doğrulanması amaçlanmıştır. Bu doğrulama aşamasından sonra cami sonlu eleman modelleri üzerinde duvar mekanik özelliklerinin deneysel dinamik davranış parametrelerini tam olarak yansıtması için sonlu eleman model kalibrasyon işlemleri yapılmıştır.

Yukarıda bahsedilen tüm aşamalar, tez çalışmasında bahsedilen 9 cami için sırasıyla yapılmıştır. Bu bölümde her cami için önce cami bilgileri, camilerin özellikleri, deprem hasarları, restorasyon geçmişleri, vb. durumları bahsedilmiştir. Daha sonra

camilerin sonlu eleman modellemeleri ve bu modellerde teorik modal analizlerden gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşamada, camilerin deneysel dinamik davranış parametreleri belirlenmiştir. Dördüncü aşamada ise camilerin teorik modal analizleri ile OMA sonuçları karşılaştırılmış, camilerin sonlu eleman modellerinde sonlu eleman model kalibrasyon işlemleri yapılmıştır. Tez çalışmasının devam eden bölümünde bu aşamalardan detaylı bir şekilde bahsedilmiştir. Sonlu eleman modellerinin oluşturulması için gerekli rölevelerin temini ve camilerin yerinde dinamik davranış parametrelerinin belirlenmesi için gerekli çalışma izni çalışma için Kültür ve Turizm Bakanlığı Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden yazılı izinler alınmıştır. Bu izin yazısı tez çalışmasının EKLER bölümüne eklenmiştir.

7.1. Pervizoğlu Camii

Pervizoğlu Camii, Erzurum ili Yakutiye İlçesi Ayazpaşa Caddesi üzerinde bulunan tarihi bir camidir. Yapının tarihçesi hakkında literatürde net bir tarih belirtilmemekle birlikte; caminin inşa yılının 1715 yılında vakıf kayıtlarına bulunması nedeniyle bu yılda yapıldığı kabul edilmektedir. Camiyi inşa edenin Pervizoğlu Mehmet Efendi olduğu vakıf kayıtlarına geçmiştir (Konyalı 1960). Şekil 7.5.'te caminin genel görünümü, Şekil 7.6.'da ise caminin konumu gösterilmiştir.



Şekil 7.5. Pervizoğlu Camii



Şekil 7.6. Pervizoğlu Camii konumu (Anonim 2022b)

Cami, yapıldığı yıllarda caminin dışında üç adet medrese bulunmaktadır; ancak farklı zamanlarda gerçekleşen imar hareketleri nedeniyle bu yapılar günümüze kadar ulaşamamıştır. Sadece caminin hemen sol bitişiğindeki küçük medrese odası bugüne ulaşmıştır (Konyalı 1960). Cami dikdörtgen biçiminde bir plana sahip olup boyu 10,74 m eni 14,55 m'dir. Camii tek merkezi kubbeye sahip olup, bu kubbeyi 8 adet kemerli sütun taşımaktadır. Kubbenin cami tabanından yüksekliği 9,50 m, kemerlerin cami tabanından yüksekliği 5,30 m'dir. Cami düzgün bir biçimde kesilmiş büyük kesme bazalt taşlarından inşa edilmiştir. Camide kullanılan harç kireç bağlayıcı esaslı Horasan harcıdır. Caminin iç görünümü Şekil 7.7.'de, caminin son cemaat yeri ise Şekil 7.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.7. Pervizoğlu Camii iç görünüşü



Şekil 7.8. Pervizoğlu Camii girişi

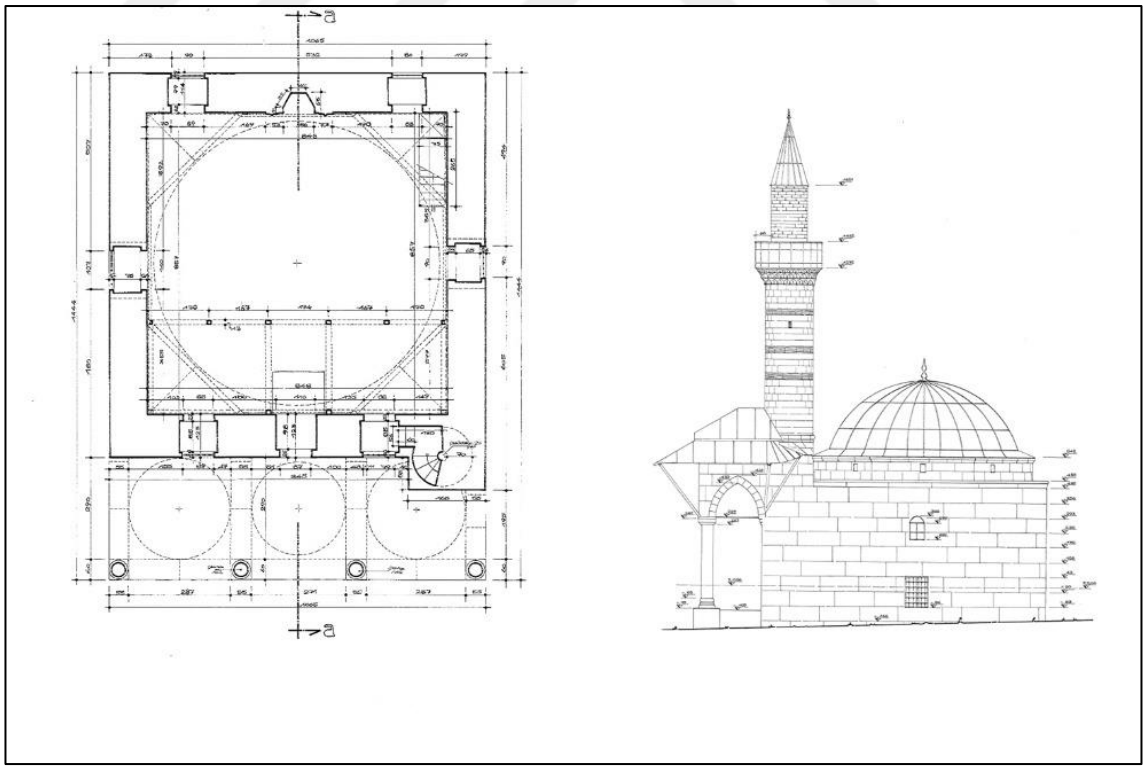
Camide, iki adet son cemaat yerinde, iki adet mihrap duvarında, sağ ve sol duvarlarda da birer adet olmak üzere toplam 6 pencere bulunmaktadır. Bu pencerelere ek olarak sağ ve sol duvarlarda, mahfil hizasında olmak üzere birer adet küçük pencere bulunmaktadır. Pencerelerin genişlikleri ortalama 1 m, yükseklikleri ise ortalama 1,35 m'dir. Cami duvar kalınlıkları sağ ve sol duvarlarda 1,22 m, kapı girişinde 1,42 m, mihrap duvarında 1,22 m'dir. Camide bir adet minare bulunmaktadır. Cami minaresi caminin kuzeybatısına konumlandırılmıştır. Caminin gövdesi şerefeye kadar cami duvarlarıyla aynı malzemeden inşa edilmiştir. Cami külahında yapı malzemesi olarak tuğla kullanılmıştır.

Pervizoğlu Camii'nin 2 Haziran 1859 depreminde hasar aldığı kaynaklarda belirtilmiştir. Rus Bilimler Akdaemisi üyesi Alman jeolog Hermann von Abich'in raporlarına göre Pervizoğlu Camii depremde yarı yarıya hasar almıştır ve cami kubbesi depremde yerinden hareket ederek kaymıştır. Sonraki artçı depremlerde kubbe tekrar eski yerine geri gelmiştir (Taşkesenlioğlu ve Taşkesenligil 2020). Bu bilgilerden caminin 2 Haziran 1859 depreminde temel olarak kubbe tarafından hasar aldığı kabulü yapılmaktadır.

7.1.1. Pervizoğlu Camii teorik modal analiz uygulaması

Bu bilgilerin ardından Pervizoğlu Camii'nin yapısal analize esas sonlu eleman modelinin oluşturulma aşamasına geçilmiştir. Sonlu eleman modelleme aşamasında ilk önce yapı yerinde incelenmiştir. Yapı yerinde incelenerek yapının boyutları yerinde belirlenmiştir. Eğer yapının bir rölevesi yoksa, yapının rölevesi bu ölçümlerle oluşturulmuştur. Daha sonra yapının duvar mekanik özellikleri belirlenmiştir. En sonunda yapının sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan sonlu eleman modeli üzerinde teorik modal analizler yapılarak, modal davranış parametreleri hesaplanmıştır.

Bu yöntem sıralamasının ardından Pervizoğlu Camii üzerinde önce keşif çalışması yapılmıştır. Caminin ölçüleri ve malzeme özellikleri belirlenmiştir. Pervizoğlu Camii'nin yapı boyutları yerinde ölçülmüştür. Bu boyutlar, Pervizoğlu Camii'nin cami rölevesinde belirtilen boyutları ile karşılaştırılarak caminin nihai boyutları belirlenmiştir. Pervizoğlu Camii'nin rölevesi Şekil 7.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 7.9. Pervizoğlu Camii rölevesi

Tarihi yığma yapılar üzerinde duvar mekanik özelliklerini belirlemek için tahribatsız deney yöntemleri kullanılmıştır. Tahribatlı deneylerin yapılarda verdiği hasar nedeniyle tarihi yapılarda bu yöntemler tercih edilmemektedir. Bu sebeple, Pervizoğlu Camii üzerinde duvar malzeme özelliklerinin belirlenmesi için tahribatsız deney yöntemleri kullanılmıştır. Tahribatsız deney yöntemlerinin en bilinen ve en kolay yöntemlerinden biri beton Schmidt çekici yöntemidir. Schmidt çekici, beton malzemenin eksenel basınç mukavemetini belirlemedeki yöntemlerden biridir. Beton malzeme yüzeyine uygulanan Schmidt çekicinin içindeki yayın sıkışması sonucunda çekicin zımba kısmı beton malzemenin yüzeyine çarpıp geri tepmektedir. Bu geri tepme sonucunda beton malzemenin yüzey sertlik değeri belirlenir. Daha sonra çekiç üzerindeki kalibrasyon eğrileri yardımıyla betonun yaklaşık eksenel basınç mukavemeti belirlenebilmektedir. Benzer bir çekiç türü doğal kayaçlar için de yapılmıştır ancak hem maliyet yüksekliği hem de her laboratuvarda bulunmama durumu büyük bir dezavantajdır. Bu nedenle, beton Schmidt çekicinin doğal taşların mekanik özelliklerini belirlemede kullanılma durumu sorgulanmıştır. Beton malzemede tutarlı bir şekilde bulunabilen basınç mukavemetleri, doğal taşlarda aynı sonucu vermemektedir. Bu durum nedeniyle beton Schmidt çekici sertlik değeri ile, doğal taşların basınç mukavemetine ulaşılabilecek bir eşitlik üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Özdoğan (2018), çalışmasında, eğer doğal bir taşın türünün andezit ya da bazalt olduğunu bilinir ve bu taşlar üzerinde beton Schmidt çekici yatay bir şekilde uygulanırsa taşların basınç mukavemetlerinin;

Andezit için; $f_c = 1{,}01 * (R_h)^{0.97}$ (7.2)

Bazalt için ; $f_c = 0{,}00012 * (R_h)^{3.43}$ (7.3)

bağıntıları ile hesaplandığını belirtmiştir. Burada f_c taş basınç mukavemetini, R_h ise yatay şekilde uygulanan beton Schmidt çekicinden elde edilen sertlik değerini ifade etmektedir.

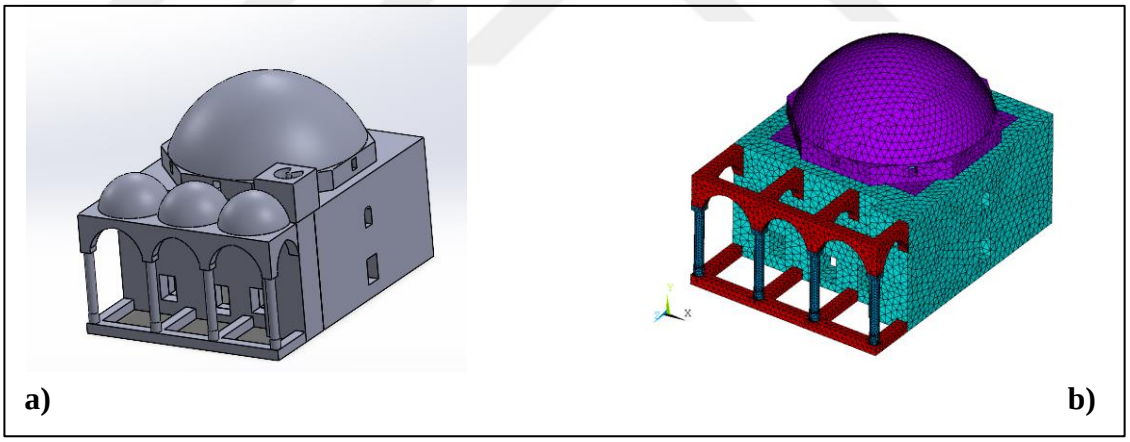
Yığma bir duvarın, inşa edildiği taş malzeme ve bağlayıcı olarak kullanılan harç numunesinin eksenel basınç dayanımı bilindiği takdirde, yığma duvarın duvar mekanik özellikleri olan duvar basınç mukavemeti ve duvar elastisite modülü hesaplanabilmektedir. Eurocode 6 (1995) yönetmeliğinde, bir yığma duvarın basınç mukavemeti ve elastisite modülü;

$$f_k = K.\, f_b^{\alpha}.\, f_m^{\beta} \tag{7.4}$$

$$E = 200\, f_k \tag{7.5}$$

bağıntılarıyla hesaplanabilmektedir. f_k yığma duvar basınç mukavemetini, f_b yığma duvarın inşa edildiği taş ya da başka bir malzemenin basınç dayanımını, f_m duvar inşasında kullanılan harcın basınç mukavemetini ifade etmektedir. K değeri, duvarın morfolojik yapısına göre değişen, 0,4 ile 0, 6 değerleri arasında bulunan sabit bir sayıdır. α ve β ise, duvar biçimiyle ilişkili sabitler olup, eğer duvar düzgün bir biçimde örülmüşse sırasıyla 0,70 ve 0,30, eğer duvar yığma bir şekilde örülmüşse 0,65 ve 0,25 değerlerini almaktadır (Özdoğan 2018).

Bu bilgiler verildikten sonra, önce Pervizoğlu Camii'nin Solidworks (2022), yazılımında sonlu eleman modeli oluşturulup ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Sonlu eleman modelleri Şekil 7.10.'da gösterilmiştir.



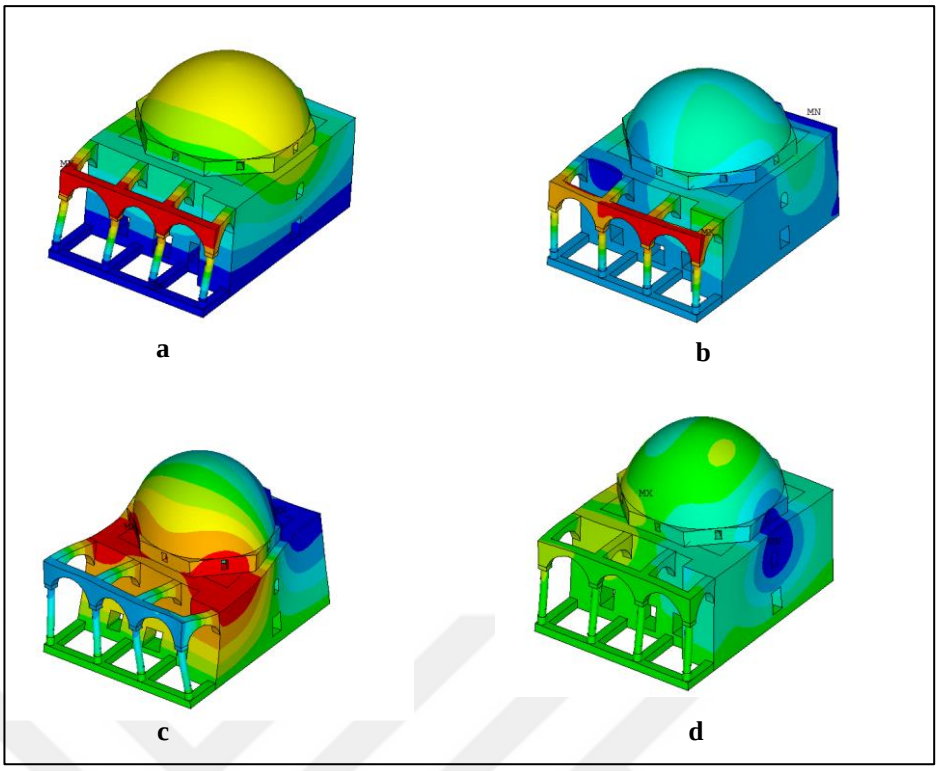
Şekil 7.10. Pervizoğlu Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli

Solidworks (2022) yazılımında oluşturulan model ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmadan önce Workbench (2016) sonlu elemanların, küçük sonlu elemanlara bölünme işlemi ağlama (mesh) işlemi yapılmıştır. Cami elemanları, 40-45 cm boyutunda sonlu küçük elemanlara ayrılacak şekilde ağlama işlemi yapılmıştır. Her bir ağlama sonucunda oluşan küçük elemanlar boyut olarak tetra (onlu) eleman şeklindedir.

Pervizoğlu Camii, tek bir malzemeden bazalttan imal edilmiştir. Bu durumda Özdoğan (2018)'de belirtilen bazalt taşı için beton Schmidt çekici kullanarak oluşturduğu basınç mukavemeti bağıntısı kullanılmıştır. Caminin bütün dış duvarlar yüzeyine uygulanan beton Schmidt çekici sonucunda bazaltın yüzey sertlik değeri ortalama 27 olarak elde edilmiştir. Bu değer, Denklem 7.3'teki bağıntıda yerine yazıldığında, ortalama taş basınç mukavemeti yaklaşık 9,87 MPa olarak hesaplanmıştır. Yapı inşasında bağlayıcı harç olarak Horasan harcı kullanılmıştır. Horasan harcı kireç esaslı bağlayıcı bir harçtır. Dayanımı oldukça düşük olan bu harcın basınç mukavemeti deneysel olarak 1,15 MPa hesaplanmıştır (Özdoğan 2018). Taş ve harç basınç mukavemetleri bilindikten sonra duvar mekanik özellikleri Denklem 7.4 kullanılarak hesaplanmıştır. K değeri 0,5, duvarlar düzgün bir örülme şekli ile örüldüğü için α ve β değerleri 0,7 ve 0,3 olarak alınmıştır. Bu denklem yardımıyla duvar basınç mukavemeti ortalama 2,58 MPa olarak hesaplanmıştır. Duvar elastisite modülü de Denklem 7.5. kullanılarak bu değerin 200 katı yani 516 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, caminin sonlu elemanlar modeline duvar elastisite modülü değeri olarak girilmiştir. Kemerler için de aynı elastisite modülü değeri girilmiştir. Kubbe için ise 1000 MPa elastisite modülü değeri girilmiştir. Sütunların taş türü bilinememiştir. Sütunlar andezit olarak kabul edilmiştir. Sütunların ortalama Schmidt sertlik değeri 30 olarak elde edilmiştir. Denklem 7.1 kullanılarak taşın basınç mukavemeti yaklaşık 28,06 MPa olarak hesaplanmıştır. Duvar basınç mukavemeti 5,40 MPa, duvar elastisite modülü değeri 1080 MPa olarak hesaplanmıştır. Elastisite modülü değerleri girişi tamamlandıktan sonra cami üzerinde teorik modal analiz yapılmıştır. Teorik modal analiz sonuçları Çizelge 7.1.'de gösterilmiştir. Caminin teorik mod şekilleri Şekil 7.11.'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.1. Pervizoğlu Camii teorik modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (x yönünde)	4,795
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (y yönünde)	5,132
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (z yönünde)	8,275
4	Kubbenin düşey yer değiştirme hareketi	10,433



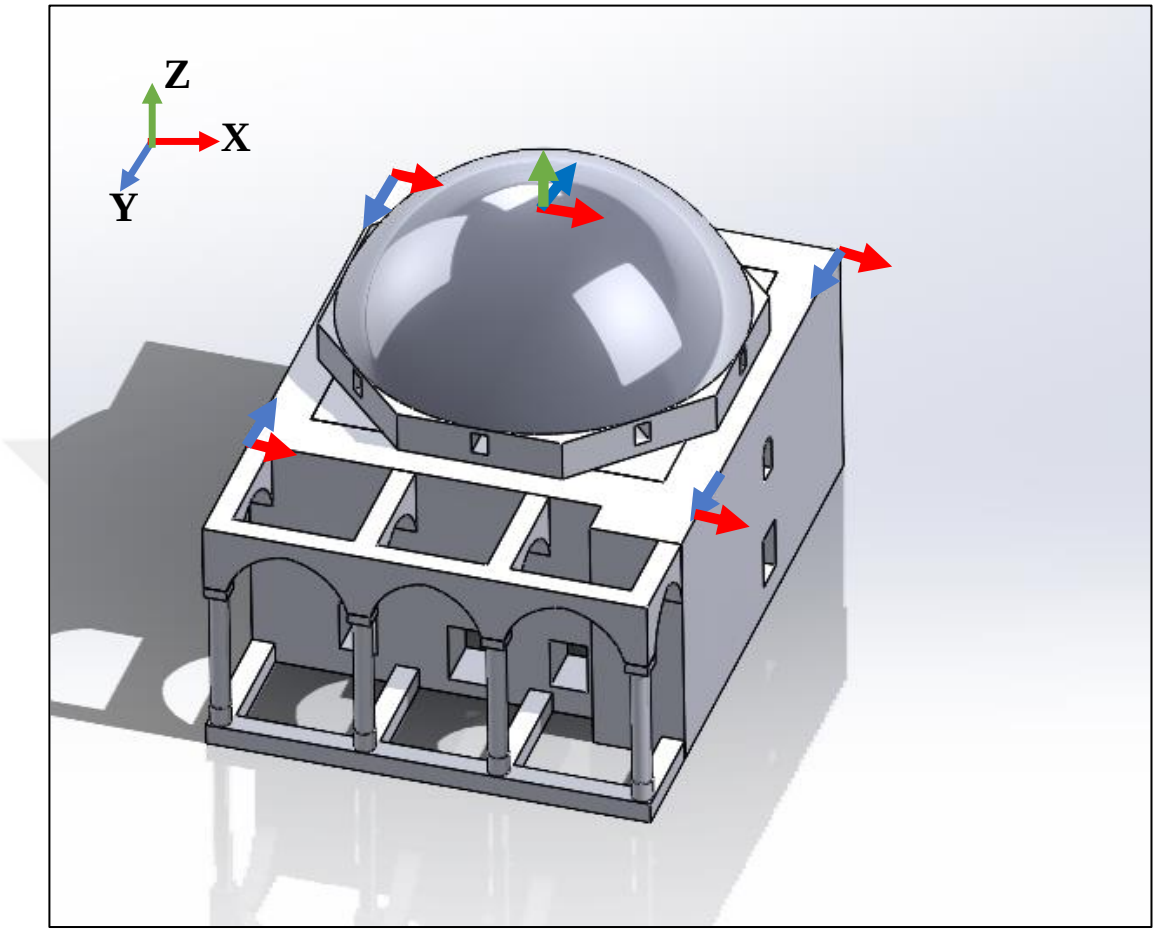
Şekil 7.11. Pervizoğlu Camii a) x yönde öteleme b) y yönünde öteleme c)burulma d) kubbe düşey hareketi.

Caminin sonlu eleman modelinde kısa doğrultu x yönü, uzun doğrultu y yönü, düşey doğrultu ise z yönü olarak ifade edilmiştir. Caminin teorik modal analiz sonuçlarına göre, caminin gövde ilk modu kısa doğrultuda (x yönü) yatay öteleme hareketi, ikinci modu uzun doğrultuda (y yönü) yatay öteleme hareketi olarak elde edilmiştir. üçüncü modda düşey eksen (z yönü) etrafında yanal burulma hareketi, dördüncü modda ise kubbenin düşey hareketi elde edilmiştir. Bu sonuçlardan hareketle cami operasyonel modal analiz uygulaması için, cami köşelerine ve cami kubbesine sensör yerleştirme sonucuna ulaşılmıştır.

7.1.2. Pervizoğlu Camii operasyonel modal analiz uygulaması

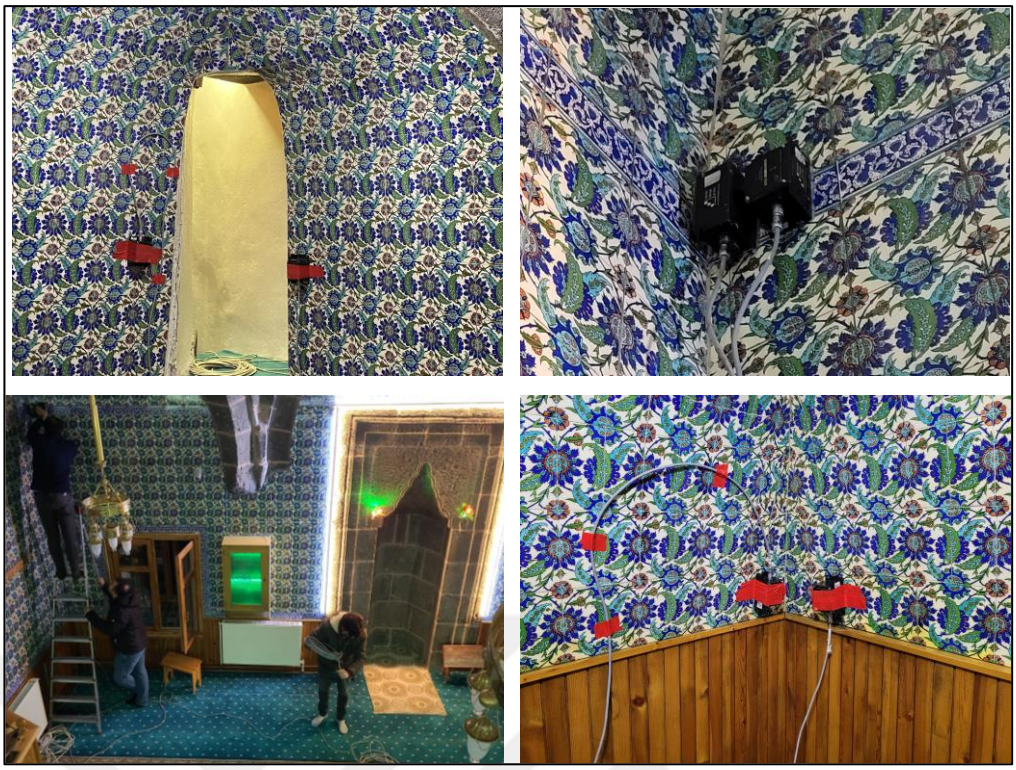
Yapının çevresel etkilere karşı titreşim periyotlarının belirlenmesi ve mod şekillerinin elde edilmesi yani yapının yerinde dinamik davranış parametrelerinin belirlenmesi için yapı üzerinde OMA uygulaması yapılmıştır. Cami içindeki ivmeölçer yerleşimi, ilk teorik modal analizdeki mod şekilleri baz alınarak yapılmıştır. İvmeölçerler yetersiz kablo uzunluğu, iklim şartlarından cihazların olumsuz etkilenmemesi gibi nedenlerden ötürü cami içine yerleştirilmiştir.

Pervizoğlu Camii cami içi ivmeölçer yerleşim krokisi Şekil 7.12.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.12. Pervizoğlu Camii cami içi ve kubbe ivmeölçer yerleşim krokisi

Cami içine 8 adet tek eksende ivme kaydı alan tek eksenli kablolu ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Cami teorik modal analiz sonuçları incelendiğinde ilk üç mod şeklinde cami gövdesinin düşey hareketine dair bir mod şekline rastlanmadığı için düşey yönde titreşim kaydı alınmamıştır. İvmeölçerlerin yerleştirilmesi işleminde yapıya herhangi bir hasar vermeden yerleştirilmesi ve sökülmesi en önemli hususdur. İvmeölçerleri sabitleme işleminden önce, yön ve doğrultu belirleme işlemleri yapılması gerekmektedir. Caminin kuzey-güney aksı yani kapı-mihrap aksı y yönü, doğu-batı yani yan duvarlar aksı ise x yönü olarak tayin edilmiştir. Yön tayinlerinden sonra 8 adet tek eksenli ivmeölçer, cami duvarlarına sıcak silikon ile yapıştırılmıştır ve ivmeölçerlerin üstü güçlü bant ile yapıştırılarak herhangi bir düşmeye karşı güçlendirilmiştir. Cami içi ivmeölçer yerleşimi Şekil 7.13.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.13. Pervizoğlu Camii cami içi ivmeölçer yerleşimi

Sensör yerleştirme işlemi sadece cami içiyle sınırlı kalmamıştır. Cami kubbesinin, teorik modal analiz sonucunda düşey yönde (z yönünde) bir mod hareketi elde edilmiştir. Bu sonuç baz alındığında, kubbe düşey hareketi beklenen bir hareket olduğu için cami kubbesine de ivmeölçer yerleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Cami kubbesi üzerine üç eksenli ivmeölçer yerleştirilmiştir. İvmeölçer üzerindeki yön işareti güney yönünü gösterecek şekilde ivmeölçer cami kubbesine konumlandırılmıştır ve çabuk donan alçı yardımıyla sabitlenmiştir. Cami kubbesi için kubbe yerleşim krokisi ve ivmeölçer yerleşimi Şekil 7.14.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.14. Pervizoğlu Camii ivmeölçerin kubbeye sabitlenmesi

İvmeölçerlerin, caminin tüm bölümlerinde sabitleme işleminin tamamlanmasının ardından, ivmeölçerler özel veri kabloları yardımıyla veri toplama sistemine bağlanmıştır. Veri toplama sistemi Şekil 7.15.'te gösterilmiştir. Veri toplama sistemi 16 kanallı, taşınabilir dinamik bir veri toplama sistemidir. Veri kaydı için Testlab Network (2019) adlı yazılım kullanılmıştır (Okuyucu 2020). Her kablo, sensör için önceden belirlenen kanal numarasına yerleştirilmiştir. İvmeölçerler veri toplama sistemine bağlandıktan sonra her cihazın kendine ait kalibrasyon çarpanı veri toplama sistemine girilmiştir. Daha sonra kayda başlamadan önce rastgele kısa süreli bir kayıt alınıp ivmeölçerlerde veya kablolarda herhangi bir sıkıntı olup olmadığı kontrol edilmiştir.

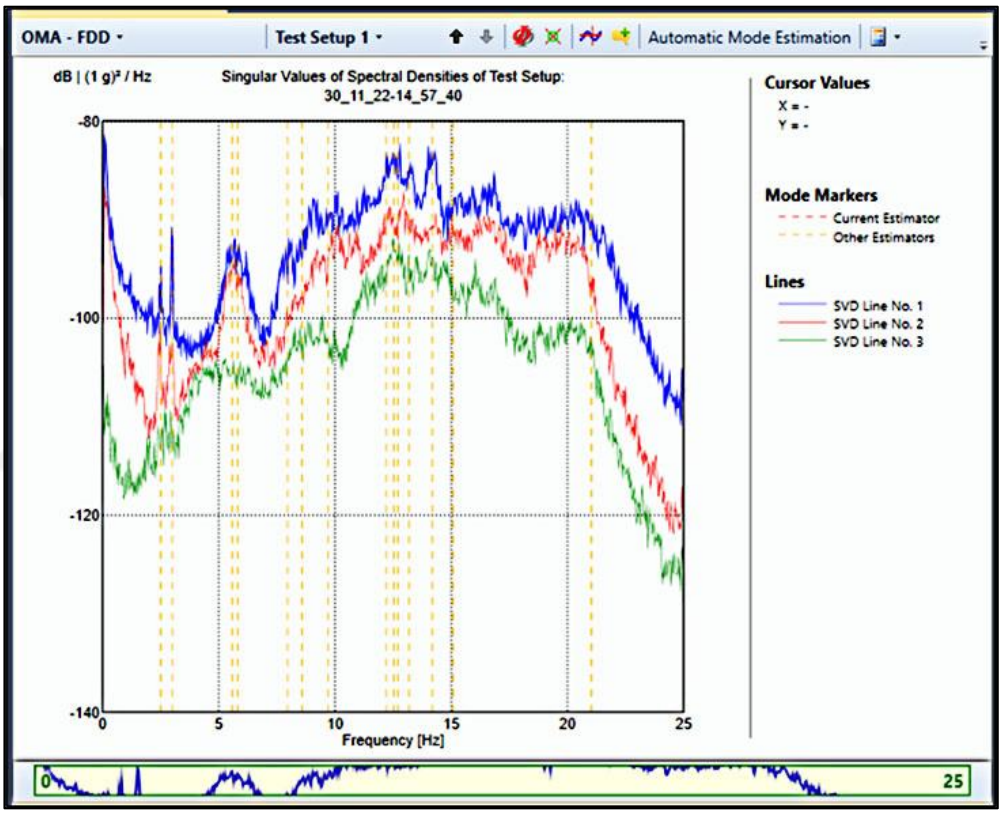


Şekil 7.15. Pervizoğlu Camii veri toplama sistemi kurulumu

Gerekli kontrollerin ardından kayıt alma işlemine geçilmiştir. Kayıt süresi için çeşitli öneriler olmakla birlikte yapının en düşük mod şeklindeki periyot değerinin 500 katı sürece kayıt ölçümü alınması tavsiye edilmektedir (Okuyucu 2020). Tüm bu değerlendirmelerin, ardından 3 adet 100 Hz'lik ve 3 adet 200 Hz'lik olmak üzere 6 adet ivme kaydı alınmıştır. İvme ölçüm birimi g'dir. Cami, konumu itibariyle araç sürekliliği bakımından yoğun bir bölgededir. Bu yoğunluk nedeniyle cami sürekli çevresel titreşim

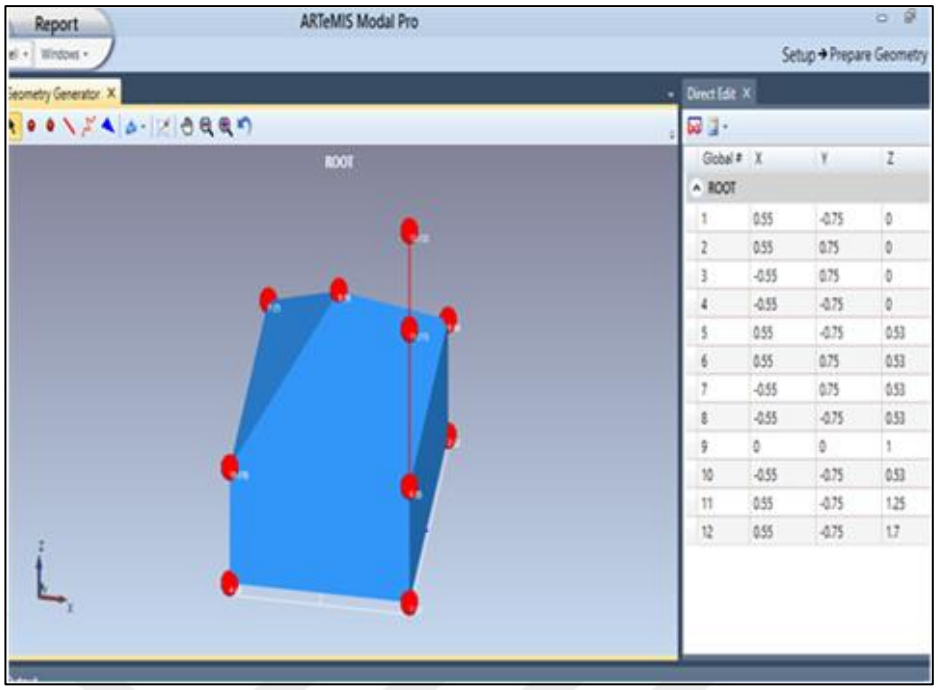
etkisi altındadır. Bu titreşime ek olarak, caminin duvarlarında plastik tokmakla vurularak yapay titreşimler verilmiştir.

Kayıt alma işlemi tamamlandıktan sonra veriden caminin deneysel mod şekillerini ve bu mod şekillerine karşılık gelen deneysel modal frekans değerlerini elde etmek için işlenme aşamasına geçilmiştir. Artemis Modal Pro (2023) yazılımı kullanarak caminin deneysel mod şekilleri ve modal frekansları elde edilmiştir. Artemis Modal Pro yazılımı ekran görüntüsü Şekil 7.16.'da gösterilmiştir.



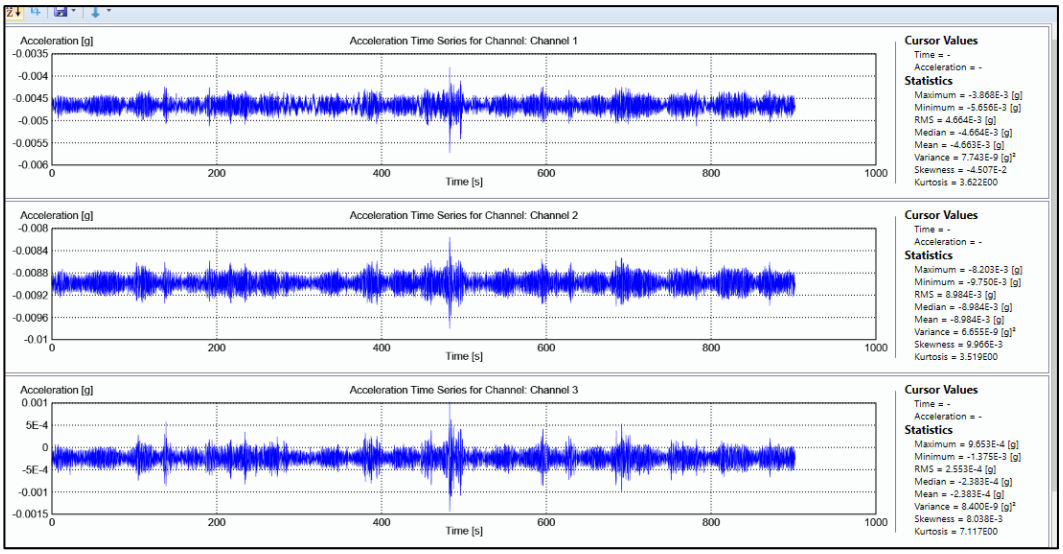
Şekil 7.16. Artemis Modal Pro yazılım ekran görüntüsü

Verinin yazılımda işlenme süreci birkaç aşamadan oluşmaktadır. Yazılımda veri dönüştürülmeden önce ölçüm alınan ilgili yapının temsili bir geometrisi oluşturulur. Pervizoğlu Camii'nin yazılımdaki temsili geometrisi Şekil 7.17.'de gösterilmiştir.

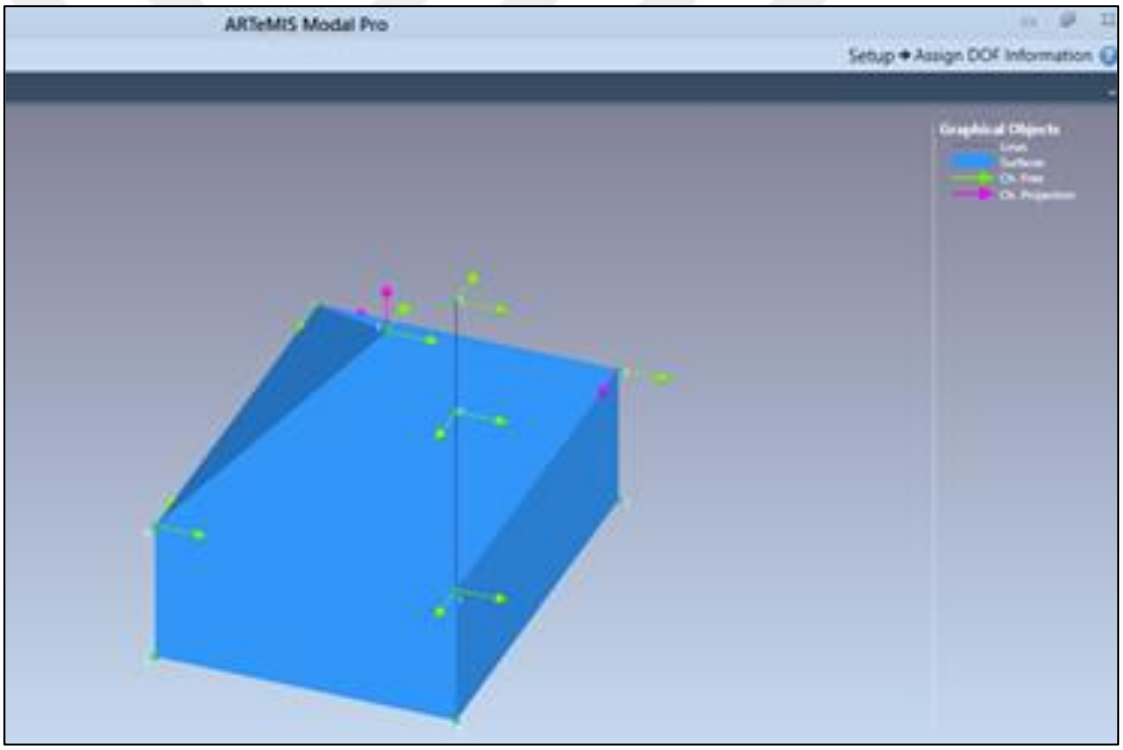


Şekil 7.17. Pervizoğlu Camii opersyonal modal analize esas geometrisi

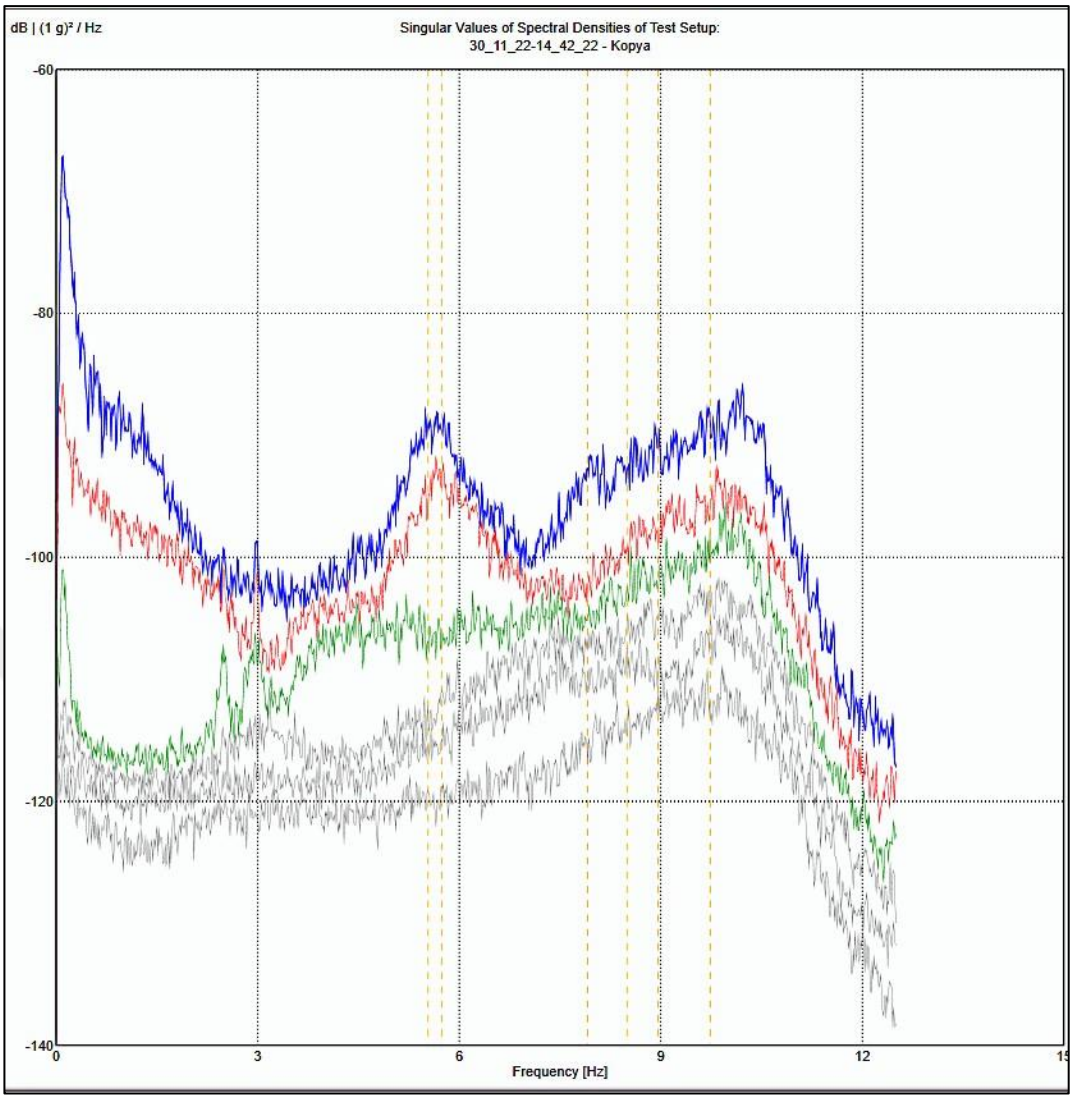
Bu model analize esas model olarak da adlandırılmaktadır (Özdoğan 2018). Daha sonra veri toplama sisteminde her bir ivmeölçerden alınan titreşim kayıtları, bu yazılımda ivme-zaman grafiklerine çevrilir. Pervizoğlu Camii ivme-zaman grafikleri Şekil 7.18.'de gösterilmiştir. Kayıt setinin kayıt frekansı kontrol edilmiştir. Bu aşamadan sonra yapı köşelerine yerleştirilen ivmeölçerler, yazılımdaki geometrilerine de ölçüm anındaki doğrultuları bire bir aynı olacak şekilde tanımlanır. Pervizoğlu Camii'nin ivmeölçerlerin yönlerinin yazılımda tanıtılması Şekil 7.19.'da gösterilmiştir. İvmeölçerlerin yönlerinin tanıtılmasının ardından veri analizleri yapılmıştır. Pervizoğlu Camii'nin analizdeki spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 7.20.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.18. Pervizoğlu Camii titreşim kayıtlarının ivme-zaman grafiklerine dönüşümü



Şekil 7.19. Pervizoğlu Camii ivmeölçerlerin ve yönlerinin geometrik modele tanımlanışı



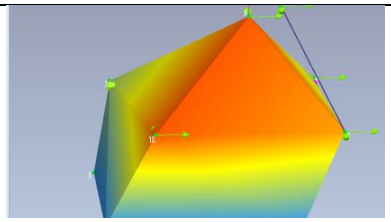
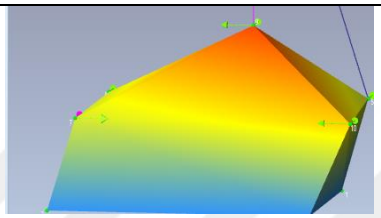
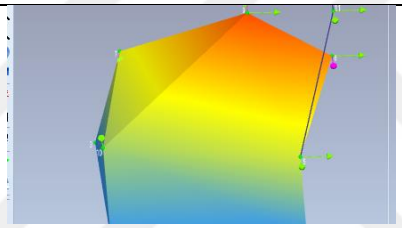
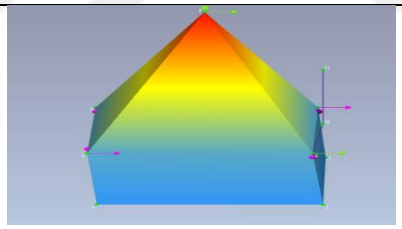
Şekil 7.20. Pervizoğlu Camii spektral yoğunluk fonksiyonu

Yazılımda farklı teknikler ile çözümlemeler mevcuttur. Temel algoritma olarak frekansın değişken olduğu frekans tanım alanında ve zamanın değişken olduğu zaman tanım alanında Fourier dönüşümlerine dayalı matematiksel denklemler mevcuttur (Erkmen 2022). Mevcut olan yöntemler frekansın değişken olduğu Frekans Alanında Ayrıştırma (FDD), Geliştirilmiş Frekans Alanında Ayrıştırma (EFDD), Eğri Uyumlu Frekans Alanı Ayrışması (CFDD) ve zamanın değişken olduğu Stokastik Alt Alan Tanımlama (SSI-UPC ve SSI-UPCX) yöntemleridir.

Çalışmada literatürde son zamanlarda sıklıkla kullanılan zaman alanında tanım yöntemi olan SSI-UPCX analiz yöntemiyle analizler yapılmıştır. Pervizoğlu Camii'nde ölçülen titreşim kayıtları, Artemis Modal Pro yazılımı kullanılarak yapının deneysel mod

şekilleri ve modal frekans değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 7.2.'de gösterilmiştir.

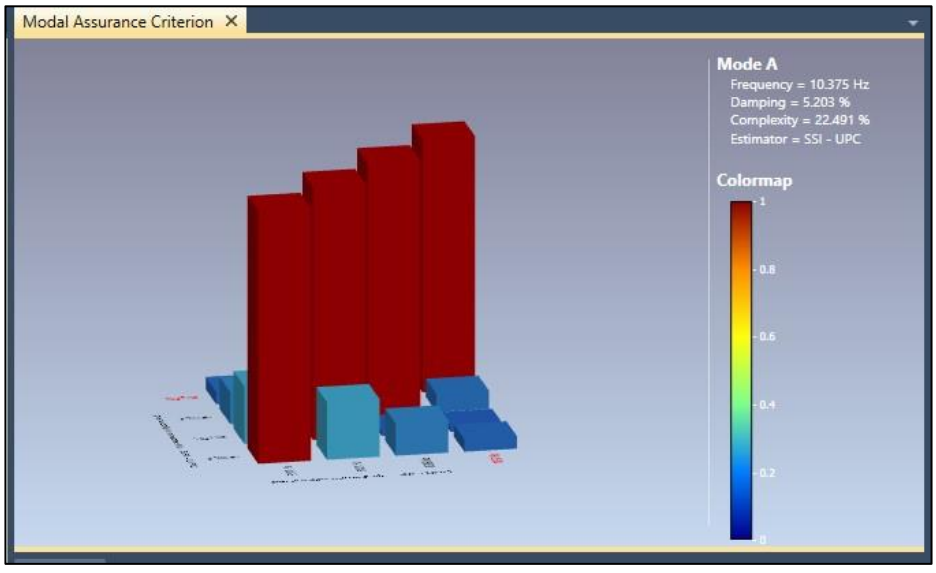
Çizelge 7.2. Pervizoğlu Camii OMA Sonuçları

Mod Şekli	**Frekans (Hz)**	
Kısa doğrultuda (x yönünde) öteleme hareketi		5,595
Uzun doğrultuda (y yönünde) yatay öteleme hareketi		5,767
Düşey eksen (z yönünde) etrafında burulma hareketi		8,038
Kubbe düşey yönlü (z yönünde) hareket		10,385

OMA sonuçları incelendiğinde, cami modunun ilk iki modu minare modlarıdır. Minarenin dinamik davranış parametreleri, cami modal davranışından bağımsızdır. Minare modal frekans değerleri, cami gövdesi modal frekans değerlerinden daha düşük frekans değerlerindedir. Bu sebeple, cami modal analiz sonuçlarında minare modları dikkate alınmamıştır. Caminin OMA sonuçları incelendiğinde ilk modu kısa doğrultuda (x doğrultusu) öteleme, ikinci mod uzun doğrultuda öteleme (y doğrultusu), üçüncü mod ise z ekseni etrafında burulma hareketidir. Cami kubbe düşey (z doğrultusu) hareketi, üç temel moddan sonra elde edilmektedir. Caminin deneysel dinamik parametreleri, teorik modal parametrelerle benzer çıkmıştır. Cami OMA sonuçlarında, güneybatı köşesinin

daha fazla zorlandığı ve herhangi bir deprem durumunda bu noktadan hasar almasının olası olduğu sonucu elde edilmiştir.

Deneysel modal analiz sonuçlarının güvenilirliği açısından önemli bir etken MAC (Modal Assurance Criterion) değerleridir. Bu değerler, mod şekillerinin ve modal frekanslarının güvenilirlik ve birbirinden bağımsız olmasının en önemli göstergelerinden biridir. Değerler 0 ve 1 arasında değişmektedir. 1 değeri mod şekillerinin aynı olduğunu; 0 değeri mod şekillerinin ayrık olduğunu ifade etmektedir. Pervizoğlu Camii'nin deneysel modal analiz sonuçlarının MAC değerler grafiği Şekil 7.21.'de gösterilmiştir. Burada istenilen durum, mod şekillerinin MAC değerlerinin 0'a yakın olmasıdır. Böylelikle analiz sonuçlarının birbirinden ayrıklığı kolaylıkla belirlenebilir ve analiz sonuçları daha doğru bir şekilde yorumlanabilir. MAC değerleri tablosu oluşturulurken, yapıdan beklenen temel mod şekilleri dışında olan diğer mod şekilleri silinir. Daha sonra kalan mod şekillerine ait modal frekans değerleri bir kare matris şeklinde oluşturulur. Satırlara ve sütunlara mod şekillerine karşılık gelen modal frekans değerleri yazılır. Matrisin köşegeni, satır ve sütunda aynı frekans değerlerine karşılık gelen hücreler "1" değeri yazılacak şekilde doldurulur. Mod şekillerinin modal analiz sonucundaki diğer mod şekilleriyle etkileşiminden sonucunda ortaya çıkan değerler bu tabloda gösterilir. Pervizoğlu Cami'nin analiz sonuçlarına ilişkin MAC değerleri tablosu Çizelge 7.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.21. Pervizoğlu Camii MAC değerler grafiği

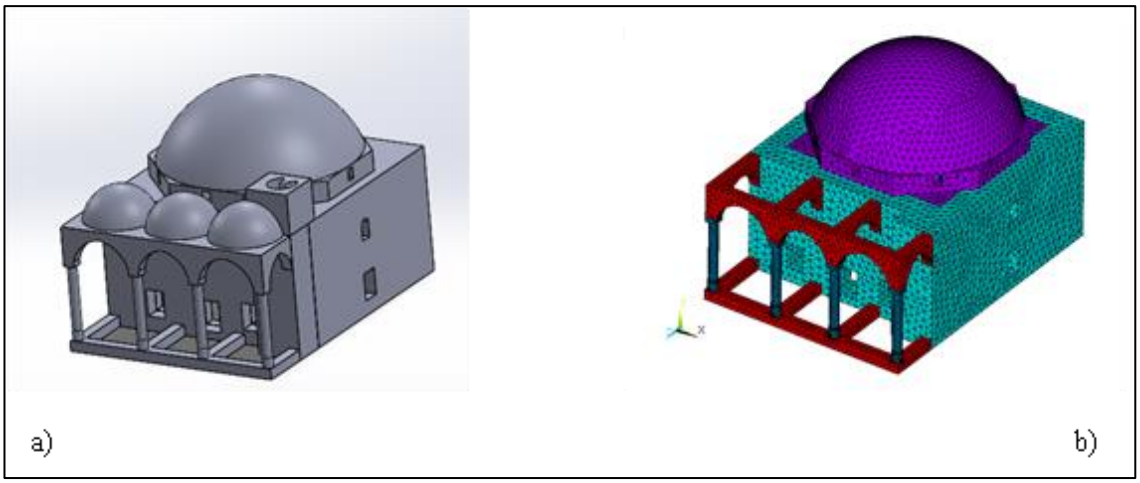
Çizelge 7.3. Pervizoğlu Camii MAC değerleri tablosu

Frekans (Hz)	**5,595**	**5,767**	**8,038**	**10,385**
5,595	1	0,0127	0,0303	0,0303
5,767	0,0127	1	0,0647	0,0358
8,038	0,0303	0,0647	1	0,0691
10,385	0,0303	0,0358	0,0691	1

Çizelge 7.3'teki Pervizoğlu Camii deneysel modal analiz sonuçlarının MAC değerleri incelendiğinde, modlar arasındaki MAC değerlerinin 0'a yakın olduğu görülmüştür. Bu sonuç, mod şekillerinin birbirinden ayrık olduğunu ve deneysel modal analiz sonuçlarının güvenilir olduğunu göstermektedir. Örnek olarak kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi ile uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi arasındaki MAC değerinin 0,01 olduğu görülmüştür. Bütün modların MAC değerleri incelendiğinde bütün modların birbirinden ayrık ve operasyonal modal analizin güvenilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

7.1.3. Pervizoğlu Camii sonlu eleman model kalibrasyon çalışması

Pervizoğlu Camii üzerinde deneysel modal analizin tamamlanmasının ardından sonlu eleman model kalibrasyon aşamasına geçilmiştir. Caminin ilk teorik modal analizi için hazırlanan katı model önce Solidworks yazılımında oluşturulmuştur. Cami minaresi haricindeki cami duvarları, cami kemerleri, kubbesi ve son cemaat yeri bu yazılımla çizilmiştir. Oluşturulan model dinamik analizler için ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Bölüm 7.1.1.'de bu aşamalar detaylı şekilde açıklanmıştır. Pervizoğlu Camii'nin katı modeli ve sonlu eleman modeli Şekil 7.22.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.22. Pervizoğlu Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli

Soidworks (2022) yazılımında oluşturulan cami katı modeli, sınır koşullarının tanımlanması ve modelin küçük elemanlara bölünme işleminin tamamlanması için Workbench (2016) yazılımına aktarılmıştır. Bölüm 7.1.1.'de Pervizoğlu Camii katı modeli üzerinde sonlu elemanların küçük sonlu eleman parçalarına bölünme işlemi diyerek adlandırılan ağlama (mesh) işlemine tabi tutulmuştur. Her bir eleman boyutu düzgün dörtyüzlü (tetrahedral) biçiminde ve boyutu 40-45 cm olacak şekilde ağlama işlemi yapılmıştır. Bu işlem sonunda caminin sonlu eleman modeli 71.265 eleman ve 17.122 düğüm noktalıdır. Mesnet koşulları ve ağlama işlemlerinin tamamlanmasının ardından katı model ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Yazılımda ilk önce sonlu eleman malzeme modeli olarak yazılımda bulunan SOLID65 malzeme modeli güncellenmiştir. Bu malzemenin seçilme nedeni Bölüm 7'de daha önce bahsedilmiştir Pervizoğlu Camii'nin, Bölüm 7.1.1.'de tanımlanan duvar elastisite modülleri ile ilk teorik modal analiz gerçekleştirilmiştir. Teorik modal analiz sonuçları ile caminin OMA sonuçları Çizelge 7.4.'te gösterilmiştir.

Çizelge 7.4. Pervizoğlu Camii ilk teorik modal analiz ile OMA sonuçlarının karşılaştırılması.

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (x yönünde)	5,597	4,795	14,32
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (y yönünde)	5,767	4,795	11,01
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (z yönünde)	8,038	8,275	2,94
4	Kubbenin düşey yerdeğiştirme hareketi	10,385	10,433	0,46

Çizelge 7.4. incelendiğinde, teorik modal analiz ve OMA sonuçları arasında farklı sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle, yapının ilk iki mod şekli olan kısa ve uzun doğrultuda öteleme hareketlerindeki hata oranı yüksektir. İki modal analiz arasındaki sonuçların birbiriyle örtüşmesi için sonlu eleman model kalibrasyonu gerekmektedir. Model kalibrasyon çalışmaları mesnet koşullarının güncellenmesi, yapının geometrik ölçülerinin gözden geçirilmesi, malzeme özelliklerinin güncellenerek tekrarlı analizlerin yapılmasını içermektedir (Okuyucu 2020). Caminin teorik ve OMA sonuçları sıralama ve mod şekli olarak aynı çıktığından sonlu eleman modelinde mesnet koşulları ve geometrik ölçülerin güncellenmesine gerek duyulmamıştır. Dolayısıyla, Pervizoğlu Camii için malzeme elastik modüllerinin güncellenmesi işlemi yapılmıştır. Malzeme elastisite modülleri iterasyon işlemleri caminin OMA sonuçlarına diğer bir deyişle yapının doğal davranış parametrelerine en yakın kalibrasyon değerine ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. İterasyon işlemleri sonunda Pervizoğlu Camii için ulaşılan kalibrasyon elastisite modülü değerleri Çizelge 7.5.'te gösterilmiştir.

Çizelge 7.5. Pervizoğlu Camii sonlu eleman modeli kalibrasyonu öncesi ve sonrası elastisite modülü değerleri.

Basınç Dayanımı (MPa)		**Elastisite Modülü (MPa)**							
Duvar Kemer	*Sütun*	*Duvar*		*Kubbe*		*Kemer*		*Sütun*	
		Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra
2,58	5,40	516	720	1.000	450	516	1.400	1.080	10.000

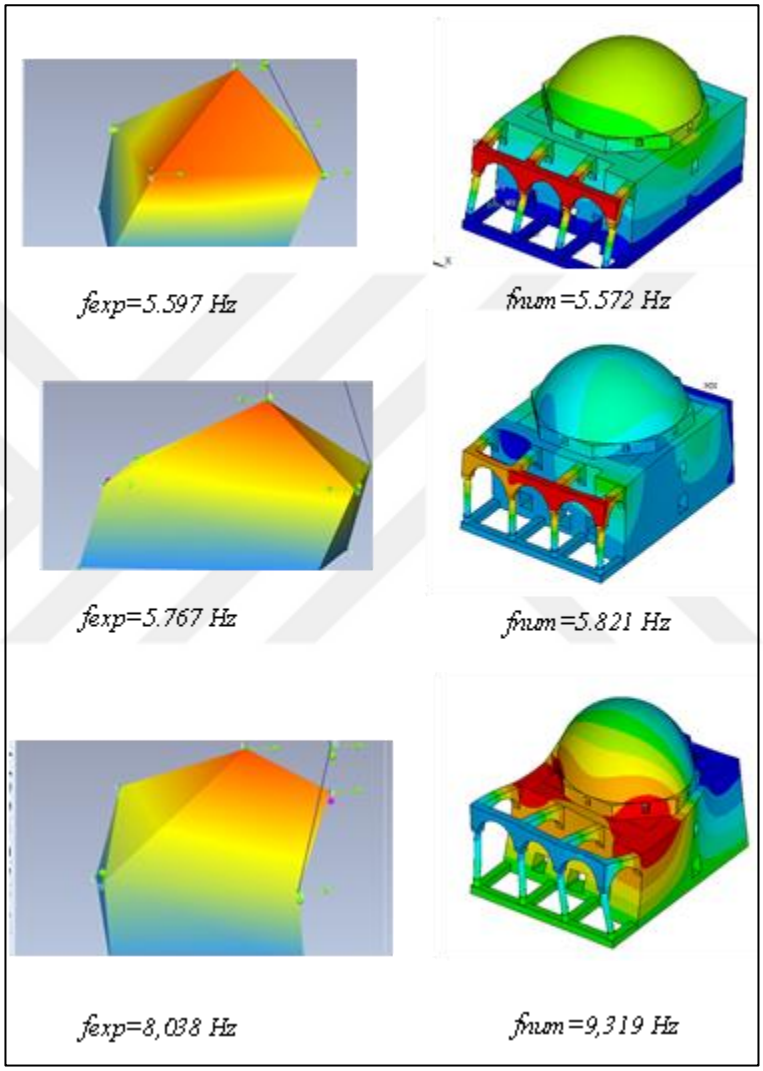
Çizelge 7.5. incelendiğinde cami duvarları için duvar elastisite modülü değerleri 720 MPa, kubbe için 450 MPa ve kemerler için 1.400 MPa değerleri modele tanıtıldığında, Pervizoğlu Camii'nin, deneysel dinamik davranış parametrelerine en yakın teorik parametre değerleri elde edildiği belirlenmiştir. Çizelge 7.6.'da caminin OMA sonuçlarıve bu kalibrasyon elastisite modül değerleriyle yapılan teorik modal analiz sonuçları diğer bir deyişle caminin deneysel ve teorik dinamik davranış parametreleri gösterilmiştir.

Çizelge 7.6. Pervizoğlu Camii kalibre edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanan teorik modal analiz ve deneysel modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

Mod Numarası	**Mod Şekli**	**Frekans (Hz)**		**Hata Oranı (%)**
		OMA	**Teorik**	
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (x yönü)	5,597	5,586	0,19
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (y yönü)	5,767	5,826	1,02
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (z yönü)	8,038	9,316	15,93
4	Kubbenin düşey yerdeğiştirme hareketi	10,385	11,260	8,17

Çizelge 7.6. değerlendirildiğinde, Pervizoğlu Camii'nin kalibre edilmiş sonlu eleman model üzerinden hesaplanan teorik modal analiz sonuçlarıyla caminin deneysel modal davranış parametrelerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Özellikle, caminin ilk iki mod şekillerine karşılık gelen modal frekans değerleri arasındaki hata oranlarının

%1'in altında olduğu görülmüştür. Bu sonlu eleman model kalibrasyonun caminin sonlu eleman modeline tanıtıldığında, caminin doğal dinamik davranış parametrelerini neredeyse yansıttığı görülmüştür. Şekil 7.23.'te Pervizoğlu Camii'nin deneysel modal analiz sonuçlarıyla kalibre edilmiş teorik modal analiz sonuçları şematik olarak gösterilmiştir.



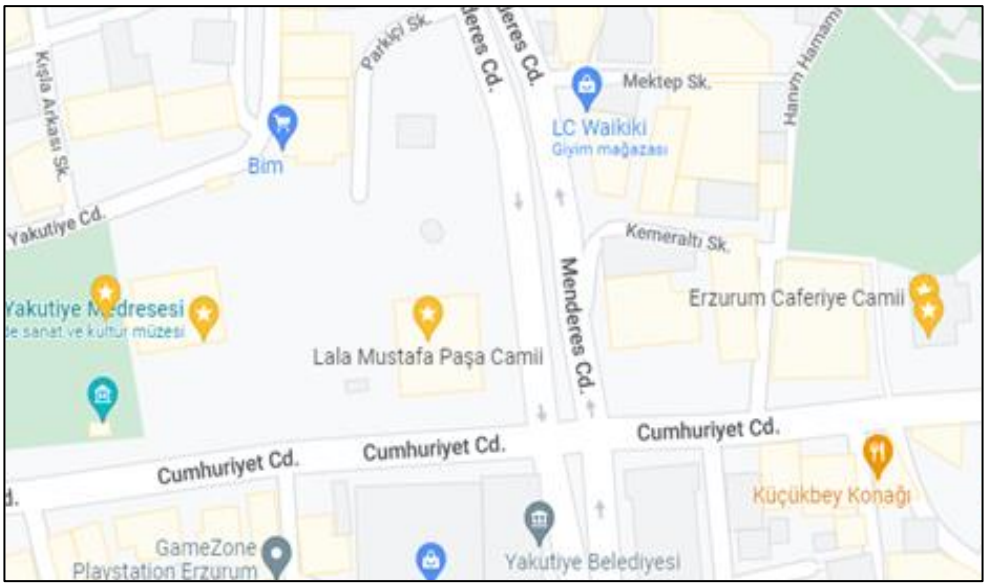
Şekil 7.23. Pervizoğlu Camii deneysel modal analiz ve kalibre edilmiş teorik modal analiz sonuçlarının şematik olarak karşılaştırılması.

7.2. Lala Mustafa Paşa Camii

Erzurum'da inşa edilen ilk Osmanlı eseri olan Lala Mustafa Paşa Camii, Osmanlı beylerbeyi ve Kıbrıs Fatihi olarak da bilinen Lala Mustafa Paşa adına 1562 yılında yaptırılmıştır. Cami, Erzurum merkez ilçelerinden Yakutiye'de Cumhuriyet Caddesi üzerinde şehrin merkezi bir yerinde bulunmaktadır. Mimar Sinan tarafından yaptırılan cami ilk başta içinde şadırvan, hamam, mektep bulunduran bir külliye formunda yapılmasına rağmen günümüze sadece cami ve hamam ulaşmıştır. (Gündoğdu vd 2010; Şeker vd 2015). Şekil 7.24.'te caminin genel görünümü, Şekil 7.25.'te ise caminin konumu gösterilmiştir.



Şekil 7.24. Lala Mustafa Paşa Camii



Şekil 7.25. Lala Mustafa Paşa konumu (Anonim 2022c)

Cami bir Mimar Sinan yapısı olması nedeniyle yapısal özellikleri bakımından Mimar Sinan'ın diğer yapılarına benzerlikler göstermektedir. Cami, İstanbul Şehzade Camii gibi kare plana ve merkezi kubbeye sahiptir. 26 m x 26 m boyutlarında olan caminin, duvar yüksekliği 7,40 m'dir. Cami duvar kalınlığı 1,80 m'dir. Caminin kubbesi, orta kısmında bulunan dört sekizgen taş kolon üzerine yerleştirilmiştir. Kubbeyi desteklemek ve kubbe mukavemetini artırmak için dört yandan yarım kubbeler ve payandalar inşa edilmiştir. Cami bu yapılarla birlikte simetrik bir şekilde gözükmektedir (Konyalı 1960). Caminin ana kubbesi 13 m çapında, cami zemininden itibaren 17,45 m yüksekliğinde ve 50 cm kalınlığındadır. 26 m x 5 m ölçülerinde olan son cemaat yeri 6 kolon ve 5 küçük kubbeyle inşa edilmiştir. Cami duvar kalınlığı 180 cm'dir. (Kocaman 2017). Caminin iç görünümü Şekil 7.26.'da gösterilmiştir.



Şekil 7.26. Lala Mustafa Paşa Camii iç görünümü

Caminin minaresi caminin güneybatı hizasında camiye bitişik şekildedir. Minare yüksekliği yaklaşık 23 m'dir. Caminin mimarı Mimar Sinan yaptığı camilerin birbirine benzemesinden kaçınmıştır. Bu cami Erzurum'un iklim ve deprem koşulları ön plana alınarak inşa edilmiştir. Erzurum depremleri aşağıdan yukarıya burkularak gerçekleştiği için cami kubbesi yayvan bir şekilde ve minaresi kısa bir biçimde tasarlanmıştır. Cami minaresi camiyle uyumlu bir şekilde inşa edilmiştir. Ayrıca soğuk iklim şartları nedeniyle cami minaresi, cami içinden batıya açılan bir kapıyla camiye bağlanmıştır (Konyalı 1960).

Cami, ilk onarımını 1694 yılında geçirmiştir. 1721 yılında yangınlara karşı önlem amacıyla cami ikinci bir onarımdan daha geçmiştir. 1870 yılındaki onarım, caminin 1859 depreminde hasar aldığı taç kapısının tamiratıdır. Bu bilgi, 1859 depreminde Lalapaşa Camii'nin hasar aldığına yönelik önemli bir kanıttır (Gündoğdu 1993). Ayrıca Osmanlı arşivlerinde net bir hasar kaydı bulunmamasına rağmen, arşiv kayıtlarında caminin onarımı için belirli miktarda ödenek istendiğinin geçmesi, bu ödeneğin ağır hasar alan caminin tamiratı için kullanılmasının belirtilmesi Lala Mustafa Paşa Camii'nin 1859 depreminde ağır hasar aldığının göstergeleridir (Tozlu 2000).

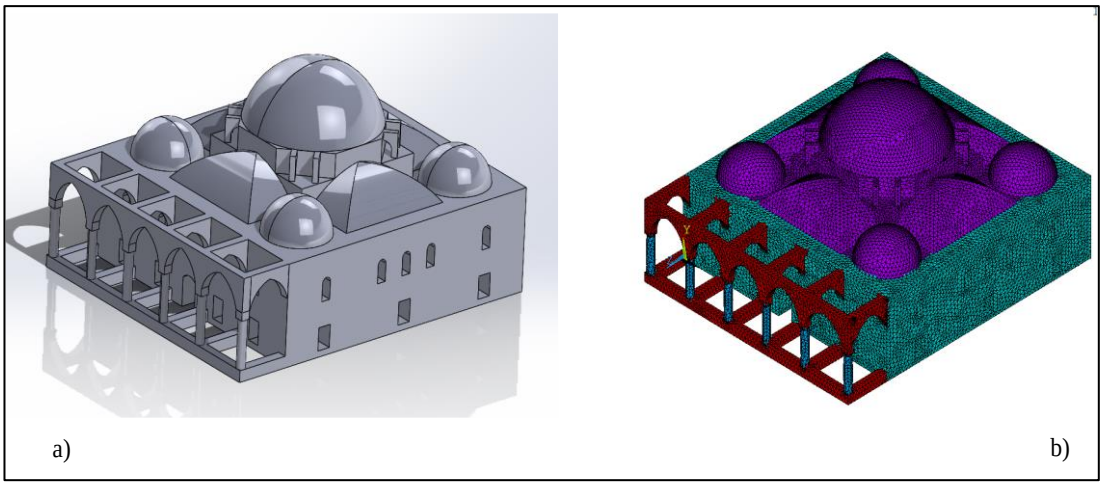
7.2.1. Lala Mustafa Paşa Camii teorik modal analiz uygulaması

Pervizoğlu Camii için uygulanan yapısal analize esas sonlu eleman model oluşturma yöntemi Lala Mustafa Paşa Camii için de yapılmıştır. Lala Mustafa Paşa Camii üzerinde önce keşif çalışması yapılmıştır. Caminin ölçüleri ve malzeme özellikleri belirlenmiştir. Lala Mustafa Paşa Camii'nin yapı boyutları yerinde ölçülmüştür. Lala Mustafa Paşa Camii rölevesi Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Cami yerinde ölçülen yapı boyutları, Lala Mustafa Paşa Camii'nin cami rölevesinde belirtilen boyutlar ile karşılaştırılarak caminin nihai boyutları belirlenmiştir. Lala Mustafa Paşa Camii'nin cami rölevesi Şekil 7.27.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.27. Lala Mustafa Paşa Camii rölevesi

Lala Mustafa Paşa Camii'nin boyutları belirlendikten sonra sonlu eleman modelinin oluşturulma aşamasına geçilmiştir. Caminin katı modeli Soidworks (2022) yazılımında oluşturulup ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Caminin sonlu eleman modeli Şekil 7.28.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.28. Lala Mustafa Paşa Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli.

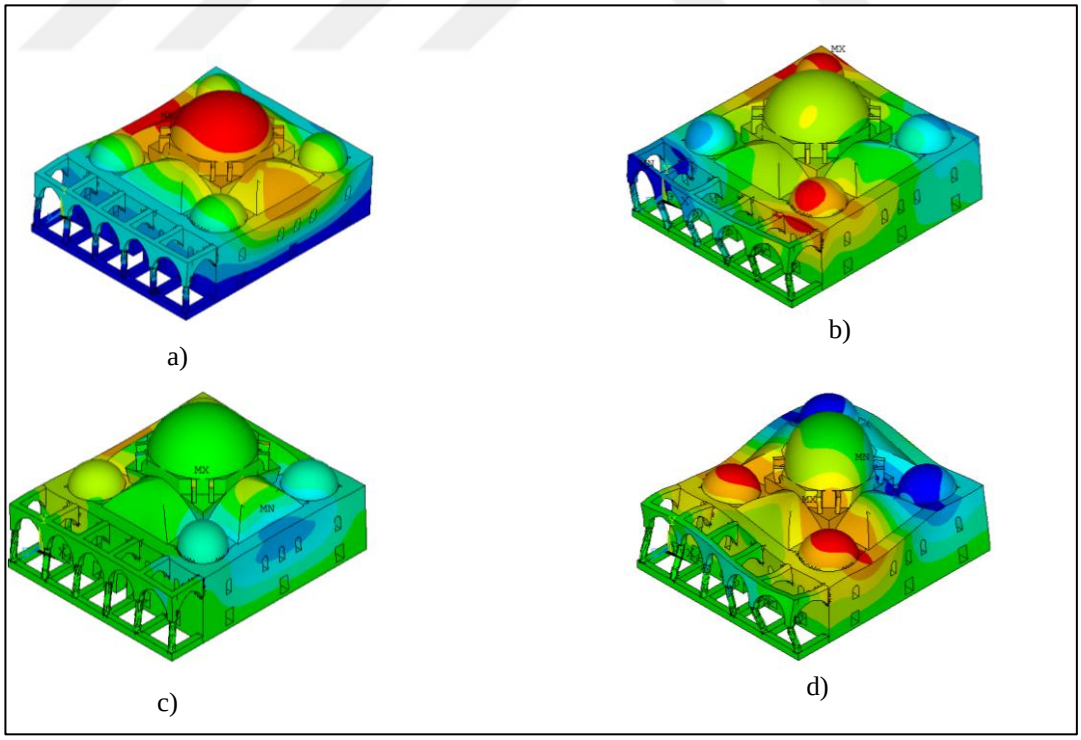
Soidworks (2022) yazılımında oluşturulan model, ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarıldıktan önce Workbench (2016) yazılımında sonlu elemanların küçük sonlu elemanlara bölünme işlemi olan ağlama (mesh) işlemi yapılmıştır. Bu elemanlar, 40-45 cm boyutunda sonlu küçük elemanlara ayrılacak şekilde ağlama işlemi yapılmıştır. Her bir ağlama sonucunda oluşan küçük elemanlar boyut olarak tetra (onlu) eleman şeklindedir.

Caminin duvar mekanik özellikleri belirleme işleminde tahribatsız deney yöntemleri kullanılmıştır. Caminin duvar taş yapısı incelendiğinde, camideki andezit ve bazalt taşı oranının hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Bu taşlara beton Schmidt çekici uygulandığında andezit için ortalama sertlik değeri yaklaşık 28,7, bazalt için ortalama sertlik değeri 27,0 olarak elde edilmiştir. Denklem 7.1 ve Denklem 7.2 kullanılarak taş basınçları hesaplandığında andezit için 36,89 MPa, bazalt için 9,77 MPa olarak hesaplanmıştır. Ortalama taş basıncını hesaplamak için duvardaki andezit ve bazalt yüzdelerinden yararlanmıştır.Caminin 1 metrekare alan içindeki duvar kesiti incelendiğinde duvardaki taş yüzdeleri %50 andezit ve %50 bazalt olarak belirlenmiştir. Bu kabule göre ortalama taş basıncı 23,31 MPa olarak hesaplanmıştır. Duvar basınç mukavemeti hesabı için, Pervizoğlu Camii'nde kullanılan Denklem 7.3, Lala Mustafa Paşa Camii için de kullanılmıştır. Harç olarak Horasan harcı kullanılmıştır ve basınç mukavemeti 1,15 MPa olarak hesaplanmıştır. K değeri 0,5, α ve β katsayıları cami duvarları düzgün bir şekilde örüldüğünden 0,7 ve 0,3 olarak kullanılmıştır. Bütün bu değerler kullanılarak duvar basınç mukavemeti ortalama 4,72 MPa, duvar elastisite

modülü ise bu değerin 200 katı yani 945 MPa olarak hesaplanmıştır. Kemerler için de aynı elastisite modülü değeri girilmiştir. Kubbe için ise 1000 MPa elastisite modülü değeri girilmiştir. Sütunlar için Pervizoğlu Camii'yle benzer şekilde 1080 MPa elastisite modülü değeri girilmiştir. Lala Mustafa Paşa Camii sonlu eleman modeline duvar mekanik özelliklerinin tanımlanmasının ardından model üzerinde teorik modal analiz yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 7.7.'de gösterilmiştir. Teorik mod şekilleri Şekil 7.29.'da gösterilmiştir.

Çizelge 7.7. Lala Mustafa Paşa Camii teorik modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (x yönünde)	3,260
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (y yönünde)	3,607
3	Kubbe düşey yönlü yer değiştirme (z yönünde) hareket	4,940
4	Düşey eksen (z yönünde) etrafında yanal burulma hareketi	5,283

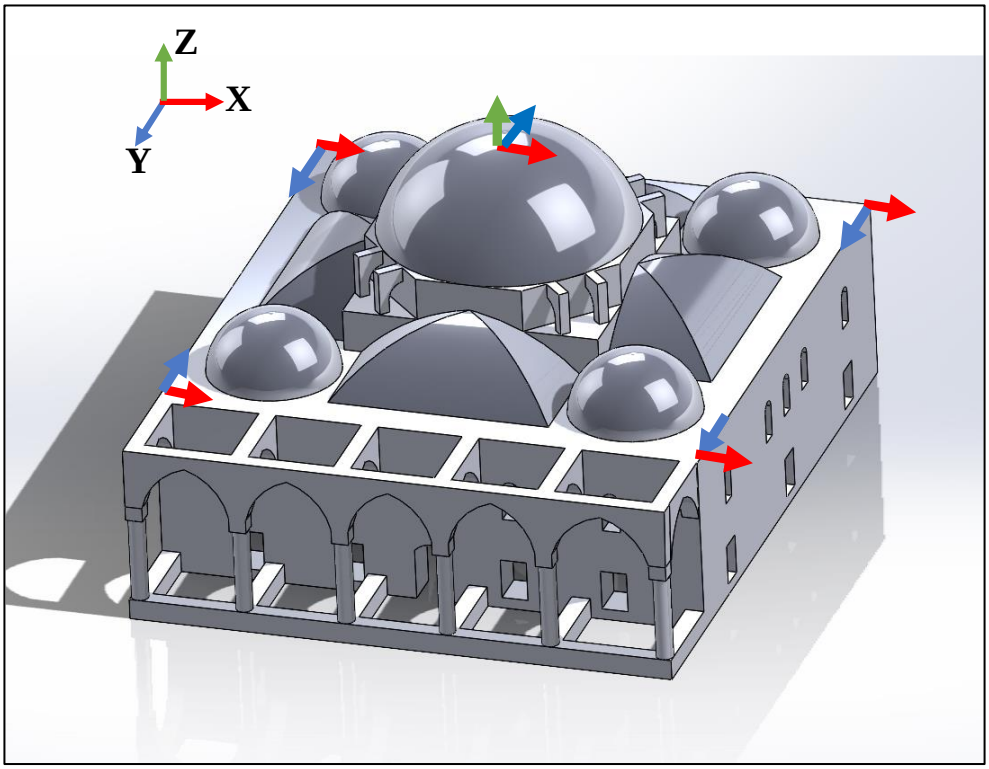


Şekil 7.29. Lala Mustafa Paşa Camii a) x yönde öteleme b) y yönünde öteleme c) kubbe düşey hareketi d) burulma.

Caminin teorik modal analiz sonuçlarına göre, cami gövdesinin ilk modu kısa doğrultuda (x yönü) yatay öteleme hareketi, ikinci modu uzun doğrultuda (y yönü) yatay öteleme hareketi olarak elde edilmiştir. Üçüncü modda düşey yönde (z yönü) kubbe düşey yönlü yer değiştirme hareketi, dördüncü modda ise düşey eksen etrafında (z yönü) yanal burulma hareketi elde edilmiştir. Bu sonuçlardan hareketle cami deneysel modal analiz uygulaması için, cami köşelerine ve cami kubbesine sensör yerleştirme sonucuna ulaşılmıştır.

7.2.2. Lala Mustafa Paşa Camii operasyonel modal analiz uygulaması

Caminin modal davranış parametrelerinin belirlenmesi için camide OMA uygulaması yapılmıştır. Pervizoğlu Camii'nde yapılan OMA uygulamasında yapılan süreçler, aynı şekilde Lala Mustafa Paşa Camii'nde de yapılmıştır. İvmeölçer yerleşimi, ilk teorik modal analizdeki mod şekilleri baz alınarak yapılmıştır. İvmeölçerler, yetersiz kablo uzunluğu ve olumsuz iklim şartlarından etkilenmemesi için cami içerisine yerleştirilmiştir. Lala Mustafa Paşa Camii ivmeölçer yerleşim krokisi Şekil 7.30.'da gösterilmiştir.



Şekil 7.30. Lala Mustafa Paşa Camii cami içi ve kubbe ivmeölçer yerleşim krokisi

Caminin iç köşelerine 8 adet tek eksende ivme kaydı alan kablolu ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Cami teorik modal analiz sonuçları incelendiğinde, ilk üç mod şeklinde caminin düşey hareketine dair bir mod şekline rastlanmadığı için düşey yönde titreşim kaydı alınmamıştır. İvmeölçerlerin yerleştirilmesi işleminde yapıya herhangi bir hasar vermeden yerleştirilmesi ve sökülmesi en önemli husustur. İvmeölçerleri sabitleme işleminden önce, yön ve doğrultu belirleme işlemleri yapılması gerekmektedir. Caminin kuzey-güney yön aksı yani kapı-mihrap aksı y yönü, doğu-batı yön aksı yani yan duvarlar aksı ise x yönü olarak tayin edilmiştir. Yön tayinlerinden sonra 8 adet tek eksenli ivmeölçer, cami duvarlarına sıcak silikon ile yapıştırılmıştır ve ivmeölçerlerin üstü güçlü bant ile yapıştırılarak herhangi bir düşmeye karşı güçlendirilmiştir. Cami içi ivmeölçer yerleşimi Şekil 7.31.'de gösterilmiştir.



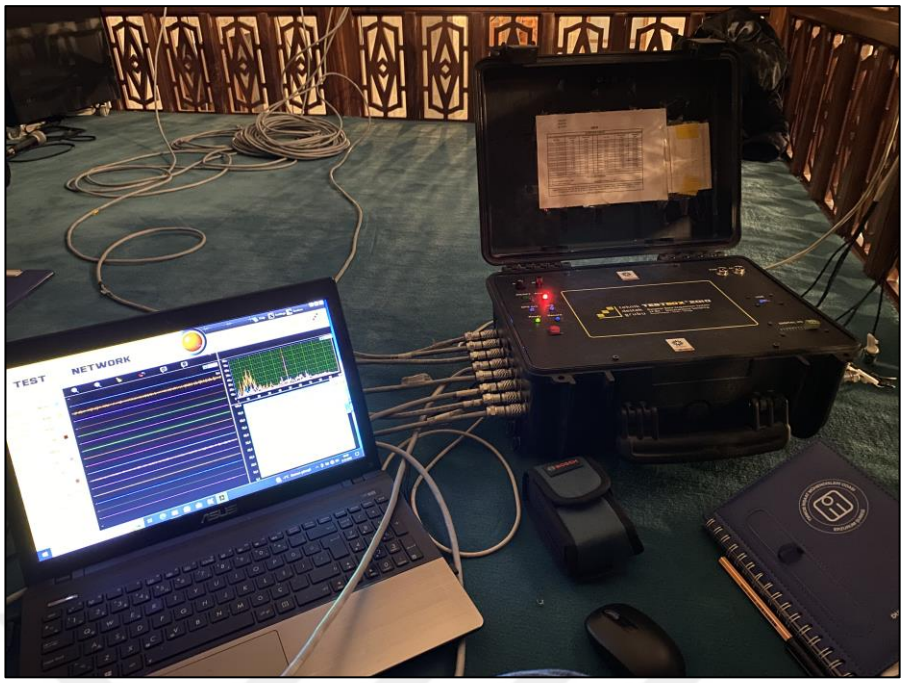
Şekil 7.31. Lala Mustafa Paşa Camii cami içi ivmeölçer yerleşimi

İvmeölçer yerleştirme işlemi cami içinden sonra cami kubbesinde devam etmiştir. Teorik modal analiz sonuçlarında cami kubbesinin düşey yönde hareketi beklenen bir hareket olduğu için, cami kubbesine de ivmeölçer yerleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Cami kubbesi üzerine üç eksenli ivmeölçer yerleştirilmiştir. İvmeölçer üzerindeki yön işareti güney yönünü gösterecek şekilde ivmeölçer cami kubbesine konumlandırılmıştır ve çabuk donan alçı yardımıyla sabitlenmiştir. Cami kubbesi için vmeölçer yerleşimi Şekil 7.32.'de gösterilmiştir.



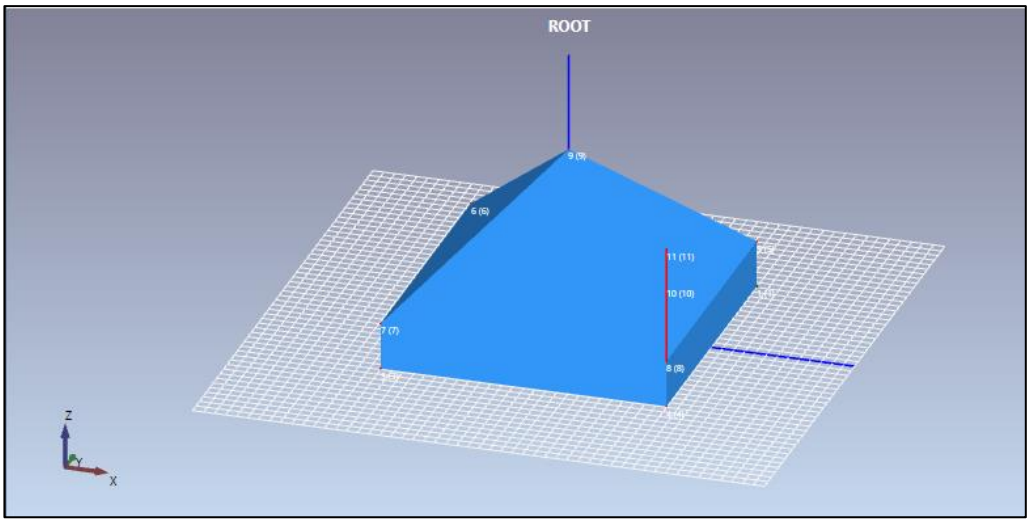
Şekil 7.32. Lala Mustafa Paşa Camii ivmeölçerin kubbeye sabitlenmesi

İvmeölçerlerin caminin tüm bölümlerinde sabitleme işleminin tamamlanmasının ardından, ivmeölçerler özel veri kabloları yardımıyla veri toplama sistemine bağlanmıştır. Veri toplama sistemi Şekil 7.33.'te gösterilmiştir. Her kablo sensör için önceden belirlenen kanal numarasına yerleştirilmiştir. İvmeölçerler veri toplama sistemine bağlandıktan sonra her cihazın kendine ait kalibrasyon çarpanı veri toplama sistemine girilmiştir. Daha sonra kayda başlamadan önce, rastgele kısa süreli bir kayıt alınıp ivmeölçer veya kablolarda herhangi bir sıkıntı olup olmadığı kontrol edilmiştir.



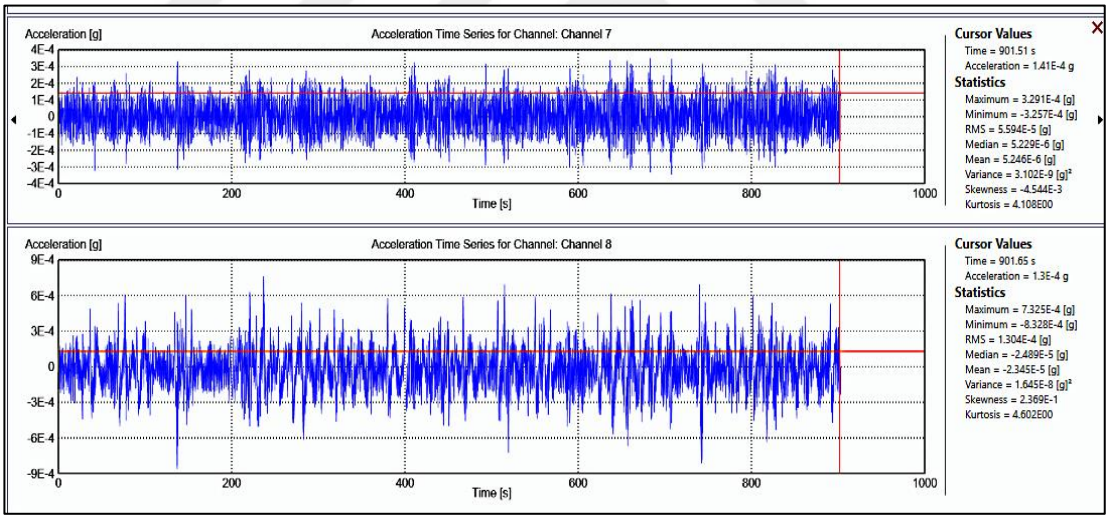
Şekil 7.33. Lala Mustafa Paşa Camii veri toplama sistemi kurulumu

Gerekli kontrollerin ardından kayıt alma işlemine geçilmiştir. Tüm bu değerlendirmelerin ardından 6 adet 100 Hz'lik ve 5 adet 200 Hz'lik olmak üzere 11 adet ivme kaydı alınmıştır. Ölçüm birimi g'dir. Cami konumu itibariyle araç sürekliliği bakımından çok yoğun bir bölgededir. Bu yoğunluk nedeniyle cami sürekli çevresel titreşim etkisindedir. Bu titreşime ek olarak, caminin duvarlarına plastik tokmakla vurularak yapay titreşimler verilmiştir. Kayıt alma işlemi tamamlandıktan sonra, kaydedilen titreşim verisinden mod şekillerini ve bu mod şekillerine karşılık gelen modal frekans değerlerini elde etmek için veri aşamasına geçilmiştir. Caminin deneysel modal analizine esas geometrisi Artemis Modal Pro (2023) yazılımında oluşturulmuştur. Şekil 7.34.'te Lala Mustafa Paşa Camii'nin Artemis yazılımındaki temsili geometrisi verilmiştir.



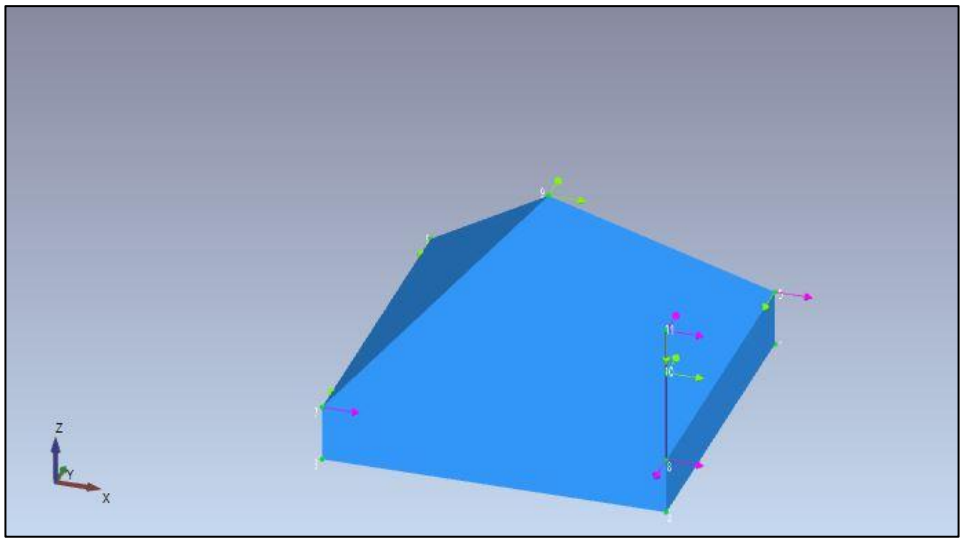
Şekil 7.34. Lala Mustafa Paşa Camii Artemis yazılımındaki geometrisi

Veri toplama sisteminde her bir ivmeölçerden alınan titreşim kayıtları Artemis Modal Pro yazılımında ivme-zaman grafiklerine çevrilmiştir. Lala Mustafa Paşa Camii ivme-zaman grafikleri Şekil 7.35.'te gösterilmiştir.

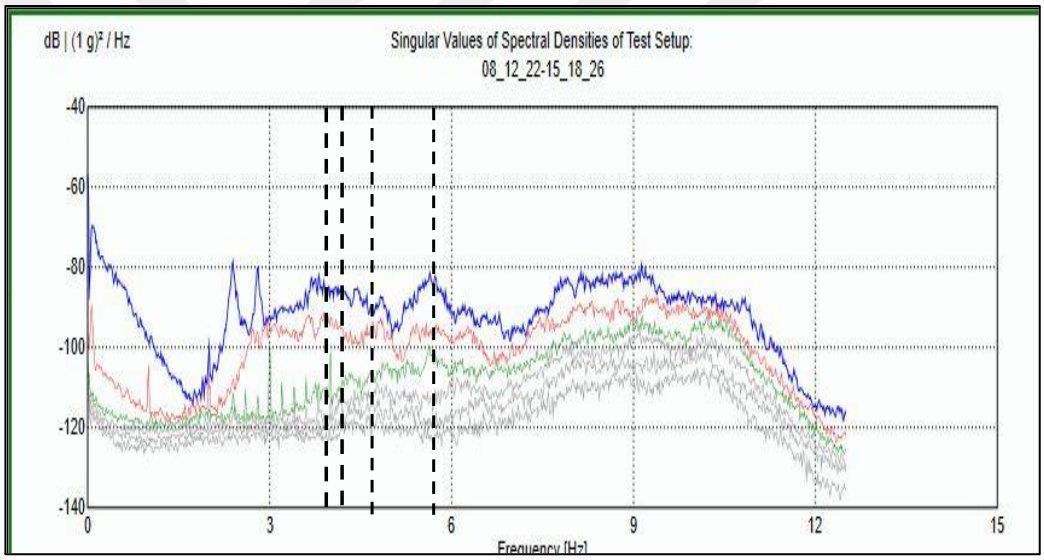


Şekil 7.35. Lala Mustafa Paşa Camii titreşim kayıtlarının ivme-zaman grafiklerine dönüşümü.

Cami köşelerine yerleştirilen ivmeölçerler, yazılımdaki geometrilerine de ölçüm anındaki doğrultuları bire bir aynı olacak şekilde tanımlanmıştır. Lala Mustafa Paşa Cami ivmeölçerlerinin yönlerinin yazılımda tanıtılması Şekil 7.36.'da gösterilmiştir. İvmeölçerlerin yönlerinin tanıtılmasının ardından veri analizleri yapılmıştır. Lala Mustafa Paşa Camii'nin analizdeki spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 7.37.'de gösterilmiştir.



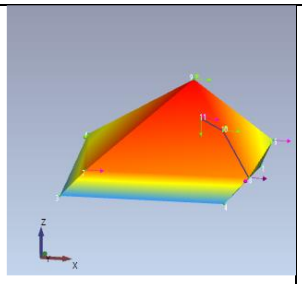
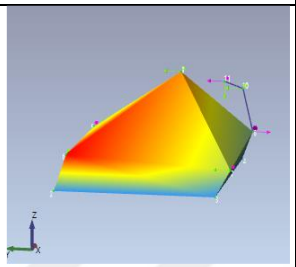
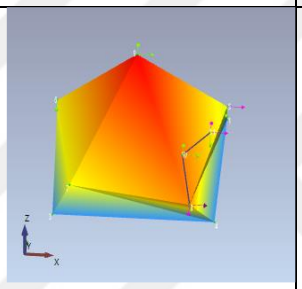
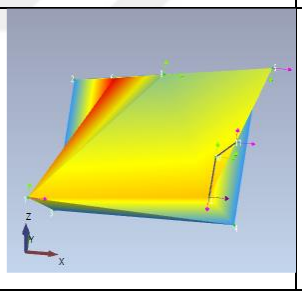
Şekil 7.36. Lala Mustafa Paşa Camii ivmeölçerlerin ve yönlerinin geometrik modelde tanıtılması.



Şekil 7.37. Lala Mustafa Paşa Camii spektral yoğunluk fonksiyonu

Tüm süreçler tamamlandıktan sonra mod şekilleri ve modal frekans değerlerini elde etme aşamasına geçilmiştir. Yazılımda farklı türde çözümleme yöntemleri mevcuttur. Lala Mustafa Paşa Camii'nin OMA titreşim kayıtları zaman tanım alanında bir yöntem olan SSI-UPCX analiz yöntemiyle çözülerek caminin Operasyonel mod şekilleri ve modal frekans değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 7.8.'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.8. Lala Mustafa Paşa Camii OMA Sonuçları

Mod Şekli	Frekans (Hz)	
Kısa doğrultuda (x yönü) yatay öteleme hareketi		3,604
Uzun doğrultuda (y yönü) yatay öteleme hareketi		3,901
Düşey yönde (z yönü) kubbe yer değiştirme hareketi		4,293
Düşey eksen etrafında (z yönü) yanal burulma hareketi		5,681

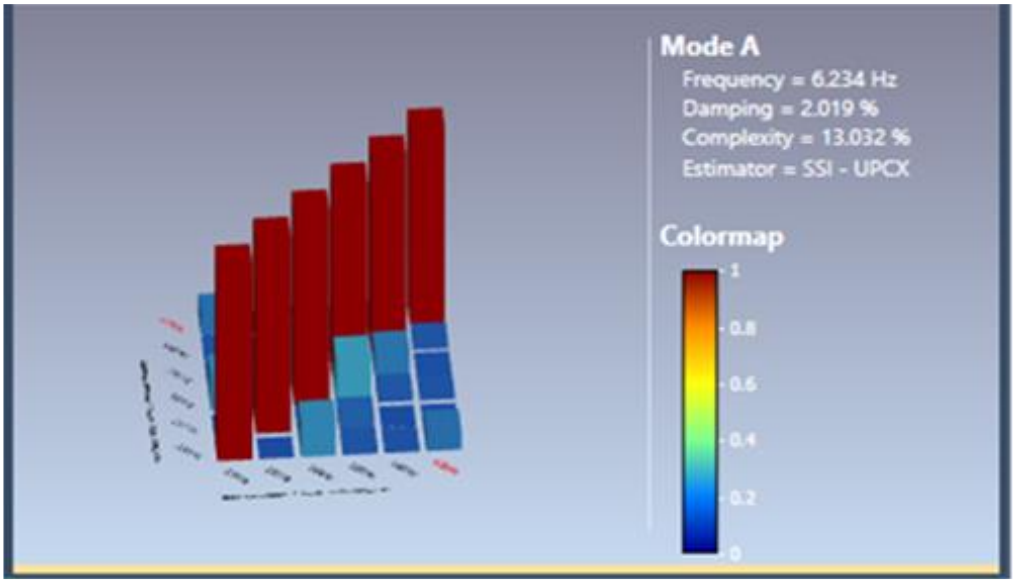
Operasyonel modal analiz sonuçları değerlendirildiğinde, ilk iki mod minare modlarıdır. Minarenin dinamik davranış parametreleri cami modal davranışından bağımsızdır. Minare modal frekans değerleri cami gövdesi modal frekans değerlerinden daha düşük frekans değerlerindedir. Bu sebeple, cami modal analiz sonuçlarında minare modları dikkate alınmamıştır. Cami gövdesinin OMA sonuçları incelendiğinde ilk modu kısa doğrultuda (x doğrultusu) öteleme, ikinci mod uzun doğrultuda öteleme (y doğrultusu), üçüncü mod ise cami kubbe düşey (z doğrultusu) hareketidir. Bu moddan sonra diğer mod düşey eksen (z yönü) etrafında burulma hareketidir. Cami kubbe düşey yönde (z doğrultusu) hareketi üç temel moddan sonra elde edilmektedir. Caminin

deneysel dinamik parametreleri teorik modal parametrelerle benzer çıkmıştır. Caminin kubbe düşey hareket modunun burulma modundan önce çıkması dikkat çekmiştir. Deneysel modal analiz sonuçlarında dikkat çeken başka bir sonuç, cami doğu duvar aksının hareket ettiği sonucudur. Bu sonuçtan sonra sadece doğu duvar köşeleri üzerinde ikinci bir deneysel modal analiz uygulaması yapılmıştır. Bu sonuçlar irdelendiğinde, caminin güney doğu köşe duvarında üst kubbeden gelen ve pencere hizasından duvar boyunca boyuna bir çatlak gözlenmiştir ve bunun yapı sağlığı açısından riskli olduğu yorumlanmıştır. Bu kusur deneysel modal analiz sonuçlarında gözlenmiştir. Şekil 7.38.'de bu yapısal kusurlar gösterilmiştir.



Şekil 7.38. Lala Mustafa Paşa Camii güney duvar çatlağı

Lala Mustafa Paşa Camii'nin deneysel modal analiz sonuçlarının güvenilirliğinin belirlenmesi için MAC değerleri kontrol edilmiştir. Şekil 7.39.'da Lala Mustafa Paşa Camii'nin MAC değerler grafiği gösterilmiştir. Deneysel modal frekans değerleri kullanılarak oluşturulan Lala Mustafa Paşa Camii MAC değerleri tablosu Çizelge 7.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 7.39. Lala Mustafa Paşa Camii MAC değerleri grafiği

Çizelge 7.9. Lala Mustafa Paşa Camii OMA sonuçlarına ait MAC değerleri

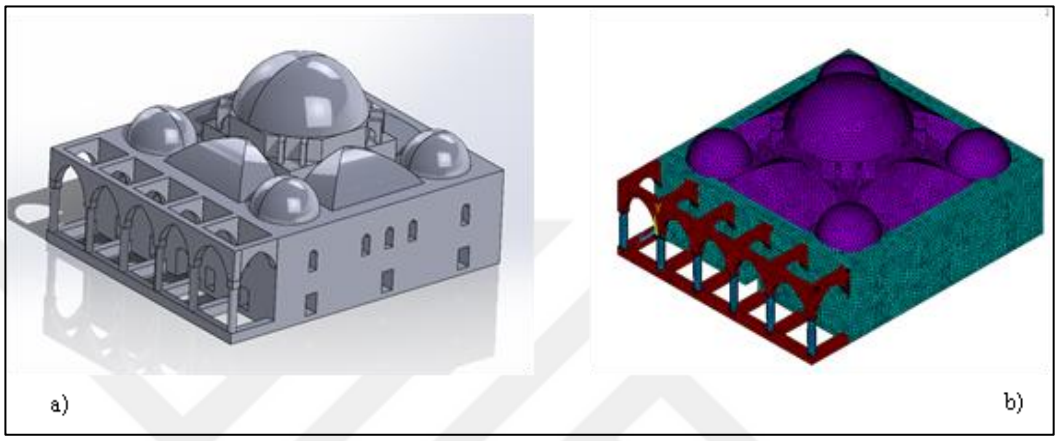
Frekans (Hz)	**3,604**	**3,901**	**4,293**	**5,681**
3,604	1	0.0127	0.0303	0.0303
3,901	0.0127	1	0.0647	0.0358
4,293	0.0303	0.0647	1	0.0691
5,681	0.0303	0.0358	0.0691	1

Çizelge 7.9.'da verilen Lala Mustafa Paşa Camii deneysel modal analiz sonuçlarının MAC değerleri incelendiğinde, modlar arasındaki MAC değerlerinin 0'a yakın olduğu görülmüştür. Bu sonuç, mod şekillerinin birbirinden ayrık olduğunu ve OMA sonuçlarının güvenilir olduğunu göstermektedir. Örnek olarak kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi ile uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi arasındaki MAC değerinin 0,012 olduğu görülmüştür. Bütün modların MAC değerleri incelendiğinde, bütün modların birbirinden ayrık ve deneysel modal analizin güvenilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

7.2.3. Lala Mustafa Paşa Camii sonlu eleman model kalibrasyon çalışması

Lala Mustafa Paşa Camii üzerinde deneysel modal analizin tamamlanmasının ardından sonlu eleman model kalibrasyon aşamasına geçilmiştir. Lala Mustafa Paşa

Camii'nin ilk teorik modal analizi için hazırlanan katı model önce Soidworks (2022) yazılımında oluşturulmuştur. Cami minaresi haricindeki cami duvarları, cami kemerleri, kubbesi ve son cemaat yeri bu yazılımla çizilmiştir. Oluşturulan model dinamik analizler için ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Bölüm 7.2.1.'de bu aşamalar detaylı şekilde açıklanmıştır. Lala Mustafa Paşa Camii'nin katı modeli ve sonlu eleman modeli Şekil 7.40.'ta gösterilmiştir.



Şekil 7.40. Lala Mustafa Paşa Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli

Soidworks (2022) yazılımında oluşturulan cami katı modeli, sınır koşullarının tanımlanması ve modelin küçük elemanlara bölünme işleminin tamamlanması için Workbench (2016) yazılımına aktarılmıştır. Bölüm 7.2.1.'de Lala Mustafa Paşa Camii sonlu eleman modeli üzerinde 40-45 cm boyutunda düzgün dörtyüzlü şeklinde meshleme işlemi yapıldığından bahsedilmiştir. Bu işlem sonunda caminin sonlu eleman modeli 356.470 eleman ve 78.617 düğüm noktalıdır. Mesnet koşulları ve ağlama işlemlerinin tamamlanmasının ardından katı model ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Yazılımda ilk önce sonlu eleman malzeme modeli olarak yazılımda bulunan SOLID65 malzeme modeli güncellenmiştir. Bu malzemenin seçilme nedeni Bölüm 7'de daha önce bahsedilmiştir. Lala Mustafa Paşa Camii'nin, Bölüm 7.2.1.'de tanımlanan duvar elastisite modülleri ile ilk teorik modal analiz gerçekleştirilmiştir. Teorik modal analiz sonuçları ile caminin OMA sonuçları Çizelge 7.10.'da gösterilmiştir

.

Çizelge 7.10. Lala Mustafa Paşa Camii OMA ve ilk teorik modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (x yönünde)	3,604	3,260	9,54
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (y yönünde)	3,901	3,607	7,53
3	Kubbenin düşey yerdeğiştirme hareketi	4,293	4,940	20,75
4	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (z yönünde)	5,684	5,283	7,05

Çizelge 7.10. incelendiğinde, teorik modal analiz ve OMA sonuçları arasında farklı sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle yapının ilk iki mod şeklindeki kısa ve uzun doğrultuda öteleme hareketlerindeki hata oranları yüksektir. İki modal analiz arasındaki sonuçların birbiriyle örtüşmesi için sonlu eleman model kalibrasyonu gerekmektedir. Model kalibrasyon çalışmaları mesnet koşullarının güncellenmesi, yapının geometrik ölçülerinin gözden geçirilmesi, malzeme özelliklerinin güncellenerek tekrarlı analizlerin yapılmasını içermektedir. Caminin teorik ve OMA sonuçları sıralama ve mod şekli olarak aynı çıktığından mesnet koşulları ve geometrik ölçülerin güncellenmesine gerek duyulmamıştır. Dolayısıyla Lala Mustafa Paşa Camii için malzeme elastik modüllerinin güncellenmesi işlemi yapılmıştır. Malzeme elastisite modülleri iterasyon işlemleri caminin operasyonel modal analiz sonuçlarına diğer bir deyişle yapının doğal davranış parametrelerine en yakın kalibrasyon değerine ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. İterasyon işlemleri sonunda Lala Mustafa Paşa Camii için ulaşılan kalibrasyon elastisite modülü değerleri Çizelge 7.11.'de gösterilmiştir.

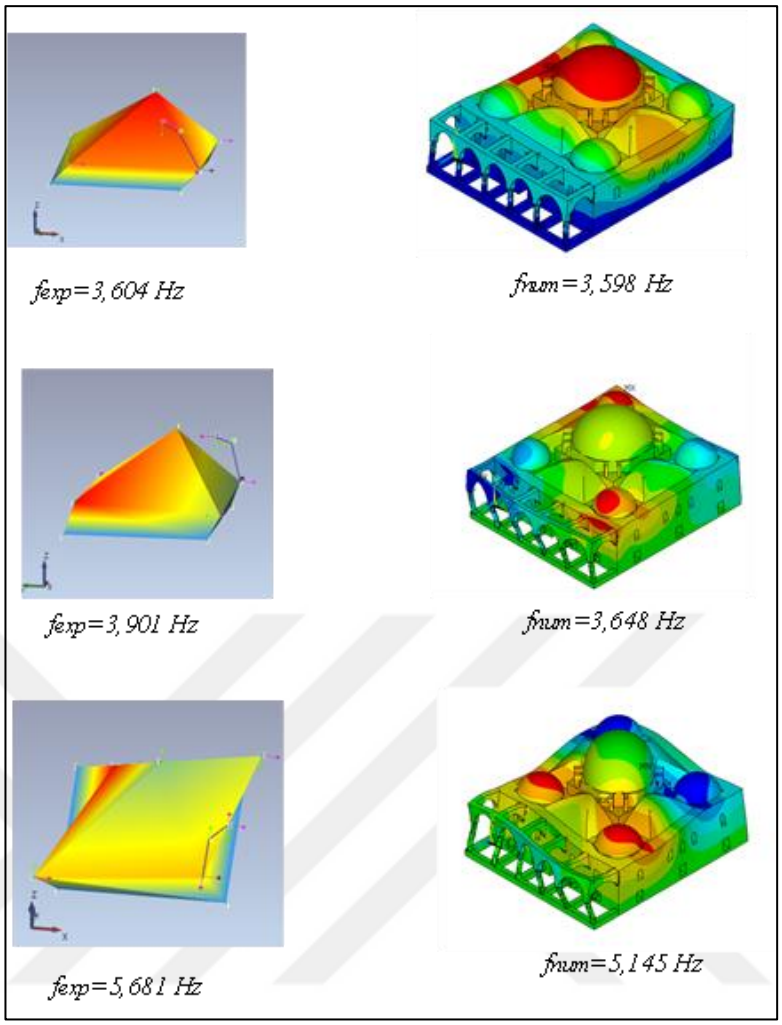
Çizelge 7.11. Lala Mustafa Paşa Camii sonlu eleman modeli kalibrasyonu öncesi ve sonrası elastisite modülü değerleri.

Basınç Dayanımı (MPa)		**Elastisite Modülü (MPa)**							
Duvar Kemer	*Sütun*	*Duvar*		*Kubbe*		*Kemer*		*Sütun*	
		Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra
4,72	28,00	945	1.050	1.000	720	945	2.000	1.080	10.000

Çizelge 7.11. incelendiğinde cami duvarları için duvar elastisite modülü değerleri 1.050 MPa, kubbe için 720 MPa, kemerler için 2.000 MPa ve sütunlar için 10.000 MPa değerleri modele tanıtıldığında, Lala Mustafa Paşa Camii'nin kalibre edilmiş sonlu eleman model üzerinden hesaplanan teorik modal analiz sonuçlarıyla caminin deneysel modal davranış parametrelerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Özellikle caminin ilk mod şekline karşılık gelen modal frekans değerleri karşılaştırıldığında hata oranının %1'in altında olduğu görülmüştür. Bu sonlu eleman model kalibrasyonun caminin sonlu eleman modeline tanıtıldığında, caminin doğal dinamik davranış parametrelerini neredeyse yansıttığı görülmüştür. Çizelge 7.12.'de caminin OMA sonuçları ve bu kalibrasyon elastisite modül değerleriyle yapılan teorik modal analiz sonuçları diğer bir deyişle caminin deneysel ve teorik dinamik davranış parametreleri tablo şeklinde gösterilmiştir. Şekil 7.41.'de ise Lala Mustafa Paşa Camii'nin deneysel modal analiz sonuçlarıyla, kalibre edilmiş teorik modal analiz sonuçları şematik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 7.12. Lala Mustafa Paşa Camii kalibre edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanan teorik modal analiz ve OMA sonuçlarının karşılaştırılması.

Mod Numarası	**Mod Şekli**	**Frekans (Hz)**		**Hata Oranı (%)**
		OMA	**Teorik**	
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (X yönü)	3,604	3,598	0,16
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (Y yönü)	3,901	3,648	6,48
3	Kubbenin düşey yer değiştirme hareketi	4,293	4,653	7,73
4	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (Z yönü)	5,684	5,145	9,48



Şekil 7.41. Lala Mustafa Paşa Camii OMA ve teorik modal analiz sonuçlarının şematik olarak karşılaştırılması.

7.3. Muratpaşa Camii

Erzurum Yakutiye ilçesinde Muratpaşa Mahallesinde bulunan Muratpaşa Camii, 1572 senesinde Osmanlı sadrazamı Kuyucu Murat Paşa tarafından yaptırılmıştır. Muratpaşa Camii, Erzurum'da bulunan ikinci Osmanlı eseridir. Cami, tipik Osmanlı camileri gibi tek kubbeli ve kare planlı şeklindedir Şekil 7.42.'de Muratpaşa Camii'nin genel görünümü, Şekil 7.43.'te ise caminin konumu gösterilmiştir.



Şekil 7.42. Muratpaşa Camii



Şekil 7.43. Muratpaşa Camii konumu (Anonim 2022d)

Cami 17,07 x 15,80 m boyutlarında olup, düzgün kesme taştan inşa edilmiştir. Duvar yüksekliği 5,50 m olan cami duvar kalınlığı 146 cm'dir. Kubbe, cami zemininden 14,80 m yüksekte olup duvarların üstündeki 8 adet kemerle taşınmaktadır. Caminin son cemaat yerini altı sütunun üstüne beş küçük kubbe örtmektedir (Konyalı 1960). Bu

sütunlar beş sivri kemerle birbirine bağlanmaktadır. Cami iç görünümü Şekil 7.44.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.44. Muratpaşa Camii iç görünümü

Cami, başlangıçta minaresiz şekilde inşa edilmiştir. Caminin doğu yönünde 1314 yılında İlhanlılar tarafından inşa edilen Ahmediye Medresesi'nin minaresi cami minaresi olarak kullanılmıştır. Bu minarenin, çok kalın ve kısa olduğu 1928 yılında art arda gelen deprem ve doğal afetlere daha fazla karşı koyamayarak yıkıldığı belirtilmiştir (Konyalı 1960). Yerine şu anki düzgün kesme taştan yapılmış, dıştan sekizgen içten daire şeklindeki 30 m yüksekliğinde minare yapılmıştır.

Cami en son 2007 yılımda restorasyon geçirmiştir. Caminin, arşiv kayıtlarında 1870 yılında bir onarımdan geçtiği belirtilmiştir (Çelemoğlu 2015).

7.3.1. Muratpaşa Camii teorik modal analiz uygulaması

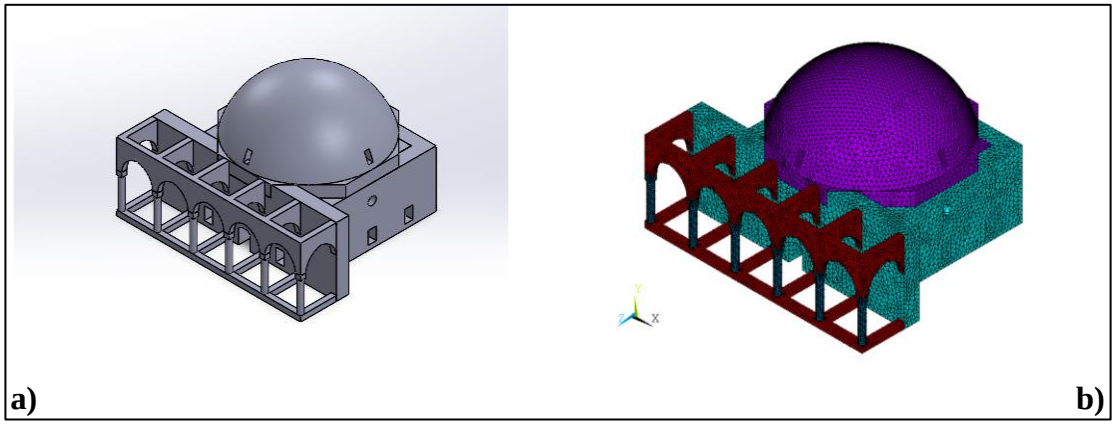
Tez çalışması için seçilen camilerde yapılan yapısal analize esas sonlu eleman model oluşturulma işlemi, Muratpaşa Camii için de aynı şekilde yapılmıştır. Muratpaşa

Camii üzerinde önce keşif çalışması yapılmıştır. Caminin ölçüleri ve malzeme özellikleri belirlenmiştir. Muratpaşa Camii'nin yapı boyutları yerinde ölçülmüştür. Muratpaşa Camii rölevesi Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Ölçülen boyutlar, Muratpaşa Camii'nin cami rölevesinde belirtilen boyutlar ile karşılaştırılarak caminin nihai boyutları belirlenmiştir. Muratpaşa Camii'nin cami rölevesi Şekil 7.45.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.45. Muratpaşa Camii rölevesi

Muratpaşa Camii'nin boyutları belirlendikten sonra sonlu eleman modelinin oluşturulma aşamasına geçilmiştir. Caminin katı modeli Soidworks (2022) yazılımında oluşturulup ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Caminin sonlu eleman modeli Şekil 7.46.'da gösterilmiştir.



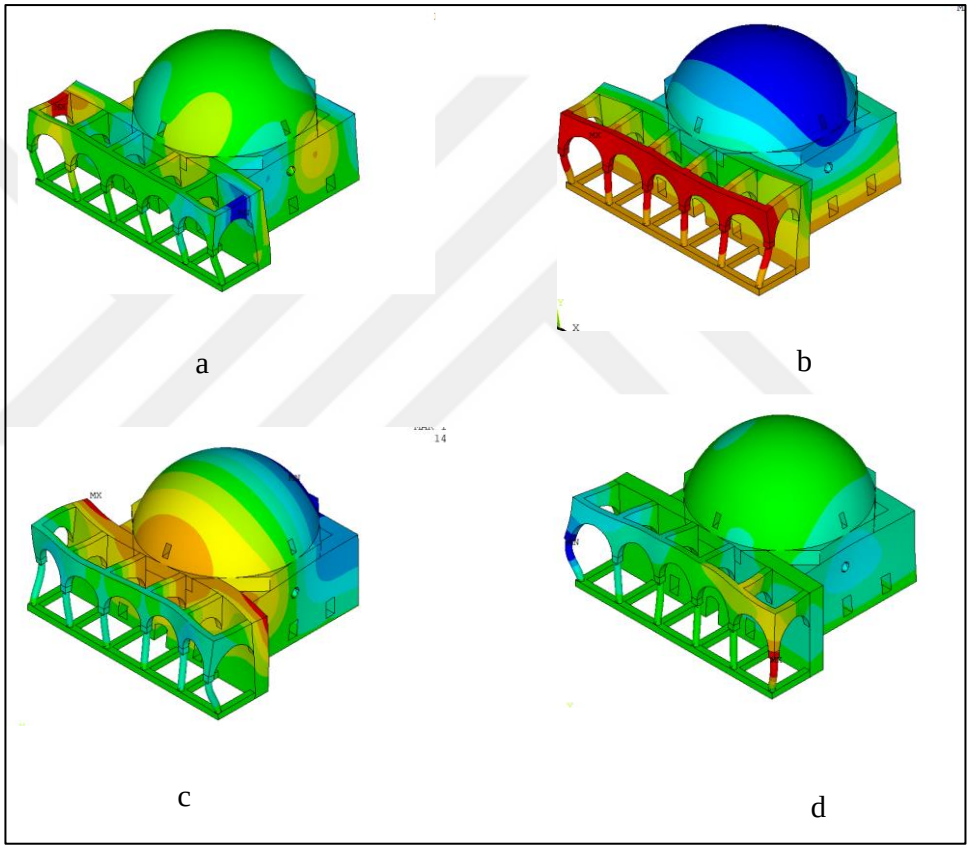
Şekil 7.46. Muratpaşa Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli

Soidworks (2022) yazılımında oluşturulan katı model, ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarıldıktan sonra, Workbench (2016) yazılımında cami elemanlarının küçük sonlu elemanlara bölünme işlemi ağlama (mesh) işlemi yapılmıştır. Bu elemanlar, 40-45 cm boyutunda sonlu küçük elemanlara ayrılacak şekilde ağlama işlemi yapılmıştır. Her bir ağlama sonucunda oluşan küçük elemanlar boyut olarak tetra (onlu) eleman şeklindedir

Caminin duvar taş yapısı incelendiğinde, duvar taş malzemenin andezit ağırlıklı, yer yer bazalt taşlarının da olduğu görülmektedir. Bu taşlara beton Schmidt çekici uygulandığında andezit için ortalama sertlik değeri yaklaşık 25,5; bazalt için ortalama sertlik değeri 19,75 olarak elde edilmiştir. Denklem 7.1 ve Denklem 7.2 kullanılarak taş basınç mukavemetleri hesaplandığında andezit için 23,40 MPa; bazalt için 8 MPa olarak hesaplanmıştır. Ortalama taş basıncını hesaplamak için, duvardaki andezit ve bazalt yüzdelerinden yararlanmıştır. 1 metrekare duvar kesiti incelendiğinde duvardaki taş yüzdeleri %70 andezit ve % 30 bazalt olarak belirlenmiştir. Bu kabule göre ortalama taş basıncı 20,25 MPa olarak hesaplanmıştır. Duvar basınç mukavemeti hesabı için, Pervizoğlu Cami ve Lala Mustafa Paşa Cami'nde kullanılan Denklem 7.3 kullanılmıştır. Harç olarak Horasan harcı kullanılmıştır ve basınç mukavemeti 1,15 MPa olarak hesaplanmıştır. K değeri 0,5; cami duvarları düzgün bir şekilde örüldüğünden α ve β katsayıları 0,7 ve 0,3 olarak kullanılmıştır. Bütün bu değerler kullanılarak duvar basınç mukavemeti ortalama 4,28 MPa, duvar elastisite modülü ise bu değerin 200 katı yani 856 MPa olarak hesaplanmıştır. Kemerler için de aynı elastisite modülü değeri girilmiştir. Kubbe için ise 1000 MPa elastisite modülü değeri girilmiştir. Sütunlar için diğer camilerle benzer şekilde 1080 MPa elastisite modülü değeri girilmiştir. Muratpaşa Camii sonlu eleman modeline duvar mekanik özelliklerinin tanımlanmasının ardından model üzerinde teorik modal analiz yapılmıştır Sonuçlar Çizelge 7.13.'te gösterilmiştir. Teorik mod şekilleri Şekil 7.47.'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.13. Muratpaşa Camii ilk teorik modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (x yönünde)	3,958
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (y yönünde)	4,361
3	Düşey eksen (z yönünde) etrafında yanal burulma hareketi	6,738
4	Kubbe düşey yönlü yer değiştirme (z yönünde) hareket	7,527

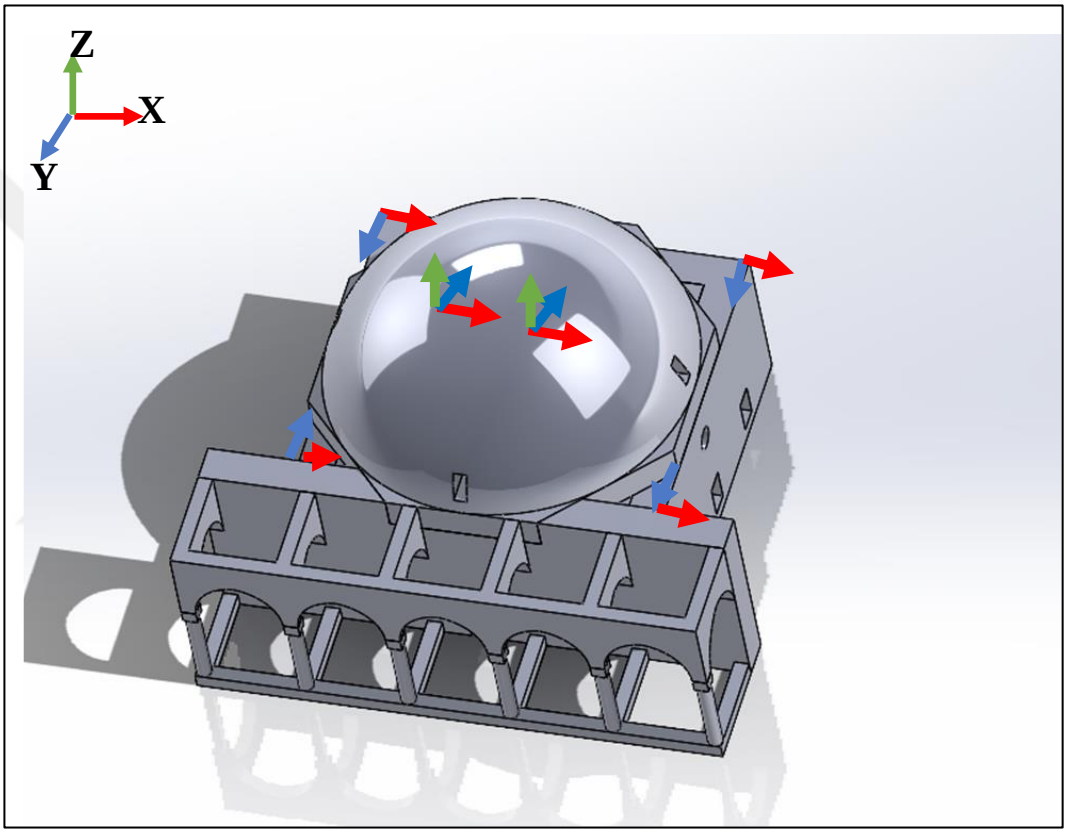


Şekil 7.47. Muratpaşa Camii a) x yönde öteleme b) y yönünde öteleme c) burulma d) kubbe düşey hareketi.

Caminin teorik modal analiz sonuçlarına göre, caminin ikinci modu kısa doğrultuda (x yönü) yatay öteleme hareketi, üçüncü modu uzun doğrultuda (y yönü) yatay öteleme hareketi olarak elde edilmiştir. Yedinci modunda düşey eksen (z yönü) etrafında burulma hareketi, on üçüncü modunda ise z yönünde düşey kubbe hareketi elde edilmiştir. Bu sonuçlardan hareketle cami deneysel modal analiz uygulaması için, cami köşelerine ve cami kubbesine sensör yerleştirme sonucuna ulaşılmıştır.

7.3.2. Muratpaşa Camii operasyonel modal Analiz uygulaması

Caminin modal davranış parametrelerinin belirlenmesi için camide OMA uygulaması yapılmıştır. İvmeölçer yerleşimi, ilk teorik modal analizdeki mod şekilleri baz alınarak yapılmıştır. İvmeölçerler yetersiz kablo uzunluğu, iklim şartlarından cihazların olumsuz etkilenmemesi gibi nedenlerden ötürü cami içine yerleştirilmiştir. Muratpaşa Camii ivmeölçer yerleşim krokisi Şekil 7.48'de gösterilmiştir.



Şekil 7.48. Muratpaşa Camii cami içi ve kubbe vmeölçer yerleşim krokisi

Cami içinde cami köşelerine 8 adet tek eksende ivme kaydı alan tek eksenli kablolu ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Cami teorik modal analiz sonuçları incelendiğinde, ilk üç mod şeklinde, caminin düşey hareketine dair bir mod şekline rastlanmadığı için düşey yönde titreşim kaydı alınmamıştır. İvmeölçerlerin yerleştirilmesi işleminde yapıya herhangi bir hasar vermeden yerleştirilmesi ve sökülmesi en önemli hususdur. İvmeölçerleri sabitleme işleminden önce, yön ve doğrultu belirleme işlemleri yapılması gerekmektedir. Caminin kuzey-güney yön aksı yani kapı-mihrap aksı y yönü, doğu-batı yön aksı yani yan duvarlar aksı ise x yönü olarak tayin edilmiştir. Yön tayinlerinden sonra

8 adet tek eksenli ivmeölçer, cami duvarlarına sıcak silikon ile yapıştırılmıştır ve ivmeölçerlerin üstü güçlü bant ile yapıştırılarak, herhangi bir düşmeye karşı güçlendirilmiştir. Cami içi ivmeölçer yerleşimi Şekil 7.49.'da gösterilmiştir.

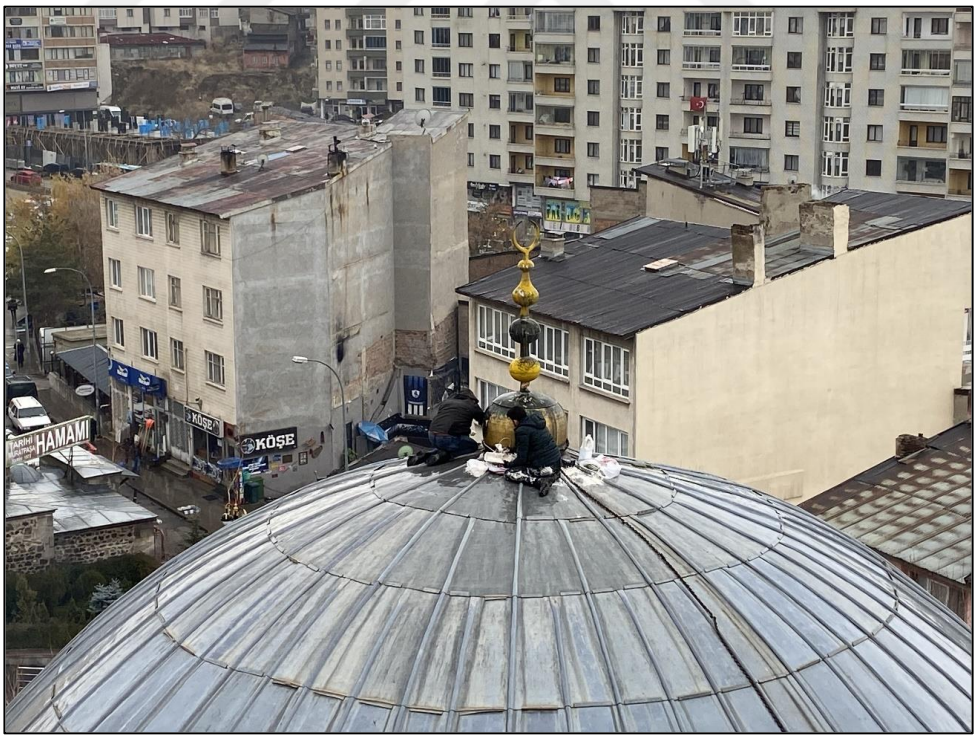


Şekil 7.49. Muratpaşa Camii cami içi ivmeölçer sabitleme işlemi

İvmeölçer yerleştirme işlemi cami içinden sonra cami kubbesinde devam etmiştir. Teorik modal analiz sonuçlarında cami kubbesinin düşey yönde hareketi beklenen bir hareket olduğu için, cami kubbesine de ivmeölçer yerleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kubbeye cami içinden ve cami dışından kolay bir şekilde erişim mümkün olmadığından itfaiye vinci yardımıyla kubbeye çıkılmıştır. Kubbeye önceki camilerden farklı olarak iki adet üç eksenli ivmeölçer yerleştirilmiştir. İvmeölçerlerin yön oku güney yönünü gösterecek şekilde yerleştirilmiştir. İvmeölçerler çabuk donan alçı yardımıyla sabitlenmiştir. Şekil 7.50.'de kubbeye ulaşım, Şekil 7.51.'de ivmeölçer sabitleme işlemi gösterilmiştir.



Şekil 7.50. Muratpaşa Camii kubbeye ulaşım işlemi



Şekil 7.51. İvmeölçerlerin kubbeye sabitlenmesi

İvmeölçerlerin caminin tüm bölümlerinde sabitleme işleminin tamamlanmasının ardından ivmeölçerler özel veri kabloları yardımıyla veri toplama sistemine bağlanmıştır. Veri toplama sistemi Şekil 7.52.'de gösterilmiştir. Her kablo, ivmeölçer için önceden

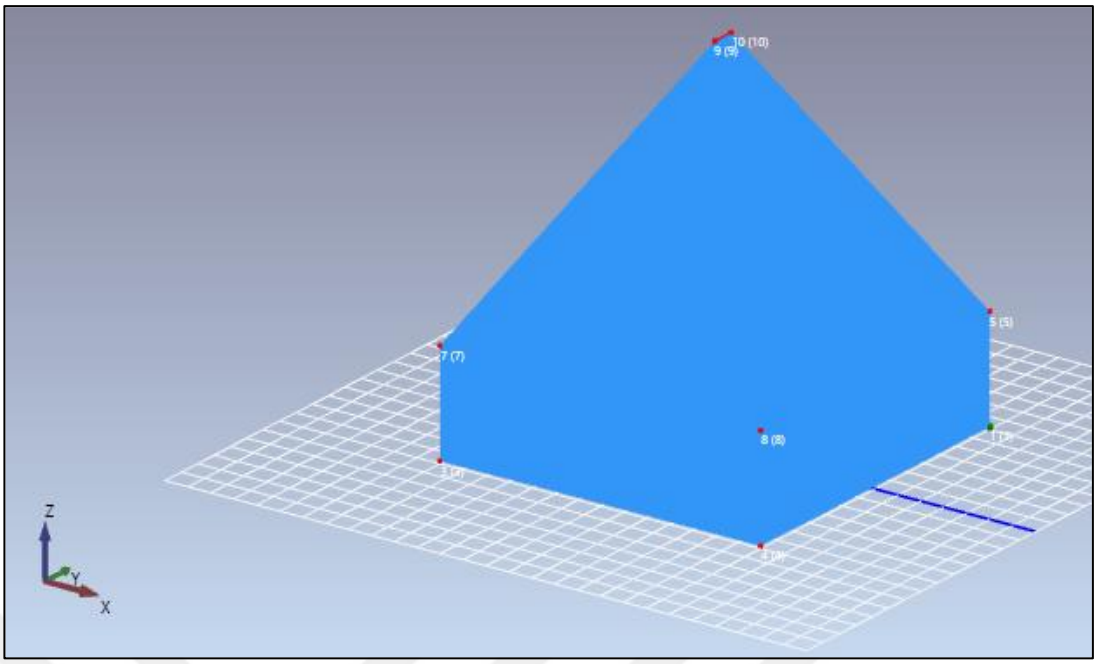
belirlenen kanal numarasına yerleştirilmiştir. İvmeölçerler veri toplama sistemine bağlandıktan sonra her cihazın kendine ait kalibrasyon çarpanı veri toplama sistemine girilmiştir. Bu işlemlerden sonra kayıt işleminden önce cihaz ve kablo kontrolleri yapılmıştır. Gerekli kontroller yapıldıktan sonra kayıt alma işlemine geçilmiştir.



Şekil 7.52. Muratpaşa Camii veri toplama sisteminin kurulması

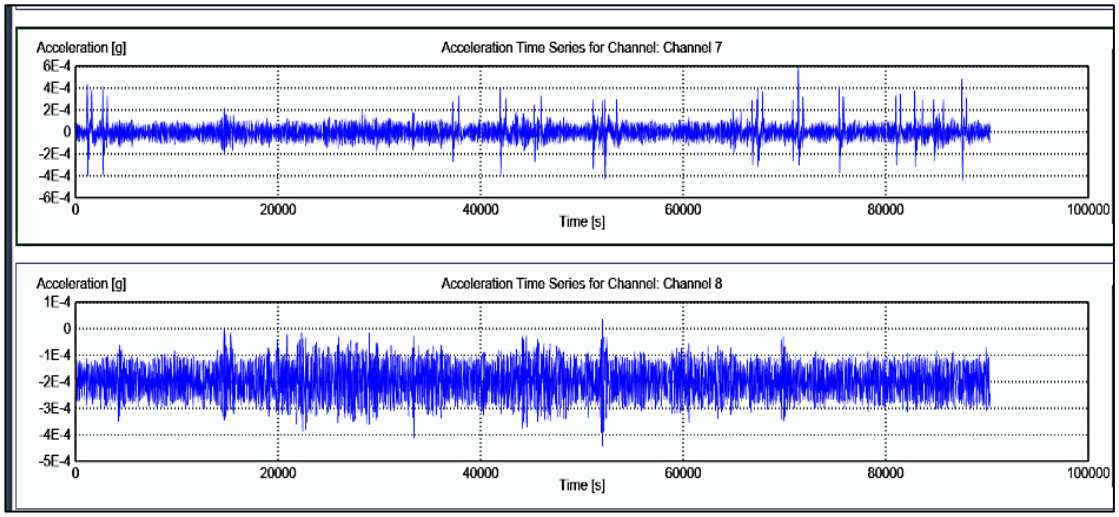
Gerekli kontrollerin ardından kayıt alma işlemine geçilmiştir. Tüm bu değerlendirmelerin ardından 3 adet 100 Hz'lik ve 3 adet 200 Hz'lik olmak üzere 6 adet ivme kaydı alınmıştır. Ölçüm birimi g'dir. Cami, konumu itibariyle araç sürekliliği bakımından seyrek bir bölgededir ve cami için sürekli çevresel titreşim yoktur. Bu nedenle, caminin duvarlarında plastik tokmakla vurularak yapay titreşimler verilmiştir. Kayıt alma işlemleri tamamlandıktan sonra, cami mod şekillerini ve bu mod şekillerine karşılık gelen modal frekans değerlerini elde etmek için veri işleme aşamasına geçilmiştir. Caminin deneysel modal analize esas geometrisi Artemis Modal Pro (2023) yazılımında oluşturulmuştur. Şekil 7.53.'te Muratpaşa Camii'nin Artemis yazılımındaki geometrisi gösterilmiştir.

.



Şekil 7.53. Muratpaşa Camii deneysel modal analize esas geometrisi

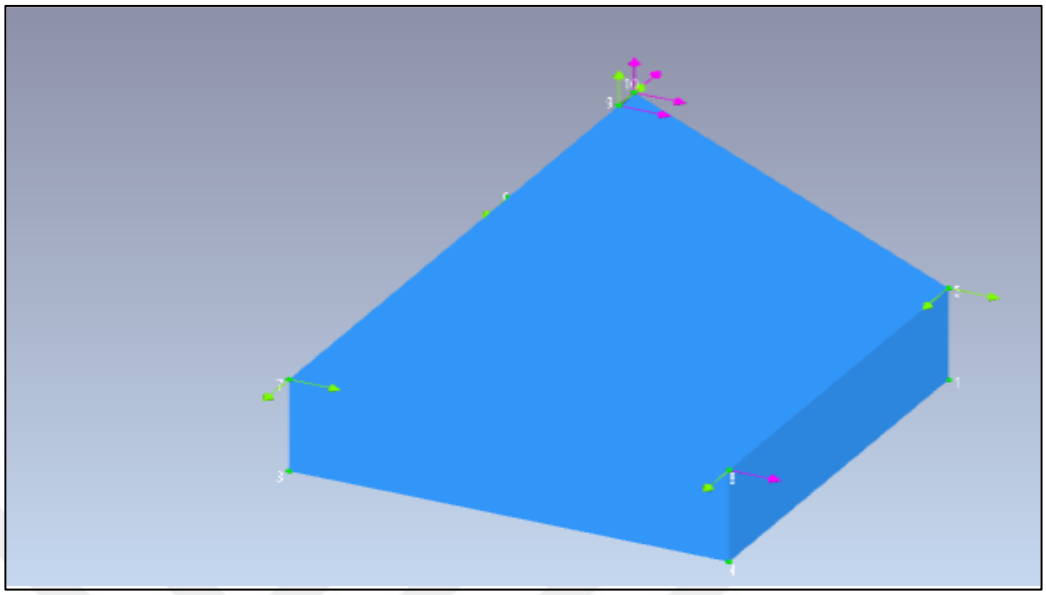
Veri toplama sisteminde her bir ivmeölçerden alınan titreşim kayıtları, Artemis Modal Pro yazılımında ivme-zaman grafiklerine çevrilmiştir. Muratpaşa Camii ivme-zaman grafikleri Şekil 7.54.'te gösterilmiştir.



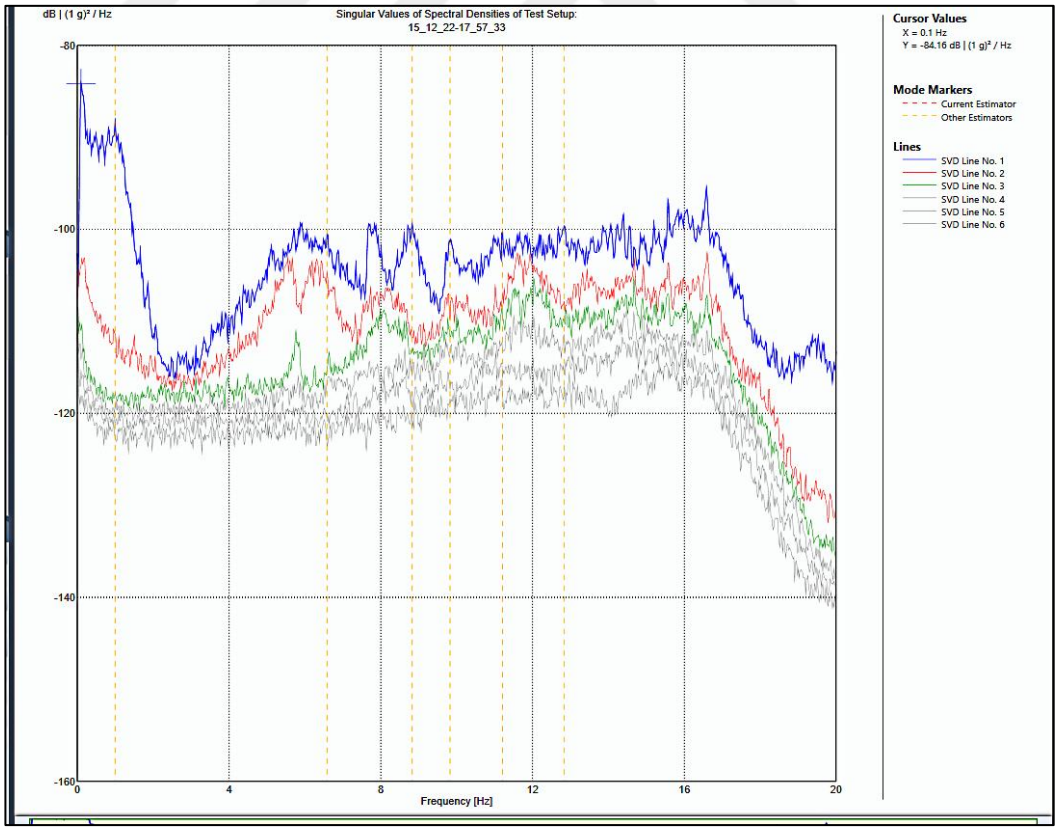
Şekil 7.54. Muratpaşa Camii titreşim kayıtlarının ivme-zaman grafiklerine dönüşümü.

Cami köşelerine yerleştirilen ivmeölçerler, yazılımdaki geometrilerine de ölçüm anındaki doğrultuları bire bir aynı olacak şekilde tanımlanmıştır. Muratpaşa Camii'nin ivmeölçerlerin yönlerinin yazılımda tanıtılması Şekil 7.55.'te gösterilmiştir.

İvmeölçerlerin yönlerinin tanıtılmasının ardından veri analizleri yapılmıştır. Muratpaşa Camii'nin analizdeki spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 7.56.'da gösterilmiştir.



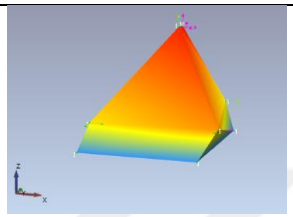
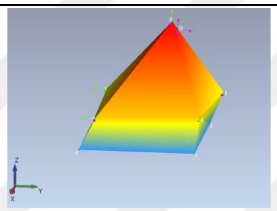
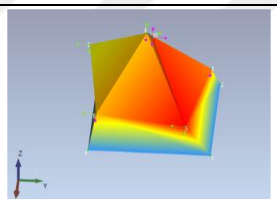
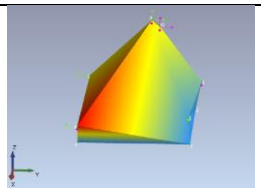
Şekil 7.55. Muratpaşa Camii'nin ivmeölçerlerin ve yönlerinin geometrik modele tanımlanışı.



Şekil 7.56. Muratpaşa Camii spektral yoğunluk fonksiyonu

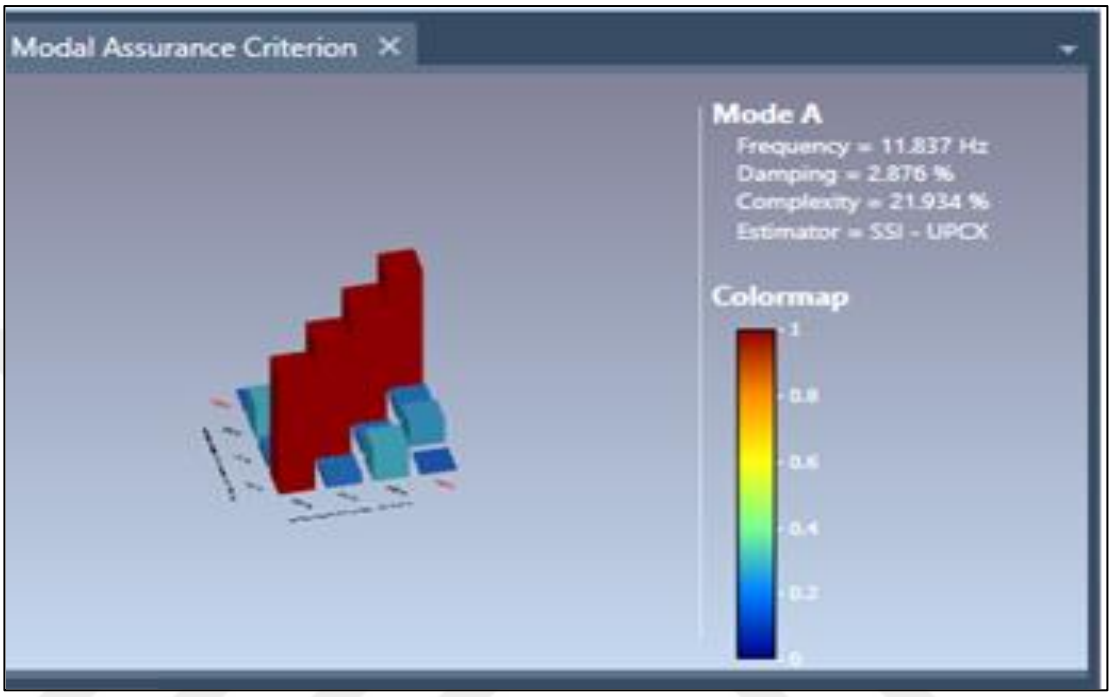
Tüm süreçler tamamlandıktan sonra mod şekilleri ve modal frekans değerlerini elde etme aşamasına geçilmiştir. Yazılımda farklı türde çözümleme yöntemleri mevcuttur. Muratpaşa Camii'nin OMA titreşim kayıtları zaman alanında tanımlı çözüm yöntemi olan SSI-UPCX analiz yöntemiyle çözülerek, caminin deneysel mod şekilleri ve modal frekans değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 7.14.'te gösterilmiştir.

Çizelge 7.14. Muratpaşa Camii OMA sonuçları

Mod Şekli	**Frekans (Hz)**	
Kısa doğrultuda (x yönü) yatay öteleme hareketi		5,310
Uzun doğrultuda (y yönü) yatay öteleme hareketi		5,700
Düşey yönde (z yönü) kubbe hareketi		8,546
Düşey eksen etrafında (z yönü) burulma hareketi		11,837

Cami OMA sonuçlarıdeğerlendirildiğinde, ilk iki modu yatay doğrultulardaki (x ve y) öteleme hareketini içermektedir. Üçüncü moddan sonra burulma modu, sonraki modlarda da kubbe düşey hareket modu elde edilmiştir. Cami gövdesi OMA sonuçları incelendiğinde, caminin doğu duvar hareketinin, bitişiğindeki medrese tarafından sınırlandırıldığı ve batı duvarının önünde hareketi sınırlayacak bir durum olmadığı için en yüksek yer değiştirmenin bu duvarda olduğu görülmüştür. Kubbe modal frekans değerinin, diğer camilere göre yüksek olduğu görülmüştür.

Muratpaşa Camii'nin OMA sonuçlarının güvenilirliğinin belirlenmesi için MAC değerleri kontrol edilmiştir. Şekil 7.57.'de, Muratpaşa Camii'nin MAC değerler grafiği gösterilmiştir. Deneysel modal frekans değerleri kullanılarak oluşturulan Muratpaşa Camii MAC değerleri tablosu Çizelge 7.15.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.57. Muratpaşa Camii MAC değerleri grafiği

Çizelge 7.15. Muratpaşa Camii MAC değerleri tablosu

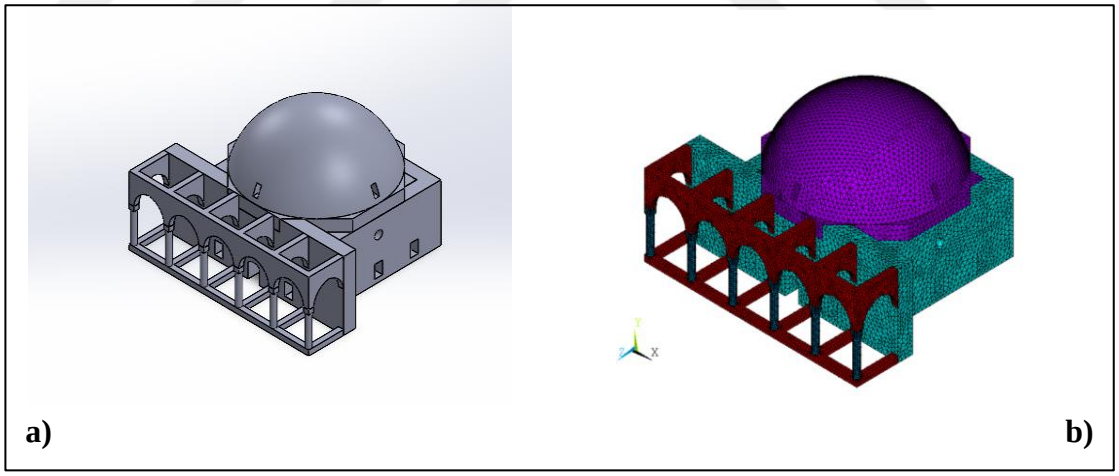
Frekans (Hz)	**5,310**	**5,700**	**8,546**	**11,837**
5,310	**1**	**0.,750**	**0.,678**	**0,0124**
5,700	**0,0750**	**1**	**0,0733**	**0,1890**
8,546	**0.,678**	**0,0733**	**1**	**0,0876**
11,837	**0,0124**	**0,1890**	**0,0876**	**1**

Çizelge 7.15.'te verilen Muratpaşa Camii deneysel modal analiz sonuçlarının MAC değerleri incelendiğinde, modlar arasındaki MAC değerlerinin 0'a yakın olduğu görülmüştür. Bu sonuç, mod şekillerinin birbirinden ayrık olduğu ve deneysel modal

analiz sonuçlarının güvenilir olduğunu göstermektedir. Örnek olarak kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi ile uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi arasındaki MAC değerinin 0,075 olduğu görülmüştür. Bütün modların MAC değerleri incelendiğinde bütün modların birbirinden ayrık ve deneysel modal analizin güvenilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

7.3.3. Muratpaşa Camii sonlu eleman model kalibrasyon çalışması

Muratpaşa Camii üzerinde deneysel modal analizin tamamlanmasının ardından, sonlu eleman model kalibrasyon aşamasına geçilmiştir. Muratpaşa Camii'nin ilk teorik modal analizi için hazırlanan katı model önce Soidworks (2022) yazılımında oluşturulmuştur. Cami minaresi haricindeki cami duvarları, cami kemerleri, kubbesi ve son cemaat yeri bu yazılımla çizilmiştir. Oluşturulan model dinamik analizler için ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Bölüm 7.3.1.'de bu aşamalar detaylı şekilde açıklanmıştır. Muratpaşa Camii'nin katı modeli ve sonlu eleman modeli Şekil 7.58.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.58. Muratpaşa Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli

Soidworks (2022) yazılımında oluşturulan cami katı modeli, sınır koşullarının tanımlanması ve modelin küçük elemanlara bölünme işleminin tamamlanması için Workbench (2016) yazılımına aktarılmıştır. Bölüm 7.3.1'de Muratpaşa Camii katı modeli üzerinde 40 cm boyutunda düzgün dörtyüzlü şeklinde meshleme işlemi yapıldığından bahsedilmiştir. Bu işlem sonunda caminin sonlu eleman modeli 211.101 eleman ve

45.975 düğüm noktalıdır. Mesnet koşulları ve sonlu elemanlara bölünme işlemlerinin tamamlanmasının ardından katı model ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Yazılımda ilk önce sonlu eleman malzeme modeli olarak yazılımda bulunan SOLID65 malzeme modeli güncellenmiştir. Bu malzemenin seçilme nedeni Bölüm 7'de daha önce bahsedilmiştir Muratpaşa Camii'nin, Bölüm 7.3.1.'de tanımlanan duvar elastisite modülleri ile ilk teorik modal analiz gerçekleştirilmiştir. Teorik modal analiz sonuçları ile caminin OMA sonuçları Çizelge 7.16.'da gösterilmiştir.

Çizelge 7.16. Muratpaşa Camii OMA ve ilk teorik modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (x yönünde)	5,310	2,772	93,61
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (y yönünde)	5,700	3,958	50,83
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (z yönünde)	8,546	4,360	103,71
4	Kubbenin düşey yerdeğiştirme hareketi	11,837	7,523	57,34

Çizelge 7.16. incelendiğinde, teorik modal analiz ve OMA sonuçları arasında farklı sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle, yapının ilk iki mod şeklindeki kısa ve uzun doğrultuda öteleme hareketlerindeki hata oranı çok yüksektir. İki modal analiz arasındaki sonuçların birbiriyle örtüşmesi için sonlu eleman model kalibrasyonu gerekmektedir. Model kalibrasyon çalışmaları mesnet koşullarının güncellenmesi, yapının geometrik ölçülerinin gözden geçirilmesi, malzeme özelliklerinin güncellenerek tekrarlı analizlerin yapılmasını içermektedir Caminin, teorik ve OMA sonuçları sıralama ve mod şekli olarak aynı çıktığından mesnet koşulları ve geometrik ölçülerin güncellenmesine gerek duyulmamıştır. Dolayısıyla, Muratpaşa Camii için malzeme elastik modüllerinin güncellenmesi işlemi yapılmıştır. Malzeme elastisite modülleri iterasyon işlemleri caminin OMA sonuçlarına diğer bir deyişle yapının dinamik davranış parametrelerine en

yakın kalibrasyon değerine ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. İterasyon işlemleri sonunda, Muratpaşa Camii için ulaşılan kalibrasyon elastisite modülü değerleri Çizelge 7.17.'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.17. Muratpaşa Camii kalibrasyon elastisite modül değerleri

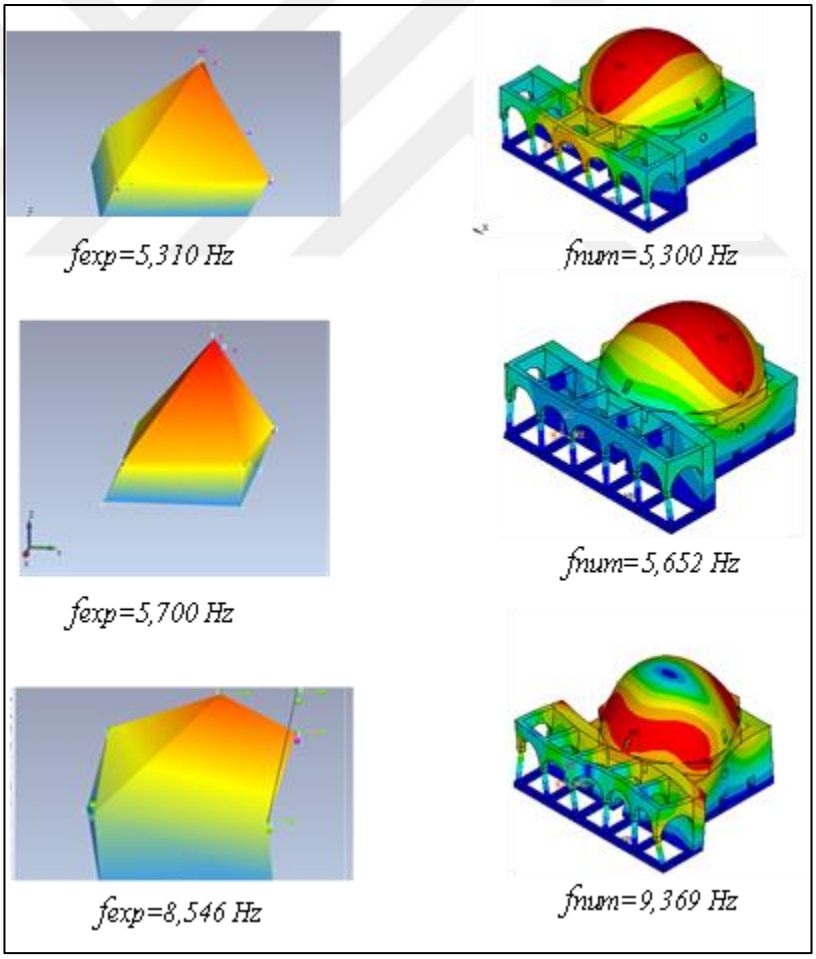
Basınç Dayanımı (MPa)		**Elastisite Modülü (MPa)**							
Duvar Kemer	*Sütun*	*Duvar*		*Kubbe*		*Kemer*		*Sütun*	
		Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra
4,28	28,00	856	2.000	856	780	856	2.000	1.080	10.000

Çizelge 7.17'deki cami duvarları için duvar elastisite modülü değeri 2.000 MPa, kubbe için 780 MPa ve kemerler için 2.000 MPa değerleri modele tanıtıldığında, Muratpaşa Camii'nin, deneysel dinamik davranış parametrelerine en yakın teorik modal parametre değerleri elde edildiği belirlenmiştir. Muratpaşa Camii'nin kalibre edilmiş sonlu eleman model üzerinden hesaplanan teorik modal analiz sonuçlarıyla caminin deneysel modal davranış parametrelerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Özellikle caminin ilk iki mod şekillerine karşılık gelen modal frekans değerleri arasındaki hata oranlarının %1'in altında olduğu görülmüştür. Bu sonlu eleman model kalibrasyonun caminin sonlu eleman modeline tanıtıldığında, caminin doğal dinamik davranış parametrelerini neredeyse yansıttığı görülmüştür.

Çizelge 7.18.'de caminin OMA sonuçları ve bu kalibrasyon elastisite modül değerleriyle yapılan teorik modal analiz sonuçları diğer bir deyişle caminin deneysel ve teorik dinamik davranış parametreleri tablo halinde gösterilmiştir. Şekil 7.59'da Muratpaşa Camii'nin deneysel modal analiz sonuçlarıyla, kalibre edilmiş teorik modal analiz sonuçları şematik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 7.18. Muratpaşa Camii kalibre edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanan teorik modal analiz ve OMA sonuçlarının karşılaştırılması.

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (X yönü)	5,310	5,300	0,18
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (Y yönü)	5,700	5,652	0,84
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (Z yönü)	8,546	9,369	8,78
4	Kubbenin düşey yerdeğiştirme hareketi	11,837	10,255	13,36



Şekil 7.59. Muratpaşa Camii deneysel ve teorik modal analiz sonuçlarının şematik olarak karşılaştırılması.

7.4. Ulu Camii

Erzurum merkez Yakutiye ilçesinde Cumhuriyet Caddesi üzerinde bulunan Ulu Camii, Erzurum'un ve Anadolu'nun en büyük camilerinden biri özelliğini taşımaktadır. Yapım tarihi net olarak bilinmemesine rağmen, caminin günümüze ulaşamayan kitabesinde 1179 yılında Saltuklu beyi Ebul Feth Melik Muhammed tarafından yapıldığı yazılmıştır (Gündoğdu vd 2010). Caminin genel görünümü, Şekil 7.60.'da, caminin konumu Şekil 7.61.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.60. Erzurum Ulu Camii



Şekil 7.61. Erzurum Ulu Camii konumu (Anonim 2022e)

Evliya Çelebi'nin hatıratlarında Ulu Camii hakkında, ilk başta basit toprak damlı, 200 kadar ahşap çam sütunlar üstüne oturtulmuş ve ahşap kirişlerin olduğu bir mimariden bahsedilmiştir. Caminin günümüzdeki haline ne zaman geldiği bilinmemektedir ancak 17. yüzyıldan sonra günümüzdeki mimari yapısına sahip olduğu varsayılmaktadır (Yurttaş 2001). Cami şu andaki haliyle düzgün kesme taştan inşa edilmiştir. Cami inşasında Erzurum yöresine özgü Sivişli taşı kullanılmıştır (Erkmen 2022). Cami 54 m x 41,70 m ölçülerinde dikdörtgen bir plana sahiptir. Cami duvar yüksekliği 9 m, duvar kalınlığı ortalama 1,1 m'dir. Camide 3'ü kuzeyde 2'si doğuda olmak üzere 5 kapı ve farklı cephelerde farklı boyutlarda olmak üzere toplam 23 pencere bulunmaktadır. Cami yirmi sekiz serbest ve dikdörtgen planlı paye üzerine cami oturtulmuştur. Cami girişinden itibaren üç farklı tonoz türü camide kullanılmıştır. Bunların ilk ikisi beşik tonoz, üçüncü tonoz mukarnas tipinde, dördüncü tipi çapraz aynalı tonoz kullanılmıştır. Caminin mihrap önünde ahşap malzemeden yapılmış kırlangıç bir kubbe vardır. Cami toplamda yedi sahına ayrılmıştır. Ortadaki beş sahın, diğer iki sahından genişlik, düzen ve kemer bakımından ayrılmıştır. Caminin batı doğu ekseninde 6 m açıklıkla inşa edilen sahınlarından caminin batısındaki sahınlar, basık beşik tonozlarla örtülmüştür. Caminin doğu sahınlarında ise ayaklar karşılıklı ters T şeklindedir ve enlemesine uzanan sivri beşik tonozlarla örtülmüştür. Caminin kuzeybatısında 25,5 m yüksekliğinde kaidesi taştan gövdesi tuğladan yapılmış minare bulunmaktadır. Cami kaidesinde, caminin eski zamanlarından kalan moloz yığınlar bulunmaktadır (Gündoğdu vd 2020; Karamağaralı 1981). Caminin iç görünümü Şekil 7.62.'de gösterilmiştir.

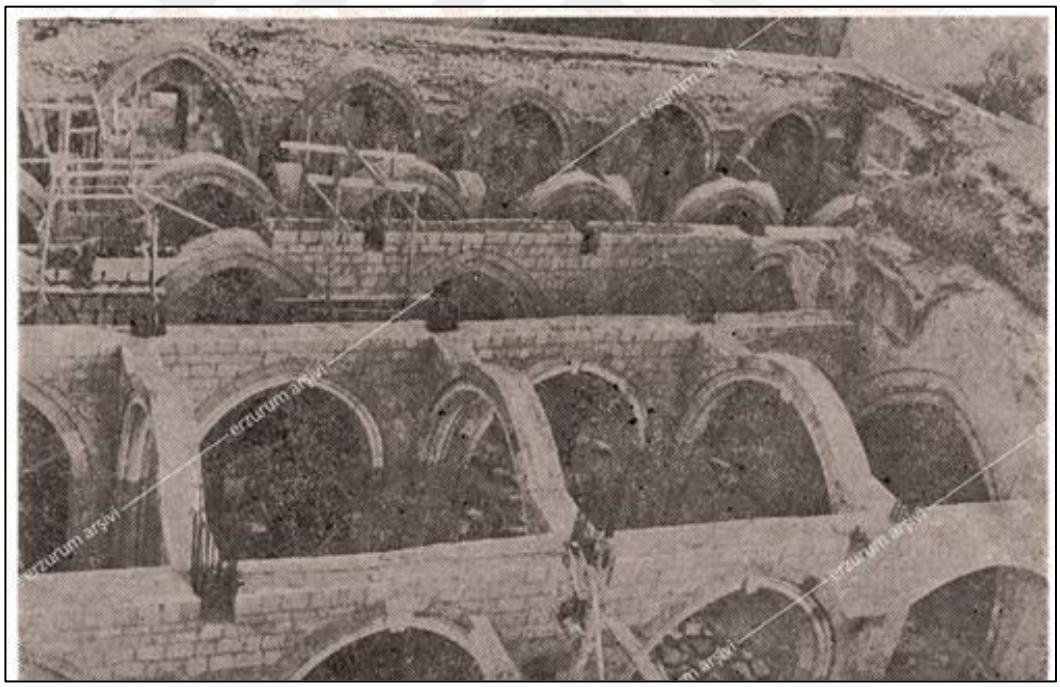


Şekil 7.62. Ulu Camii iç görünümü

Cami, günümüze kadar birçok kez onarım sürecinden geçmiştir. Bazı kaynaklarda caminin beş kez onarımdan geçtiği aktarılmıştır (Konyalı 1960). 1858-1859 yılında caminin geçirdiği onarımın kitabesi caminin doğu kapısında durmaktadır. Bu tarihten önce de caminin geçirdiği onarımlar camide kitabe olarak kayda alınmıştır, fakat bu kitabeler günümüze ulaşamamıştır. Caminin 1965 yılında geçirdiği kapsamlı onarımda, bütün ayaklar, kemerler, tonozlar yeniden inşa edilmiştir. Bu ayak ve tonozların çekirdeği betonarme şeklinde inşa edilmiştir ve bu çekirdekler düzgün kesme taşla kaplanmıştır. Caminin, orijinal kalan parçası minaresi, dış duvarlar ve mihrap bölümüdür (Anonim 2022f; Karamağaralı 1981). Ulu Camii'nin hasarlı hali Şekil 7.63.'te, yeniden inşası Şekil 7.64.'te gösterilmiştir. Caminin 1859 depreminde hasar aldığı ve bu hasarın doğu duvarında olduğu kaynaklarda belirtilmiştir.



Şekil 7.63. Ulu Camii hasarlı hali (Anonim 2022f)

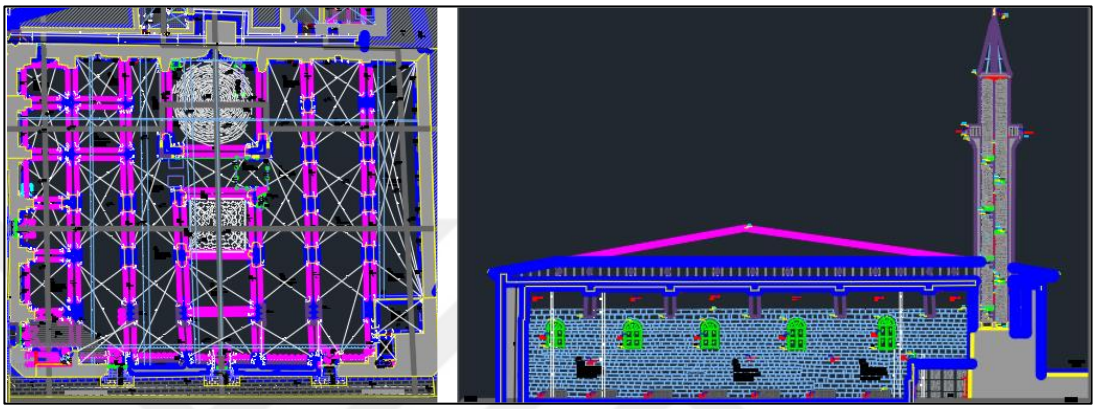


Şekil 7.64. Ulu Camii kemer ve tonozların yeniden inşası (Anonim 2022f)

7.4.1. Ulu Camii teorik modal analiz uygulaması

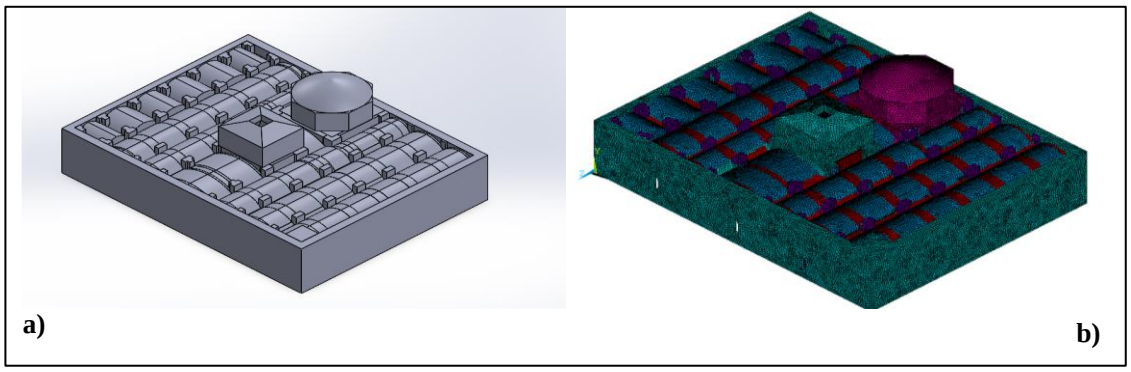
Tez çalışmasında seçilen camilerde yapılan yapısal analize esas sonlu eleman modelinin oluşturulma işlemi Ulu Camii için de aynı yöntemle yapılmıştır. Ulu Camii

üzerinde önce keşif çalışması yapılmıştır. Caminin ölçüleri ve malzeme özellikleri belirlenmiştir. Ulu Camii'nin yapı boyutları yerinde ölçülmüştür. Ulu Camii rölevesi Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Ölçülen boyutlar, Ulu Camii'nin cami rölevesinde belirtilen boyutları ile karşılaştırılarak caminin sonlu eleman modellemesi için nihai boyutları belirlenmiştir. Ulu Camii'nin cami rölevesi Şekil 7.65.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.65. Ulu Camii rölevesi

Ulu Camii'nin boyutları belirlendikten sonra sonlu eleman modelinin oluşturulma aşamasına geçilmiştir. Caminin katı modeli Soidworks (2022) yazılımında oluşturulup ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Caminin sonlu eleman modeli Şekil 7.66.'da gösterilmiştir.



Şekil 7.66. Ulu Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli

Soidworks (2022) yazılımında oluşturulan katı modeli ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmadan önce Workbench (2016) yazılımında sonlu elemanların küçük sonlu elemanlara bölünme işlemi ağlama (mesh) işlemi yapılmıştır. Bu elemanlar,

40-45 cm boyutunda sonlu küçük elemanlara ayrılacak şekilde ağlama işlemi yapılmıştır. Her bir ağlama sonucunda oluşan küçük elemanlar boyut olarak tetra (onlu) eleman şeklindedir.

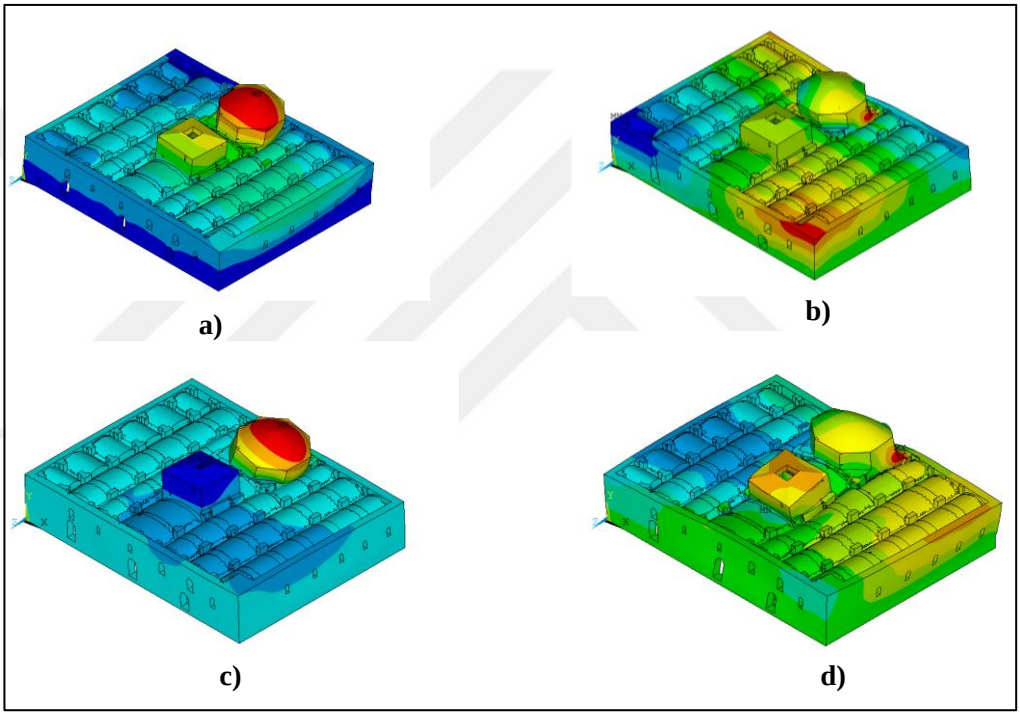
Ulu Camii'de, cami duvar yapı malzemesi olarak Erzurum yöresine özgü Sivişli taşı kullanıldığı belirtilmiştir (Erkmen 2022). Denklem 7.2 ve Denklem 7.3' te verilen taş basınç mukavemeti bağıntıları, Sivişli taşı için kullanılmamaktadır. Erkmen (2022), çalışmasında beton Schmidt çekici yardımıyla Sivişli taşının sertlik değerinden taş basınç mukavemetine ulaşmak için;

$$f_c = 0{,}4751R_h + 5{,}5717 \quad (7.6)$$

bağıntısını oluşturmuştur. Burada f_c, Sivişli taş basınç mukavemetini, R_h, beton Schmidt çekicinin yatay kullanılması ile oluşana sertlik değerini ifade etmektedir. Ulu Camii duvarları üzerinde beton Schmidt sertlik deneyi yapılarak, Sivişli taşının yüzey sertlik değerleri belirlenmiştir. Ortalama sertlik değeri 24,48 olarak hesaplanmıştır. Bu sertlik değeri, Denklem 7.5'te yerine konulduğunda ortalama Sivişli taşı basınç mukavemeti değeri 17,20 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değer kullanılarak, duvar basınç mukavemetine ve duvar elastisite modülüne ulaşmak için Denklem 7.3 ve Denklem 7.4'teki bağıntılar kullanılmıştır. K değeri 0,5; α ve β değerleri duvarlar düzgün bir biçimde örüldüğü için 0,70 ve 0,30; kullanılan harç türü Horasan harcı olduğu için harç basınç mukavemeti 1,15 MPa alınmıştır. Bu bağıntı kullanarak ortalama duvar basınç mukavemeti 4,89 MPa, duvar elastisite modül değeri ise 978 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değerler cami duvarlarına, kemerlerine girilmiştir. Ahşap kubbe değeri için de 500 MPa olarak girilmiştir. Ulu Camii sonlu eleman modeline duvar mekanik özelliklerinin tanımlanmasının ardından model üzerinde teorik modal analiz yapılmıştır. Modal analiz sonuçları Çizelge 7.19.'da gösterilmiştir. Teorik mod şekilleri Şekil 7.67.'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.19. Ulu Cami ilk teorik modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)
1	Uzun doğrultuda (x yönünde) yatay öteleme hareketi	2,524
2	Kısa doğrultuda (y yönünde) yatay öteleme hareketi	2,661
3	Batı duvar hareketi	3,094
4	Düşey eksen etrafında(z yönünde) yanal burulma hareketi	3,881

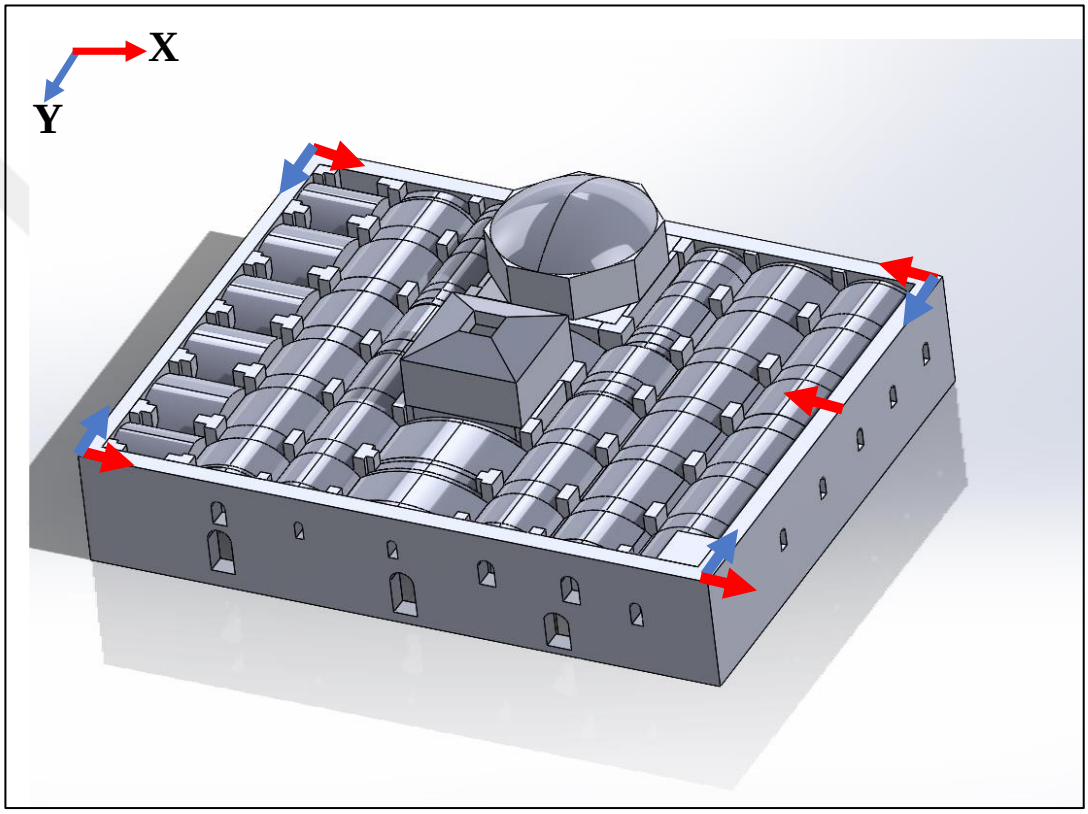


Şekil 7.67. Ulu Camii a) uzun doğrultuda öteleme b) kısa doğrultuda öteleme c) duvar hareketi d) burulma hareketi.

Caminin teorik modal analiz sonuçlarına göre, caminin ilk modu uzun doğrultuda (x yönü) yatay öteleme hareketi, ikinci modu uzun doğrultuda (y yönü) yatay öteleme hareketi olarak elde edilmiştir. Dördüncü modda cami gövdesi batı duvar hareketi, altıncı modda düşey eksen (z yönü) etrafında burulma hareketidir. Bu sonuçlara göre cami deneysel modal analiz uygulaması için, cami köşelerine ve cami batı duvar ortasına ivmeölçer yerleştirme sonucuna ulaşılmıştır

7.4.2. Ulu Camii operasyonel modal analiz uygulaması

Caminin modal davranış parametrelerinin belirlenmesi için camide OMA uygulaması yapılmıştır. İvmeölçer yerleşimi, ilk teorik modal analizdeki mod şekilleri baz alınarak yapılmıştır. İvmeölçerler yetersiz kablo uzunluğu, iklim şartlarından cihazların olumsuz etkilenmemesi gibi nedenlerden ötürü cami içinde ivmeölçer yerleşimi yapılmıştır: Ulu Camii ivmeölçer yerleşim krokisi Şekil 7.68.'de gösterilmiştir.

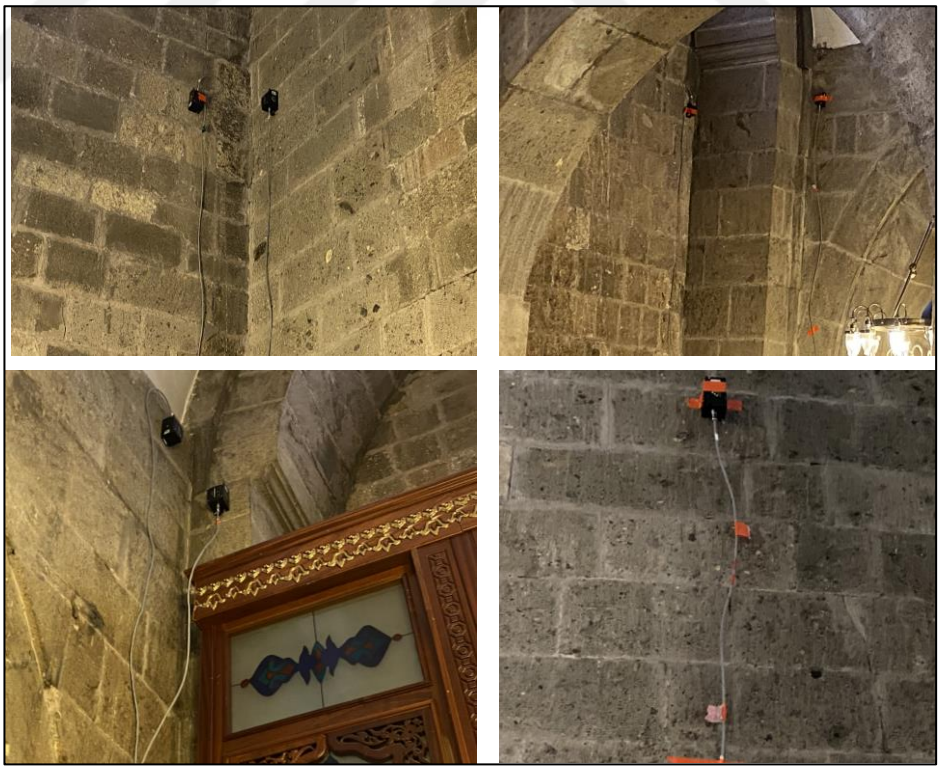


Şekil 7.68. Ulu Camii cami içi ivmeölçer yerleşim krokisi

Caminin ilk teorik modal analiz sonuçları incelendiğinde davranışında düşey eksenli bir hareket sonucuna erişilmediği için ivmeölçerlerin x ve y doğrultusunda ölçüm alacak şeklinde yerleştirilmesi yeterlidir. Caminin kuzey-güney aksı (kapı ve kıble arası) y doğrultusu, doğu batı aksıysa x doğrultusu olarak belirlenmiştir. Diğer bir deyişle caminin kısa doğrultu y yönü, uzun doğrultu x yönü olarak belirlenmiştir. Normal şartlarda, cami köşelerine iki doğrultuda bağlanan ivmeölçerler caminin doğal dinamik davranış parametrelerini belirlemek açısından yeterlidir. Fakat Ulu Camii batı duvarında diğer duvarlar gibi kemerlerin bağlandığı bir sütun bulunmamaktadır. Dolayısıyla batı

duvarın hareketini sınırlayacak bir etki olmadığı için bu duvarın da hareket etmesi, ölçüm öncesinde beklenen doğal dinamik davranış parametrelerinden biridir. Zaten, cami modelindeki ilk teorik modal analiz sonucunda bu hareket, caminin bir mod şekli olarak görülmüştür. Sonuç olarak batı duvarının tam ortasına da tek eksenli bir ivmeölçer bağlanması kararlaştırılmıştır.

Daha önceki cami krokilerinde, ivmeölçer numarası ile ivmeölçerin bağlı olduğu veri toplama sistemindeki kanal numarası aynıdır. Fakat Ulu Camii'de 2 nolu cihaz ve 2 nolu kanalda titreşim kaydı öncesi bir sıkıntı olduğu fark edilmiştir. Bunun üzerine ivmeölçer ve kanal no değişikliğine gidilmiştir. Şekil 7.68'de verilen krokide koyu renkli ifade edilen numaralar cihaz numarasını, diğer numaralar da veri toplama sisteminde bağlı oldukları kanal numarasını göstermektedir. Bu krokiye dayanarak, cami köşelerine 8 adet ve cami duvarına 1 adet olmak üzere toplam 9 adet tek eksenli ivmeölçerler, bağlanmıştır. Bu ivmeölçerler sıcak silikon ve güçlü bant yardımıyla duvarlara sabitlenmiştir. Cami içi ivmeölçer yerleşimi Şekil 7.69.'da gösterilmiştir.



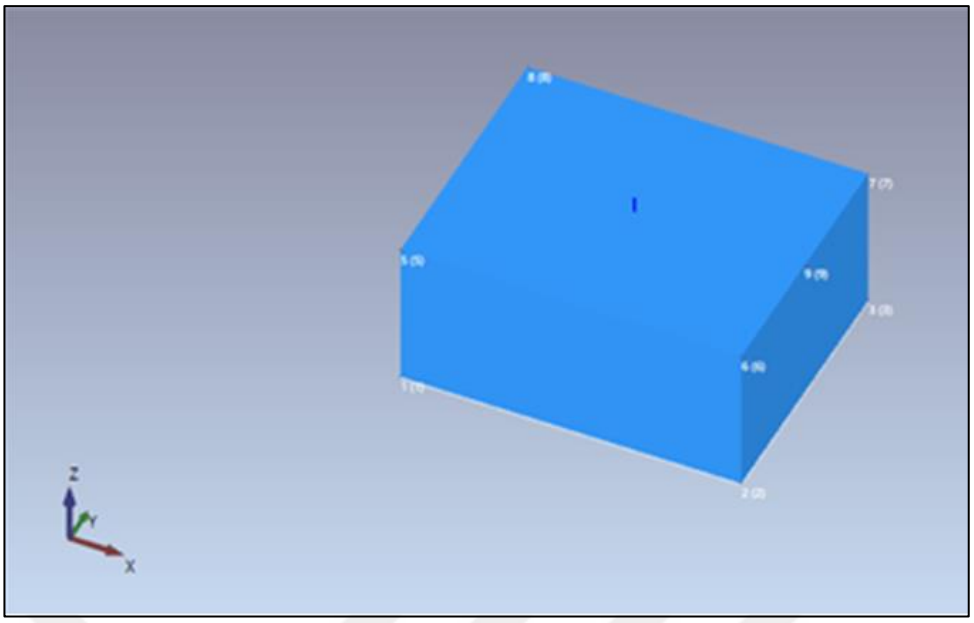
Şekil 7.69. Ulu Camii ivmeölçer sabitleme işlemi

İvmeölçerler, duvarlara sabitlendikten sonra, uzun veri taşıyıcı kablolar yardımıyla veri toplama sistemine bağlanmıştır. Veri toplama sistemi Şekil 7.70.'te gösterilmiştir. Titreşim kaydı almadan önce kablolar ve ivmeölçerler kontrol edilmiştir, arızalı cihaz ve kablolar değiştirilmiştir. Cihazlar, veri toplama sistemine tek tek bağlanmıştır. Veri toplama sisteminde her cihaz için ayrı ayrı tanımlanmış olan kalibrasyon çarpanı değerleri, veri toplama sistemine girilmiştir.



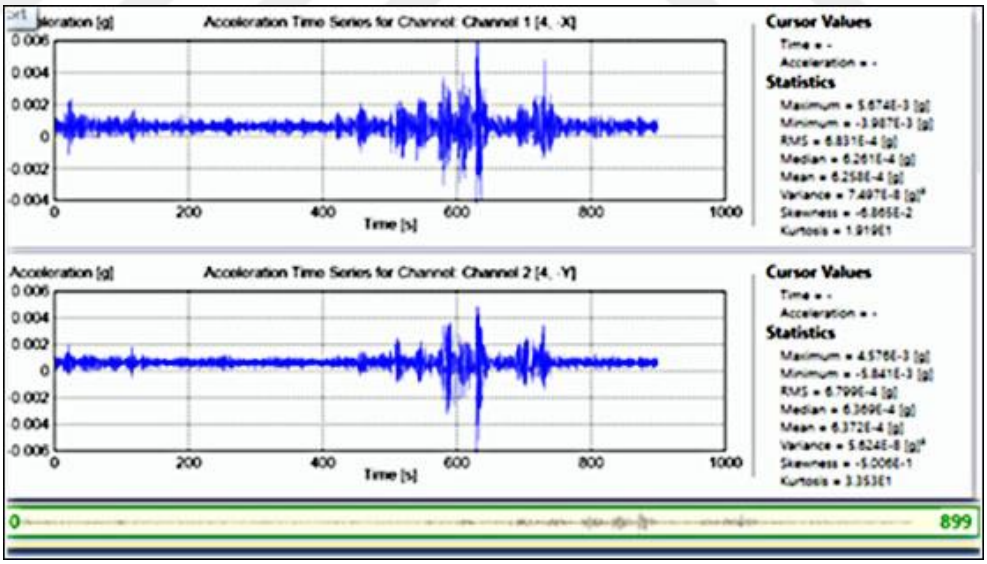
Şekil 7.70. Ulu Camii veri toplama sisteminin kurulması

Tüm kontroller tamamlandıktan sonra kayıt alma işlemine geçilmiştir. Deneme kaydı alındıktan sonra 7 adet 100 Hz ve 7 adet 200 Hz olmak üzere toplam 14 adet 15 er dakikalık (900 sn) titreşim kayıtları alınmıştır. Cami, trafik yoğunluğunun sürekli olduğu bir konumda olduğundan sürekli çevresel titreşim etkisindedir. Bu titreşim durumuna ek olarak kayıt alınırken, deneysel dinamik parametrelerin analizlerde elde edilebilmesi için cami duvarlarına plastik tokmakla vurularak camide sanal bir titreşim yaratılmıştır. Kayıt alma işleminin tamamlanmasının ardından, elde edilen cami titreşim kayıtları Artemis Modal Pro yazılımında işlenmiştir. Caminin deneysel modal analize esas geometrisi Artemis Modal Pro (2023) yazılımında oluşturulmuştur. Şekil 7.71.'de Ulu Camii'nin Artemis yazılımındaki geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 7.71. Ulu Camii deneysel Artemis yazılım geometrisi

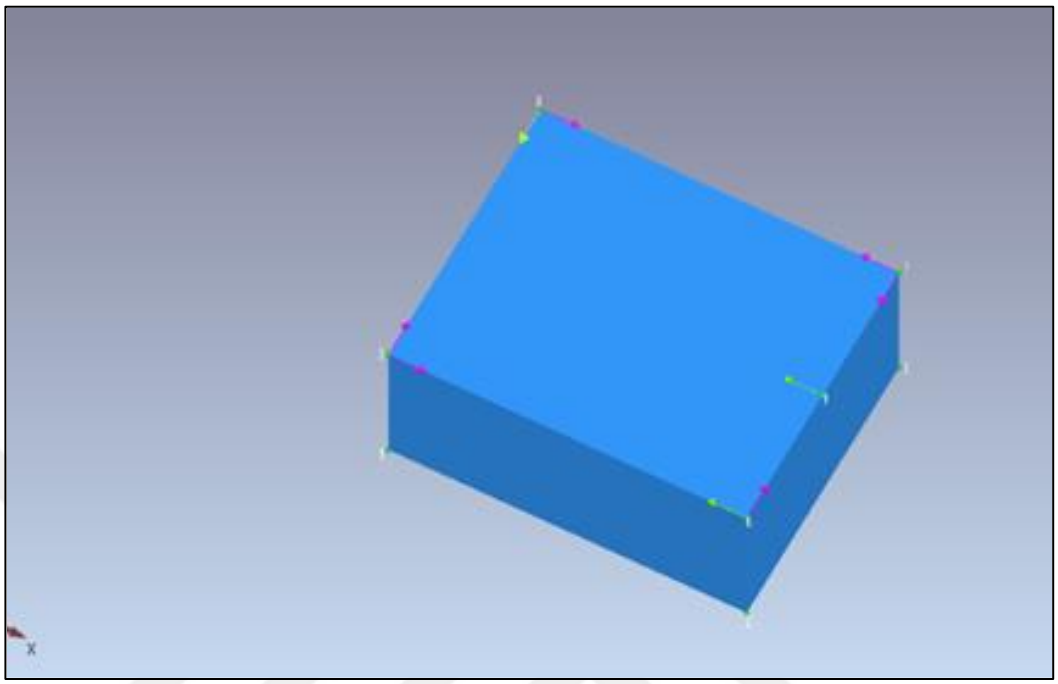
Veri toplama sisteminde her bir ivmeölçerden alınan titreşim kayıtları, Artemis Modal Pro yazılımında ivme-zaman grafiklerine çevrilmiştir. Ulu Camii ivme-zaman grafikleri Şekil 7.72.'de gösterilmiştir.



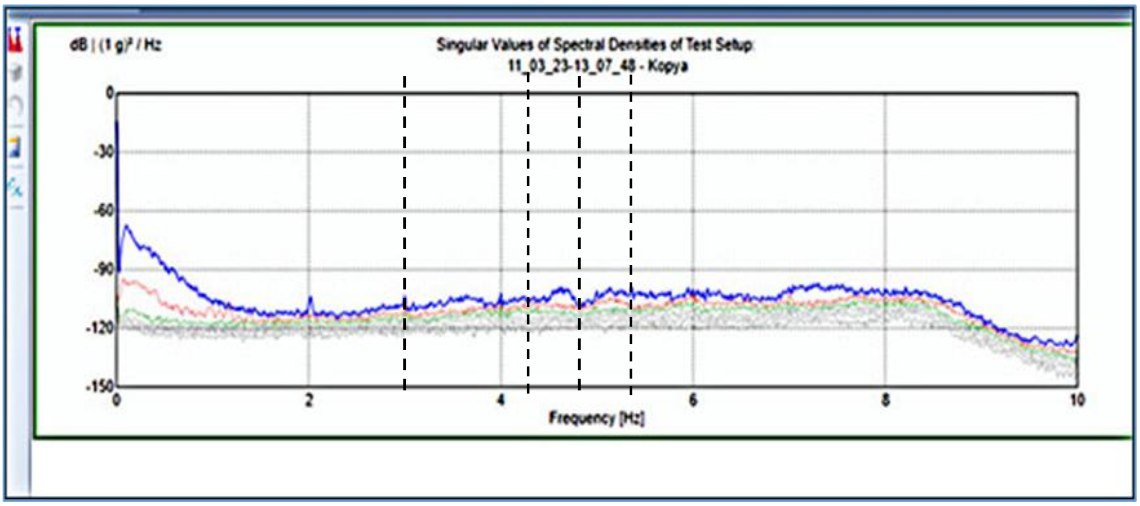
Şekil 7.72. Ulu Camii titreşim kayıtlarının ivme-zaman grafiklerine dönüşümü

Cami köşelerine yerleştirilen ivmeölçerler, yazılımdaki geometrilerine de ölçüm anındaki doğrultuları bire bir aynı olacak şekilde tanımlanmıştır. Ulu Camii'nin ivmeölçerlerin yönlerinin yazılımda tanıtılması Şekil 7.73.'te gösterilmiştir.

İvmeölçerlerin yönlerinin tanıtılmasının ardından veri analizleri yapılmıştır. Ulu Camii'nin analizdeki spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 7.74.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.73. Ulu Camii ivmeölçerlerin ve yönlerinin Artemis geometrisinde tanımlanması

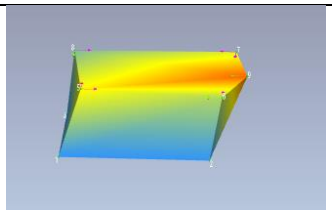
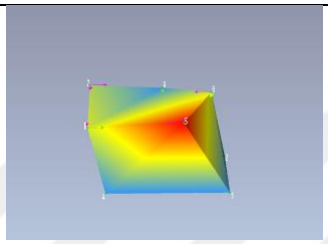
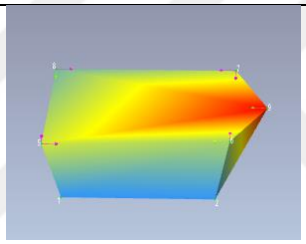
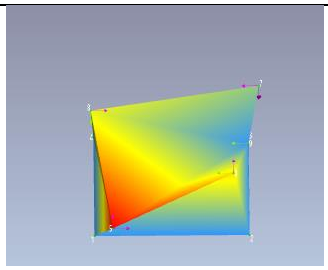


Şekil 7.74. Ulu Camii spektral yoğunluk fonksiyonu

Tüm süreçler tamamlandıktan sonra, mod şekilleri ve modal frekans değerlerini elde etme aşamasına geçilmiştir. Yazılımda farklı türde çözümleme yöntemleri mevcuttur. Ulu Camii'nin OMA titreşim kayıtları zaman alanında çözüm yöntemi SSI-

UPCX analiz yöntemiyle çözülerek, caminin deneysel mod şekilleri ve modal frekans değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 7.20.'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.20. Ulu Camii cami gövdesi OMA sonuçları

Mod Şekli	**Frekans (Hz)**	
Uzun doğrultuda (x yönü) yatay öteleme hareketi		3,684
Kısa doğrultuda (y yönü) yatay öteleme hareketi		4,309
Batı duvar öteleme hareketi		4,645
Düşey eksen etrafında (z yönünde) yanal burulma hareketi		5,491

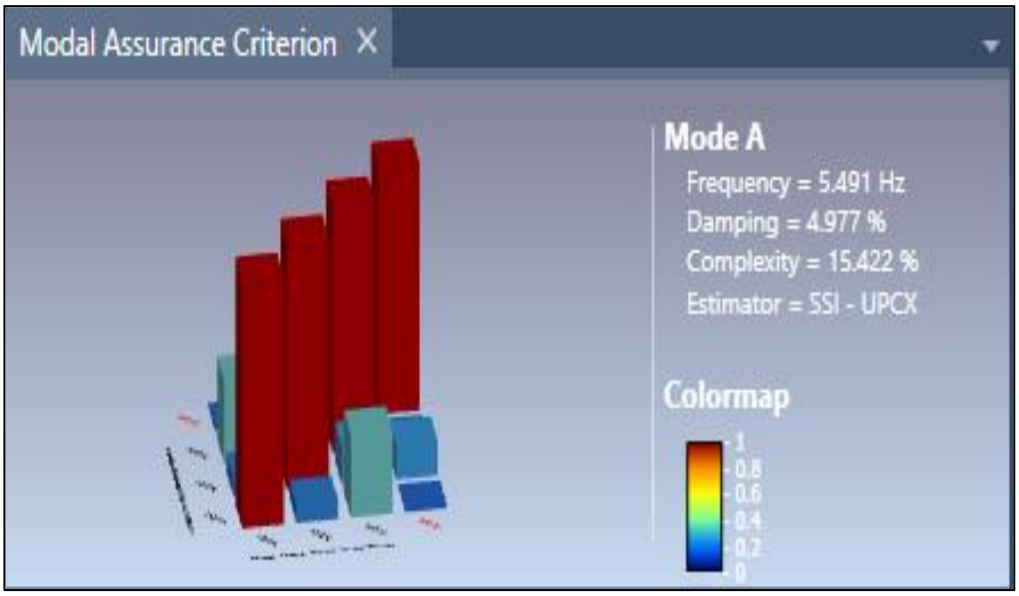
Operasyonel modal analiz sonucunda, ilk mod şeklinin uzun doğrultuda (x yönünde) öteleme, ikinci mod şeklinin kısa doğrultuda (y yönünde öteleme), üçüncü mod şeklinin caminin batı duvarın x yönünde hareketi ve dördüncü mod şeklinin ise burulma modu olduğu görülmüştür. Analiz sonucunda beklenilen ilk mod kısa doğrultuda öteleme hareketidir. Ancak Ulu Camii'de ilk mod uzun doğrultuda öteleme olarak çıkmıştır. Caminin kısa doğrultusunda bulunan boylu boyunca uzanan kemer yapılarının ilk mod öteleme hareketine mâni olduğu düşünülmektedir. OMA sonucunda caminin doğu kapısı

tarafında ve kuzey duvarında hasarlı bölgeler olduğu hem gözlemlerde hem de OMA'da tespit edilmiştir. Bu hasarlar Şekil 7.75.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.75. Ulu Camii kuzey duvar çatlağı

Ulu Camii'nin OMA sonuçlarının, güvenilirliğinin belirlenmesi için MAC değerleri kontrol edilmiştir. Şekil 7.76.'da Ulu Camii'nin MAC değerler grafiği gösterilmiştir. Deneysel modal frekans değerleri kullanılarak oluşturulan Ulu Camii MAC değerleri tablosu Çizelge 7.21.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.76. Ulu Camii MAC değerleri grafiği

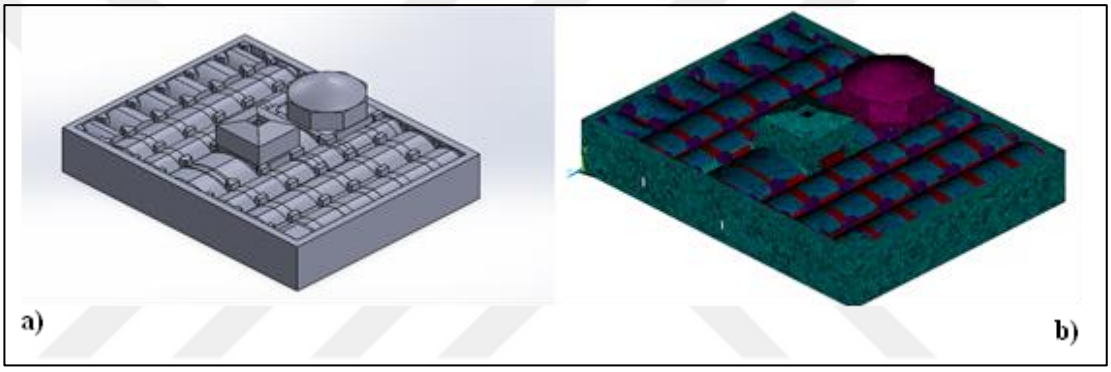
Çizelge 7.21. Ulu Camii MAC değerleri tablosu

Frekans (Hz)	**3,684**	**4,309**	**4,645**	**5,491**
3,684	**1**	**0,0746**	**0,337**	**0,0125**
4,309	**0,0746**	**1**	**0,1547**	**0,1387**
4,645	**0,337**	**0,1547**	**1**	**0,1221**
5,491	**0,0125**	**0,1387**	**0,1221**	**1**

Çizelge 7.21'de verilen Ulu Camii deneysel modal analiz sonuçlarının MAC değerleri incelendiğinde, modlar arasındaki MAC değerlerinin 0'a yakın olduğu görülmüştür. Bu sonuç, mod şekillerinin birbirinden ayrık olduğunu ve deneysel modal analiz sonuçlarının güvenilir olduğunu göstermektedir. Örnek olarak kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi ile uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi arasındaki MAC değerinin 0,0746 olduğu görülmüştür. Bütün modların MAC değerleri incelendiğinde bütün modların birbirinden ayrık ve caimi üzerinde yapılan OMA'nın güvenilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

7.4.3. Ulu Camii sonlu eleman model kalibrasyon çalışması

Ulu Camii üzerinde deneysel modal analizin tamamlanmasının ardından, sonlu eleman model kalibrasyon aşamasına geçilmiştir. Ulu Camii, ilk teorik modal analizi için hazırlanan katı model önce Soidworks (2022) yazılımında oluşturulmuştur. Cami minaresi haricindeki cami duvarları, cami kemerleri, kubbesi ve son cemaat yeri bu yazılımla çizilmiştir. Oluşturulan model dinamik analizler için ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Bölüm 7.4.1.'de bu aşamalar detaylı şekilde açıklanmıştır., Ulu Camii'nin katı modeli ve sonlu eleman modeli Şekil 7.77.' de gösterilmiştir.



Şekil 7.77. Ulu Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli

Soidworks (2022) yazılımında oluşturulan cami katı modeli, sınır koşullarının tanımlanması ve modelin küçük elemanlara bölünme işleminin tamamlanması için Workbench (2016) yazılımına aktarılmıştır. Bölüm 7.4.1'de Ulu Camii katı modeli üzerinde 40 cm boyutunda düzgün dörtyüzlü (tetrahedral) şeklinde meshleme işlemi yapıldığından bahsedilmiştir. Bu işlem sonunda caminin sonlu eleman modeli 942.147 eleman ve 200.807 düğüm noktalıdır. Mesnet koşulları ve ağlama işlemlerinin tamamlanmasının ardından katı model ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Yazılımda ilk önce sonlu eleman malzeme modeli olarak yazılımda bulunan SOLID65 malzeme modeli güncellenmiştir. Bu malzemenin seçilme nedeni Bölüm 7'de daha önce bahsedilmiştir Ulu Camii'nin, Bölüm 7.4.1.' de tanımlanan duvar elastisite modülleri ile ilk teorik modal analiz gerçekleştirilmiştir. Teorik modal analiz sonuçları ile caminin OMA sonuçları Çizelge 7.22.'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.22. Ulu Camii ilk teorik modal analiz ile OMA sonuçlarının karşılaştırılması.

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (x yönünde)	3,684	2,524	45,95
2	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (y yönünde)	4,309	2,661	61,93
3	Batı duvar öteleme hareketi	4,645	3,094	50,12
4	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (z yönünde)	5,491	3,881	41,48

Çizelge 7.22. incelendiğinde, teorik ve OMA sonuçları arasında oldukça farklı sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle, yapının doğal modları olan kısa ve uzun doğrultuda öteleme hareketlerindeki hata oranı oldukça yüksektir. Dolayısıyla, Ulu Camii için sonlu eleman model kalibrasyonu yapılması gerekmektedir. Model kalibrasyon çalışmaları mesnet koşullarının güncellenmesi, yapının geometrik ölçülerinin gözden geçirilmesi, malzeme özelliklerinin güncellenerek tekrarlı analizlerin yapılmasını içermektedir. Caminin, teorik ve OMA sonuçlarısıralama ve mod şekli olarak aynı çıktığından mesnet koşulları ve geometrik ölçülerin güncellenmesine gerek duyulmamıştır. Dolayısıyla, Ulu Camii için malzeme elastik modüllerinin güncellenmesi işlemi yapılmıştır. Bu kalibrasyon ayarı, OMA sonuçlarına diğer bir deyişle yapının doğal davranış parametrelerine en yakın kalibrasyon değerine ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. Ulu Camii 1961 yılında geçirdiği restorasyon sırasında cami kemerleri betonarme olarak inşa edilmiştir ve bu betonarme kemerler taş malzemeyle kaplanmıştır. Bu nedenle caminin sonlu eleman modeline salt bir taş malzeme tanımlanarak model kalibrasyonunu gerçekleştirmek çok doğru bir yaklaşım olmayacaktır. Cami model kalibrasyonu yapılırken, betonarme malzemenin elastisite modülü de dikkate alınmıştır. 1960 yılında inşa edilen betonun dayanımını bulmak, betonarme bölümün taşla kaplı olması ve tarihi yapıda tahribatlı test yönteminin mümkün olmamasından ötürü oldukça zordur. Bu nedenle deneysel yöntemler yerine nümerik yöntemler kullanma seçeneğine gidilmiştir.

Kotan (2016), çalışmasında eğer bir betonarme malzemenin inşa edildiği yıl biliniyorsa minimum beton eksenel basınç mukavemetinin;

$$y= 8E\text{-}19e^{(0,00221x)} \quad (7.7)$$

bağıntısıyla bulunabileceğini belirtmiştir. Bağıntıda *x* yılı, *y* ise basınç mukavemetini belirtmektedir. Bu bağıntıda x yerine 1961 yazıldığında, en düşük beton basınç mukavemeti yaklaşık 5,30 MPa olarak hesaplanmıştır. Düşük basınç mukavemetli beton elastisite modülü için, Duran vd (2017);

$$E_c= 6000 (\sqrt{f_c})+ 3580 \quad (8.2)$$

bağıntısını belirtmişlerdir. Bağıntıda E_c elastisite modülünü, f_c beton basınç mukavemetini ifade etmektedir. Bu bağıntı kullanarak, beton malzemenin elastisite modülü 17.328 MPa olarak hesaplanmıştır.

Malzeme olarak taş, kolon, kemer, tonoz ve ahşap olmak üzere 5 ayrı eleman tanımlanarak kalibrasyon işlemlerine başlanmıştır. Taş ve kolonlar taş malzeme, kemer ve tonozlar betonarme, kubbe ahşap olarak tanımlanmıştır. Fakat, bu yaklaşım ile Ulu Camii'nin deneysel modal frekans değerlerine denk veya yakın bir sonuç elde edilememiştir. Bu yaklaşımlara ek olarak, yeni bir malzeme tanımlanmaya ihtiyaç duyulmuştur. Bu malzeme, kolonların tam ortası betonarme bir çekirdek, kolonların diğer kısmının taş malzeme olarak tanımlanmıştır. Böylece caminin şu anki durumunu temsil edecek şeklinde malzeme tanımlamaları yapılmıştır. Malzeme elastisite modülleri iterasyon işlemleri caminin OMA sonuçlarına diğer bir deyişle yapının doğal davranış parametrelerine en yakın kalibrasyon değerine ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. İterasyon işlemleri sonunda, Ulu Camii için ulaşılan kalibrasyon elastisite modülü değerleri Çizelge 7.23.'te gösterilmiştir.

Çizelge 7.23. Ulu Camii kalibrasyon elastisite modül değerleri

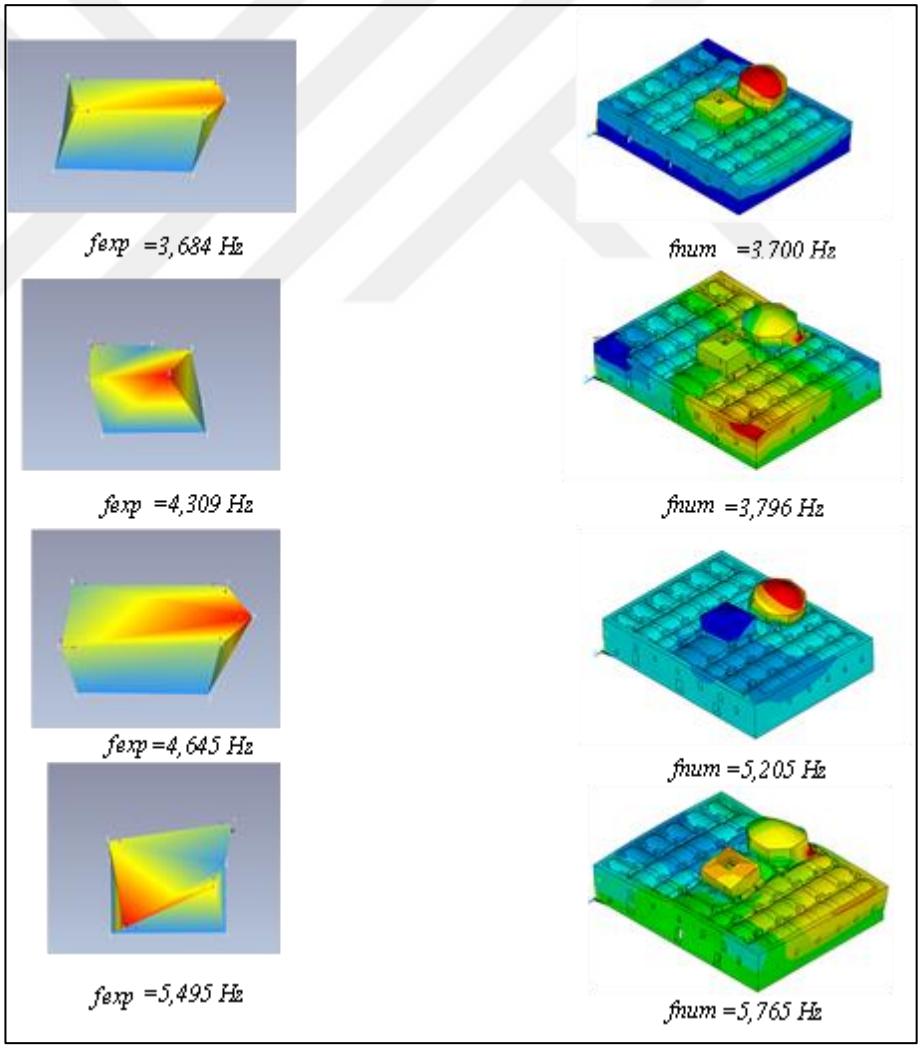
Basınç Dayanımı (MPa)			**Elastisite Modülü (MPa)**									
Duvar Kemer	*Duvar*		*Kubbe*		*Kemer*		*Sütun Kaplama*		*Tonoz*		*Sütun İç Betonarme Çekirdek*	
	Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra
4,89	978	850	500	1.000	978	850	978	10.000	-	17.328	-	17.328

Çizelge 7.23.'te cami duvarları, cami kolonları ve cami kemerleri için 850 MPa, betonarme tonoz ve betonarme kolon çekirdeği için 17.328 MPa ve ahşap kubbe için 500 MPa elastisite modülü değeri girildiğinde, deneysel modal analiz sonuçlarına en yakın sonuçların elde edildiği görülmüştür. Ulu Camii'nin kalibre edilmiş sonlu eleman model üzerinden hesaplanan teorik modal analiz sonuçlarıyla caminin deneysel modal davranış parametrelerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Özellikle, caminin üç mod şekline karşılık gelen modal frekans değerleri arasındaki hata oranlarının %3'ün altında olduğu görülmüştür. Bu sonlu eleman model kalibrasyonun caminin sonlu eleman modeline tanıtıldığında, caminin doğal dinamik davranış parametrelerini neredeyse yansıttığı görülmüştür.

Çizelge 7.24.'te OMA sonuçları ve bu kalibrasyon elastisite modül değerleriyle yapılan teorik modal analiz sonuçları diğer bir deyişle caminin deneysel ve teorik dinamik davranış parametreleri tablo halinde gösterilmiştir. Şekil 7.78.'de Ulu Camii'nin deneysel modal analiz sonuçlarıyla kalibre edilmiş teorik modal analiz sonuçları şematik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 7.24. Ulu Camii kalibre edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanan teorik modal analiz ile OMA sonuçlarının karşılaştırılması.

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (X yönü)	3,684	3,700	2,60
2	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (Y yönü)	4,309	3,796	14,80
3	Batı duvar öteleme hareketi	4,645	5,205	1,29
4	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (Z yönü)	5,495	5,765	2,37



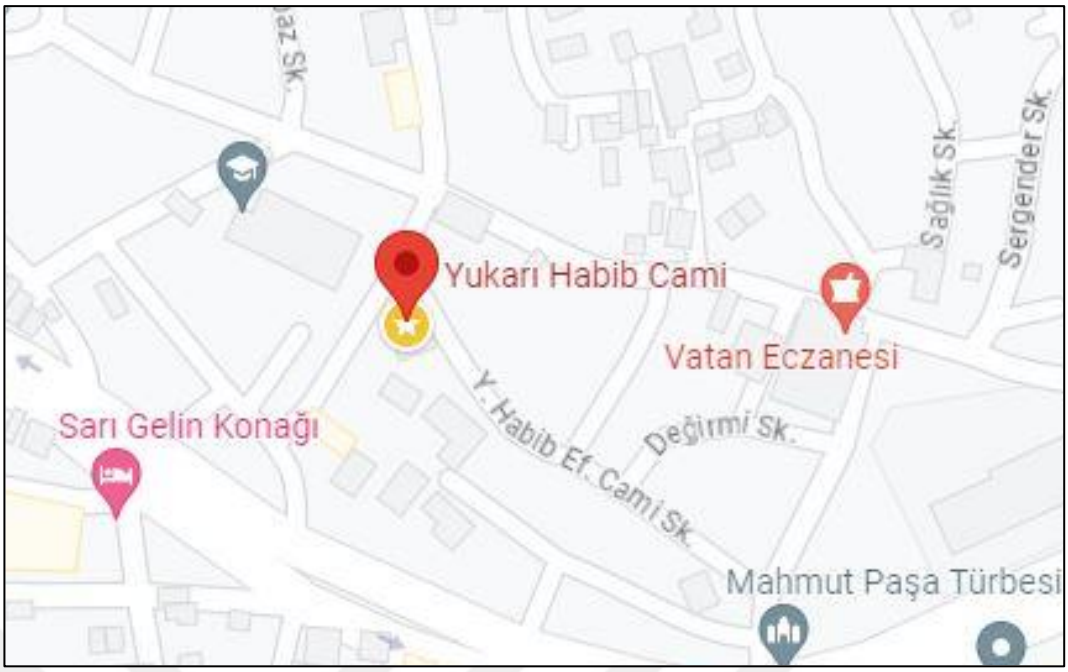
Şekil 7.78. Ulu Camii deneysel ve teorik modal analiz sonuçlarının şematik olarak karşılaştırılması.

7.5. Yukarı Habip Efendi Camii

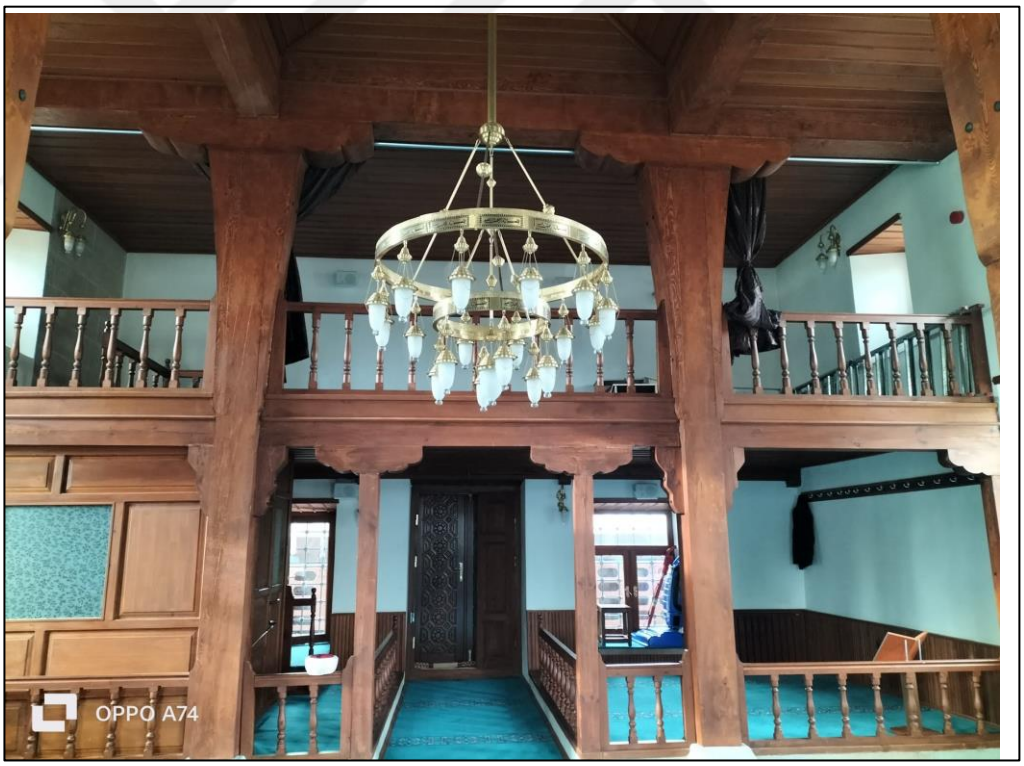
Erzurum merkez Yakutiye İlçesi Mektep Sokak'ta bulunan cami 1702 tarihinde inşa edilmiştir. Cami plan olarak kare biçimindedir. Dört ahşap destekli ve düz ahşap tavan örtülü bir cami tipindedir. Cami moloz taş malzeme ile inşa edilmiştir. 9,51 m x 13,76 m ölçülerinde olan caminin duvar yüksekliği 5,7 m'dir. Cami duvar kalınlığı 0,8 m'dir. Caminin minare yüksekliği 20,6 m'dir. Caminin genel görünümü Şekil 7.79.'da, konumu Şekil 7.80.'de ve caminin iç görünümü ise Şekil 7.81.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.79. Yukarı Habip Efendi Camii



Şekil 7.80. Yukarı Habip Efendi Camii konumu (Anonim 2022g)



Şekil 7.81. Cami içi görünümü

Cami 2009 yılında bir onarım geçirmiştir. 2016 yılına gelindiğinde cami aslına uygun bir şekilde kapsamlı restorasyona alınmıştır. Restorasyon kapsamında, caminin minaresi galvanizli bir sac şeklindeyken minare taş kaideli, tuğla gövdeli, taş şerefeli

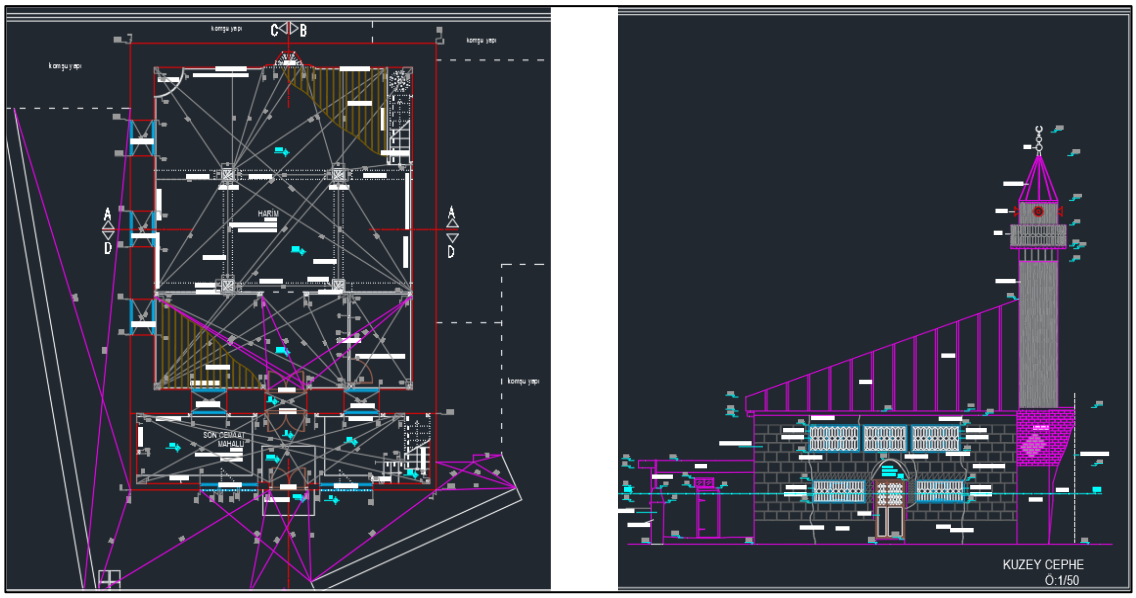
şeklinde yeniden inşa edilmiştir. Bu şekilde tüm cami yeniden inşa edilmiş ve günümüzdeki halini almıştır (Anonim 2022h). Caminin restorasyon öncesi hali Şekil 7.82.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.82. Yukarı Habip Efendi Camii restorasyon öncesi hali (Anonim 2022h)

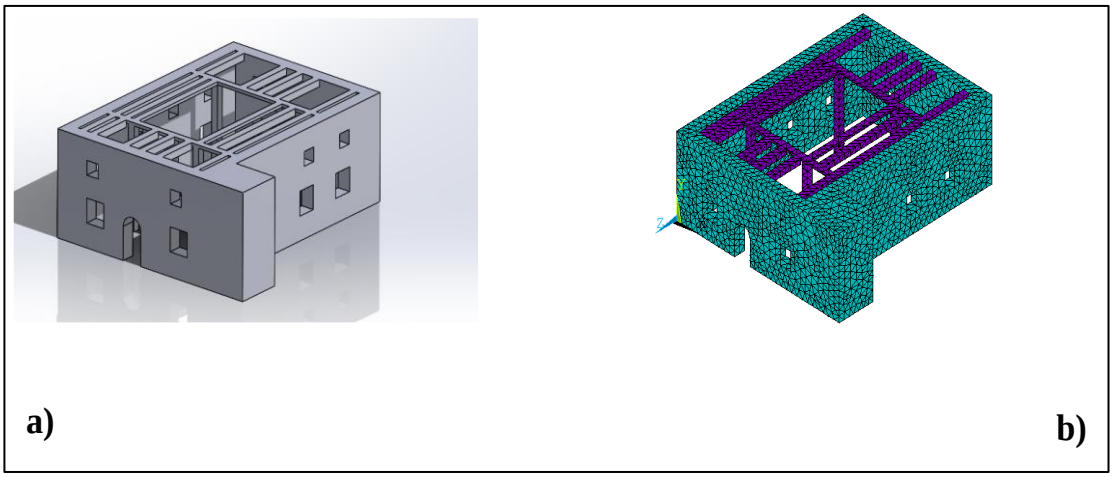
7.5.1. Yukarı Habip Efendi Camii teorik modal analiz uygulaması

Tez çalışması için seçilen camilerde yapılan yapısal analize esas sonlu eleman model oluşturulma işlemi, Yukarı Habip Efendi Camii için de aynı şekilde yapılmıştır. Yukarı Habip Efendi Camii üzerinde önce keşif çalışması yapılmıştır. Caminin ölçüleri ve malzeme özellikleri yerinde belirlenmiştir. Yukarı Habip Efendi Camii rölevesi Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden temin edilmiştir Ölçülen boyutlar Yukarı Habip Efendi Camii'nin cami rölevesinde belirtilen boyutlar ile karşılaştırılarak caminin nihai boyutları belirlenmiştir. Yukarı Habip Efendi Camii'nin cami rölevesi Şekil 7.83.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.83. Yukarı Habip Efendi Camii rölevesi

Yukarı Habip Efendi Camii'nin boyutları belirlendikten sonra sonlu eleman modelinin oluşturulma aşamasına geçilmiştir. Caminin katı modeli Soidworks (2022) yazılımında oluşturulup ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Caminin sonlu eleman modeli Şekil 7.84.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.84. Yukarı Habip Efendi Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli

Soidworks (2022) yazılımında oluşturulan model, ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmadan önce, Workbench (2016) yazılımında sonlu elemanların küçük sonlu elemanlara bölünme işlemi ağlama (mesh) işlemi yapılmıştır. Bu elemanlar, 40-45 cm boyutunda sonlu küçük elemanlara ayrılacak şekilde ağlama işlemi yapılmıştır. Her

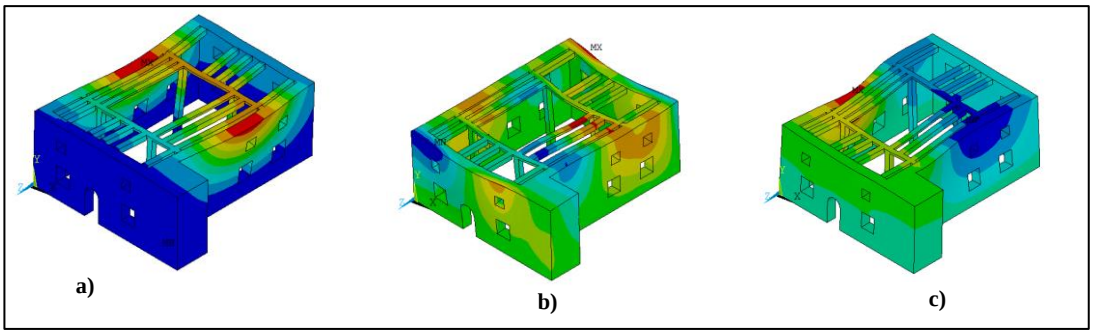
bir ağlama sonucunda oluşan küçük elemanlar boyut olarak tetra (onlu) eleman şeklindedir.

Caminin Soidworks (2022) yazılımında geometrisi oluşturulduktan sonra Workbench (2016) yazılımında geometrinin sonlu elemanlara ayrılması, sınır koşullarının tanımlanması işlemleri diğer camilerde olduğu gibi bu camide de aynı şekilde yapılmıştır. Bu işlemlerin ardından caminin sonlu eleman modeli ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır ve caminin duvar mekanik özellikleri tanımlanmıştır. Caminin, inşa edildiği taş durumuna bakıldığında, andezit ve bazalt taşlarından oluştuğu, taş yüzdelerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Önceki camilerde olduğu gibi, beton Schmidt çekici kullanılarak taşların sertlik değerleri belirlenmiştir. Daha sonra bu sertlik değerleri, Denklem 7.2 ve Denklem 7.3'teki bağıntılarda kullanılıp andezit ve bazalt için taş basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Daha sonra duvardaki taş yüzdeleri yardımıyla Denklem 7.4. ve Denklem 7.5.kullanılarak caminin duvar mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bu değerler caminin sonlu eleman modeline tanıtılmıştır. Caminin sonlu eleman modelinde teorik modal analiz yapılarak caminin teorik mod şekilleri ve bu mod şekillerine karşılık gelen modal frekans değerleri belirlenmiştir. Yukarı Habip Efendi Camii'ndeki taşlarına beton Schmidt çekici sertlik deneyi uygulandığında, bazalt için ortalama sertlik değeri 21; andezit için ise 24,76 değeri elde edilmiştir. Bu değerler Denklem 7.1 ve Denklem 7.2'deki taş basınç mukavemeti elde etme bağıntılarında kullanıldığında andezit için ortalama taş basınç mukavemeti 22,71 MPa, bazalt için ortalama taş basınç mukavemeti 4,11 MPa olarak hesaplanmıştır. Ortalama duvar basınç mukavemeti için taşların 1 m^2 duvar alanında taş yüzdeleri belirlenmiştir. Andezit ve bazalt, duvarlarda eşit miktarda bulunduğundan, taş yüzdeleri her iki taş grubu için %50 alınmıştır. Bu yüzdelerle ortalama duvar taş basınç mukavemeti 13,41 MPa olarak hesaplanmıştır. Duvar inşa edilirken kullanılan harç türü kireç esaslı Horasan harcı olduğundan, harç basınç mukavemeti 1,15 MPa alınmıştır. Duvar örülümü düzgün bir biçimde olduğundan Denklem 7.3'teki α ve β sabitleri sırasıyla 0,70 ve 0,30 olarak alınmıştır. Ek olarak, K sabiti değeri de 0,50 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, Denklem 7.3 ve Denklem 7.4'te yazıldığında ortalama duvar basınç mukavemeti 3,21 MPa, ortalama duvar elastisite modül değeri ise 642 MPa olarak hesaplanmıştır.

Bu hesaplamanın yanı sıra, cami ahşap destekli ve ahşap döşemeli bir mimariye sahip olduğu için, caminin ahşap sütunları ve ahşap tavan döşemesi için de elastisite modül değeri tanımlaması yapılmalıdır. Literatür incelendiğinde Kaplan (2013), ahşap yapılar üzerindeki çalışmasında, ahşabın malzeme özelliklerinden ve ahşap yapılı sonlu eleman modellemesinden bahsedildiği görülmüştür. Çalışmada farklı ağaç türleri için elastisite modül değerlerini deneysel olarak belirlemiştir ve 10000 MPa ile 12500 MPa arasında bir elastisite modül değeri aralığı belirlemiştir. Bu elastisite modül değerleri üç eksen için farklı değerler şeklinde modellemiştir. Ancak tez çalışmamız için, ahşap dikme ve döşemeler, malzeme modeli olarak taş malzeme gibi elastik izotropik olarak modellenmiştir. Liflere dik eksenli tek yönlü elastisite modül değeri bu elemanlara tanıtılmıştır. Yukarı Habip Efendi Camii için, Kaplan (2013) çalışması referans alınarak, ahşap türü meşe ağacı olarak seçilmiştir ve elastisite modül değerleri, liflere dik doğrultuda 10000 MPa olarak seçilmiştir. Yukarı Habip Efendi Camii sonlu eleman modeline duvar mekanik özelliklerinin tanımlanmasının ardından model üzerinde teorik modal analiz yapılmıştır Sonuçlar Çizelge 7.25.'te gösterilmiştir. Teorik mod şekilleri Şekil 7.85.'te gösterilmiştir.

Çizelge 7.25. Yukarı Habip Efendi Camii ilk teorik modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (x yönünde)	5,237
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (y yönünde)	7,033
3	Düşey eksen (z yönünde) etrafında yanal burulma hareketi	8,086

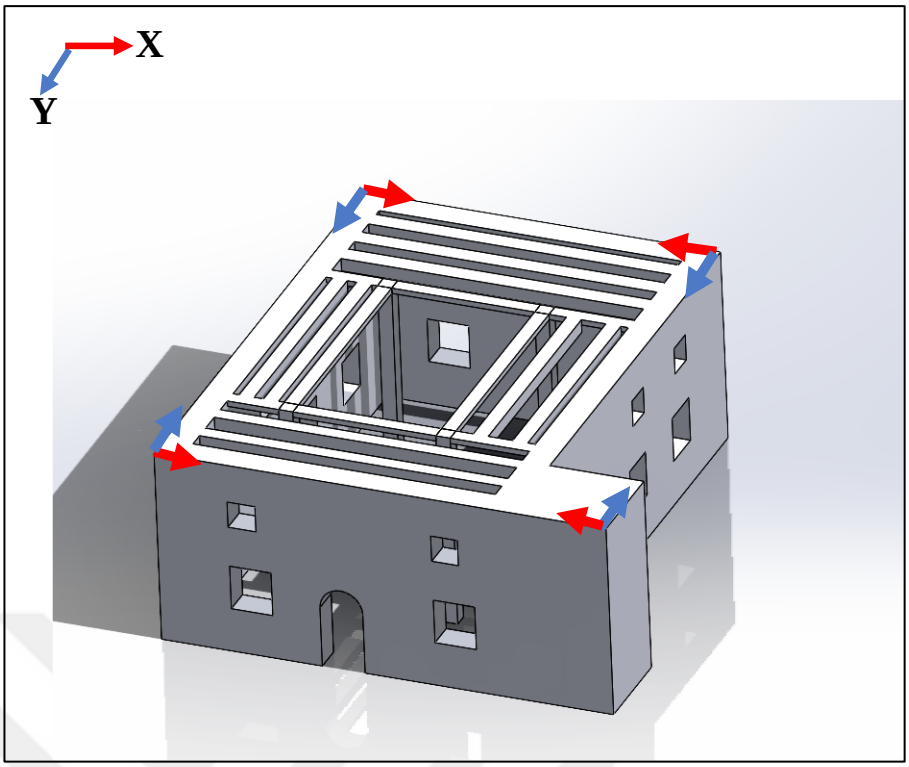


Şekil 7.85. Yukarı Habip Efendi Camii a) x doğrultusunda öteleme b) y doğrultusunda öteleme c) burulma hareketi.

Caminin teorik modal analiz sonuçlarına göre, caminin ilk mod şekli, kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi, ikinci mod şekli uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi şeklinde ortaya çıkmıştır. Üçüncü modda ise Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi ortaya çıkmıştır. Bu durumda, caminin dinamik davranış parametrelerini yerinde belirlemek için yapılacak Operasyonel modal analiz uygulamasında bu sonuçlar baz alınarak cami köşelerinde ivmeölçerler yerleştirilmesi sonucuna ulaşılmıştır.

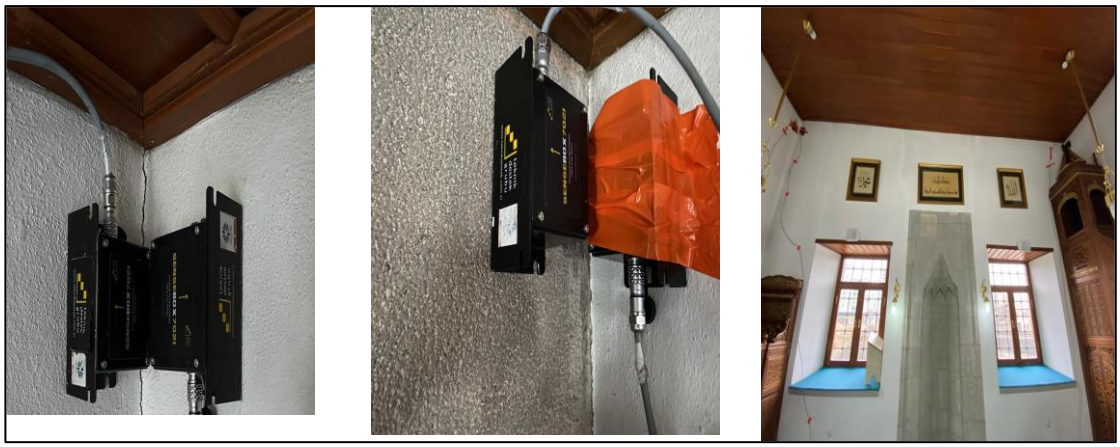
7.5.2. Yukarı Habip Efendi Camii operasyonel modal analiz uygulaması

Caminin modal davranış parametrelerinin belirlenmesi için camide OMA uygulaması yapılmıştır. İvmeölçer yerleşimi, ilk teorik modal analizdeki mod şekilleri baz alınarak yapılmıştır. İvmeölçerler, yetersiz kablo uzunluğu, iklim şartlarından cihazların olumsuz etkilenmemesi gibi nedenlerden ötürü cami içine yerleştirilmiştir. Yukarı Habip Efendi Camii ivmeölçer yerleşim krokisi Şekil 7.86.'da gösterilmiştir.



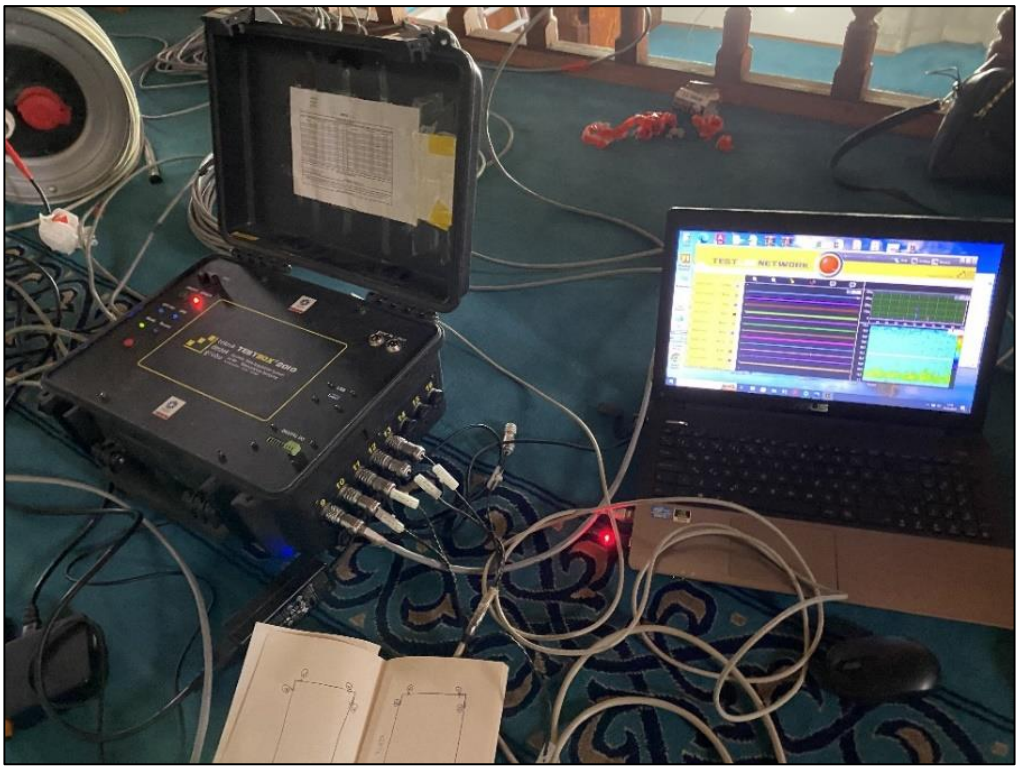
Şekil 7.86. Yukarı Habip Efendi Camii ivmeölçer yerleşim krokisi

Cami içinde cami köşelerine 8 adet tek eksende ivme kaydı alan tek eksenli kablolu ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Cami teorik modal analiz sonuçları incelendiğinde, ilk üç mod şeklinde caminin düşey hareketine dair bir mod şekline rastlanmadığı için düşey yönde titreşim kaydı alınmamıştır. İvmeölçerlerin yerleştirilmesi işleminde yapıya herhangi bir hasar vermeden yerleştirilmesi ve sökülmesi en önemli hususdur. İvmeölçerleri sabitleme işleminden önce, yön ve doğrultu belirleme işlemleri yapılması gerekmektedir. Caminin kuzey-güney yön aksı yani kapı-mihrap aksı y yönü, doğu-batı yön aksı yani yan duvarlar aksı ise x yönü olarak tayin edilmiştir. Yön tayinlerinden sonra 8 adet tek eksenli ivmeölçer, cami duvarlarına sıcak silikon ile yapıştırılmıştır ve ivmeölçerlerin üstü güçlü bant ile yapıştırılarak, herhangi bir düşmeye karşı güçlendirilmiştir. Cami içi ivmeölçer yerleşimi Şekil 7.87.'de gösterilmiştir.



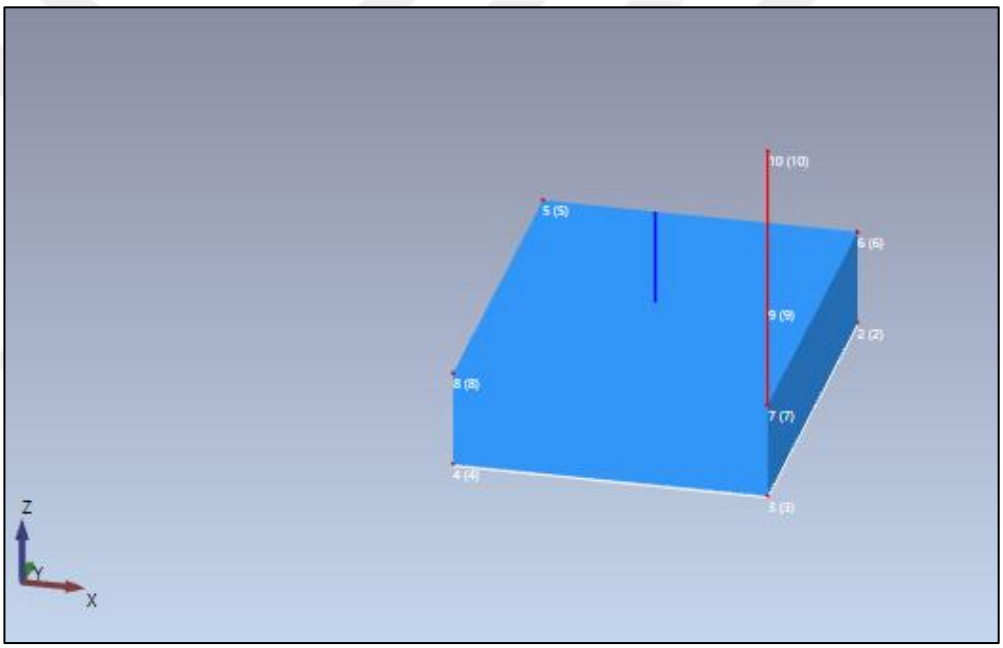
Şekil 7.87. Yukarı Habip Efendi Camii ivmeölçer sabitleme çalışması

İvmeölçerlerin, caminin tüm bölümlerinde sabitleme işleminin tamamlanmasının ardından, ivmeölçerler özel veri kabloları yardımıyla veri toplama sistemine bağlanmıştır. Veri toplama sistemi Şekil 7.88.'de gösterilmiştir. Her kablo, ivmeölçer için önceden belirlenen kanal numarasına yerleştirilmiştir. İvmeölçerler veri toplama sistemine bağlandıktan sonra her cihazın kendine ait kalibrasyon çarpanı veri toplama sistemine girilmiştir. Bu işlemlerden sonra kayıt işleminden önce cihaz ve kablo kontrolleri yapılmıştır. Gerekli kontroller yapıldıktan sonra kayıt alma işlemine geçilmiştir.



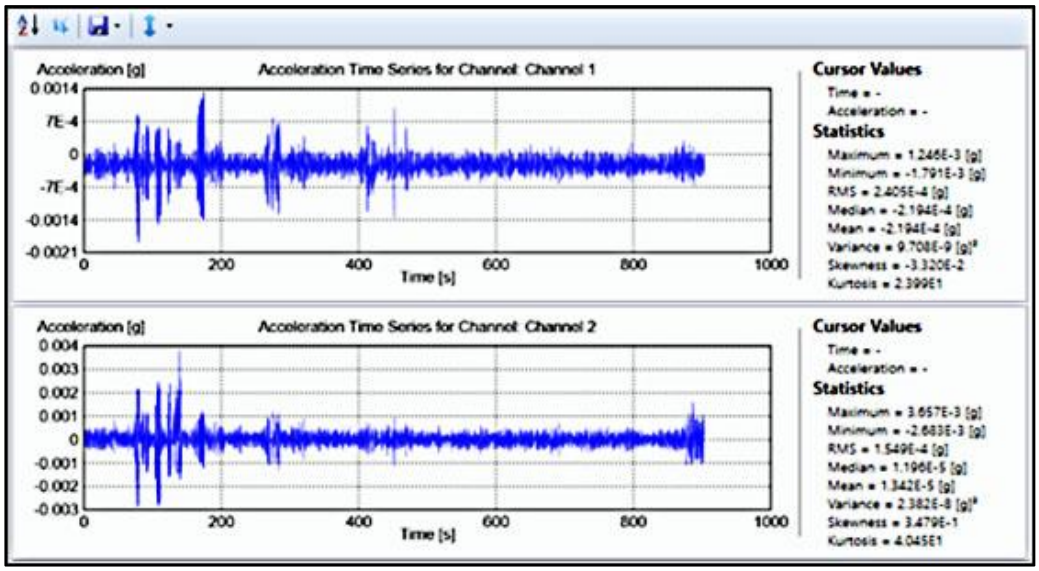
Şekil 7.88. Yukarı Habip Efendi Camii'nde veri toplama sistemi kurulması

Gerekli kontrollerin ardından, kayıt alma işlemine geçilmiştir. Tüm bu değerlendirmelerin, ardından 3 adet 100 Hz'lik ve 3 adet 200 Hz'lik olmak üzere 6 adet ivme kaydı alınmıştır. Ölçüm birimi g'dir. Cami, konumu itibariyle araç sürekliliği bakımından seyrek bir bölgededir ve sürekli bir çevresel titreşim etkisinde değildir. Bu nedenle, caminin duvarlarında plastik tokmakla vurularak yapay titreşimler verilmiştir. Kayıt alma işlemleri tamamlandıktan sonra, cami mod şekillerini ve bu mod şekillerine karşılık gelen modal frekans değerlerini elde etmek için veri işleme aşamasına geçilmiştir. Caminin deneysel modal analize esas geometrisi Artemis Modal Pro (2023) yazılımında oluşturulmuştur. Şekil 7.89.'da Yukarı Habip Efendi Camii'nin Artemis yazılımındaki geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 7.89. Yukarı Habip Efendi Camii Artemis yazılım geometrisi

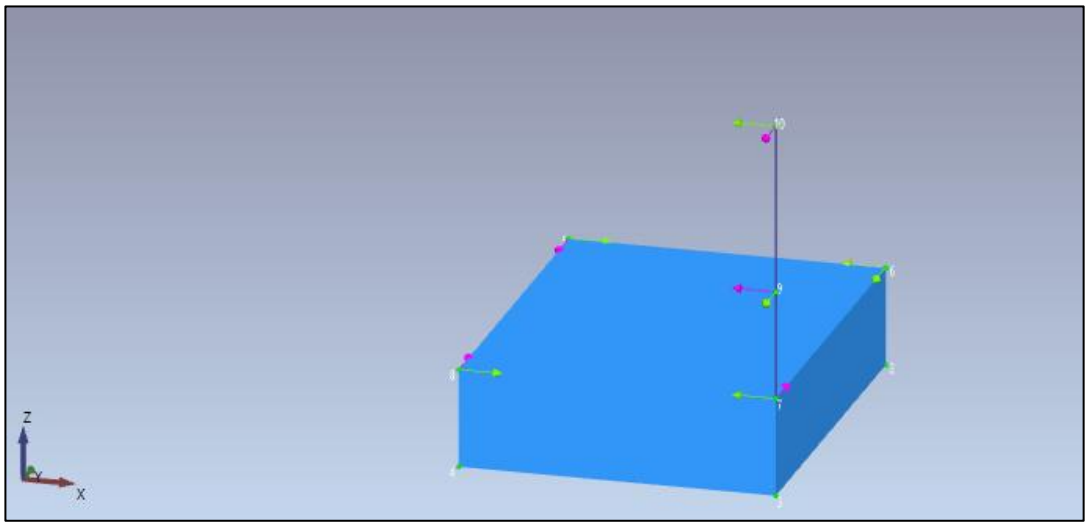
Veri toplama sisteminde her bir ivmeölçerden alınan titreşim kayıtları, Artemis Modal Pro yazılımında ivme-zaman grafiklerine çevrilmiştir. Yukarı Habip Efendi Camii Camii ivme-zaman grafikleri Şekil 7.90'da gösterilmiştir.



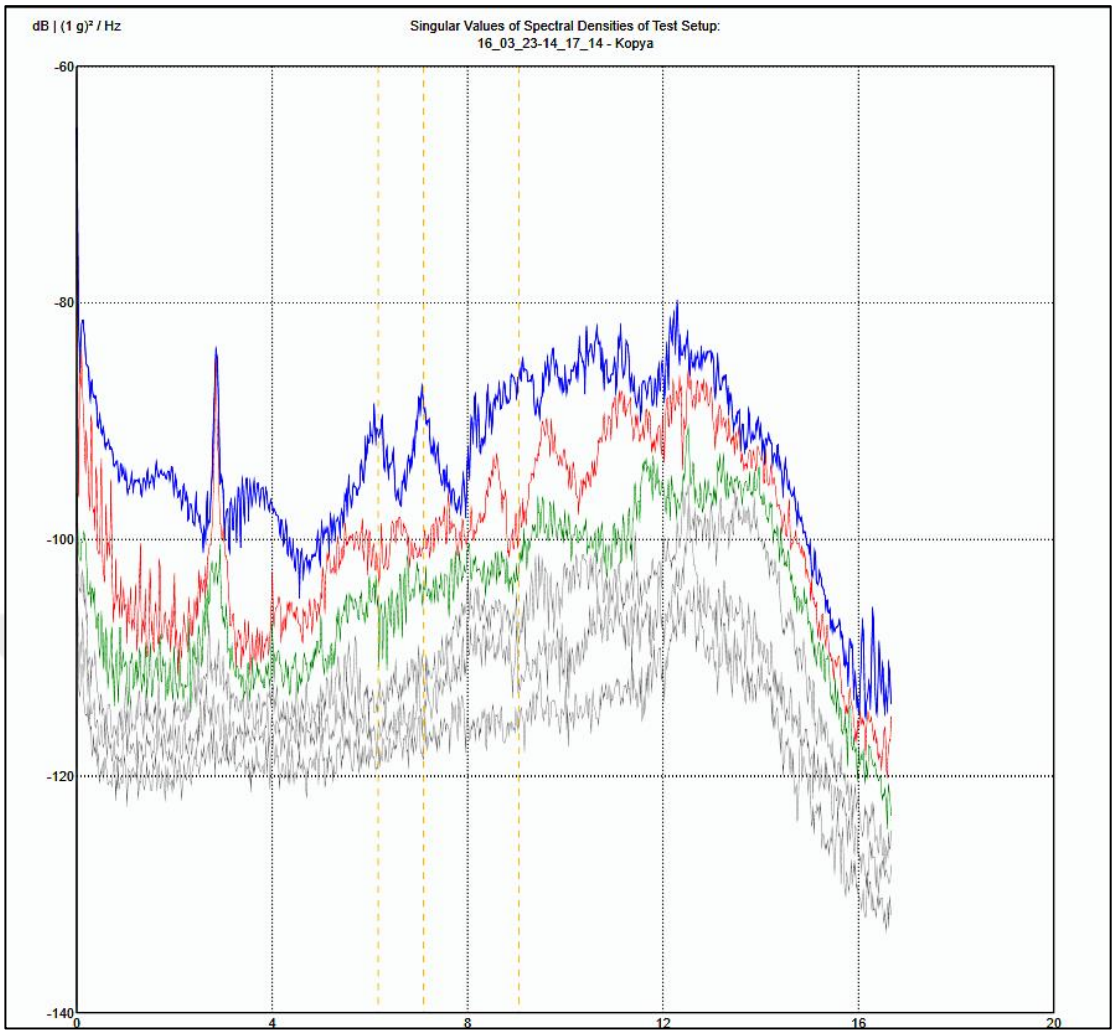
Şekil 7.90. Yukarı Habip Efendi Camii titreşim kayıtlarının ivme-zaman grafiklerine dönüşümü.

Cami köşelerine yerleştirilen ivmeölçerler, yazılımdaki geometrilerine de ölçüm anındaki doğrultuları bire bir aynı olacak şekilde tanımlanmıştır. Yukarı Habip Efendi Camii'nin ivmeölçerlerin yönlerinin yazılımda tanıtılması Şekil 7.91.'de gösterilmiştir.

İvmeölçerlerin yönlerinin tanıtılmasının ardından veri analizleri yapılmıştır. Yukarı Habip Efendi Camii'nin analizdeki spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 7.92.'de gösterilmiştir.



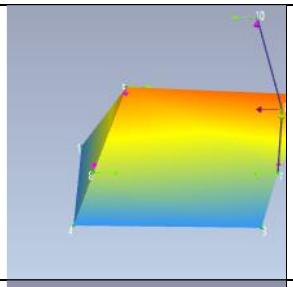
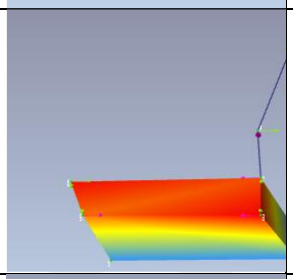
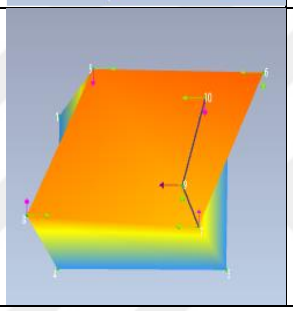
Şekil 7.91. Yukarı Habip Efendi Camii'nin ivmeölçerlerin ve yönlerinin Artemis geometrisinde tanımlanması.



Şekil 7.92. Yukarı Habip Efendi Camii spektral yoğunluk fonksiyonu

Tüm süreçler tamamlandıktan sonra, caminin mod şekilleri ve modal frekans değerlerini elde etme aşamasına geçilmiştir. Yazılımda farklı türde çözümleme yöntemleri mevcuttur. Yukarı Habip Efendi Camii'nin OMA titreşim kayıtları, diğer camilerden farklı olarak FDD analiz yöntemiyle çözülerek, caminin deneysel mod şekilleri ve modal frekans değerleri elde edilmiştir. Kayıtlar işlenme ve mod şekillerini elde etme aşamasında, yazılımda bulunan bütün çözüm yöntemleri denenmiştir ve tam anlamıyla caminin deneysel mod şekilleri ve bu mod şekillerine karşılık gelen modal frekans değerleri frekans alanında çözüm yöntemi olan FDD metoduyla elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar Çizelge 7.26.'da gösterilmiştir.

Çizelge 7.26. Yukarı Habip Efendi Camii OMA Sonuçları

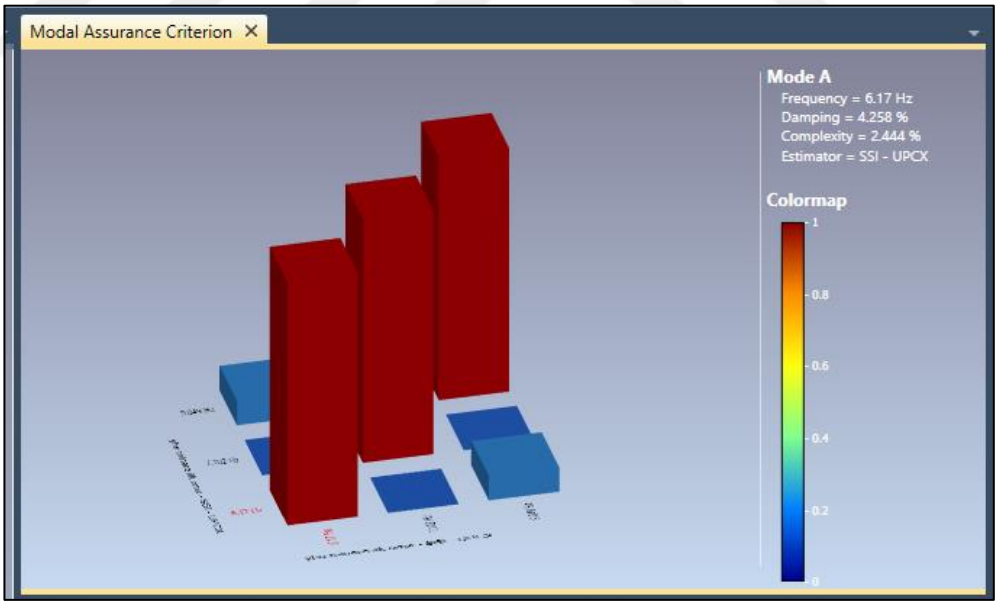
Mod Şekli	Frekans (Hz)	
Kısa doğrultuda (x yönü) yatay öteleme hareketi		6,196
Uzun doğrultuda (y yönü) yatay öteleme hareketi		7,123
Düşey eksen (z yönü) etrafında yanal burulma hareketi		9,069

OMA sonuçları incelendiğinde, cami modunun ilk iki modu minare modlarıdır. Minarenin dinamik davranış parametreleri, cami modal davranışından bağımsızdır. Minare modal frekans değerleri, cami gövdesi modal frekans değerlerinden daha düşük frekans değerlerindedir. Bu sebeple cami modal analiz sonuçlarında minare modları dikkate alınmamıştır. Cami gövdesinin OMA sonuçları incelendiğinde ilk modu kısa doğrultuda (x doğrultusu) öteleme, ikinci mod uzun doğrultuda öteleme (y doğrultusu), üçüncü mod ise z ekseni etrafında burulma hareketidir. Caminin deneysel dinamik parametreleri, teorik modal parametrelerle benzer çıkmıştır. Cami OMA sonuçlarında, güneybatı köşesinin daha fazla zorlandığı ve herhangi bir deprem durumunda bu noktadan hasar almasının olası olduğu sonucu elde edilmiştir. Caminin yakın zamanda restorasyon geçirmesine rağmen cami mihrabında çatlakların görülmesi, duvar birleşim noktalarında büyük ayrışma çatlaklarının görülmesi ve cami içi ahşap desteklerinde dönme hareketlerinin gözlenmesi, caminin yapı sağlığı açısından oldukça riskli bir durumda olduğunu göstermektedir. Bu hasarlar Şekil 7.93.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.93. Yukarı Habip Efendi Camii'nde gözlemlenen hasar

Yukarı Habip Efendi Camii'nin deneysel modal analiz sonuçlarının, güvenilirliğinin belirlenmesi için MAC değerleri kontrol edilmiştir. Şekil 7.94'te, Yukarı Habip Efendi Camii'nin MAC değerler grafiği gösterilmiştir. Deneysel modal frekans değerleri kullanılarak oluşturulan Yukarı Habip Efendi Camii MAC değerleri tablosu Çizelge 7.27.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.94. Yukarı Habip Efendi Camii MAC değerleri grafiği

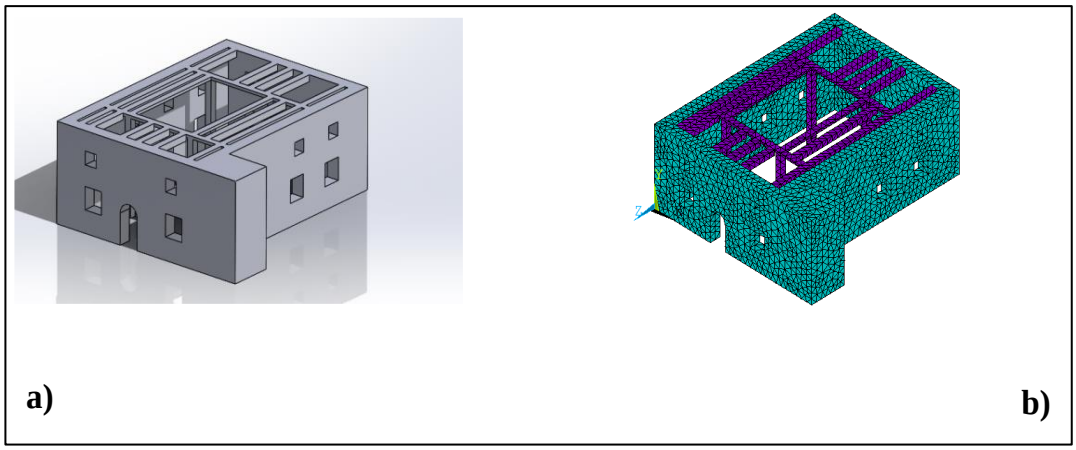
Çizelge 7.27. Yukarı Habip Efendi Camii MAC değerleri tablosu

Frekans (Hz)	**6,198**	**7,169**	**8,989**
6,198	**1**	**0,0010**	**0,0192**
7,169	**0,0010**	**1**	**0,0117**
8,989	**0,0192**	**0,0117**	**1**

Çizelge 7.27'de verilen Yukarı Habip Efendi Camii OMA sonuçlarının MAC değerleri incelendiğinde, modlar arasındaki MAC değerlerinin 0'a yakın olduğu görülmüştür. Bu sonuç, mod şekillerinin birbirinden ayrık olduğu ve deneysel modal analiz sonuçlarının güvenilir olduğunu göstermektedir.Örnek olarak kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi ile uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi arasındaki MAC değerinin 0,0010 olduğu görülmüştür. Bütün modların MAC değerleri incelendiğinde bütün modların birbirinden ayrık ve deneysel modal analizin güvenilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

7.5.3. Yukarı Habip Efendi Camii sonlu eleman model kalibrasyon çalışması

Yukarı Habip Efendi Camii üzerinde deneysel modal analizin tamamlanmasının ardından, model kalibrasyon aşamasına geçilmiştir. Yukarı Habip Efendi Camii, ilk teorik modal analizi için hazırlanan katı model önce Soidworks (2022) yazılımında oluşturulmuştur. Cami minaresi haricindeki cami duvarları, cami kemerleri, kubbesi ve son cemaat yeri bu yazılımla çizilmiştir. Oluşturulan model dinamik analizler için ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Bölüm 7.5.1.'de bu aşamalar detaylı şekilde açıklanmıştır. Yukarı Habip Efendi Camii'nin katı modeli ve sonlu eleman modeli Şekil 7.95'te gösterilmiştir.



Şekil 7.95. Yukarı Habip Efendi Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli

Cami, diğer büyük camiler gibi kompleks bir plana sahip olmayıp, basit kare plana sahip ahşap destekli bir cami olduğundan, camide kubbe, kemer, tonoz gibi yapı elemanları bulunmamaktadır. Cami minaresi haricindeki cami duvarları, cami ahşap dikmeleri ve ahşap tavan döşemesi bu yazılımda çizilmiştir. Soidworks (2022) yazılımında oluşturulan cami katı modeli, sınır koşullarının tanımlanması ve modelin küçük elemanlara bölünme işleminin tamamlanması için Workbench (2016) yazılımına aktarılmıştır. Bölüm 7.5.1'de Yukarı Habip Efendi Camii katı modeli üzerinde 40 cm boyutunda düzgün dörtyüzlü (tetrahedral) şeklinde meshleme işlemi yapıldığından bahsedilmiştir. Bu işlemin sonucunda ve ANSYS Mechanical (2016) yazılımında bu işlemin üzerine yapılan sonlu elemanlara ayırma işleminin sonucunda 25.075 düğüm noktalı ve 109.712 elemanlı bir sonlu eleman modeli ortaya çıkmıştır. Mesnet koşulları ve ağlama işlemlerinin tamamlanmasının ardından katı model ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Yazılımda ilk önce sonlu eleman malzeme modeli olarak yazılımda bulunan SOLID65 malzeme modeli güncellenmiştir. Yukarı Habip Efendi Camii'nin, Bölüm 7.5.1.'te tanımlanan duvar elastisite modülleri ile ilk teorik modal analiz gerçekleştirilmiştir. Teorik modal analiz sonuçları ile caminin OMA sonuçları Çizelge 7.28.'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.28. Yukarı Habip Efendi Camii ilk teorik modal analiz ile OMA sonuçlarının karşılaştırılması.

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda (x yönünde) öteleme	6,196	5.237	15,47
2	Uzun doğrultuda (y yönünde) öteleme	7,123	7,033	1,26
3	Düşey eksen (z yönünde) etrafında burulma	9,069	8,086	10,84

Çizelge 7.28. incelendiğinde, teorik modal analiz ve OMAsonuçları arasında farklı sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle, yapının ilk mod şekli olan kısa doğrultuda öteleme hareketindeki hata oranı çok yüksektir. İki modal analiz arasındaki sonuçların birbiriyle örtüşmesi için sonlu eleman model kalibrasyonu gerekmektedir. Model kalibrasyon çalışmaları mesnet koşullarının güncellenmesi, yapının geometrik ölçülerinin gözden geçirilmesi, malzeme özelliklerinin güncellenerek tekrarlı analizlerin yapılmasını içermektedir. Caminin, teorik ve OMA sonuçlarısıralama ve mod şekli olarak aynı çıktığından mesnet koşulları ve geometrik ölçülerin güncellenmesine gerek duyulmamıştır. Dolayısıyla, Yukarı Habip Efendi Camii için malzeme elastik modüllerinin güncellenmesi işlemi yapılmıştır. Malzeme elastisite modülleri iterasyon işlemleri caminin Operasyonel modal analiz sonuçlarına diğer bir deyişle yapının doğal davranış parametrelerine en yakın kalibrasyon değerine ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. İterasyon işlemleri sonunda, Yukarı Habip Efendi Camii için ulaşılan kalibrasyon elastisite modülü değerleri Çizelge 7.29.'da gösterilmiştir.

Çizelge 7.29. Yukarı Habip Efendi Camii kalibrasyon elastisite modül değerleri

Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)					
Duvar Kemer	*Duvar*		*Ahşap Tavan*		*Ahşap Dikme*	
	Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra
4,11	822	740	10.000	10.000	10.000	10.000

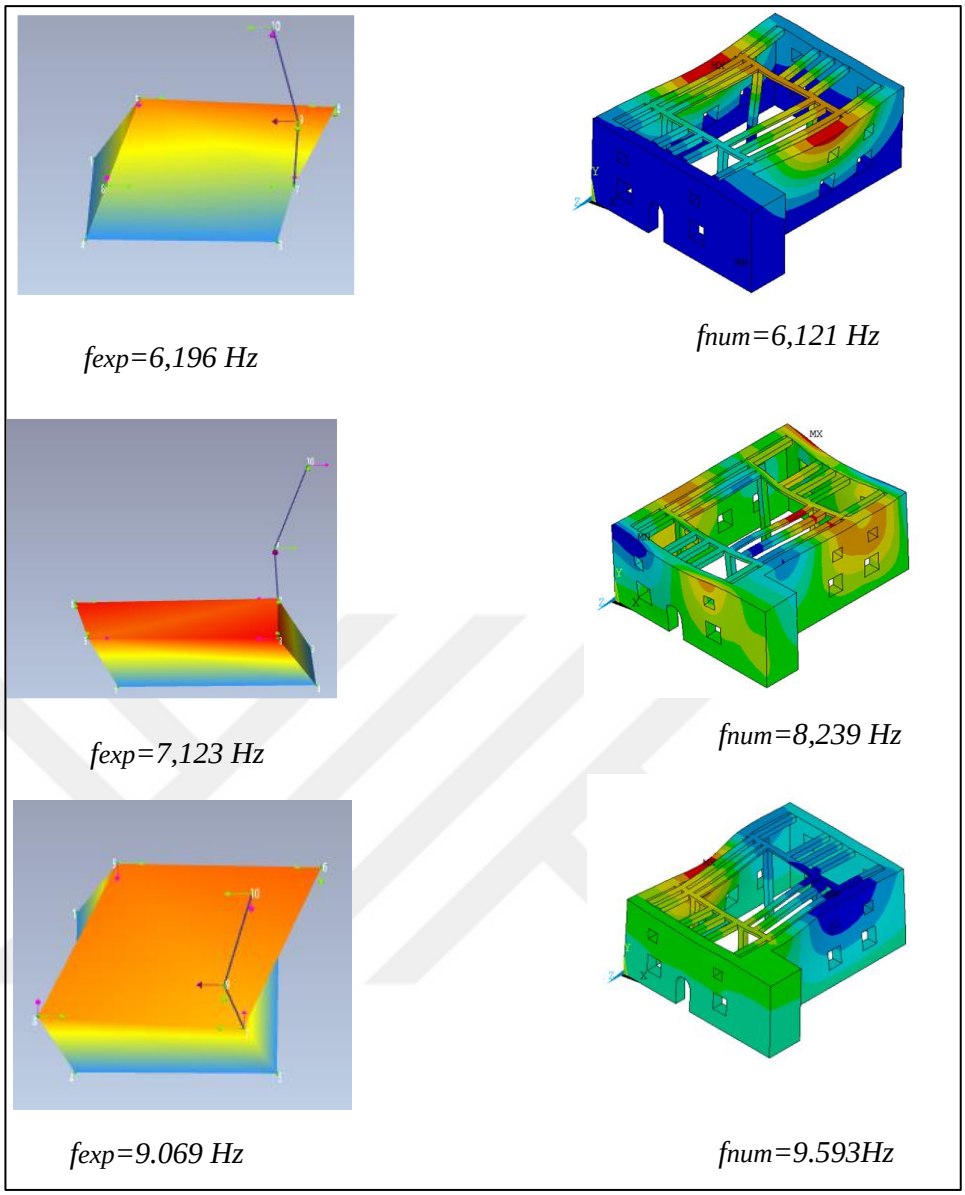
Çizelge 7.29. incelendiğinde cami duvarları için duvar elasitiste modülü değerleri 740 MPa olarak modele tanıtılmıştır. Ahşap dikmeler ve ahşap tavan döşemesi için

Kaplan (2013), çalışmasında belirttiği gibi meşe elemanı seçilmiştir. Meşenin elastisite modülü liflere dik doğrultuda 10.000 MPa değerleri modele tanıtılmıştır. Bu şekilde tanımlanan elastisite modül kalibrasyonu ile gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçlarının, caminin deneysel dinamik parametrelerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Özellikle caminin ilk mod şekline karşılık gelen modal frekans değerleri arasındaki hata oranının %1,5'in altında olduğu görülmüştür. Bu sonlu eleman model kalibrasyonun caminin sonlu eleman modeline tanıtıldığında, caminin doğal dinamik davranış parametrelerini neredeyse yansıttığı görülmüştür

Çizelge 7.30.'da caminin OMA sonuçları ve bu kalibrasyon elastisite modül değerleriyle yapılan teorik modal analiz sonuçları diğer bir deyişle caminin deneysel ve teorik dinamik davranış parametreleri tablo şeklinde gösterilmiştir. Şekil 7.96.'da Yukarı Habip Efendi Camii'nin deneysel modal analiz sonuçlarıyla, kalibre edilmiş teorik modal analiz sonuçları şematik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 7.30. Yukarı Habip Efendi Camii kalibre edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanan teorik modal analiz ile OMA sonuçlarının karşılaştırılması.

Mod Numarası	**Mod Şekli**	**Frekans (Hz)**		**Hata Oranı (%)**
		OMA	**Teorik**	
1	Kısa doğrultuda (x yönünde) öteleme	6,196	6,121	1,21
2	Uzun doğrultuda (y yönünde) öteleme	7,123	8,239	15,66
3	Düşey eksen (z yönünde) etrafında burulma	9,069	9,593	5,77



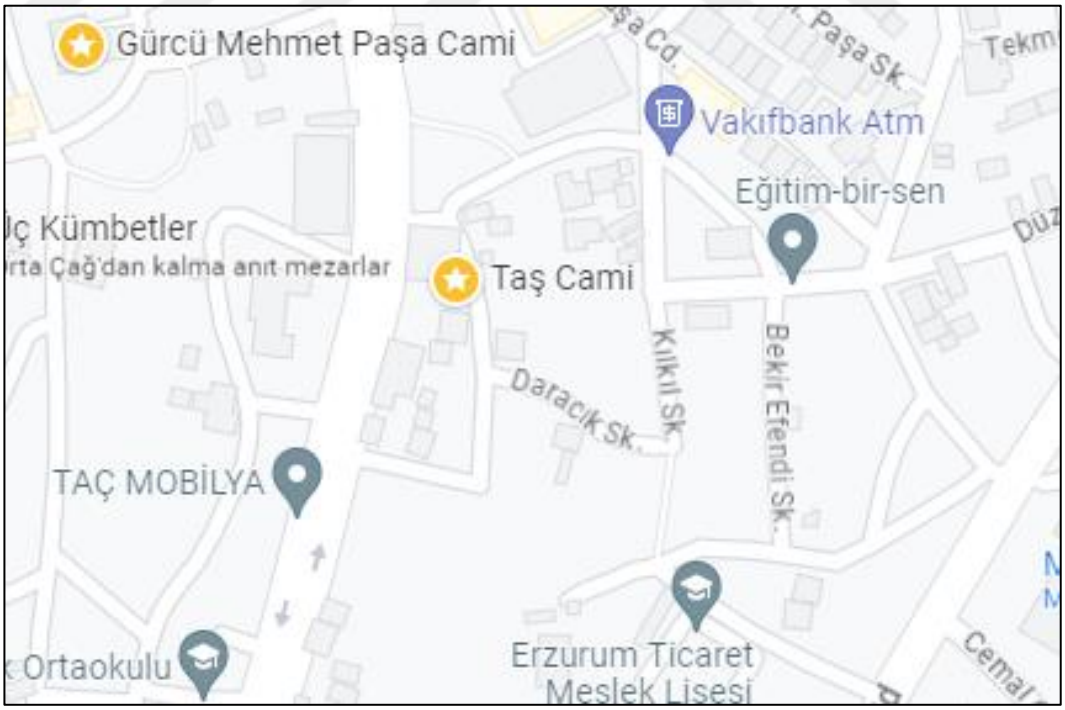
Şekil 7.96. Yukarı Habip Efendi Camii OMA ve teorik modal modal analiz sonuçlarının şematik olarak karşılaştırılması.

7.6. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii

Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii, Erzurum merkez Yakutiye ilçesi Aşağı Hasan-ı Basri Mahallesi'nde bulunmaktadır. Caminin şu anki yerinde Karakullukçu Ömer Ağa tarafından yaptırılan bir caminin olduğu kaynaklarda belirtilmiştir. Bu caminin 1905 yılında hasar aldığı, Hacızade Mehmet Efendi tarafından yıktırılıp bugünkü caminin yaptırıldığı kaynaklarda belirtilmektedir (Konyalı 1960; Gündoğdu vd 2010). Şekil 7.97.'de caminin genel görünümü, Şekil 7.98.'de caminin konumu ve Şekil 7.99.'da caminin iç görünümü verilmiştir.



Şekil 7.97. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii



Şekil 7.98. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii konumu (Anonim 2022i)



Şekil 7.99. Cami iç görünümü

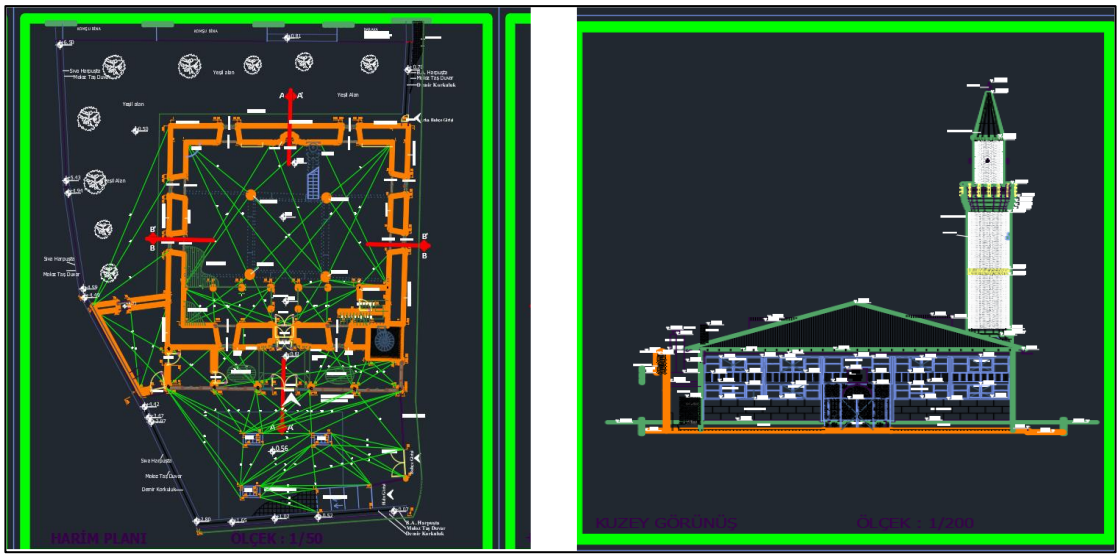
Taş Camii dikdörtgen planlı kubbesiz bir yapıya sahiptir. Cami giriş kapısı düzgün kesme taştan bir kemer biçimindedir. Cami, 12,94 m x 14,26 m ölçülerindedir, duvar yüksekliği 5,60 m'dir. Cami duvar kalınlığı 70 cm'dir. Cami iç kısımdan ahşap desteğin üzerine oturan ahşap tavan oturtulmuştur. Cami duvarları yığma taştan yapılmıştır. Cami minaresi tuğladan, kaidesi ve şerefesi düzgün kesme taştan inşa edilmiştir. Caminin kuzeybatı köşesinde bulunan minare taş kaidenin üstüne oturtulmuş, gövdesi tuğladan inşa edilmiştir (Gündoğdu vd 2010). Cami 2016 yılında restore edilmiştir. Ön ve arka kısmında yıkılmaların ve minaresinde çatlakların oluştuğu cami onarılarak yeniden ibadete açılmıştır (Anonim 2022j). Caminin restorasyon öncesi hali Şekil 7.100.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.100. Taş Camii restorasyon öncesi hali (Anonim 2022j)

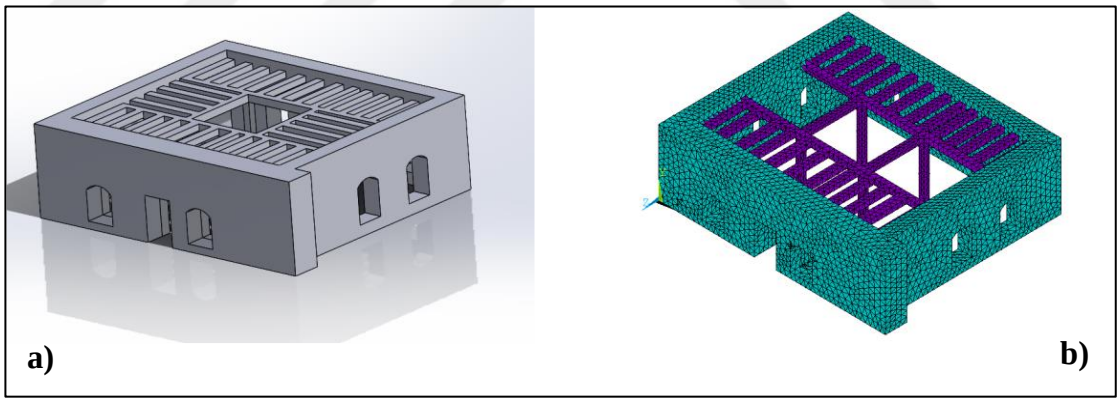
7.6.1. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii teorik modal analiz uygulaması

Tez çalışması için seçilen camilerde yapılan yapısal analize esas sonlu eleman model oluşturulma işlemi, Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii için de aynı şekilde yapılmıştır. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii üzerinde önce keşif çalışması yapılmıştır. Caminin ölçüleri ve malzeme özellikleri yerinde belirlenmiştir. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii rölevesi Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden temin edilmiştir Ölçülen boyutlar, Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii'nin cami rölevesinde belirtilen boyutları ile karşılaştırılarak caminin nihai boyutları belirlenmiştir. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii'nin cami rölevesi Şekil 7.101.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.101. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii rölevesi

Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii'nin boyutları belirlendikten sonra sonlu eleman modelinin oluşturulma aşamasına geçilmiştir. Caminin katı modeli Soidworks (2022) yazılımında oluşturulup ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Caminin sonlu eleman modeli Şekil 7.102.'de gösterilmiştir



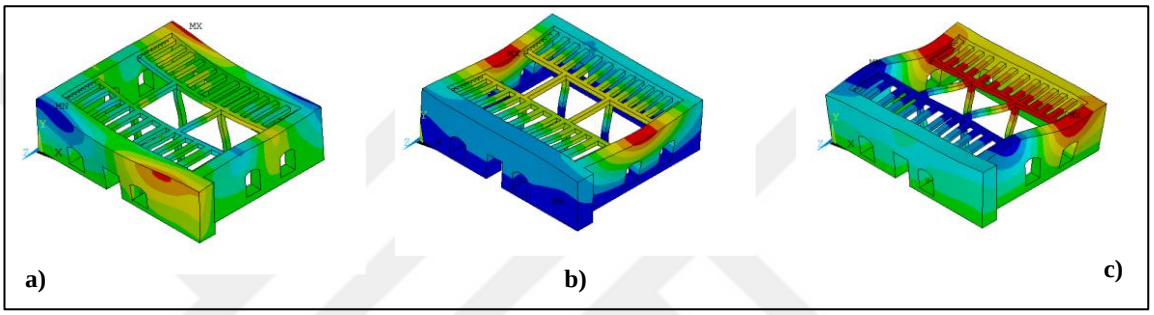
Şekil 7.102.. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman model.

Caminin Soidworks (2022) yazılımında katı modeli oluşturulduktan sonra Workbench (2016) yazılımına aktarılmıştır. Workbench (2016) yazılımına aktarıldıktan sonra katı modelin, küçük sonlu elemanlara bölünme işlemi ağlama (mesh) işlemi yapılmıştır. Bu elemanlar, 40-45 cm boyutunda sonlu küçük elemanlara ayrılacak şekilde ağlama işlemi yapılmıştır. Her bir ağlama sonucunda oluşan küçük elemanlar boyut

olarak tetra (onlu) eleman şeklindedir. Sonlu elemanlara bölünme işleminin ardından, cami modelinin sınır koşullarının tanımlanması işlemleri diğer camilerde olduğu gibi bu camide de aynı şekilde yapılmıştır. Bu işlemlerin ardından caminin sonlu eleman modeli ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır ve caminin duvar mekanik özellikleri tanımlanmıştır. Caminin, inşa edildiği taş durumuna bakıldığında, andezit ve bazalt taşlarından oluştuğu taş yüzdelerine bakıldığında camide bazalt taşının daha fazla olduğu görülmüştür. Önceki camilerde olduğu gibi, beton Schmidt çekici kullanılarak taşların sertlik değerleri belirlenmiştir. Daha sonra bu sertlik değerleri kullanılarak, Denklem 7.2 ve Denklem 7.3'teki bağıntılar yardımıyla andezit ve bazalt için taş basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Duvardaki taş yüzdeleri yardımıyla caminin duvar taş basınç mukavemeti belirlenerek Denklem 7.3 ve Denklem 7.4 yardımıyla caminin duvar mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bu değerler caminin sonlu eleman modeline tanıtılmıştır. Caminin sonlu eleman modeli üzerinde teorik modal analiz yapılarak caminin teorik mod şekilleri ve bu mod şekillerine karşılık gelen modal frekans değerleri belirlenmiştir. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii'ndeki taşlara beton Schmidt çekici sertlik deneyi uygulandığında, bazalt için ortalama sertlik değeri 20,33; andezit için ise 42,57 değeri elde edilmiştir. Bu değerler Denklem 7.2 ve Denklem 7.3'teki taş basınç mukavemeti elde etme bağıntılarında kullanıldığında andezit için ortalama taş basınç mukavemeti 38,41 MPa, bazalt için ortalama taş basınç mukavemeti 3,68 MPa olarak hesaplanmıştır. Ortalama duvar basınç mukavemeti için taşların 1 m^2 duvar alanında taş yüzdeleri belirlenmiştir. Andezit ve bazalt arasında duvarlardaki taş yüzdeleri bazalt için %80, andezit için %20 olarak belirlenmiştir. Bu yüzdelerle ortalama duvar taş basınç mukavemeti 10,62 MPa olarak hesaplanmıştır. Duvar inşa edilirken kullanılan harç türü kireç esaslı Horasan harcı olduğundan harç basınç mukavemeti 1,15 MPa alınmıştır. Duvar örülümü yığma bir biçimde olduğundan Denklem 7.3'teki α ve β sabitleri cami duvarlarının moloz şekilde örülmesi nedeniyle 0,65 ve 0,25 olarak alınmıştır. Ek olarak, K sabiti değeri de 0,5 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, Denklem 7.3 ve Denklem 7.4 'te yazıldığında ortalama duvar basınç mukavemeti 2,40 MPa, ortalama duvar elastisite modül değeri ise 480 MPa olarak hesaplanmıştır. Camideki ahşap dikmeler ve ahşap tavam döşemesi için tavan elastisite modül değeri, Yukarı Habip Efendi Camii'nde olduğu gibi 10000 MPa olarak seçilmiştir. Aşağı Hasan-Basri Taş Camii sonlu eleman modeline duvar mekanik özelliklerinin tanımlanmasının ardından model üzerinde teorik modal analiz yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 7.31.'de gösterilmiştir. Teorik mod şekilleri Şekil 7.103.'te gösterilmiştir

Çizelge 7.31. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii ilk teorik modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)
1	Kısa doğrultu (y yönünde) yatay öteleme hareketi	5,076
2	Uzun doğrultu (x yönünde) yatay öteleme hareketi	5,798
3	Düşey eksen (z yönünde) etrafında yanal burulma hareketi	7,120

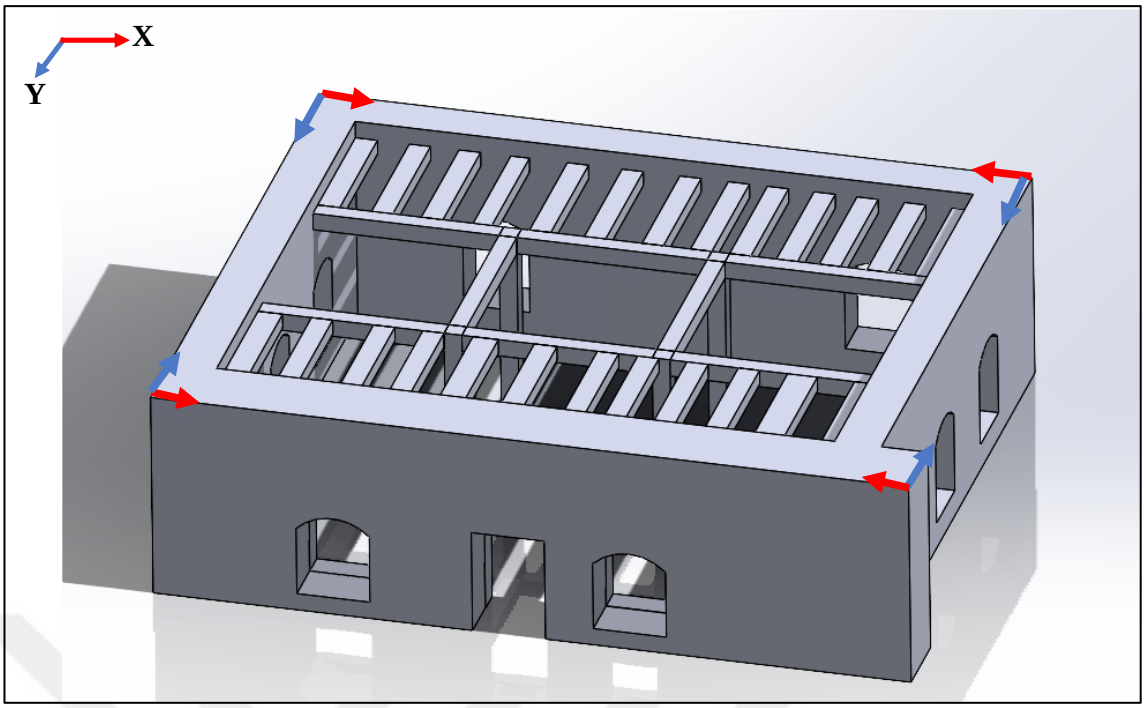


Şekil 7.103. Taş Camii a) kısa doğrultuda öteleme b) uzun doğrultuda öteleme c) burulma hareketi.

Caminin teorik modal analiz sonuçlarına göre, caminin gövde moduna ait ilk mod şekli, kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi, ikinci mod şekli uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi şeklinde ortaya çıkmıştır. Üçüncü mod da ise Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi ortaya çıkmıştır. Bu durumda, caminin dinamik davranış parametrelerini yerinde belirlemek için yapılacak Operasyonel modal analiz uygulamasında bu sonuçlar baz alınarak cami köşelerine ivmeölçerler yerleştirilmesi sonucuna ulaşılmıştır.

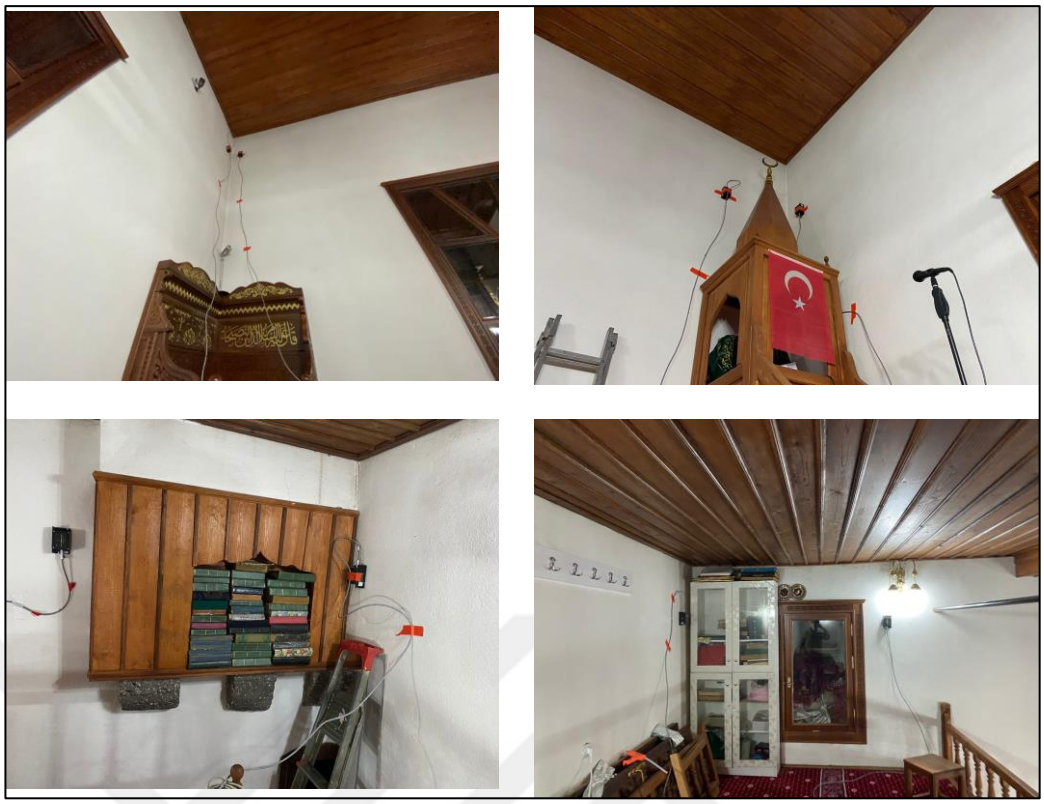
7.6.2. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii operasyonel modal analiz uygulaması

Caminin modal davranış parametrelerinin belirlenmesi için camide OMA uygulaması yapılmıştır. İvmeölçer yerleşimi, ilk teorik modal analizdeki mod şekilleri baz alınarak yapılmıştır İvmeölçerler yetersiz kablo uzunluğu, iklim şartlarından cihazların olumsuz etkilenmemesi gibi nedenlerden ötürü cami içine yerleştirilmiştir. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii ivmeölçer yerleşim krokisi Şekil 7.104.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.104. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii ivmeölçer yerleşim krokisi

Cami içinde cami köşelerine 8 adet tek eksende ivme kaydı alan tek eksenli kablolu ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Cami teorik modal analiz sonuçları incelendiğinde ilk üç mod şeklinde caminin düşey hareketine dair bir mod şekline rastlanmadığı için düşey yönde titreşim kaydı alınmamıştır. İvmeölçerlerin yerleştirilmesi işleminde yapıya herhangi bir hasar vermeden yerleştirilmesi ve sökülmesi en önemli husustur. İvmeölçerleri sabitleme işleminden önce, yön ve doğrultu belirleme işlemleri yapılması gerekmektedir. Caminin kuzey-güney yön aksı yani kapı-mihrap aksı y yönü, doğu-batı yön aksı yani yan duvarlar aksı ise x yönü olarak tayin edilmiştir. Yön tayinlerinden sonra 8 adet tek eksenli ivmeölçer, cami duvarlarına sıcak silikon ile yapıştırılmıştır ve ivmeölçerlerin üstü güçlü bant ile yapıştırılarak herhangi bir düşmeye karşı güçlendirilmiştir. Cami içi ivmeölçer yerleşimi Şekil 7.105.'te gösterilmiştir



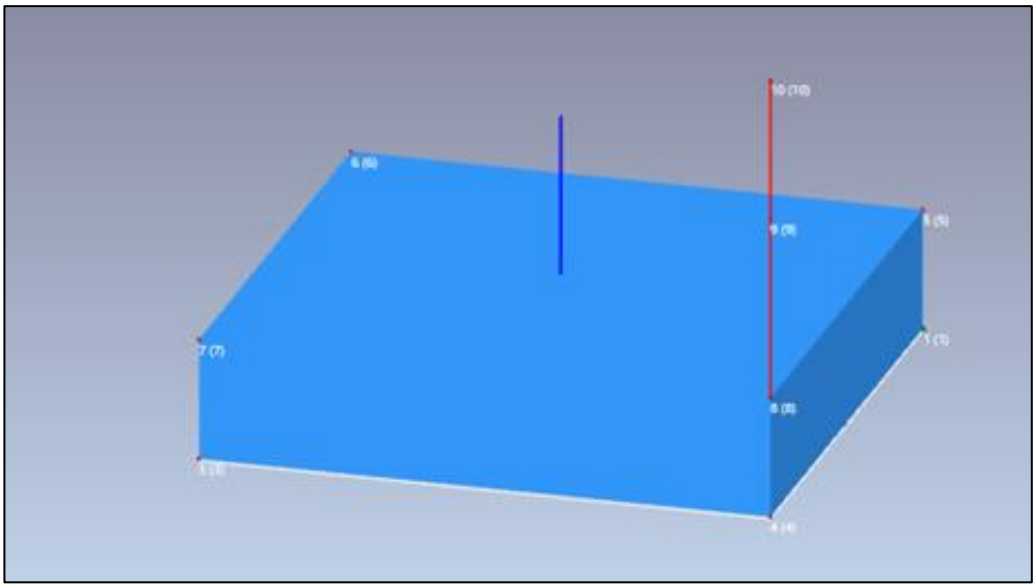
Şekil 7.105. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii ivmeölçer sabitleme çalışması

İvmeölçerlerin, caminin tüm bölümlerinde sabitleme işleminin tamamlanmasının ardından, ivmeölçerler özel veri kabloları yardımıyla veri toplama sistemine bağlanmıştır Veri toplama sistemi Şekil 7.106.'da gösterilmiştir. Her kablo, ivmeölçer için önceden belirlenen kanal numarasına yerleştirilmiştir. İvmeölçerler veri toplama sistemine bağlandıktan sonra her cihazın kendine ait kalibrasyon çarpanı veri toplama sistemine girilmiştir. Bu işlemlerden sonra kayıt işleminden önce cihaz ve kablo kontrolleri yapılmıştır. Gerekli kontroller yapıldıktan sonra kayıt alma işlemine geçilmiştir.



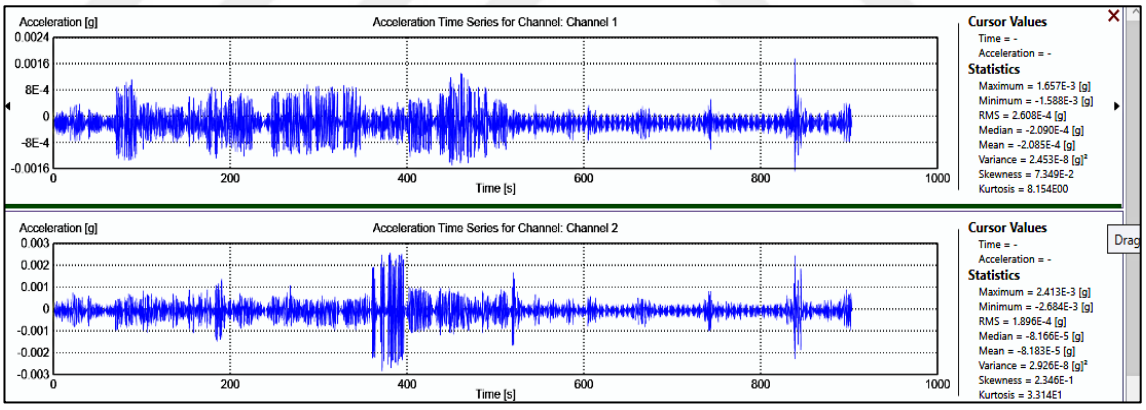
Şekil 7.106. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii veri toplama sistemi kurulması

Gerekli kontrollerin ardından, kayıt alma işlemine geçilmiştir. Tüm bu değerlendirmelerin, ardından 3 adet 100 Hz'lik ve 3 adet 200 Hz'lik olmak üzere 6 adet ivme kaydı alınmıştır. Ölçüm birimi g' dir. Cami, konumu itibariyle araç sürekliliği bakımından orta yoğunlukta bir bölgededir. Bu yoğunluk nedeniyle cami sürekli olmasa da çevresel titreşim etkisindedir. Bu titreşime ek olarak, caminin duvarlarına plastik tokmakla vurularak yapay titreşimler verilmiştir. Kayıt alma işlemleri tamamlandıktan sonra, cami mod şekillerini ve bu mod şekillerine karşılık gelen modal frekans değerlerini elde etmek için veri işleme aşamasına geçilmiştir. Caminin deneysel modal analize esas geometrisi Artemis Modal Pro (2023) yazılımında oluşturulmuştur. Şekil 7.107.'de Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii'nin Artemis yazılımındaki geometrisi gösterilmiştir.



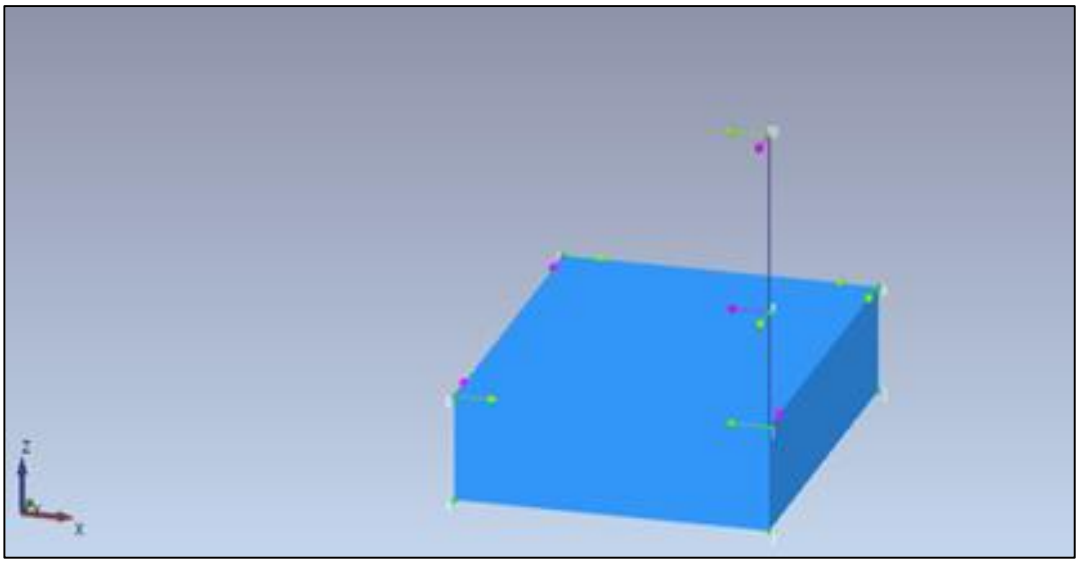
Şekil 7.107. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii Artemis yazılım geometrisi

Veri toplama sisteminde her bir ivmeölçerden alınan titreşim kayıtları, Artemis Modal Pro yazılımında ivme-zaman grafiklerine çevrilmiştir. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii ivme-zaman grafikleri Şekil 7.108'de gösterilmiştir.

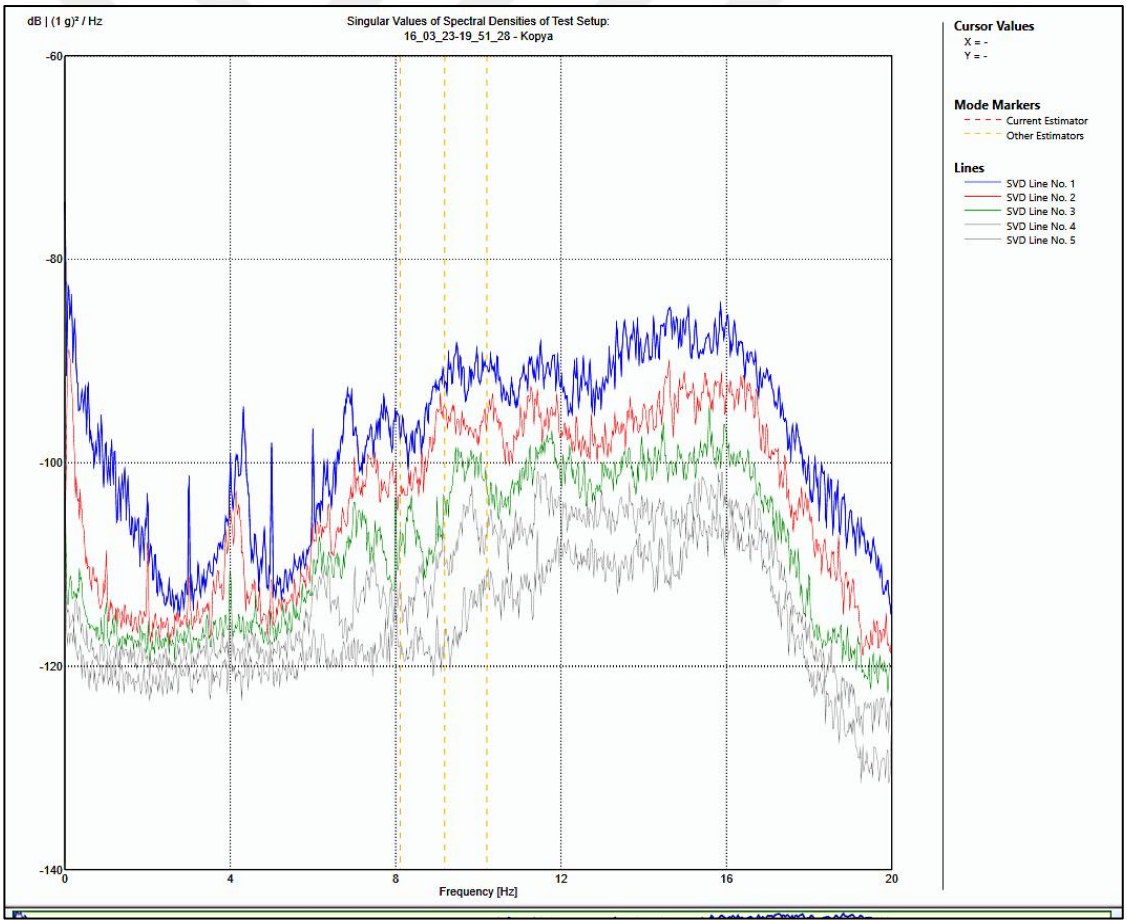


Şekil 7.108. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii titreşim kayıtlarının ivme-zaman grafiklerine dönüşümü.

Cami köşelerine yerleştirilen ivmeölçerler, yazılımdaki geometrilerine de ölçüm anındaki doğrultuları bire bir aynı olacak şekilde tanımlanmıştır. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Cami'nin ivmeölçerlerin yönlerinin yazılımda tanıtılması Şekil 7.109.'da gösterilmiştir. İvmeölçerlerin yönlerinin tanıtılmasının ardından veri analizleri yapılmıştır. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Cami'nin analizdeki spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 7.110'da gösterilmiştir.



Şekil 7.109. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Cami'nin ivmeölçerlerin ve yönlerinin Artemis geometrisinde tanımlanması.

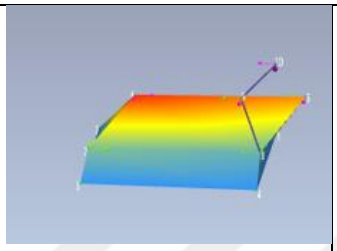
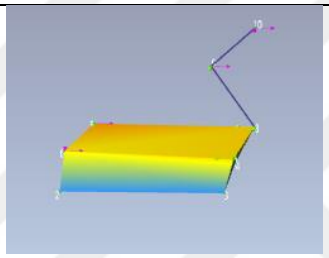
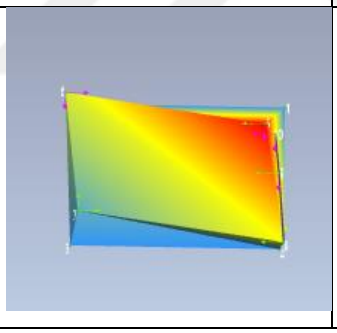


Şekil 7.110. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Cami'nin spektral yoğunluk fonksiyonu

Tüm süreçler tamamlandıktan sonra, mod şekilleri ve modal frekans değerlerini elde etme aşamasına geçilmiştir. Yazılımda farklı türde çözümleme yöntemleri

mevcuttur. Aşağı Hasan-ı Basri Taş, Camii'nin OMA titreşim kayıtları, zaman alanından çözüm yöntemi olan SSI-UPCX analiz yöntemiyle çözülerek, caminin deneysel mod şekilleri ve modal frekans değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 7.32.'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.32. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii OMA Sonuçları

Mod Şekli	**Deneysel Modal Analiz (Hz)**	
Kısa doğrultuda (y yönü) yatay öteleme hareketi		9,085
Uzun doğrultuda (x yönü) yatay öteleme hareketi		10,285
Düşey eksen (z yönü) etrafında burulma hareketi		11,767

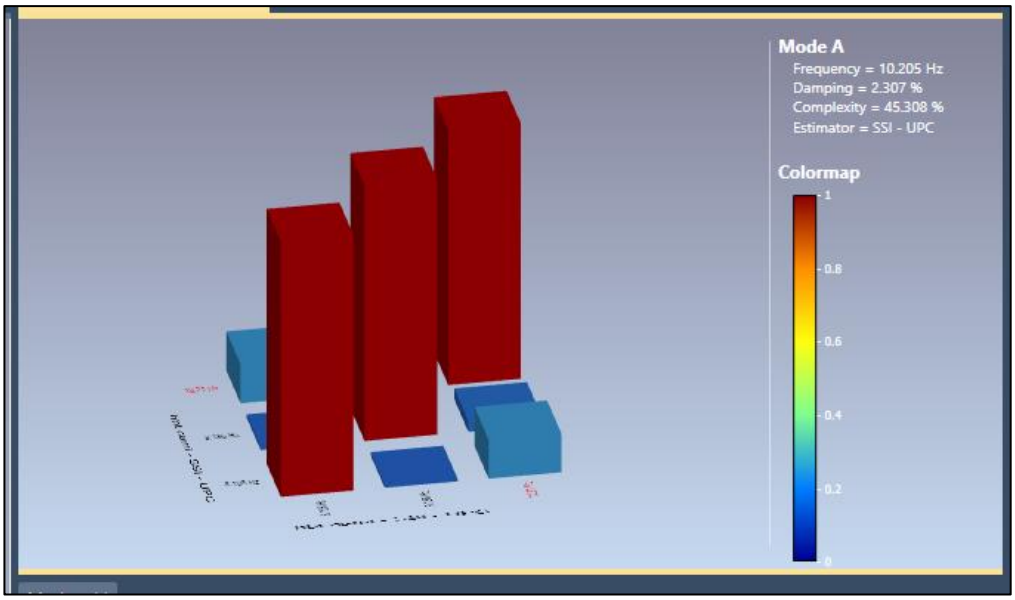
OMA sonuçları incelendiğinde, cami modunun ilk iki modu minare modlarıdır. Minarenin dinamik davranış parametreleri, cami modal davranışından bağımsızdır. Minare modal frekans değerleri, cami gövdesi modal frekans değerlerinden daha düşük frekans değerlerindedir. Bu sebeple, cami modal analiz sonuçlarında minare modları dikkate alınmamıştır. Cami gövdesinin OMA sonuçları incelendiğinde ilk modu kısa doğrultuda (y doğrultusu) öteleme, ikinci mod uzun doğrultuda öteleme (x doğrultusu), üçüncü mod ise z ekseni etrafında burulma hareketidir. Caminin deneysel dinamik parametreleri, teorik modal parametrelerle benzer çıkmıştır. Cami modlarının diğer camilerle karşılaştırıldığında daha yüksek modal frekans değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Cami duvarlarında yapılan incelemede, cami güney duvarının üst kısmında

bir bombelenme olduğu görülmüştür. Bu durum OMA sonuçlarında yapının mod şeklinden tespit edilmiştir. Ayrıca yapıyı destekleyen ahşap direklerde de dönme hareketinin gözlenmiş olması, yapıyı tehdit eden risklerden biridir Bu hasarlar Şekil 7.111.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.111. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii'ndeki gözlemlenen bazı hasarlar

Aşağı Hasan-ı Basri Taş Cami'nin deneysel modal analiz sonuçlarının, güvenilirliğinin belirlenmesi için MAC değerleri kontrol edilmiştir. Şekil 7.112.'de, Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii'nin MAC değerler grafiği gösterilmiştir. Deneysel modal frekans değerleri kullanılarak oluşturulan Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii MAC değerleri tablosu Çizelge 7.33.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.112. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Cami MAC değerler grafiği

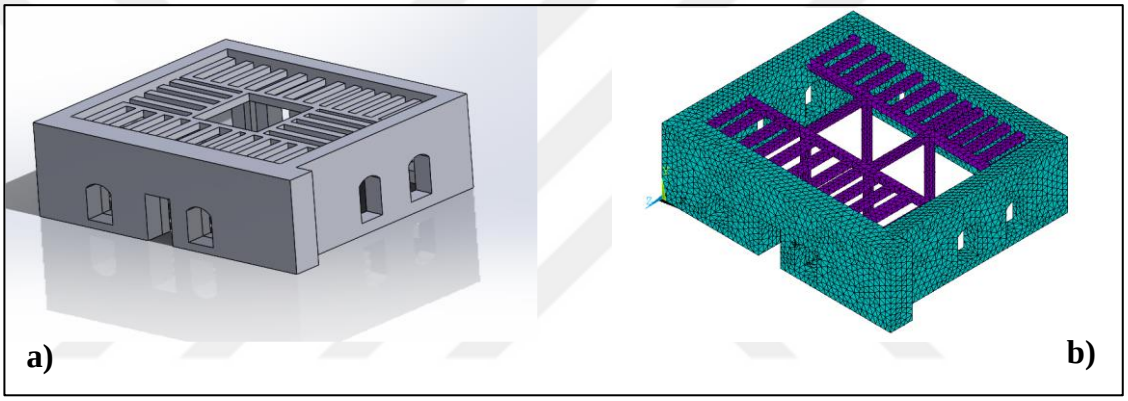
Çizelge 7.33. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Cami MAC değerleri tablosu

Frekans (Hz)	**9,085**	**10,285**	**11,767**
9,085	**1**	**0,0048**	**0,1256**
10,285	**0,0048**	**1**	**0,1325**
11,767	**0,1256**	**0,1325**	**1**

Çizelge 7.33'te verilen Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii deneysel modal analiz sonuçlarının MAC değerleri incelendiğinde, modlar arasındaki MAC değerlerinin 0'a yakın olduğu görülmüştür. Bu sonuç, mod şekillerinin birbirinden ayrık olduğunu ve deneysel modal analiz sonuçlarının güvenilir olduğunu göstermektedir. Örnek olarak kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi ile uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi arasındaki MAC değerinin 0,0048 olduğu görülmüştür. Bütün modların MAC değerleri incelendiğinde bütün modların birbirinden ayrık ve OMA uygulamasının güvenilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

7.6.3. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii sonlu eleman model kalibrasyon çalışması

Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii üzerinde deneysel modal analizin tamamlanmasının ardından sonlu eleman model kalibrasyon aşamasına geçilmiştir. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii'nin ilk teorik modal analizi için hazırlanan katı modeli önce Soidworks (2022) yazılımında oluşturulmuştur. Cami minaresi haricindeki cami duvarları, cami kemerleri, kubbesi ve son cemaat yeri bu yazılımla çizilmiştir. Oluşturulan model dinamik analizler için ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Bölüm 7.6.1.'de bu aşamalar detaylı şekilde açıklanmıştır. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii'nin katı modeli ve sonlu eleman modeli Şekil 7.113.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.113. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli

Cami, diğer büyük camiler gibi kompleks bir plana sahip olmayıp, basit kare plana sahip ahşap destekli bir cami olduğundan, camide kubbe, kemer, tonoz gibi yapı elemanları bulunmamaktadır. Cami minaresi haricindeki cami duvarları, cami ahşap dikmeleri ve ahşap tavan döşemesi bu yazılımda çizilmiştir. Soidworks (2022) yazılımında oluşturulan cami katı modeli, sınır koşullarının tanımlanması ve modelin küçük elemanlara bölünme işleminin tamamlanması için Workbench (2016) yazılımına aktarılmıştır. Bölüm 7.6.1'de Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii katı modeli üzerinde 40 cm boyutunda düzgün dörtyüzlü (tetrahedral) şeklinde meshleme işlemi yapıldığından bahsedilmiştir. Bu işlemin sonucunda 14.769 düğüm noktalı ve 61.479 elemanlı bir sonlu eleman modeli ortaya çıkmıştır. Mesnet koşulları ve ağlama işlemlerinin tamamlanmasının ardından katı model ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Yazılımda ilk önce sonlu eleman malzeme modeli olarak yazılımda bulunan SOLID65 malzeme modeli güncellenmiştir. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii'nin, Bölüm

7.6.1.'de tanımlanan duvar elastisite modülleri ile ilk teorik modal analiz gerçekleştirilmiştir. Teorik modal analiz sonuçları ile caminin OMA sonuçları Çizelge 7.34'te gösterilmiştir

Çizelge 7.34. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii ilk teorik modal analiz ile OMA sonuçlarının karşılaştırılması.

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda (y yönünde) öteleme	9,085	5,076	44,12
2	Uzun doğrultuda (x yönünde) öteleme	10,265	5,798	43,51
3	Düşey eksen (z yönünde) etrafında yanal burulma	11,767	7,120	39,49

Çizelge 7.34. incelendiğinde, teorik modal analiz ve OMA sonuçları arasında farklı sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle, cami gövdesinin ilk iki mod şekli olan kısa ve uzun doğrultuda öteleme hareketlerindeki hata oranı çok yüksektir. İki modal analiz arasındaki sonuçların birbiriyle örtüşmesi için sonlu eleman model kalibrasyonu gerekmektedir. Model kalibrasyon çalışmaları mesnet koşullarının güncellenmesi, yapının geometrik ölçülerinin gözden geçirilmesi, malzeme özelliklerinin güncellenerek tekrarlı analizlerin yapılmasını içermektedir Caminin, teorik ve OMA sonuçlarısıralama ve mod şekli olarak aynı çıktığından mesnet koşulları ve geometrik ölçülerin güncellenmesine gerek duyulmamıştır. Dolayısıyla, Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii için malzeme elastik modüllerinin güncellenmesi işlemi yapılmıştır. Malzeme elastisite modülleri iterasyon işlemleri caminin Operasyonel modal analiz sonuçlarına diğer bir deyişle yapının doğal davranış parametrelerine en yakın kalibrasyon değerine ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. İterasyon işlemleri sonunda, Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii için ulaşılan kalibrasyon elastisite modülü değerleri Çizelge 7.35.'te gösterilmiştir.

Çizelge 7.35. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii kalibrasyon elastisite modül değerleri

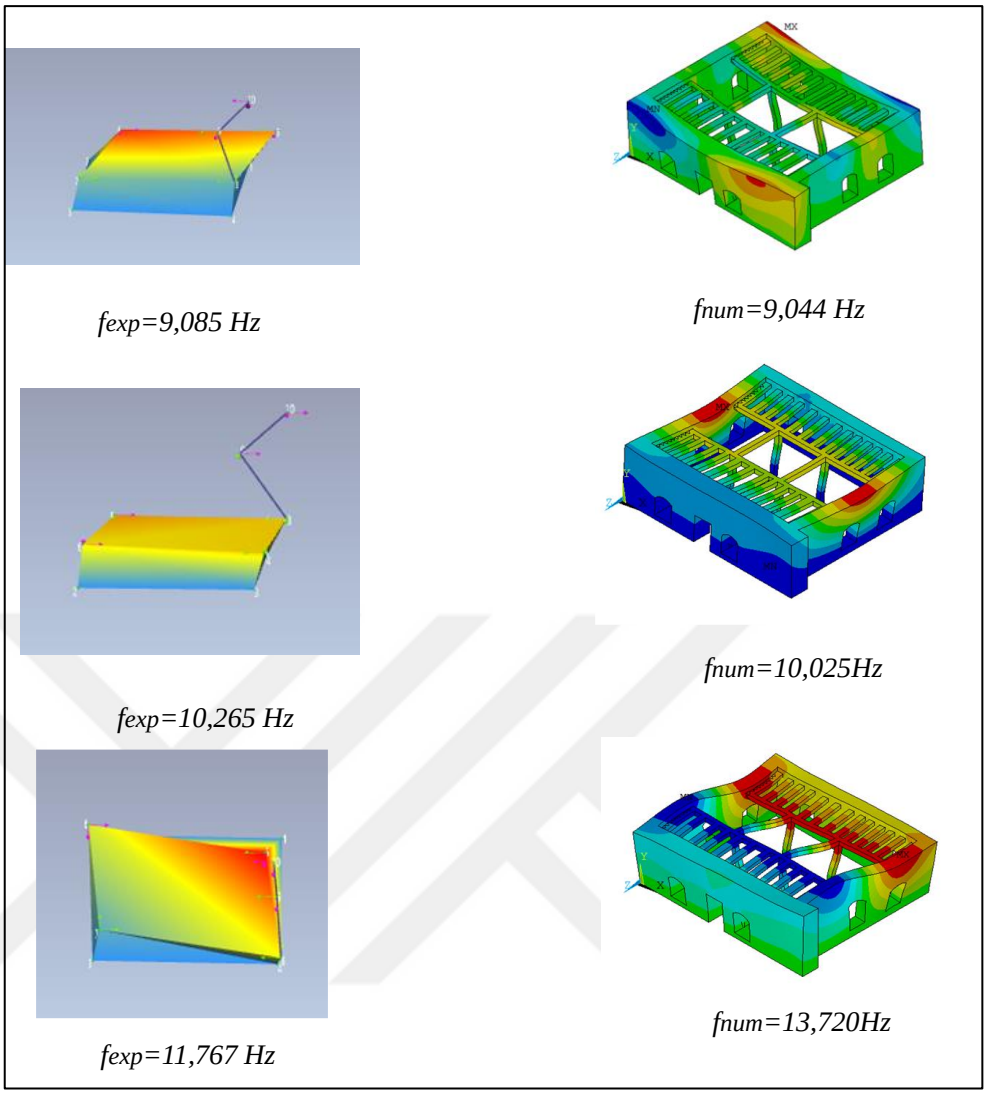
Basınç Dayanımı (MPa)	**Elastisite Modülü (MPa)**					
Duvar	*Duvar*		*Ahşap Tavan*		*Ahşap Dikme*	
	Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra
240	480	2.350	10.000	10.000	10.000	10.000

Çizelge 7.35. incelendiğinde cami duvarları için duvar elastisite modülü değerleri 2,350 MPa olarak sonlu eleman modeline tanıtılmıştır. Ahşap dikmeler ve ahşap tavan döşemesi için, Kaplan (2013), çalışmasında belirttiği gibi meşe elemanı seçilmiştir. Elastisite modülü liflere dik doğrultuda 10.000 MPa değeri caminin sonlu eleman modeline tanıtılmıştır. Bu şekilde tanımlanan elastisite modül kalibrasyonu ile gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçlarının, caminin deneysel dinamik parametrelerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Özellikle caminin ilk mod şekline karşılık gelen modal frekans değerleri karşılaştırıldığında hata oranının %1'in altında olduğu görülmüştür. Bu sonlu eleman model kalibrasyonun caminin sonlu eleman modeline tanıtıldığında, caminin doğal dinamik davranış parametrelerini neredeyse yansıttığı görülmüştür.

Çizelge 7.36.'da caminin OMA sonuçlarıve bu kalibrasyon elastisite modül değerleriyle yapılan teorik modal analiz sonuçları diğer bir deyişle caminin deneysel ve teorik dinamik davranış parametreleri gösterilmiştir. Şekil 7.114.'te Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii'nin deneysel modal analiz sonuçlarıyla, kalibre edilmiş teorik modal analiz sonuçları şematik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 7.36. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii kalibre edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanan teorik modal analiz ile OMA sonuçlarının karşılaştırılması.

Mod Numarası	**Mod Şekli**	**Frekans (Hz)**		**Hata Oranı (%)**
		OMA	**Teorik**	
1	Kısa doğrultuda (y yönünde) öteleme	9,085	9,044	0,45
2	Uzun doğrultuda (x yönünde) öteleme	10,265	10,025	2,33
3	Düşey eksen (z yönünde) etrafında yanal burulma	11,767	13,720	16,59



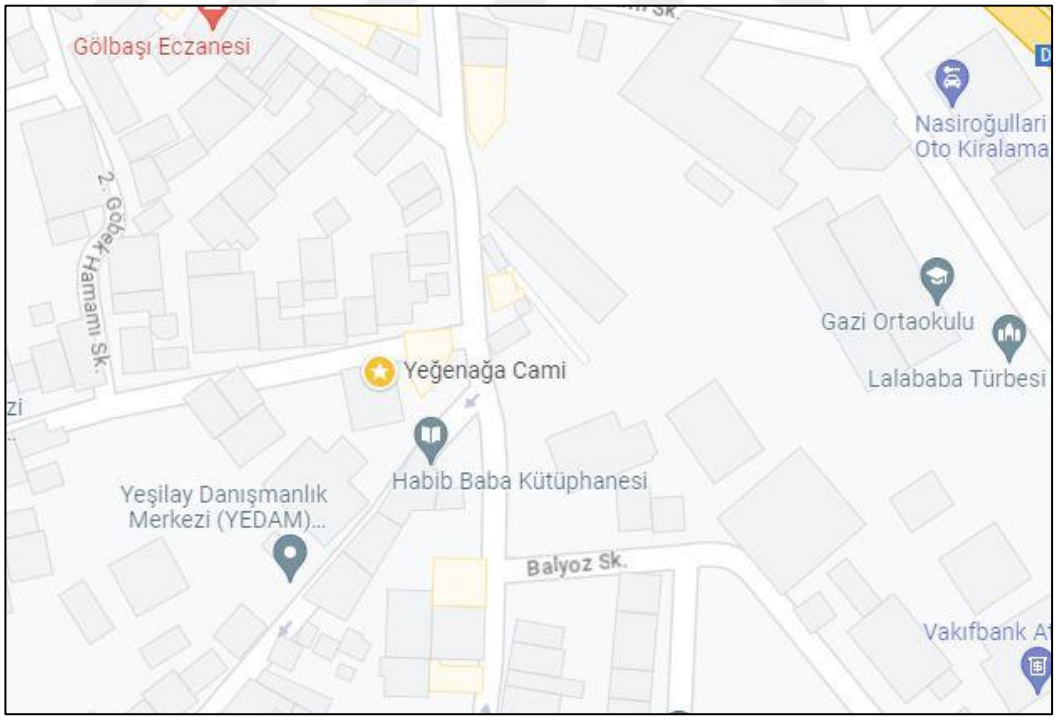
Şekil 7.114. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Cami OMA ve teorik modal modal analiz sonuçlarının şematik olarak karşılaştırılması.

7.7. Yeğenağa Camii

Erzurum merkez Yakutiye ilçesi Nazik Çarşı Caddesi üzerinde yer alan cami 1661 yılında Yeğen Hacı Ahmet Ağa tarafından yaptırılmıştır. Cami basit planlı, kubbesiz, kare şeklinde bir mimariye sahiptir Caminin genel görünümü Şekil 7.155.'te, caminin konumu ise Şekil 7.116.'da gösterilmiştir.



Şekil 7.115. Yeğenağa Camii



Şekil 7.116. Yeğenağa Camii konumu (Anonim 2022k)

Cami 11 m x 11 m ölçülerine sahiptir. Cami duvar yüksekliği 5,40 m'dir. Cami duvar kalınlığı 105 cm'dir. Caminin dış duvarları moloz taştan inşa edilmiş, duvar

aralarına ahşap hatıllar atılmıştır. Cami kapısının olduğu duvar düzgün kesme taştan inşa edilmiştir. Cami içten ahşap direklerle desteklenmiştir. Cami iç görünümü Şekil 7.117.'de gösterilmiştir. Cami son cemaat yeri altı ahşap destekle desteklenmiştir (Konyalı 1960; Gündoğdu vd 2010; Berkli ve Özsağlıcak 2019). Cami en son 2006 yılında restore edilmiştir. Bu restorasyonda, son cemaat yerinde bulunan duvar yıkılarak, caminin aslına uygun şekilde bugünkü haline getirilmiştir. Ek olarak çatı kaplaması değiştirilmiştir ve cami içindeki ahşap direkler yeniden boyanmıştır (Berkli ve Özsağlıcak 2019). Caminin restorasyon öncesi durumu Şekil 7.118'de gösterilmiştir.



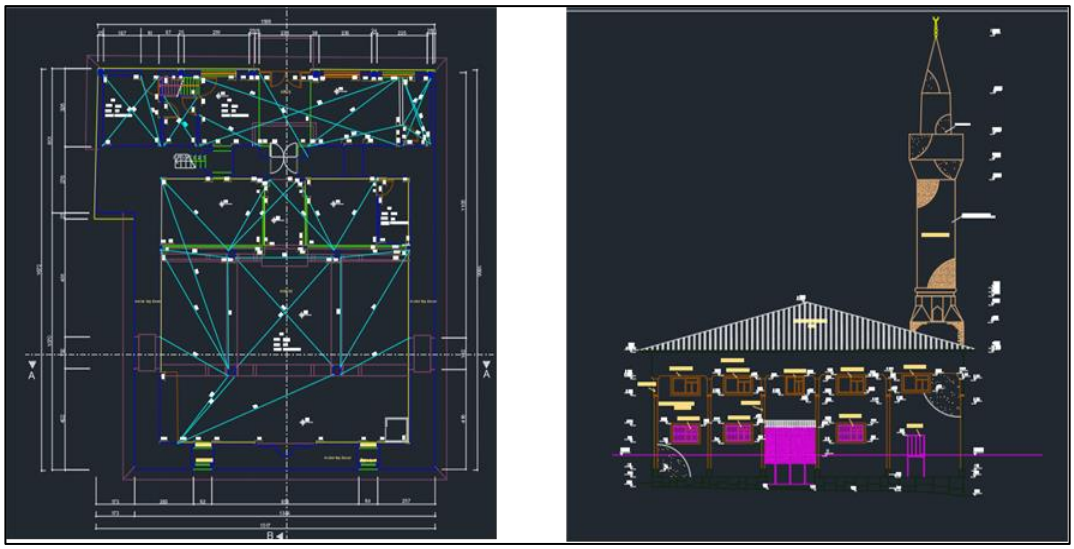
Şekil 7.117. Cami iç görünümü



Şekil 7.118. Yeğenağa Camii restorasyon öncesi hali (Berkli ve Özsağlıcak 2019)

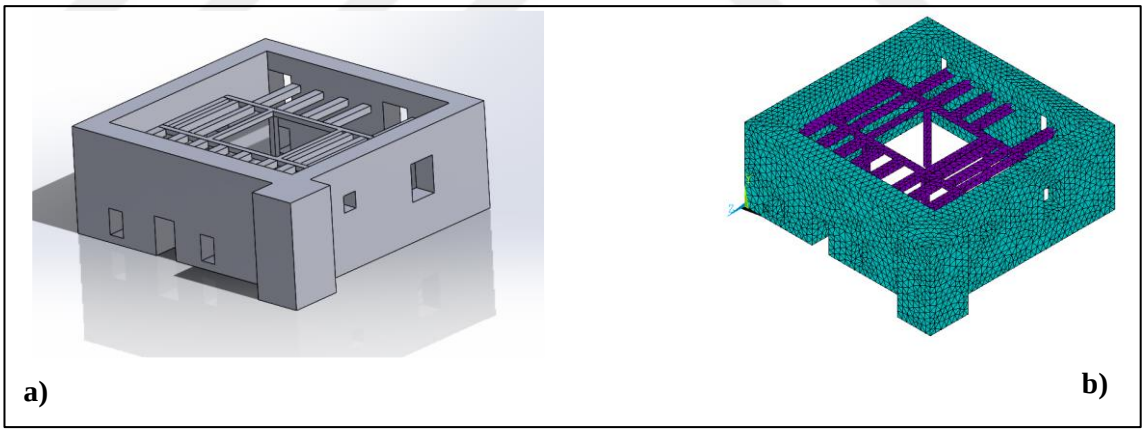
7.7.1. Yeğenağa Camii teorik modal analiz uygulaması

Tez çalışması için seçilen camilerde yapılan yapısal analize esas sonlu eleman model oluşturulma işlemi, Yeğenağa Camii için de aynı şekilde yapılmıştır. Yeğenağa Camii üzerinde önce keşif çalışması yapılmıştır. Caminin ölçüleri ve malzeme özellikleri belirlenmiştir. Yeğenağa Camii rölevesi Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Ölçülen boyutlar, Yeğenağa Camii'nin cami rölevesinde belirtilen boyutları ile karşılaştırılarak caminin nihai boyutları belirlenmiştir. Yeğenağa Camii'nin cami rölevesi Şekil 7.119.'da gösterilmiştir.



Şekil 7.119. Yeğenağa Camii rölevesi

Yeğenağa Camii'nin boyutları belirlendikten sonra sonlu eleman modelinin oluşturulma aşamasına geçilmiştir. Caminin katı modeli Soidworks (2022) yazılımında oluşturulup ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Caminin sonlu eleman modeli Şekil 7.120.'de gösterilmiştir.



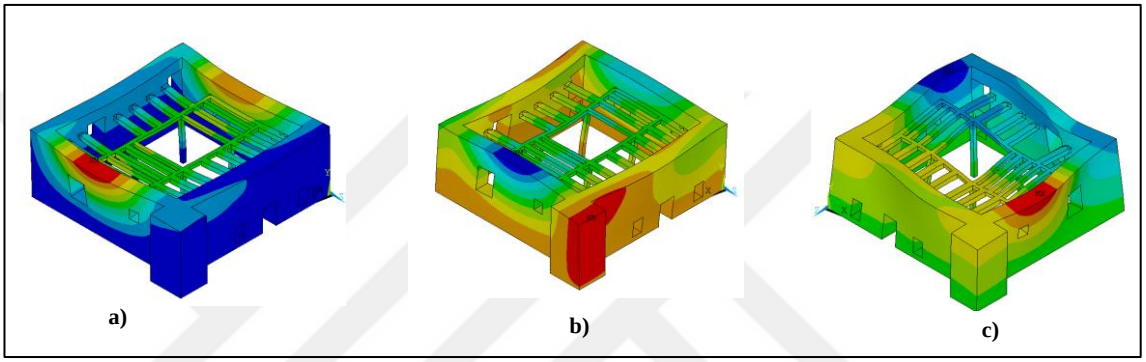
Şekil 7.120. Yeğenağa Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli

Caminin Soidworks (2022) yazılımında katı modeli oluşturulduktan sonra Workbench (2016) yazılımına aktarılmıştır. Workbench (2016) yazılımına aktarıldıktan sonra katı modelin, küçük sonlu elemanlara bölünme işlemi ağlama (mesh) işlemi yapılmıştır. Bu elemanlar, 40-45 cm boyutunda sonlu küçük elemanlara ayrılacak şekilde ağlama işlemi yapılmıştır. Her bir ağlama sonucunda oluşan küçük elemanlar boyut olarak tetra (onlu) eleman şeklindedir. Sonlu elemanlara bölünme işleminin ardından,

cami modelinin sınır koşullarının tanımlanması işlemleri diğer camilerde olduğu gibi bu camide de aynı şekilde yapılmıştır. Bu işlemlerin ardından caminin sonlu eleman modeli ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır ve caminin duvar mekanik özellikleri tanımlanmıştır. Caminin inşa edildiği taş durumuna bakıldığında, andezit ve bazalt taşlarından oluştuğu taş yüzdelerine bakıldığında camide bazalt taşının daha fazla olduğu görülmüştür. Diğer camilerde olduğu gibi, cami duvarlarına beton Schmidt çekici kullanılarak taşların sertlik değerleri belirlenmiştir. Daha sonra bu sertlik değerleri kullanılarak, Denklem 7.2. ve Denklem 7.3.'teki bağıntılar yardımıyla andezit ve bazalt için taş basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Duvardaki taş yüzdeleri yardımıyla caminin duvar taş basınç mukavemeti belirlenerek, Denklem 7.3 ve Denklem 7.4 yardımıyla caminin duvar mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bu değerler caminin sonlu eleman modeline tanıtılmıştır. Caminin sonlu eleman modelinde teorik modal analiz yapılarak caminin teorik mod şekilleri ve bu mod şekillerine karşılık gelen modal frekans değerleri belirlenmiştir. Yeğenağa Camii için andezit ve bazalttan oluşan duvarlarda bazalt yüzdesi, andezite göre daha fazladır. Cami duvarlarındaki taşlara beton Schmidt çekici sertlik deneyi uygulandığında, bazalt için ortalama sertlik değeri 31,06 andezit için ise 27,37 değeri elde edilmiştir. Bu değerler Denklem 7.2 ve Denklem 7.3'teki taş basınç mukavemeti bağıntılarında kullanıldığında andezit için ortalama taş basınç mukavemeti 25,03 MPa; bazalt için ortalama taş basınç mukavemeti 15,75 MPa olarak hesaplanmıştır. Ortalama duvar basınç mukavemeti için taşların 1 m^2 duvar alanında taş yüzdeleri belirlenmiştir. Andezit ve bazalt arasında duvarlardaki taş yüzdeleri bazalt için %80; andezit için %20 olarak belirlenmiştir. Bu yüzdelerle ortalama duvar taş basınç mukavemeti 17,60 MPa olarak hesaplanmıştır. Duvar inşa edilirken kullanılan harç türü kireç esaslı Horasan harcı olduğundan, harç basınç mukavemeti 1,15 MPa alınmıştır. Duvar örülümü yığma bir biçimde olduğundan Denklem 7.3'teki α ve β sabitleri, duvar örülme şekli moloz bir şekilde örüldüğünden sırasıyla 0,65 ve 0,25 olarak alınmıştır. Ek olarak K sabiti değeri de 0,5 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, Denklem 7.3 ve Denklem 7.4 'te yazıldığında ortalama duvar basınç mukavemeti 3,34 MPa, ortalama duvar elastisite modül değeri ise 668 MPa olarak hesaplanmıştır. Camideki ahşap dikmeler ve ahşap tavan döşemesi için tavan elastisite modül değeri, Yukarı Habip Efendi Camii ve Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii'de olduğu gibi 10000 MPa olarak seçilmiştir. Yeğenağa Camii sonlu eleman modeline duvar mekanik özelliklerinin tanımlanmasının ardından model üzerinde teorik modal analiz yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 7.37.'de gösterilmiştir. Teorik mod şekilleri Şekil 7.121.'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.37. Yeğenağa Camii ilk teorik modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)
1	Kısa doğrultuda (x yönünde) yatay öteleme hareketi	6,203
2	Uzun doğrultu (y yönünde) yatay öteleme hareketi	6,320
3	Düşey eksen (z yönünde) etrafında yanal burulma hareketi	9,420

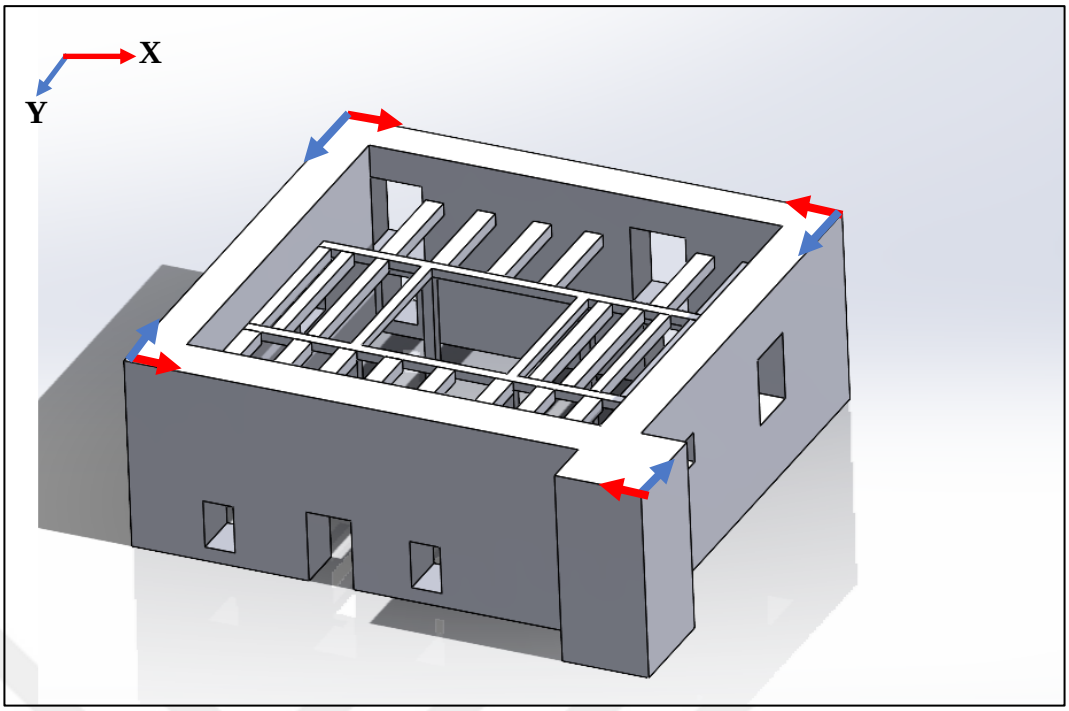


Şekil 7.121. Yeğenağa Camii a) kısa doğrultuda öteleme b) uzun doğrultuda öteleme c) burulma hareketi.

Teorik modal analiz sonuçlarından elde edilen bulgulara göre, caminin ilk modu, kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi, ikinci modu uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi şeklindedir. Dördüncü mod da ise düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi ortaya çıkmıştır. Bu durumda, caminin dinamik davranış parametrelerini yerinde belirlemek için yapılacak Operasyonel modal analiz uygulamasında bu sonuçlar baz alınarak cami köşelerinde ivmeölçerler yerleştirilmesi sonucuna ulaşılmıştır.

7.7.2. Yeğenağa Camii operasyonel modal analiz uygulaması

Caminin modal davranış parametrelerinin belirlenmesi için camide OMA uygulaması yapılmıştır. İvmeölçer yerleşimi, ilk teorik modal analizdeki mod şekilleri baz alınarak yapılmıştır İvmeölçerler yetersiz kablo uzunluğu, iklim şartlarından cihazların olumsuz etkilenmemesi gibi nedenlerden ötürü cami içine yerleştirilmiştir. Yeğenağa Camii ivmeölçer yerleşim krokisi Şekil 7.122.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.122. Yeğenağa Camii ivmeölçer yerleşim krokisi

Cami içinde cami köşelerine 8 adet tek eksende ivme kaydı alan tek eksenli kablolu ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Cami teorik modal analiz sonuçları incelendiğinde ilk üç mod şeklinde, caminin düşey hareketine dair bir mod şekline rastlanmadığı için düşey yönde titreşim kaydı alınmamıştır. İvmeölçerlerin yerleştirilmesi işleminde yapıya herhangi bir hasar vermeden yerleştirilmesi ve sökülmesi en önemli hususdur. İvmeölçerleri sabitleme işleminden önce yön ve doğrultu belirleme işlemleri yapılması gerekmektedir. Caminin kuzey-güney yön aksı yani kapı-mihrap aksı y yönü, doğu-batı yön aksı yani yan duvarlar aksı ise x yönü olarak tayin edilmiştir. Yön tayinlerinden sonra 8 adet tek eksenli ivmeölçer, cami duvarlarına sıcak silikon ile yapıştırılmıştır ve ivmeölçerlerin üstü güçlü bant ile yapıştırılarak herhangi bir düşmeye karşı güçlendirilmiştir. Cami içi ivmeölçer yerleşimi Şekil 7.123.'te gösterilmiştir.



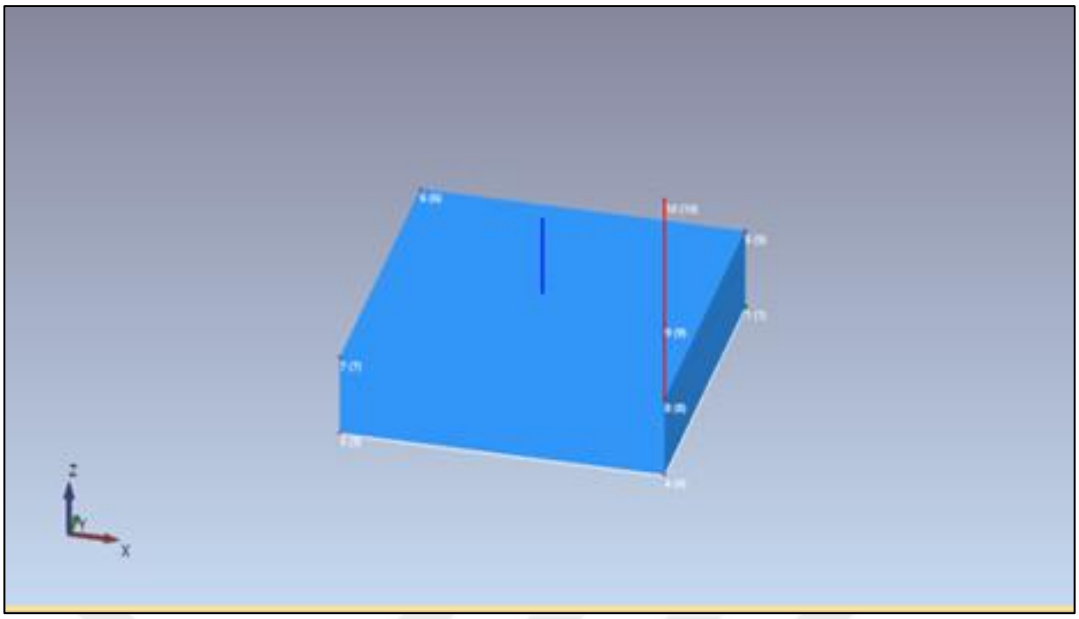
Şekil 7.123. Yeğenağa Camii ivmeölçer sabitleme çalışması

İvmeölçerlerin, caminin tüm bölümlerinde sabitleme işleminin tamamlanmasının ardından ivmeölçerler özel veri kabloları yardımıyla veri toplama sistemine bağlanmıştır. Veri toplama sistemi Şekil 7.124.'te gösterilmiştir. Her kablo, ivmeölçer için önceden belirlenen kanal numarasına yerleştirilmiştir. İvmeölçerler veri toplama sistemine bağlandıktan sonra her cihazın kendine ait kalibrasyon çarpanı veri toplama sistemine girilmiştir. Bu işlemlerden sonra kayıt işleminden önce cihaz ve kablo kontrolleri yapılmıştır. Gerekli kontroller yapıldıktan sonra kayıt alma işlemine geçilmiştir.



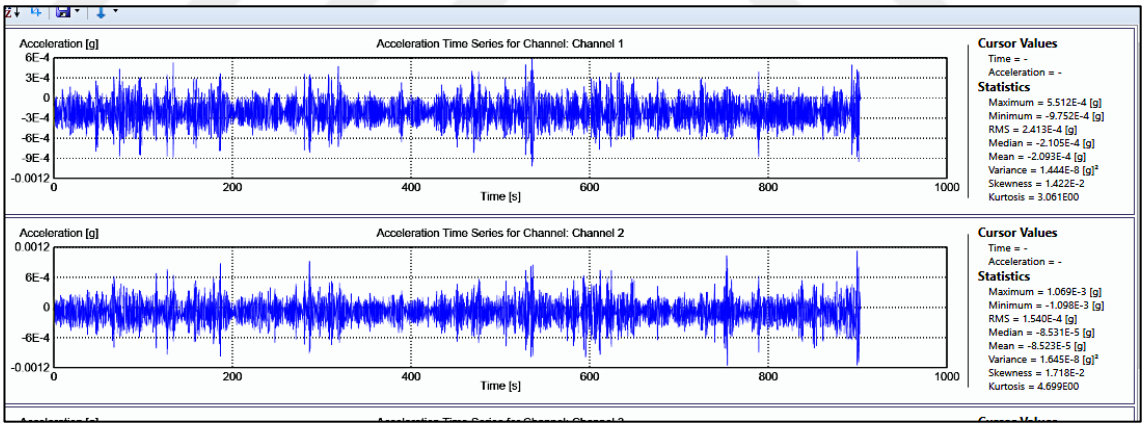
Şekil 7.124. Yeğenağa Camii veri toplama sistemi kurulması

Gerekli kontrollerin ardından, kayıt alma işlemine geçilmiştir. Tüm bu değerlendirmelerin, ardından 3 adet 100 Hz'lik ve 3 adet 200 Hz'lik olmak üzere 6 adet ivme kaydı alınmıştır. Ölçüm birimi g'dir. Cami, konumu itibariyle araç sürekliliği bakımından seyrek bir bölgededir ve cami çevresel bir titreşim etkisi altında değildir. Bu nedenle, caminin duvarlarında plastik tokmakla vurularak yapay titreşimler verilmiştir. Kayıt alma işlemleri tamamlandıktan sonra cami mod şekillerini ve bu mod şekillerine karşılık gelen modal frekans değerlerini elde etmek için veri işleme aşamasına geçilmiştir. Caminin deneysel modal analize esas geometrisi Artemis Modal Pro (2023) yazılımında oluşturulmuştur. Şekil 7.125.'te Yeğenağa Camii'nin Artemis yazılımındaki geometrisi gösterilmiştir.



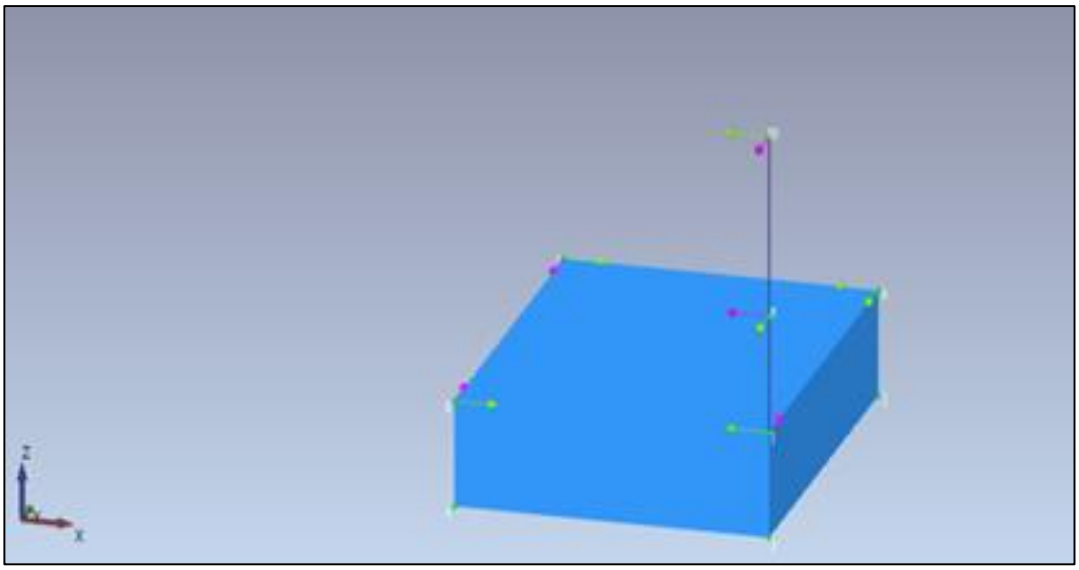
Şekil 7.125. Yeğenağa Camii Artemis yazılım geometrisi

Veri toplama sisteminde her bir ivmeölçerden alınan titreşim kayıtları, Artemis Modal Pro yazılımında ivme-zaman grafiklerine çevrilmiştir. Yeğenağa Camii ivme-zaman grafikleri Şekil 7.126.'da gösterilmiştir.

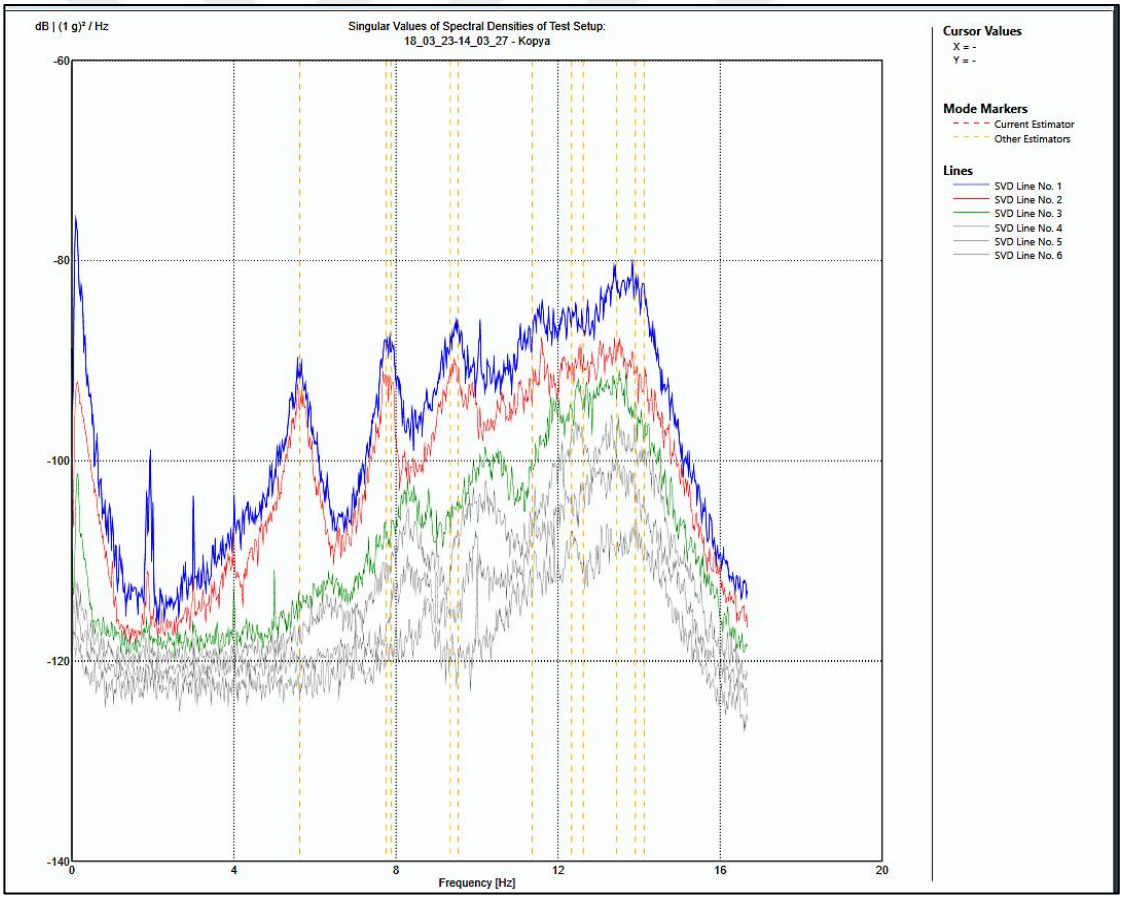


Şekil 7.126. Yeğenağa Camii titreşim kayıtlarının ivme-zaman grafiklerine dönüşümü

Cami köşelerine yerleştirilen ivmeölçerler, yazılımdaki geometrilerine de ölçüm anındaki doğrultuları bire bir aynı olacak şekilde tanımlanmıştır. Yeğenağa Camii'nin ivmeölçerlerin yönlerinin yazılımda tanıtılması Şekil 7.127'de gösterilmiştir. İvmeölçerlerin yönlerinin tanıtılmasının ardından veri analizleri yapılmıştır. Yeğenağa Cami'nin analizdeki spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 7.128.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.127. Yeğenağa Camii ivmeölçerlerin ve yönlerinin Artemis geometrisinde tanımlanması.

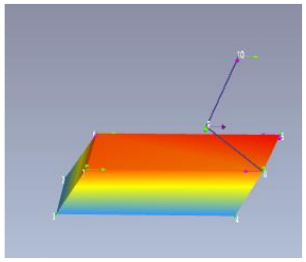
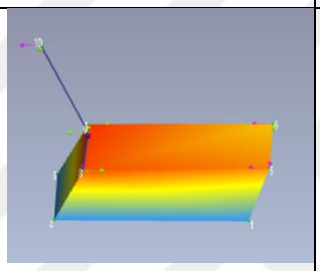
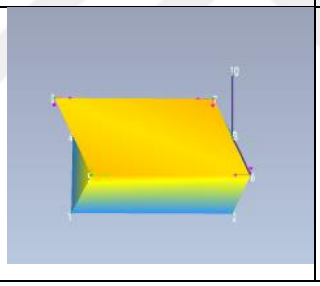


Şekil 7.128. Yeğenağa Camii'nin spektral yoğunluk fonksiyonları

Tüm süreçler tamamlandıktan sonra, caminin mod şekilleri ve modal frekans değerlerini elde etme aşamasına geçilmiştir. Yazılımda farklı türde çözümleme

yöntemleri mevcuttur. Yeğenağa Camii'nin OMA titreşim kayıtları, frekans alanında çözüm yöntemi olan FDD analiz yöntemiyle çözülerek, caminin deneysel mod şekilleri ve modal frekans değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 7.38.' de gösterilmiştir.

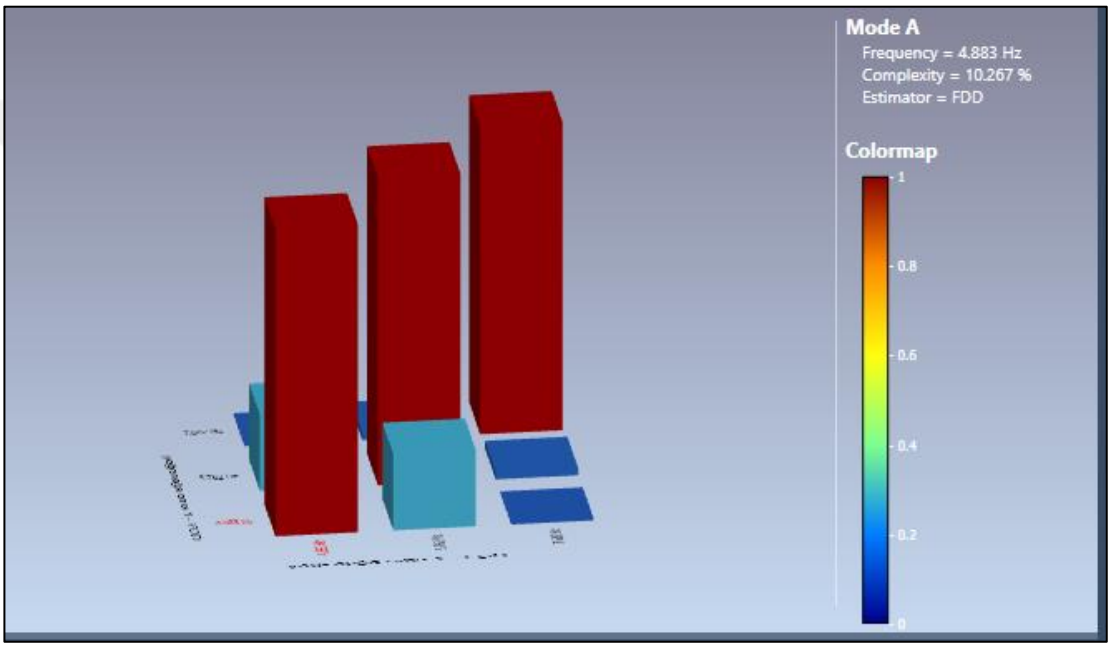
Çizelge 7.38. Yeğenağa Camii OMA Sonuçları

Mod Şekli	**Frekans (Hz)**	
Kısa doğrultuda (x yönü) yatay gövde öteleme hareketi		4,297
Uzun doğrultuda (y yönü) yatay gövde öteleme hareketi		5,846
Düşey eksen (z yönü) etrafında yanal burulma hareketi		6,824

OMA sonuçları incelendiğinde, cami modunun ilk iki modu minare modlarıdır. Minarenin dinamik davranış parametreleri, cami modal davranışından bağımsızdır. Minare modal frekans değerleri, cami gövdesi modal frekans değerlerinden daha düşük frekans değerlerindedir. Bu sebeple cami modal analiz sonuçlarında minare modları dikkate alınmamıştır. Caminin gövdesine ait OMA sonuçları incelendiğinde ilk modu kısa doğrultuda (x doğrultusu) öteleme, ikinci mod uzun doğrultuda öteleme (y doğrultusu), üçüncü mod ise z ekseni etrafında burulma hareketidir. Caminin deneysel dinamik parametreleri teorik modal parametrelerle benzer çıkmıştır. Cami hasar durumları incelendiğinde, dış duvarlarındaki zemin seviyesindeki ahşap hatılların eskimiş ve yer yer çürümüş olduğu, dış duvar taş malzemelerinde dökülmeler ve çatlaklar olduğu

görülmüştür. Ayrıca cami doğu duvarının batı yönüne doğru kısmi devrildiği görülmüştür. Bu hasarların, yapı sağlığı açısından risk oluşturduğu yorumu yapılabilmektedir.

Yeğenağa Cami'nin deneysel modal analiz sonuçlarının, güvenilirliğinin belirlenmesi için MAC değerleri kontrol edilmiştir. Şekil 7.129.'da Yeğenağa Camii'nin MAC değerler grafiği gösterilmiştir. Deneysel modal frekans değerleri kullanılarak oluşturulan Yeğenağa Camii MAC değerleri tablosu Çizelge 7.39.'da gösterilmiştir.



Şekil 7.129. Yeğenağa Camii MAC değerleri grafiği

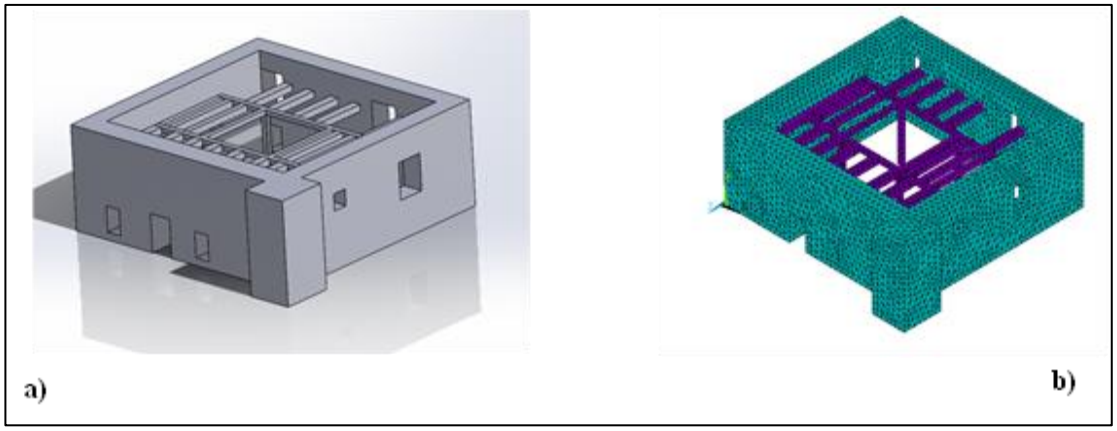
Çizelge 7.39. Yeğenağa Camii MAC değerleri tablosu

Frekans (Hz)	**4,297**	**5,896**	**6,824**
4,297	**1**	**0,2044**	**0,0021**
5,896	**0,2044**	**1**	**0,1666**
6,824	**0,0021**	**0,1666**	**1**

Çizelge 7.39'da verilen Yeğenağa Camii deneysel modal analiz sonuçlarının MAC değerleri incelendiğinde, modlar arasındaki MAC değerlerinin 0'a yakın olduğu görülmüştür. Bu sonuç, mod şekillerinin birbirinden ayrık olduğunu ve deneysel modal analiz sonuçlarının güvenilir olduğunu göstermektedir. Örnek olarak kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi ile uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi arasındaki MAC değerinin 0,2044 olduğu görülmüştür. Bütün modların MAC değerleri incelendiğinde bütün modların birbirinden ayrık ve OMA sonuçlarının güvenilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

7.7.3. Yeğenağa Camii sonlu eleman model modül kalibrasyon çalışması

Yeğenağa Camii üzerinde deneysel modal analizin tamamlanmasının ardından, model kalibrasyon aşamasına geçilmiştir. Yeğenağa Camii'nin ilk teorik modal analizi için hazırlanan katı modeli önce Soidworks (2022) yazılımında oluşturulmuştur. Cami minaresi haricindeki cami duvarları, cami kemerleri, kubbesi ve son cemaat yeri bu yazılımla çizilmiştir. Oluşturulan model dinamik analizler için ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Bölüm 7.7.1.'de bu aşamalar detaylı şekilde açıklanmıştır. Yeğenağa Camii'nin katı modeli ve sonlu eleman modeli Şekil 7.130.'da gösterilmiştir.



Şekil 7.130. Yeğenağa Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli

Cami, diğer büyük camiler gibi kompleks bir plana sahip olmayıp, basit kare plana sahip ahşap destekli bir cami olduğundan, camide kubbe, kemer, tonoz gibi yapı elemanları bulunmamaktadır. Cami minaresi haricindeki cami duvarları, cami ahşap

dikmeleri ve ahşap tavan döşemesi bu yazılımda çizilmiştir. Soidworks (2022) yazılımında oluşturulan cami katı modeli, sınır koşullarının tanımlanması ve modelin küçük elemanlara bölünme işleminin tamamlanması için Workbench (2016) yazılımına aktarılmıştır. Bölüm 7.7.1'de Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii katı modeli üzerinde 40 cm boyutunda düzgün dörtyüzlü (tetrahedral) şeklinde meshleme işlemi yapıldığından bahsedilmiştir. Bu işlemin sonucunda 12.658 düğüm noktalı ve 52.363 elemanlı bir sonlu eleman modeli ortaya çıkmıştır. Mesnet koşulları ve ağlama işlemlerinin tamamlanmasının ardından katı model ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Yazılımda ilk önce sonlu eleman malzeme modeli olarak yazılımda bulunan SOLID65 malzeme modeli güncellenmiştir. Yeğenağa Camii'nin, Bölüm 7.7.1.'de tanımlanan duvar elastisite modülleri ile ilk teorik modal analiz gerçekleştirilmiştir. Teorik modal analiz sonuçları ile caminin OMA sonuçları Çizelge 7.40.'da gösterilmiştir.

Çizelge 7.40. Yeğenağa Camii ilk teorik modal analiz ile OMA sonuçlarının karşılaştırılması.

Mod Numarası	**Mod Şekli**	**Frekans (Hz)**		**Hata Oranı (%)**
		OMA	**Teorik**	
1	Kısa doğrultuda (x yönünde) öteleme	4,297	6,203	44,35
2	Uzun doğrultuda (y yönünde) öteleme	5,896	6,320	7,19
3	Düşey eksen (z yönünde) etrafında yanal burulma	6,824	9,420	49,90

Çizelge 7.40. incelendiğinde, teorik modal analiz ve OMA sonuçları arasında farklı sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle, yapının ilk mod şekli olab kısa doğrultuda öteleme hareketindeki hata oranı çok yüksektir. İki modal analiz arasındaki sonuçların birbiriyle örtüşmesi için sonlu eleman model kalibrasyonu gerekmektedir. Model kalibrasyon çalışmaları mesnet koşullarının güncellenmesi, yapının geometrik ölçülerinin gözden geçirilmesi, malzeme özelliklerinin güncellenerek tekrarlı analizlerin yapılmasını içermektedir Caminin, teorik ve OMA sonuçlarısıralama ve mod şekli olarak aynı çıktığından mesnet koşulları ve geometrik ölçülerin güncellenmesine gerek duyulmamıştır. Dolayısıyla, Yeğenağa Camii için malzeme elastisite modüllerinin güncellenmesi işlemi yapılmıştır. Malzeme elastisite modülleri iterasyon işlemleri

caminin Operasyonel modal analiz sonuçlarına diğer bir deyişle yapının doğal davranış parametrelerine en yakın kalibrasyon değerine ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. İterasyon işlemleri sonunda, Yeğenağa Camii için ulaşılan kalibrasyon elastisite modülü değerleri Çizelge 7.41.'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.41. Yeğenağa Camii kalibrasyon elastisite modül değerleri

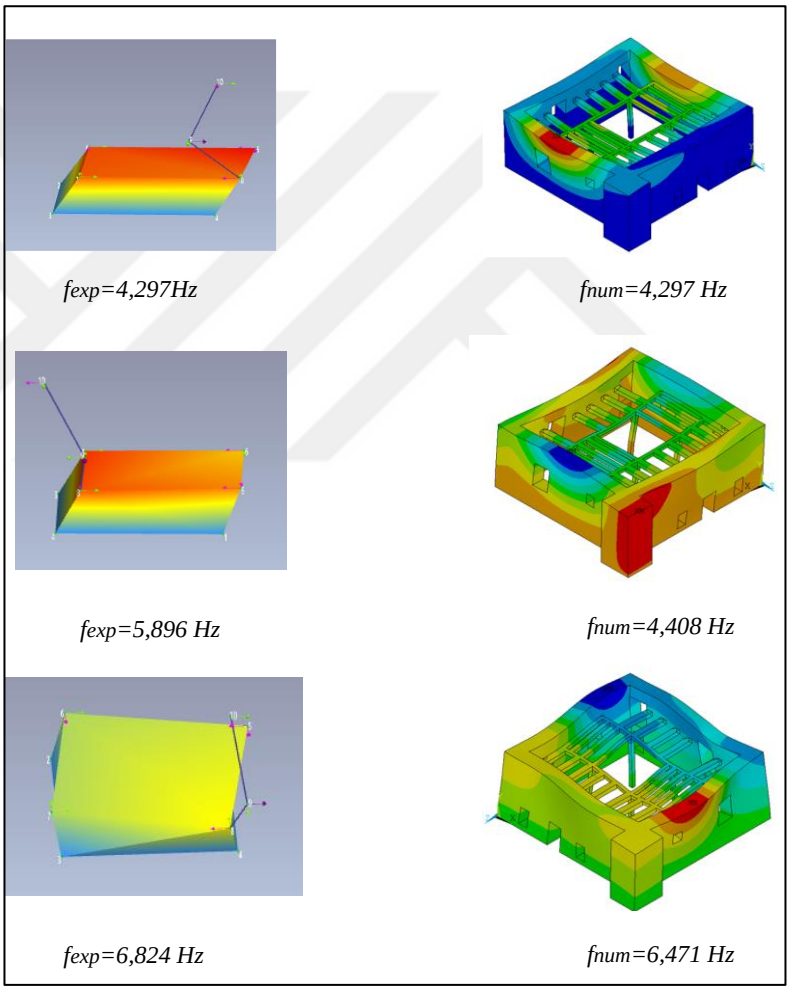
Basınç Dayanımı (MPa)	**Elastisite Modülü (MPa)**					
Duvar	*Duvar*		*Ahşap Tavan*		*Ahşap Dikme*	
	Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra
3,34	668	255	10.000	10.000	10.000	10.000

Çizelge 7.41. incelendiğinde cami duvarları için duvar elastisite modülü değerleri 255 MPa olarak sonlu eleman modeline tanıtılmıştır. Ahşap dikmeler ve ahşap tavan döşemesi için, Kaplan (2013), çalışmasında belirttiği gibi meşe elemanı seçilmiştir. Elastisite modülü liflere dik doğrultuda 10.000 MPa değeri caminin sonlu eleman modeline tanıtılmıştır. Bu şekilde tanımlanan elastisite modül kalibrasyonu ile gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçlarına göre Yeğenağa Camii için, elastisite modülü kalibrasyon değerlerinin uygun olduğu ve caminin deneysel dinamik parametrelerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Özellikle caminin ilk mod şekline karşılık gelen modal frekans değerleri karşılaştırıldığında değerler birebir aynı

Çizelge 7.42.'de caminin OMA sonuçlarıve bu kalibrasyon elastisite modül değerleriyle yapılan teorik modal analiz sonuçları diğer bir deyişle caminin deneysel ve teorik dinamik davranış parametreleri gösterilmiştir. Şekil 7.131.'de Yeğenağa Camii'nin deneysel modal analiz sonuçlarıyla, kalibre edilmiş teorik modal analiz sonuçları şematik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 7.42. Yeğenağa Camii Camii kalibre edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanan teorik modal analiz ve OMA sonuçlarının karşılaştırılması.

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda (x yönünde) öteleme	4,297	4,297	0,00
2	Uzun doğrultuda (y yönünde) öteleme	5,896	4,408	26,59
3	Düşey eksen (z yönünde) etrafında yanal burulma	6,824	6,471	5,17



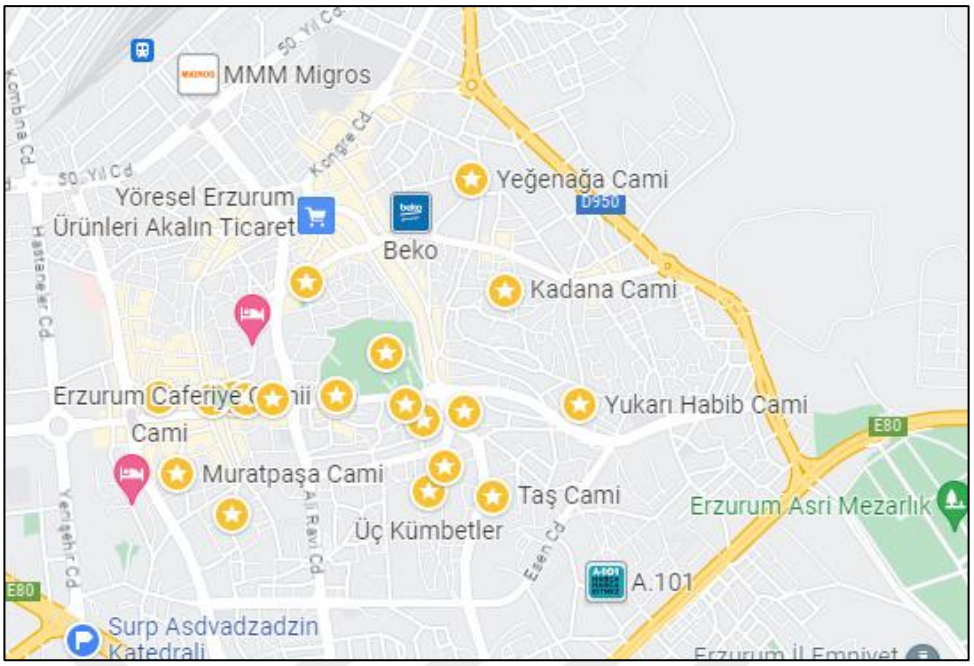
Şekil 7.131. Yeğenağa Camii deneysel ve teorik modal analiz sonuçlarının şematik olarak karşılaştırılması.

7.8. Kadana Camii

Erzurum merkez Yakutiye ilçesi Kadana Mahallesi'nde bulunan cami 1751 yılında Kadana Zade İsmail Efendi tarafından yaptırılmıştır. Kubbesiz, kare plana sahip olan cami 13 m x 13 m boyutlarındadır. Cami yüksekliği 5,25 m, duvar kalınlığı 65 cm' dir. Cami köşeleri kesme boşluklu bazalt taşından yapılmıştır. Caminin kuzey cephesi haricindeki duvarlar, bazalt ve andezitten oluşan yığma moloz taşlardan yapılmıştır ve bu molozların arasına hatıllar üç sıra halinde atılmıştır. Cami kuzey cephesi tamamen keme boşluklu bazalt taşından inşa edilmiştir. Kuzey cephede yedi ahşap direkle desteklenen son cemaat yeri bulunmaktadır. Cami içeriden dört ahşap destekli ahşap tavanlıdır. Camini kuzeybatısında taş kaideye oturtulmuş, gövdesi tuğladan olup tek şerefeli bir minare bulunmaktadır (Özdoğan 2018; Özsağlıcak 2019). Şekil 7.132'de caminin genel görünümü, Şekil 7.133.'te caminin konumu ve Şekil 7.134.'te caminin iç görünümü gösterilmiştir.



Şekil 7.132. Kadana Camii



Şekil 7.133. Kadana Camii konumu (Anonim 2022l)



Şekil 7.134. Kadana Cami iç görünümü

Cami en son 2016 yılında restorasyon işlemine tabi tutulmuştur. Bu restorasyonda taşıyıcı duvarlar üzerinde herhangi bir işlem yapılmamıştır. Son cemaat yeri aslına uygun hale getirilmiştir. Cami içi ahşap direklerin boyaları kazılarak, caminin özgün ahşap rengi

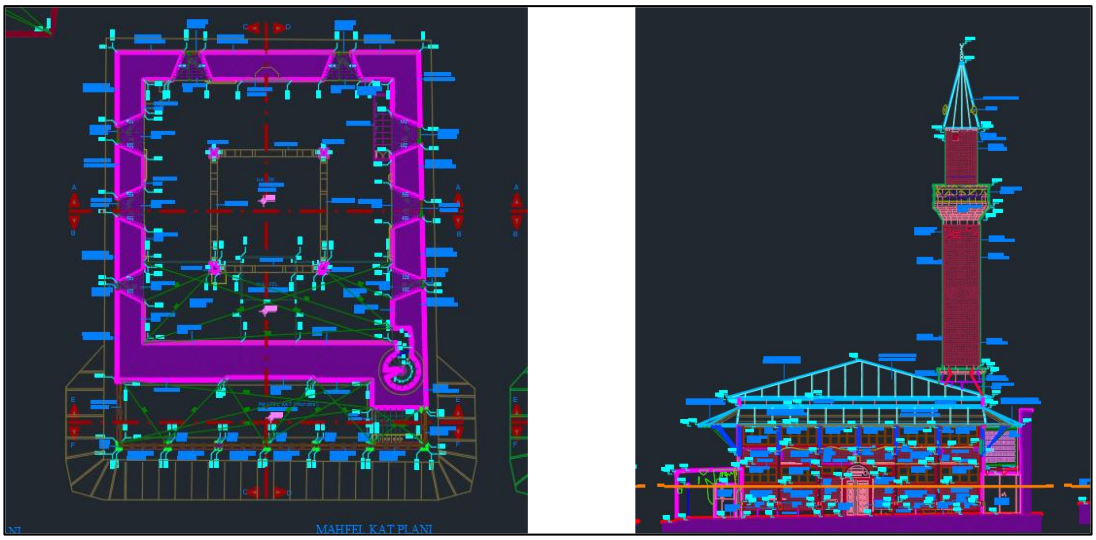
ortaya çıkarılmıştır. Ahşap döşeme kaplamasındaki bozuk yerler ve çatı kaplaması onarılmıştır. Minare tuğlası, şerefesi ve cami duvarındaki hasarlı taşlar değiştirilerek, aynı malzemeyle yenileri yerleştirilmiştir. Cami külahı değiştirilerek kurşun levha ile kaplanmıştır. Cami duvarlarında ve minare gövdesindeki çimento esaslı derzler kazınarak, kireç esaslı derzler yapılmıştır (Özsağlıcak 2019). Caminin restorasyon öncesi durumu Şekil 7.135.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.135. Erzurum Kadana Camii restorasyon öncesi durumu (Özsağlıcak 2019)

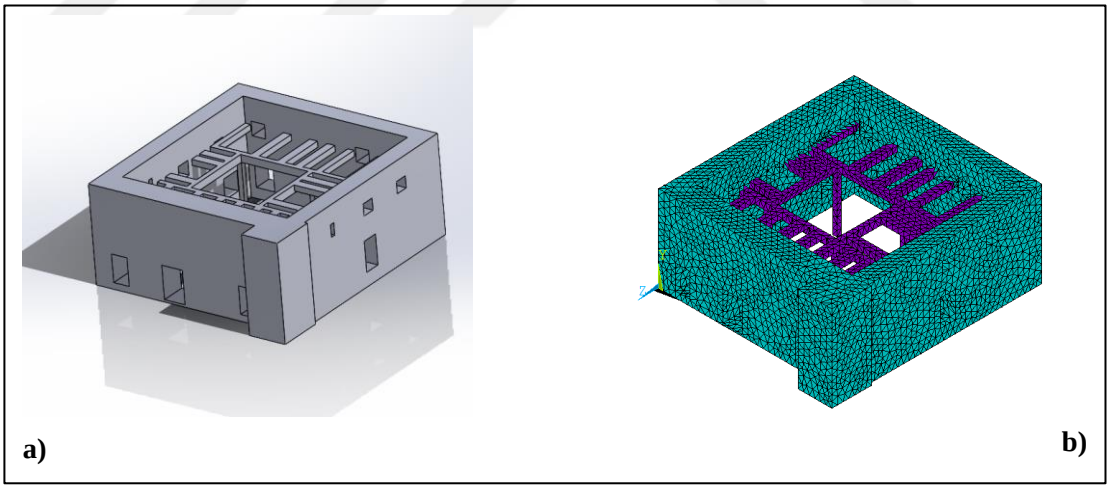
7.8.1. Kadana Camii teorik modal analiz uygulaması

Tez çalışması için seçilen camilerde yapılan yapısal analize esas sonlu eleman model oluşturulma işlemi, Kadana Camii için de aynı şekilde yapılmıştır. Kadana Camii üzerinde önce keşif çalışması yapılmıştır. Caminin ölçüleri ve malzeme özellikleri belirlenmiştir. Kadana Camii rölevesi Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Ölçülen boyutlar, Kadana Camii'nin cami rölevesinde belirtilen boyutları ile karşılaştırılarak caminin nihai boyutları belirlenmiştir. Kadana Camii'nin cami rölevesi Şekil 7.136.'da gösterilmiştir.



Şekil 7.136. Kadana Camii rölevesi

Kadana Camii'nin boyutları belirlendikten sonra sonlu eleman modelinin oluşturulma aşamasına geçilmiştir. Caminin katı modeli Soidworks (2022) yazılımında oluşturulup ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Caminin katı modeli ve sonlu eleman modeli Şekil 7.137.'de gösterilmiştir.



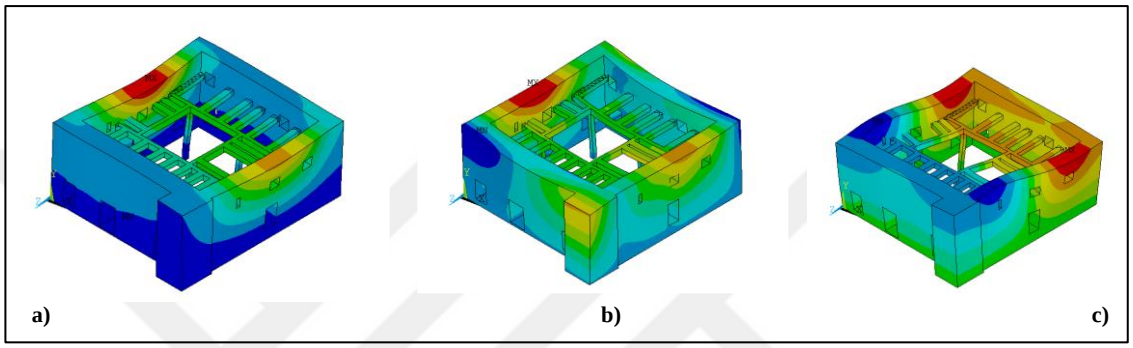
Şekil 7.137. Kadana Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli

Caminin Soidworks (2022) yazılımında katı modeli oluşturulduktan sonra Workbench (2016) yazılımına aktarılmıştır. Workbench (2016) yazılımına aktarıldıktan sonra katı modelin, küçük sonlu elemanlara bölünme işlemi ağlama (mesh) işlemi yapılmıştır. Bu elemanlar, 40-45 cm boyutunda sonlu küçük elemanlara ayrılacak şekilde ağlama işlemi yapılmıştır. Her bir ağlama sonucunda oluşan küçük elemanlar boyut olarak tetra (onlu) eleman şeklindedir. Sonlu elemanlara bölünme işleminin ardından,

cami modelinin sınır koşullarının tanımlanması işlemleri diğer camilerde olduğu gibi bu camide de aynı şekilde yapılmıştır. Bu işlemlerin ardından caminin sonlu eleman modeli ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır ve caminin duvar mekanik özellikleri tanımlanmıştır. Özdoğan (2018), çalışmasında Kadana Camii'nin yapı malzemesi ve harç özellikleri üzerinde çalışmıştır. Caminin yapı malzemesi olarak andezit ve bazalttan oluştuğu, harç malzemesinin Horasan harcı olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda duvarlardaki taş yüzdeleri ayrıntılı bir biçimde belirtilmiştir. Bu taşlara beton Schmidt çekici testi uygulanmıştır. Andezit için ortalama yatay sertlik değeri yaklaşık 19,9; bazalt için ortalama sertlik değeri 20,65 olarak elde edilmiştir. Denklem 7.2 ve Denklem 7.3 kullanılarak taş basınçları hesaplandığında andezit için 18,37 MPa; bazalt için 3,88 MPa olarak hesaplanmıştır. Ortalama taş basıncını hesaplamak için duvardaki andezit ve bazalt yüzdelerinden yararlanmıştır. Her duvar için ayrı ayrı 1 metrekare duvar kesiti incelendiğinde, Özdoğan (2018)'ın çalışmasında belirtilen duvar yüzdeleri alınmıştır. Bu kabule göre ortalama taş basınç mukavemeti kuzey duvar için 7,5 MPa, güney duvar için 5,3 MPa, batı duvar için 6,05 MPa ve doğu duvar için 6,78 MPa olarak hesaplanmıştır. Duvar basınç mukavemeti hesabı için, Denklem 7.3 kullanılmıştır. Harç olarak Horasan harcı kullanılmıştır ve basınç mukavemeti 1,15 MPa olarak hesaplanmıştır. K değeri 0,5, α ve β katsayıları cami duvarları düzgün bir biçimde örüldüğünden 0,7 ve 0,3 olarak kullanılmıştır. Bütün bu değerler kullanılarak kuzey duvar basınç mukavemeti ortalama 2,13 MPa, güney duvar basınç mukavemeti 1.51 MPa, batı duvar basınç mukavemeti için 1,72 MPa ve doğu duvar basınç mukavemeti için 1,93 MPa olarak hesaplanmıştır. Tüm duvarların ortalama basınç mukavemeti hesaplandığında 1,91 MPa olarak hesaplanmıştır. Ortalama duvar elastisite modülü ise bu değerin 200 katı yani 382 MPa olarak hesaplanmıştır. Camideki ahşap dikmeler ve ahşap tavan döşemesi için tavan elastisite modül değeri diğer ahşap destekli camilerde olduğu gibi 10000 MPa olarak seçilmiştir. Kadana Camii sonlu eleman modeline duvar mekanik özelliklerinin tanımlanmasının ardından model üzerinde teorik modal analiz yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 7.43.'te gösterilmiştir. Teorik mod şekilleri Şekil 7.138.'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.43. Kadana Camii ilk teorik modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)
1	Kısa doğrultuda (x yönünde) yatay öteleme hareketi	4,856
2	Uzun doğrultuda (y yönünde) yatay öteleme hareketi	4,968
3	Düşey eksen (z yönünde) etrafında yanal burulma hareketi	6,674

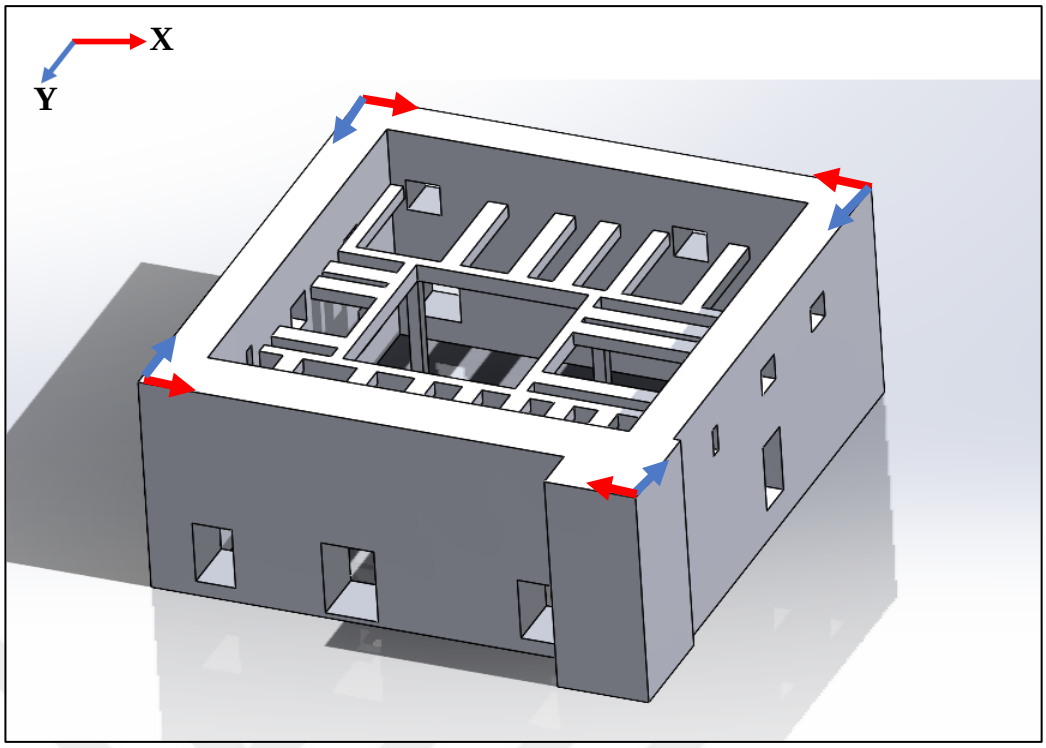


Şekil 7.138. Kadana Camii a) kısa doğrultuda öteleme b) uzun doğrultuda öteleme c) burulma hareketi.

Teorik modal analiz sonuçlarından elde edilen sonuçlara göre caminin ilk mod şekli kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi, ikinci mod şekli uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi şeklindedir. Üçüncü mod şekli ise düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi ortaya çıkmıştır. Bu durumda, caminin dinamik davranış parametrelerini yerinde belirlemek için yapılacak Operasyonel modal analiz uygulamasında bu sonuçlar baz alınarak cami köşelerinde ivmeölçerler yerleştirilmesi sonucuna ulaşılmıştır.

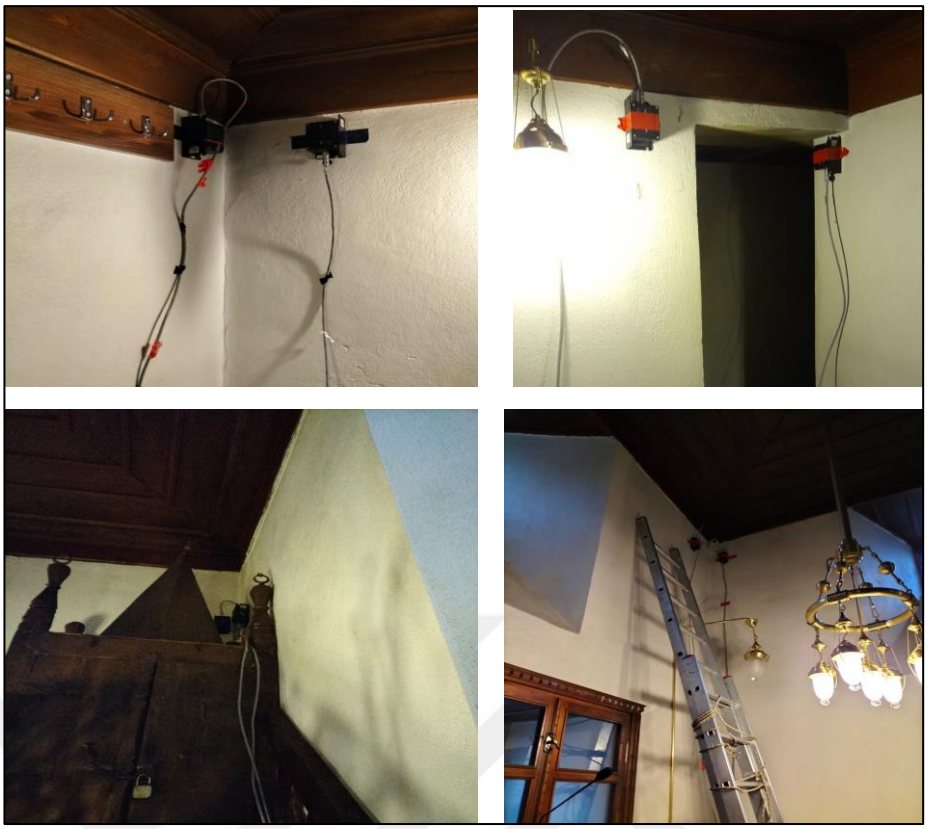
7.8.2. Kadana Camii operasyonel modal analiz uygulaması

Caminin modal davranış parametrelerinin belirlenmesi için camide OMA uygulaması yapılmıştır. İvmeölçer yerleşimi, ilk teorik modal analizdeki mod şekilleri baz alınarak yapılmıştır İvmeölçerler yetersiz kablo uzunluğu, iklim şartlarından cihazların olumsuz etkilenmemesi gibi nedenlerden ötürü cami içine yerleştirilmiştir. Kadana Camii ivmeölçer yerleşim krokisi Şekil 7.139.'da gösterilmiştir.



Şekil 7.139. Kadana Camii ivmeölçer yerleşim krokisi

Cami içinde cami köşelerine 8 adet tek eksende ivme kaydı alan tek eksenli kablolu ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Cami teorik modal analiz sonuçları incelendiğinde ilk üç mod şeklinde, caminin düşey hareketine dair bir mod şekline rastlanmadığı için düşey yönde titreşim kaydı alınmamıştır. İvmeölçerlerin yerleştirilmesi işleminde yapıya herhangi bir hasar vermeden yerleştirilmesi ve sökülmesi en önemli husustur. İvmeölçerleri sabitleme işleminden önce, yön ve doğrultu belirleme işlemleri yapılması gerekmektedir. Caminin kuzey-güney yön aksı yani kapı-mihrap aksı y yönü; doğu-batı yön aksı yani yan duvarlar aksı ise x yönü olarak tayin edilmiştir. Yön tayinlerinden sonra 8 adet tek eksenli ivmeölçer, cami duvarlarına sıcak silikon ile yapıştırılmıştır ve ivmeölçerlerin üstü güçlü bant ile yapıştırılarak herhangi bir düşmeye karşı güçlendirilmiştir. Cami içi ivmeölçer yerleşimi Şekil 7.140.'ta gösterilmiştir.



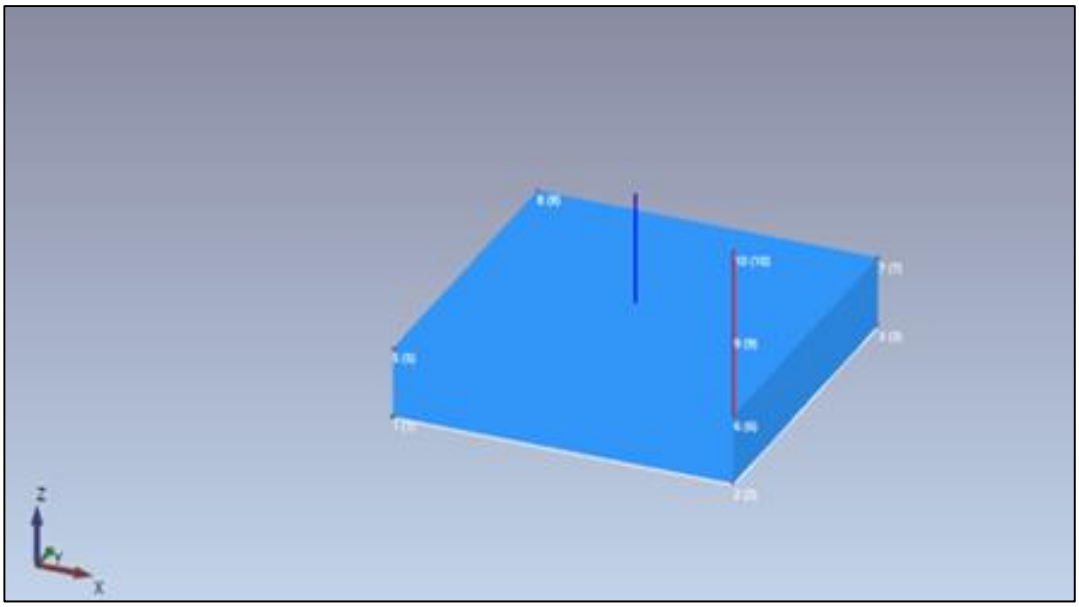
Şekil 7.140. Kadana Camii ivmeölçer sabitleme işlemleri

İvmeölçerlerin, caminin tüm bölümlerinde sabitleme işleminin tamamlanmasının ardından ivmeölçerler özel veri kabloları yardımıyla veri toplama sistemine bağlanmıştır. Veri toplama sistemi Şekil 7.141'de gösterilmiştir. Her kablo, ivmeölçer için önceden belirlenen kanal numarasına yerleştirilmiştir. İvmeölçerler veri toplama sistemine bağlandıktan sonra her cihazın kendine ait kalibrasyon çarpanı veri toplama sistemine girilmiştir. Bu işlemlerden sonra kayıt işleminden önce cihaz ve kablo kontrolleri yapılmıştır. Gerekli kontroller yapıldıktan sonra kayıt alma işlemine geçilmiştir.



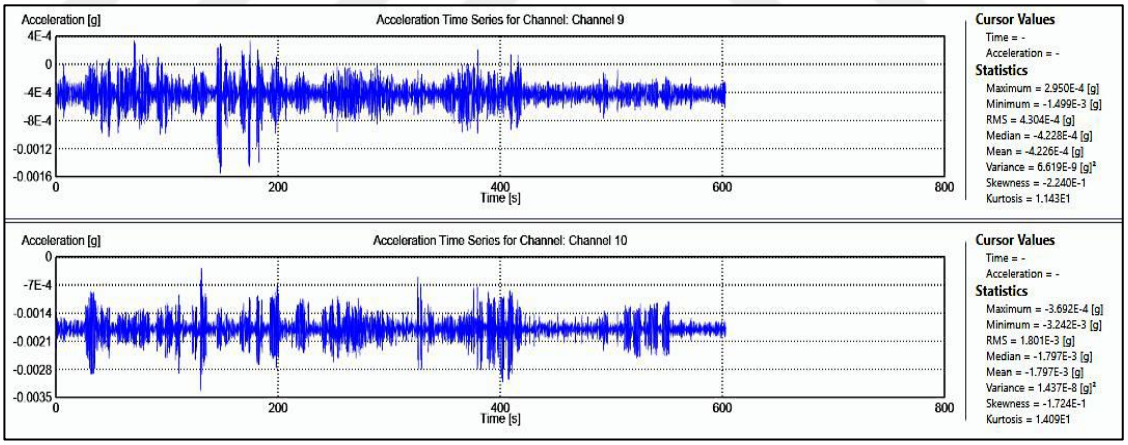
Şekil 7.141. Kadana Camii veri toplama sistemi kurulması

Gerekli kontrollerin ardından, kayıt alma işlemine geçilmiştir. Tüm bu değerlendirmelerin ardından 3 adet 100 Hz'lik ve 3 adet 200 Hz'lik olmak üzere 6 adet ivme kaydı alınmıştır. Ölçüm birimi g'dir. Cami, konumu itibariyle araç sürekliliği bakımından seyrek bir bölgededir ve sürekli çevresel titreşim etkisinde değildir. Bu nedenle caminin duvarlarında plastik tokmakla vurularak yapay titreşimler verilmiştir. Kayıt alma işlemleri tamamlandıktan sonra cami deneysel mod şekillerini ve bu mod şekillerine karşılık gelen modal frekans değerlerini elde etmek için veri işleme aşamasına geçilmiştir. Caminin deneysel modal analize esas geometrisi Artemis Modal Pro (2023) yazılımında oluşturulmuştur. Şekil 7.142.'de Kadana Camii'nin Artemis yazılımındaki geometrisi gösterilmiştir.



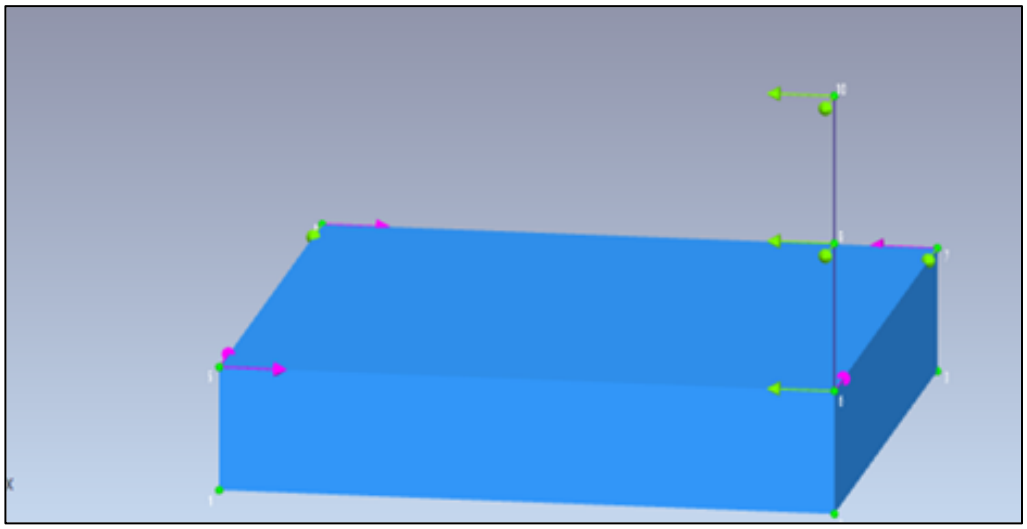
Şekil 7.142. Kadana Camii Artemis yazılım geometrisi

Veri toplama sisteminde her bir ivmeölçerden alınan titreşim kayıtları, Artemis Modal Pro yazılımında ivme-zaman grafiklerine çevrilmiştir. Kadana Camii ivme-zaman grafikleri Şekil 7.143'te gösterilmiştir.

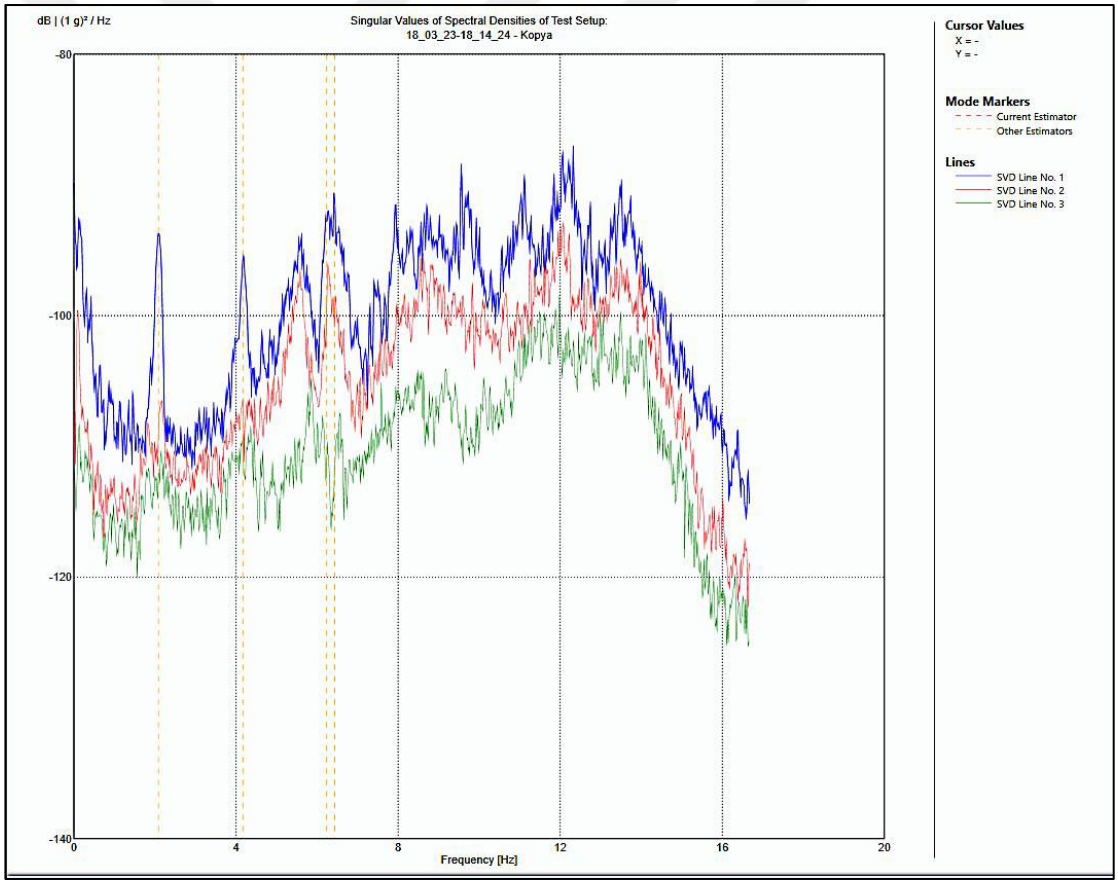


Şekil 7.143. Kadana Camii titreşim kayıtlarının ivme-zaman grafiklerine dönüşümü

Cami köşelerine yerleştirilen ivmeölçerler yazılımdaki geometrilerine de deneysel ölçüm anındaki doğrultuları bire bir aynı olacak şekilde tanımlanmıştır. Kadana Camii'nin ivmeölçerlerin yönlerinin yazılımda tanıtılması Şekil 7.144.'te gösterilmiştir. İvmeölçerlerin yönlerinin tanıtılmasının ardından veri analizleri yapılmıştır. Kadana Camii'nin analizdeki spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 7.145.'te gösterilmiştir



Şekil 7.144. Kadana Camii ivmeölçerlerin ve yönlerin Artemis yazılımında tanımlanması.

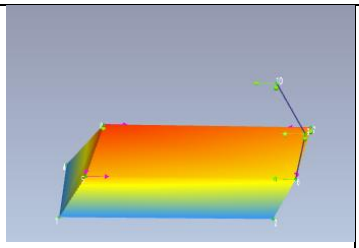
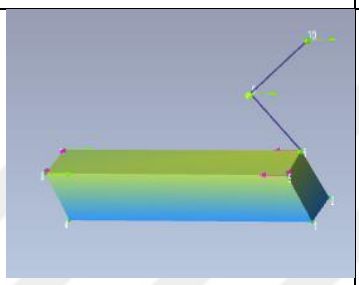
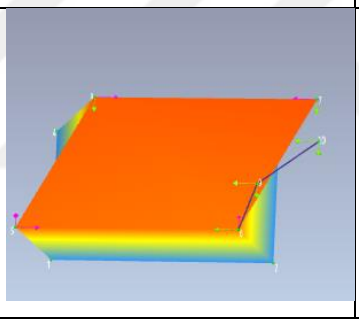


Şekil 7.145. Kadana Camii spektral yoğunluk fonksiyonları

Tüm süreçler tamamlandıktan sonra, mod şekilleri ve modal frekans değerlerini elde etme aşamasına geçilmiştir. Yazılımda farklı türde çözümleme yöntemleri mevcuttur. Kadana Camii'nin OMA titreşim kayıtları frekans alanında çözüm yöntemi

olan FDD analiz yöntemiyle çözülerek, caminin deneysel mod şekilleri ve modal frekans değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 7.44.' te gösterilmiştir.

Çizelge 7.44. Kadana Camii OMA sonuçları

Mod Şekli	Frekans (Hz)	
Kısa doğrultuda (x yönü) yatay gövde öteleme hareketi		4,346
Uzun doğrultuda (y yönü) yatay gövde öteleme hareketi		5,596
Düşey eksen (z yönü) etrafında yanal burulma hareketi		8,330

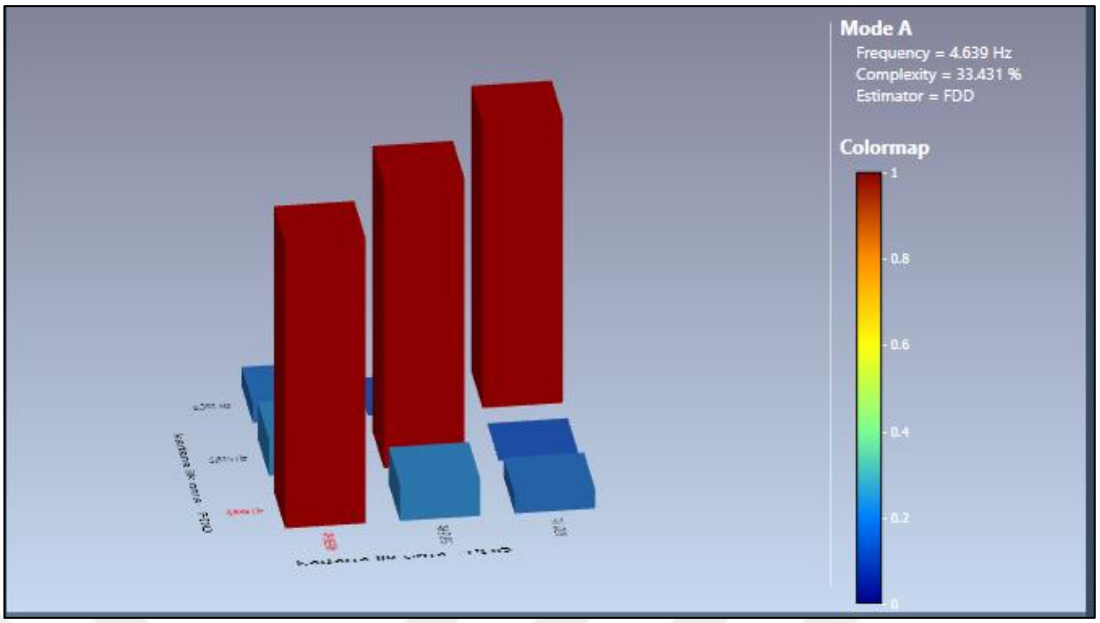
OMA sonuçları incelendiğinde, cami modunun ilk iki modu minare modlarıdır. Minarenin dinamik davranış parametreleri, cami modal davranışından bağımsızdır. Minare modal frekans değerleri, cami gövdesi modal frekans değerlerinden daha düşük frekans değerlerindedir. Bu sebeple, cami modal analiz sonuçlarında minare modları dikkate alınmamıştır. Caminin gövde OMA sonuçları incelendiğinde ilk modu kısa doğrultuda (x doğrultusu) öteleme, ikinci mod uzun doğrultuda öteleme (y doğrultusu), üçüncü mod ise z ekseni etrafında burulma hareketidir. Caminin deneysel dinamik parametreleri, teorik modal parametrelerle benzer çıkmıştır. Cami hasar durumları incelendiğinde dış duvarlarındaki zemin seviyesindeki ahşap hatıllarda eskime ve yer yer çürüme olduğu, dış duvar taş malzemelerinde dökülmeler ve çatlaklar olduğu görülmüştür. Ayrıca, yapının doğu duvarının batı yönüne doğru kısmi devrildiği

görülmüştür. Bu hasarların yapı sağlığı açısından risk oluşturduğu yorumu yapılabilmektedir. Cami yakın zamanda restorasyon geçirmesine rağmen, cami hasar düzeylerine bakıldığında, Yukarı Habip Efendi ve Taş Camii'nde gözlenen, ahşap desteklerdeki burulma hareketi bu camide de gözlenmiştir. Ayrıca bu ahşap desteklerde derin boyuna çatlaklar gözlenmiştir. Mahfil merdiven duvarında boyuna uzun çatlaklar ve mahfil sol arka duvardaki birleşme noktalarında ayrışmaya benzeyen boyuna çatlaklar görülmüştür. Bu kusurlar, yapı sağlığı açısından oldukça olumsuzdur ve yapı sağlığını tehdit edebilmektedir. Şekil 7.146.'da Kadana Camii'ndeki cami hasarları gösterilmiştir.



Şekil 7.146. Kadana Cami'nde gözlemlenen hasarlar

Kadana Cami'nin deneysel modal analiz sonuçlarının güvenilirliğinin belirlenmesi için MAC değerleri kontrol edilmiştir. Şekil 7.147.'de Kadana Camii'nin MAC değerler grafiği gösterilmiştir. Deneysel modal frekans değerleri kullanılarak oluşturulan Kadana Camii MAC değerleri tablosu Çizelge 7.45.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.147. Kadana Camii MAC değerler grafiği

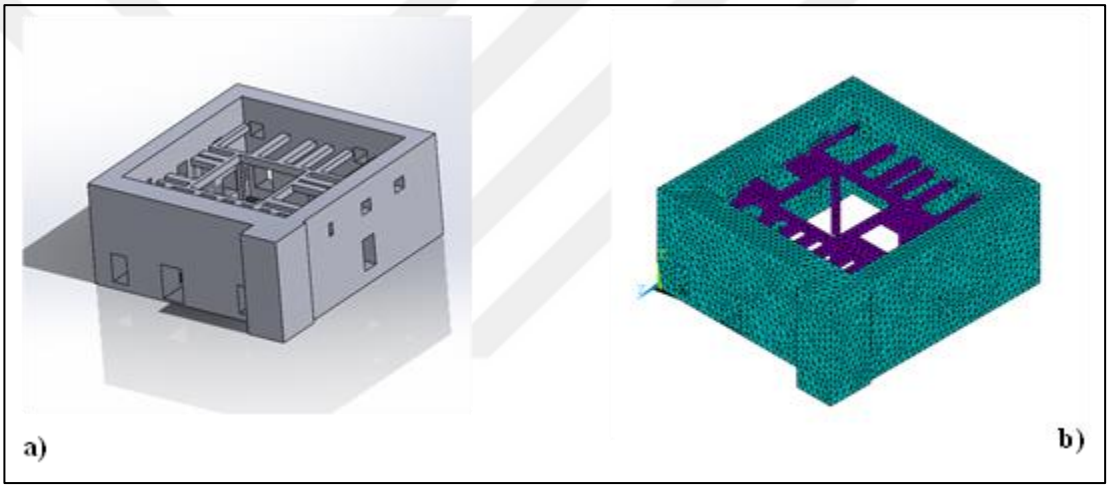
Çizelge 7.45. Kadana Camii MAC değerleri tablosu

Frekans (Hz)	**4,346**	**5,596**	**8,330**
4,346	**1**	**0,1552**	**0,0007**
5,596	**0,1552**	**1**	**0,0008**
8,330	**0,0007**	**0,0008**	**1**

Çizelge 7.45.'te verilen Kadana Camii deneysel modal analiz sonuçlarının MAC değerleri incelendiğinde, modlar arasındaki MAC değerlerinin 0'a yakın olduğu görülmüştür. Bu sonuç, mod şekillerinin birbirinden ayrık olduğunu ve deneysel modal analiz sonuçlarının güvenilir olduğunu göstermektedir. Örnek olarak kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi ile uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi arasındaki MAC değerinin 0,1552 olduğu görülmüştür. Bütün modların MAC değerleri incelendiğinde bütün modların birbirinden ayrık ve OMA sonuçlarının güvenilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

7.8.3. Kadana Camii sonlu eleman model kalibrasyon çalışması

Kadana Camii üzerinde deneysel modal analizin tamamlanmasının ardından, model kalibrasyon aşamasına geçilmiştir. Kadana Camii'nin ilk teorik modal analizi için hazırlanan katı modeli önce Soidworks (2022) yazılımında oluşturulmuştur. Cami minaresi haricindeki cami duvarları, cami kemerleri, kubbesi ve son cemaat yeri bu yazılımla çizilmiştir. Oluşturulan model dinamik analizler için ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Bölüm 7.8.1.'de bu aşamalar detaylı şekilde açıklanmıştır. Kadana Camii'nin katı modeli ve sonlu eleman modeli Şekil 7.148.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.148. Kadana Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli

Cami, diğer büyük camiler gibi kompleks bir plana sahip olmayıp, basit kare plana sahip ahşap destekli bir cami olduğundan camide kubbe, kemer, tonoz gibi yapı elemanları bulunmamaktadır. Cami minaresi haricindeki cami duvarları, cami ahşap dikmeleri ve ahşap tavan döşemesi bu yazılımda çizilmiştir. Soidworks (2022) yazılımında oluşturulan cami katı modeli, sınır koşullarının tanımlanması ve modelin küçük elemanlara bölünme işleminin tamamlanması için Workbench (2016) yazılımına aktarılmıştır. Kadana Camii sonlu eleman modeli üzerinde küçük sonlu eleman parçalarına bölünme işlemi yapılmıştır. Her bir eleman boyutu düzgün dörtyüzlü (tetrahedral) biçiminde ve boyutu 40 cm olacak şekilde ağlama işlemi yapılmıştır. Bu işlemin sonucunda 12.723 düğüm noktalı ve 52.747 elemanlı bir sonlu eleman modeli ortaya çıkmıştır. Mesnet koşulları ve ağlama işlemlerinin tamamlanmasının ardından katı model ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Yazılımda ilk önce sonlu

eleman malzeme modeli olarak yazılımda bulunan SOLID65 malzeme modeli güncellenmiştir. Kadana Camii'nin, Bölüm 7.8.1.'de tanımlanan duvar elastisite modülleri ile ilk teorik modal analiz gerçekleştirilmiştir. Teorik modal analiz sonuçları ile caminin OMA sonuçları Çizelge 7.46.'da gösterilmiştir.

Çizelge 7.46. Kadana Camii ilk teorik modal analiz ile OMA sonuçlarının karşılaştırılması.

Mod Numarası	**Mod Şekli**	**Frekans (Hz)**		**Hata Oranı (%)**
		OMA	**Teorik**	
1	Kısa doğrultuda (x yönünde) öteleme	4,346	4,856	11,73
2	Uzun doğrultuda (y yönünde) öteleme	5,596	4,968	11,22
3	Düşey eksen (z yönünde) etrafında yanal burulma	8,330	6,674	19,87

Çizelge 7.46. incelendiğinde, teorik modal analiz ve OMA sonuçlarıarasında farklı sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle, yapının ilk iki mod şekiileri olan kısa ve uzun doğrultuda öteleme hareketindeki hata oranları çok yüksektir. İki modal analiz arasındaki sonuçların birbiriyle örtüşmesi için sonlu eleman model kalibrasyonu gerekmektedir. Model kalibrasyon çalışmaları için, mesnet koşullarının güncellenmesi, yapının geometrik ölçülerinin gözden geçirilmesi, malzeme özelliklerinin güncellenerek tekrarlı analizlerin yapılmasını içermektedir Caminin, teorik ve OMA sonuçlarısıralama ve mod şekli olarak aynı çıktığından mesnet koşulları ve geometrik ölçülerin güncellenmesine gerek duyulmamıştır. Dolayısıyla, Kadana Camii için malzeme elastik modüllerinin güncellenmesi işlemi yapılmıştır. Malzeme elastisite modülleri iterasyon işlemleri caminin Operasyonel modal analiz sonuçlarına diğer bir deyişle yapının doğal davranış parametrelerine en yakın kalibrasyon değerine ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. İterasyon işlemleri sonunda, Kadana Camii için ulaşılan kalibrasyon elastisite modülü değerleri Çizelge 7.47.'de gösterilmiştir.

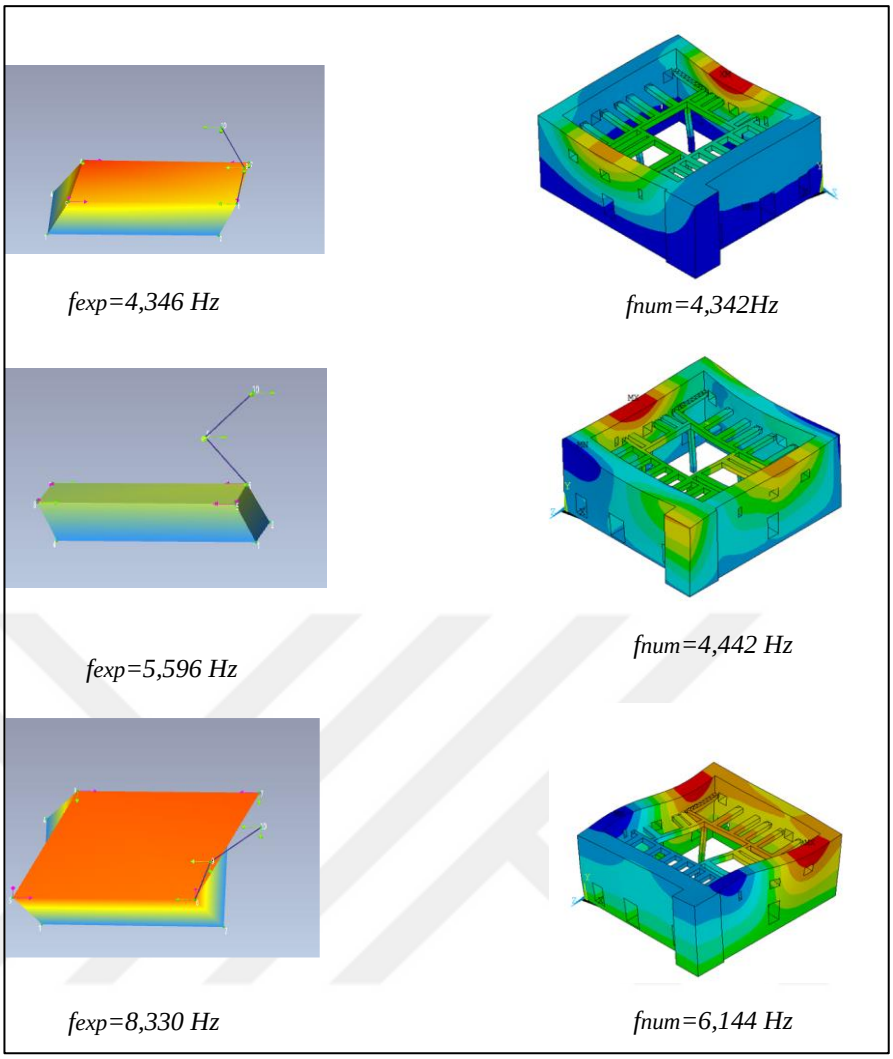
Çizelge 7.47. Kadana Camii kalibrasyon elastisite modül değerleri

Basınç Dayanımı (MPa)	**Elastisite Modülü (MPa)**					
Duvar	*Duvar*		*Ahşap Tavan*		*Ahşap Dikme*	
	Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra
1,91	382	255	10.000	9.840	10.000	9.840

Çizelge 7.47. incelendiğinde cami duvarları için duvar elastisite modülü değerleri 285 MPa değeri sonlu eleman modeline tanıtılmıştır. Ahşap dikmeler ve ahşap tavan döşemesi için, Kaplan (2013), çalışmasında belirttiği gibi meşe elemanı seçilmiştir. Elastisite modülü liflere dik doğrultuda 9,840 MPa değeri caminin sonlu eleman modeline tanıtılmıştır. Bu şekilde tanımlanan elastisite modül kalibrasyonu ile gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçlarının, Kadana Camii'nin dinamik davranış parametrelerine en yakın modal davranış parametreleri olduğu sonucuna ulaşılmıştır.. Özellikle caminin ilk mod şekline karşılık gelen modal frekans değerleri karşılaştırıldığında hata oranının %1'in altında olduğu görülmüştür. Bu sonlu eleman model kalibrasyonun caminin sonlu eleman modeline tanıtıldığında, caminin doğal dinamik davranış parametrelerini neredeyse yansıttığı görülmüştür. Çizelge 7.48.'de caminin OMA sonuçlarıve bu kalibrasyon elastisite modül değerleriyle yapılan teorik modal analiz sonuçları diğer bir deyişle caminin deneysel ve teorik dinamik davranış parametreleri gösterilmiştir. caminin OMA sonuçlarıve bu kalibrasyon elastisite modül değerleriyle yapılan teorik modal analiz sonuçları diğer bir deyişle caminin deneysel ve teorik dinamik davranış parametreleri gösterilmiştir. Şekil 7.149.'da Kadana Camii'nin deneysel modal analiz sonuçlarıyla, kalibre edilmiş teorik modal analiz sonuçları şematik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 7.48. Kadana Camii kalibre edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanan teorik modal analiz ve OMA sonuçlarının karşılaştırılması.

Mod Numarası	**Mod Şekli**	**Frekans (Hz)**		**Hata Oranı (%)**
		OMA	**Teorik**	
1	Kısa doğrultuda (x yönünde) öteleme	4,346	4,342	0,09
2	Uzun doğrultuda (y yönünde) öteleme	5,596	4,442	20,62
3	Düşey eksen (z yönünde) etrafında yanal burulma	8,330	6,622	20,50



Şekil 7.149. Kadana Cami deneysel ve teorik modal analiz sonuçlarının şematik olarak karşılaştırılması.

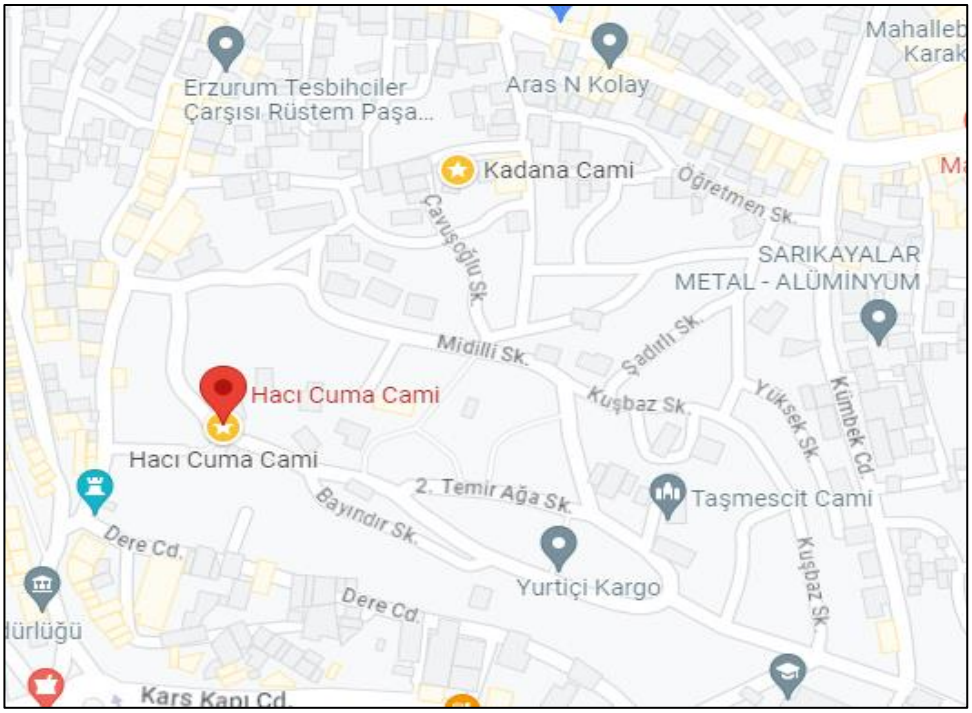
7.9. Hacıcuma Camii

Erzurum merkez Yakutiye ilçesi Hacı Cuma Mahallesi'nde bulunan cami, vakıf kayıtlarına bakıldığında 1630 yılında Karayazıcızade Seyyid Ahmet oğlu Abdullah tarafından yaptırılmıştır. Cami tez çalışmasında ele alınan diğer küçük camiler gibi kubbesiz dikdörtgen planlı basit bir mimariye sahiptir. Caminin genel görünümü Şekil 7.150.'de, caminin konumu Şekil 7.151'de, caminin iç görünümü Şekil 7.152.'de gösterilmiştir. Caminin ölçüleri 12,50m x9,35 m olup cami yüksekliği 5,80 m'dir. Cami duvar kalınlığı 105 cm'dir. Cami kuzeyinde altı ahşap direk üzerine oturtulmuş son cemaat yeri bulunmaktadır. Cami kapısı üstü sivri kemerle çevrilmiş basık kemerden yapılmıştır. Kadınlar mahfili ikisi ana ahşap taşıyıcı olmak üzere sekiz ahşap direkle desteklenmiştir. Cami kuzey cephesi düzgün kesme taştan inşa edilmişken diğer cepheleri

kesme taştan ve moloz taştan inşa edilmiştir. Bu molozların arasına üç sıra halinde hatıllar atılmıştır. Caminin kuzeybatısında kaidesi düzgün kesme taştan gövdesi tuğladan inşa edilmiş tek şerefeli bir minaresi vardır (Gündoğdu vd 2010; Özsağlıcak 2019).



Şekil 7.150. Hacıcuma Camii



Şekil 7.151. Hacıcuma Camii konumu (Anonim 2022l)



Şekil 7.152. Hacıcuma Camii iç görünümü

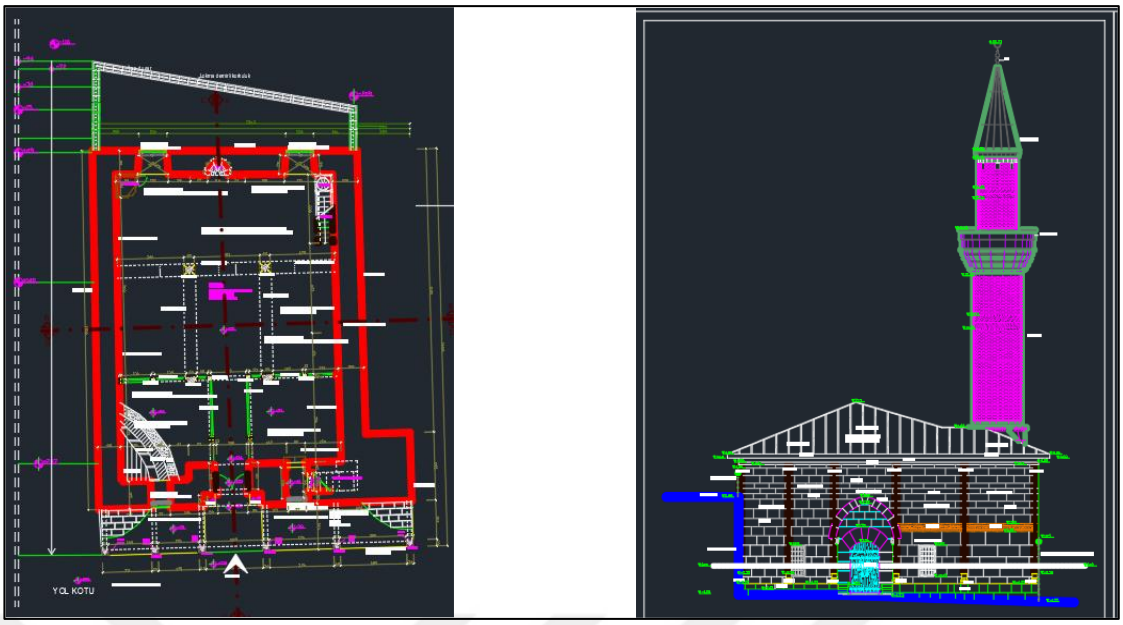
Cami, çeşitli zaman aralıklarında restorasyon geçirmiştir. En son 2017 yılında restorasyonu tamamlanan camide istinat duvarı yenilenmiştir. Son cemaat yeri düzenlenerek bugünkü haline getirilmiştir. Yeni drenajlar yapılarak zemin ve nem yalıtımı yapılmıştır. Duvarlardaki açılmalar onarılarak derzler temizlenmiştir. Duvarlardaki tüm sıvalar Horasan harcı ile yenilenmiştir. İç taraftaki ahşapların boyaları sökülerek ahşap koruyucu uygulanmıştır. Cami minaresindeki sac kaplama kaldırılıp tuğla gövdeli minare inşa edilmiştir. Caminin çatı kaplaması kaldırılıp yeniden yapılmıştır (Özsağlıcak 2019). Caminin restorasyon öncesi durumu Şekil 7.153.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.153. Hacıcuma Camii restorasyon öncesi hali (Özsağlıcak 2019)

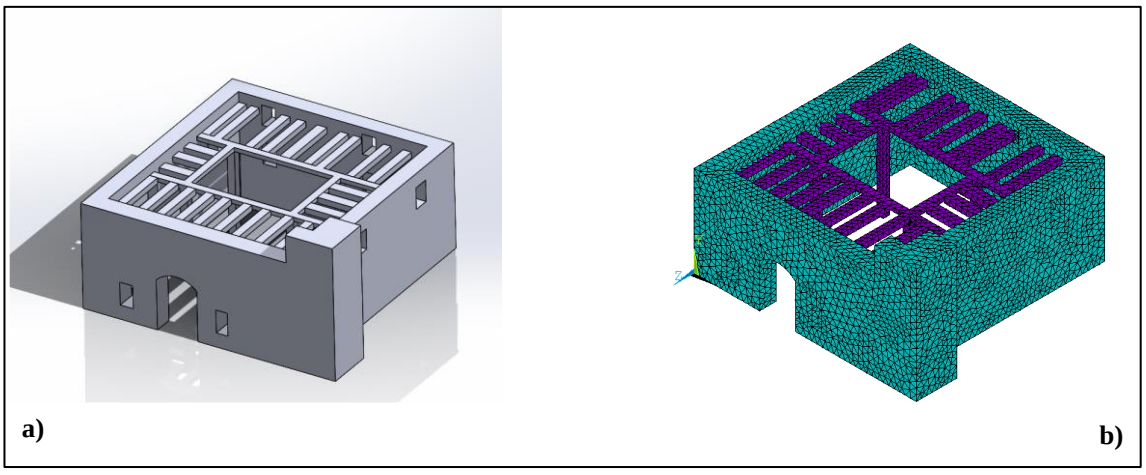
7.9.1. Hacıcuma Camii teorik modal analiz uygulaması

Tez çalışması için seçilen camilerde yapılan yapısal analize esas sonlu eleman model oluşturulma işlemi Hacıcuma Camii için de aynı şekilde yapılmıştır. Hacıcuma Camii üzerinde önce keşif çalışması yapılmıştır. Caminin ölçüleri ve malzeme özellikleri belirlenmiştir. Hacıcuma Camii rölevesi Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Ölçülen boyutlar, Hacıcuma Camii'nin cami rölevesinde belirtilen boyutları ile karşılaştırılarak caminin nihai boyutları belirlenmiştir. Kadana Camii'nin cami rölevesi Şekil 7.154.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.154. Hacıcuma Camii rölevesi

Hacıcuma Camii'nin boyutları belirlendikten sonra sonlu eleman modelinin oluşturulma aşamasına geçilmiştir. Caminin katı modeli Soidworks (2022) yazılımında oluşturulup ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Caminin sonlu eleman modeli Şekil 7.155.'te gösterilmiştir.



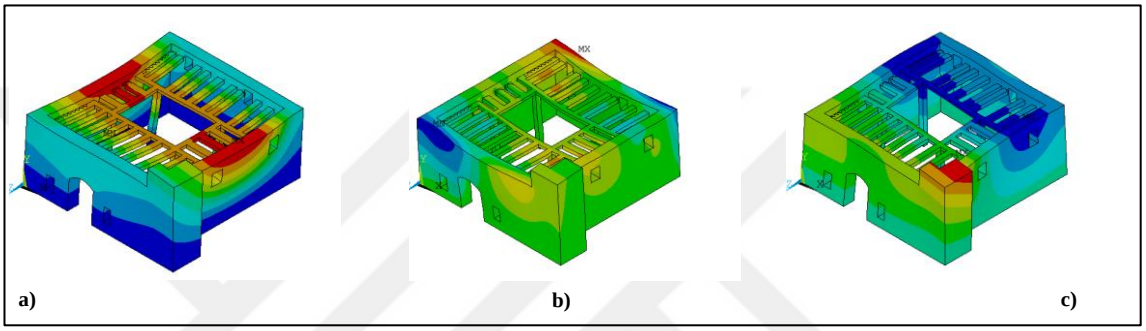
Şekil 7.155. Hacıcuma Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli

Caminin Soidworks (2022) yazılımında katı modeli oluşturulduktan sonra Workbench (2016) yazılımına aktarılmıştır. Workbench (2016) yazılımına aktarıldıktan sonra katı modelin, küçük sonlu elemanlara bölünme işlemi ağlama (mesh) işlemi yapılmıştır. Bu elemanlar, 40-45 cm boyutunda sonlu küçük elemanlara ayrılacak şekilde ağlama işlemi yapılmıştır. Her bir ağlama sonucunda oluşan küçük elemanlar boyut

olarak tetra (onlu) eleman şeklindedir. Sonlu elemanlara bölünme işleminin ardından, cami modelinin sınır koşullarının tanımlanması işlemleri diğer camilerde olduğu gibi bu camide de aynı şekilde yapılmıştır. Bu işlemlerin ardından caminin sonlu eleman modeli ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır ve caminin duvar mekanik özellikleri tanımlanmıştır. Andezit ve bazalt taşlarından oluşan caminin taş durumuna bakıldığında camide bazalt taşının daha fazla olduğu görülmüştür. Önceki camilerde olduğu gibi, beton Schmidt çekici kullanılarak taşların sertlik değerleri belirlenmiştir. Daha sonra bu sertlik değerleri kullanılarak, Denklem 7.2 ve Denklem 7.3'teki bağıntılar yardımıyla andezit ve bazalt için taş basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Duvardaki taş yüzdeleri yardımıyla caminin duvar taş basınç mukavemeti belirlenerek, Denklem 7.4. ve Denklem 7.5.yardımıyla caminin duvar mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bu değerler, caminin sonlu eleman modeline tanıtılmıştır. Caminin sonlu eleman modelinde teorik modal analiz yapılarak caminin teorik mod şekilleri ve bu mod şekillerine karşılık gelen modal frekans değerleri belirlenmiştir. Hacıcuma Camii'ndeki taşlara beton Schmidt çekici uygulandığında, bazalt için ortalama sertlik değeri 24,85; andezit için ise 38,25 değeri elde edilmiştir. Bu değerler Denklem 7.2 ve Denklem 7.3'teki taş basınç mukavemeti elde etme bağıntılarında kullanıldığında andezit için ortalama taş basınç mukavemeti 34,77 MPa; bazalt için ortalama taş basınç mukavemeti 7,33 MPa olarak hesaplanmıştır. Ortalama duvar basınç mukavemeti için taşların 1 m^2 duvar alanında taş yüzdeleri belirlenmiştir. Andezit ve bazalt, arasında duvarlardaki taş yüzdeleri bazalt için %90; andezit için %10 olarak belirlenmiştir. Bu yüzdelerle ortalama duvar taş basınç mukavemeti 10,07 MPa olarak hesaplanmıştır. Duvar inşa edilirken kullanılan harç türü kireç esaslı Horasan harcı olduğundan harç basınç mukavemeti 1.15 MPa alınmıştır. Duvar örülümü yığma bir biçimde olduğundan Denklem 7.3'teki α ve β sabitleri sırasıyla 0,65 ve 0,25 olarak alınmıştır. Ek olarak, K sabiti değeri de 0,5 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, Denklem 7.4 ve Denklem 7.5 'te yazıldığında ortalama duvar basınç mukavemeti 2,32 MPa; ortalama duvar elastisite modül değeri ise 464 MPa olarak hesaplanmıştır. Camideki ahşap dikmeler ve ahşap tavan döşemesi için tavan elastisite modül değeri, Yukarı Habip Efendi Camii'nde olduğu gibi 10000 MPa olarak seçilmiştir. Hacıcuma Camii sonlu eleman modeline duvar mekanik özelliklerinin tanımlanmasının ardından model üzerinde teorik modal analiz yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 7.49.'da gösterilmiştir. Teorik mod şekilleri Şekil 7.156.'da gösterilmiştir.

Çizelge 7.49. Hacıcuma Camii ilk teorik modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)
1	Kısa doğrultuda (x yönünde) yatay öteleme hareketi	4,305
2	Uzun doğrultuda (y yönünde) yatay öteleme hareketi	4,927
3	Düşey eksen (z yönünde) etrafında yanal burulma hareketi	6,252

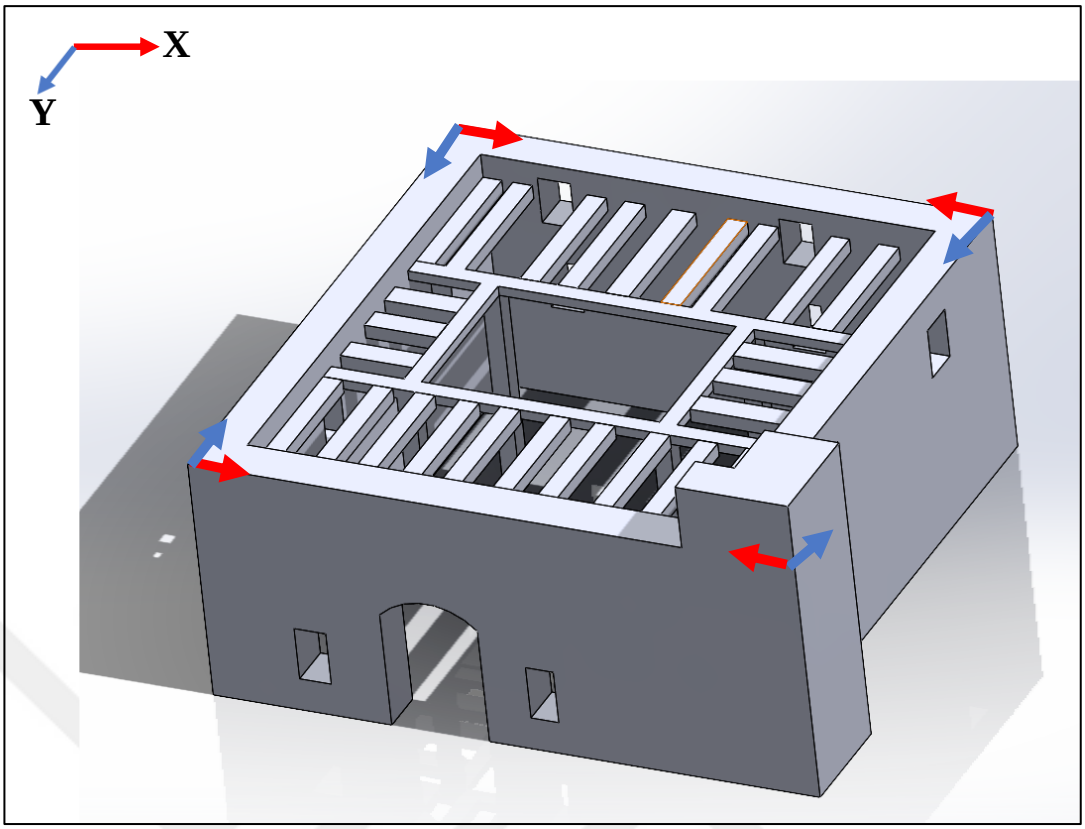


Şekil 7.156. Hacıcuma Camii a) kısa doğrultuda öteleme b) uzun doğrultuda öteleme c) gövde burulma hareketi.

Teorik modal analiz sonuçlarından elde edilen sonuçlara göre caminin ilk mod şekli, kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi, ikinci mod şekli uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi şeklindedir. Üçüncü mod şekli ise Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketidir. Bu durumda, caminin dinamik davranış parametrelerini yerinde belirlemek için yapılacak Operasyonel modal analiz uygulamasında bu sonuçlar baz alınarak cami köşelerinde ivmeölçerler yerleştirilmesi sonucuna ulaşılmıştır

7.9.2. Hacıcuma Camii operasyonel modal analiz uygulaması

Caminin dinamik davranış parametrelerinin belirlenmesi için camide OMA uygulaması yapılmıştır. İvmeölçer yerleşimi, ilk teorik modal analizdeki mod şekilleri baz alınarak yapılmıştır İvmeölçerler yetersiz kablo uzunluğu, iklim şartlarından cihazların olumsuz etkilenmemesi gibi nedenlerden ötürü cami içine yerleştirilmiştir.: Hacıcuma Camii ivmeölçer yerleşim krokisi Şekil 7.157.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.157. Hacıcuma Camii ivmeölçer yerleşim krokisi

Cami içinde cami köşelerine 8 adet tek eksende ivme kaydı alan tek eksenli kablolu ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Cami teorik modal analiz sonuçları incelendiğinde, ilk üç mod şeklinde, caminin düşey hareketine dair bir mod şekline rastlanmadığı için düşey yönde titreşim kaydı alınmamıştır. İvmeölçerlerin yerleştirilmesi işleminde yapıya herhangi bir hasar vermeden yerleştirilmesi ve sökülmesi en önemli hususdur. İvmeölçerleri sabitleme işleminden önce yön ve doğrultu belirleme işlemleri yapılması gerekmektedir. Caminin kuzey-güney yön aksı yani kapı-mihrap aksı y yönü; doğu-batı yön aksı yani yan duvarlar aksı ise x yönü olarak tayin edilmiştir. Yön tayinlerinden sonra 8 adet tek eksenli ivmeölçer, cami duvarlarına sıcak silikon ile yapıştırılmıştır. İvmeölçerlerin üstü güçlü bant ile yapıştırılarak herhangi bir düşmeye karşı güçlendirilmiştir. Cami içi ivmeölçer yerleşimi Şekil 7.158.'de gösterilmiştir.



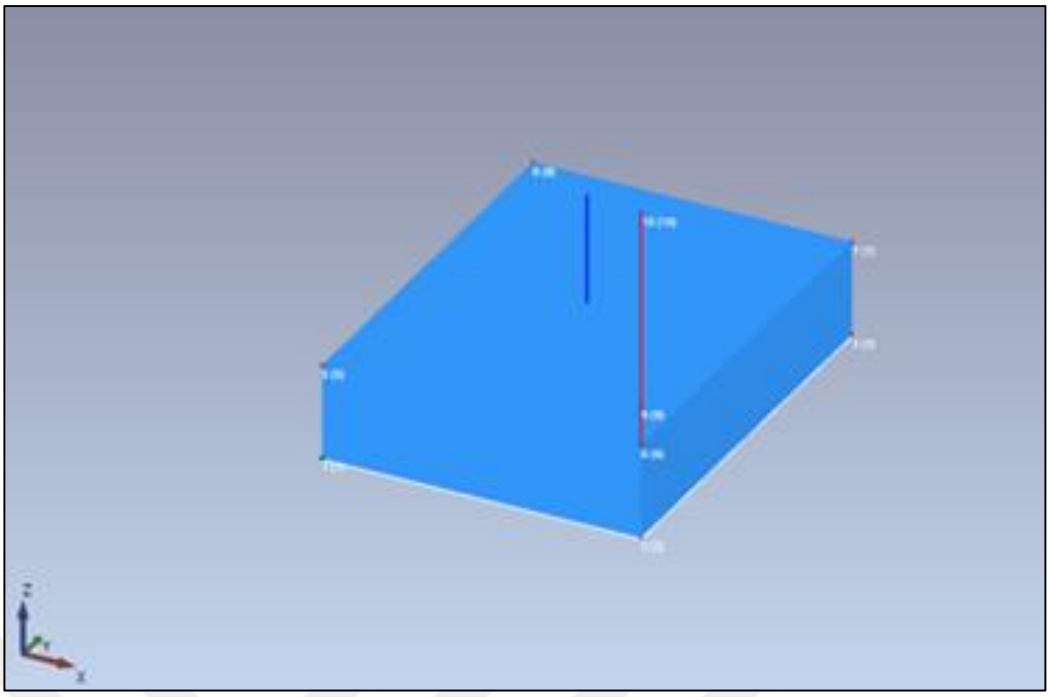
Şekil 7.158. Hacıcuma Camii ivmeölçer sabitleme işlemleri

İvmeölçerlerin caminin tüm bölümlerinde sabitleme işleminin tamamlanmasının ardından ivmeölçerler özel veri kabloları yardımıyla veri toplama sistemine bağlanmıştır Veri toplama sistemi Şekil 7.159.'da gösterilmiştir. Her kablo, ivmeölçer için önceden belirlenen kanal numarasına yerleştirilmiştir. İvmeölçerler veri toplama sistemine bağlandıktan sonra her cihazın kendine ait kalibrasyon çarpanı veri toplama sistemine girilmiştir. Bu işlemlerden sonra kayıt işleminden önce cihaz ve kablo kontrolleri yapılmıştır. Gerekli kontroller yapıldıktan sonra kayıt alma işlemine geçilmiştir.



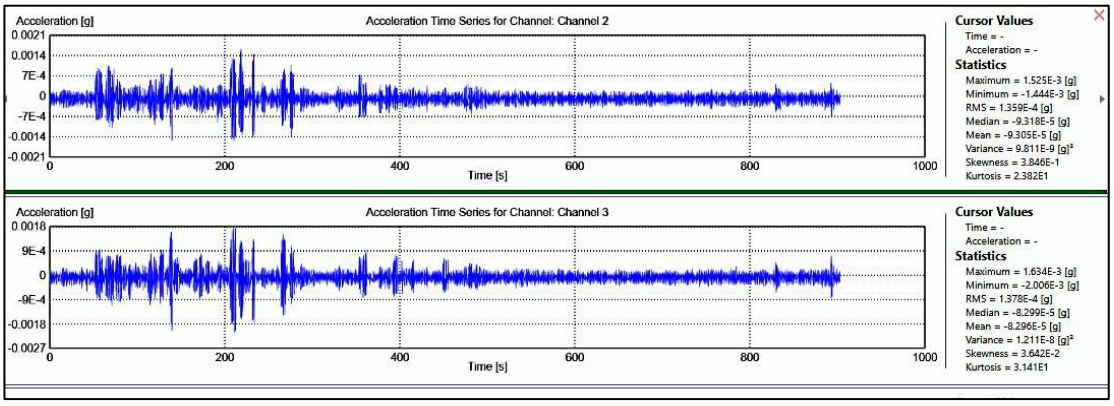
Şekil 7.159. Hacıcuma Camii veri toplama sistemi kurulumu

Gerekli kontrollerin ardından, kayıt alma işlemine geçilmiştir. Tüm bu değerlendirmelerin, ardından 3 adet 100 Hz'lik ve 3 adet 200 Hz'lik olmak üzere 6 adet ivme kaydı alınmıştır. Ölçüm birimi g'dir. Cami, konumu itibariyle araç sürekliliği bakımından seyrek bir bölgededir ve cami sürekli çevresel titreşim etkisinde değildir. Bu nedenle, caminin duvarlarında plastik tokmakla vurularak yapay titreşimler verilmiştir. Kayıt alma işlemleri tamamlandıktan sonra caminin deneysel mod şekillerini ve bu mod şekillerine karşılık gelen modal frekans değerlerini elde etmek için veri işleme aşamasına geçilmiştir. Caminin deneysel modal analize esas geometrisi Artemis Modal Pro (2023) yazılımında oluşturulmuştur. Şekil 7.160.'ta Hacıcuma Camii'nin Artemis yazılımındaki geometrisi gösterilmiştir.



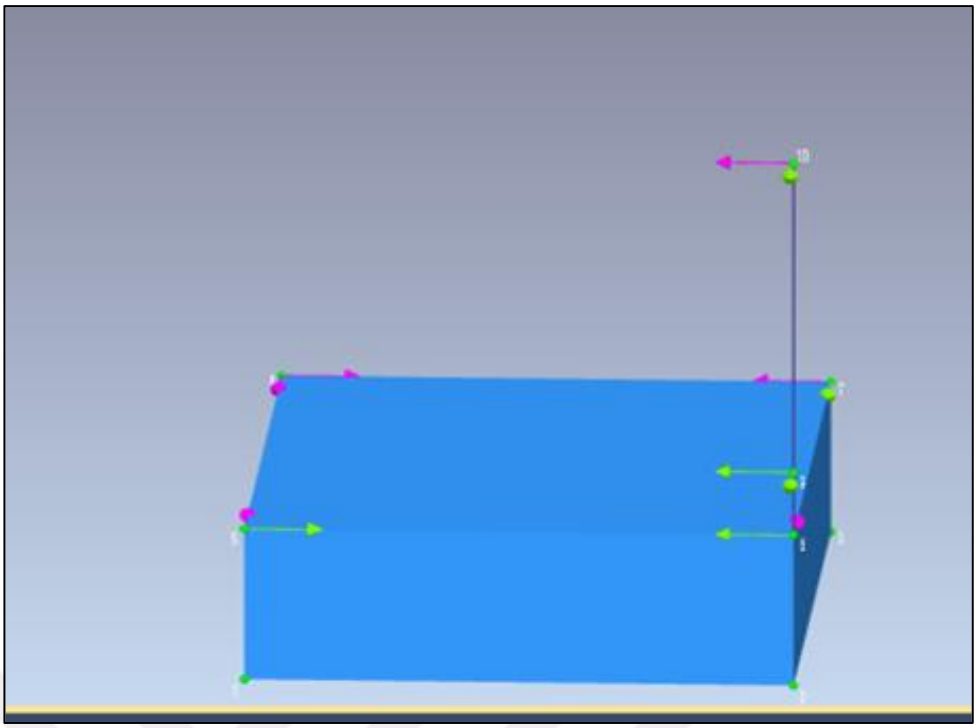
Şekil 7.160. Hacıcuma Camii için Artemis yazılımı geometrisi

Veri toplama sisteminde her bir ivmeölçerden alınan titreşim kayıtları, Artemis Modal Pro yazılımında ivme-zaman grafiklerine çevrilmiştir. Hacıcuma Camii ivme-zaman grafikleri Şekil 7.161.'de gösterilmiştir.

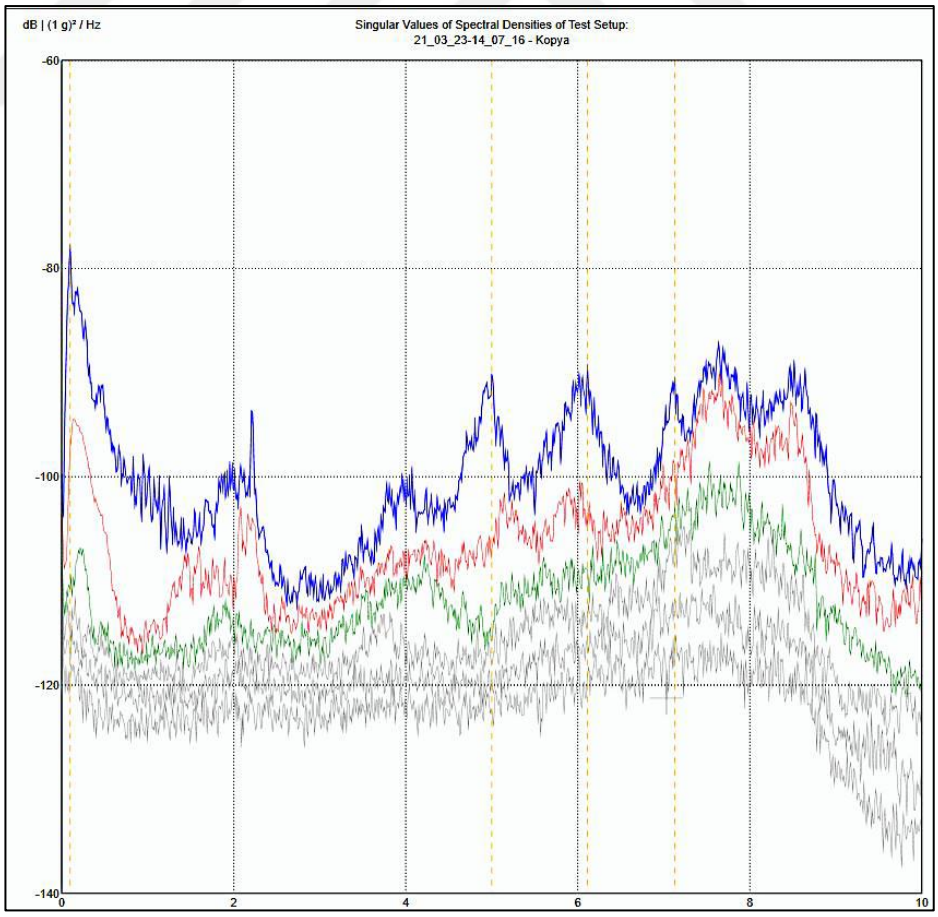


Şekil 7.161. Hacıcuma Camii titreşim kayıtlarının ivme-zaman grafiklerine dönüşümü.

Cami köşelerine yerleştirilen ivmeölçerler, yazılımdaki geometrilerine de ölçüm anındaki doğrultuları bire bir aynı olacak şekilde tanımlanmıştır. Hacıcuma Camii'nin ivmeölçerlerin yönlerinin yazılımda tanıtılması Şekil 7.162'de gösterilmiştir. İvmeölçerlerin yönlerinin tanıtılmasının ardından veri analizleri yapılmıştır. Hacıcuma Camii'nin analizdeki spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 7.163'te gösterilmiştir.



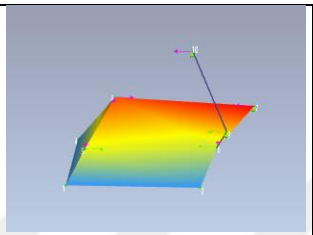
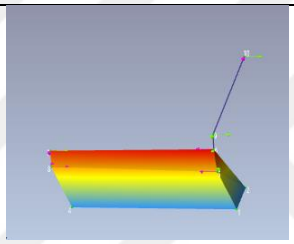
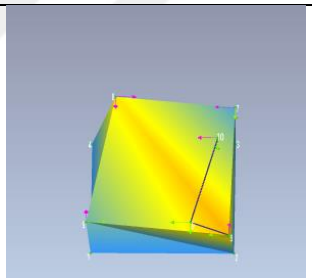
Şekil 7.162. Hacıcuma Camii ivmeölçerlerin ve yönlerin Artemis yazılımında tanımlanması.



Şekil 7.163. Hacıcuma Camii spektral yoğunluk fonksiyonları

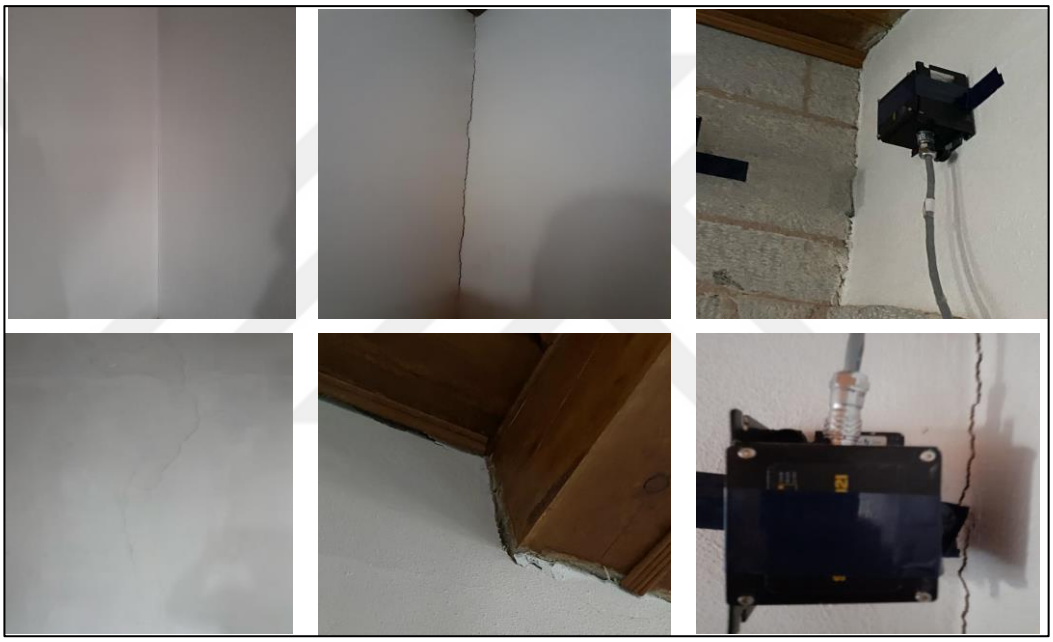
Tüm süreçler tamamlandıktan sonra, caminin mod şekilleri ve modal frekans değerlerini elde etme aşamasına geçilmiştir. Yazılımda farklı türde çözümleme yöntemleri mevcuttur. Hacıcuma Camii'nin OMA titreşim kayıtları, frekans alanında çözüm yöntemi olan FDD analiz yöntemiyle çözülerek, caminin deneysel mod şekilleri ve modal frekans değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 7.50.' de gösterilmiştir.

Çizelge 7.50. Hacıcuma Camii OMA Sonuçları

Mod Şekli	**Frekans (Hz)**	
Kısa doğrultuda (x yönü) yatay öteleme hareketi		5,005
Uzun doğrultuda (y yönü) yatay öteleme hareketi		6,116
Düşey eksen (z yönü) etrafında burulma hareketi		7,104

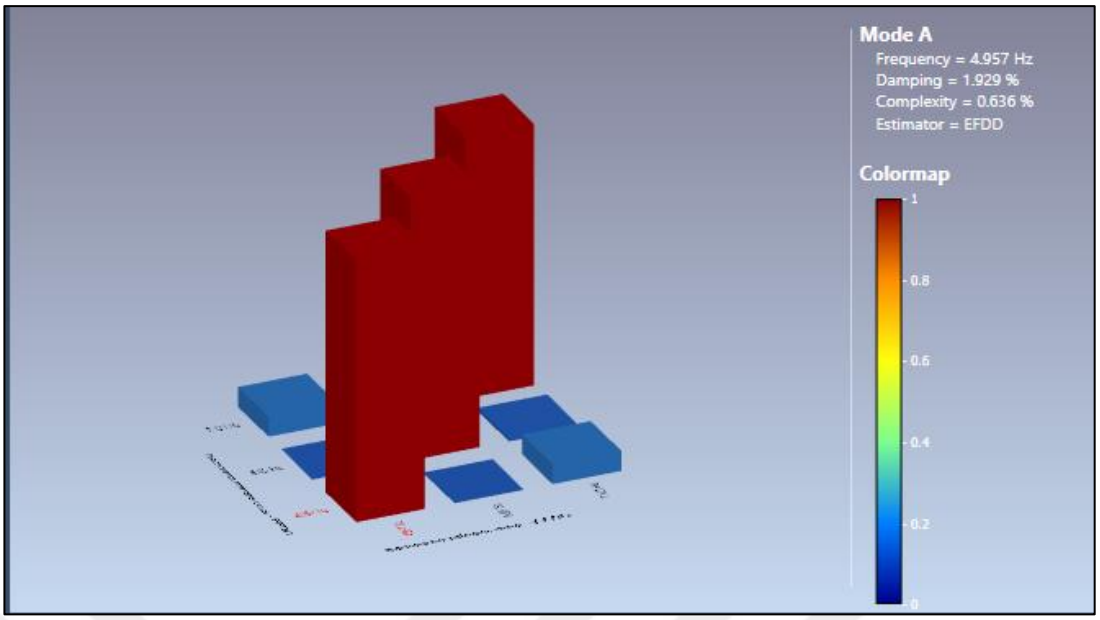
OMA sonuçları incelendiğinde, cami modunun ilk iki modu minare modlarıdır. Minarenin dinamik davranış parametreleri, cami modal davranışından bağımsızdır. Bu sebeple, cami modal analiz sonuçlarında minare modları dikkate alınmamıştır. Caminin gövde OMA sonuçları incelendiğinde ilk modu kısa doğrultuda (x doğrultusu) öteleme, ikinci mod uzun doğrultuda öteleme (y doğrultusu), üçüncü mod ise z ekseni etrafında burulma hareketidir. Caminin deneysel dinamik parametreleri, teorik modal parametrelerle benzer çıkmıştır. Cami hasar durumları incelendiğinde, dış duvarlarındaki zemin seviyesindeki ahşap hatıllarda eskime ve yer yer çürüme olduğu, dış duvar taşlarında dökülmeler ve çatlaklar olduğu görülmüştür. Ayrıca yapının doğu duvarının,

batı yönüne doğru kısmi devrildiği görülmüştür. Bu hasarların, yapı sağlığı açısından risk oluşturduğu yorumu yapılabilmektedir. Cami yakın zamanda restorasyon geçirmesine rağmen cami hasar düzeylerine bakıldığında, diğer ahşap destekli camilerde gözlenen ahşap desteklerdeki burulma hareketi bu camide de gözlenmiştir. Ayrıca bu ahşap desteklerde derin boyuna çatlaklar gözlenmiştir. Mahfil merdiven duvarında boyuna uzun çatlaklar ve mahfil sol arka duvardaki birleşme noktalarında ayrışmaya benzeyen boyuna çatlaklar görülmüştür. Bu kusurlar, yapı sağlığı açısından oldukça olumsuzdur ve yapı sağlığını tehdit edebilmektedir. Şekil 7.164.'te Hacıcuma Camii'ndeki cami hasarları gösterilmiştir.



Şekil 7.164. Hacıcuma Camii gözlemlenen hasarlar

Hacıcuma Cami'nin OMA sonuçlarının, güvenilirliğinin belirlenmesi için MAC değerleri kontrol edilmiştir. Şekil 7.165.'te Hacıcuma Camii'nin MAC değerler grafiği gösterilmiştir. Deneysel modal frekans değerleri kullanılarak oluşturulan Hacıcuma Camii MAC değerleri tablosu Çizelge 7.51.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.165. Hacıcuma Camii MAC değerleri grafiği

Çizelge 7.51. Hacıcuma Camii MAC değerleri tablosu

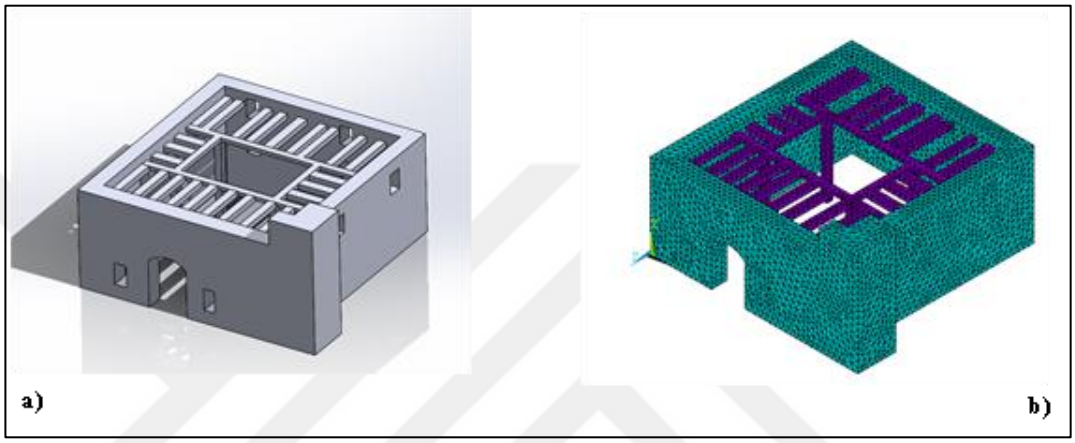
Frekans (Hz)	**5,005**	**6,116**	**7,104**
5,005	**1**	**0,0031**	**0.0123**
6,116	**0,0031**	**1**	**0,0605**
7,104	**0,0123**	**0,0605**	**1**

Çizelge 7.51.'de verilen Hacıcuma Camii deneysel modal analiz sonuçlarının MAC değerleri incelendiğinde, modlar arasındaki MAC değerlerinin 0'a yakın olduğu görülmüştür. Bu sonuç, mod şekillerinin birbirinden ayrık olduğunu ve deneysel modal analiz sonuçlarının güvenilir olduğunu göstermektedir. Örnek olarak kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi ile uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi arasındaki MAC değerinin 0,0031 olduğu görülmüştür. Bütün modların MAC değerleri incelendiğinde bütün modların birbirinden ayrık ve OMA sonuçlarının güvenilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

7.9.3. Hacıcuma Camii sonlu eleman model kalibrasyon çalışması

Hacıcuma Camii üzerinde deneysel modal analizin tamamlanmasının ardından, model kalibrasyon aşamasına geçilmiştir. Hacıcuma Camii üzerinde deneysel modal

analizin tamamlanmasının ardından model kalibrasyon aşamasına geçilmiştir. Hacıcuma Camii'nin ilk teorik modal analizi için hazırlanan katı modeli önce Soidworks (2022) yazılımında oluşturulmuştur. Cami minaresi haricindeki cami duvarları, cami kemerleri, kubbesi ve son cemaat yeri bu yazılımla çizilmiştir. Oluşturulan model dinamik analizler için ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Bölüm 7.9.1.'de bu aşamalar detaylı şekilde açıklanmıştır. Hacıcuma Camii'nin katı modeli ve sonlu eleman modeli Şekil 7.166.'da gösterilmiştir.



Şekil 7.166. Hacıcuma Camii a) Katı modeli b) Sonlu eleman modeli

Cami, diğer büyük camiler gibi kompleks bir plana sahip olmayıp, basit kare plana sahip ahşap destekli bir cami olduğundan camide kubbe, kemer, tonoz gibi yapı elemanları bulunmamaktadır. Cami minaresi haricindeki cami duvarları, cami ahşap dikmeleri ve ahşap tavan döşemesi bu yazılımda çizilmiştir. Soidworks (2022) yazılımında oluşturulan cami katı modeli, sınır koşullarının tanımlanması ve modelin küçük elemanlara bölünme işleminin tamamlanması için Workbench (2016) yazılımına aktarılmıştır. Hacıcuma Camii katı modeli üzerinde küçük sonlu eleman parçalarına bölünme işlemi (mesh) yapılmıştır. Her bir eleman boyutu düzgün dörtyüzlü (tetrahedral) biçiminde ve boyutu 40 cm olacak şekilde ağlama işlemi yapılmıştır. Bu işlemin sonucunda 14879 düğüm noktalı ve 62236 elemanlı bir sonlu eleman modeli ortaya çıkmıştır. Mesnet koşulları ve ağlama işlemlerinin tamamlanmasının ardından sonlu eleman modeli ANSYS Mechanical (2016) yazılımına aktarılmıştır. Yazılımda ilk önce sonlu eleman malzeme modeli olarak yazılımda bulunan SOLID65 malzeme modeli güncellenmiştir. Hacıcuma Camii'nin, Bölüm 7.9.1.'de tanımlanan duvar elastisite

modülleri ile ilk teorik modal analiz gerçekleştirilmiştir. Teorik modal analiz sonuçları ile caminin OMA sonuçları Çizelge 7.52'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.52. Hacıcuma Camii ilk teorik modal analiz ile OMA sonuçlarının karşılaştırılması.

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda (x yönünde) öteleme	5,005	4,305	13,98
2	Uzun doğrultuda (y yönünde) öteleme	6,116	4,927	19,44
3	Düşey eksen (z yönünde) etrafında yanal burulma	7,104	6,252	11,99

Çizelge 7.52. incelendiğinde, teorik modal analiz ve OMA sonuçları arasında farklı sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle, yapının ilk mod şeklindeki kısa doğrultuda öteleme hareketindeki hata oranı yüksektir. İki modal analiz arasındaki sonuçların birbiriyle örtüşmesi için sonlu eleman model kalibrasyonu gerekmektedir. Model kalibrasyon çalışmaları mesnet koşullarının güncellenmesi, yapının geometrik ölçülerinin gözden geçirilmesi, malzeme özelliklerinin güncellenerek tekrarlı analizlerin yapılmasını içermektedir. Caminin, teorik ve OMA sonuçlarısıralama ve mod şekli olarak aynı çıktığından mesnet koşulları ve geometrik ölçülerin güncellenmesine gerek duyulmamıştır. Dolayısıyla, Hacıcuma Camii için malzeme elastik modüllerinin güncellenmesi işlemi yapılmıştır. Malzeme elastisite modülleri iterasyon işlemleri caminin Operasyonel modal analiz sonuçlarına diğer bir deyişle yapının doğal davranış parametrelerine en yakın kalibrasyon değerine ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. İterasyon işlemleri sonunda, Hacıcuma Camii için ulaşılan kalibrasyon elastisite modülü değerleri Çizelge 7.53.'te gösterilmiştir.

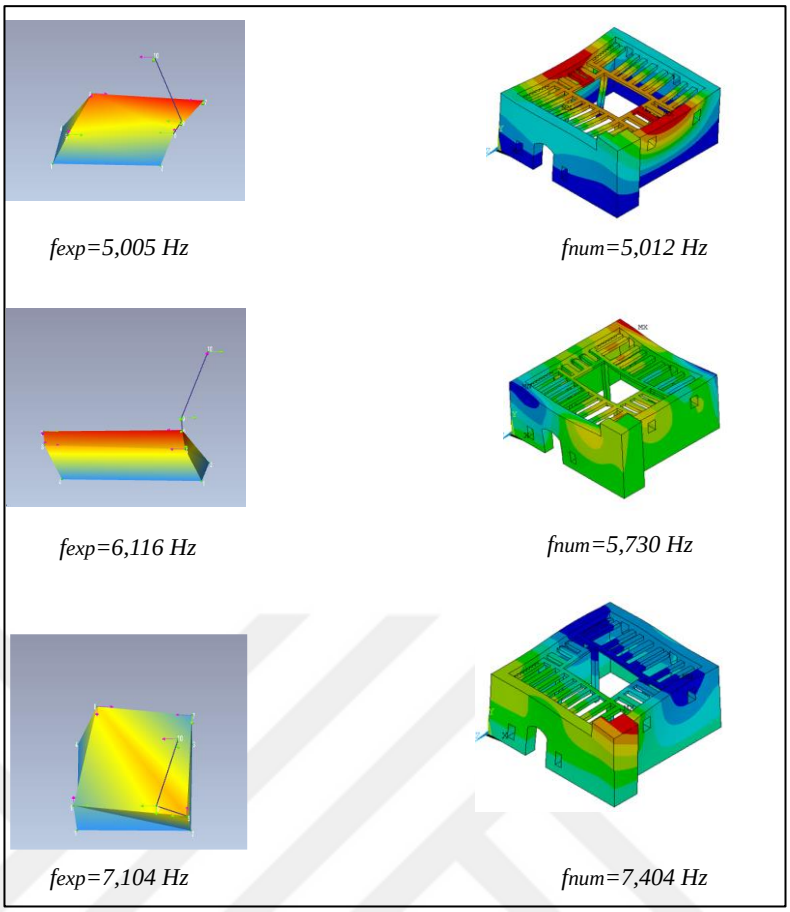
Çizelge 7.53. Hacıcuma Camii kalibrasyon elastisite modül değerleri

Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)					
Duvar	*Duvar*		*Ahşap Tavan*		*Ahşap Dikme*	
	Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra
2,32	464	700	10.000	10.000	10.000	10.000

Çizelge 7.53. incelendiğinde cami duvarları için duvar elastisite modülü değerleri 700 MPa sonlu eleman modeline tanıtılmıştır. Ahşap dikmeler ve ahşap tavan döşemesi için, diğer camilerden farklı olarak Kaplan (2013), çalışmasında belirttiği gibi meşe elemanı seçilmiştir. Elastisite modülü liflere dik doğrultuda 10000 MPa olarak modele tanıtılmıştır. Bu değerlerle teorik modal analiz tamamlandığında, Hacıcuma Camii'nin, deneysel dinamik davranış parametrelerine en yakın teorik parametre değerleri elde edildiği belirlenmiştir. Özellikle caminin ilk mod şekline karşılık gelen modal frekans değerleri karşılaştırıldığında hata oranının %1'in altında olduğu görülmüştür..Çizelge 7.54.'te caminin OMA sonuçları ile bu kalibrasyon elastisite modül değerleriyle yapılan teorik modal analiz sonuçları diğer bir deyişle caminin deneysel ve teorik dinamik davranış parametreleri gösterilmiştir. Şekil 7.167.'de Hacıcuma Camii'nin deneysel modal analiz sonuçlarıyla, kalibre edilmiş teorik modal analiz sonuçları şematik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 7.54. Hacıcuma Camii kalibre edilmiş sonlu eleman modeli üzerinde hesaplanan teorik modal analiz ve OMA sonuçlarının karşılaştırılması.

Mod Numarası	**Mod Şekli**	**Frekans (Hz)**		**Hata Oranı (%)**
		OMA	**Teorik**	
1	Kısa doğrultuda (x yönünde) öteleme	5,005	5,012	0,14
2	Uzun doğrultuda (y yönünde) öteleme	6,116	5,730	6,31
3	Düşey eksen (z yönünde) etrafında yanal burulma	7,104	7,404	4,05



Şekil 7.167. Hacıcuma Cami deneysel ve teorik modal analiz sonuçlarının şematik olarak karşılaştırılması.

8. 2 HAZİRAN 1859 ERZURUM DEPREMİ YER HAREKETİ SİMÜLASYONUNUN OLUŞURULMASI ve DOĞRULANMASI

Cami sonlu eleman modellemeleri, operasyonel modal analizleri ve operasyonel modal analiz sonuçlarına bağlı sonlu eleman modellerindeki elastisite modül kalibrasyonlarının tamamlanmasının ardından 2 Haziran 1859 Erzurum depreminin senaryo yer hareketi simülasyonunun oluşturulması aşamasına geçilmiştir. Bu bölümde, ilk aşamada 2 Haziran 1859 depreminin sentetik ivme kaydı oluşturulmasından bahsedilmiştir. Daha sonra bu deprem kaydının, tez çalışması için belirlenen 9 caminin kalibre edilmiş sonlu eleman modellerine etkitilmiş, camiler üzerinde dinamik analizler yapılmıştır. En sonunda camilerin deprem sonucundaki hasar durumları incelenmiştir.

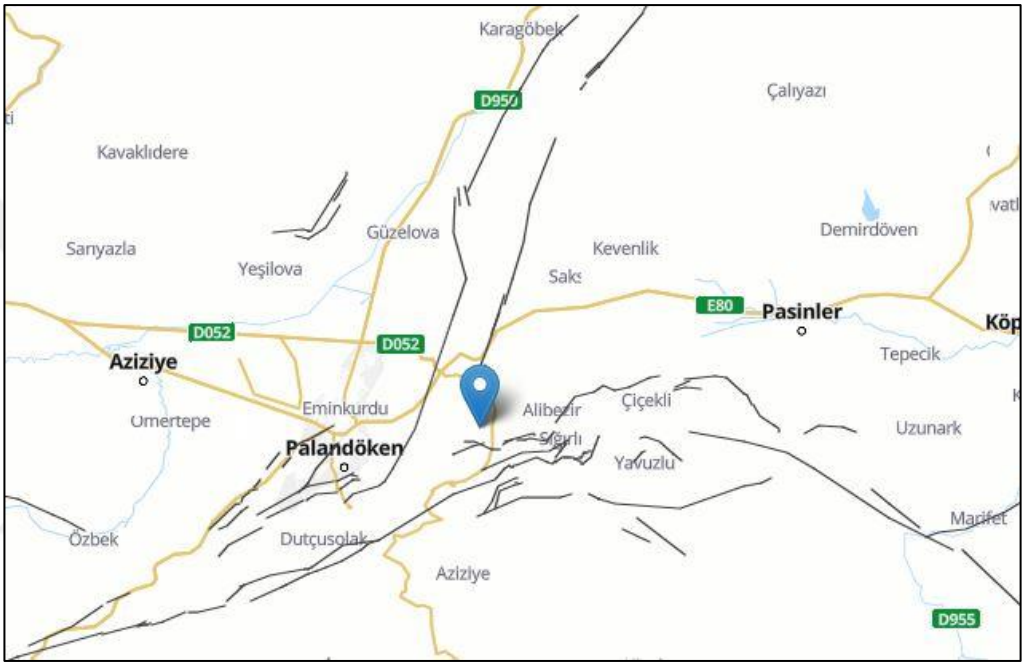
8.1. 2 Haziran 1859 Depreminin Yer Hareketi Simülasyonun Oluşturulması

Deprem kayıtları oluşturulurken depremle ilgili parametreler, sentetik deprem kayıtlarının oluşturulmasının ana etmenleridir. Sentetik deprem kayıtları, EXSIM adı verilen özel bir yazılım kullanılarak üretilmiştir. Bu özel yazılımda, depremle ilgili bütün parametreler girilerek herhangi bir depremin sentetik kayıtları oluşturulabilmektedir. Bu parametrelerden bahsedilecek olursa; deprem büyüklüğü, depremin gerçekleştiği fay koordinatları, fay yırtılma genişliği, gerilim düşümü, fayın atım şekli, fay boyutu, fay derinliği, geometrik dalga yayılımı, kabuk yoğunluğu, yırtılma hızı, kabuksal kesme dalgası hızı, alt fay sayısı ve alt fay boyutları, depremin gerçekleştiği noktanın coğrafi koordinatları, yerel kappa faktörü gibi yer hareketi ve yer hareketinin gerçekleştiği zeminin parametreleridir. Bu parametreler yazılıma girildikten sonra yazılımda sentetik deprem kaydı üretilir. Bu tez çalışmasının 4. Bölümü olan Stokastik Yer Hareketi Yaklaşımı bölümünde bu parametreler ile ilgili tanımlar ve matematiksel ifadeler ayrıntılı biçimde açıklanmıştır.

Bu bilgilerin ardından, 2 Haziran 1859 Erzurum depreminin sentetik ivme kaydı üretilme aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada yaşanılan en büyük dezavantaj depremin eski bir tarihte olması nedeniyle deprem ile ilgili ulaşılabilecek kaynak sayısının az olması ve ulaşılabilen kaynaklarda deprem ile ilgili bilgilerin kısıtlı ve sınırlı olmasıdır. Dolaysıyla,

deprem ile ilgili nesnel terimlere ulaşılamamıştır. Bu nedenle, bazı terimler literatürde bu konuyla ilgili çalışma yapılan kaynaklardan yararlanılarak elde edilmiştir.

2 Haziran 1859 Erzurum depreminin büyüklüğünün Mw=6,1 olduğu kaynaklarda belirtilmiştir (Anonim 2023a). Bu depremin, tez çalışmasının 5. Bölümünde Erzurum Fayı üzerinde gerçekleştiği çıkarımı yapılmıştır. Şekil 8.1.'de Erzurum fayı gösterilmiştir.



Şekil 8.1. Erzurum Fay Zonu ve 1859 depreminin fay koordinatları (Anonim 2023a)

2 Haziran 1859 Erzurum depreminin literatürde belirtilen fay koordinatları olan 39°94'N ve 41°397'E değerleri yazılıma girilmiştir (Anonim 2023a). Bu fayın sol doğrultu atımlı (strike slip fault) bir fay olduğu literatürde mevcuttur. Fay zonunun, Erzurum'un doğusu ile kuzeyi arasında 38 km bir uzunlukta, 23 km genişliğinde bir alana sahip olduğu bilinmektedir (Demirtaş 2019). 2 Haziran 1859 Erzurum depremi aletsel dönem öncesinde gerçekleşen bir deprem olduğu için depremin fay yırtılma uzunluğu ve genişliği ile ilgili nesnel bir bilgi mevcut değildir. Erzurum Fayının bugünkü bilgiler ile incelendiğinde, doğuda 35 km'ye kadar uzunlukta olduğu saptanmıştır. Depremin bu fay bölgesinin 15 km fay uzunluğunda gerçekleştiği kabul edilmektedir. Wells and Coppersmith (1994) bir depremin büyüklüğü ve fayın türü bilinirse fay yırtılma genişliğinin;

$$log(RW) = a + b*M \quad (8.1)$$

bağıntısıyla ifade edileceğini belirtmişlerdir. Burada M deprem büyüklüğünü, a ve b ise özel bağıntı katsayılarını ifade etmekte olup fayın sol doğrultu atımlı bir fay olması nedeniyle değerleri sırasıyla -0,76 ve 0,14 değerleridir. Bu bağıntı kullanılarak fay yırtılma genişliği 7,5 km olarak hesaplanmıştır ve yazılıma bu değer tanımlanmıştır. Fay doğrultu eğim açısı, depremin gerçekleştiği fay uzunluğu ve hesaplanan fay genişliği yardımıyla yaklaşık 25° olarak hesaplanmıştır. Fay derinlik açısı, 0 ile 90° arasında bir değer almaktadır. Bu fay sol doğrultu atımlı bir fay olduğu için bu açı değeri 90° olarak belirlenmiş ve yazılıma tanımlanmıştır. Stokastik sonlu fay metodunun bir parçası olan alt fay boyutları için 1,5 x 1,5 km boyutları yazılıma tanıtılmıştır. Depremin hiposentr noktası olarak alt faylardan bir fay seçilmiştir. Bu faylar i ve j olmak üzere (i, j) koordinat tiplerine sahiptir. Burada (5, 3) alt fayı, depremin hiposentr alt fayı olarak seçilmişitr. Gerilim düşümü ($\Delta\sigma$) için Mohammediun and Serva (2001), eğer doğrultu atımlı bir fayın genişliği bilinir ise;

$$\Delta\sigma_{SS} = 8{,}9\ xW^{0,8} \quad (8.2)$$

bağıntısını önermişlerdir. W fay genişliğini ifade etmektedir. 7,5 km olarak belirlenen fay genişliği bağıntıda yazıldığında gerilim düşüm değeri yaklaşık 45 bar olarak hesaplanmıştır. Depremle ilgili sayısal verinin yeteri kadar net bilinememesi yazılıma girilecek terimlerde de bazı kısıtlayıcı durumlara neden olmuştur. Bu aşamada, Uğurhan (2010) ve Karimzadeh et al. (2018)'ın sentetik deprem kaydı üretme üzerindeki çalışmalarından 2 Haziran 1859 Depremi'nin sentetik deprem kaydındaki eksik kalan terimleri tamamlamak için yararlanılmıştır. İki çalışmada farklı zamanlarda Erzincan'da gerçekleşen depremlerin sentetik deprem kayıtları üretilmiştir. Uğurhan (2010)'ın çalışmasında 1992 Erzincan Depremi'nin sentetik deprem kaydını üretirken Karimzadeh et al. (2018) ise çalışmalarında 1939 Erzincan Depremi'nin sentetik deprem kaydını üretmişlerdir. Eksik kalan terimlerden biri olan deprem odak derinliği Uğurhan (2010) 1992 Erzincan depremi için 3 km; Karimzadeh et al. (2018) 1939 Erzincan Depremi için 2 km olarak belirlemişlerdir. Bu veri ışığında Erzurum depremi için odak derinliği 3 km

olarak belirlenmiştir. Elastik olmayan azaltma ya da kalite faktörü (Q_f), terimi için, Uğurhan (2010) ve Karimzadeh et al.(2018) Erzincan depremleri için;

$$Q = 122 * f^{0,68} \tag{8.3}$$

bağıntısını kullanmışlardır. Bu kısıtlayıcı faktör terimi 1859 Erzurum depremi için yazılıma işlenmiştir. Geometrik yayılım için Karimzadeh et al. (2018) 1939 Erzincan depremi için;

$$R^{-1,1}, \quad R \leq 25\ km \tag{8.4}$$

$$R^{-0.5}, \quad R > 25\ km$$

bağıntılarını kullanmışlardır. R depremin kaynağı ile alıcı arasındaki mesafedir. Fay yırtılma uzunluğu 15 km uzunluğunda olduğu için, 25 km'den küçük olan geometrik yayılım bağıntısı yazılıma işlenmiştir. Zaman süre modeli için Uğurhan (2010) ve Karimzadeh et al. (2018);

$$T = T_0 + 0,05R \tag{8.5}$$

zaman modelini kullanmışlardır. T zaman modelini, T_0 kaynak süresini, R fayın dış merkezlik (hiposantr) mesafesini ifade etmektedir. Bu değerlerle model yazılıma tanıtılmıştır. Erzurum için yerel zemin sınıfının belirlenmesi için V_s30 hızlarından yararlanılmıştır. Tez çalışmasının 3. Bölümünde, Erzurum merkez için V_s30 hızının 200 ile 240 m/s arasında değiştiği belirtilmiştir. Bölgedeki Vs30 değeriyle tutarlı olması amacıyla Joyner ve Boore (1997) tarafından yapılan amplifikasyonlar kullanılmıştır TBDY (2018)'de bu hız aralığında zemin sınıfının ZD zemin sınıfı olduğu ifade edilmiştir. Depremin sentetik kaydı için ZD zemin sınıfı yazılıma tanıtılmıştır. Yerel zemin etkilerini belirten kappa faktörü katsayısı (κ_0) için Altındal and Askan (2022), Türkiye'nin doğusundaki ZD sınıfı zeminlerde en düşük 0,0365 değerini önermişlerdir. Uğurhan (2010) 1992 Erzincan depremi için 0,045, Karimzadeh et al. (2018) 1939 Erzincan Depremi için 0,066 değerini kullanmıştır..İlk önce 0,040 değeri kullanılarak

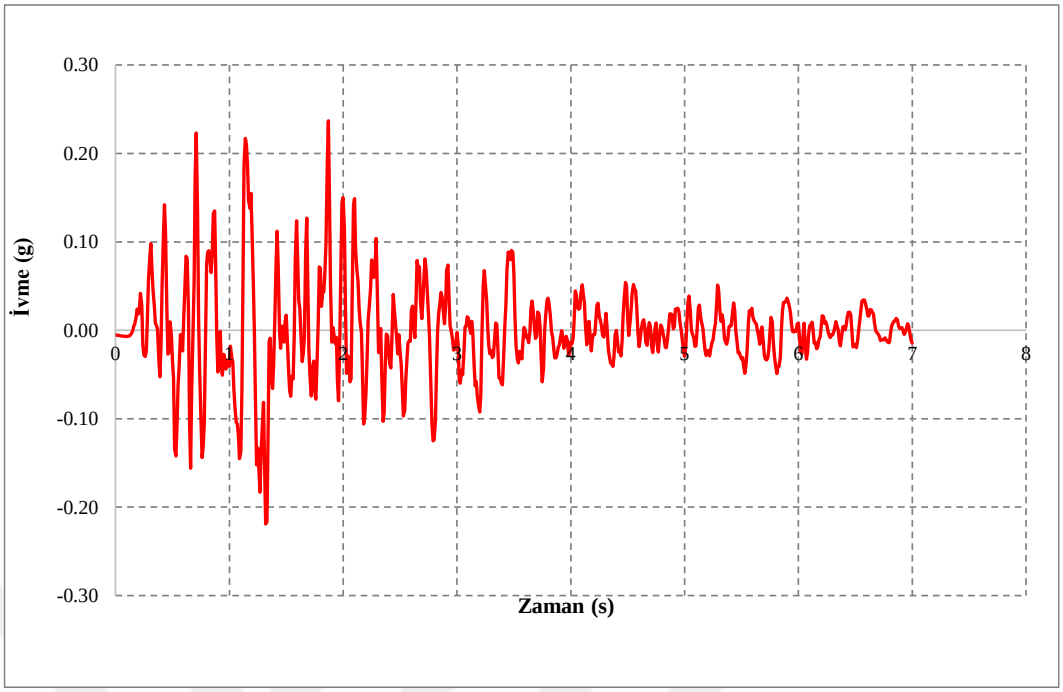
deprem kaydı üretilmiş ve pilot analizler yapılmıştır. Fakat bu değerle oluşturulan deprem kaydı camilere etkitildiğinde beklenen hasar kaydı oluşturulmamıştır ve hasarın artması için bu değerin azaltılması yoluna gidilmiştir. En sonunda Altındal and Askan (2022) değeri baz alınmıştır ve çalışma alanındaki engebeli topoğrafyayı hesaba katmak için ortalama-1sigma değeri kullanılarak kappa değeri 0,025 değerine çekilmiştir ve bu değerle depremin sentetik ivme kaydı oluşturulmuştur. Kabuksal kayma dalgası hızı ve kabuksal yoğunluk değerleri için Uğurhan (2010) ve Karimzadeh et al. (2018) çalışmalarında kullanılan değerleri baz alınarak sırasıyla kabuksal kayma dalgası hızı için 3600 m/s, ve kabuksal yoğunluk için 2800 kg/m^3 değerleri yazılıma işlenmiştir. Bu işlemler tamamlandıktan sonra, deprem kaydının kullanılacağı konum yazılıma işlenmiştir. Bu konum için, 1859 depreminde deprem hasarının net olarak bilindiği ve kaynaklarda var olan Erzurum Ulu Camii'nin konumu girilmiştir ve deprem için bu kayıt baz alınmıştır. Çalışma için belirlenen diğer 8 cami için de Erzurum Ulu Camii baz alınarak oluşturulan deprem kaydı kullanılmıştır. Sentetik deprem kaydı üretimi için matematiksel konum olarak Ulu Camii'nin konumu olan 39° 906 (*N*) ve 41 °277 (*E*) konumları yazılıma işlenmiştir ve kayıt oluşturma aşaması tamamlanmıştır. 2 Haziran 1859 Depreminin sentetik deprem kaydının parametreleri Çizelge 8.1.'de, yer hareketinin özellikleri Çizelge 8.2.'de gösterilmiştir. Şekil 8.2.'de 2 Haziran 1859 Erzurum depreminin ivme kaydı gösterilmiştir. Depremin yatay elastik tasarım spektrumunu oluşturmak için AFAD'ın TBDY 2018 deprem veri tabanından yararlanılmıştır. Depremin gerçekleştiği aynı konum için AFAD veri tabanından ZA, ZB ve ZC, ZD ve ZE zemin sınıflarını içeren yatay elastik tasarım spektrumları elde edilmiştir. (Anonim 2024a). Bütün bu kayıtlar, 2 Haziran 1859 depreminin yatay elastik spektrumu ile bir araya getirilerek 5 farklı yatay elastik spektrumu grafikleri oluşturulmuştıur. Şekil 8.3.'te oluşturulan ivme-spektrum grafiği gösterilmiştir.

Çizelge 8.1. 1859 Erzurum Depreminin simülasyon parametreleri

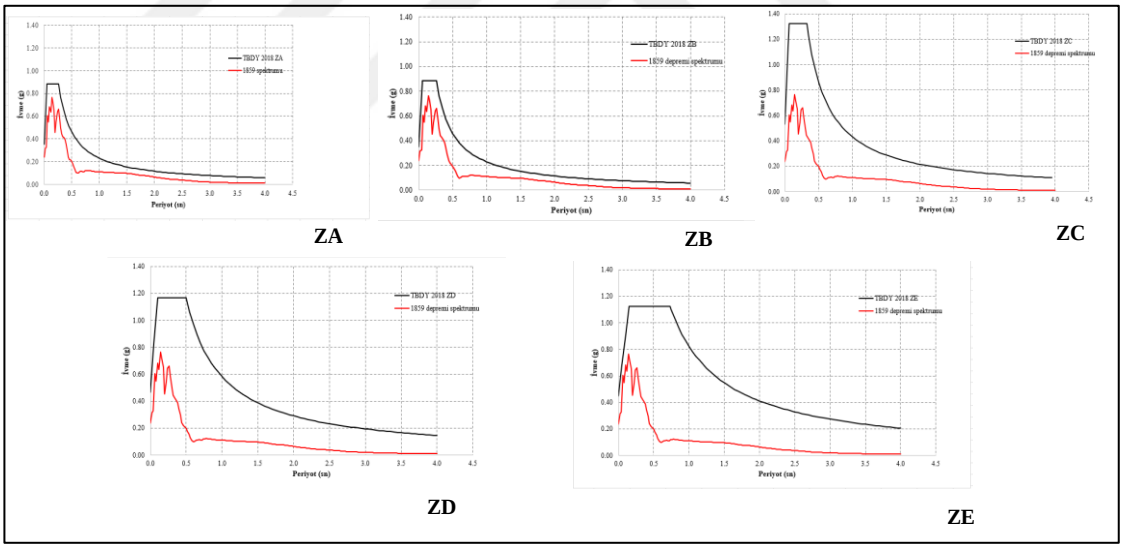
Parametre	**Değerler**
Fay Yönelimi	Doğrultu eğim açısı: 25 ° Derinlik açısı: 90 °
Fay boyutları	15 x 7,5 km
Deprem büyüklüğü	6,1
Fay derinliği	3 km
Alt fay boyutları	1,5 x 1,5 km
Gerilim düşümü	45 bar
Kabuksal kayma dalgası hızı	3,600 m/s
Kabuksal yoğunluk	2,800 kg/m^3
Atım alanı yüzdesi	% 50
κ_0	0,025
Zaman süre modeli	0,05*R
Azaltma faktörü, $Q_{(f)}$	122 $f^{0,68}$
Geometrik yayılım	$R^{-1,1}$, R≤25 km $R^{-0.5,}$ R>25 km
Pencereleme fonksiyonu	Saragoni- Hart
Yerel zemin sınıfı	ZD

Çizelge 8.2. 2 Haziran Erzurum 1859 depremi sentetik yer hareketi özellikleri

Deprem	**Tarih**	**M_w**	**Konum**	**PGA (gal)**	**PGV (cm/sn)**
Erzurum	2 Haziran 1859	6,1	39°906 (N) 41°277 (E)	234	12,1



Şekil 8.2. 2 Haziran 1859 Erzurum depremi senaryo deprem ivme kaydı



Şekil 8.3. 2 Haziran 1859 Erzurum depremi yatay elastik tasarım ivme-spektrumları

Depremin şiddeti ile ilgili literatürde mevcut hasar kayıtları değerlendirildiğinde MMI (Modifiy Mercalli Intensity) şiddet ölçeğine göre 9 şiddet düzeyinde olduğu Özer et al. (2019) çalışmasından belirlenmiştir. Bu bilgi tez çalışmasının 5. bölümünde verilmiştir. Bilal and Askan (2014) çalışmalarında, eğer bir yer hareketinin yer ivme kaydı biliniyorsa depremin şiddetinin;

$$MMI = 0{,}132 + 3{,}884x \log(PGA) \quad (8.6.)$$

bağıntısı ile hesaplanacağını belirtmişlerdir. Bağıntıda PGA birimi gal olarak girilmesi gereken maksimum yer ivmesidir. 2 Haziran 1859 Erzurum depreminin sentetik kaydından elde edilen 234 gal PGA değeri Bağıntı 8.6'ya tanımlandığında depremin şiddet değeri 9.33 olarak hesaplanmıştır. Bağıntı 8.6 kullanılarak hesaplanan 9.33 MMI şiddet değerinin Özer vd (2019) tarafından verilen 9 şiddeti değeri ile örtüştüğü görülmüştür.

Ulu Camii referans alınarak sentetik şekilde üretilen deprem kaydı, 100 Hz frekanslı, % 5 sönümlü, toplam 82 saniyelik bir kayıttır. Depremin hiposantr mesafesi 17,94 km, fay mesafesi 11,48 km olarak hesaplanmıştır. İvme birimi cm/s^2'dir. Deprem simülasyon kaydı üç doğrultu (x, y, z) için ayrı ayrı oluşturulmamış, tüm yönlerin adeta bir bileşkesi olacak şekilde tek doğrultuda üretilmiştir. Yapılara etkitilecek deprem kaydı için 82 saniyelik tüm kayıt yerine deprem ivmesinin en yüksek olduğu, yıkıcılık ihtimalinin en yüksek olduğu saniye aralığı alınmıştır. Deprem kaydı incelendiğinde 20-25 saniye arasında en yüksek ivmelerin olduğu görülmüştür. Bu aralıktaki 5 saniyelik ivme kaydı düzenlenerek deprem kaydı olarak camilere etkitilmiştir.

Ulu Camii için sonlu eleman model kalibrasyon tanımlaması Bölüm 7.4.3.'te yapılmıştır. Fakat 2 Haziran 1859 depreminin sentetik ivme kaydının caminin arşiv kaydındaki hasarı tam bir şekilde yansıtması için, Ulu Camii'nin 1859 tarihindeki malzeme ve taş durumu dikkate alınmıştır. Caminin o yıllarda betonarme malzemeyi içermesi mümkün değildir. Dolaysıyla caminin şu anda betonarme eleman kısmını oluşturan tonoz ve kolonların betonarme çekirdek kısmı başta olmak üzere caminin tüm yeni bir sonlu eleman kalibrasyon güncellemesi yapılmıştır. Ek olarak, caminin o yıllardaki Erzurum yapı durumuna benzer şekilde çatı kısmının toprak bir çatı örtüsü olduğu bilinmektedir (Konyalı 1960). Bu sebeple, Ulu Camii'nin deprem analizine maruz bırakılacak sonlu eleman modelinde, yapı modelinin çatı kısmına toprak yükü tanımlanmıştır. Ulu Camii için sonlu eleman kalibrasyon değerleri Çizelge 8.3.'te gösterilmiştir.

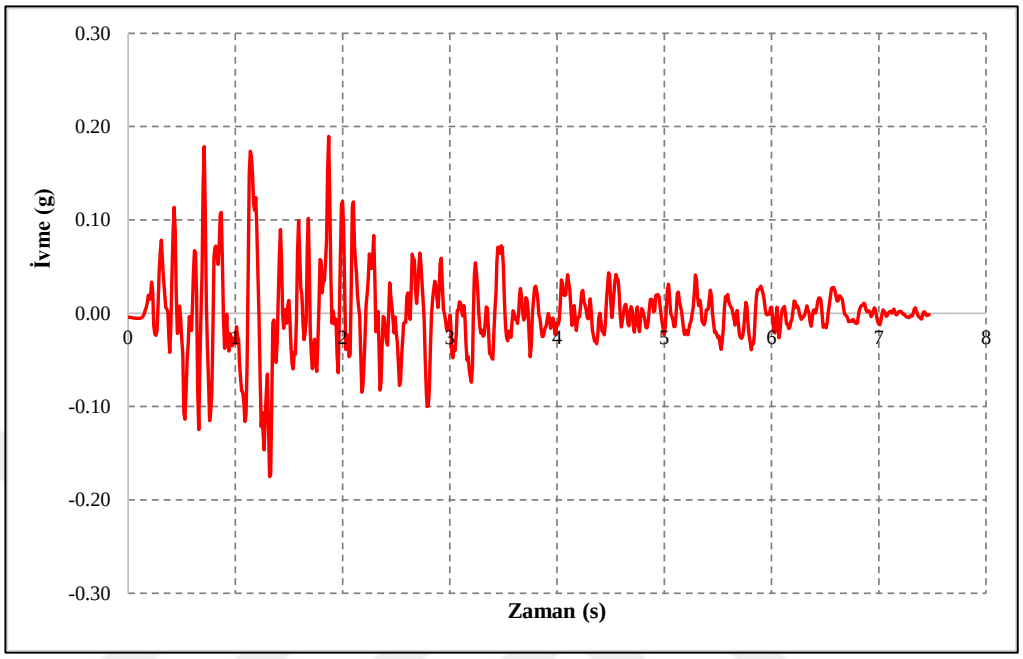
Çizelge 8.3. Ulu Camii deprem analizi yeni kalibrasyon elastisite modül değerleri

Duvar Elastisite Modülü (MPa)	**Kolon Elastisite Modülü (MPa)**	**Kemer Elastisite Modülü (MPa)**	**Tonoz Elastisite Modülü (MPa)**	**Kubbe Elastisite Modülü (MPa)**	**Betonarme Çekirdek Elastisite Modülü (MPa)**
850	1.415	1.415	500	500	500

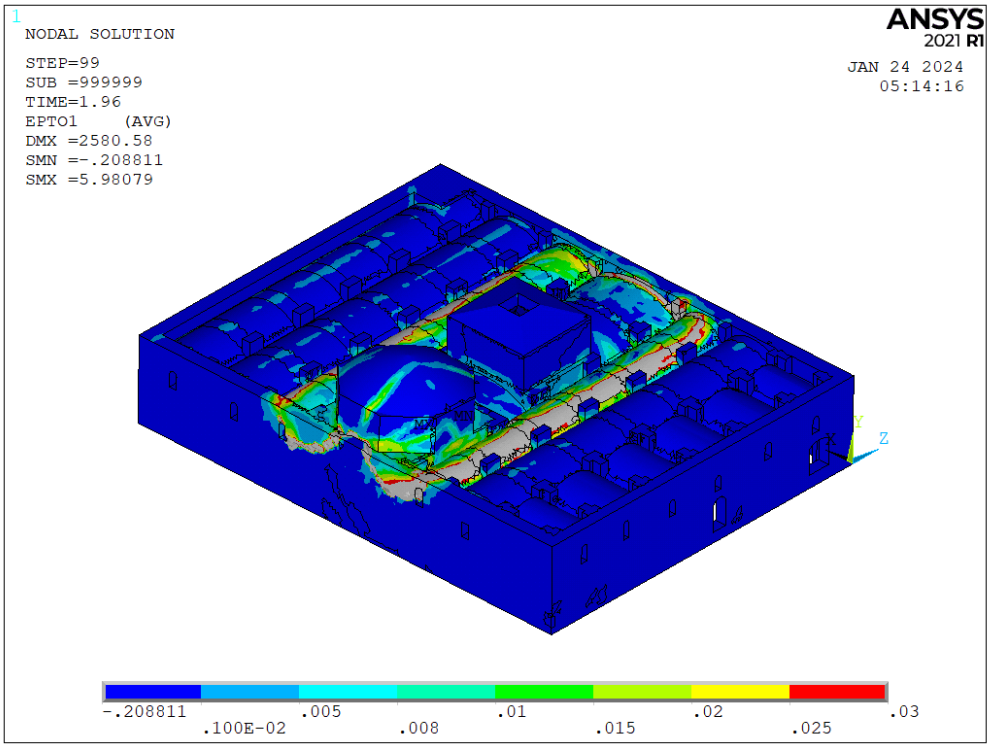
Çizelge 8.3. incelendiğinde, Ulu Camii'nin 1859 depremine maruz bırakılacak sonlu eleman modeli için duvar elastisite modülü baz alınmıştır. Duvar elastisite modülü önceki model kalibrasyonundaki gibi 850 MPa olarak belirlenmiştir. Duvar basınç mukavemeti 3 MPa olarak kabul edildiğinde, elastisite modül değeri duvar basınç mukavemetinin yaklaşık 283 katıdır. Kolon ve kemer elemanları için de duvar basınç mukavemeti 5 MPa olarak belirlenmiştir ve bu değerin 283 katı olan 1.415 MPa elastisite modül değeri belirlenmiştir. Günümüzde betonarme durumda olan tonozlar ve betonarme çekirdek için duvar basınç mukavemeti değeri 3 MPa olarak kabul edilmiştir. Ancak elastisite modül kalibrasyon değeri, diğer yapı elemanlarından düşük olacak şekilde, bu değerin yaklaşık 167 katı olan 500 MPa olarak belirlenmiştir. Caminin ahşap kubbesi için önceki kalibrasyon elastisite modül değerinin yarısı olan 500 MPa olarak belirlenmiştir.

Ulu Camii'mde gerekli kalibrasyon ayarı tamamlandıktan sonra, oluşturulan ivme kaydı ANSYS Mechanical (2016) yazılımında Ulu Camii'nin sonlu eleman modeli üzerinde etkitilmeye başlanmıştır. Ulu Camii üzerinde bu kayıt etkitilmeye başlandığında caminin güçlü deprem kaydında göçtüğü ve analizin tamamlanamadığı gözlenmiştir. Bu aşamada 1859 depreminin sentetik ivme kaydında camide meydana gelecek en az göçme olacağı hale gelinceye kadar küçültülmeye gidilmiştir. Deprem kaydı 0,01 ile çarpıldığında, caminin en az hasar ile göçmeden ayakta kaldığı görülmüştür. 0,01 ile çarpılmış deprem kaydı baz alınmıştır. Bu kayıttan bir önceki kayıt olan ve camide hasara sebep olan deprem kaydı 0,8 ile çarpılan kayıttır. Sonuç olarak 1859 depreminin sentetik kaydı deprem kaydı olarak 0,8 ile çarpılan ivme kaydı belirlenmiştir. Şekil 8.4.'te 2 Haziran 1859 depreminin yeni ivme kaydı gösterilmiştir. Şekil 8.5.'te deprem kaydının

referans modeli olan Ulu Camii'nin yeni deprem kaydında aldığı hasar mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 8.4. 2 Haziran 1859 net deprem ivme kaydı



Şekil 8.5. Ulu Camii yıkılma mekanizması

8.2. Camilerin Deprem Analizlerinin Değerlendirilmesi

Bu başlıkta, simülasyon kaydı oluşturulan 1859 depreminin tez çalışmasında belirtilen camilere etkitilmesi ve dinamik analiz sonuçlarının her cami için ayrı ayrı değerlendirilmesi ele alınmıştır.

Cami dinamik analizleri ANSYS Mechanical (2016) yazılımında yapılmıştır. Sonlu eleman yönteminde *N* serbestlik dereceli bir sistemin genel hareket denklemi;

$$[M]\{\ddot{u}(t)\}+[C]\{\dot{u}(t)\}+[K]\{u(t)\}=\{R(t)\} \quad (8.7.)$$

şeklinde ifade edilmektedir. $\ddot{u}$(t)}, {$\dot{u}$(t)}, {u (t)} ve {R(t)} ise sırasıyla çok serbestlik dereceli sistemin zamana bağlı ivme, hız, yer değiştirme ve kuvvet vektörlerini; [M], [C] ve [K] ise çok serbestlik dereceli sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini ifade etmektedir. Bu denklem yatay olarak uygulanan belli bir F(t) dış kuvveti altındaki denge denklemi şeklinde de ifade edilmektedir. Deprem analizi için, ANSYS Mechanical (2016) yazılımında yer ivmesi mesnetlere doğrudan uygulanamamaktadır. Bunun yerine ACEL komutu yardımıyla bütün düğüm noktalarına ivme alanları oluşturulmuştur. Komutta belirtilen yer ivmesi bütün düğüm noktalarının üç yönünde de eşit büyüklükte fakat ters işaretli olarak tanımlanmıştır. Bu ivmeler, kütle eleman matrisleriyle bir araya gelerek cisim yük vektör terimi oluşturulur. Bu terim, tüm sönümlü dinamik analizler için oluşturulmuştur ve bu terimler yazılımda ANTYPE, TRANS komutlarıyla ifade edilmiştir.

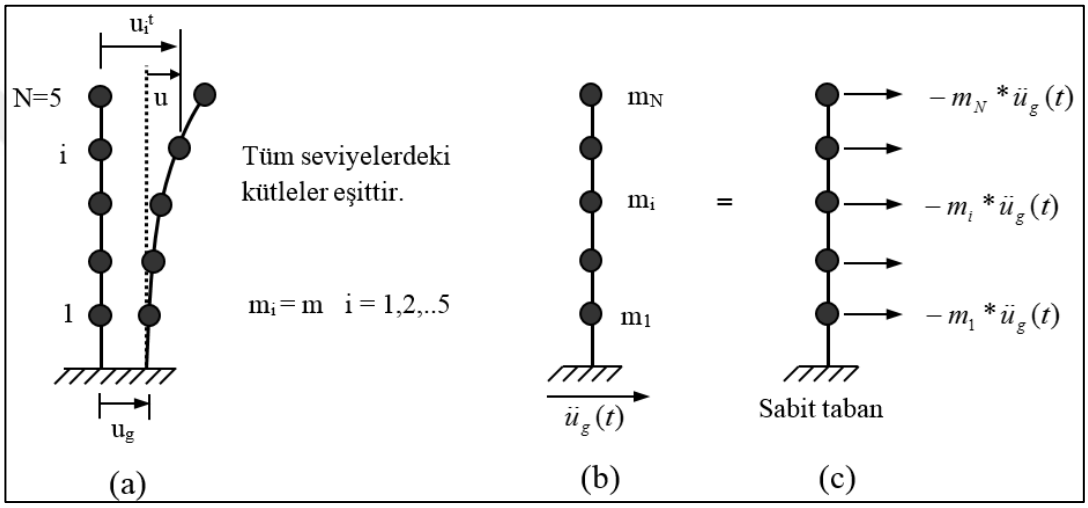
Çok serbestlik dereceli bir sistemde belirli seviyelerde kütlelerin yığıldığı varsayılarak, herhangi u_g zemin yer değiştirmesi altında toplam kat yer değiştirme vektörü {$u^t(t)$};

$$\{u^t(t)\}=\{u(t)\}+\{\imath\}u_g(t) \quad (8.8.)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. $\{\iota\}$, kat kütlelerinin, bir birim zemin yer değiştirmesi nedeniyle ortaya çıkan yer değiştirme şeklinde ifade edilen etki vektörüdür. Deprem anında F(t)=0 olduğundan Denklem 8.7.'deki denge denklemi;

$$M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=-[M]\{\iota\}\,\ddot{u}_g(t) \qquad (8.9.)$$

haline dönüşmüştür (Kocaman 2022). Şekil 8.6.'da bu bilgiler şematik olarak gösterilmiştir.

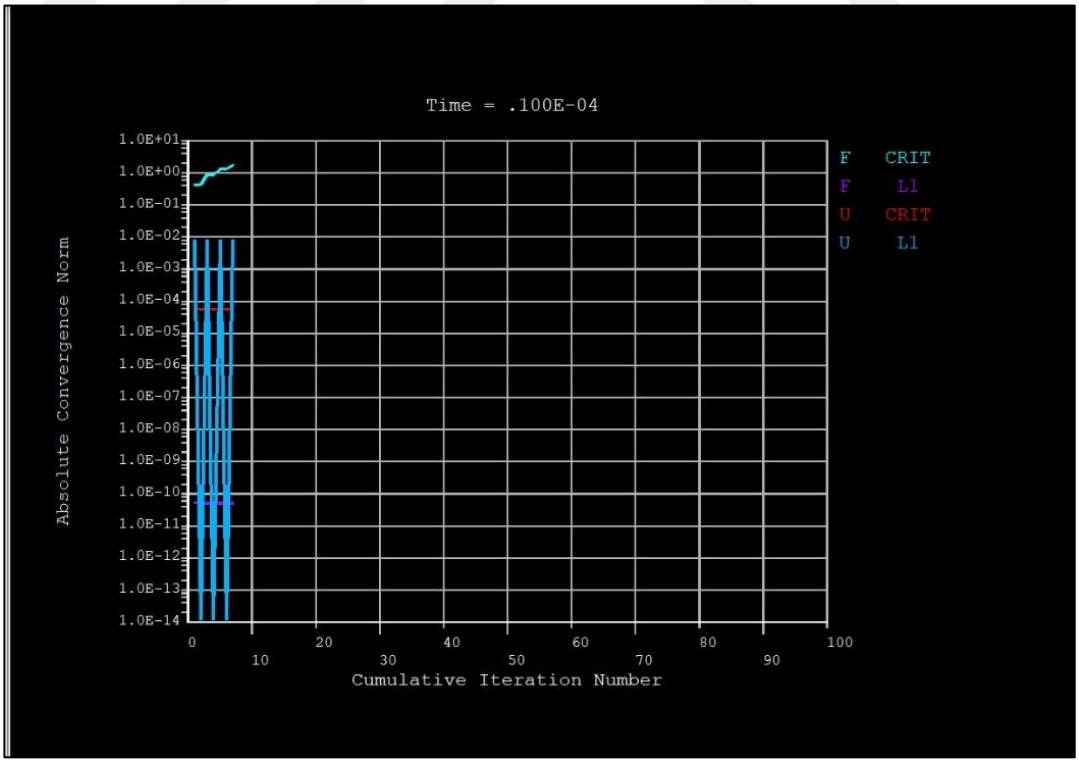


Şekil 8.6. (a) Kütle sistemi, (b) yer hareketi etkisi, (c) Efektif deprem yükü (Kazaz et al.2006).

Denklem 8.7. ve Denklem 8.9.'taki denge denklemleri karşılaştırıldığında, Şekil 8.6b.'de $\ddot{u}_g(t)$ yer ivmesindeki yapının hareket denklemi ile Şekil 8.6c.'de $mi\ddot{u}g(t)$ yanal dinamik kuvvet uygulanan sistemin hareket denklemi aynıdır. Denklem 8.9. yardımı ile hesaplanan ve yapıdaki düğüm noktalarında elde edilen yer değiştirme $\{u(t)\}$ ve ivme $\{\ddot{u}(t)\}$, yapının bulunduğu zemine bağlıdır. Bu nedenle herhangi bir kütlenin toplam ivmesi $\{\ddot{u}_g(t)\}$, Denklem 8.8. yardımıyla hesaplanmalıdır. ACEL komutuyla ters işaretli olarak yapıya uygulanan yer ivmesi ve mutlak toplam ivme, yer ivmesinin $\ddot{u}_g(t)$ -1 ile çarpılıp Denklem 8.7.'de kullanılmasıyla hesaplanmıştır. Bu aşamaların ardından ivmeler programa belli komutlar yardımıyla tanıtılmıştır ve bu veri belirli zaman aralıkları (Δ_t) şeklinde bir komut dizisi şeklinde oluşturulmuştur. Bu oluşturulan komut dizileri caminin sonlu eleman modelinde mevcut olan bütün düğüm noktalarını kapsayacak şekilde tanımlanmıştır. İvme veri kat kütleleriyle çarpılarak bir yanal dinamik yük şeklinde

yapının sonlu eleman modeline uygulanır. Bütün zaman anındaki çözülen Denklem 8.9.'da ifade edilen denge denklemleri dinamik yükün belirlenen zaman süresine kadar toplanır yani her an bir integrasyon metodu olarak kullanılmıştır. Doğrusal olmayan denklemler Newton-Raphson nümerik iterasyon yöntemleri ile çözülmüştür (Kocaman 2022).

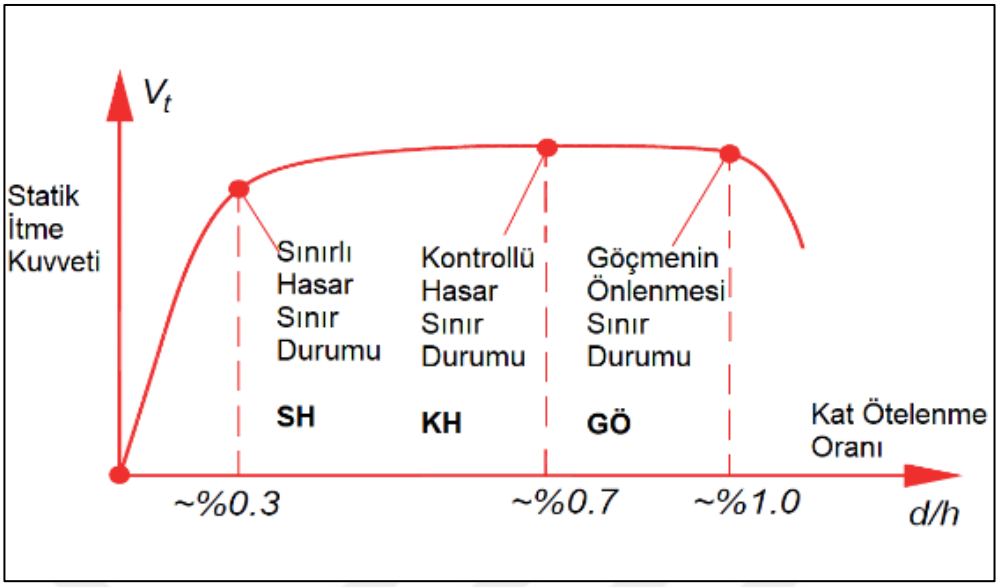
Tüm camiler için 2 Haziran 1859 depreminin 5 saniyelik oluşturulan deprem kaydı, oluşturulan bir kod yardımıyla camilerin ANSYS Mechanical (2016) yazılımında camilerin sonlu eleman modellerine etkitilmiştir. Analizlerin tamamlanmasının ardından camilerin duvar köşe düğüm noktalarından ve duvar ortalarına denk gelen düğüm noktalarından deplasman değerleri alınmıştır. Daha sonra, yine bir kod yardımıyla caminin analiz sonuçlarından elde edilen üç yöndeki kuvvetler elde edilmiştir. Kuvvet ve deplasman değerlerinden faydalanılarak camilerin kuvvet-deplasman eğrileri çizilmiştir. Çalışmanın bundan sonraki bölümünde her cami için ayrı ayrı bu işlemler yapılmıştır ve analiz sonuçları yorumlanmıştır. Şekil 8.7.'de ANSYS yazılımında gerçekleşen analizin ekran görüntüsü verilmiştir.



Şekil 8.7. ANSYS (2016) yazılımında gerçekleştirilen örnek doğrusal olmayan analiz

Tarihi yapıların deprem etkisi altındaki davranışı ve deprem güvenlikleri için performans kavramı geliştirilmiştir. Bu kavram, temelde tarihi yapıların deprem etkisi altındaki elastik ve elastik olmayan davranışlarının, yapıların gerçek bir deprem anındaki davranışlarını olabildikçe yakın bir davranış gerçekleştirmesini öngörmektedir. Daha sonra bu davranışların yol açtığı hasar değerlerinin ayrıntılı bir sayısal veri şeklinde ifade edilerek sağlıklı bir deprem değerlendirme yapılması amaçlanmaktadır. Elde edilen bu sayısal veri, yapılarda belirsizlikler nedeniyle belli başlı kabuller ve belirli bir hassasiyet düzeyinde belirlendiğinden; yapı çözümlerindeki kabuller ve matematiksel işlemler basit tutulmalıdır. Belirli bir deprem etkisi altındaki yapıların performans düzeyleri üç grupta toplanmaktadır:

- **Sınırlı Hasar (SH) Performans Düzeyi**: Yapının taşıyıcı elemanlarında yapının güvenliğini tehdit etmeyecek düzeyde hasarın meydana geldiği (doğrusal olmayan davranışın sınırlı kaldığı) hasar düzeyidir.
- **Kontrollü Hasar (KH) Performans Düzeyi:** Yapının taşıyıcı elemanlarında çoğunlukla basit veya onarımı imkânsız olmayan kontrollü hasar düzeyidir.
- **Göçmenin Önlenmesi (GÖ) Performans Düzeyi:** Yapının taşıyıcı elemanlarında ileri düzeyde ağır hasarın meydana geldiği, yapının kısmen veya tamamen göçmeye yaklaştığı ancak göçmenin önlendiği duruma karşı gelen hasar düzeyidir (TYİDRYK 2017). Şekil 8.8.'de bu performans düzeyleri gösterilmiştir.



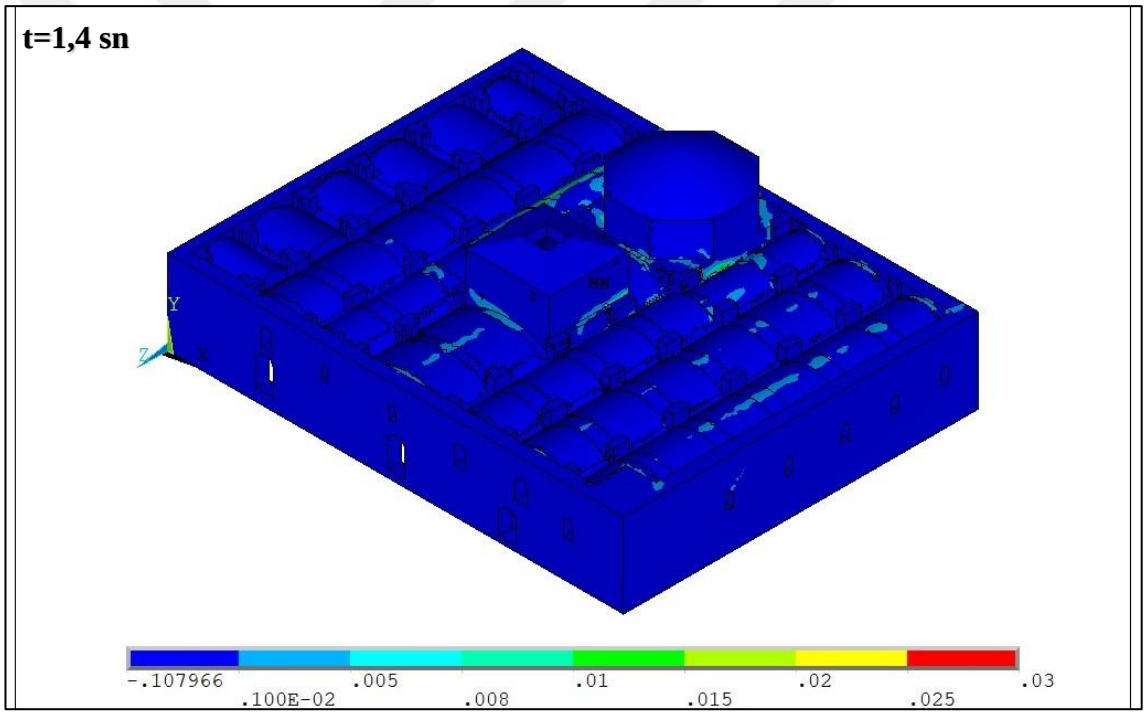
Şekil 8.8. Tarihi yapıların performans düzeyleri (TYİDRYK 2017; Kumbasaroğlu ve Çelik 2019).

Doğrusal olmayan şekil değiştirmelerde göçme düzeyleri için yapının bütünsel davranışını temsil eden yatay öteleme oranları üzerinden bir değerlendirme yapılabilmektedir. Bu oran yapının en yüksek yatay öteleme yer değiştirmesinin yapı yüksekliğine bölünmesiyle hesaplanabilmektedir. Bu oranlar baz alındığında, sınırlı hasar (SH) durumu için %0,3, kontrollü hasar durumu (KH) için %0,7 ve göçmenin önlenmesi (GÖ) durumu için %1,0 olarak kabul edilmektedir (TYİDRYK 2017). Bu çalışmada, 2 Haziran 1859 Erzurum depreminde analiz sonuçlarının ardından bütün camiler için bu oranlar hesaplanmıştır.

8.2.1. Ulu Camii dinamik analiz sonuçları

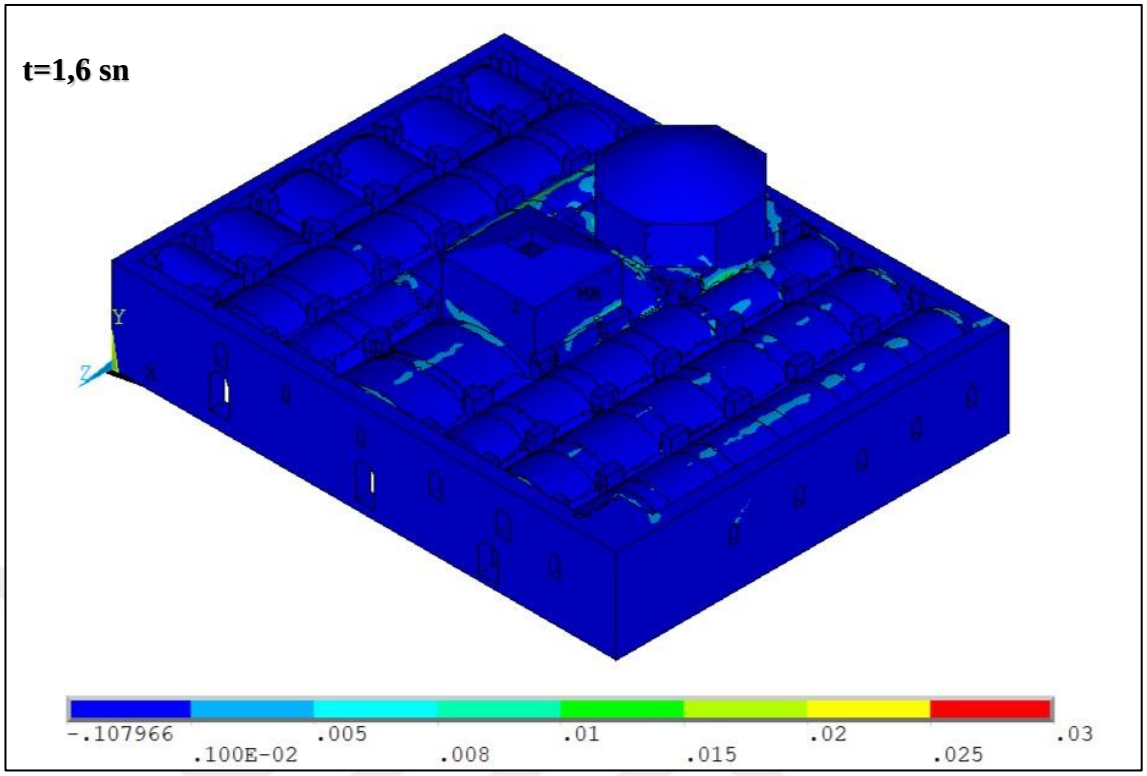
Analiz sonucunda Ulu Camii'nin hasar mekanizması Şekil 8.9.'da gösterilmiştir. Caminin 0-5 saniye arasında analiz sonuçları ve yer değiştirmeleri incelenmiştir. Caminin duvar yüksekliği 9.000 mm'dir. TYDYRK (2017)'ye göre camininin yanal yer değiştirme değerinin, cami duvar yüksekliğine bölünmesiyle caminin kat ötelme oranı hesaplanıp caminin performans limitleri belirlenmektedir. Bu limitlerden daha önce Şekil 8.8'de bahsedilmiştir. Caminin yer değiştirmeleri 1,4 saniyeye kadar 1-2 mm arasında değişmektedir. Caminin sağ bölümünde ve orta sahnında bulunan kemerlerde ve tonozlarda bir hat boyunca kılcal çatlaklar oluşmuştur. TYİDYRK (2017)'de belirtilen

yığma yapıların performans düzey limitlerine göre x ve y doğrultuları için caminin kat öteleme oranları hesaplanmıştır. Caminin 1,4 saniyeye kadar kat öteleme oranı en fazla %0,022 olarak hesaplanmıştır. Cami bu saniyeye kadar Sınırlı hasar (SH) durumundadır. 1,6 saniyeden itibaren orta sahndaki ahşap kubbede, taş kubbe yanındaki sağ-sol akslardaki tonozlarda ve kubbelerde çatlaklar meydana gelmiştir. Bu seviyede çatlaklar önce 3 mm daha sonra 6 mm'ye çıkmıştır. Kat öteleme oranı %0,06 olarak hesaplanmıştır ve SH durumu devam etmektedir. 1,96 saniyede Ulu Camii kubbelerinin sağ ve sol akslarındaki tonoz ve kemerlerinden göçme yaşanmıştır. Şekil 8.10.'da Ulu Camii'nin taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi çizilmiştir. Yön tanımlamasında doğu batı aksı X, kuzey-güney aksı ise Y yönü olarak tanımlanmıştır.

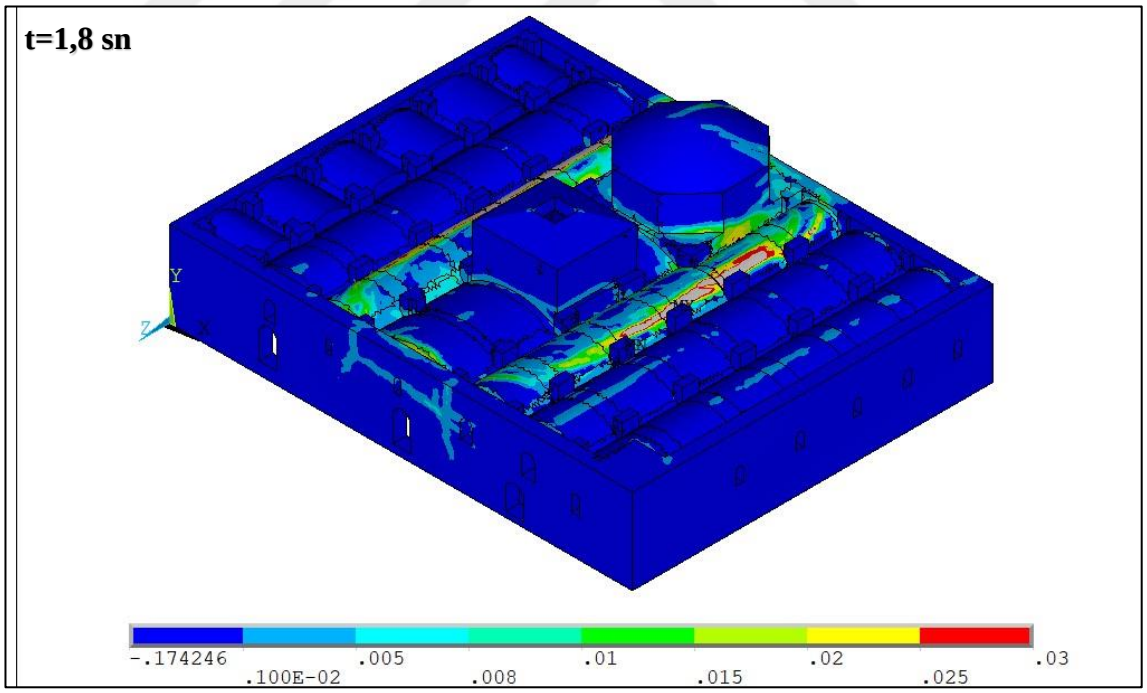


(a)

Şekil 8.9. Ulu Camii hasar mekanizması (a), (b), (c), (d)

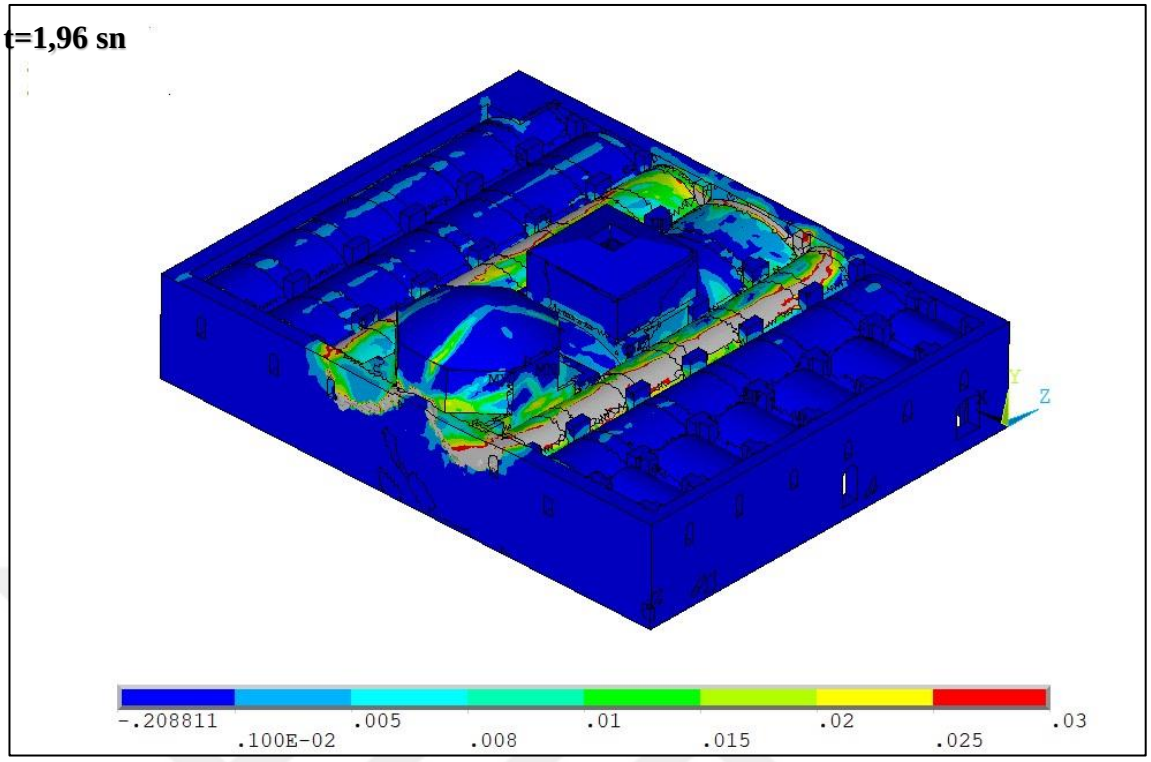


(b)



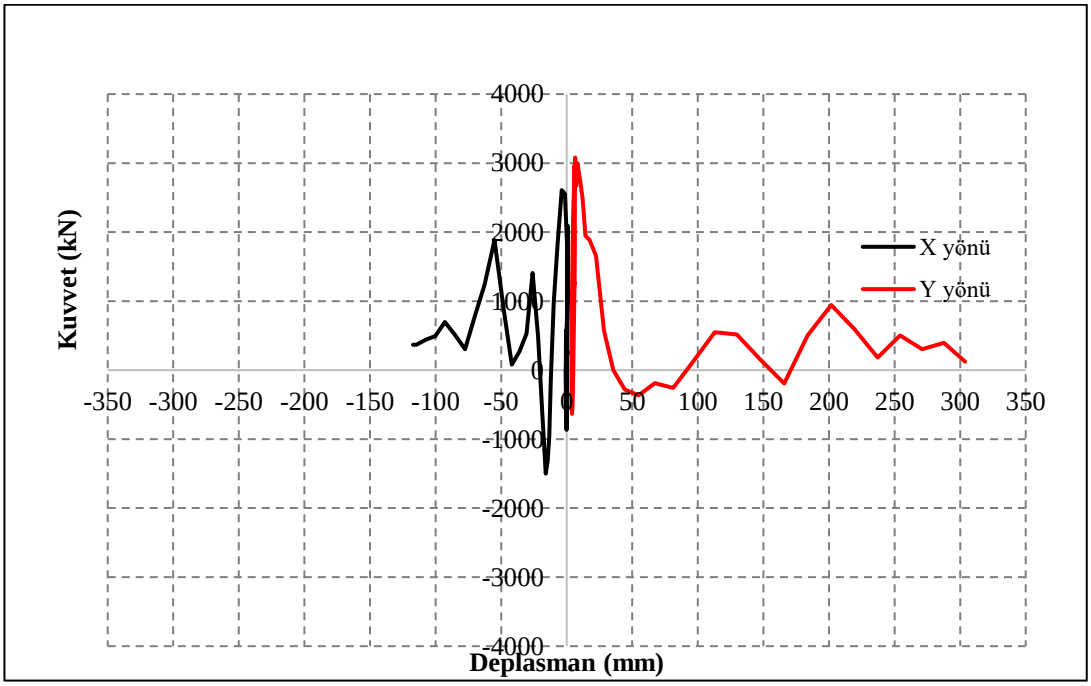
(c)

Şekil 8.9. (devam)



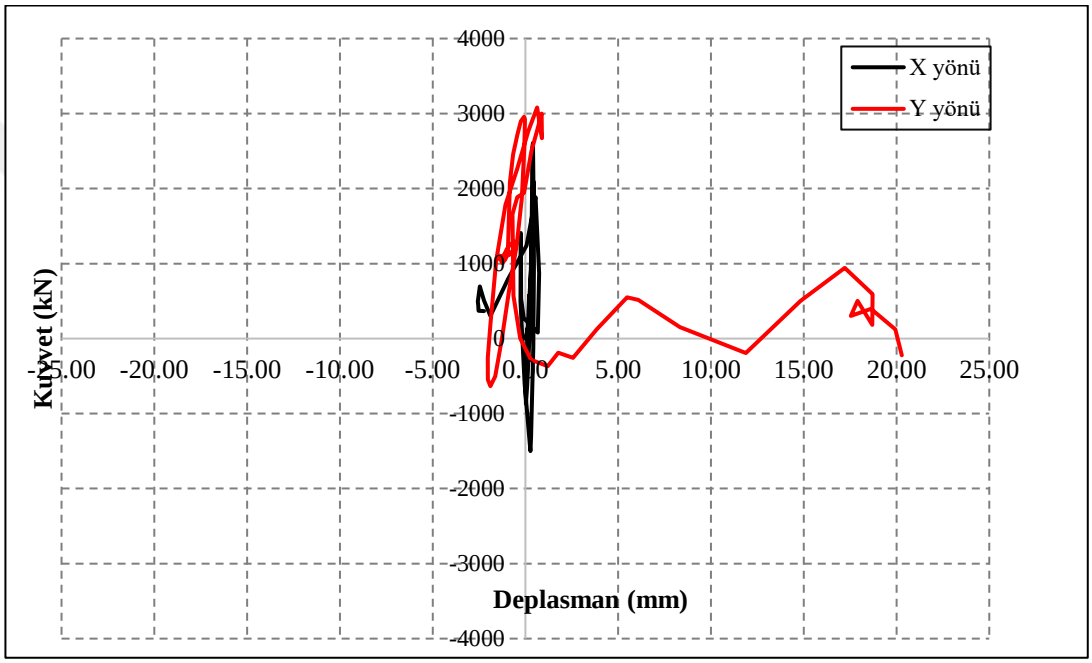
(d)

Şekil 8.9. (devam)

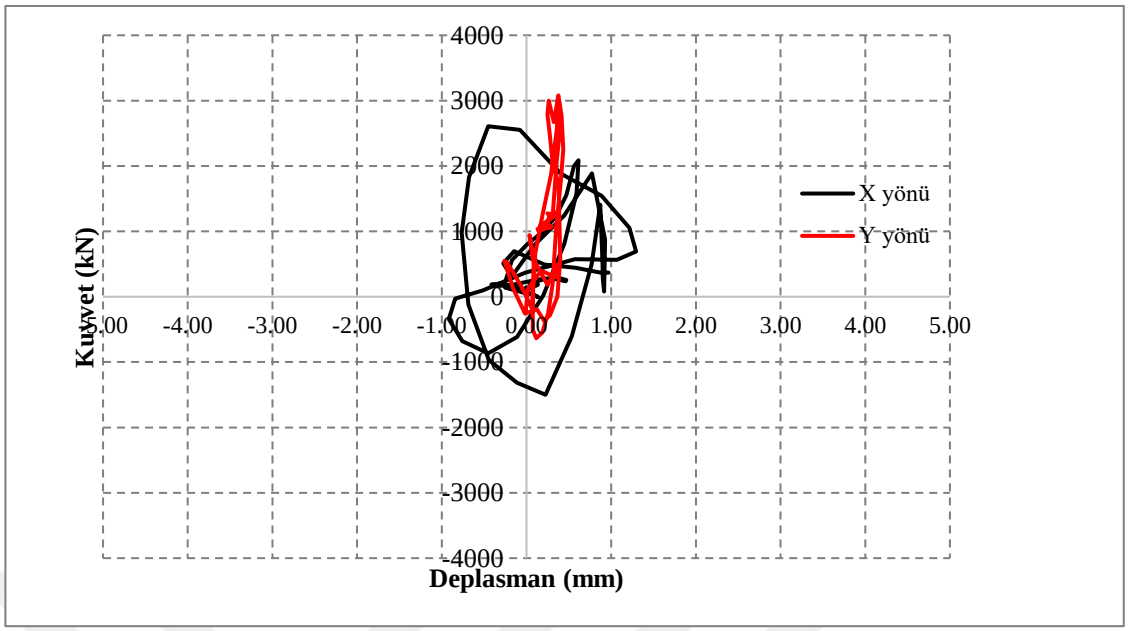


Şekil 8.10. Ulu Camii 1859 depremi ivme kaydı ile elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi.

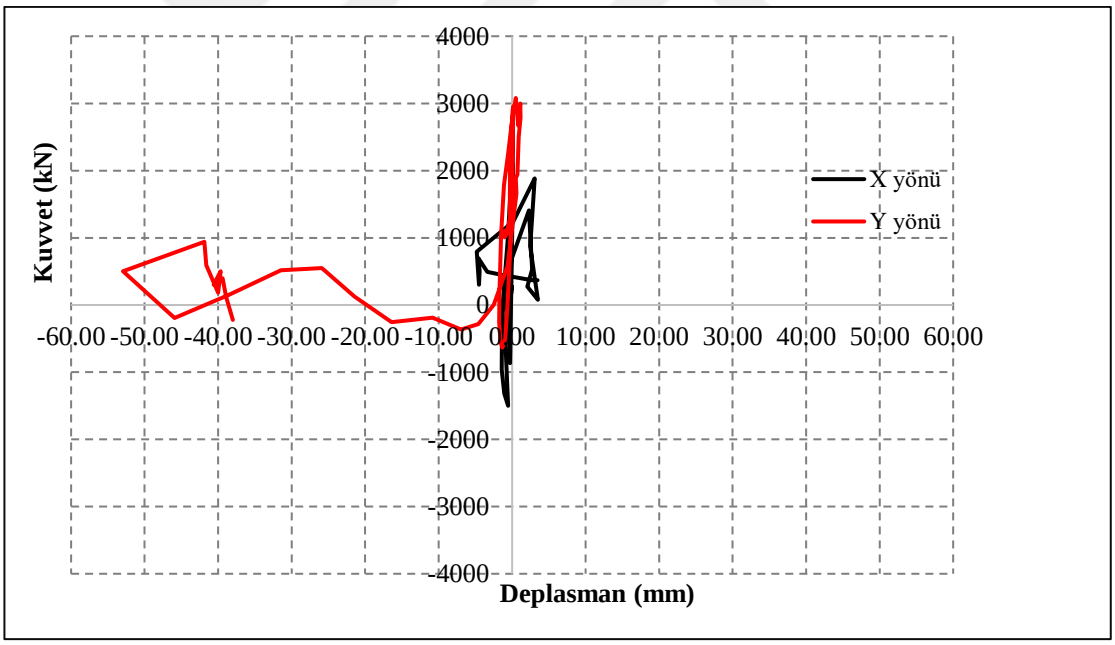
Şekil 8.10.'da caminin ahşap kubbesinin tepe noktasındaki taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizildikten sonra yapının duvar köşeleri ve duvar ortalarının taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Bu eğriler çizilirken, caminin duvar köşeleri ve duvarların orta üst düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler elde edilmiştir. Bu yer değiştirmeler ile taban kesme kuvvetleri kullanılarak eğriler oluşturulmuştur. Şekil 8.11.'de güney duvar, Şekil 8.12.'de doğu duvar, Şekil 8.13.'te kuzey duvar ve Şekil 8.14.'te batı duvar için taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri oluşturulmuştur.



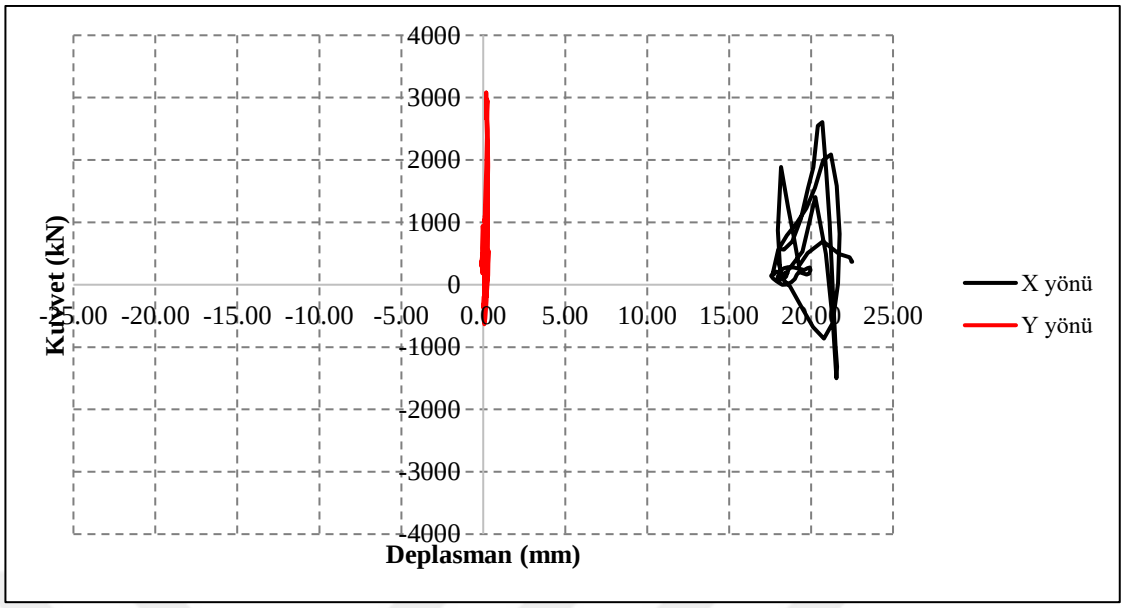
Şekil 8.11. Ulu Camii güney duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.12. Ulu Camii doğu duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi.

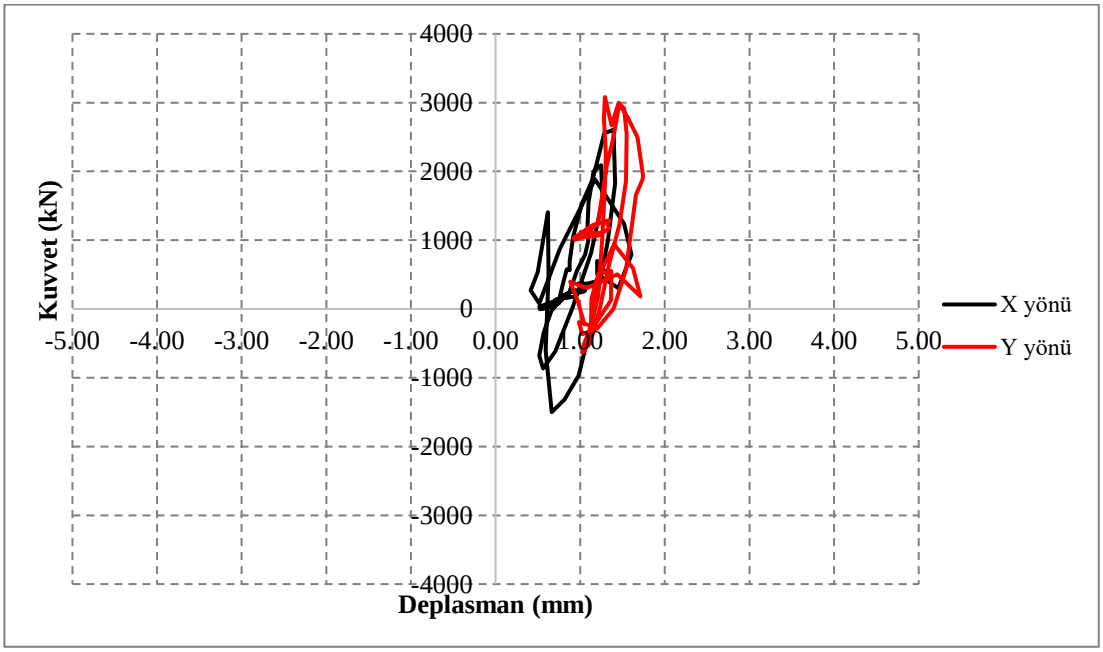


Şekil 8.13. Ulu Camii kuzey duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi.

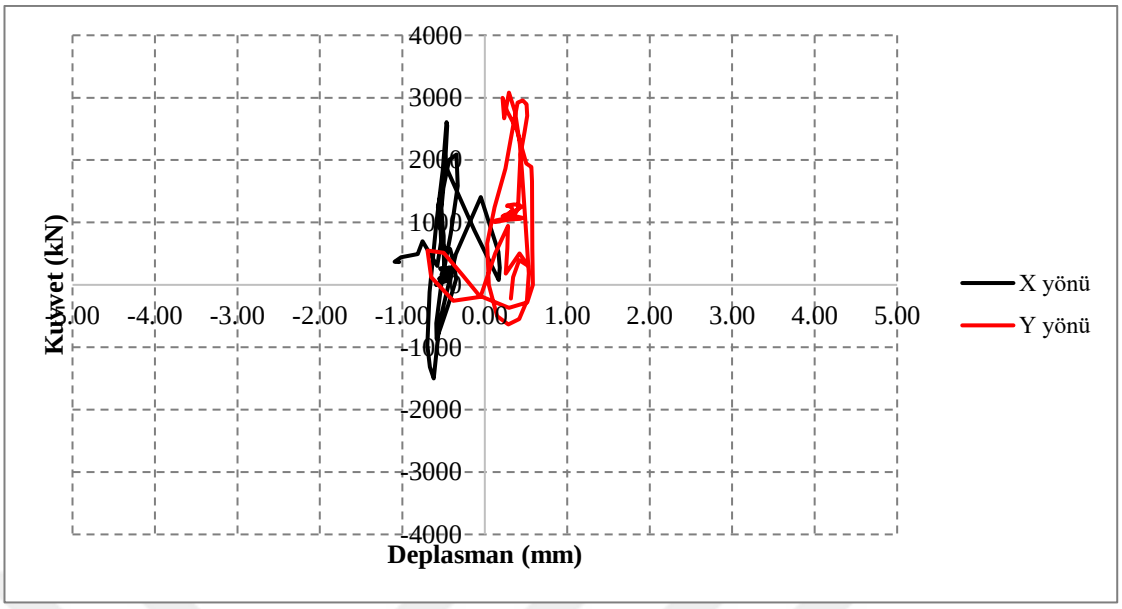


Şekil 8.14. Ulu Camii batı duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi.

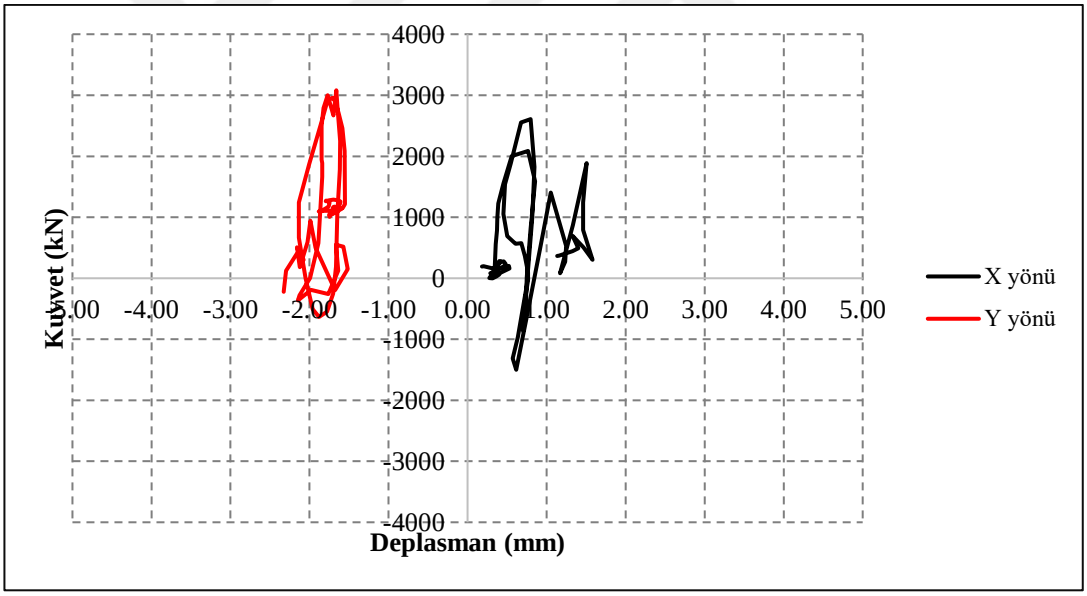
Duvar eğrileri oluşturulduktan sonra caminin köşe noktalarının taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Cami köşe noktalarına denk gelen düğüm noktalarından değerler alınarak eğriler oluşturulmuştur. Şekil 8.15.'te güneybatı köşesi, Şekil 8.16.'da güneydoğu köşesi, Şekil 8.17.'de kuzeybatı köşesi ve Şekil 8.18.'de kuzeydoğu köşesi için taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri oluşturulmuştur.



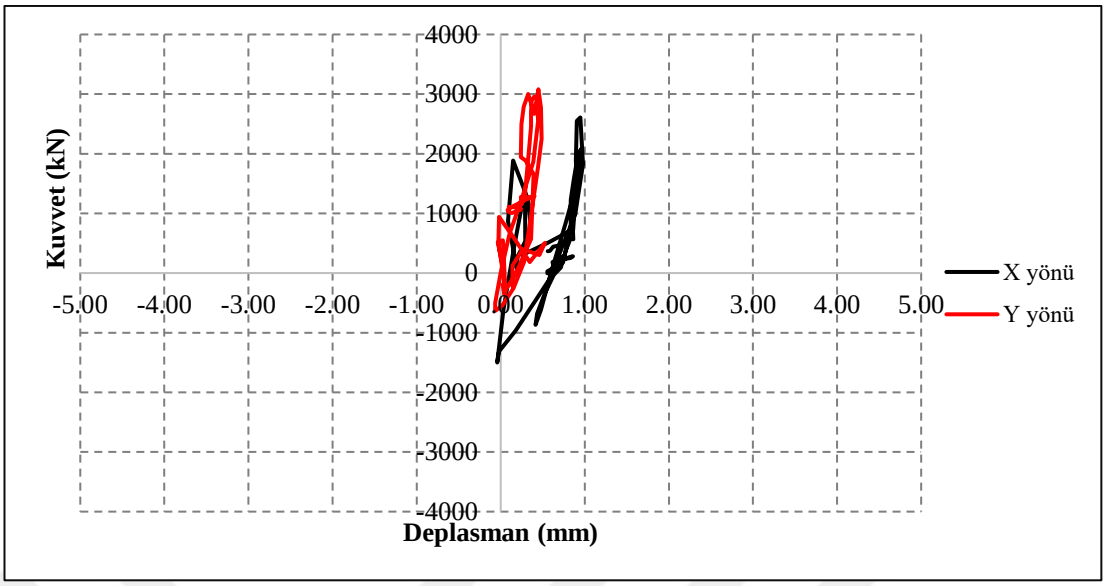
Şekil 8.15. Ulu Camii güneybatı duvar köşesinde yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.16. Ulu Camii güneydoğu duvar köşesinde yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.17. Ulu Camii kuzeybatı duvar köşesinde yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

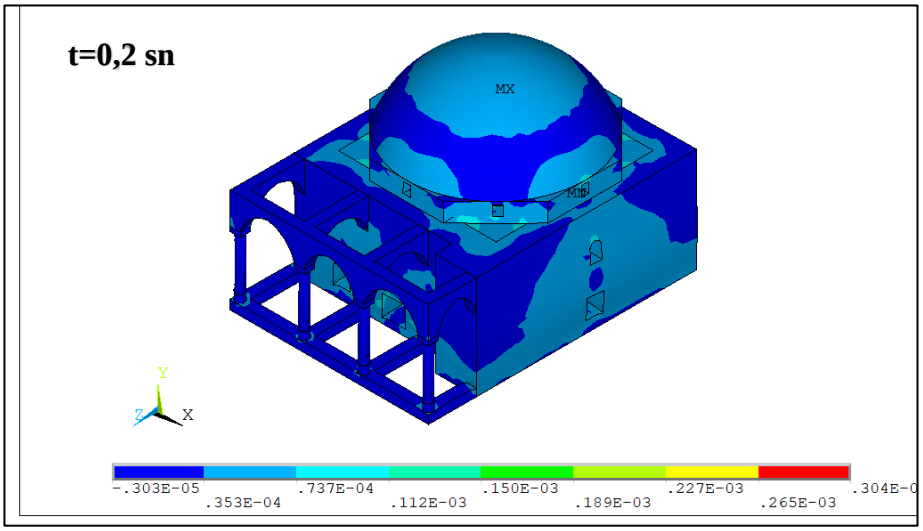


Şekil 8.18. Ulu Camii kuzeydoğu duvar köşesinde yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

Ulu Camii analiz sonuçları incelendiğinde, 1859 depremi ile ilgili var olan hasar kaydının doğrulanması sonucu üretilen ivme kaydının, hasar tespitini yansıtacak şekilde olduğu doğrulanmıştır. Konyalı (1960) ve Yurttaş (2001) çalışmalarında Ulu Camii'nin 2 Haziran 1859 depreminde hasar aldığı belirtilmiştir. Depremde Ulu Camii'nin hasar aldığını belirten arşiv kayıtları ve caminin doğu duvarı üzerinde bulunan tamirat kitabesi, hasar kaydının kanıtlarıdır. 1,96 saniyede Ulu Camii kubbelerinin sağ ve sol akslarındaki tonoz ve kemerlerinden göçme yaşanmıştır. Caminin analiz sonucunda ulaştığı tepe noktası maksimum yanal deplasman değerleri x ve y doğrultuları için sırasıyla 115 mm ve 206 mm'dir. TYİDRYK 2017'ye göre hesaplanan kat öteleme oranları sırasıyla %2,12 ve 2,28 dir. Cami kat öteleme oranlarına göre Göçmenin önlenmesi (GÖ) sınır değerini geçmiştir. Sonuç olarak, Ulu Camii'nin 2 Haziran 1859 depreminde aldığı hasar, depremin oluşturulan sentetik ivme kaydıyla gerçekleştirilen dinamik analiz sonucunda doğrulanmıştır. Bu kayıt, diğer cami analizleri için de bir referans deprem kaydı olarak tanımlanmıştır ve diğer camilerin dinamik analizleri bu kayda göre yapılmıştır.

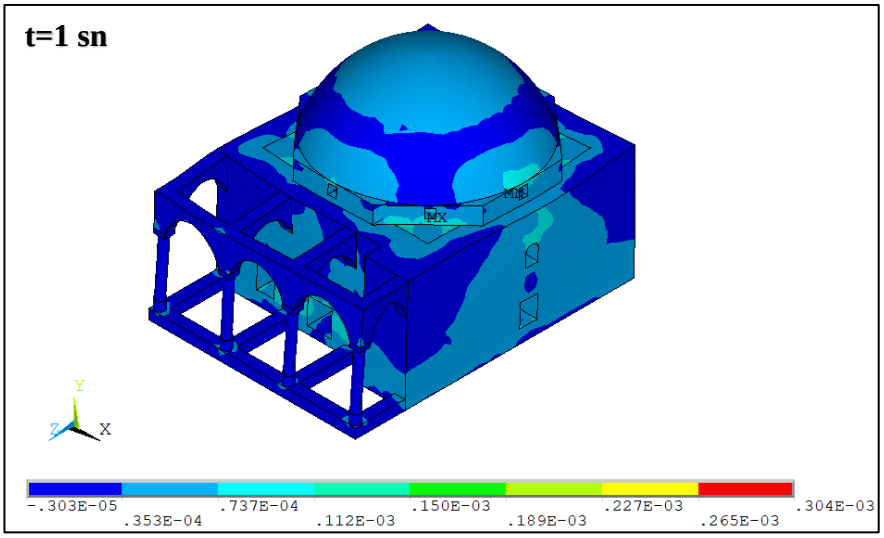
8.2.2. Pervizoğlu Camii dinamik analiz sonuçları

Ulu Camii'nin analizinin tamamlanmasının ardından Pervizoğlu Camii'nin dinamik analizine geçilmiştir. Pervizoğlu Camii'nin hasar mekanizmaları Şekil 8.19.'da gösterilmiştir. Caminin duvar yüksekliği 9.500 mm'dir. Caminin 0-5 saniye arasında analiz sonuçları ve yer değiştirmeleri incelenmiştir. Analiz sonucunda caminin tepe noktasındaki yer değiştirmeler x ve y doğrultusunda 0,70 mm'dir. TYİDYRK (2017)'de belirtilen yığma yapıların performans düzey limitlerine göre caminin kat yanal öteleme oranı %0,01 olarak değeri hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonucunda TYİDYRK (2017)'de belirtilen performans limitlerine göre cami Sınırlı hasar (SH) durumundadır ve yer hareketi süresi boyunca bu sınırda kalmıştır. Bu hesaplama sonucunda, caminin yer değiştirmeleri yer hareketi süresi boyuncaya kadar kabul edilebilir seviyededir. Ayrıca, caminin taşıyıcı duvarlarında ve kubbesinde camide göçmeye neden olabilecek herhangi bir ciddi hasara analiz sonucunda rastlanılamamıştır. Bu elemanlarda hasar küçük ve kılcal seviyede çatlaklardır. Şekil 8.20.'de caminin tam orta noktasına denk gelen kubbe tepe noktasındaki X ve Y doğrultusundaki deplasmanlarından faydalanarak caminin taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi çizilmiştir.

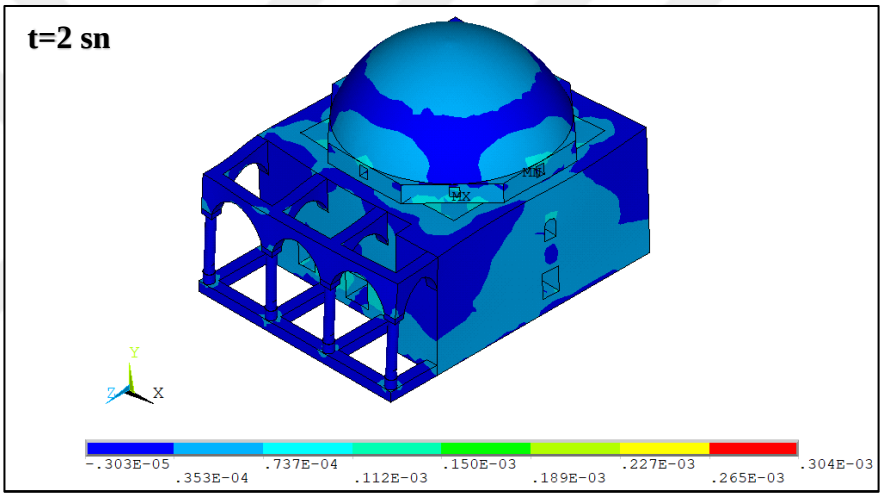


(a)

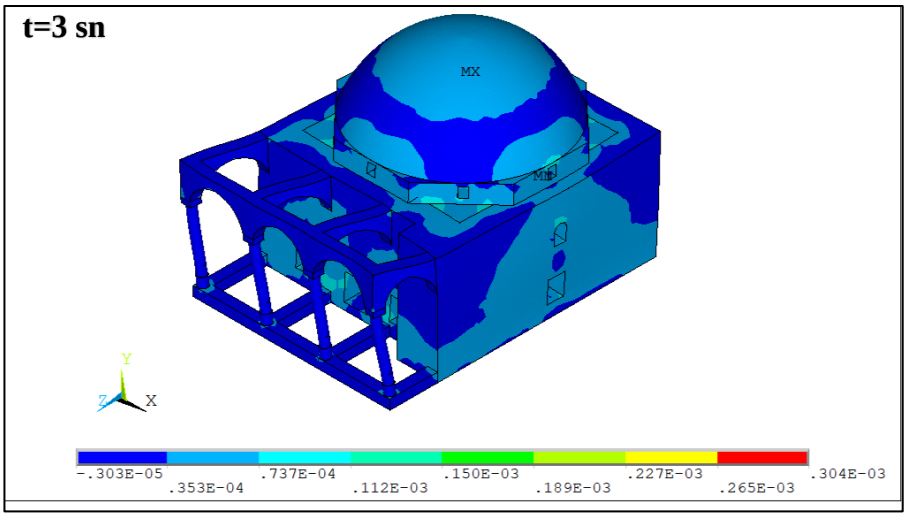
Şekil 8.19. Pervizoğlu Camii hasar mekanizması (a) (b) (c) (d) (e) (f)



(b)

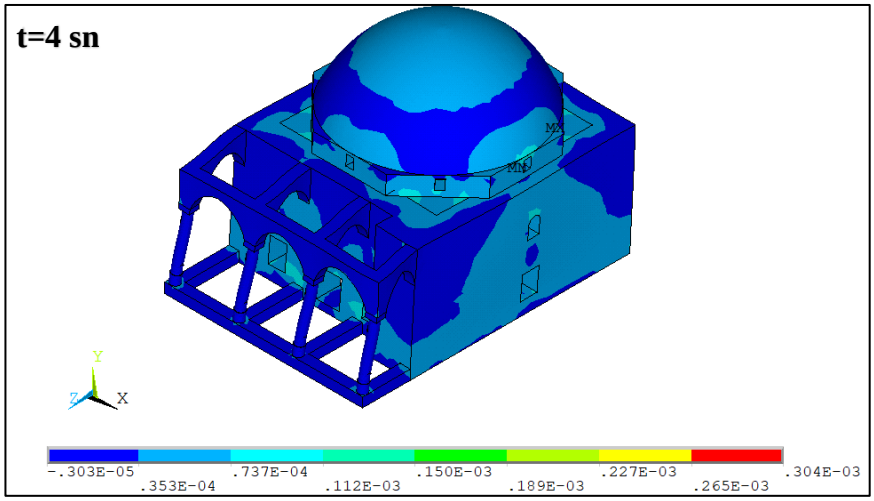


(c)

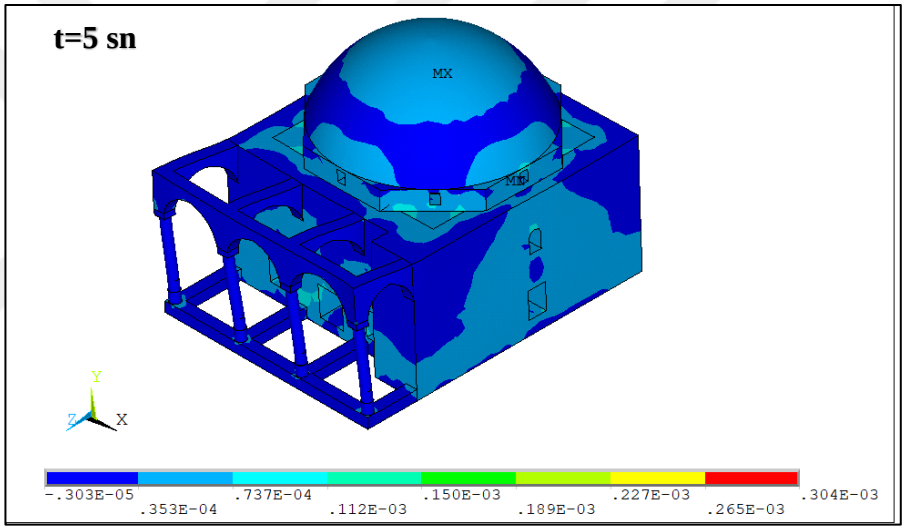


(d)

Şekil 8.19. (devam)

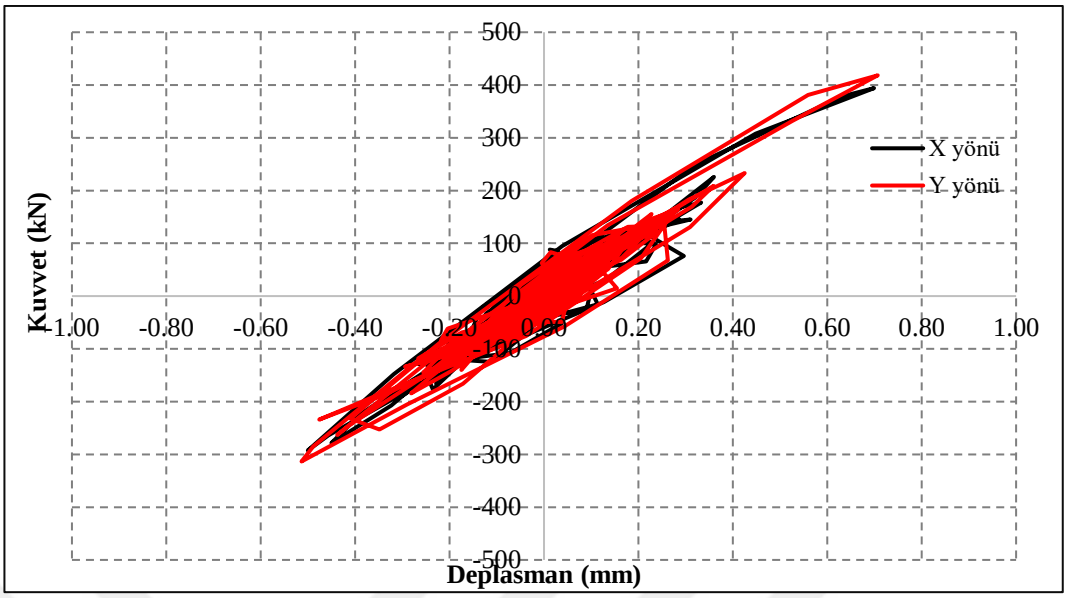


(e)



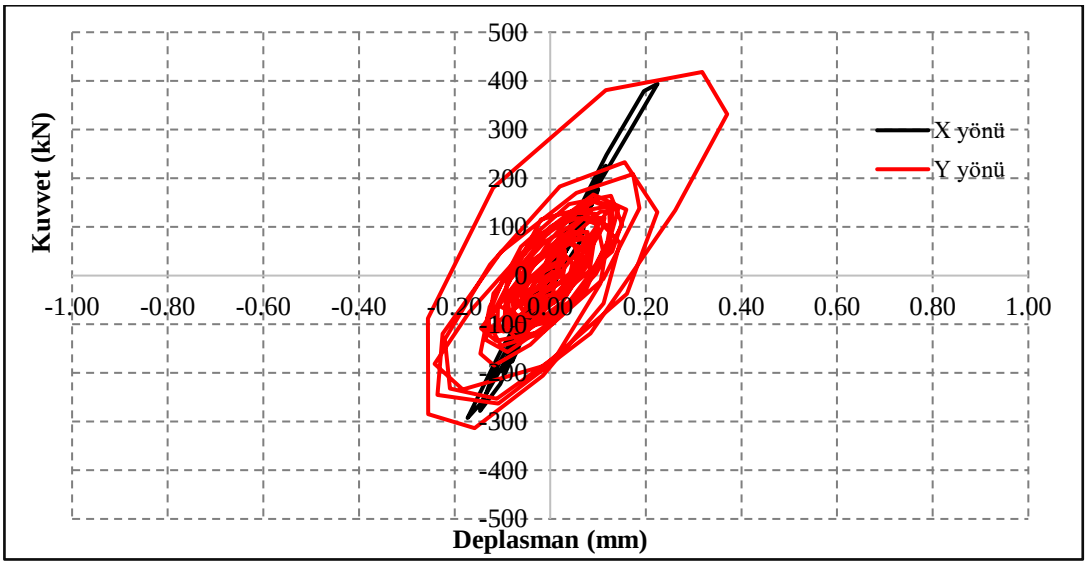
(f)

Şekil 8.19. (devam)

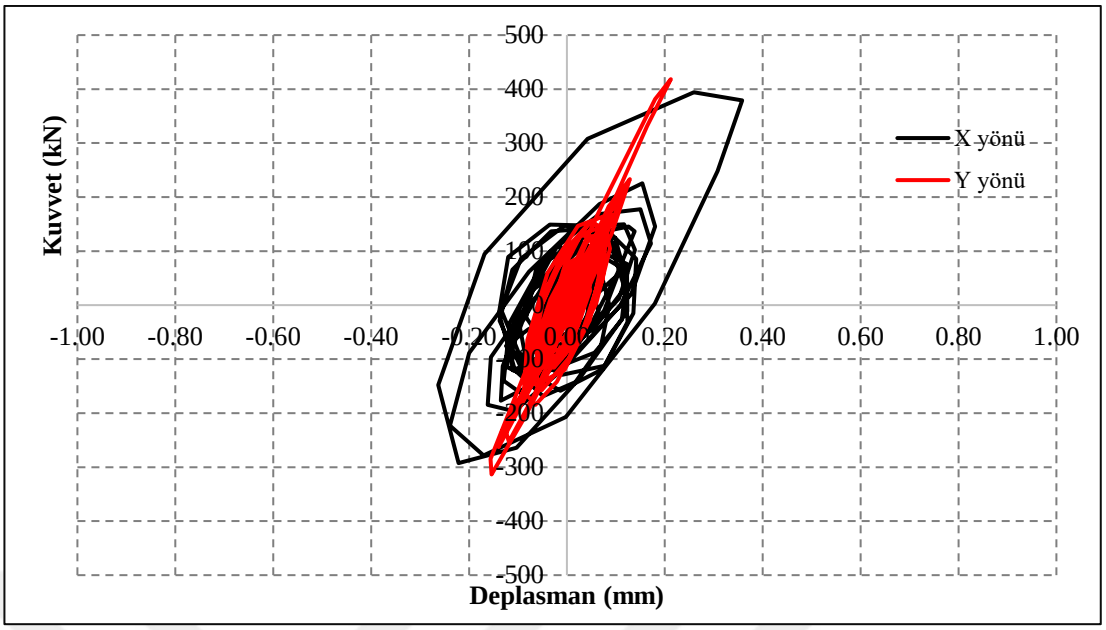


Şekil 8.20. Pervizoğlu Camii 1859 depremi ivme kaydı ile elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi.

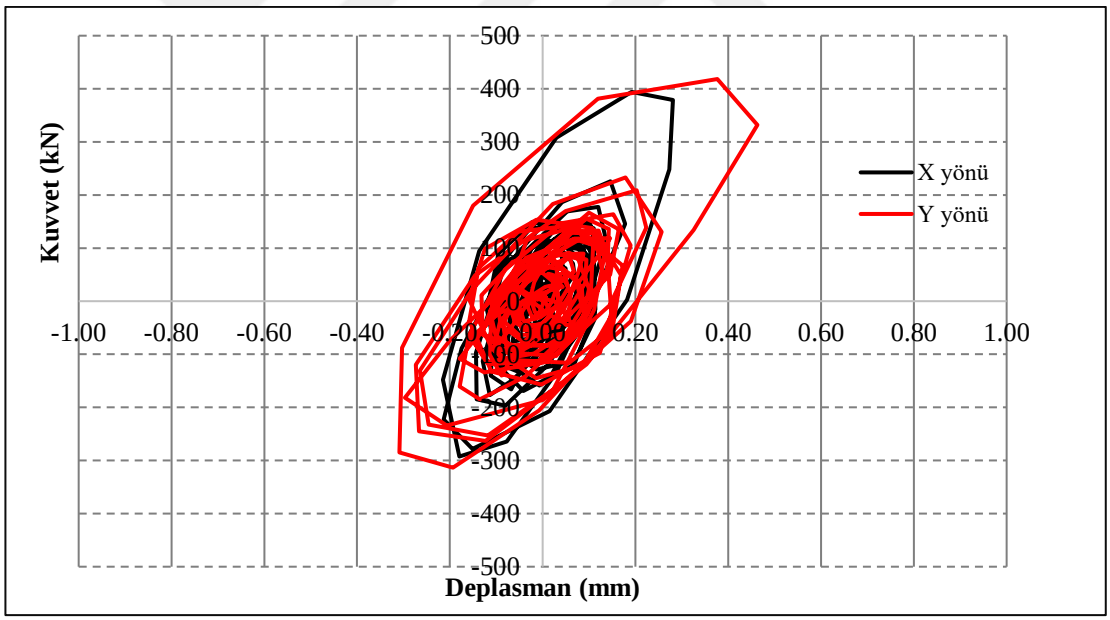
Şekil 8.20.'de caminin kubbesinin tepe noktasındaki taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizildikten sonra yapının duvar köşeleri ve duvar ortalarının taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Bu eğriler çizilirken, dört duvar köşeleri ve duvarların orta üst düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler elde edilmiştir. Bu yer değiştirmeler ile taban kesme kuvvetleri kullanılarak eğriler oluşturulmuştur. Şekil 8.21.'de güney duvar, Şekil 8.22.'de doğu duvar, Şekil 8.23.'te kuzey duvar ve Şekil 8.24.'te batı duvar için taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir.



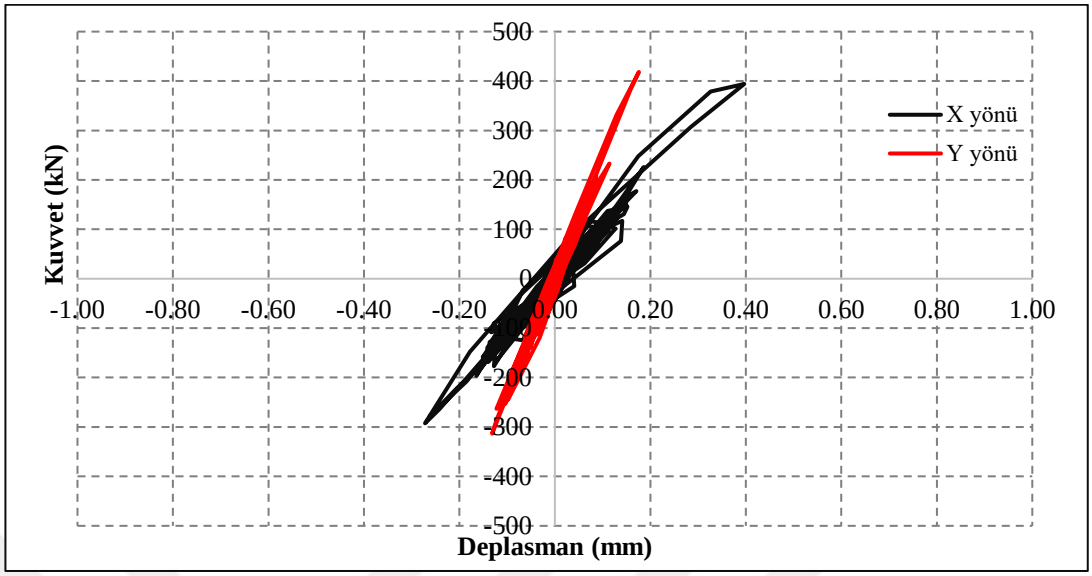
Şekil 8.21. Pervizoğlu Camii güney duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.22. Pervizoğlu Camii doğu duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

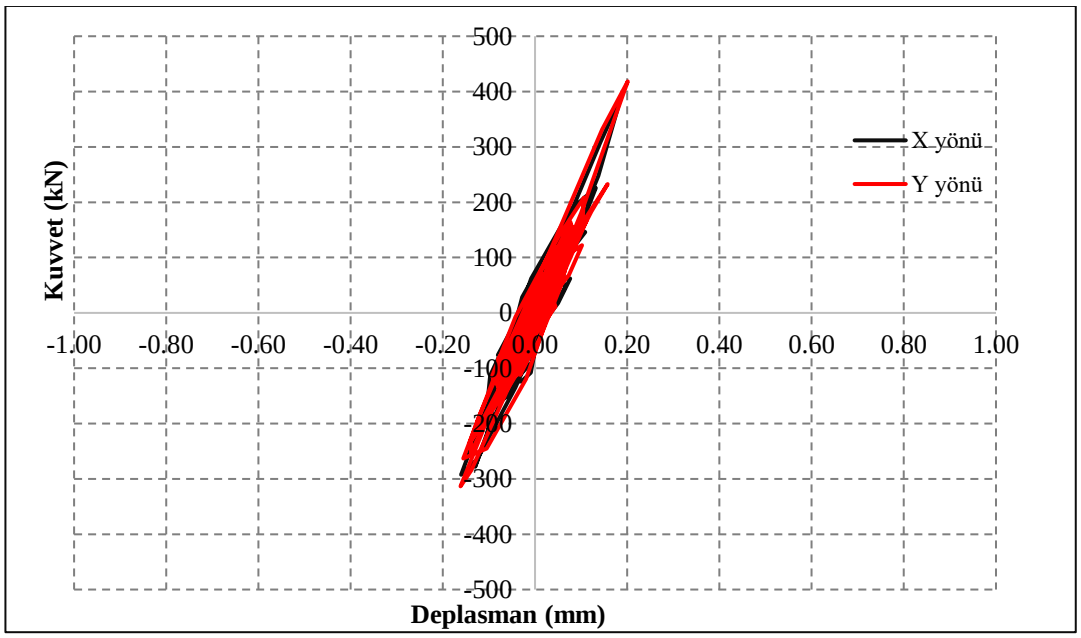


Şekil 8.23. Pervizoğlu Camii kuzey duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

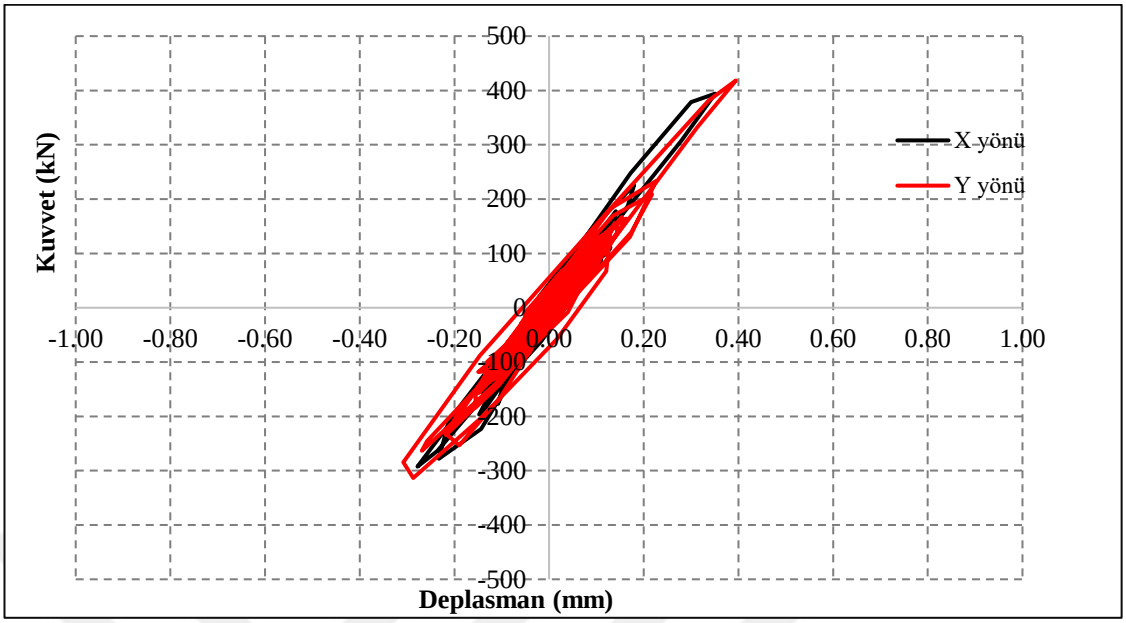


Şekil 8.24. Pervizoğlu Camii batı duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

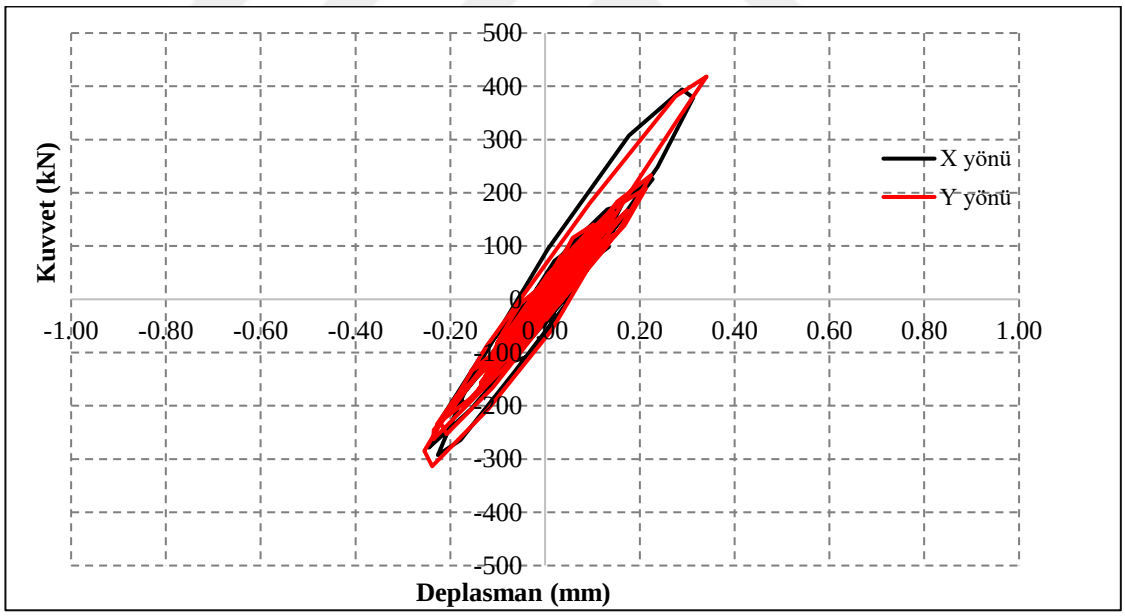
Duvar eğrileri oluşturulduktan sonra caminin köşe noktalarının taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Cami köşe noktalarına denk gelen düğüm noktalarından değerler alınarak eğriler oluşturulmuştur. Şekil 8.25.'te güneybatı köşesi, Şekil 8.26.'da güneydoğu köşesi, Şekil 8.27.'de kuzeybatı köşesi ve Şekil 8.28.'de kuzeydoğu köşesi için taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri oluşturulmuştur.



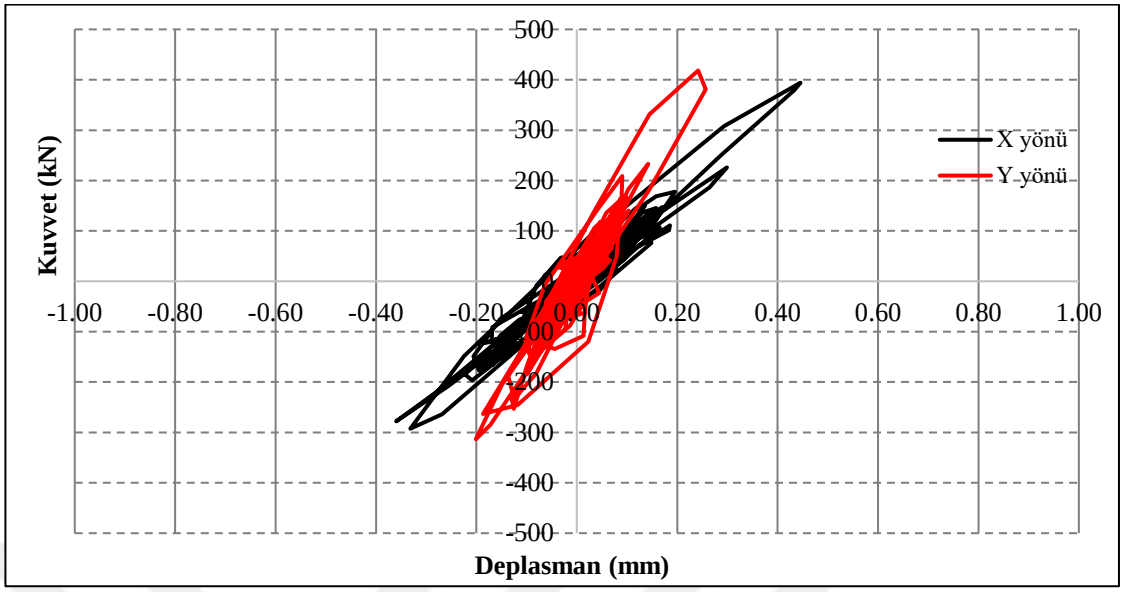
Şekil 8.25. Pervizoğlu Camii güneybatı duvar köşesinde yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.26. Pervizoğlu Camii güneybatı duvar köşesinde yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.27. Pervizoğlu Camii kuzeydoğu duvar köşesinde yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

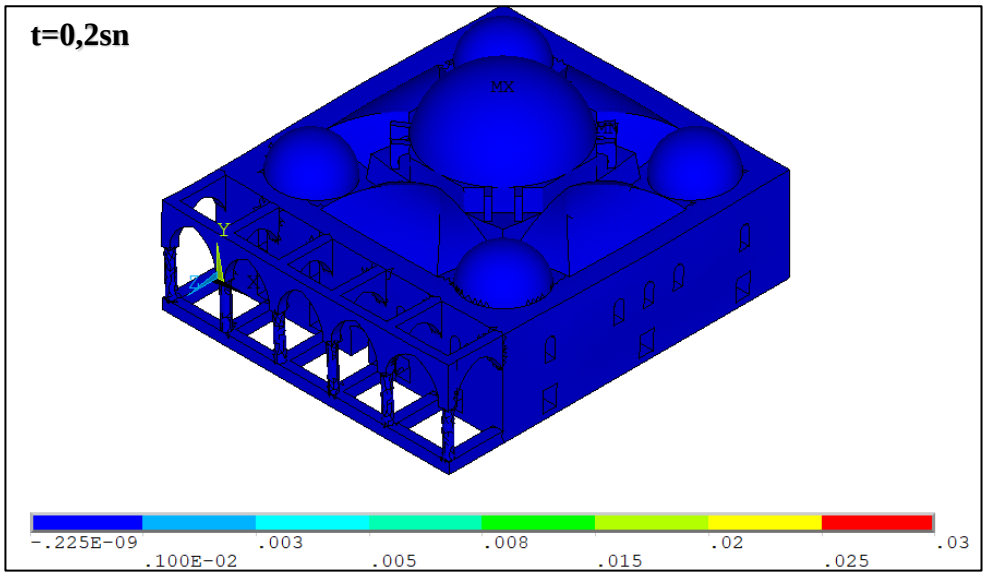


Şekil 8.28. Pervizoğlu Camii kuzeybatı duvar köşesinde yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

Pervizoğlu Camii analiz sonuçları incelendiğinde, 2 Haziran 1859 depremi ile ilgili var olan hasar kaydının doğrulanması sonucu üretilen ivme kaydının, camideki hasar tespitini tam olarak yansıtmadığı görülmüştür. Taşkesenlioğlu ve Taşkesenligil (2020) çalışmalarında, 1859 depremi sırasında Erzurum'da bulunan Alman jeolog Abich'in raporuna dayanarak Pervizoğlu Camii'nin depremde yarı yarıya hasar aldığını ve kubbesinin hareket ettiğini belirtmişlerdir. Bu hasar kaydının Osmanlı arşiv kayıtlarında da doğrulandığı ifade edilmiştir. Bu analiz sonucunda, cami taşıyıcı duvarlarında ve cami köşelerindeki yer değiştirmelerin 1 mm'nin altında olduğu ve cami duvarının hasar durumlarının kılcal durumda olduğuna ulaşılmıştır. TYİDYRK (2017)'de belirtilen yığma yapıların performans düzey limitlerine göre cami, Sınırlı hasar (SH) durumundadır ve yer hareketi boyunca bu sınırda kalmıştır. Kuvvet kapasitesinin ise -300 kN ile 500 kN arasında olduğu ve bu kapasitenin hasar alan Ulu Camii'nin kuvvet kapasitesinin çok altında olduğu görülmüştür. Caminin 1859 depreminde hasar almış olduğu kayıtlarda geçmesine rağmen, deprem kaydında kısmi bir hasar alması durumu için çalışmada çeşitli teoriler düşünülmüştür. Caminin dinamik davranış parametreleri modelde doğru bir şekilde tanıtıldığından, modellemede herhangi bir sorun olduğu ihtimali zayıftır. 1843 ve 1852 depremlerinde cami yapısal olarak büyük bir hasar görmemesine rağmen, caminin dayanım kapasitesinin azalmış olabileceği; bu yapısal azalmanın da 2 Haziran 1859 depreminde caminin hasar almasına neden olduğu yorumu yapılabilmektedir.

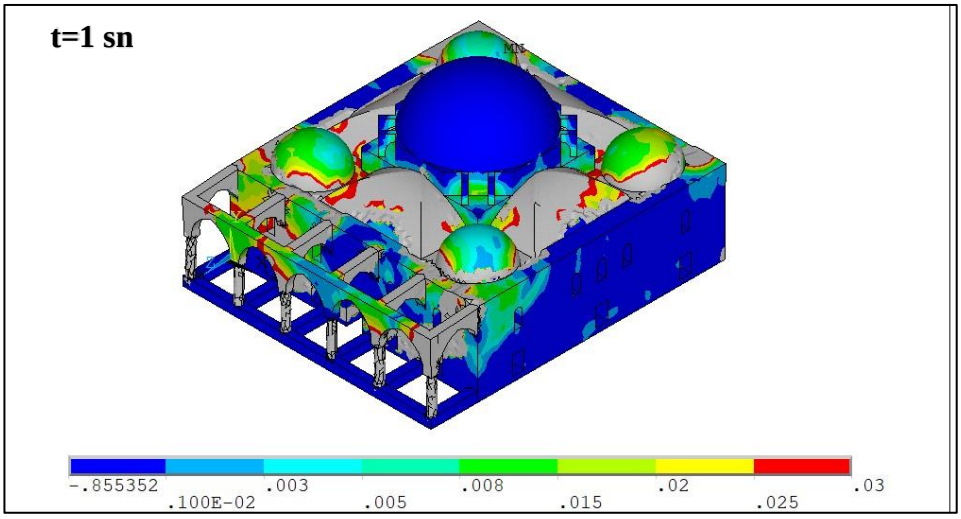
8.2.3. Lala Mustafa Paşa Camii dinamik analiz sonuçları

Pervizoğlu Camii'nin analizinin tamamlanmasının ardından Lala Mustafa Paşa Camii'nin dinamik analizine geçilmiştir. Lala Mustafa Paşa Camii'nin hasar mekanizması Şekil 8.29.'da gösterilmiştir. Caminin 0-5 saniye arasında analiz sonuçları ve yer değiştirmeleri incelenmiştir. Caminin duvar yüksekliği 7.400 mm'dir. Sonuçlar incelendiğinde caminin yer değiştirmeleri yer hareketi boyunca çok yüksektir. Caminin x ve y doğrultusunda kubbe tepe noktası yanal deplasmanları sırasıyla 108 mm ve 206 mm olarak elde edilmiştir. TYİDYRK (2017)'de belirtilen yığma yapıların performans düzey limitlerine göre caminin kat yanal öteleme oranları %1,45 ve %2,7 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda TYİDYRK (2017)'de belirtilen performans limitlerine göre cami göçmenin önlenmesi (GÖ) sınır limiti değerini geçmiştir ve cami göçmüştür. Caminin taşıyıcı duvarlarında ve kubbesinde camide göçmeye neden olacak büyük hasarlar mevcuttur. Şekil 8.30.'da caminin tam orta noktasına denk gelen kubbe tepe noktası seçilerek bu noktanın X ve Y doğrultusundaki deplasmanlardan faydalanarak caminin taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi çizilmiştir.

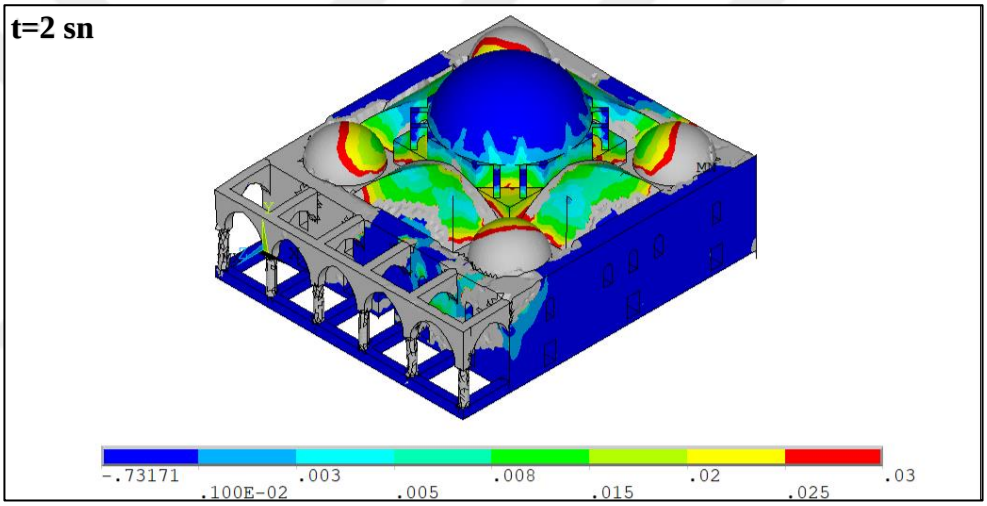


(a)

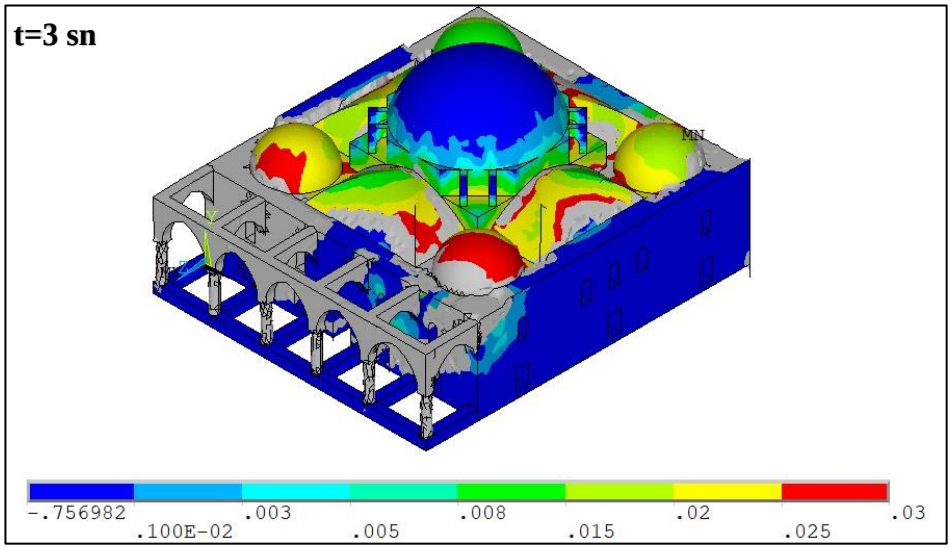
Şekil 8.29. Lala Mustafa Paşa Camii hasar mekanizması (a) (b) (c) (d) (e) (f)



(b)

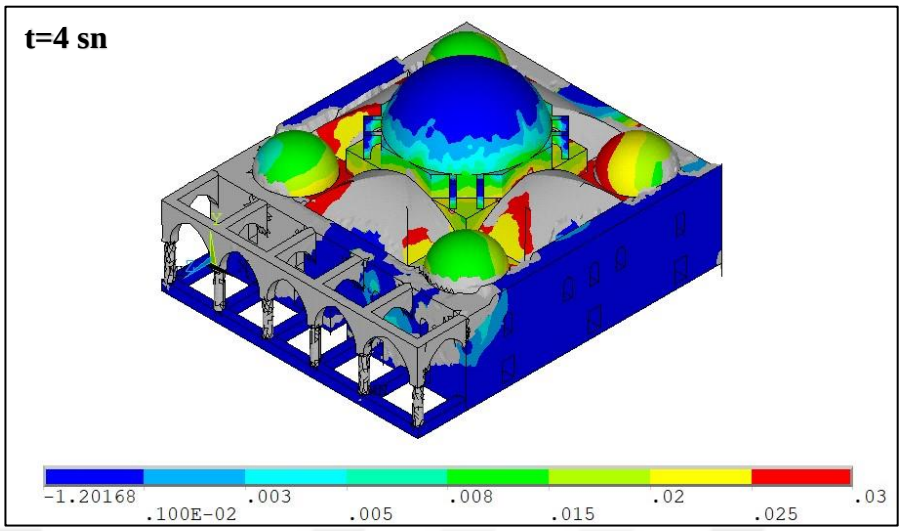


(c)

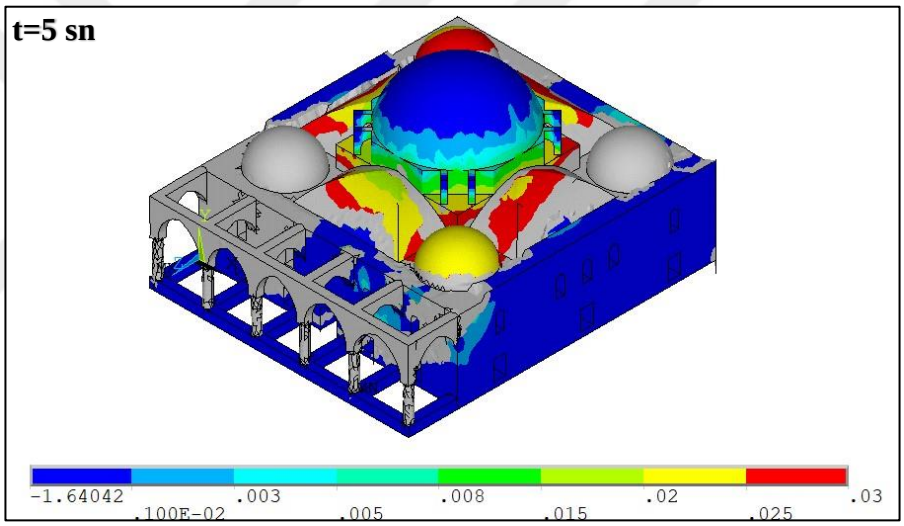


(d)

Şekil 8.29. (devam)

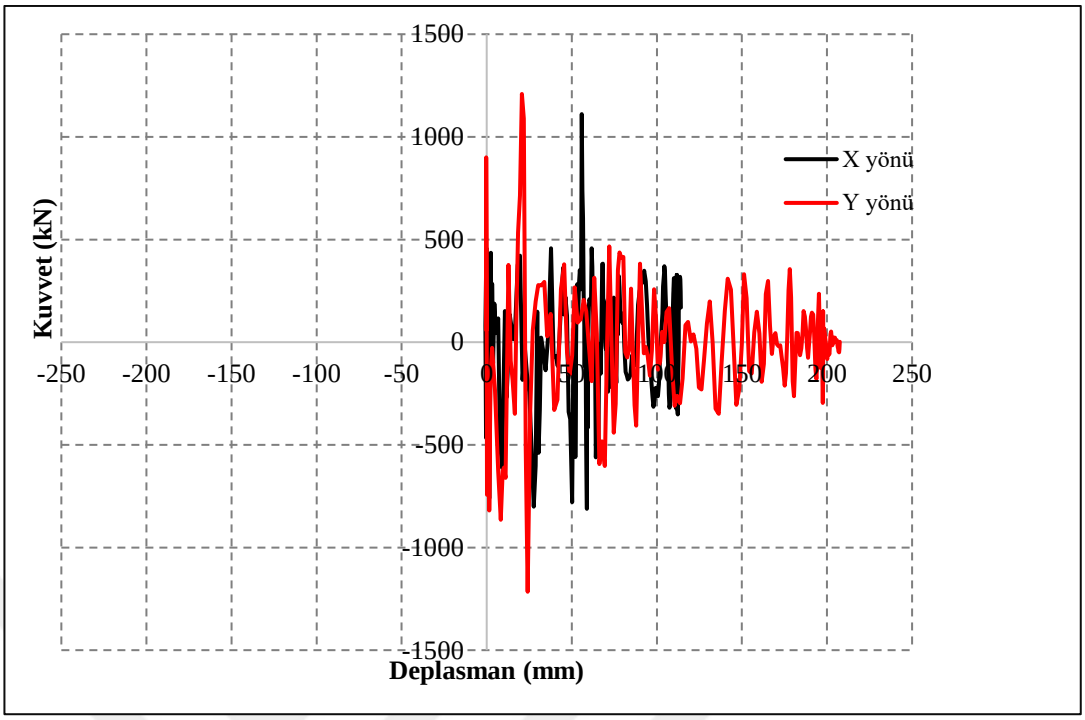


(e)



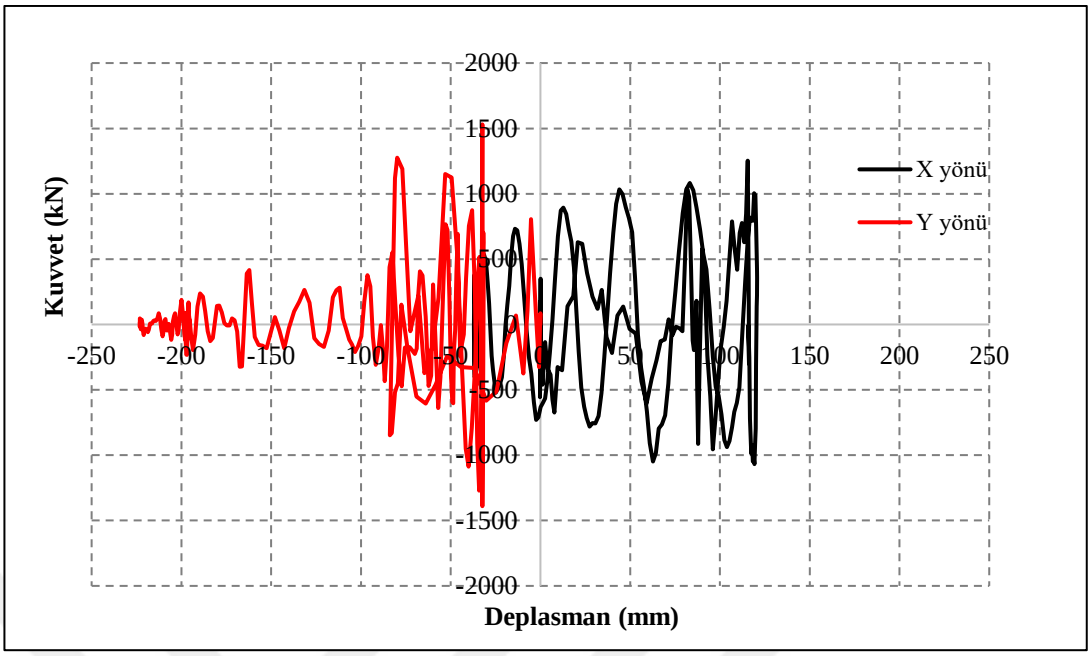
(f)

Şekil 8.29. (devam)

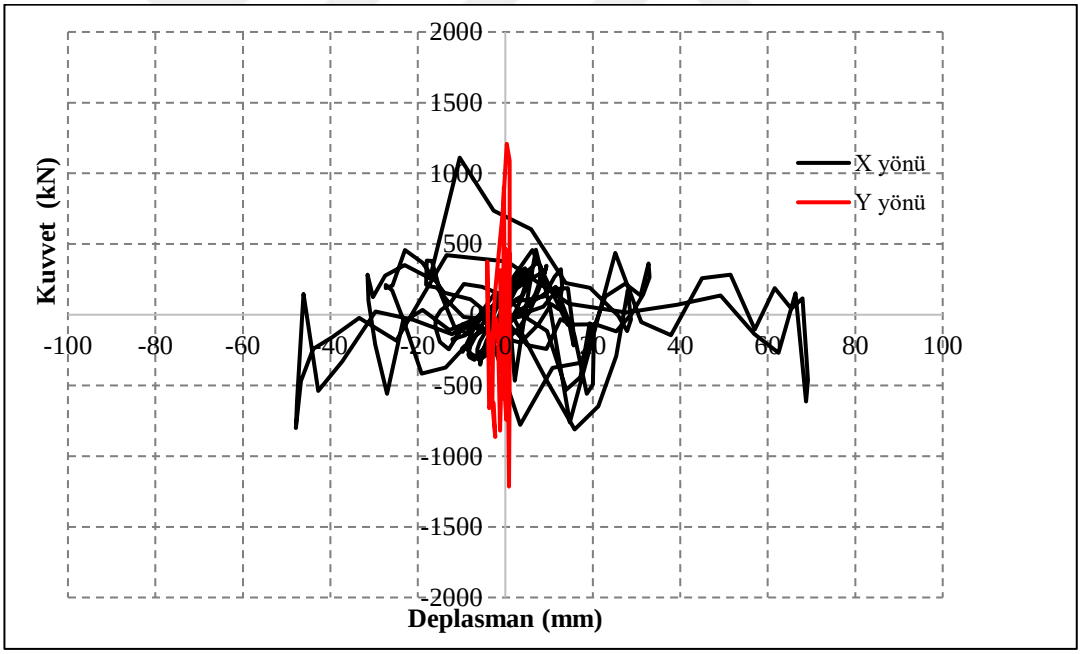


Şekil 8.30. Lala Mustafa Paşa Cami ile 1859 depremi ivme kaydı ile elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi.

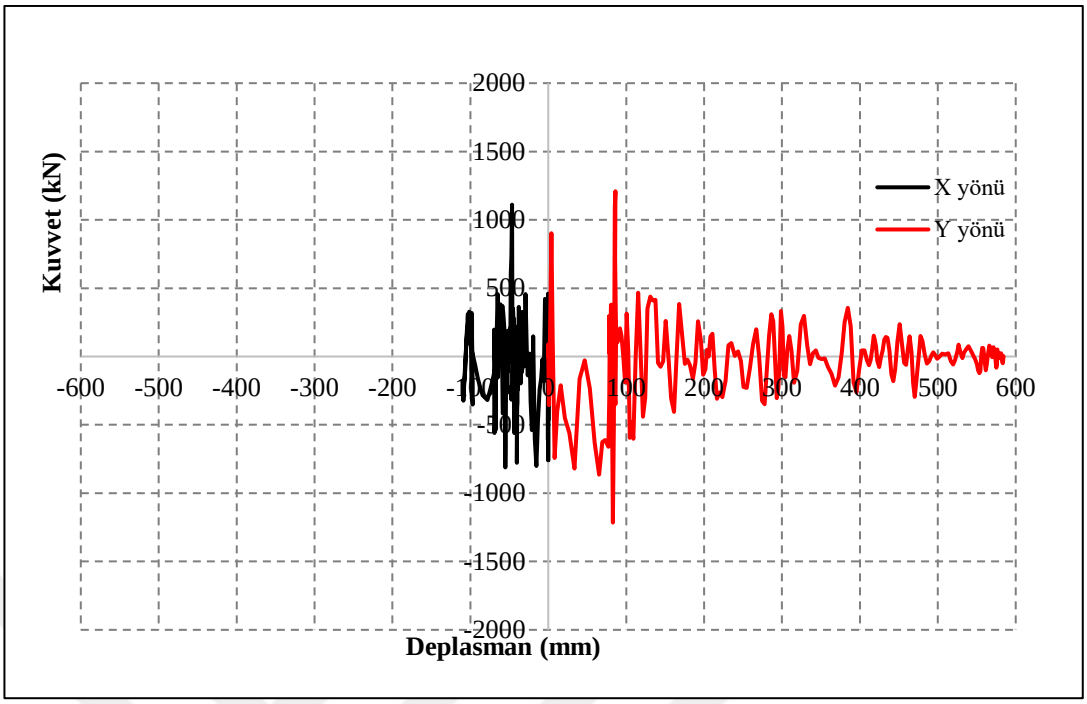
Şekil 8.30.'da caminin kubbesinin tepe noktasındaki taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizildikten sonra camini duvar köşeleri ve duvar ortalarının taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Bu eğriler çizilirken dört duvar köşeleri ve duvarların orta üst düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler elde edilmiştir. Bu yer değiştirmeler ile taban kesme kuvvetleri kullanılarak eğriler oluşturulmuştur. Şekil 8.31.'de güney duvar, Şekil 8.32.'de doğu duvar, Şekil 8.33.'te kuzey duvar ve Şekil 8.34.'te batı duvar için taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir.



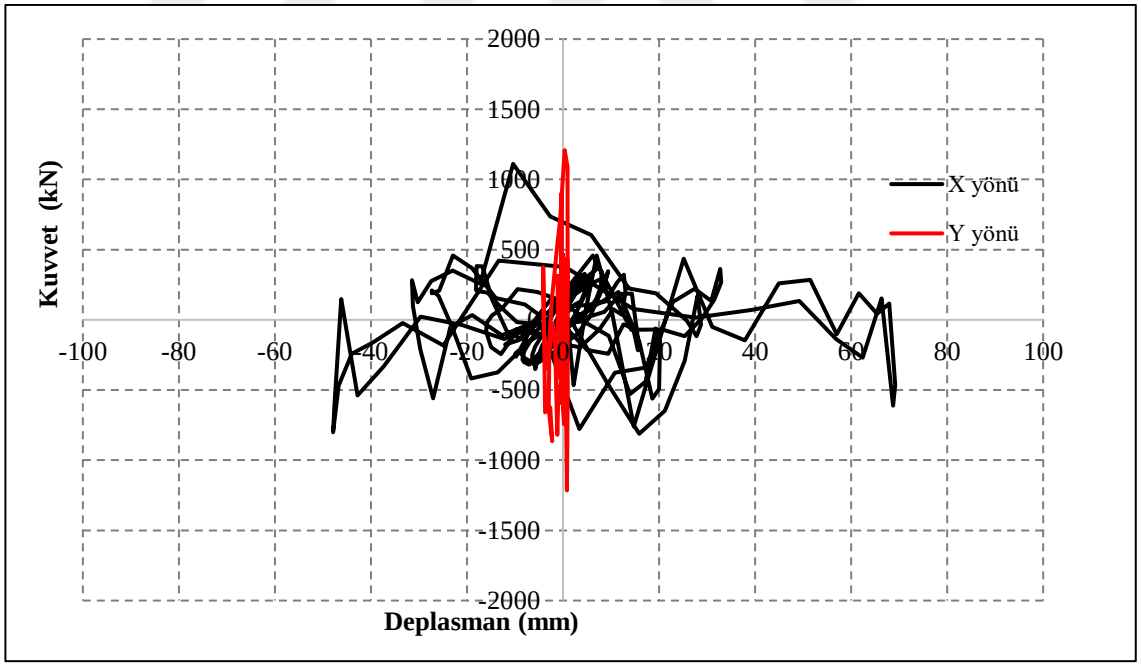
Şekil 8.31. Lala Mustafa Paşa Camii güney duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.32. Lala Mustafa Paşa Camii doğu duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



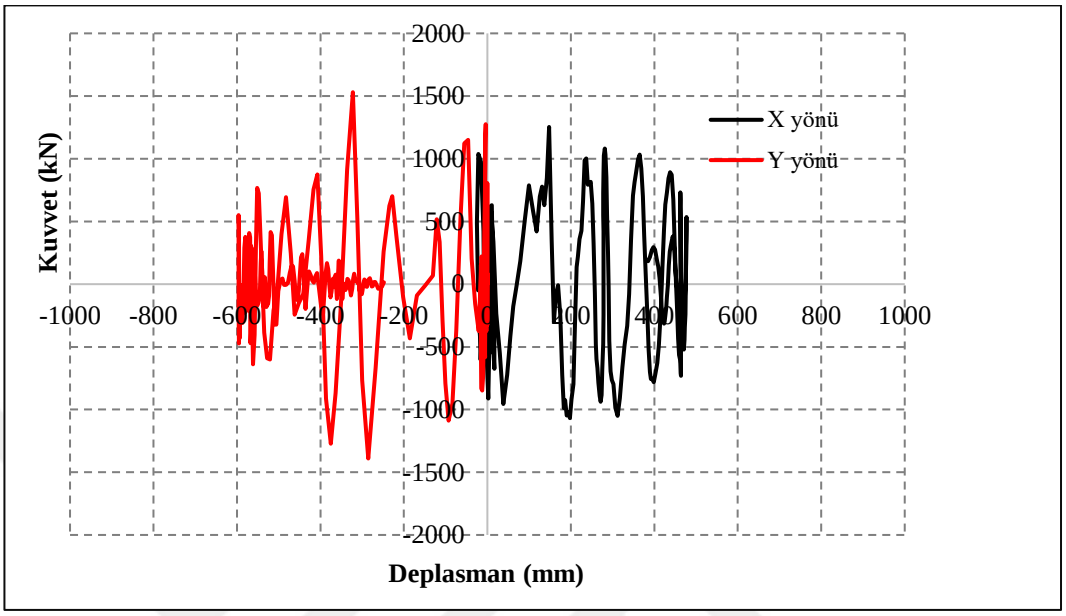
Şekil 8.33. Lala Mustafa Paşa Camii kuzey duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



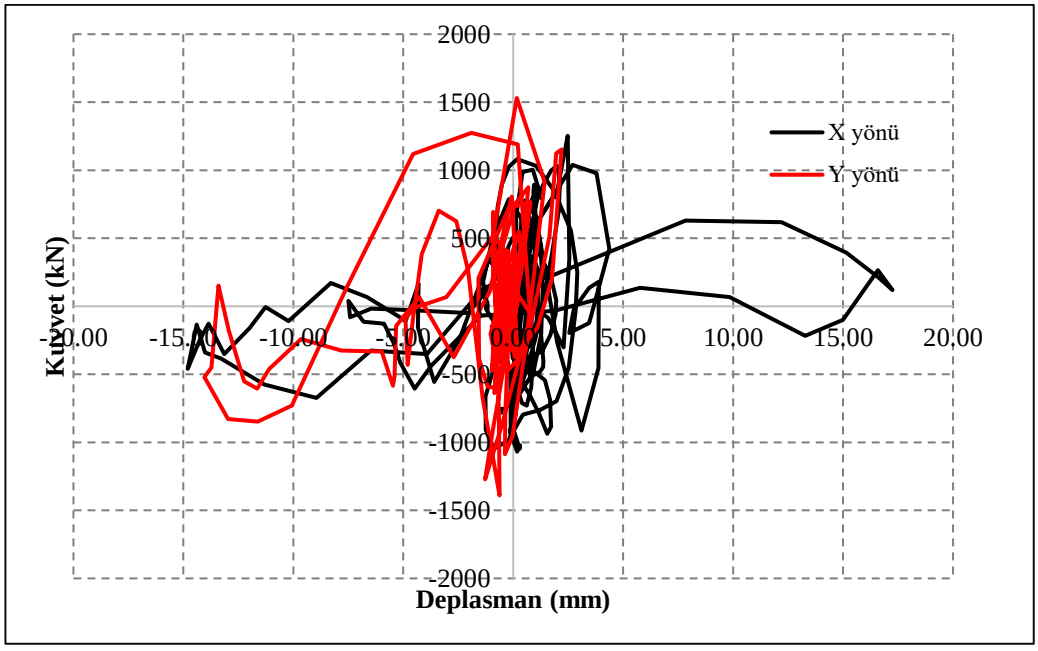
Şekil 8.34. Lala Mustafa Paşa Camii batı duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

Duvar eğrileri oluşturulduktan sonra caminin köşe noktalarının taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Cami köşe noktalarına denk gelen düğüm noktalarından değerler alınarak eğriler oluşturulmuştur. Şekil 8.35.'te güneybatı köşesi,

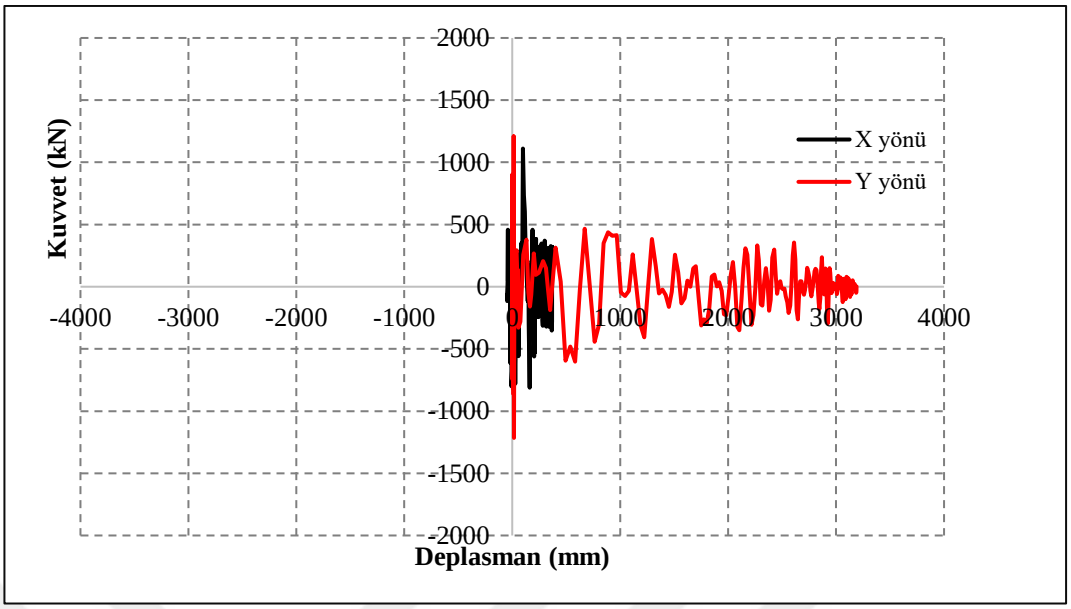
Şekil 8.36.'da güneydoğu köşesi , Şekil 8.37.'de kuzeybatı köşesi ve Şekil 8.38.'de kuzeydoğu köşesi için taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri oluşturulmuştur.



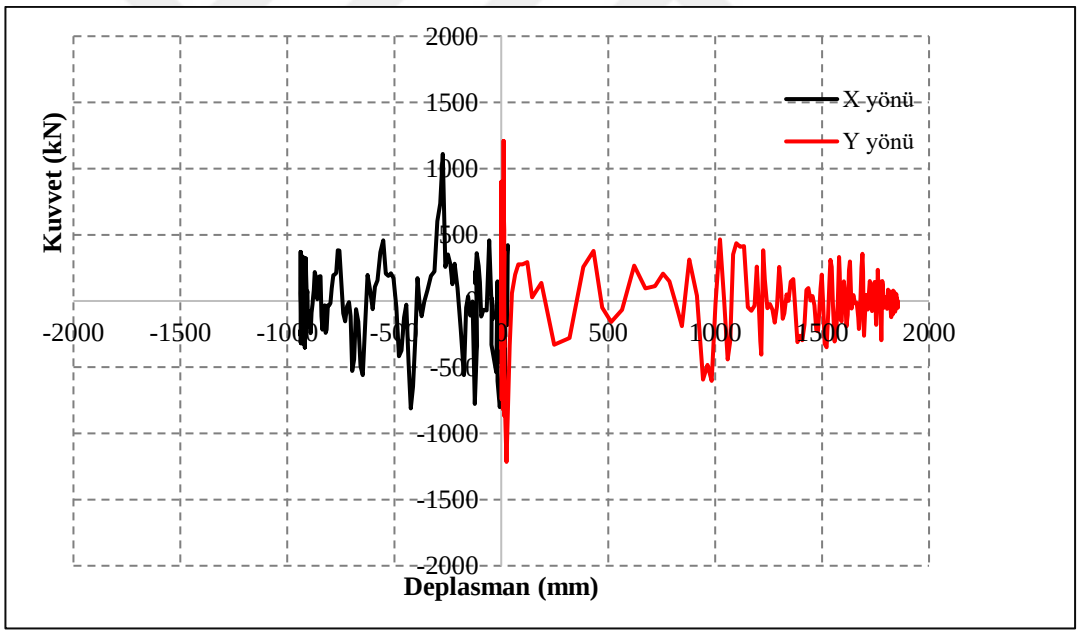
Şekil 8.35. Lala Mustafa Paşa Camii güneybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.36.. Lala Mustafa Paşa Camii güneydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.37. Lala Mustafa Paşa Camii kuzeydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



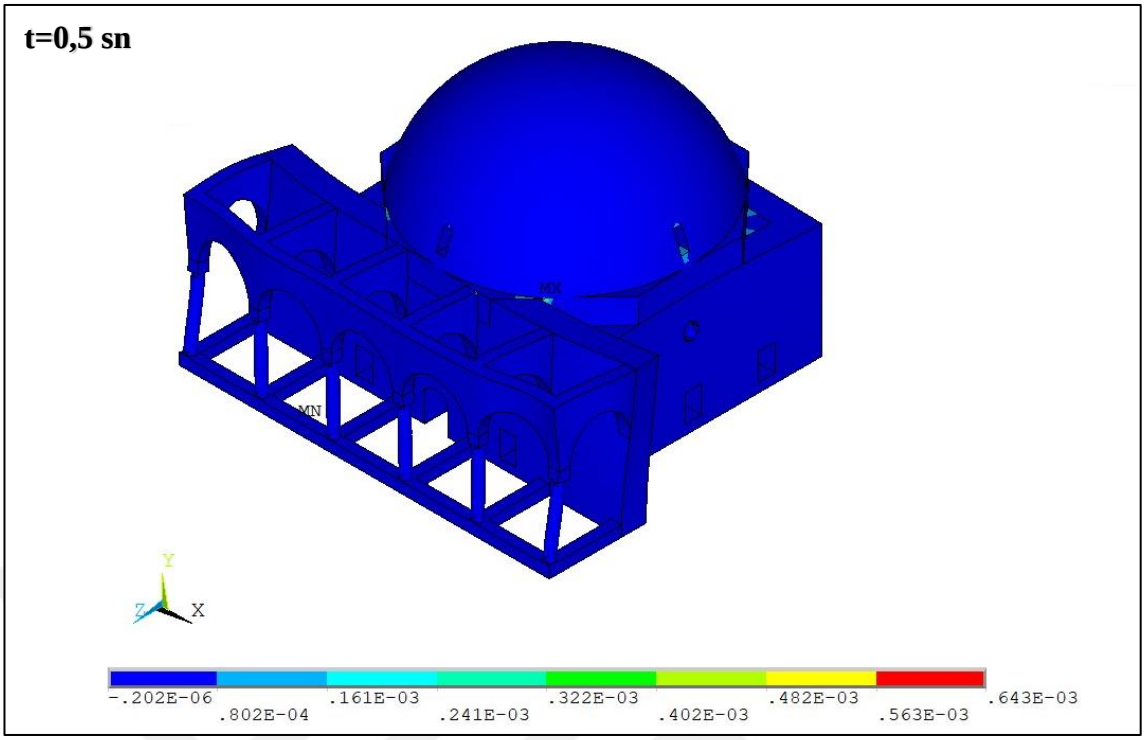
Şekil 8.38. Lala Mustafa Paşa Camii kuzeybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

Lala Mustafa Paşa Camii analiz sonuçları incelendiğinde, 2 Haziran 1859 depremi ile ilgili var olan hasar kaydının doğrulanması sonucu üretilen ivme kaydının camideki hasar tespitini yansıttığı görülmüştür. Caminin 2 Haziran 1859 depreminde ağır hasar aldığı ve harap durumda olduğu arşiv kayıtlarında geçmektedir. Bu analiz sonucunda cami kubbesinde, son cemaat yerinin duvarlarında ve cami köşelerindeki yer

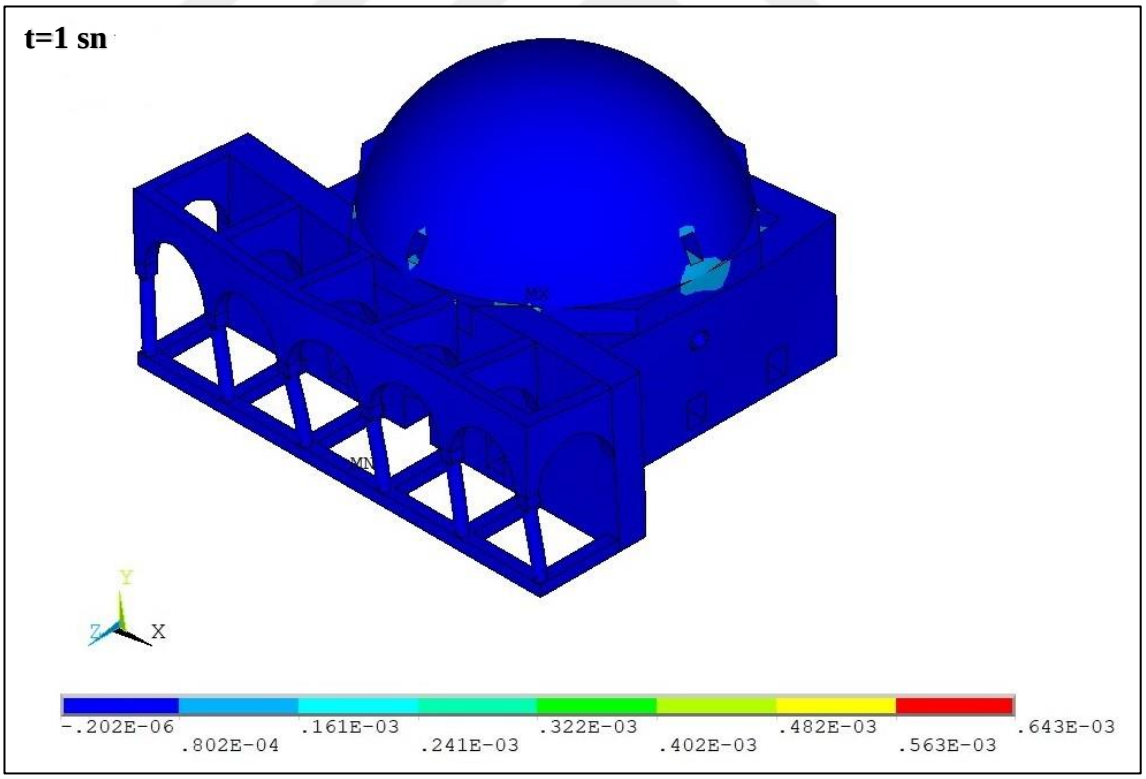
değiştirmelerin grafiklerde de incelendiği üzere oldukça büyük olduğu ve caminin bu büyük mertebe yer değiştirmelerde göçtüğü anlaşılmıştır. Bu durum TYDYRK (2017)'de belirtilen yığma yapıların performans düzey limit hesabıyla da doğrulanmıştır ve cami göçmenin önlenmesi (GÖ) sınır durumunu aşmıştır. Tozlu (2000), Lala Mustafa Paşa Camii'nin 1852 depreminde ağır hasar aldığını ve caminin yıkılma tehlikesi altında olduğunu ifade etmiştir. 1859 depreminde de Lala Mustafa Paşa Camii'nin harap hale gelmesinin, caminin 1852 depreminde aldığı hasara bağlı olabileceği yorumu yapılabilir. Kocaman vd (2018) çalışmalarında, Lala Mustafa Paşa Camii sonlu eleman modeline 1992 Erzincan depreminin kaydı uygulandığında, cami kubbesi ile son cemaat yerinde hasarların ve göçmelerin olduğu görülmüştür. Caminin 2 Haziran 1859 deprem kaydı uygulandığında da benzer yıkılma mekanizmasına sahip olduğu görülmüştür.

8.2.4. Muratpaşa Camii dinamik analiz sonuçları

Lala Mustafa Paşa Camii'nin analizinin tamamlanmasının ardından Muratpaşa Cami'nin dinamik analizine geçilmiştir. Muratpaşa Camii'nin hasar mekanizmaları Şekil 8.39.'da gösterilmiştir. Caminin 0-5 saniye arasında analiz sonuçları ve yer değiştirmeleri incelenmiştir. Caminin duvar yüksekliği 5.500 mm'dir. Camide hareket süresi boyunca kubbe tepe noktasındaki maksimum yanal yer değiştirmeler x ve y doğrultuları için 0,70 mm'dir. TYİDYRK (2017)'de belirtilen yığma yapıların performans düzey limitlerine göre caminin kat yanal öteleme oranı %0,18 değeri hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonucunda TYİDYRK (2017)'de belirtilen performans limitlerine göre cami Sınırlı hasar (SH) durumundadır ve yer hareketi boyunca bu sınırda kalmıştır. Bu hesaplama sonucunda, caminin yer değiştirmeleri yer hareketi süresi boyuncaya kadar kabul edilebilir seviyededir . Ayrıca caminin taşıyıcı duvarlarında ve kubbesinde kılcal seviyede çatlaklar mevcuttur. Şekil 8.39.'da caminin hasar mekanizması, Şekil 8.40'ta tam orta noktasına denk gelen kubbe tepe noktasındaki X ve Y doğrultusundaki deplasmanlardan faydalanarak caminin taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi gösterilmiştir.

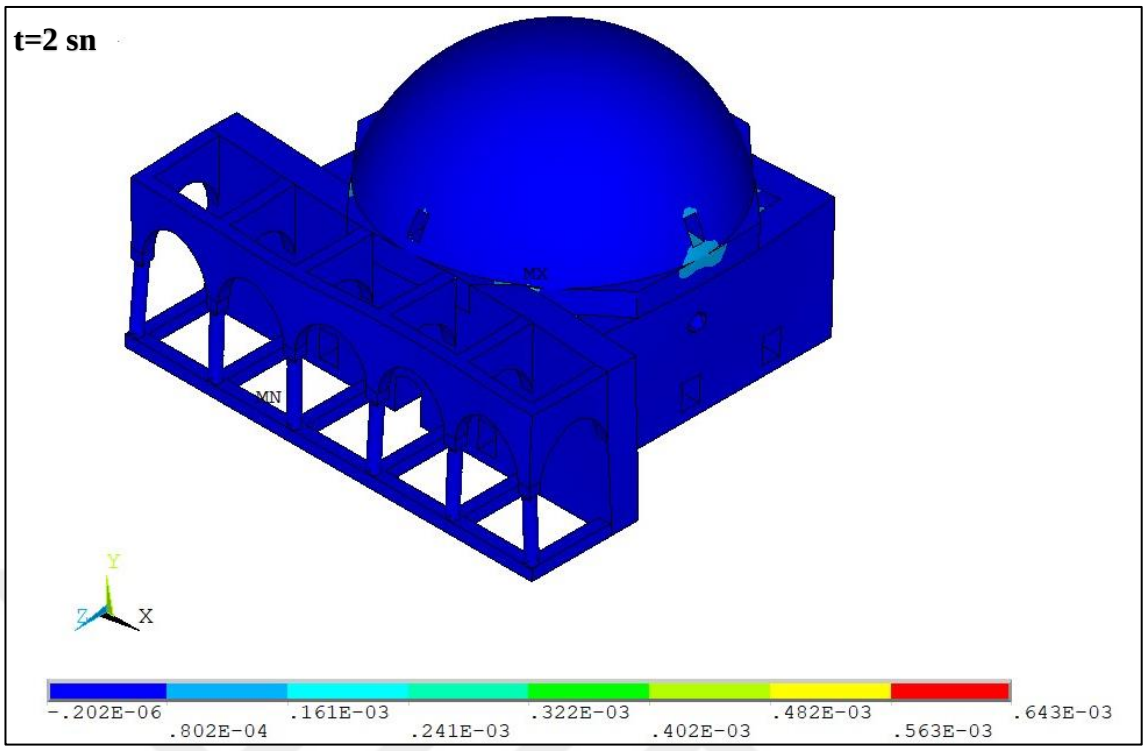


(a)

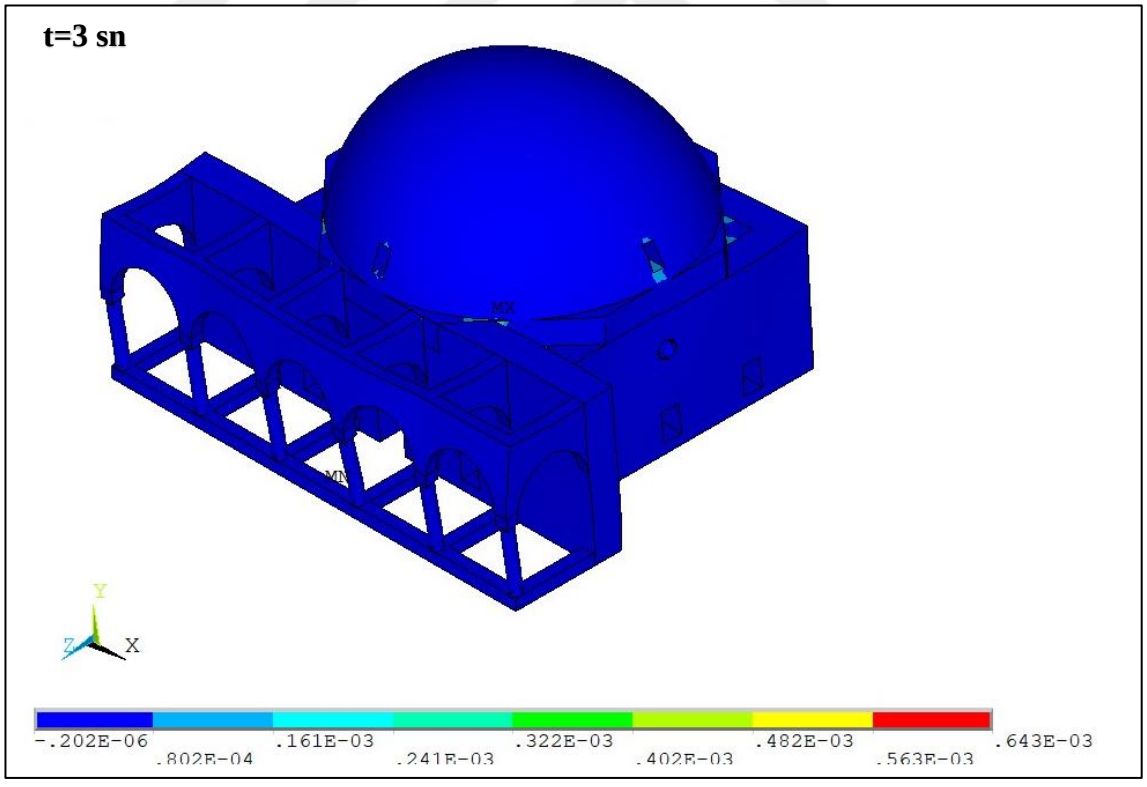


(b)

Şekil 8.39. Muratpaşa Camii hasar mekanizması (a) (b) (c) (d) (e) (f)

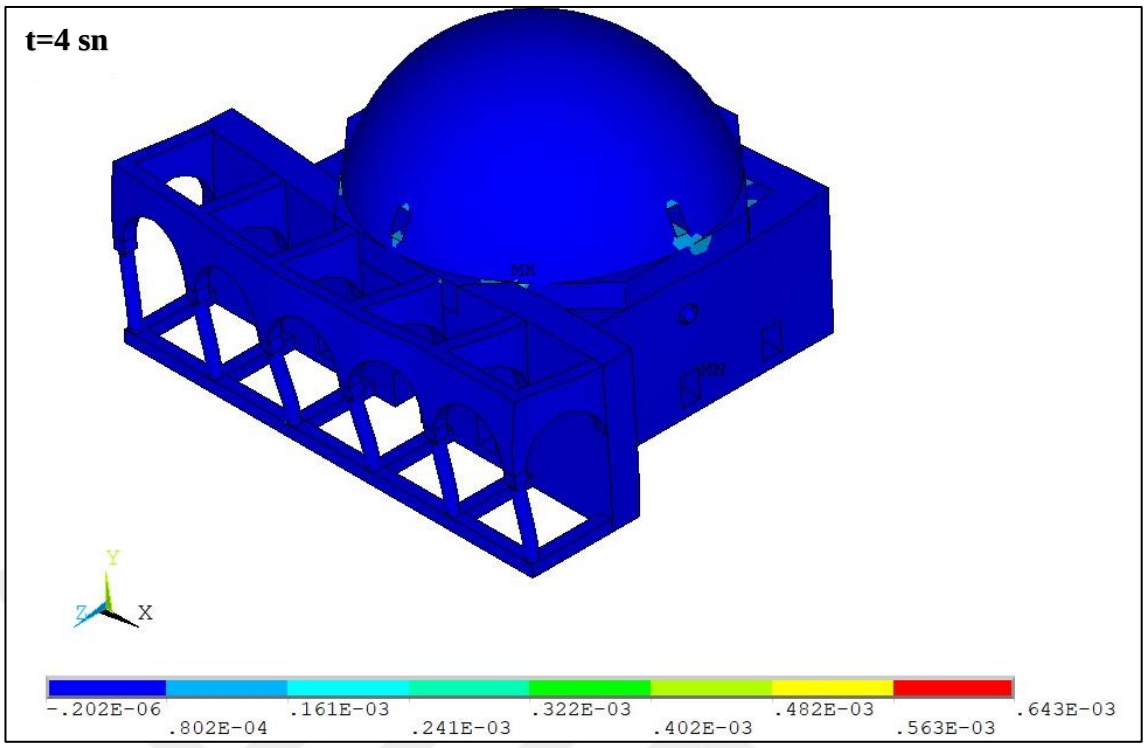


(c)

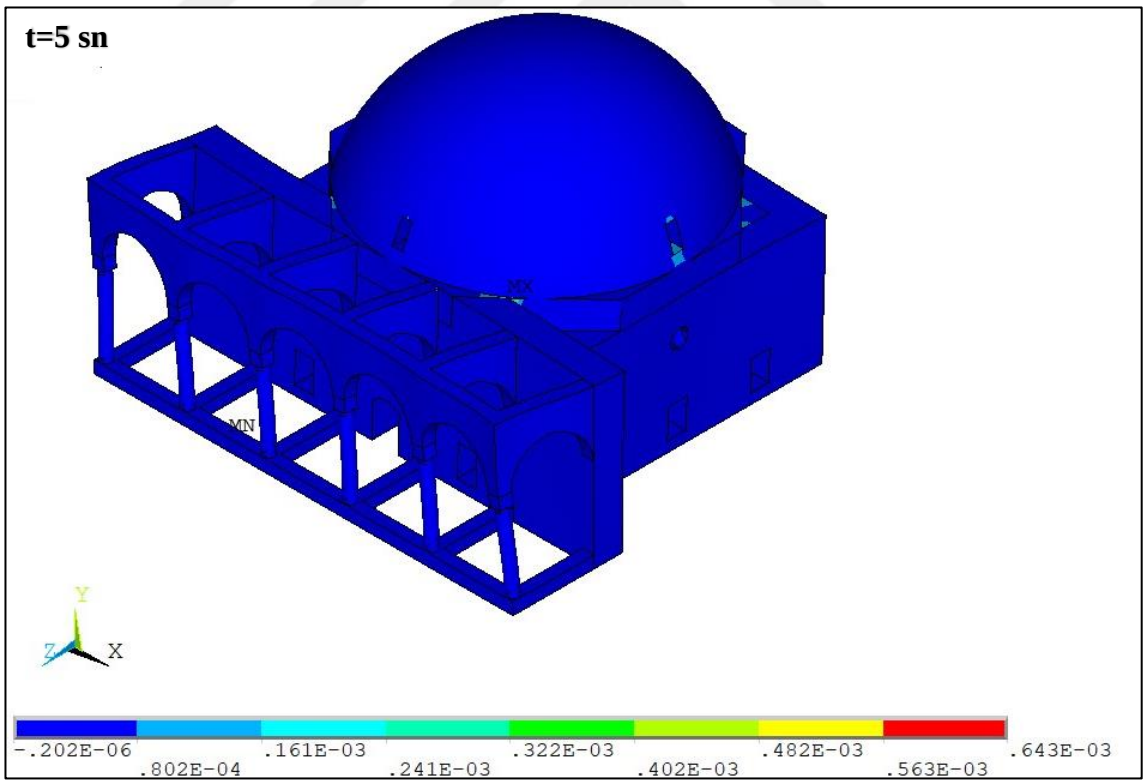


(d)

Şekil 8.39. (devam)

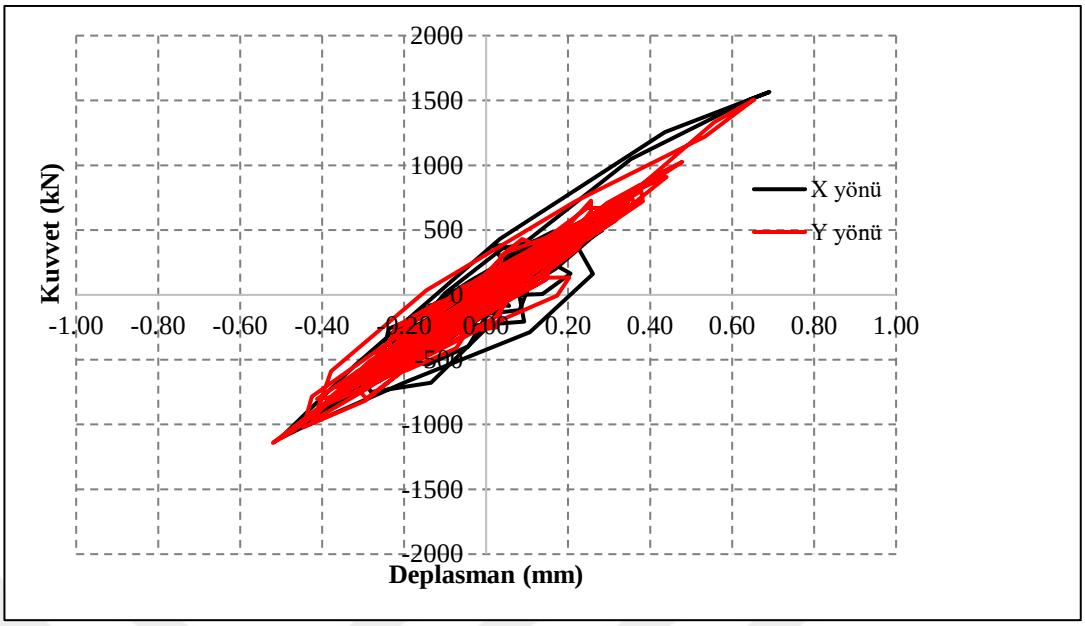


(e)



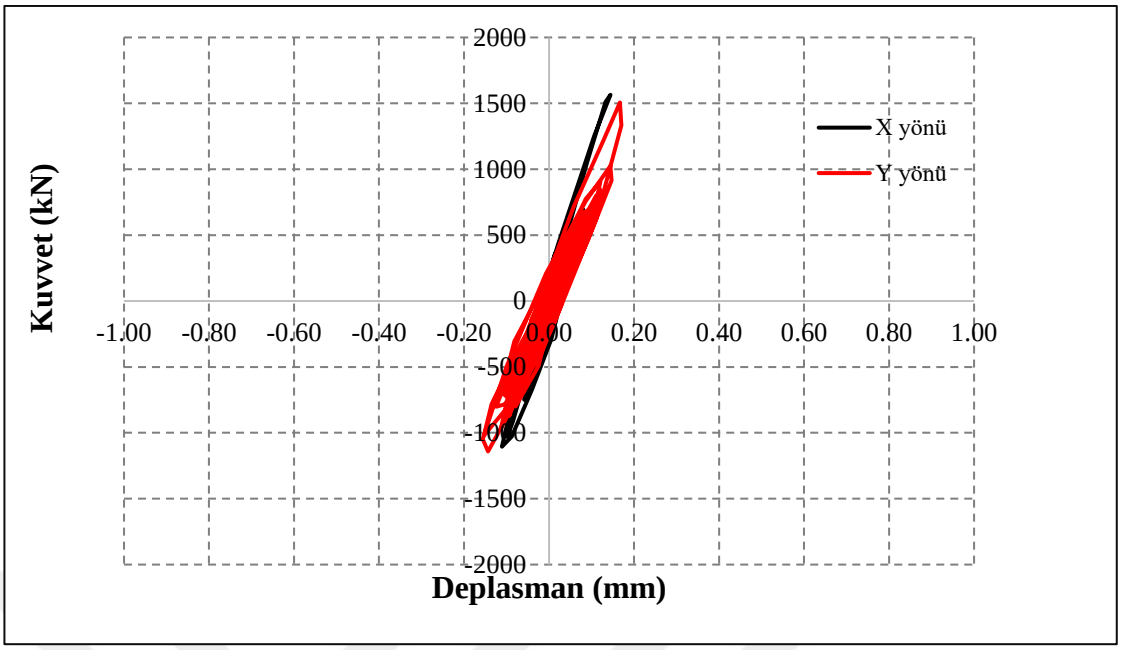
(f)

Şekil 8.39. (devam)

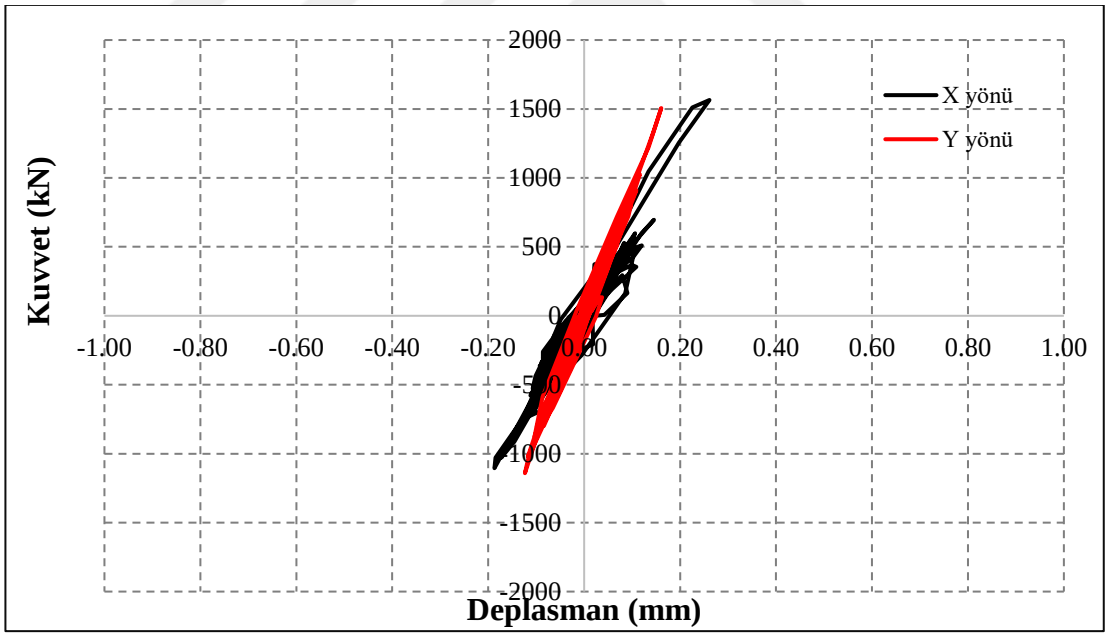


Şekil 8.40. Muratpaşa Camii 1859 depremi ivme kaydı ile elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi.

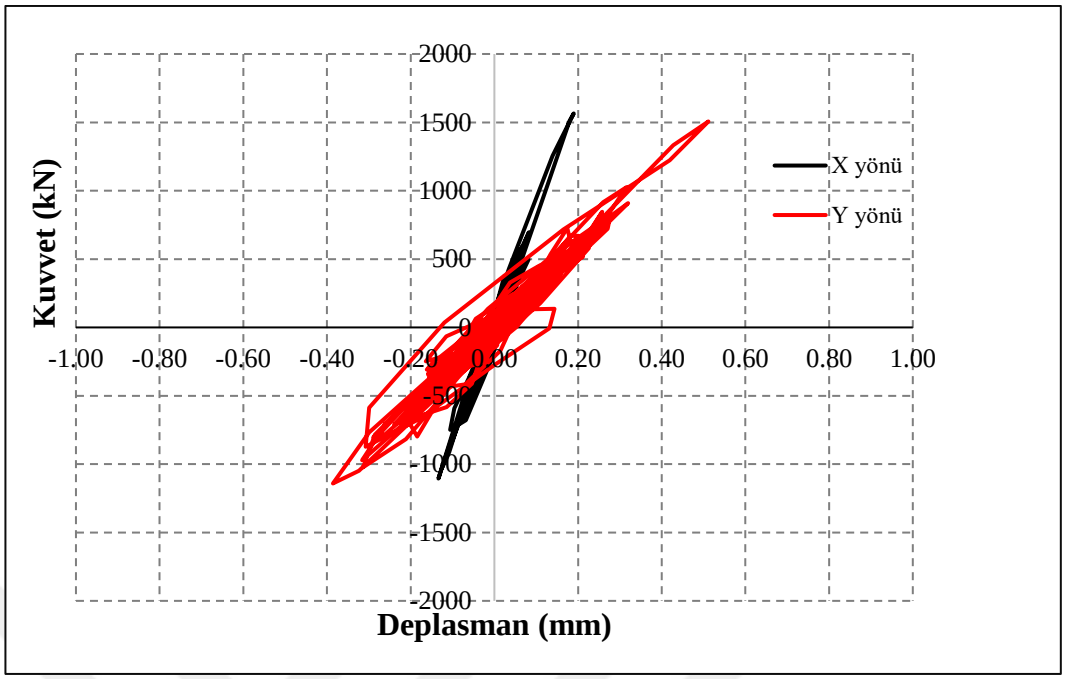
Şekil 8.40.'da caminin kubbesinin tepe noktasındaki taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizildikten sonra yapının duvar köşeleri ve duvar ortalarının taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Bu eğriler çizilirken, dört duvar köşeleri ve duvarların orta üst düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler elde edilmiştir. Bu yer değiştirmeler ile taban kesme kuvvetleri kullanılarak eğriler oluşturulmuştur. Şekil 8.41.'de güney duvar, Şekil 8.42.'de doğu duvar, Şekil 8.43.'te kuzey duvar ve Şekil 8.44.'te batı duvar için taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir.



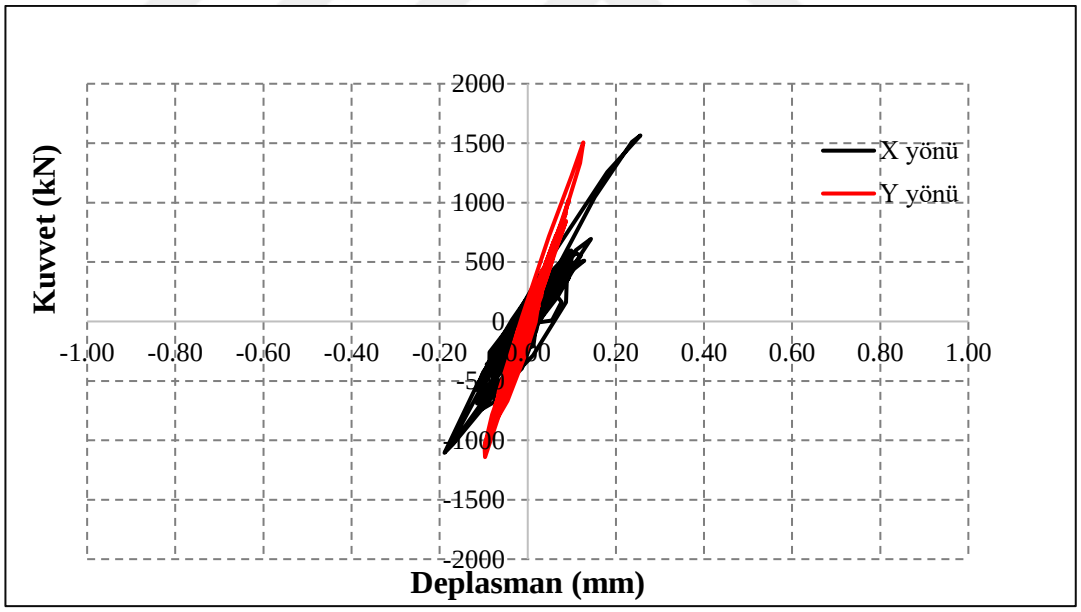
Şekil 8.41. Muratpaşa Camii güney duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.42. Muratpaşa Camii doğu duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi.

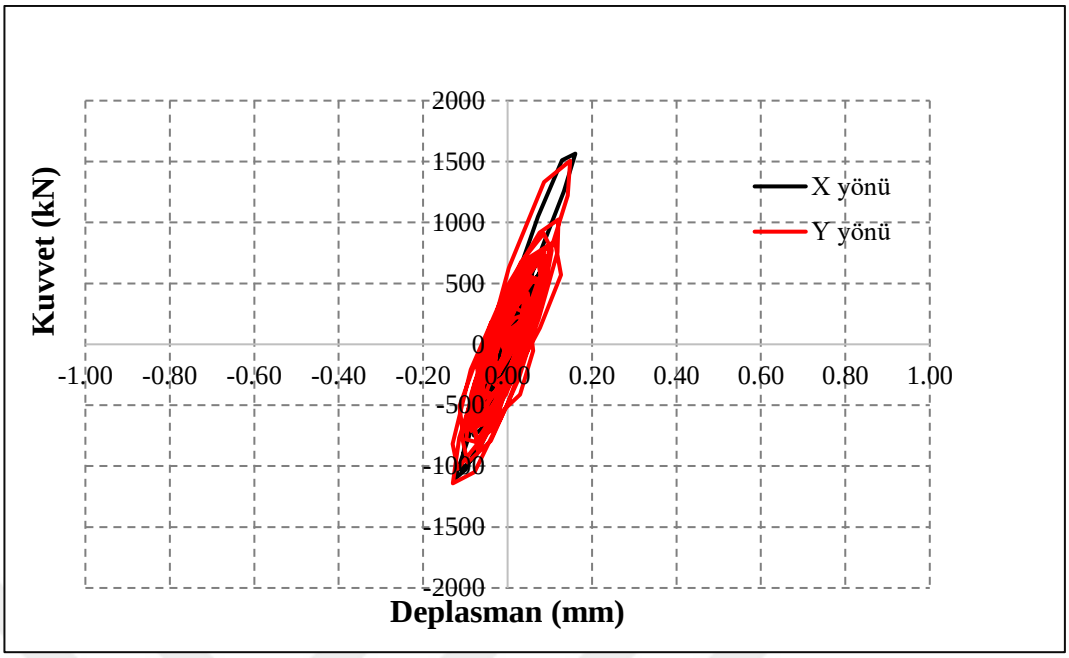


Şekil 8.43. Muratpaşa Camii kuzey duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi.

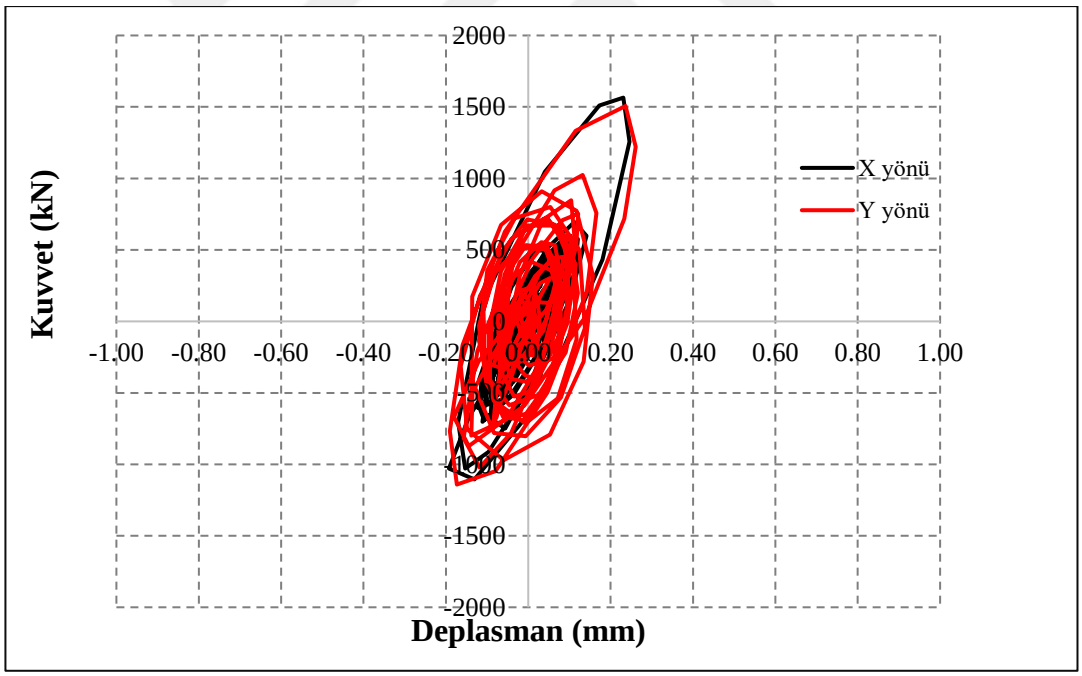


Şekil 8.44. Muratpaşa Camii batı duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi.

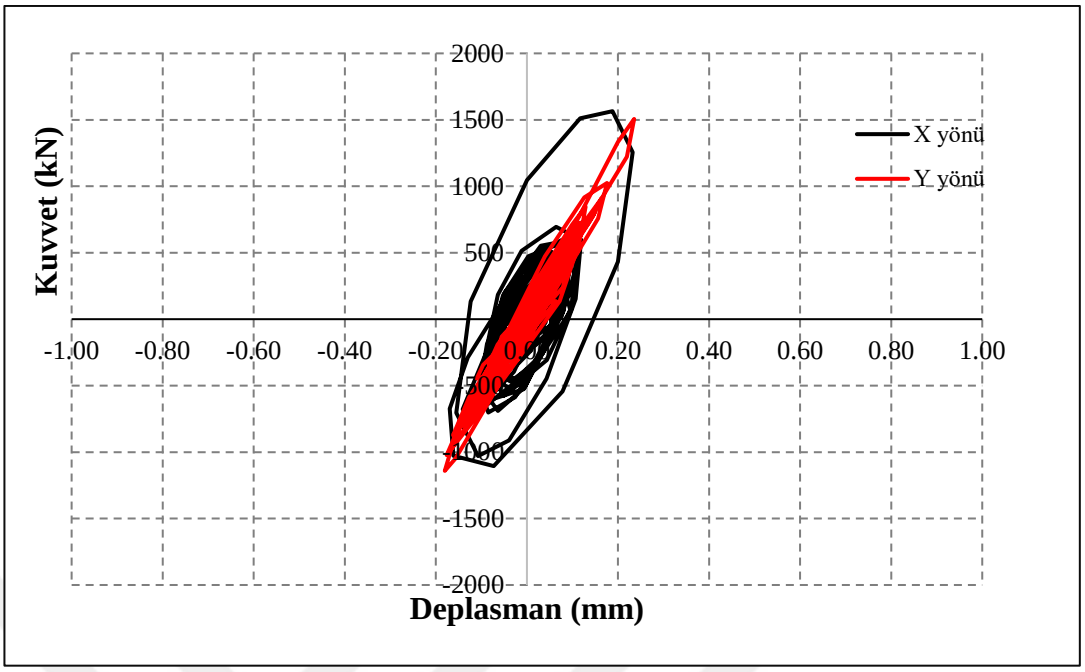
Duvar eğrileri oluşturulduktan sonra caminin köşe noktalarının taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Cami köşe noktalarına denk gelen düğüm noktalarından değerler alınarak eğriler oluşturulmuştur. Şekil 8.45.'te güneybatı köşesi, Şekil 8.46.'da güneydoğu köşesi, Şekil 8.47.'de kuzeybatı köşesi ve Şekil 8.48.'de de kuzeydoğu köşesi için taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri oluşturulmuştur.



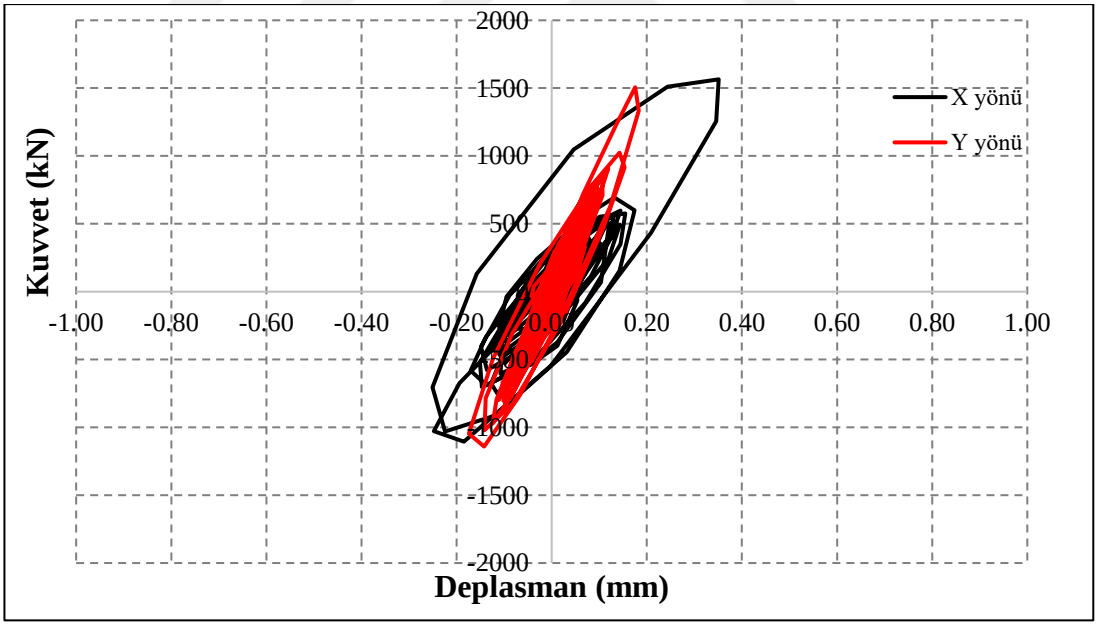
Şekil 8.45. Muratpaşa Camii güneybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.46. Muratpaşa Camii güneydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.47. Muratpaşa Cami kuzeybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



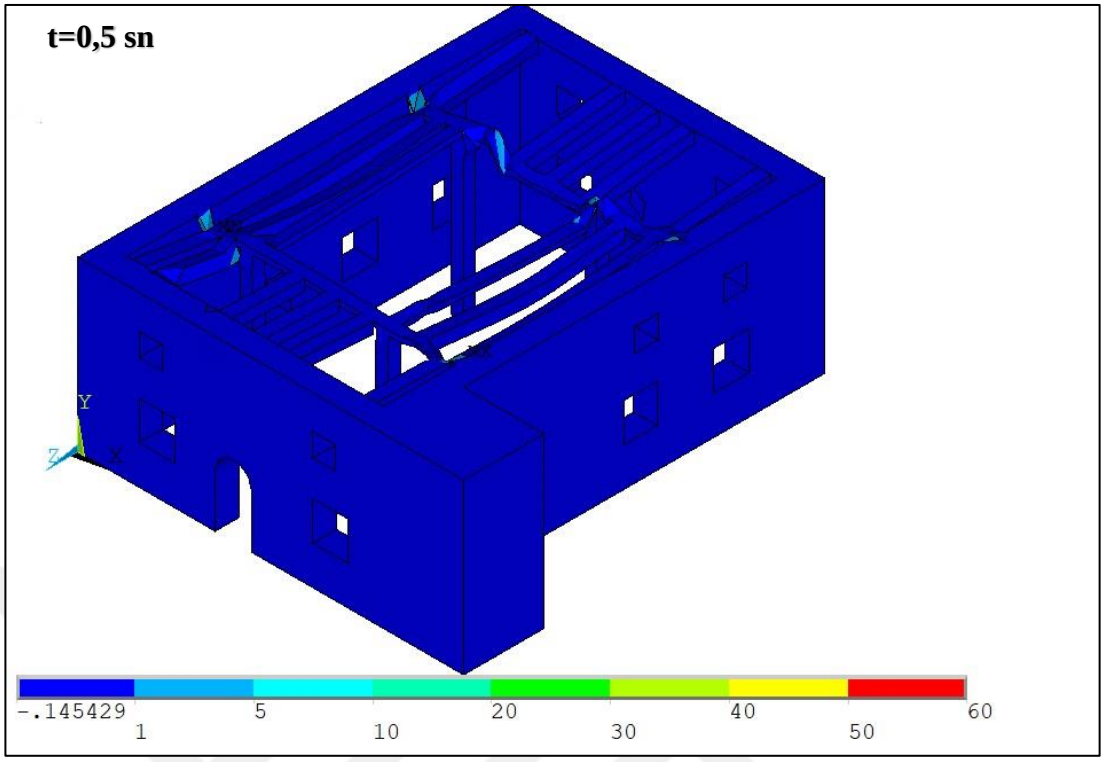
Şekil 8.48. Muratpaşa Camii kuzeydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

Muratpaşa Camii analiz sonuçları incelendiğinde, 2 Haziran 1859 depreminin ivme kaydının etkitilmesi sonucundaki hasarın, camininin literatürdeki hasar tespiti ile paralel olduğu görülmüştür. Caminin, 2 Haziran 1859 depreminde arşivlerde net bir hasar kaydı bulunmamakla birlikte caminin ağır hasar alan Muratpaşa mahallesinde bulunması

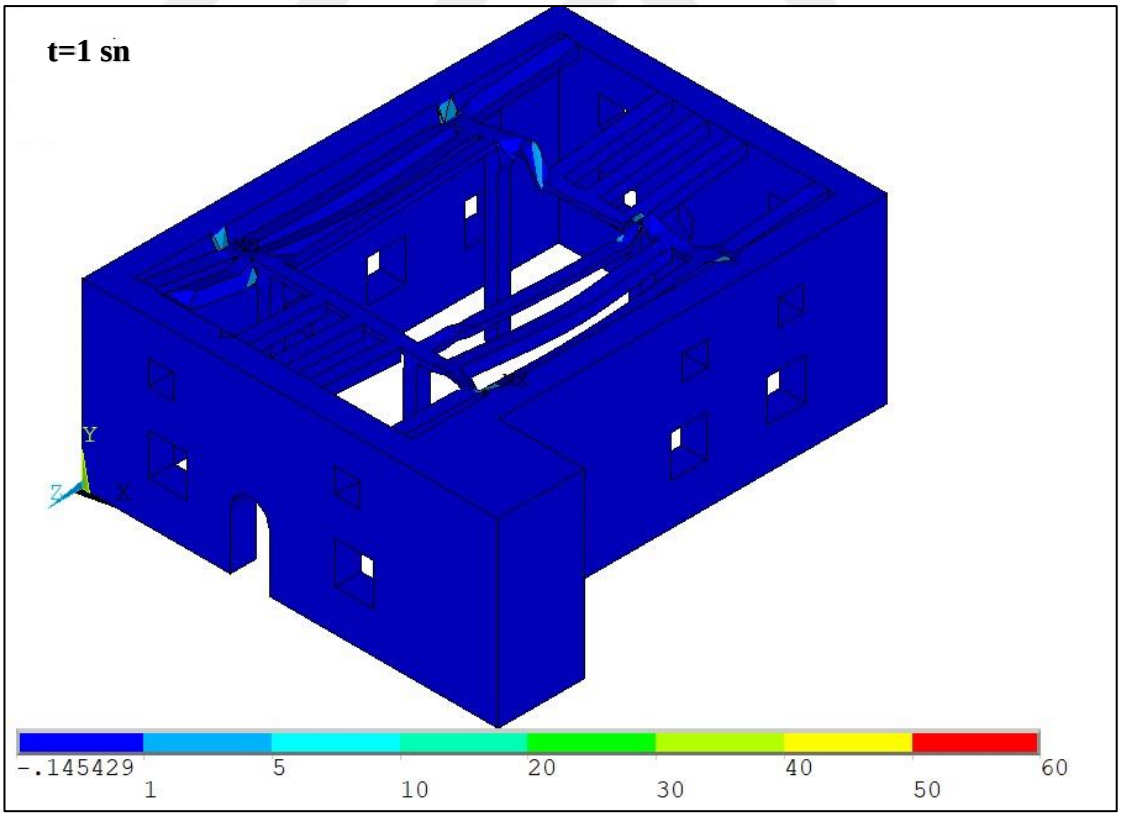
nedeniyle caminin hasar alma ihtimali olduğu düşünülmüştür. Bu analiz sonucunda; cami taşıyıcı duvarlarında, cami kubbesinde ve cami köşelerindeki yer değiştirmelerin 1 mm'nin altında olduğu ve cami duvarının hasar durumlarının kılcal durumda olduğu analiz sonucunda ulaşılmıştır. TYİDYRK (2017)'de belirtilen yığma yapıların performans düzey limitlerine göre cami, Sınırlı hasar (SH) durumundadır ve yer hareketi boyunca bu sınırda kalmıştır. Ayrıca kuvvet kapasitesinin de -2000 kN ile 2000 kN arasında olduğu görülmüştür.

8.2.5. Yukarı Habip Efendi Camii dinamik analiz sonuçları

Büyük planlı ve kubbeli camilerin deprem analizlerinin tamamlanmasının ardından küçük ve basit planlı camilerin dinamik analizlerine geçilmiştir. İlk dinamik analiz Yukarı Habip Efendi Camii ile başlamıştır. Yukarı Habip Efendi Camii'nin hasar mekanizmaları Şekil 8.49'da gösterilmiştir. Caminin 0-5 saniye arasında analiz sonuçları ve yer değiştirmeleri incelenmiştir. Caminin duvar yüksekliği 5.700 mm'dir. Caminin analiz sonucunda x ve y noktasında tepe noktasındaki maksimum yanal yer değiştirmeleri sırasıyla 9 mm ve 2mm olarak elde edilmiştir. TYİDYRK (2017)'de belirtilen yığma yapıların performans düzey limitlerine göre caminin kat yanal öteleme oranları x ve y doğrultuları için sırasıyla %0,157 ve %0,035 tir. Bu hesaplamalar sonucunda TYİDYRK (2017)'de belirtilen performans limitlerine göre cami Sınırlı hasar (SH) durumundadır ve yer hareketi süresi boyunca bu sınırda kalmıştır. Bu hesaplama sonucunda, caminin yer değiştirmeleri yer hareketi süresi boyuncaya kadar kabul edilebilir seviyededir. Ayrıca yer hareketi süresi boyunca taşıyıcı duvarlar üzerindeki kılcal çatlaklar yapı taşıyıcı sistemine tehdit oluşturmayacak düzeydedir.Şekil 8.50.'de caminin üst kısmına denk gelen tepe noktasındaki X ve Y doğrultusundaki deplasmanlardan faydalanarak caminin taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi çizilmiştir.

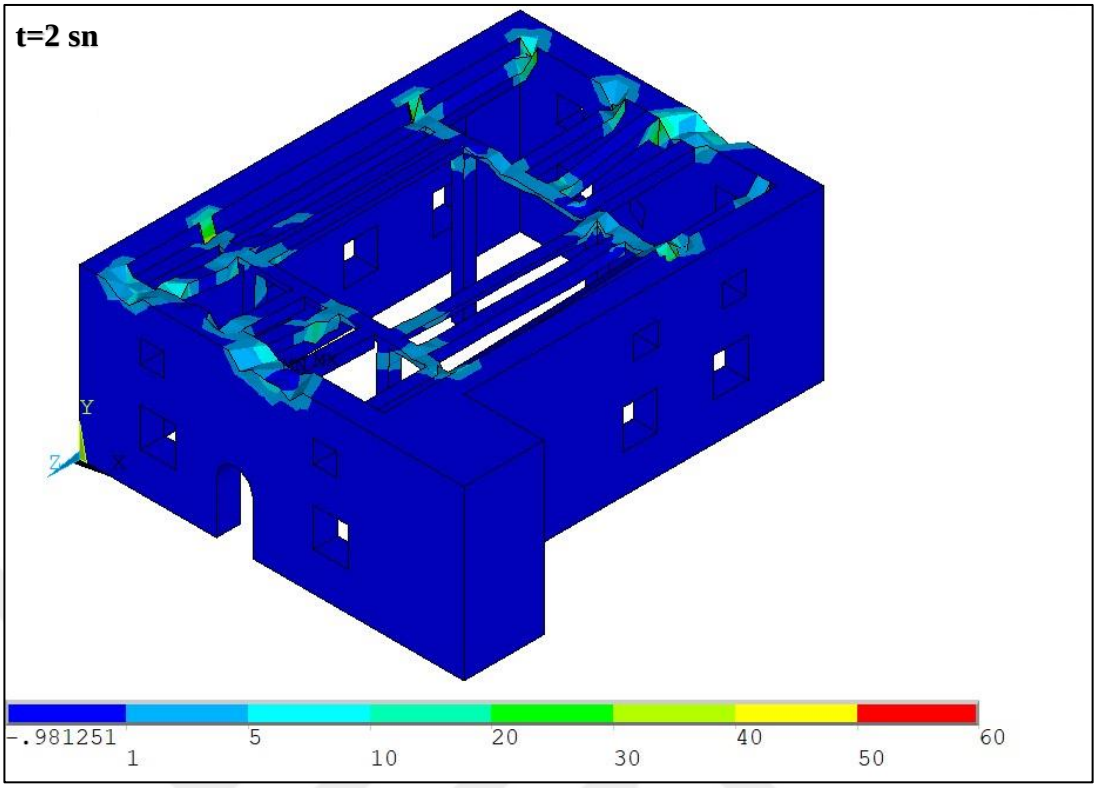


(a)

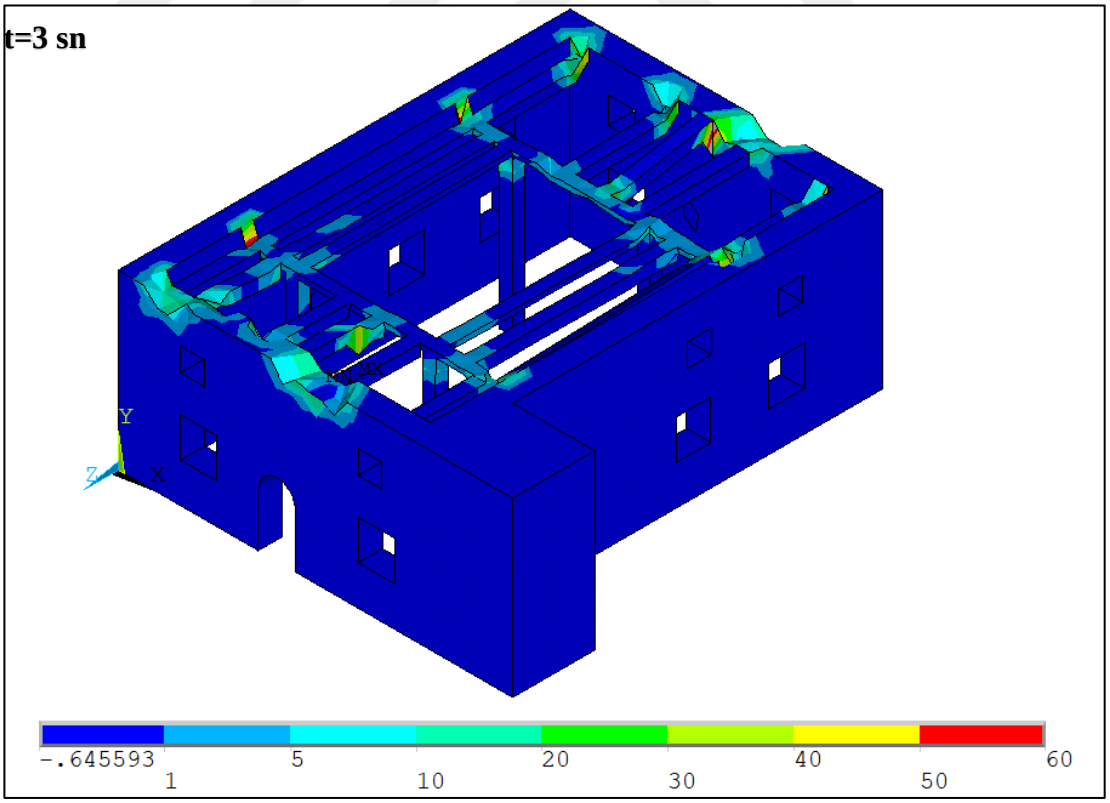


(b)

Şekil 8.49. Yukarı Habip Efendi Camii hasar mekanizması (a) (b) (c) (d) (e) (f)

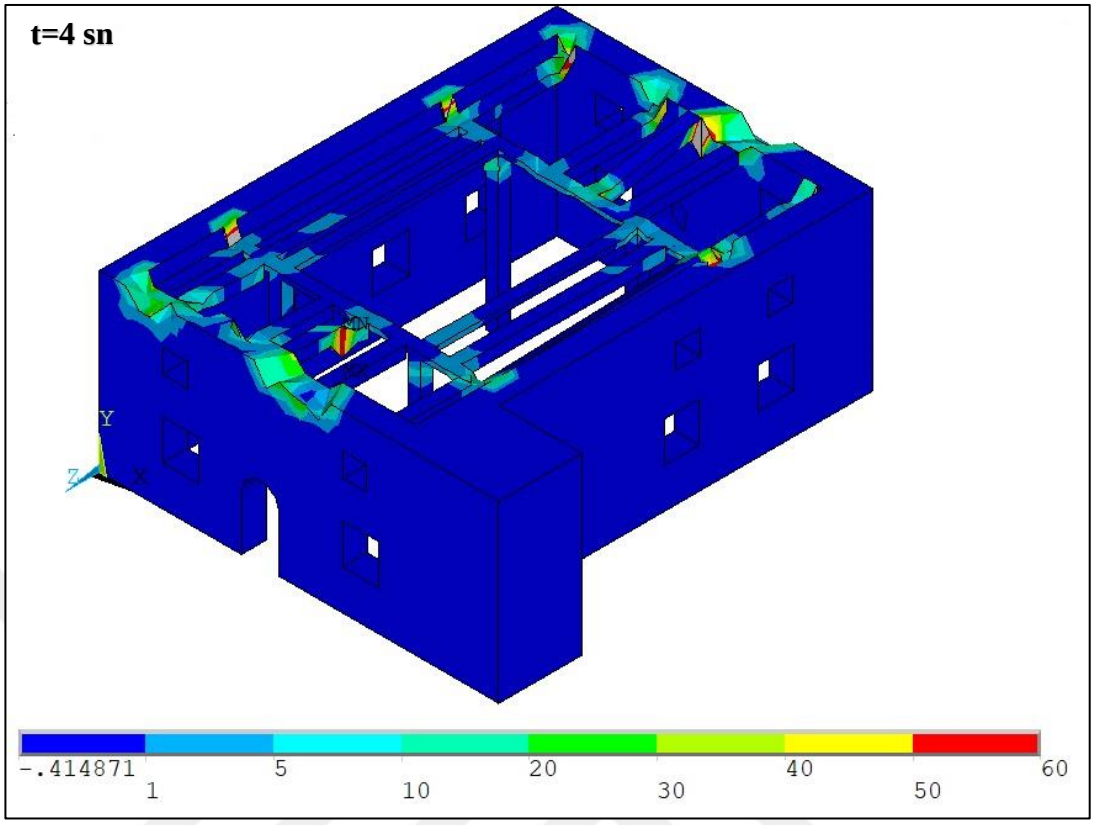


(c)

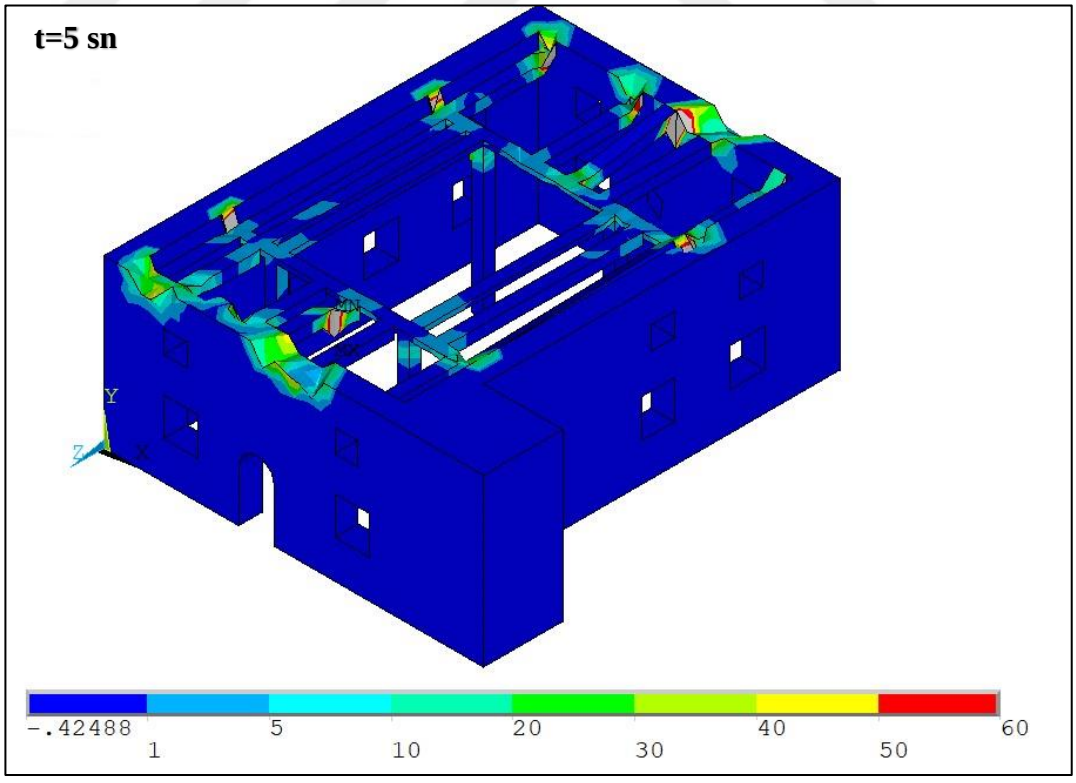


(d)

Şekil 8.49. (devam)

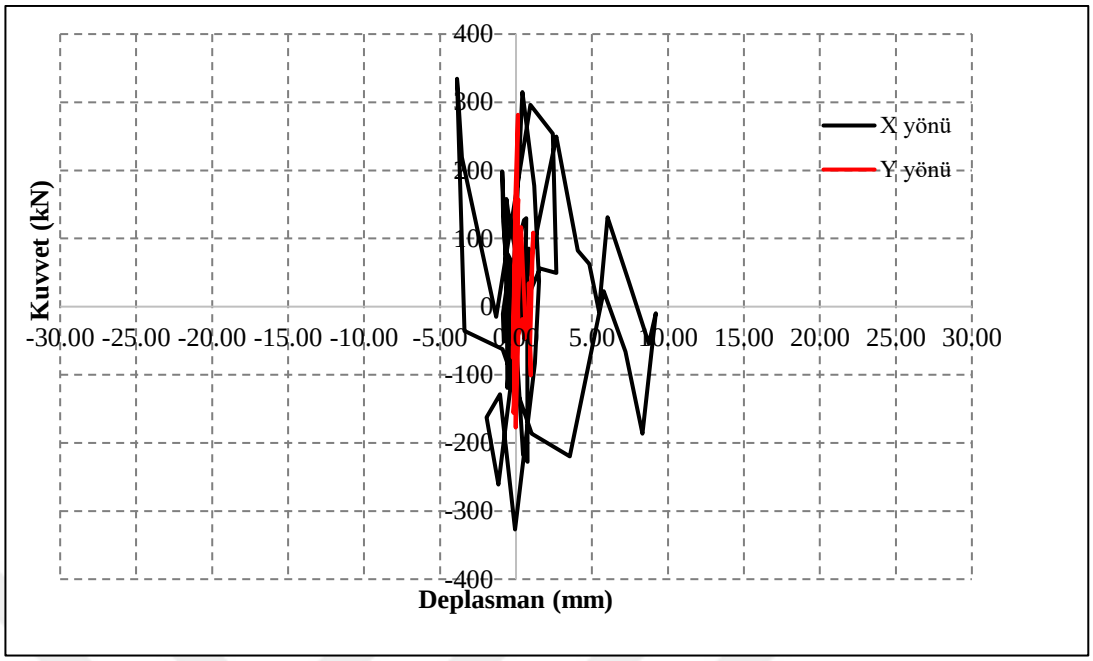


(e)



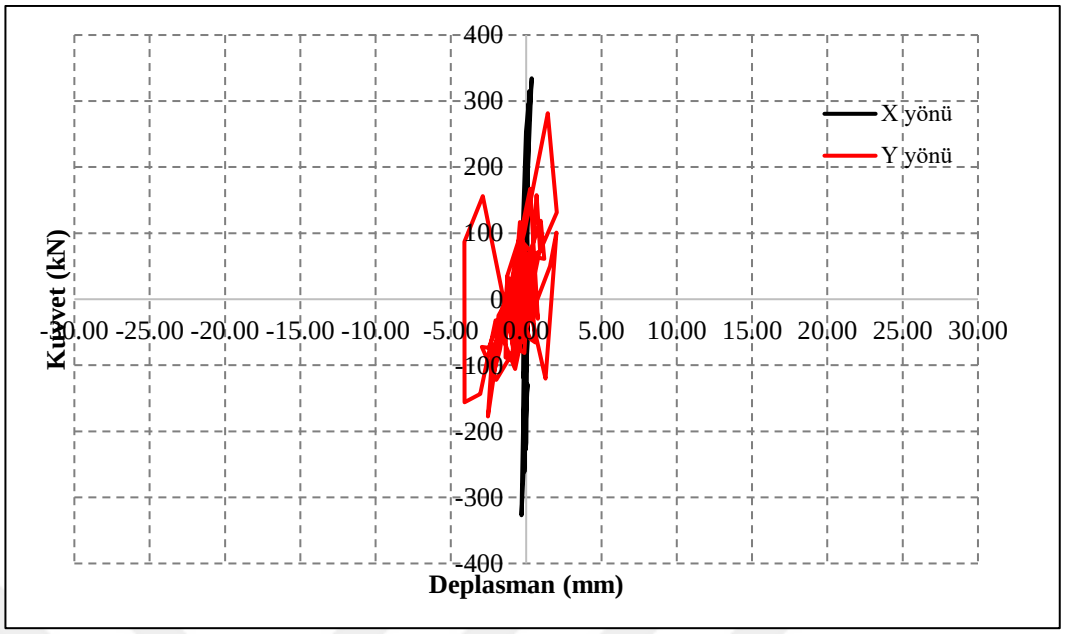
(f)

Şekil 8.49. (devam)

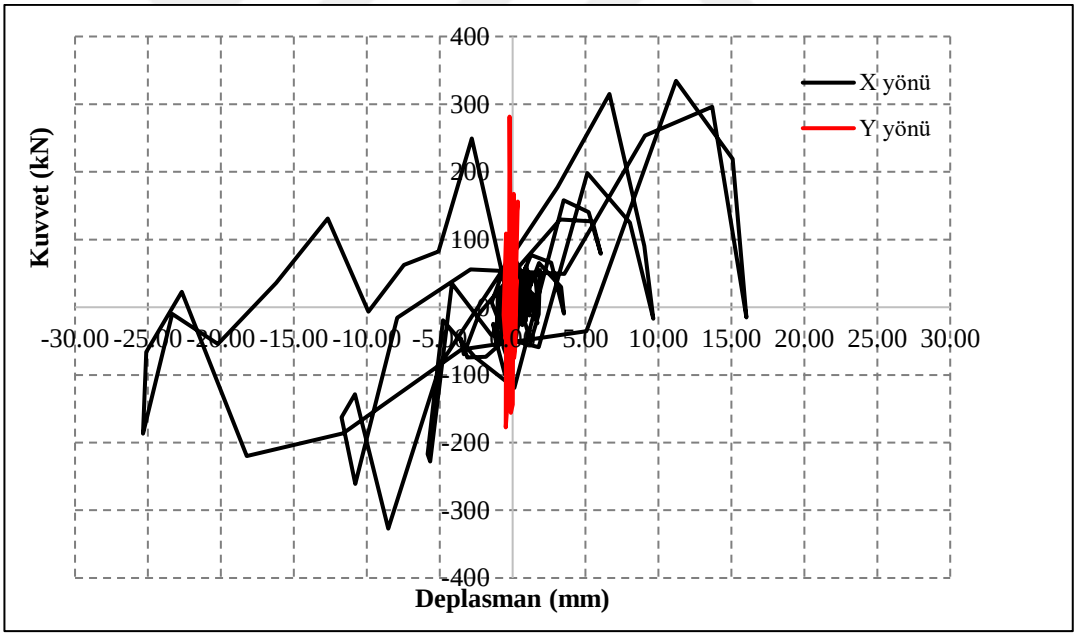


Şekil 8.50. Yukarı Habip Efendi Camii 1859 depremi ivme kaydı ile elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi.

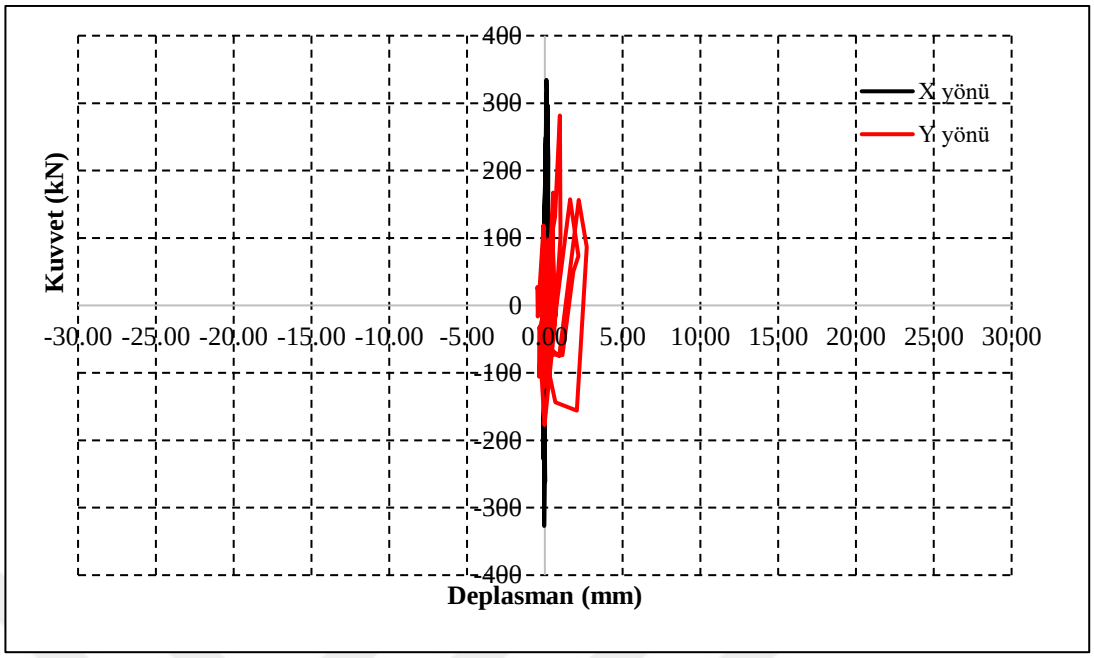
Şekil 8.50.'de caminin ahşap kaplamasının tepe noktasındaki taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizildikten sonra yapının duvar köşeleri ve duvar ortalarının taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Bu eğriler çizilirken, dört duvar köşeleri ve duvarların orta üst düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler elde edilmiştir. Bu yer değiştirmeler ile taban kesme kuvvetleri kullanılarak eğriler oluşturulmuştur. Şekil 8.51.'de güney duvar, Şekil 8.52.'de doğu duvar, Şekil 8.53.'te kuzey duvar ve Şekil 8.54.'te batı duvar için taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir.



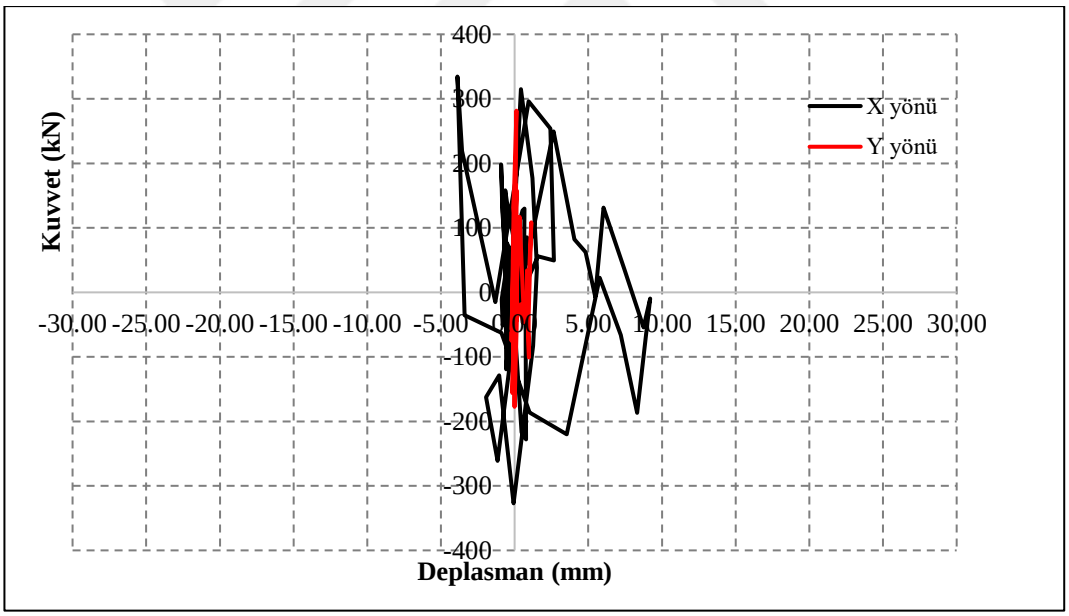
Şekil 8.51. Yukarı Habip Efendi Camii güney duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.52. Yukarı Habip Efendi Camii doğu duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

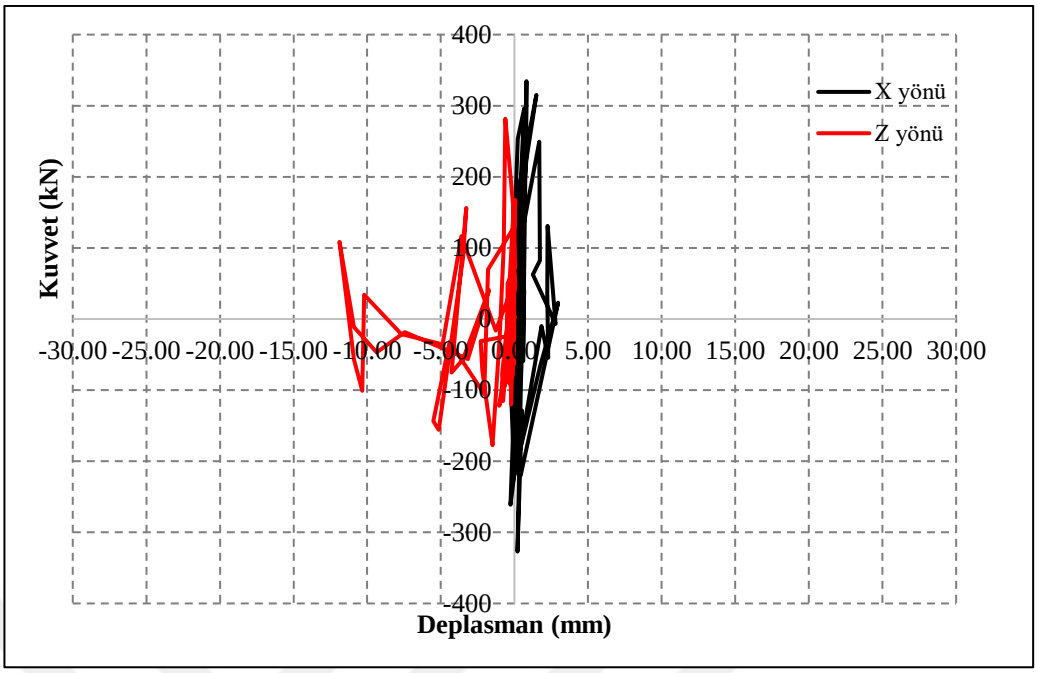


Şekil 8.53. Yukarı Habip Efendi Camii kuzey duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

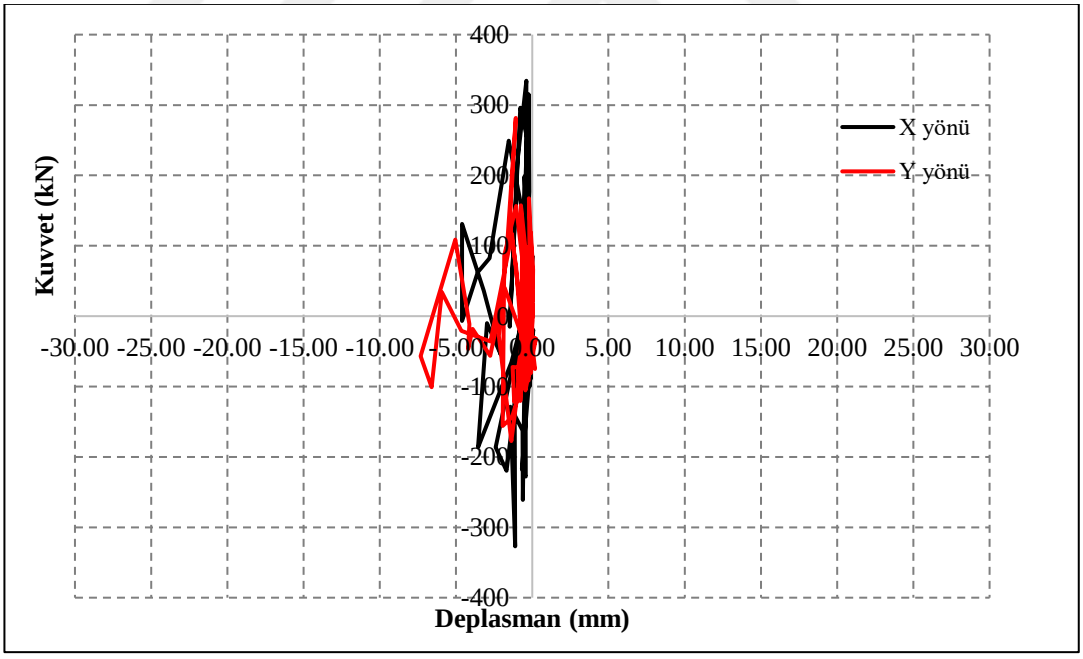


Şekil 8.54. Yukarı Habip Efendi Camii batı duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

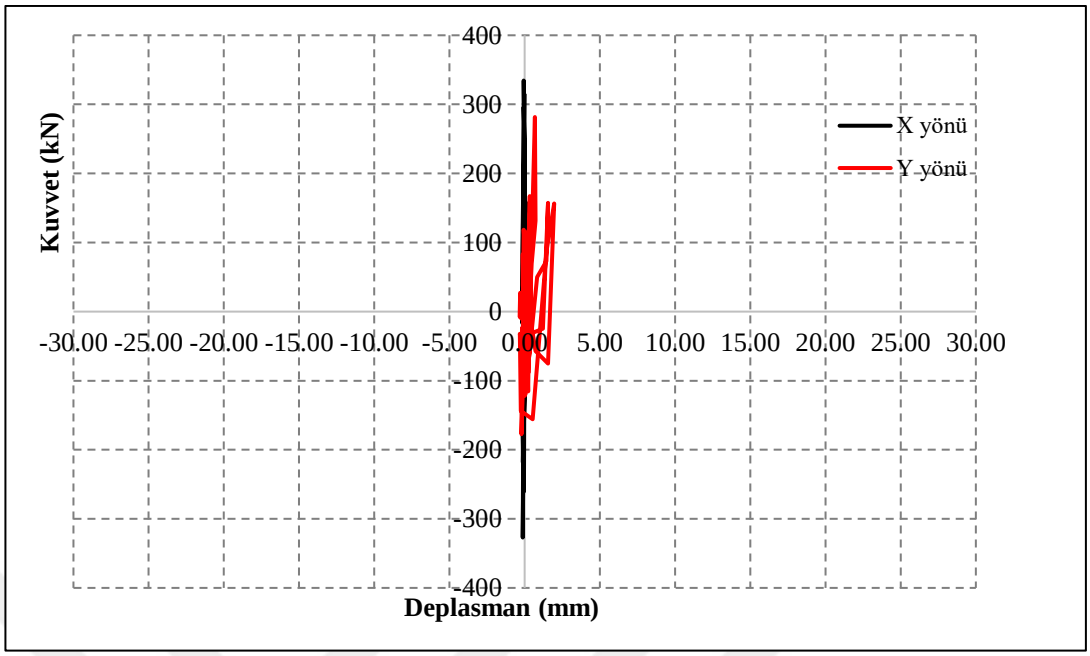
Duvar eğrileri oluşturulduktan sonra caminin köşe noktalarının taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Cami köşe noktalarına denk gelen düğüm noktalarından değerler alınarak eğriler oluşturulmuştur. Şekil 8.55.'te güneybatı köşesi, Şekil 8.56.'da güneydoğu köşesi, Şekil 8.57.'de kuzeybatı köşesi ve Şekil 8.58.'de kuzeydoğu duvar köşesi için taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri oluşturulmuştur.



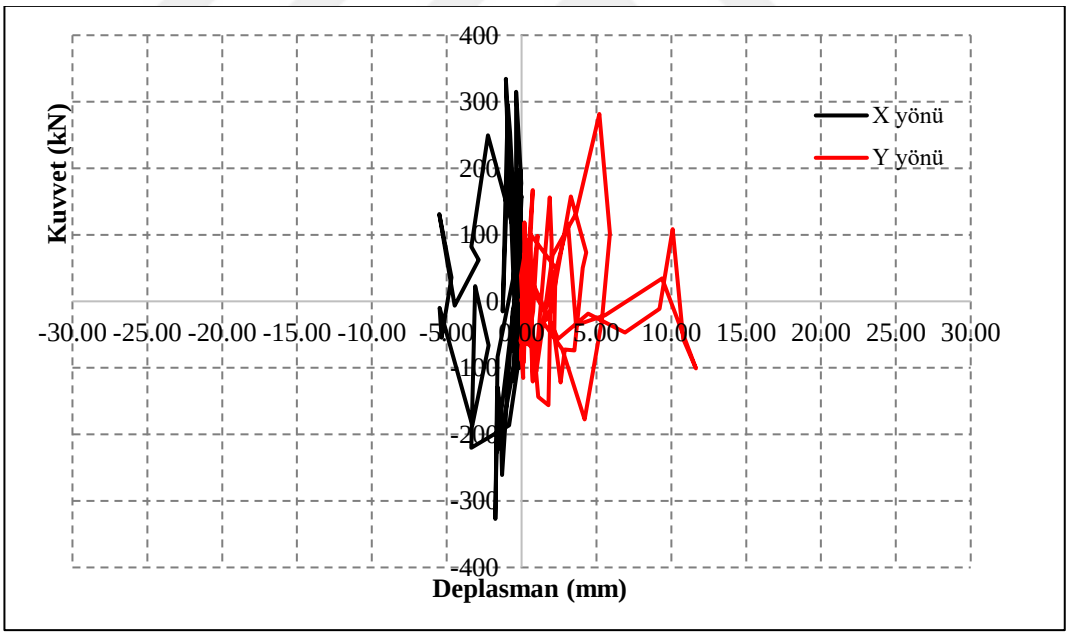
Şekil 8.55. Yukarı Habip Efendi Camii güneybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.56. Yukarı Habip Efendi Camii güneydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.57. Yukarı Habip Efendi Camii kuzeybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



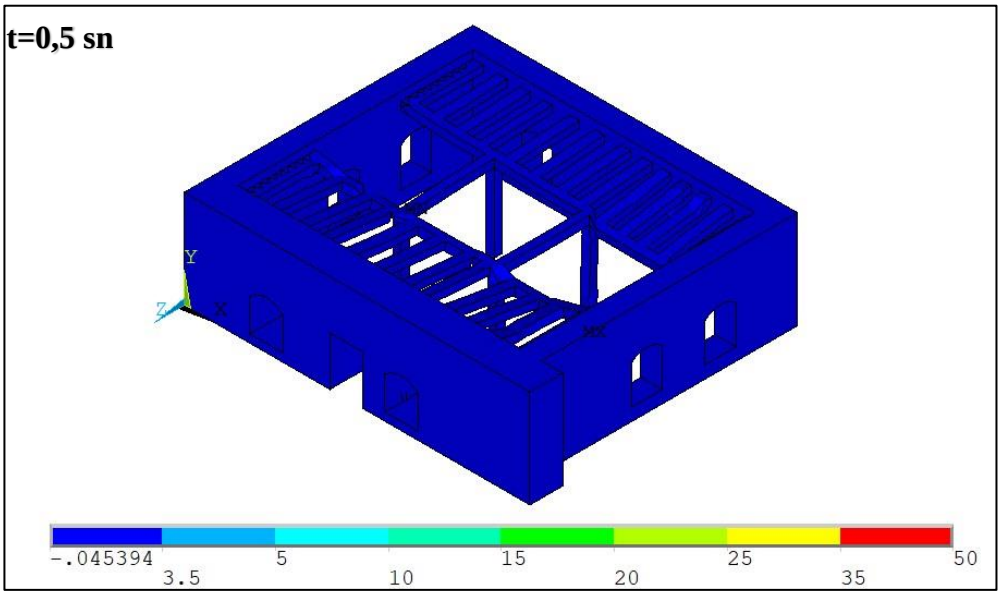
Şekil 8.58. Yukarı Habip Efendi Camii kuzeydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

Yukarı Habip Efendi Camii'nin 2 Haziran 1859 depreminde arşivlerde net bir hasar kaydı bulunmamakla birlikte, caminin ağır hasar alan camilere yakın bir konumda olması ve ağır hasar alan mahallelerin birinde olması caminin hasar alma ihtimalini düşündürmüştür.. Caminin, 2 Haziran 1859 depreminde arşivlerde net bir hasar kaydı

bulunmamakla birlikte caminin ağır hasar alan camilere ve ağır hasar alan mahallelere yakın bir konumda olması caminin hasar alma ihtimalini düşündürmüştür. Analiz sonucunda camideki taşıyıcı duvarlarda önemli bir hasar bulunmadığı ve genellikle 2-5 mm arasında hasarların olduğu gözlenmiştir. TYİDYRK (2017)'de belirtilen yığma yapıların performans düzey limitlerine göre cami hesabıyla da Sınırlı hasar (SH) durumundadır. Caminin hasar alan kısımlarının ahşap kalas döşemelerinde ve bu döşemelerin duvarlarla birleştiği noktalarda olduğu görülmüştür. Ayrıca kuvvet kapasitesinin de -300 kN ile 300 kN arasında olduğu ve bu kapasitenin, hasar alan diğer camilerin kuvvet kapasitesinin altında olduğu görülmüştür.

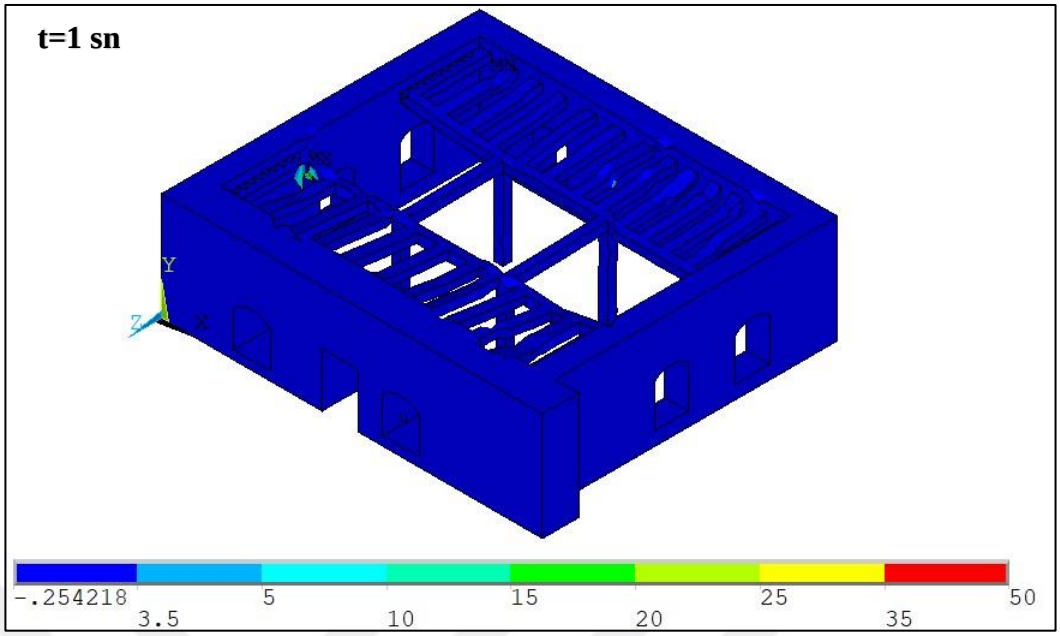
8.2.6. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii dinamik analiz sonuçları

Yukarı Habip Efendi Camii'nin deprem analizinin tamamlanmasının ardından diğer basit planlı cami olan Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii'ne geçilmiştir. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii'nin hasar mekanizmaları Şekil 8.59.'da gösterilmiştir. Caminin 0-5 saniye arasında analiz sonuçları ve yer değiştirmeleri incelenmiştir.Caminin duvar yüksekliği 5,600 mm'dir.Şekil 8.60.'da caminin üst kısmına denk gelen tepe noktasındaki X ve Y doğrultusundaki deplasmanlardan faydalanarak caminin taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi çizilmiştir.

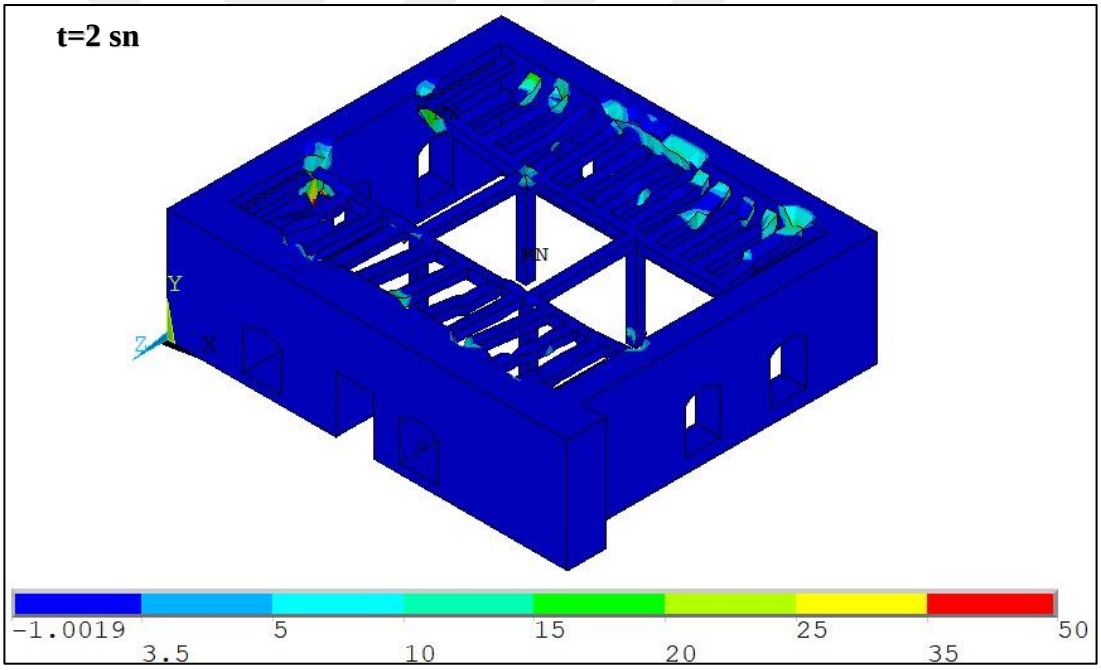


(a)

Şekil 8.59. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii hasar mekanizması (a), (b) (c),(d),(e), (f)

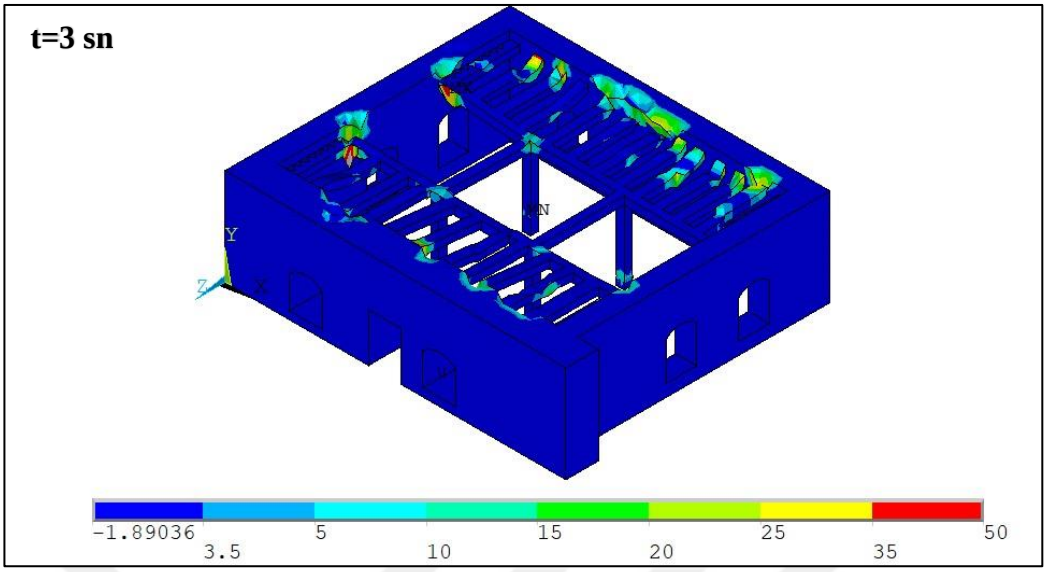


(b)

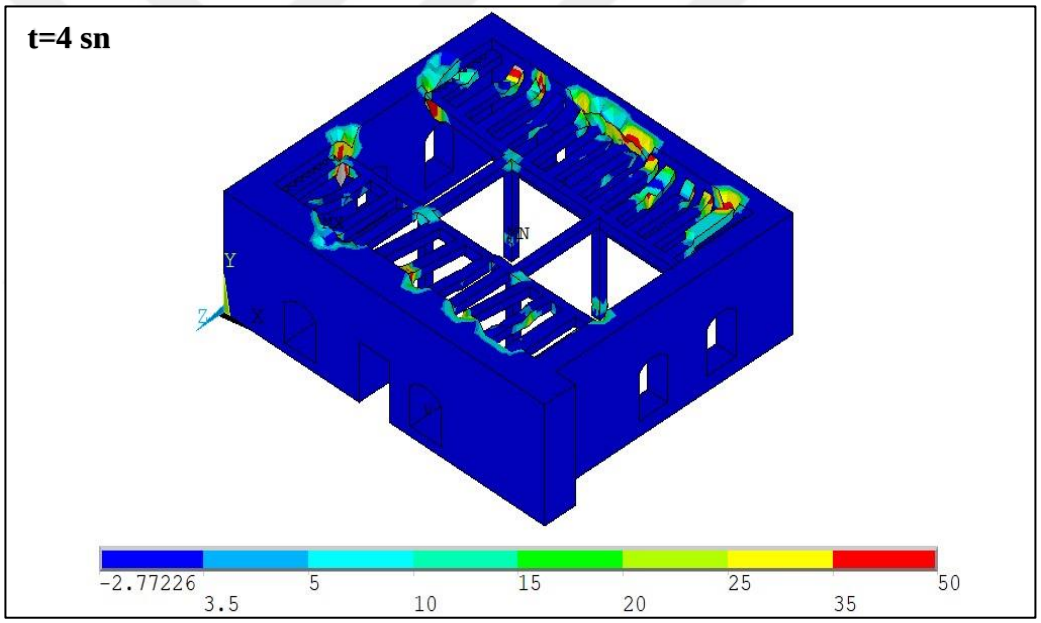


.(c)

Şekil 8.59. (devam)

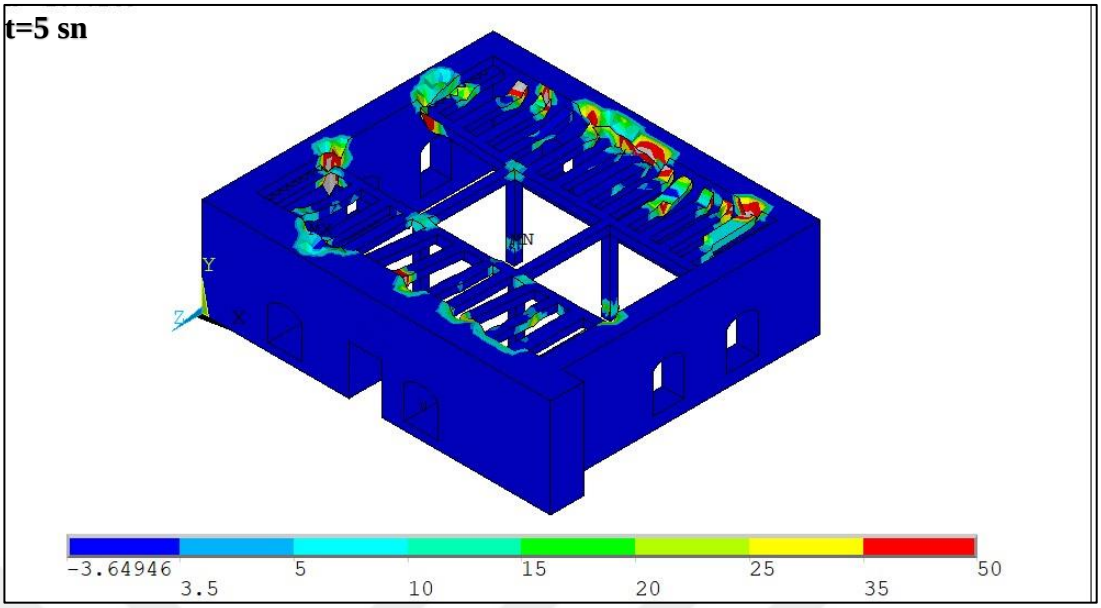


(d)



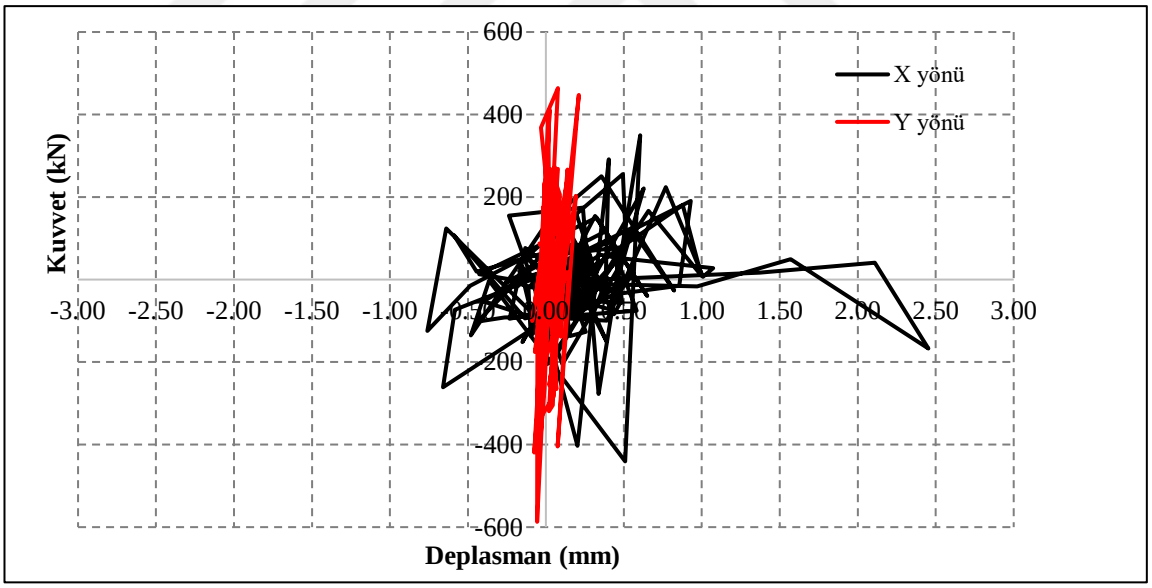
(e)

Şekil 8.59. (devam)



(f)

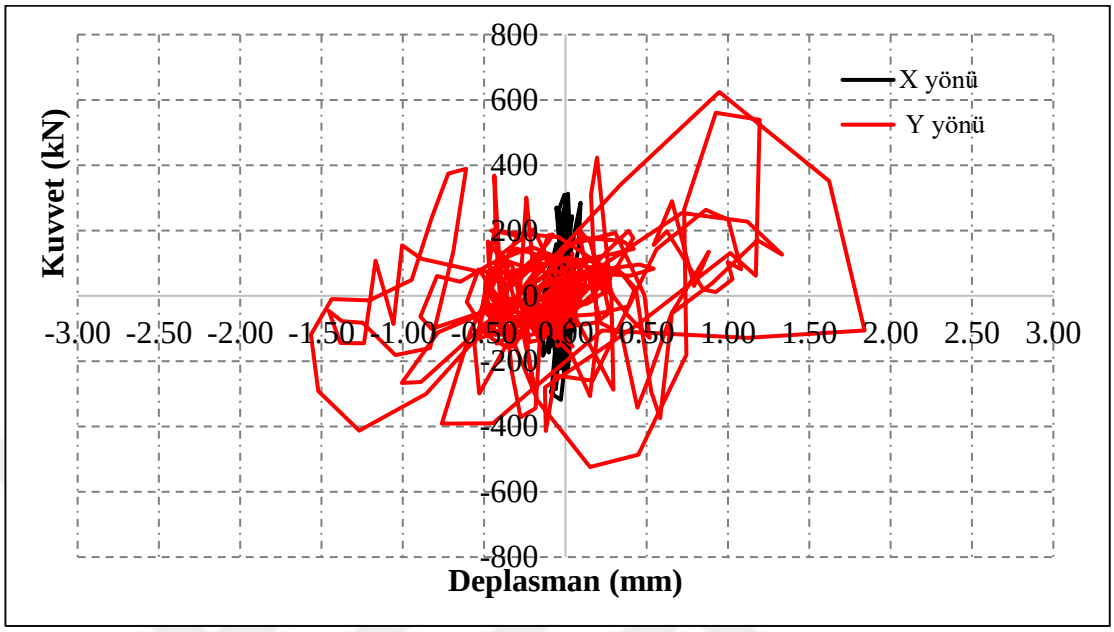
Şekil 8.59. (devam)



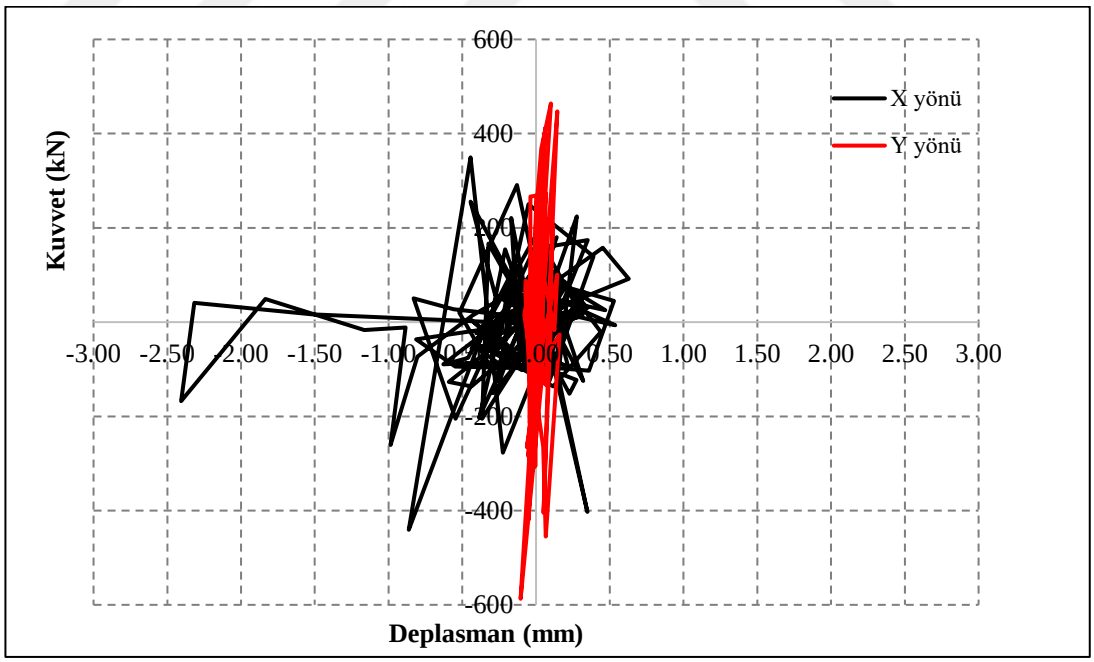
Şekil 8.60. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii 1859 depremi ivme kaydı ile elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi.

Şekil 8.60.'ta caminin tepe noktasındaki taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizildikten sonra yapının duvar köşeleri ve duvar ortalarının taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Bu eğriler çizilirken, dört duvar köşeleri ve duvarların orta üst düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler elde edilmiştir. Bu yer değiştirmeler ile taban kesme kuvvetleri kullanılarak eğriler oluşturulmuştur. Şekil 8.61.'de güney duvar,

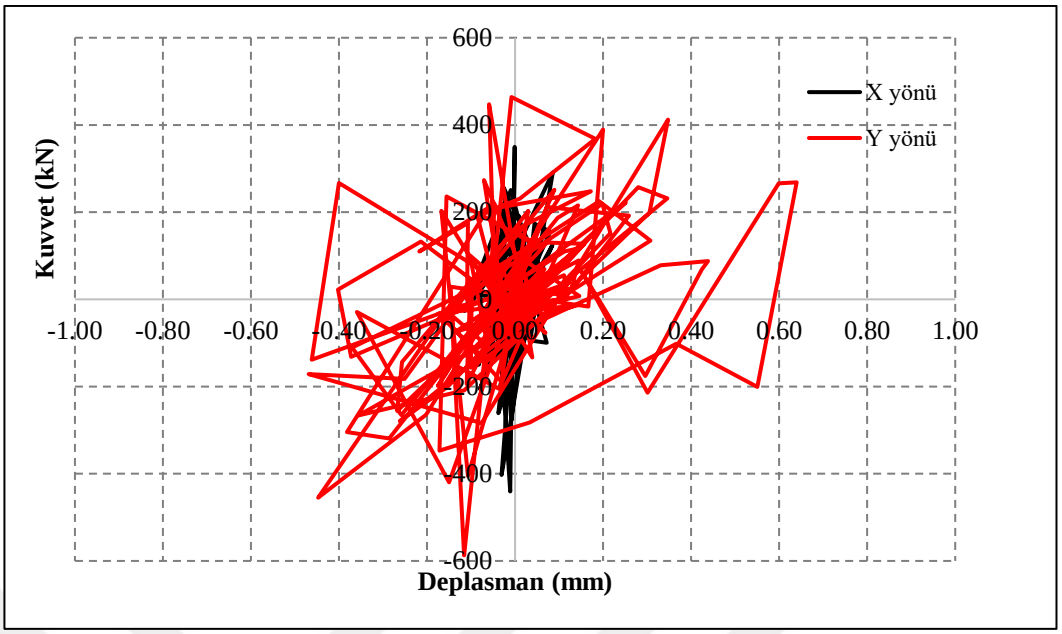
Şekil 8.62.'de doğu duvar, Şekil 8.63.'te kuzey duvar ve Şekil 8.64.'te batı duvar için taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir.



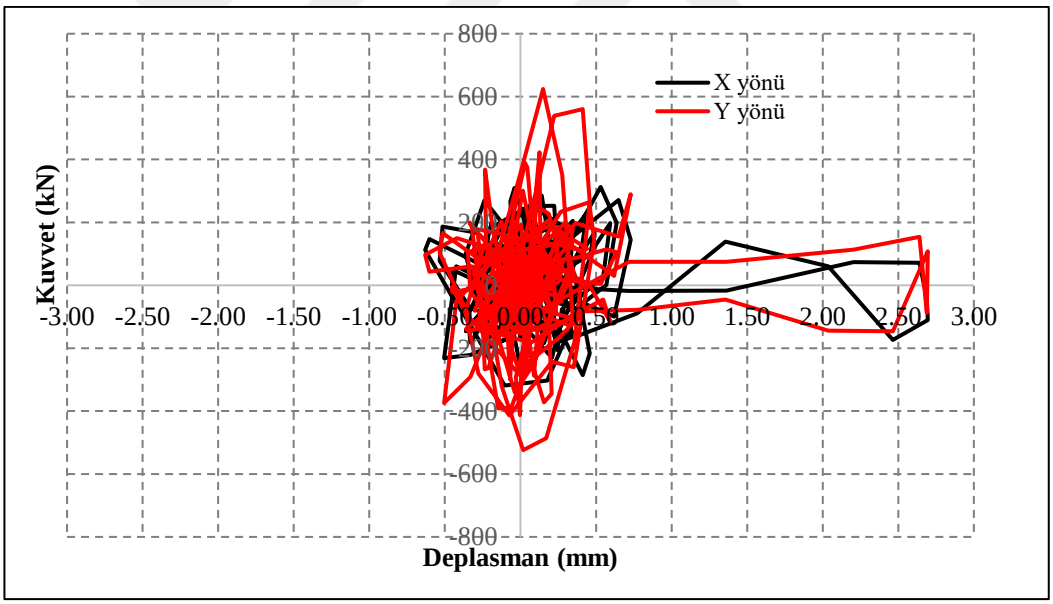
Şekil 8.61. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii güney duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.62. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii doğu duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

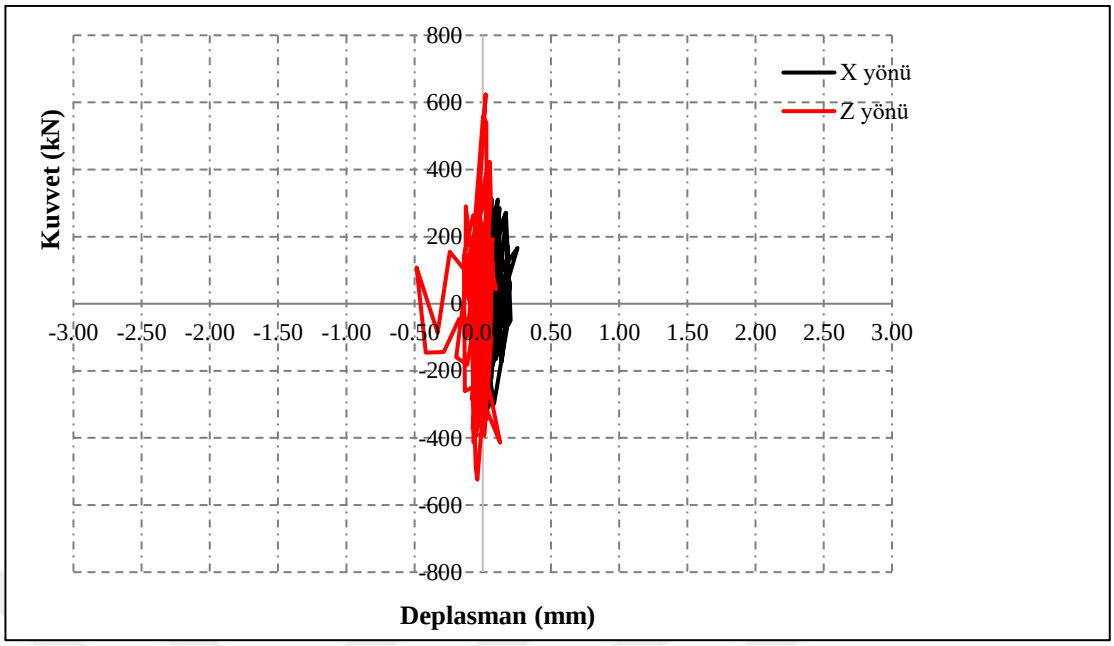


Şekil 8.63. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii kuzey duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

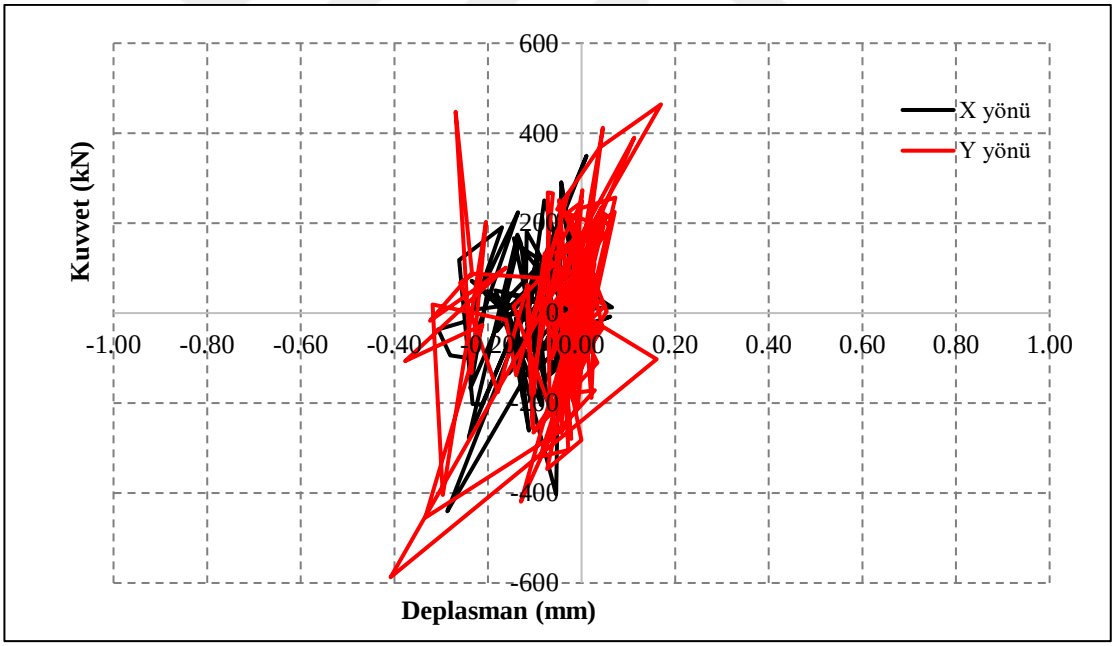


Şekil 8.64. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii batı duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

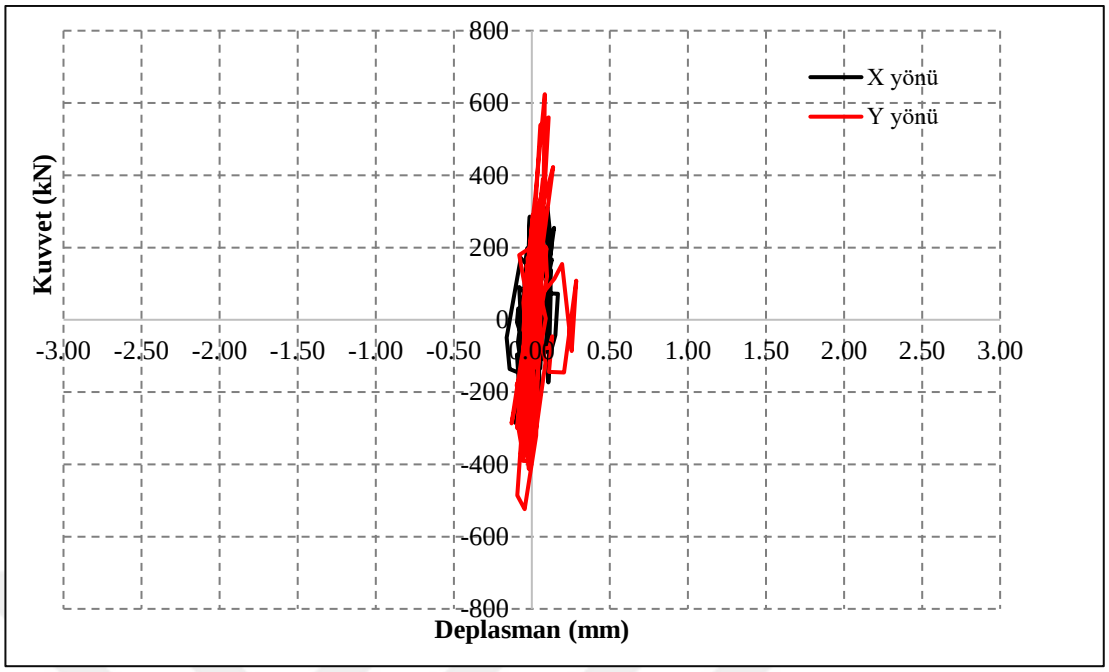
Duvar eğrileri oluşturulduktan sonra caminin köşe noktalarının taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Cami köşe noktalarına denk gelen düğüm noktalarından veri alınarak eğriler oluşturulmuştur. Şekil 8.65.'te güneybatı köşesi, Şekil 8.66.'da güneydoğu köşesi, Şekil 8.67.'de kuzeybatı köşesi ve Şekil 8.68.'de kuzeydoğu köşesi için taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri oluşturulmuştur.



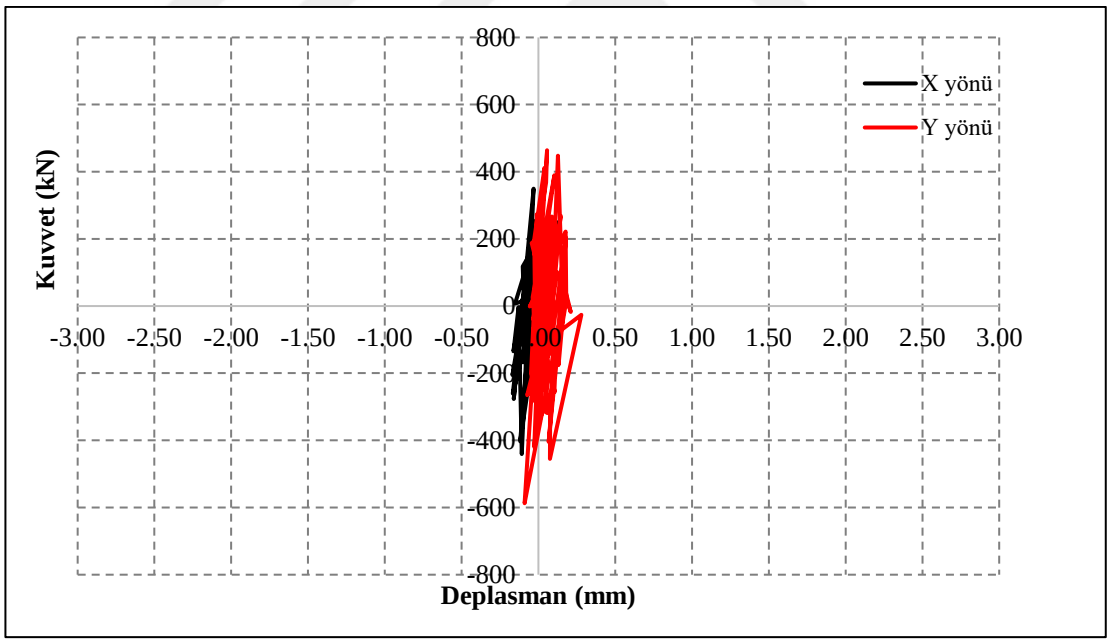
Şekil 8.65. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii güneybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.66. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii güneydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.67. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii kuzeybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



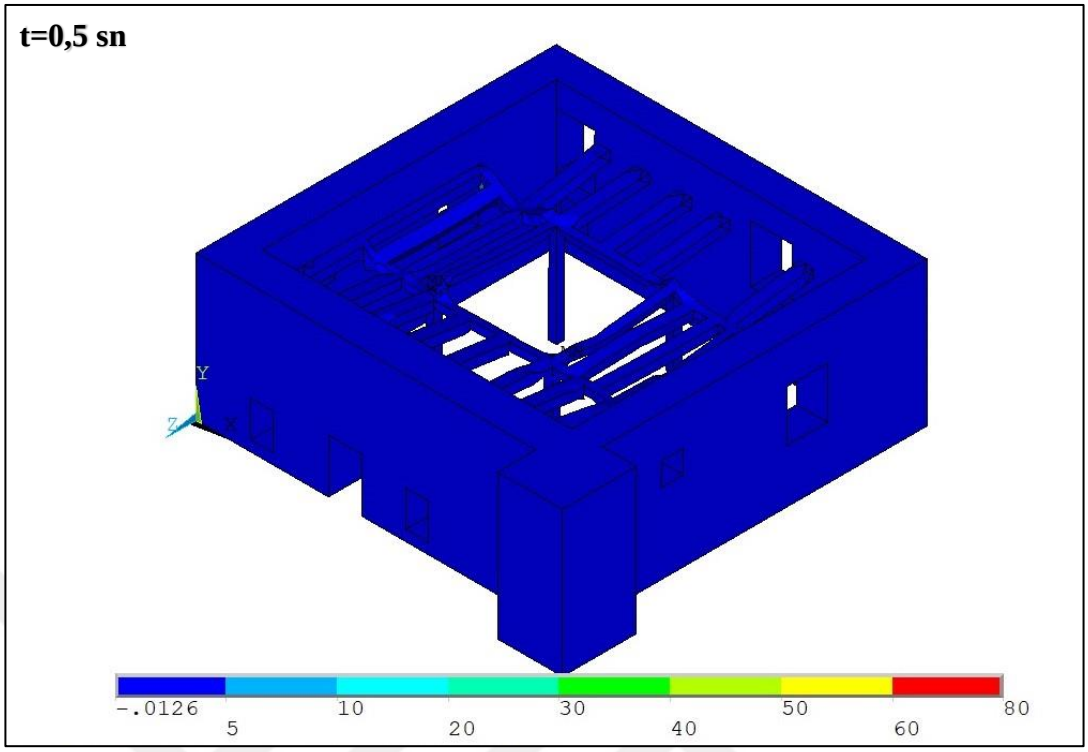
Şekil 8.68. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii kuzeydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii'nin,2 Haziran 1859 depreminde arşivlerde net bir hasar kaydı bulunmamakla birlikte, caminin ağır hasar alan camilere yakın bir konumda olması ve ağır hasar alan mahallelerin birinde olması caminin hasar alma ihtimalini düşündürmüştür. Analiz sonucunda camideki taşıyıcı duvarlarında doğrultusunda önemli

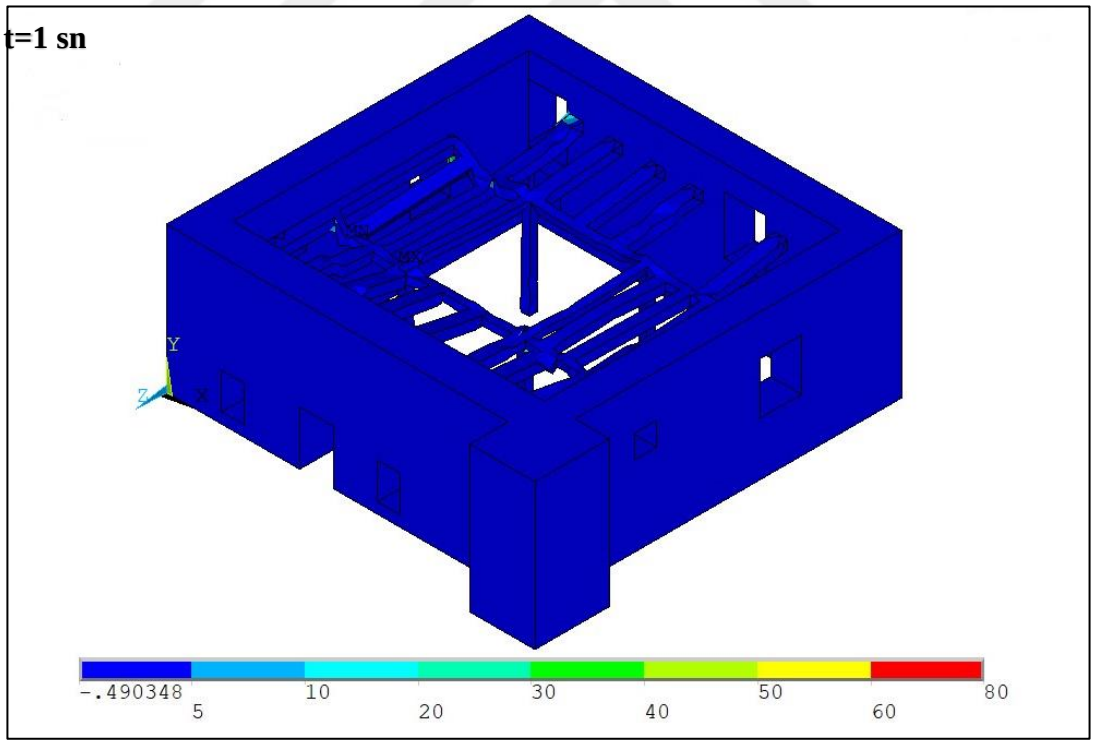
bir hasar bulunmadığı ve genellikle 2-5 mm arasında çatlakların olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Caminin x ve y doğrultularında tepe noktası maksimum yanal yer değiştirmeleri sırasıyla 2,50 mm ve 0,200 mm dir. TYİDYRK (2017)'de belirtilen yığma yapıların performans düzey limitlerine göre caminin kat yanal öteleme oranları sırasıyla %0,044 ve 0,003'tür. Bu hesaplama sonucunda TYİDYRK (2017)'de belirtilen performans limitlerine göre cami sınırlı hasar (SH) durumundadır ve yer hareketi süresi boyunca bu sınırda kalmıştır. Ancak caminin güney duvarında diğer duvarlara göre daha fazla hasar olduğu ve bu hasarın duvar üstünde olduğu analiz sonuçlarında tespit edilmiştir. Ayrıca Caminin hasar alan kısımlarının ahşap kalas döşemelerinde ve bu döşemelerin duvarlarla birleştiği noktalarda olduğu görülmüştür. Ayrıca caminin kuvvet kapasitesi de -600 kN ile 600 kN arasındadır.

8.2.7. Yeğenağa Camii dinamik analiz sonuçları

Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii'nin deprem analizinin tamamlanmasının ardından, diğer basit planlı cami olan Yeğenağa Camii'ne geçilmiştir. Yeğenağa Camii'nin hasar mekanizmaları Şekil 8.69.'da gösterilmiştir. Caminin 0-5 saniye arasında analiz sonuçları ve yer değiştirmeleri incelenmiştir. Şekil 8.70.'te caminin üst kısmına denk gelen tepe noktasındaki X ve Y doğrultusundaki deplasmanlardan faydalanarak caminin taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi çizilmiştir.

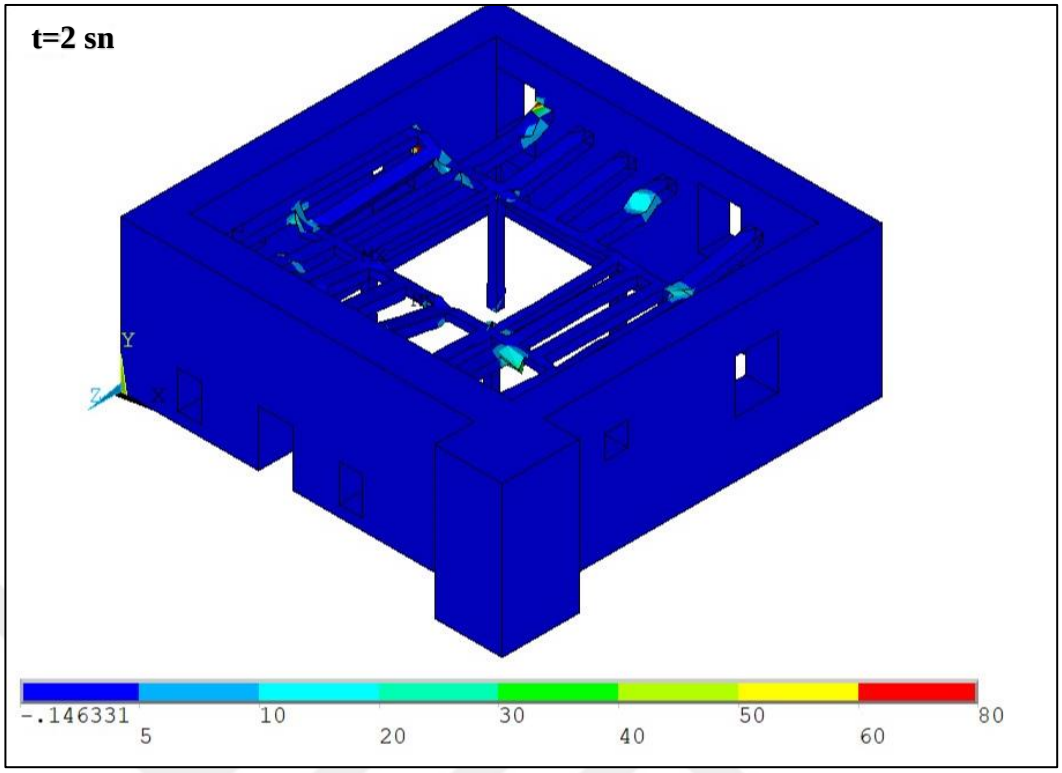


(a)

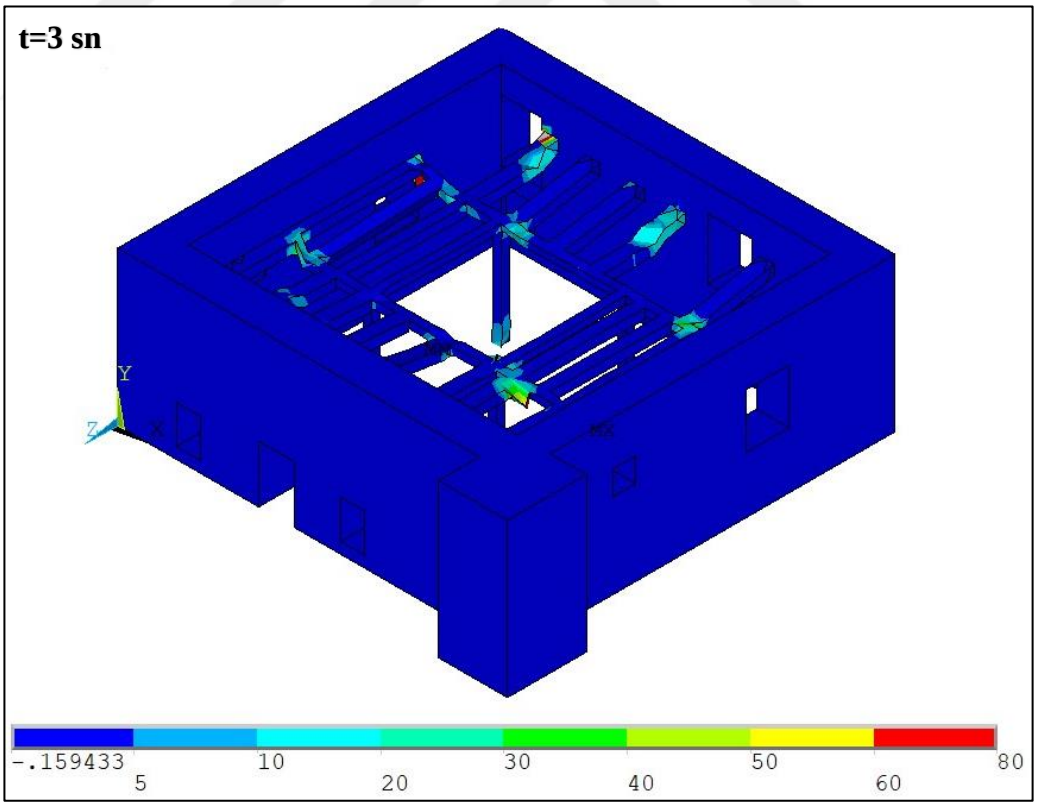


(b)

Şekil 8.69. Yeğenağa Camii hasar mekanizması (a),(b),(c), (d), (e),(f)

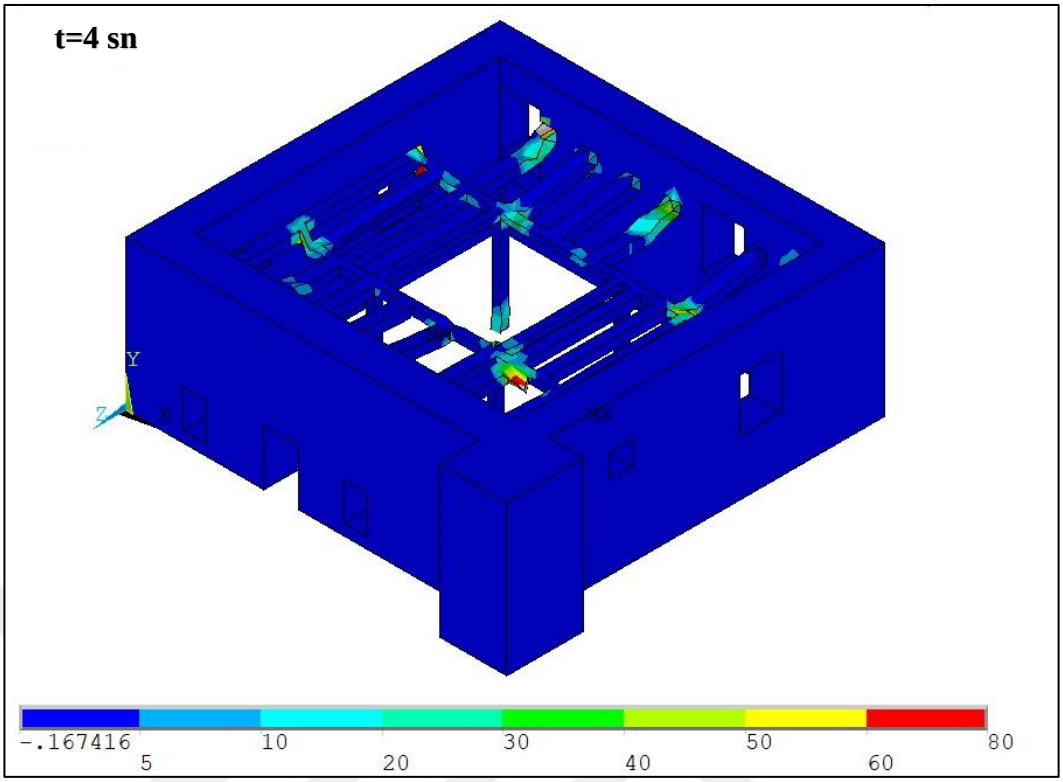


(c)

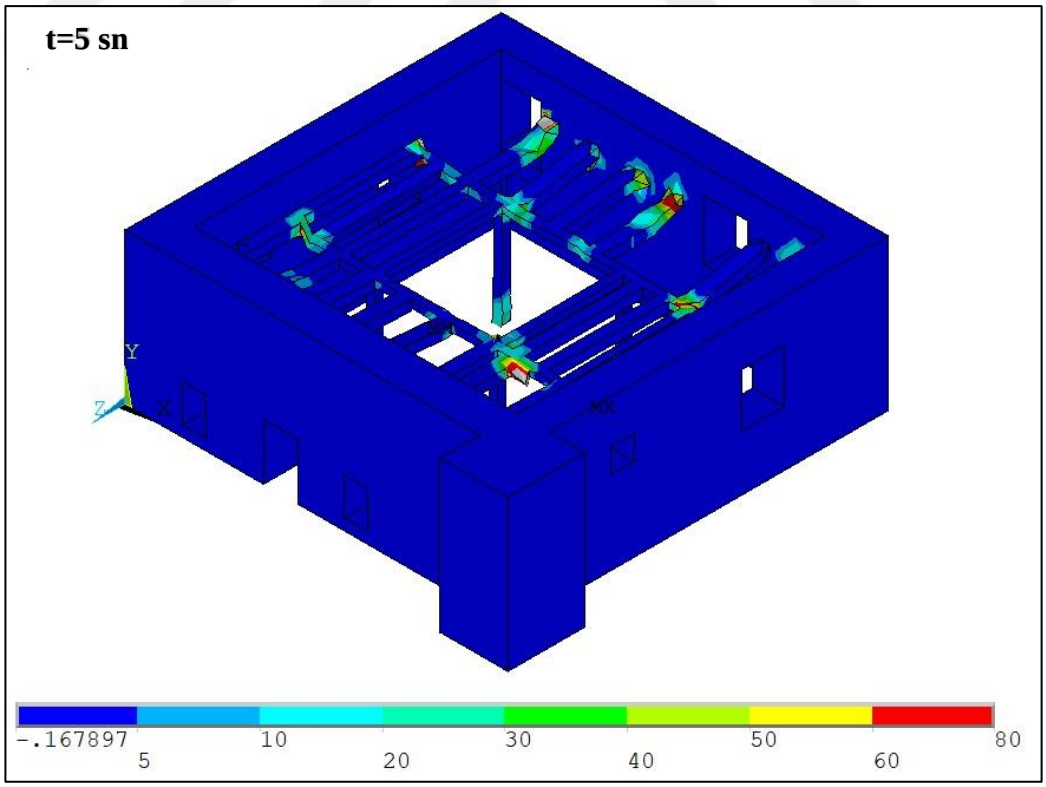


(d)

Şekil 8.69. (devam)

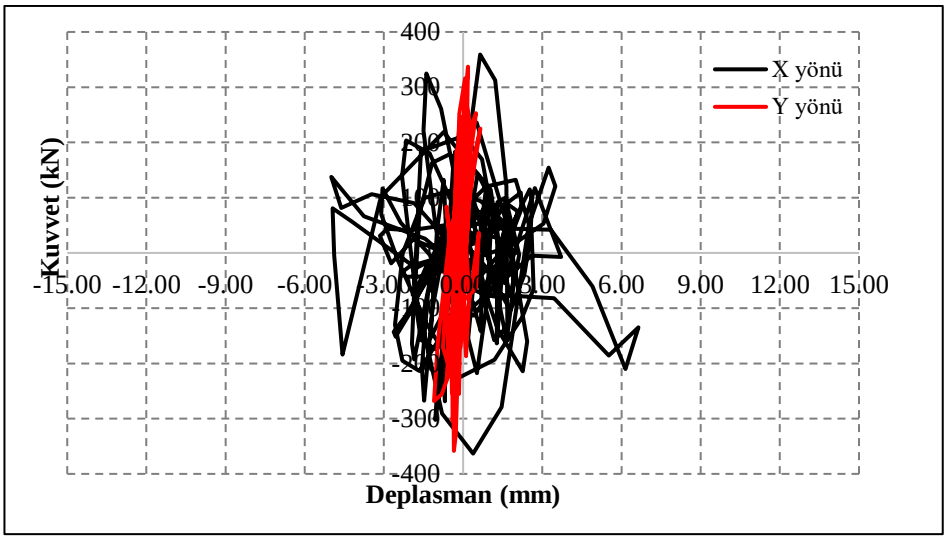


(e)



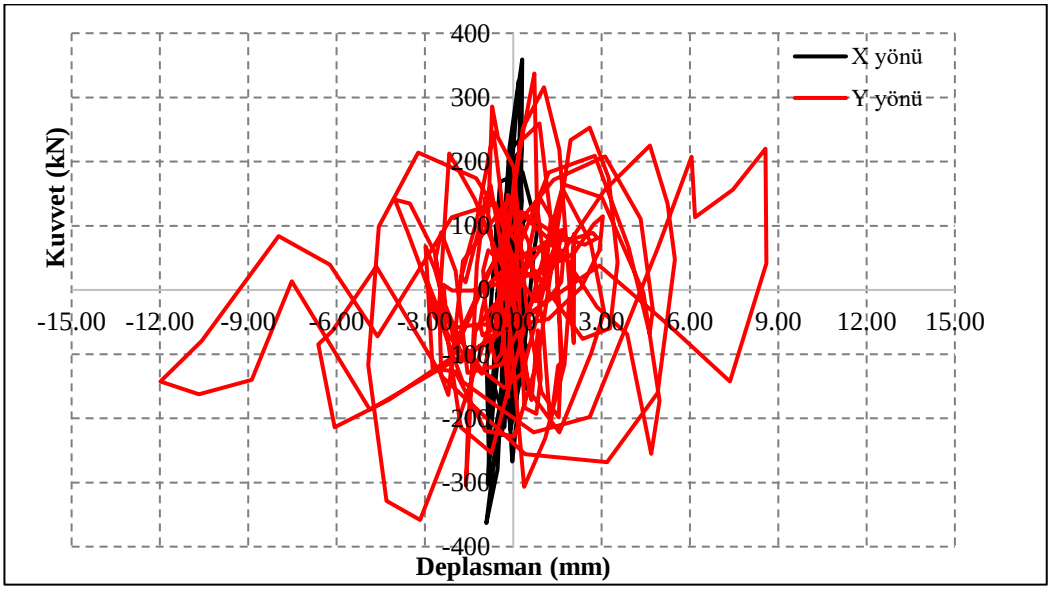
(f)

Şekil 8.69. (devam)

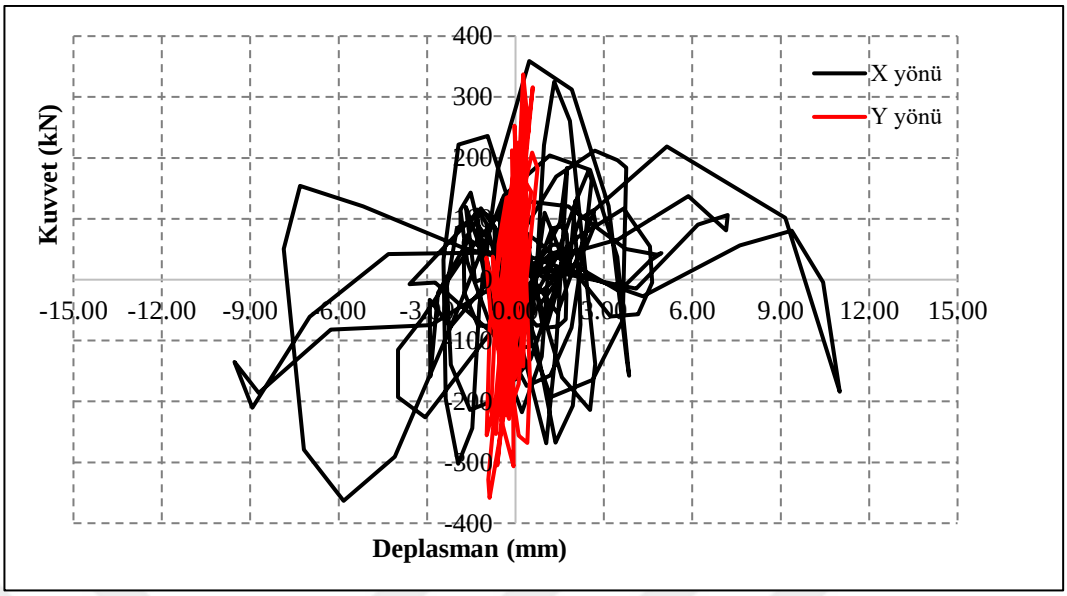


Şekil 8.70. Yeğenağa Camii 1859 depremi ivme kaydı ile elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

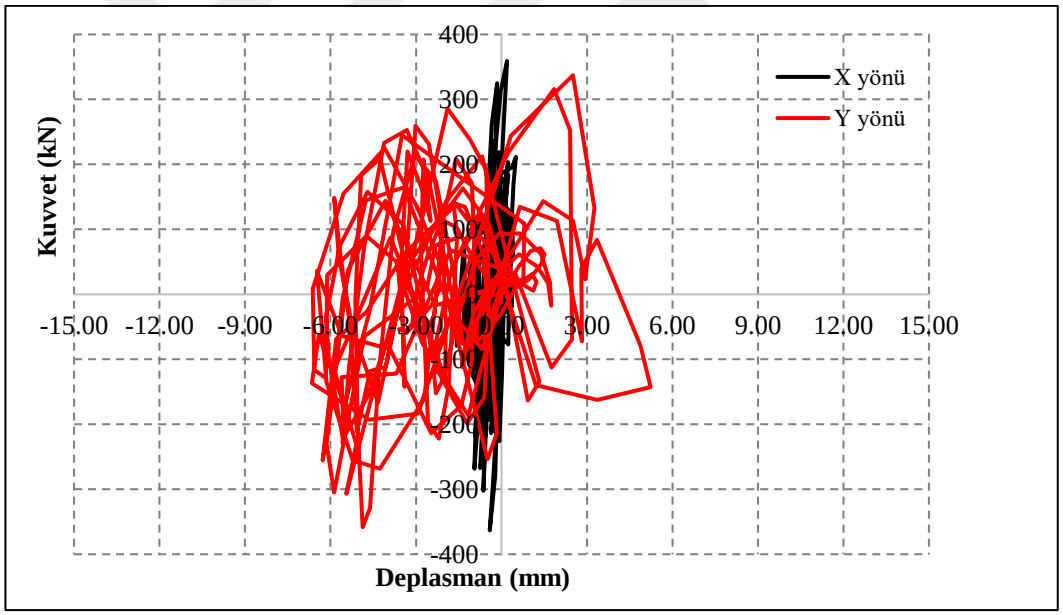
Şekil 8.70.'te caminin tepe noktasındaki taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizildikten sonra yapının duvar köşeleri ve duvar ortalarının taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Bu eğriler çizilirken dört duvar köşeleri ve duvarların orta üst düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler elde edilmiştir. Bu yer değiştirmeler ile taban kesme kuvvetleri kullanılarak eğriler oluşturulmuştur. Şekil 8.71.'de güney duvar, Şekil 8.72.'de doğu duvar, Şekil 8.73.'te kuzey duvar ve Şekil 8.74.'te batı duvar için taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir.



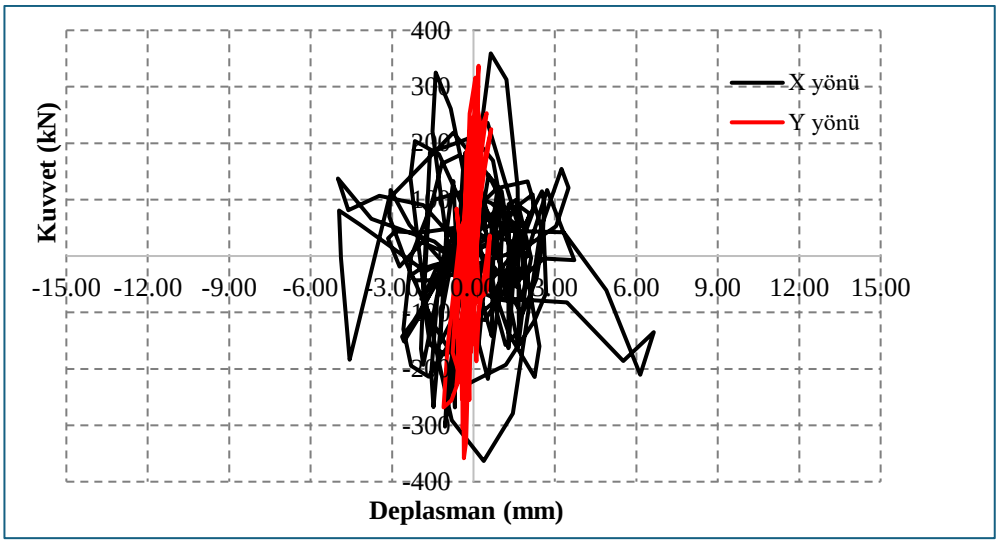
Şekil 8.71. Yeğenağa Camii güney duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.72. Yeğenağa Camii doğu duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

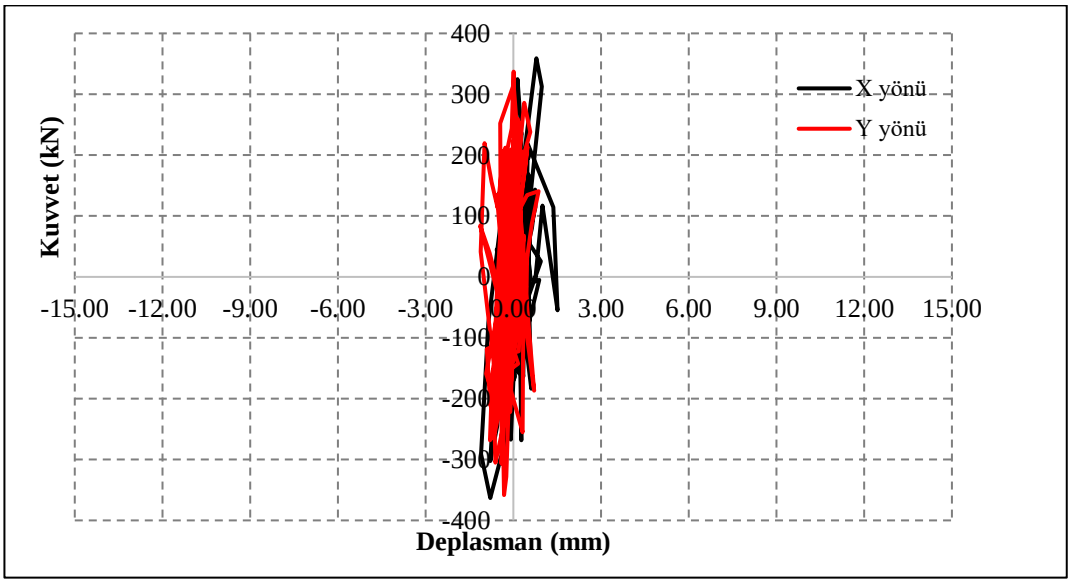


Şekil 8.73. Yeğenağa Camii kuzey duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

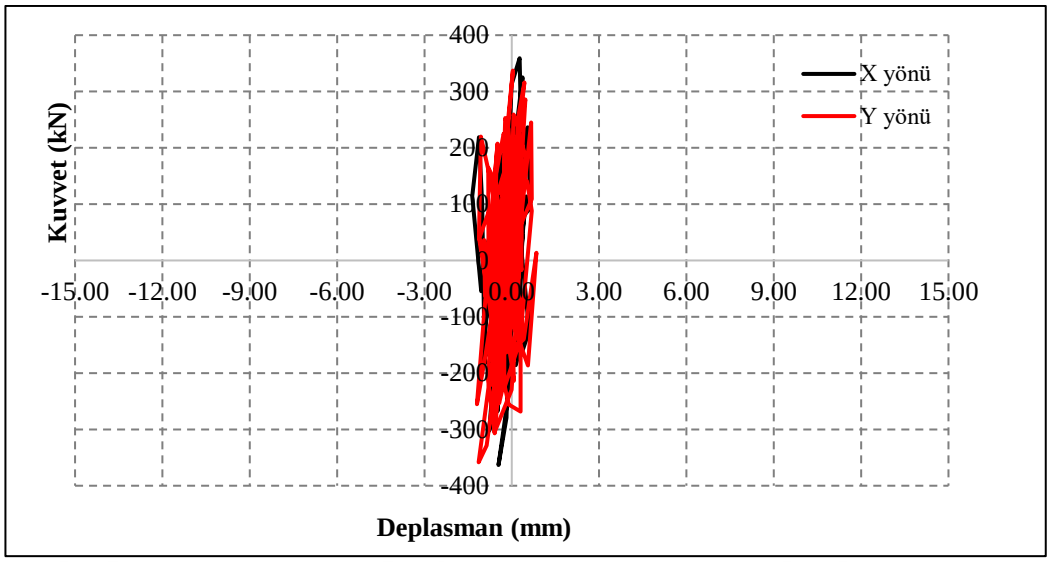


Şekil 8.74. Yeğenağa Camii batı duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

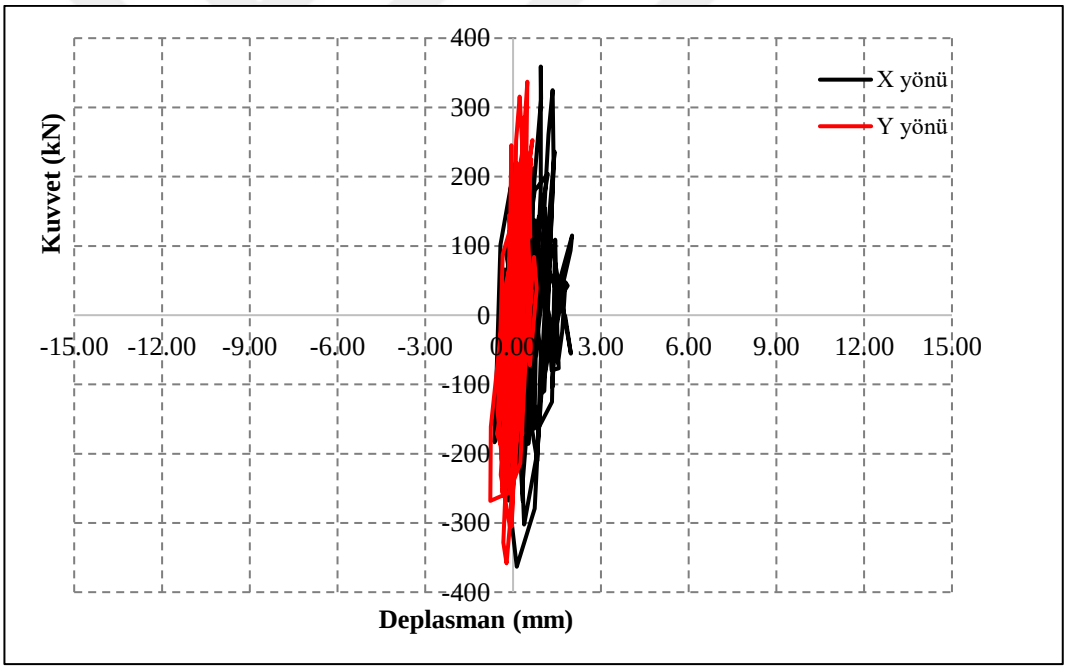
Duvar eğrileri oluşturulduktan sonra caminin köşe noktalarının taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Cami köşe noktalarına denk gelen düğüm noktalarından veri alınarak eğriler oluşturulmuştur. Duvar eğrileri oluşturulduktan sonra caminin köşe noktalarının taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Şekil 8.75.'te güneybatı köşesi, Şekil 8.76.'da güneydoğu köşesi, Şekil 8.77.'de kuzeybatı köşesi ve Şekil 8.78.'de kuzeydoğu köşesi için taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri oluşturulmuştur.



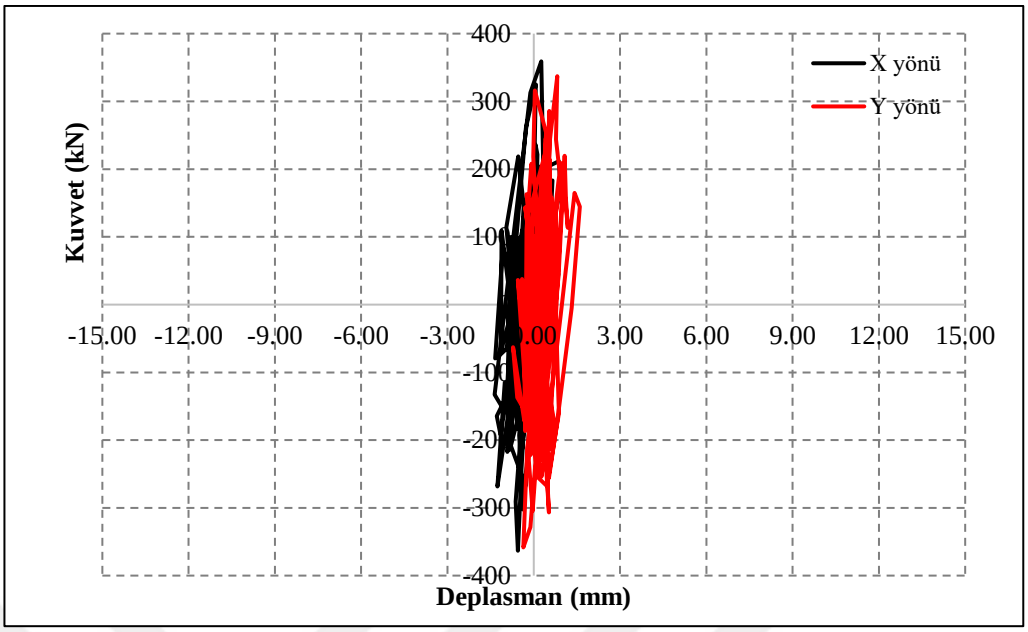
Şekil 8.75. Yeğenağa Camii güneybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.76. Yeğenağa Camii güneydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.77. Yeğenağa Camii kuzeybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

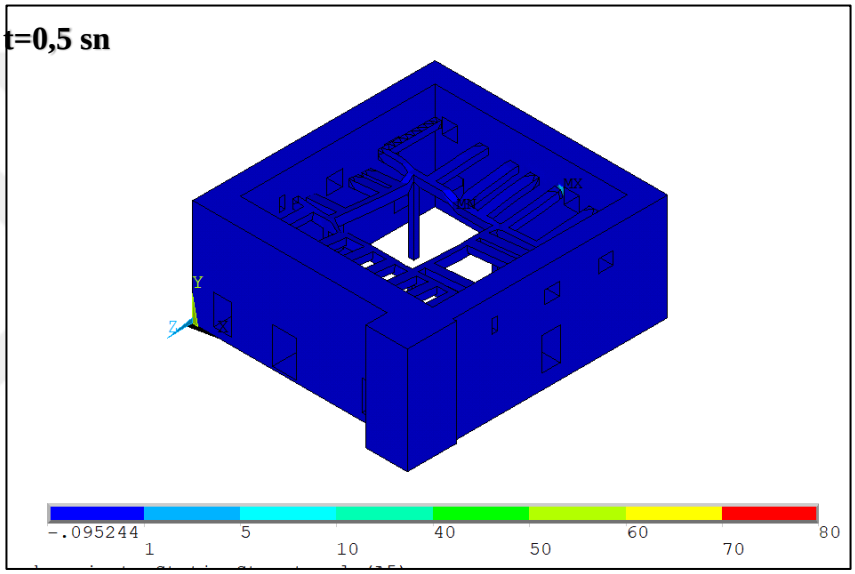


Şekil 8.78. Yeğenağa Camii kuzeydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

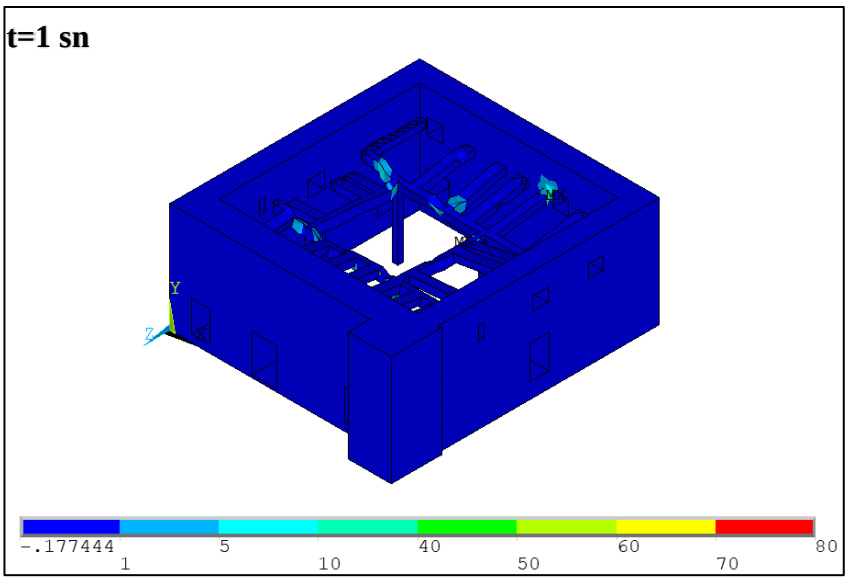
Yeğenağa Camii'nin 2 Haziran 1859 depreminde arşivlerde net bir hasar kaydı bulunmamakla birlikte, caminin ağır hasar alan camilere yakın bir konumda olması ve ağır hasar alan mahallelerin birinde olması caminin hasar alma ihtimalini düşündürmüştür. Cami duvar yüksekliği 5.400 mm'dir. Caminin x ve y doğrultularındaki maksimum yanal deplasmanları sırasıyla 6,64 mm ve 0,20mm'dir. TYİDYRK (2017)'de belirtilen yığma yapıların performans düzey limitlerine göre caminin kat yanal öteleme oranları sırasıyla %0,123 ve %0,003'tür. Bu hesaplama sonucunda TYİDYRK (2017)'de belirtilen performans limitlerine göre cami sınırlı hasar (SH) durumundadır ve yer hareketi süresi boyunca bu sınırda kalmıştır. Cami köşe noktalarında ise hasarın 2 mm mertebesinde olduğu analiz sonuçlarında tespit edilmiştir. Analiz sonucunda caminin yapısal bütünlüğünü etkileyecek bir hasar ortaya çıkmamıştır. Yeğenağa Camii'nin 1859 depreminde önemli ölçüde hasar almadığı doğrulanmıştır. Ayrıca hasar kısımlarının ahşap kalas döşemelerinde ve bu döşemelerin duvarlarla birleştiği noktalarda olduğu görülmüştür.

8.2.8. Kadana Camii dinamik analiz sonuçları

Yeğenağa Camii'nin deprem analizinin tamamlanmasının ardından diğer basit planlı cami olan Kadana Camii'ne geçilmiştir. Kadana Cami'nin hasar mekanizması Şekil 8.79.'da gösterilmiştir. Caminin 0-5 saniye arasında analiz sonuçları ve yer değiştirmeleri incelenmiştir. Şekil 8.80.'de caminin üst kısmına denk gelen tepe noktasındaki X ve Y doğrultusundaki deplasmanlardan faydalanarak caminin taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi çizilmiştir.

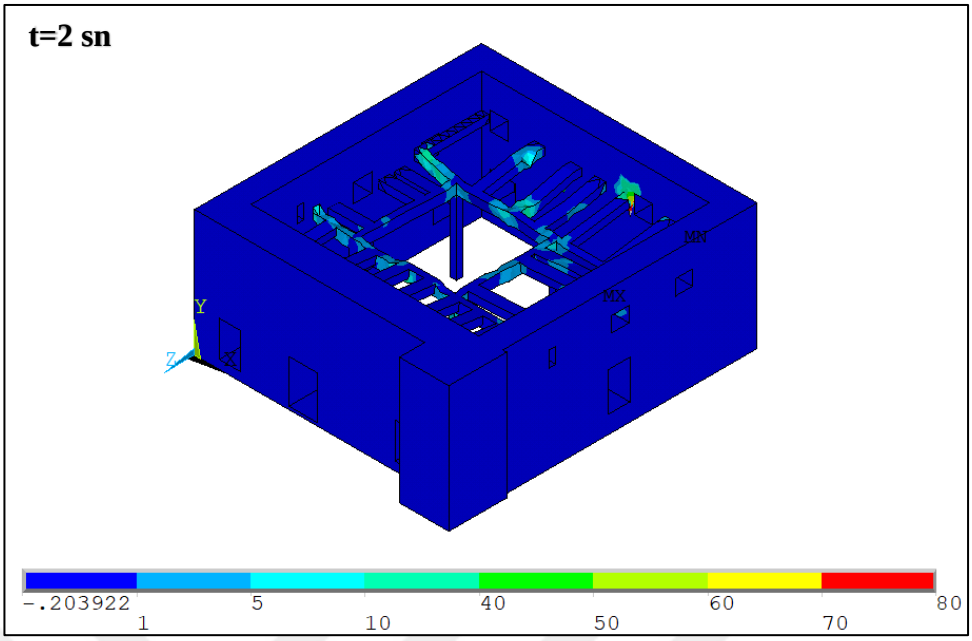


(a)

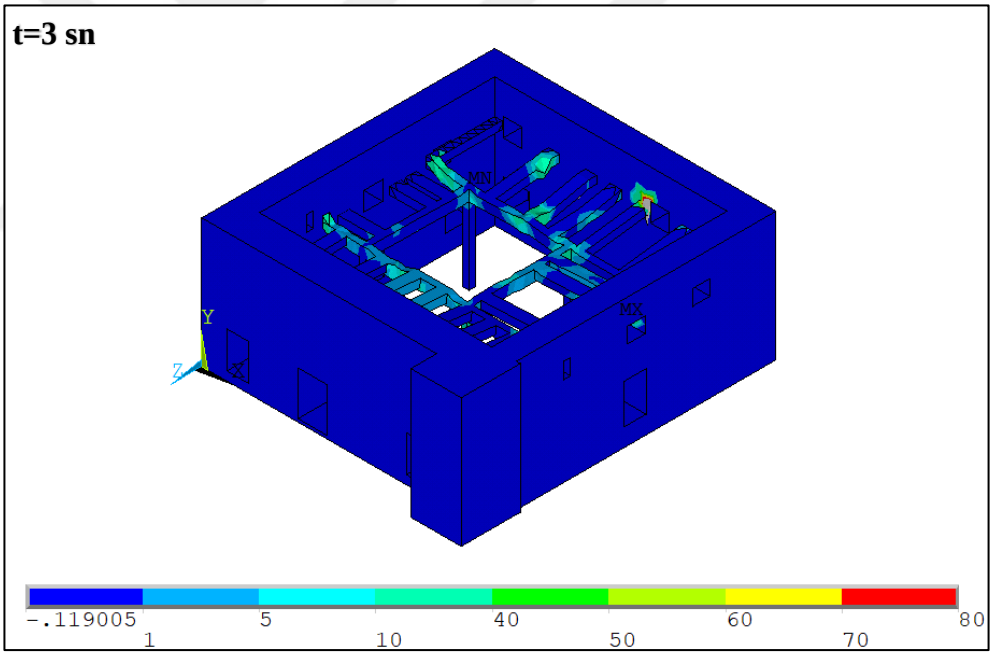


(b)

Şekil 8.79. Kadana Camii hasar mekanizması (a), (b), (c), (d), (e), (f)

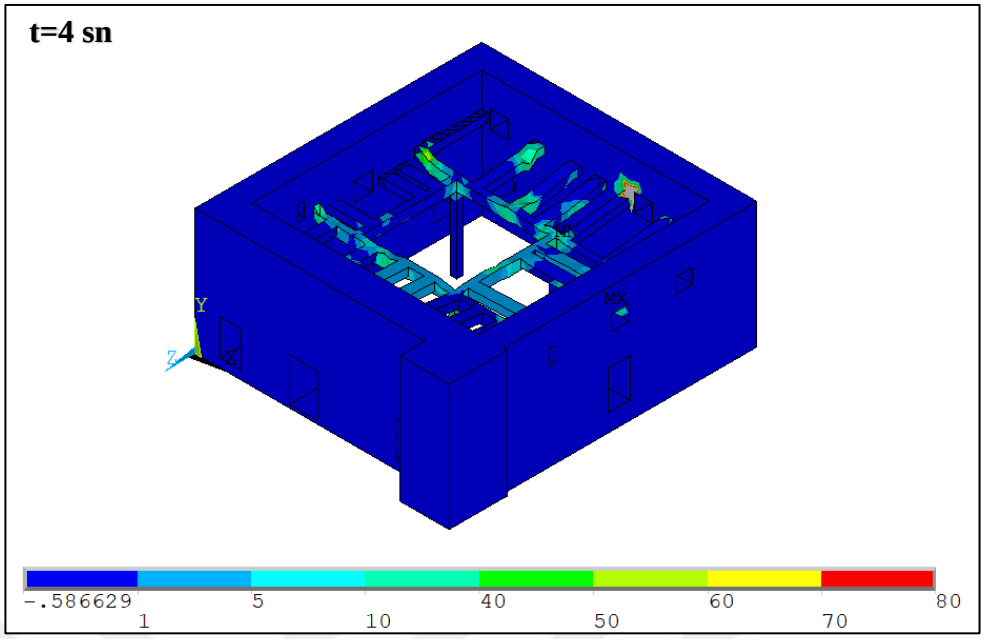


(c)

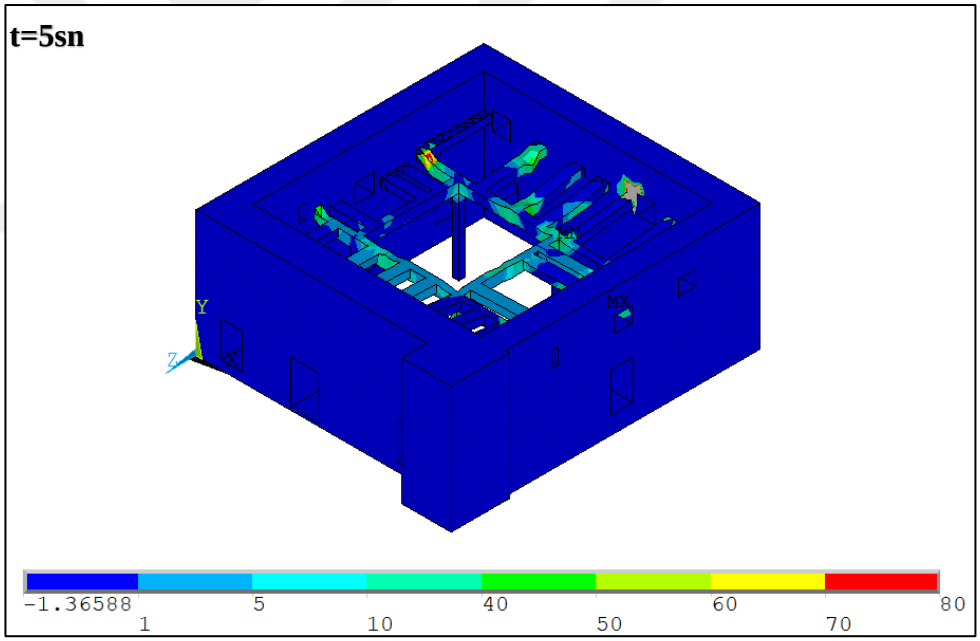


(d)

Şekil 8.79.(devam)

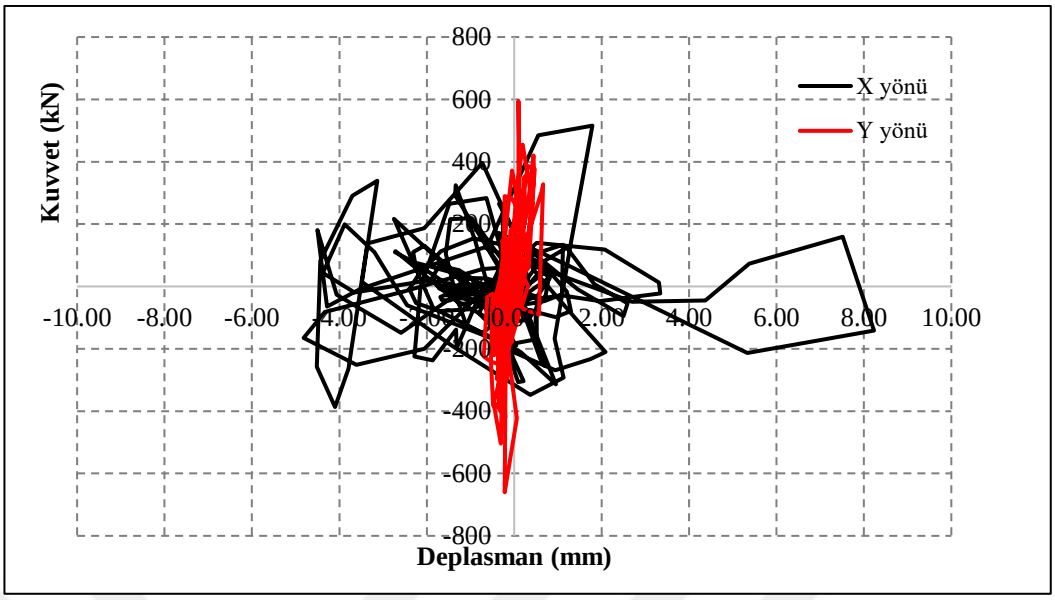


(e)



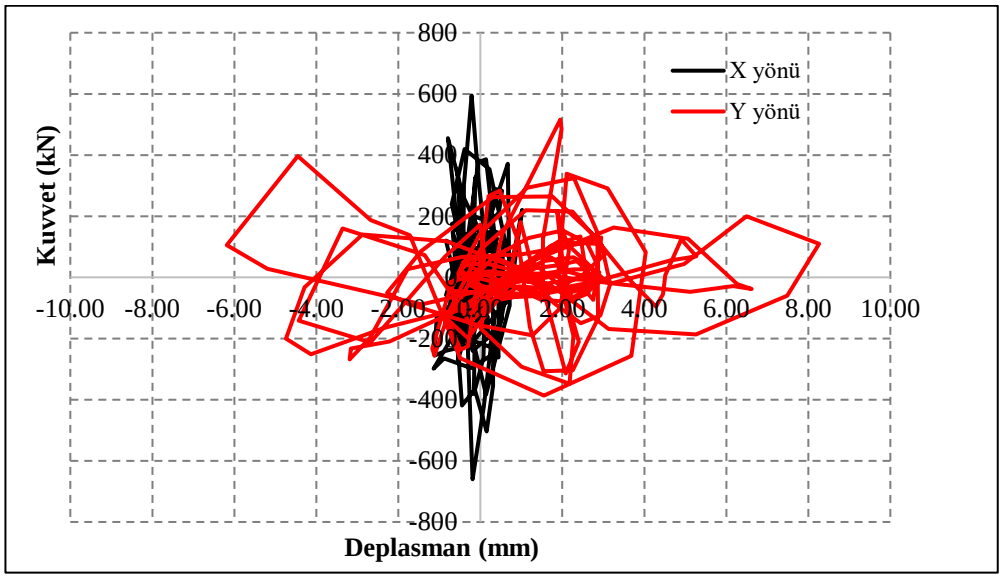
(f)

Şekil 8.79. (devam)

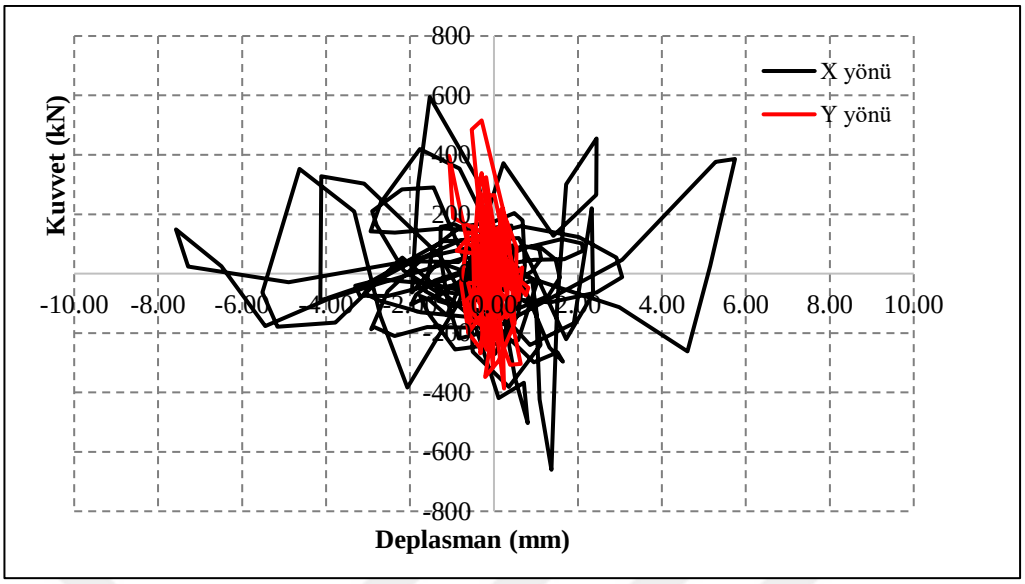


Şekil 8.80. Kadana Camii 1859 depremi ivme kaydı ile elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi.

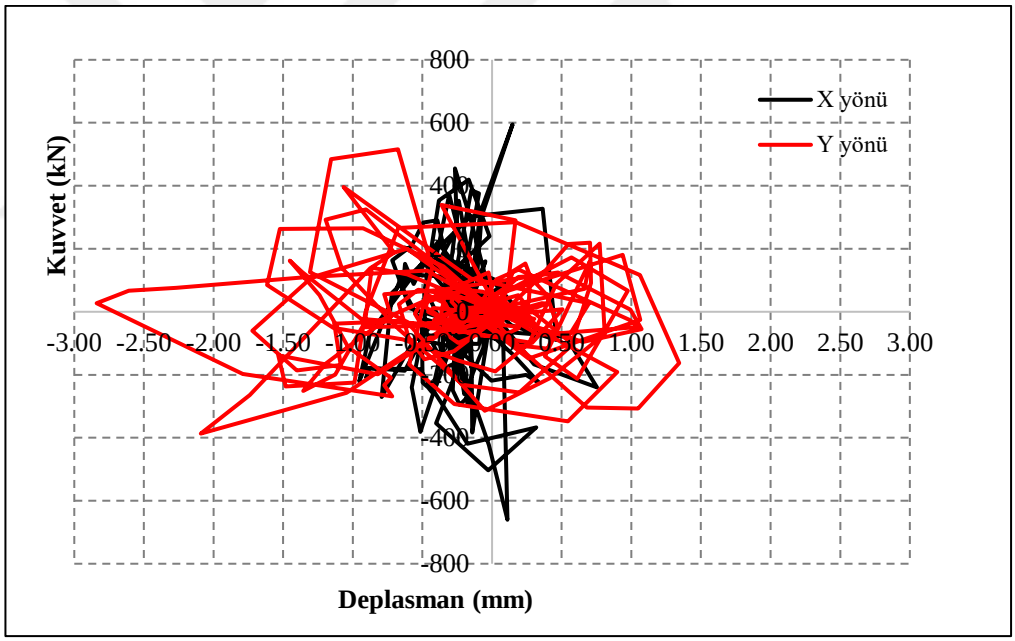
Şekil 8.80.'de caminin tepe noktasındaki taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizildikten sonra yapının duvar köşeleri ve duvar ortalarının taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Bu eğriler çizilirken dört duvar köşeleri ve duvarların orta üst düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler elde edilmiştir. Bu yer değiştirmeler ile taban kesme kuvvetleri kullanılarak eğriler oluşturulmuştur. Şekil 8.81.'de güney duvar, Şekil 8.82.'de doğu duvar, Şekil 8.83.'te kuzey duvar ve Şekil 8.84.'te batı duvar için taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir.



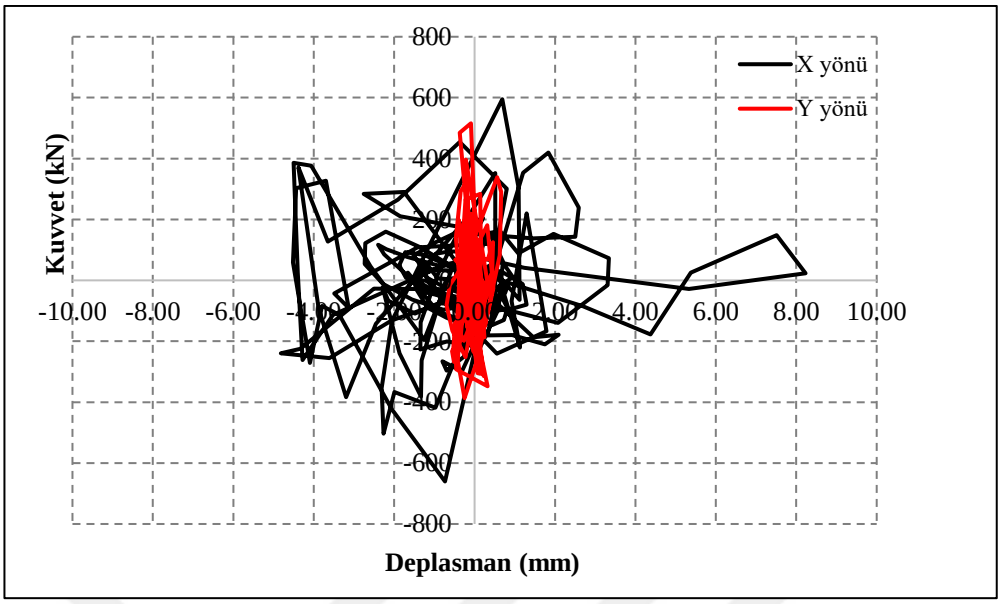
Şekil 8.81. Kadana Camii güney duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.82. Kadana Camii doğu duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

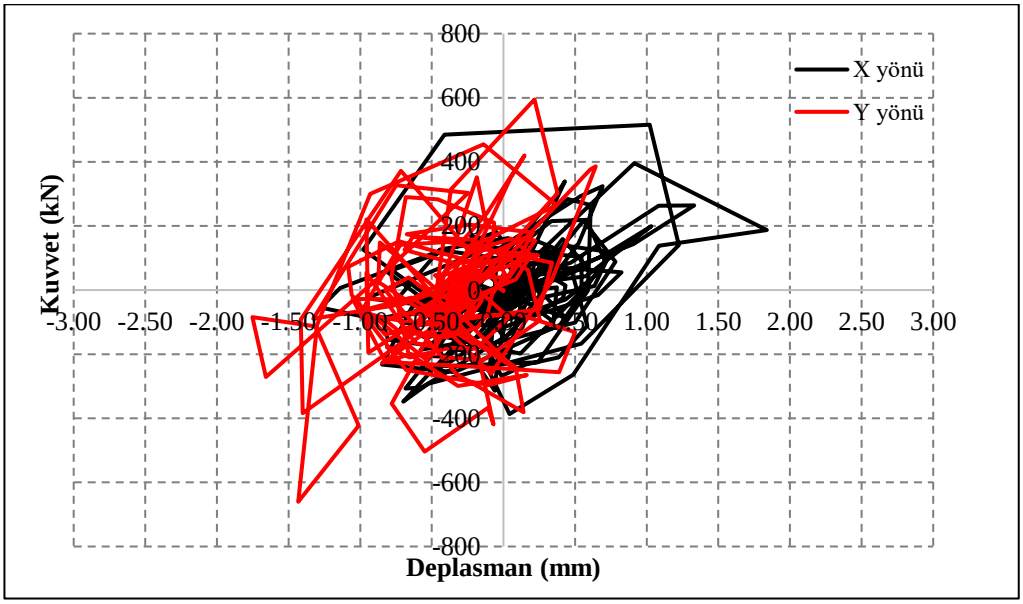


Şekil 8.83. Kadana Camii kuzey duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

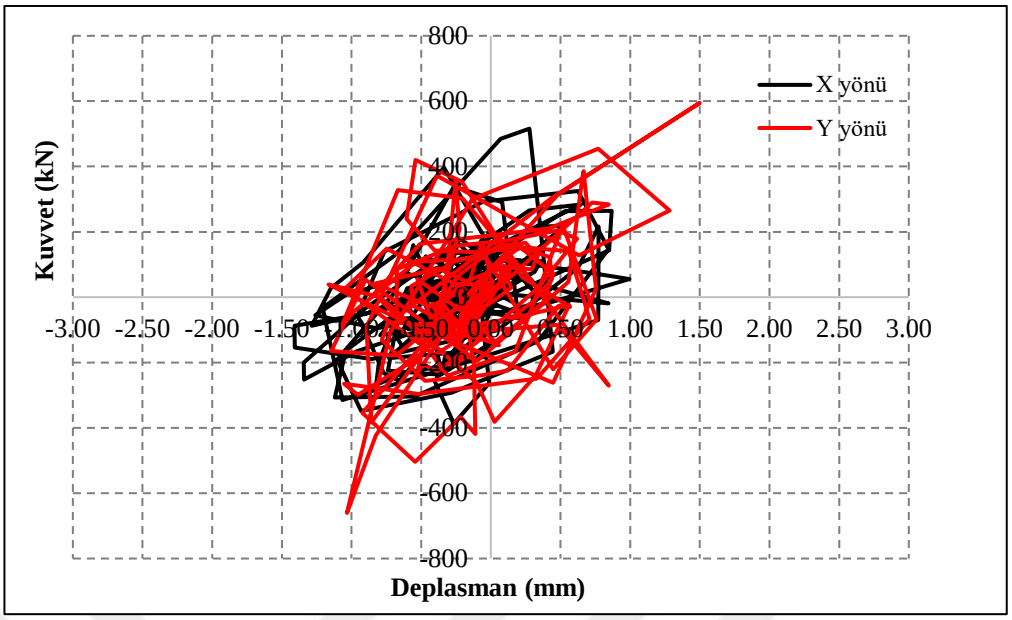


Şekil 8.84. Kadana Camii batı duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

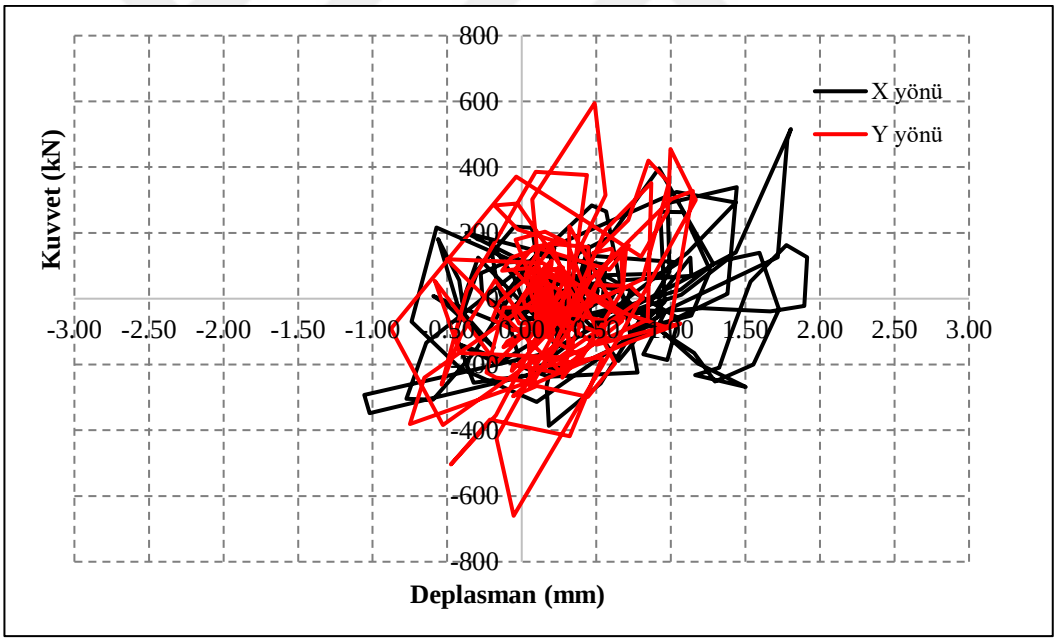
Duvar eğrileri oluşturulduktan sonra caminin köşe noktalarının taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Cami köşe noktalarına denk gelen düğüm noktalarından veri alınarak eğriler oluşturulmuştur. Şekil 8.85.'te güneybatı köşesi, Şekil 8.86.'da güneydoğu köşesi, Şekil 8.87.'de kuzeybatı köşesi ve Şekil 8.88.'de kuzeydoğu köşesi için taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri oluşturulmuştur.



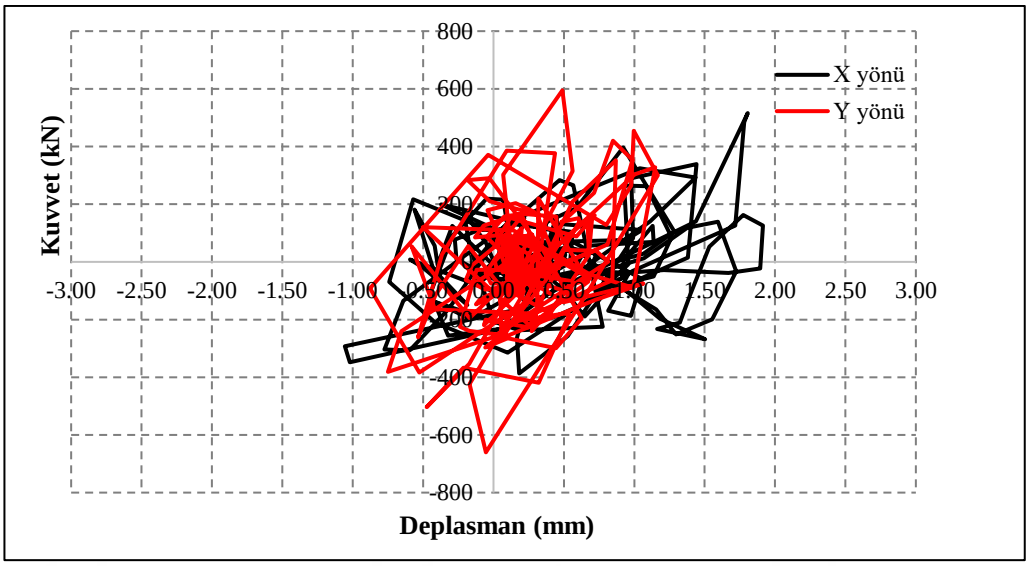
Şekil 8.85. Kadana Camii güneybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.86. Kadana Camii güneydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.87. Kadana Camii kuzeybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

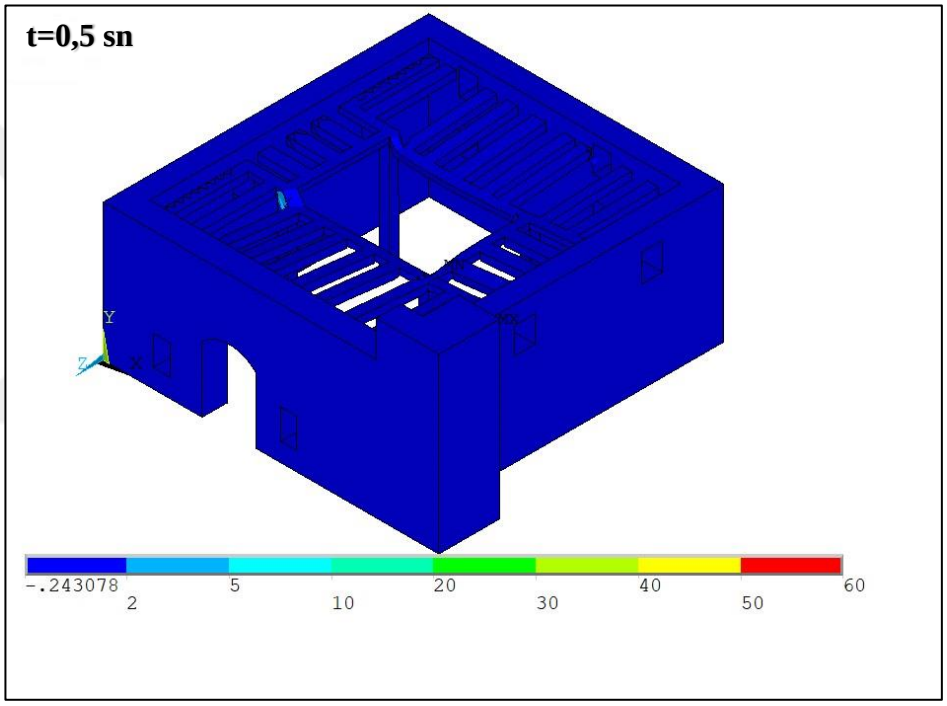


Şekil 8.88. Kadana Camii kuzeydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

Kadana Camii'nin 2 Haziran 1859 depreminde arşivlerde net bir hasar kaydı bulunmamakla birlikte, caminin ağır hasar alan camilere yakın bir konumda olması ve ağır hasar alan mahallerden birinde olması caminin hasar alma ihtimalini düşündürmüştür. Caminin yüksekliği 5.200 mm 'dir. Analiz sonuçları incelendiğinde, caminin x ve y doğrultuları tepe noktası maksimum yanal deplasman değerleri sırasıyla 8 mm ve 0,60 mm'dir. TYİDYRK (2017)'de belirtilen yığma yapıların performans düzey limitlerine göre x ve y doğrultuları için caminin kat yanal öteleme oranları sırasıyla %0,153 ve %0,011 dir.. Bu hesaplama sonucunda TYİDYRK (2017)'de belirtilen performans limitlerine göre cami sınırlı hasar (SH) durumundadır ve yer hareketi süresi boyunca bu sınırda kalmıştır. Cami köşe noktalarında ise hasarın 1-2 mm mertebesinde olduğu analiz sonuçlarında tespit edilmiştir. Analiz sonucunda caminin yapısal bütünlüğünü etkileyecek bir hasar ortaya çıkmamıştır. Ayrıca hasar kısımlarının ahşap kalas döşemelerinde ve bu döşemelerin duvarlarla birleştiği noktalarda olduğu görülmüştür. Caminin kuvvet kapasitesi ise -600 kN ile 600 kN arasında değişmektedir. Sonuç olarak Kadana Camii'nin 2 Haziran 1859 depreminde önemli ölçüde hasar almadığı doğrulanmıştır.

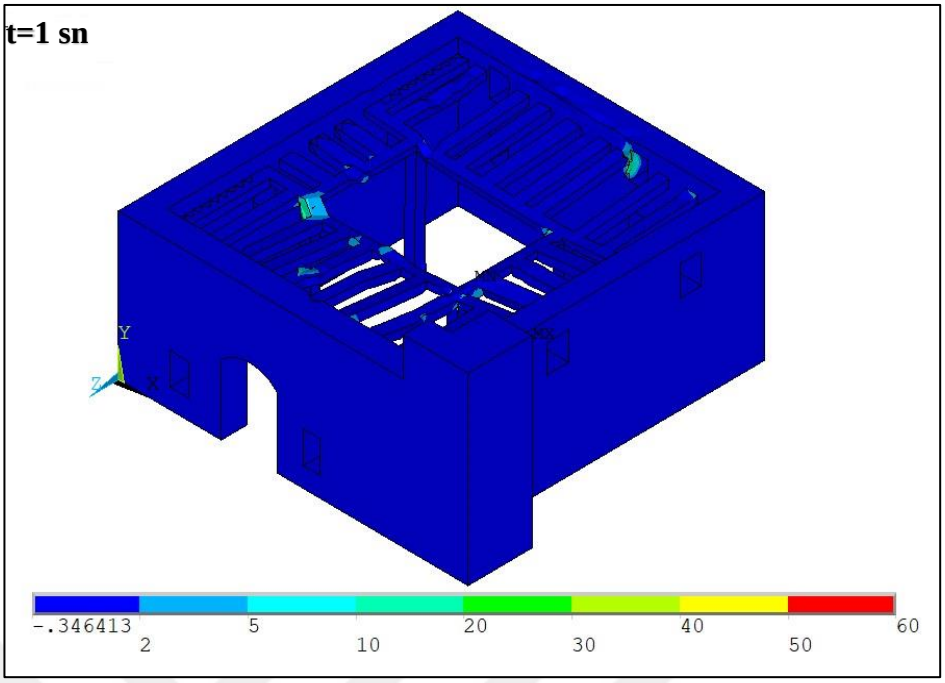
8.2.9. Hacıcuma Camii dinamik analiz sonuçları

Kadana Camii'nin deprem analizinin tamamlanmasının ardından diğer basit planlı cami olan Hacıcuma Camii'ne geçilmiştir. Hacıcuma Camii'nin hasar mekanizmaları Şekil 8.89.'da gösterilmiştir. Caminin 0-5 saniye arasında analiz sonuçları ve yer değiştirmeleri incelenmiştir. Şekil 8.90.'da caminin üst kısmına denk gelen tepe noktasındaki X ve Y doğrultusundaki deplasmanlardan faydalanarak caminin taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi çizilmiştir.

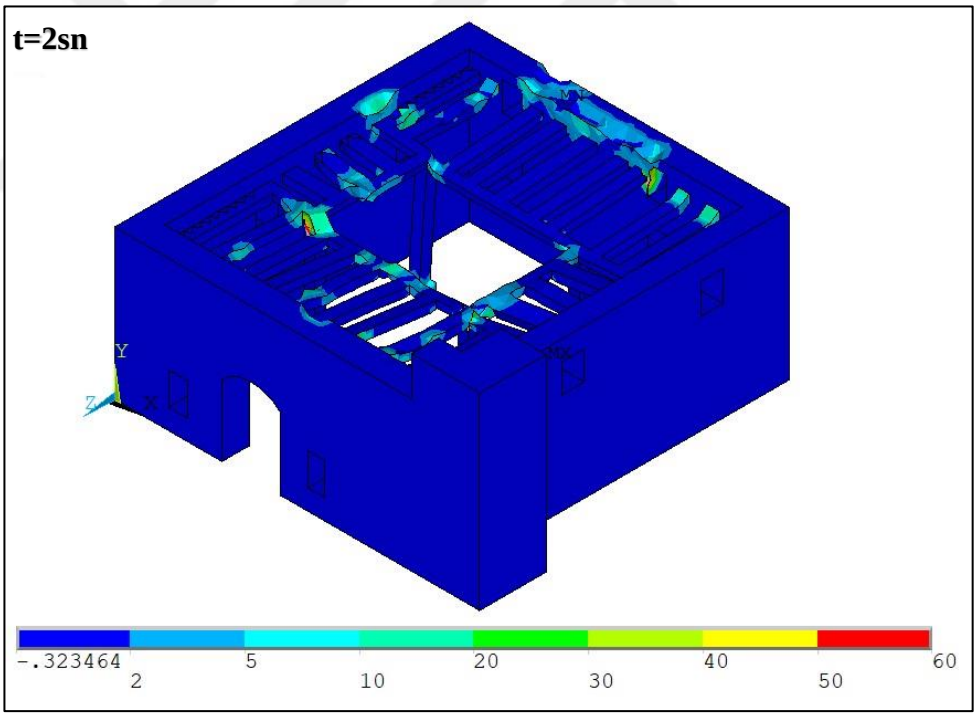


(a)

Şekil 8.89. Hacıcuma Camii hasar mekanizması (a),(b),(c),(d),(e),(f)

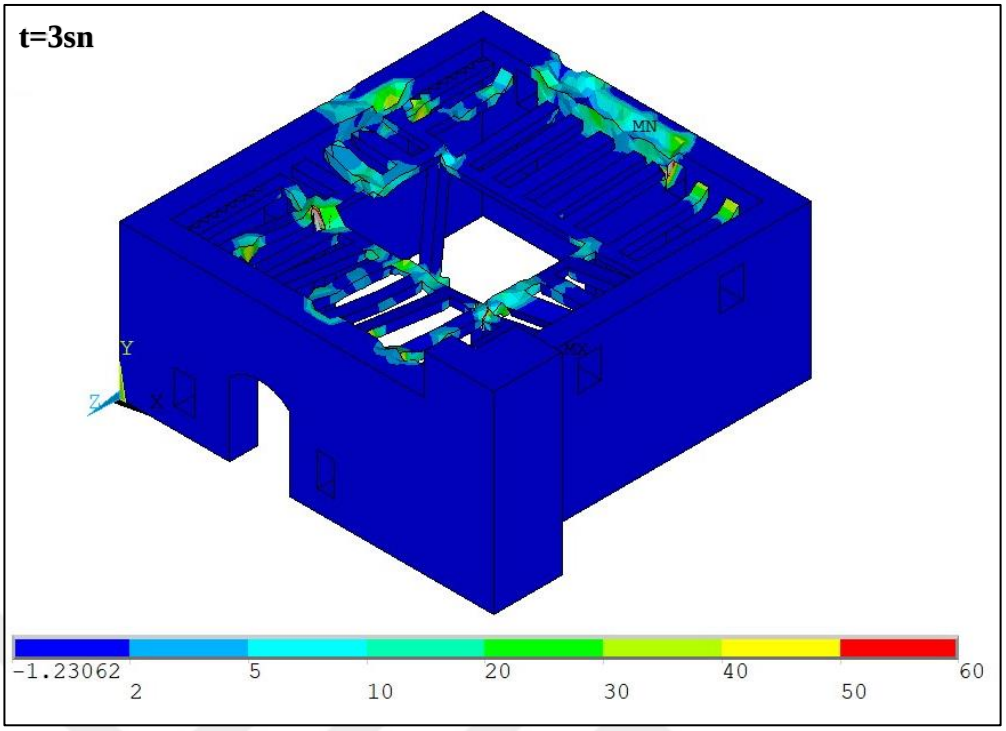


(b)

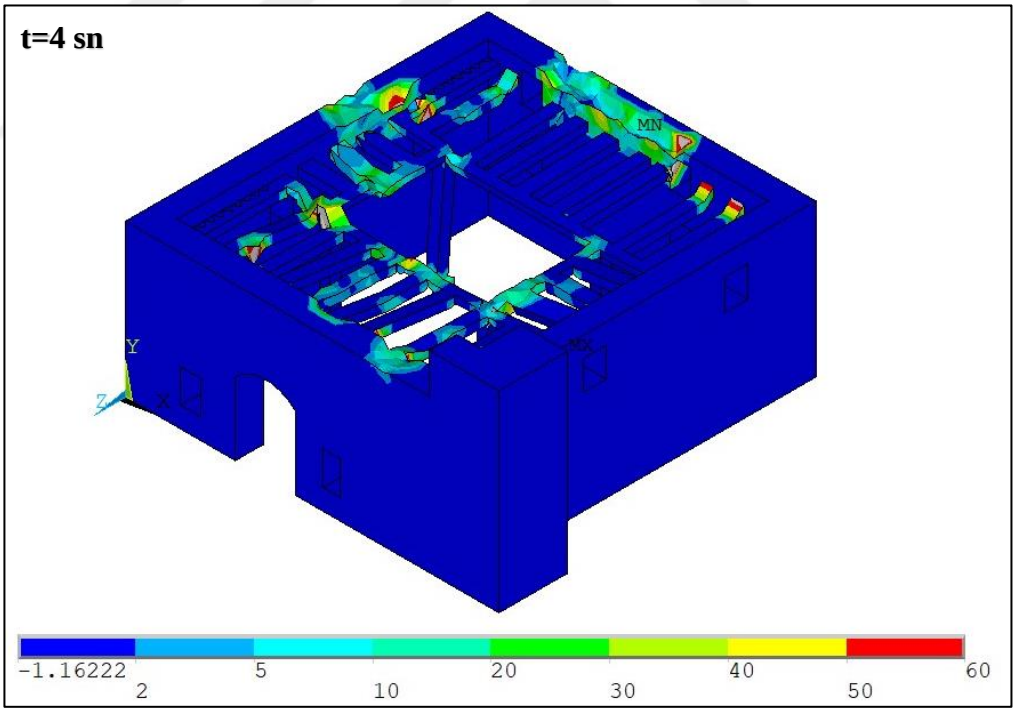


(c)

Şekil 8.89.(devam)

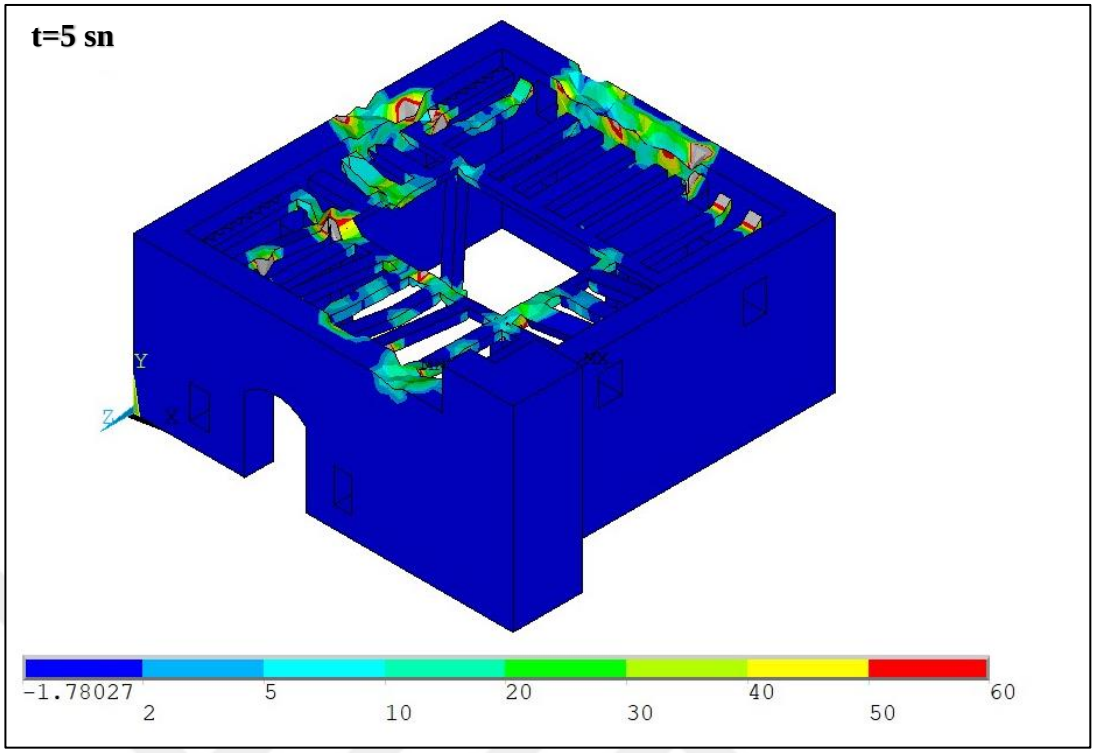


(d)



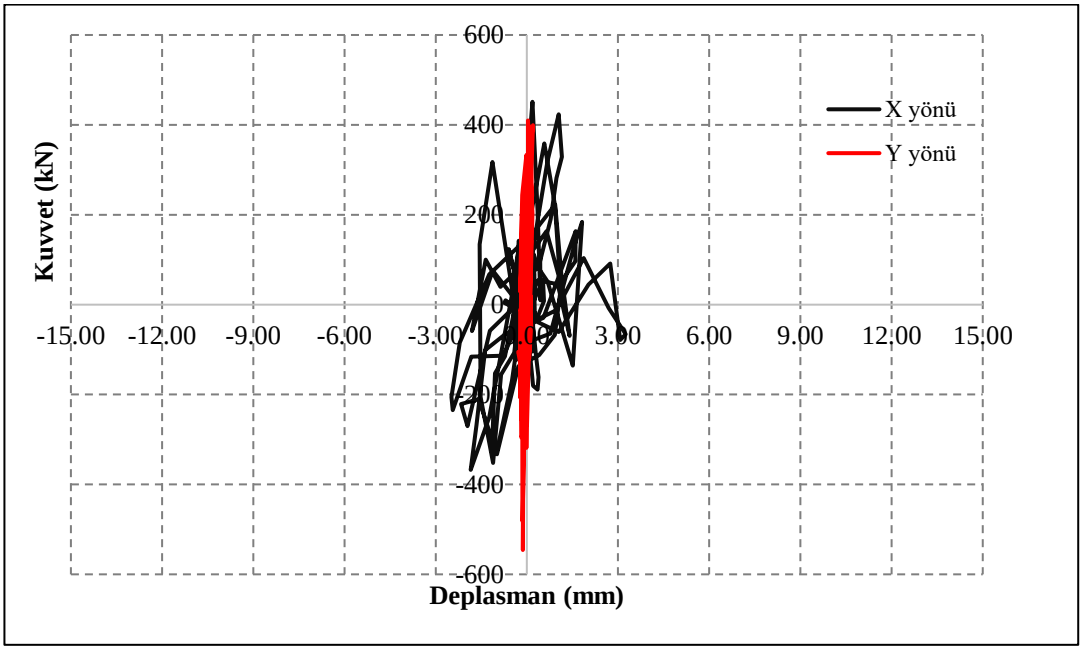
(e)

Şekil 8.89.(devam)



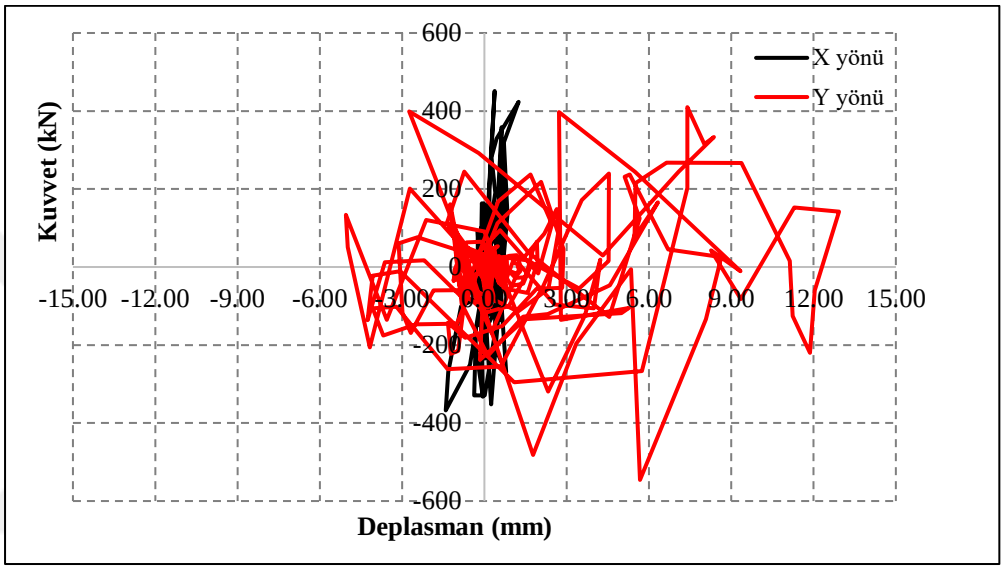
(f)

Şekil 8.89. (devam)

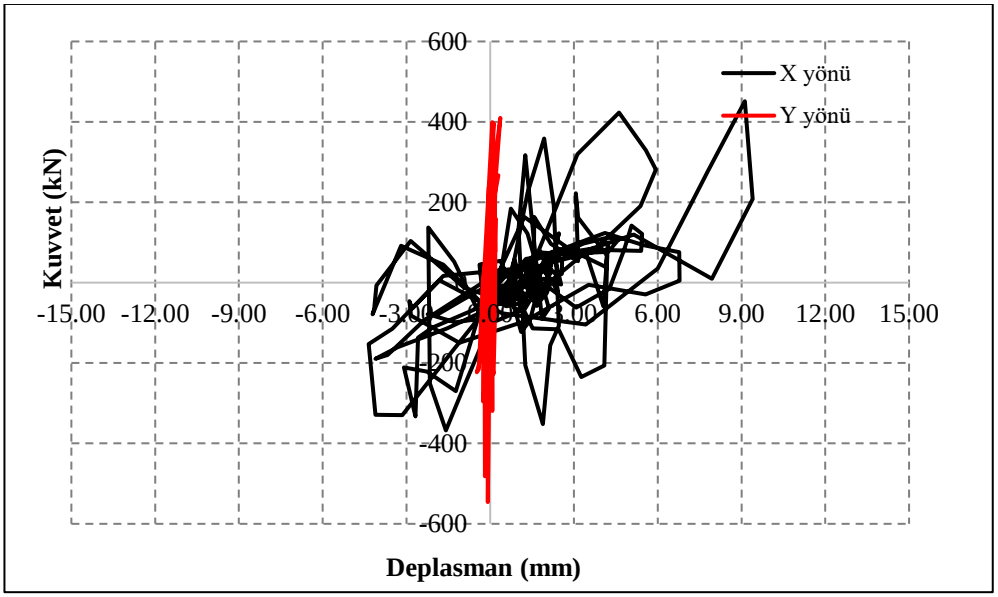


Şekil 8.90. Hacıcuma Camii 1859 depremi ivme kaydı ile elde edilen taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi.

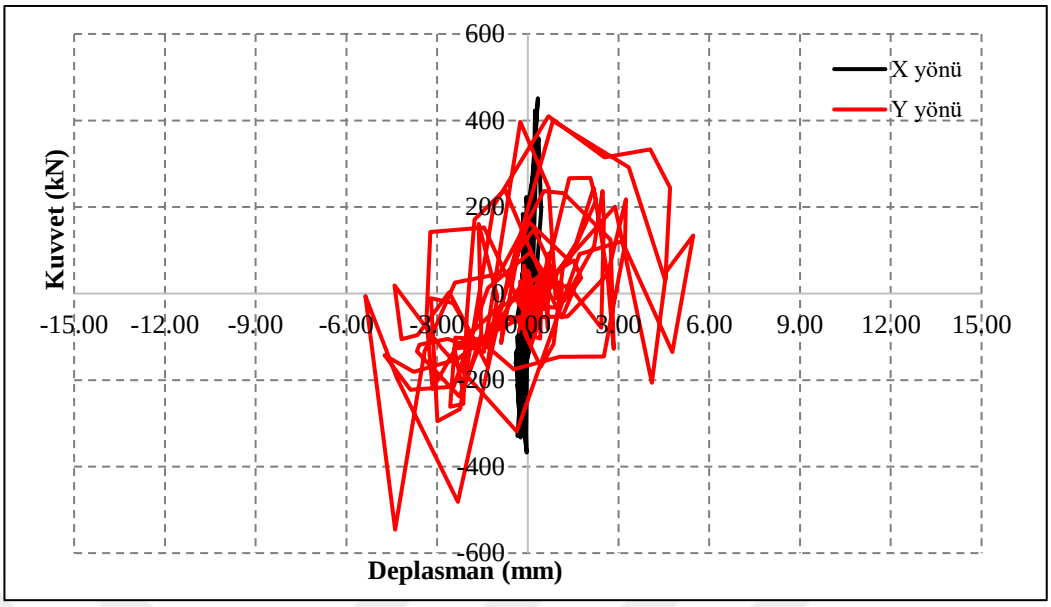
Şekil 8.90.'da caminin tepe noktasındaki taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizildikten sonra yapının duvar köşeleri ve duvar ortalarının taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Bu eğriler çizilirken dört duvar köşeleri ve duvarların orta üst düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler elde edilmiştir. Bu yer değiştirmeler ile taban kesme kuvvetleri kullanılarak eğriler oluşturulmuştur. Şekil 8.91.'de güney duvar, Şekil 8.92.'de doğu duvar, Şekil 8.93.'te kuzey duvar ve Şekil 8.94.'te batı duvar için taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir.



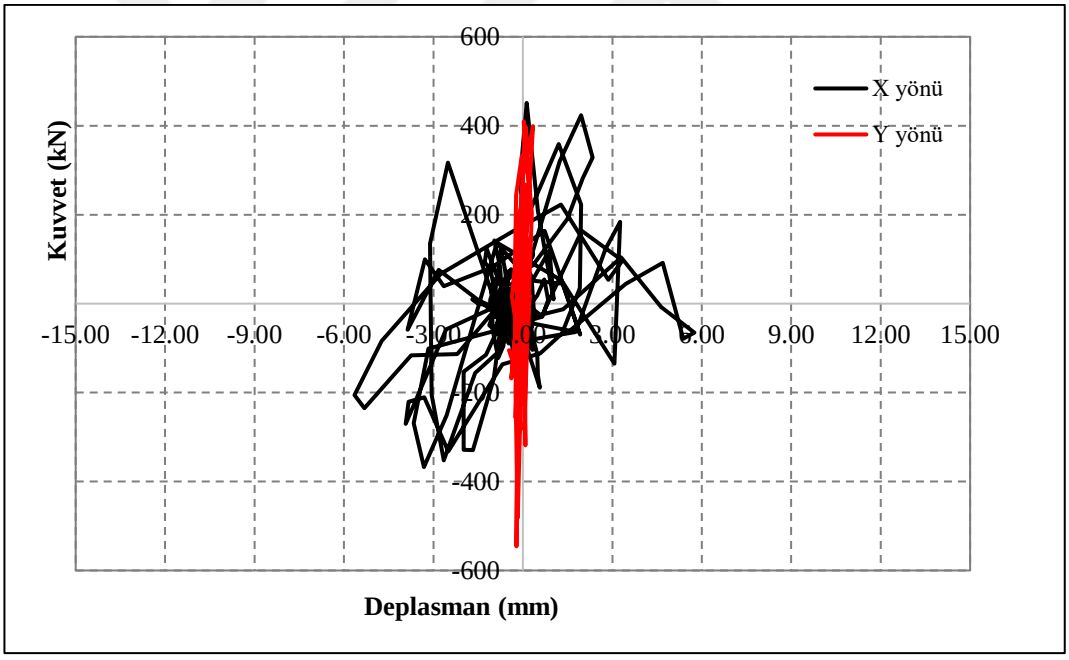
Şekil 8.91. Hacıcuma Camii güney duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.92. Hacıcuma Camii doğu duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

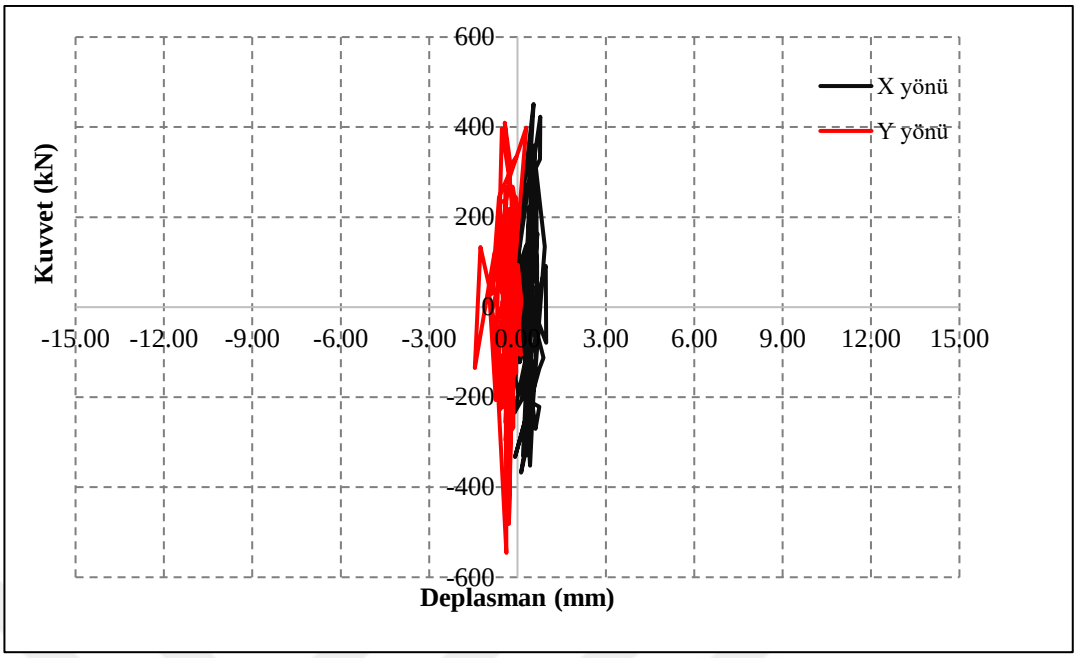


Şekil 8.93. Hacıcuma Camii kuzey duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

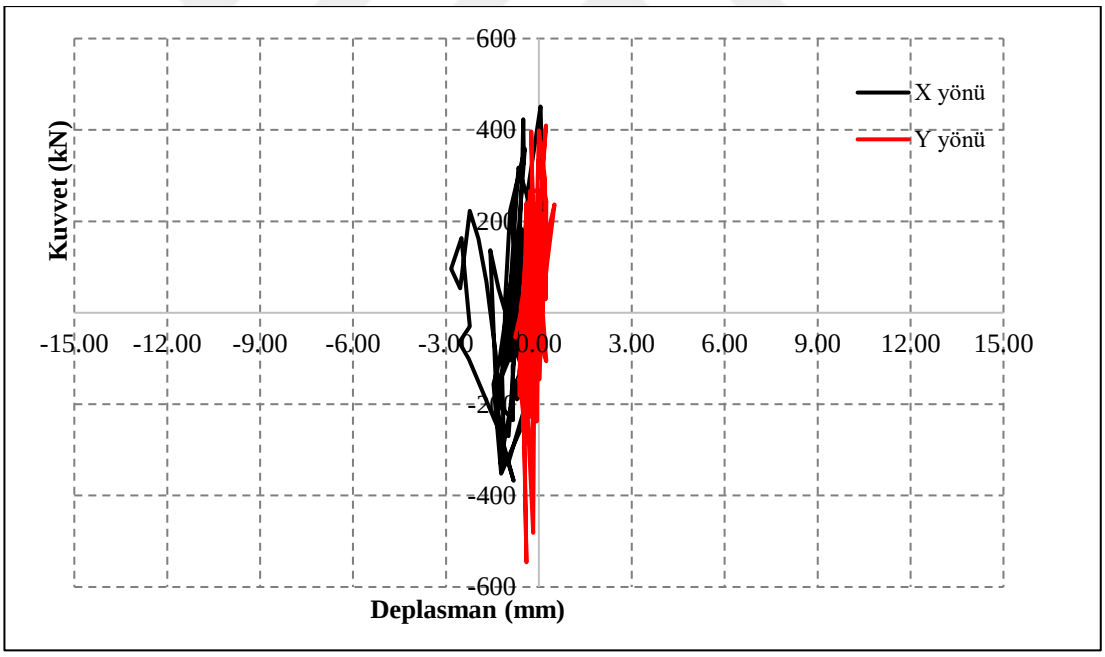


Şekil 8.94. Hacıcuma Camii batı duvarı yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

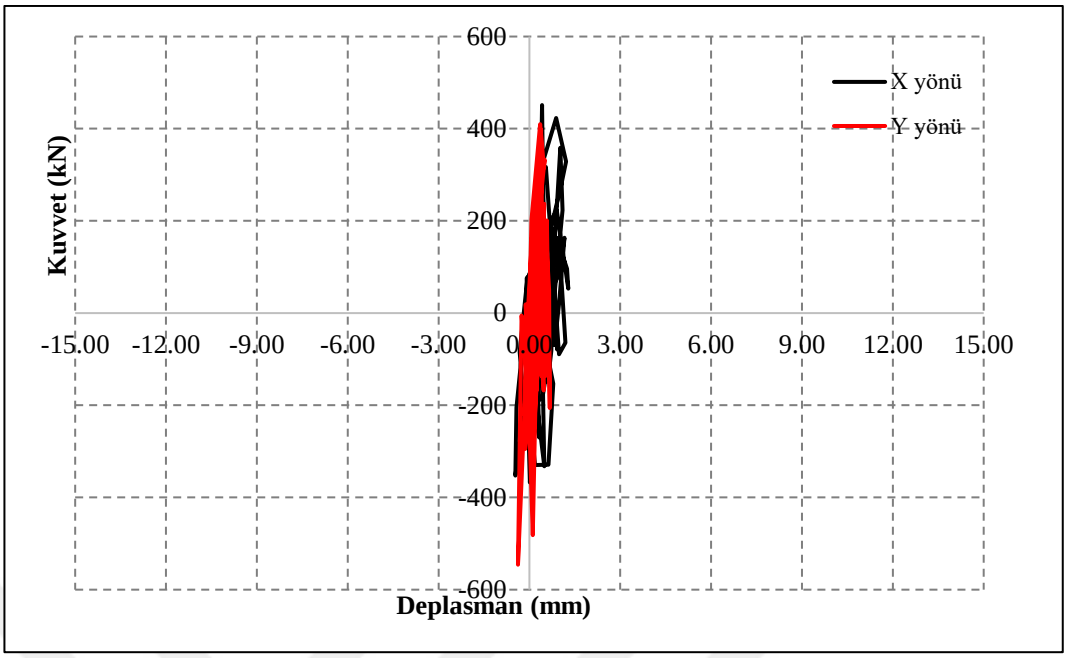
Duvar eğrileri oluşturulduktan sonra caminin köşe noktalarının taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Cami köşe noktalarına denk gelen düğüm noktalarından veri alınarak eğriler oluşturulmuştur. Şekil 8.95.'te güneybatı köşesi, Şekil 8.96.'da güneydoğu köşesi, Şekil 8.97.'de kuzeybatı köşesi ve Şekil 8.98.'de kuzeydoğu köşesi için taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrileri oluşturulmuştur.



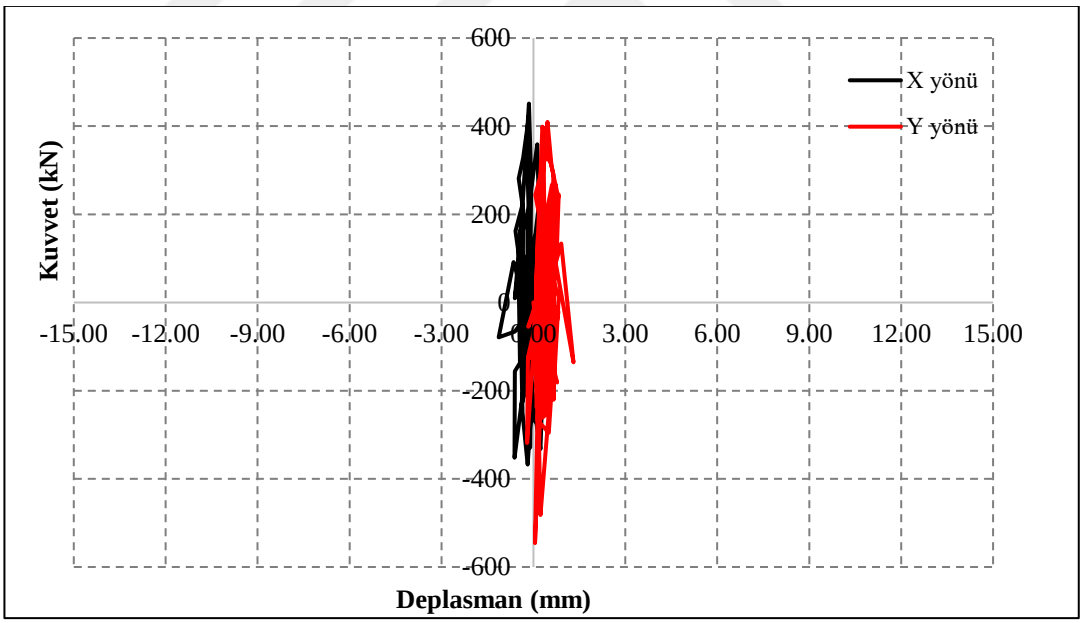
Şekil 8.95.. Hacıcuma Camii güneybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.96. Hacıcuma Camii güneydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.97. Hacıcuma Camii kuzeybatı duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.



Şekil 8.98. Hacıcuma Camii kuzeydoğu duvar köşesi yer hareketi sonucu elde edilen taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi.

Hacıcuma Cami'nin 2 Haziran 1859 depreminde arşivlerde net bir hasar kaydı bulunmamakla birlikte, caminin ağır hasar alan camilere yakın bir konumda olması ve depremde ağır hasar alan mahallere yakın olması caminin hasar alma ihtimalini düşündürmüştür. Cami duvar yüksekliği 5.800 mm'dir. Analiz sonuçları incelendiğinde, caminin x ve y doğrultuları tepe noktası maksimum yanal deplasman değerleri sırasıyla

3 mm ve 0,20 mm'dir TYİDYRK (2017)'de belirtilen yığma yapıların performans düzey limitlerine göre x ve y doğrultuları için caminin kat yanal öteleme oranları sırasıyla %0,051 ve %0,034'tür. Bu hesaplama sonucunda TYİDYRK (2017)'de belirtilen performans limitlerine göre cami sınırlı hasar (SH) durumundadır ve yer hareketi süresi boyunca bu sınırda kalmıştır. Cami köşe noktalarında ise hasarın 1-2 mm mertebesinde olduğu analiz sonuçlarında tespit edilmiştir. Cami köşe noktalarında ise hasarın 1-2 mm mertebesinde olduğu analiz sonuçlarında tespit edilmiştir. Analiz sonucunda caminin yapısal bütünlüğünü etkileyecek bir hasar ortaya çıkmamıştır. Ayrıca hasar kısımlarının ahşap kalas döşemelerinde ve bu döşemelerin duvarlarla birleştiği noktalarda olduğu görülmüştür. Kuvvet kapasitesi ise -600 kN ile 600 kN arasında değişmektedir. Sonuç olarak Hacıcuma Camii'nin 1859 depreminde önemli ölçüde hasar almadığı doğrulanmıştır.

8.3. Bulgular ve Tartışma

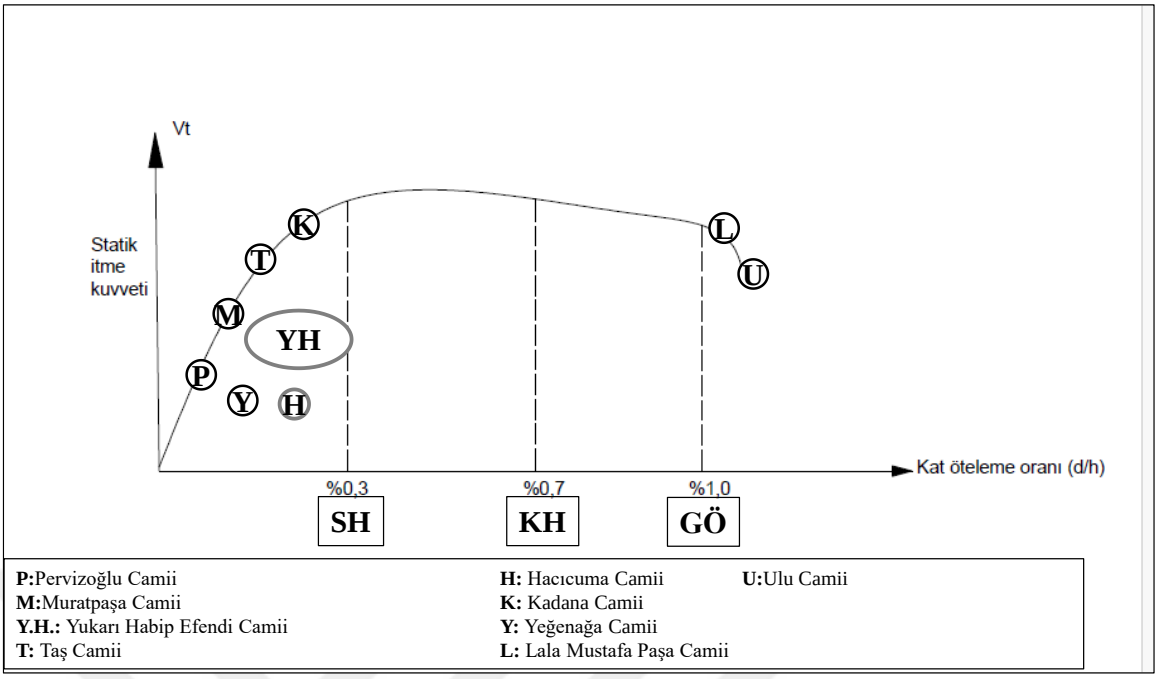
Camilerin analizlerinin tamamlanmasının ardından, camilerin x ve y doğrultuları iiçin hesaplanan yatay öteleme oranları toplu bir şekilde Çizelge 8.4.'te gösterilmiştir.

Çizelge 8.4. Camilerin yatay öteleme oranları

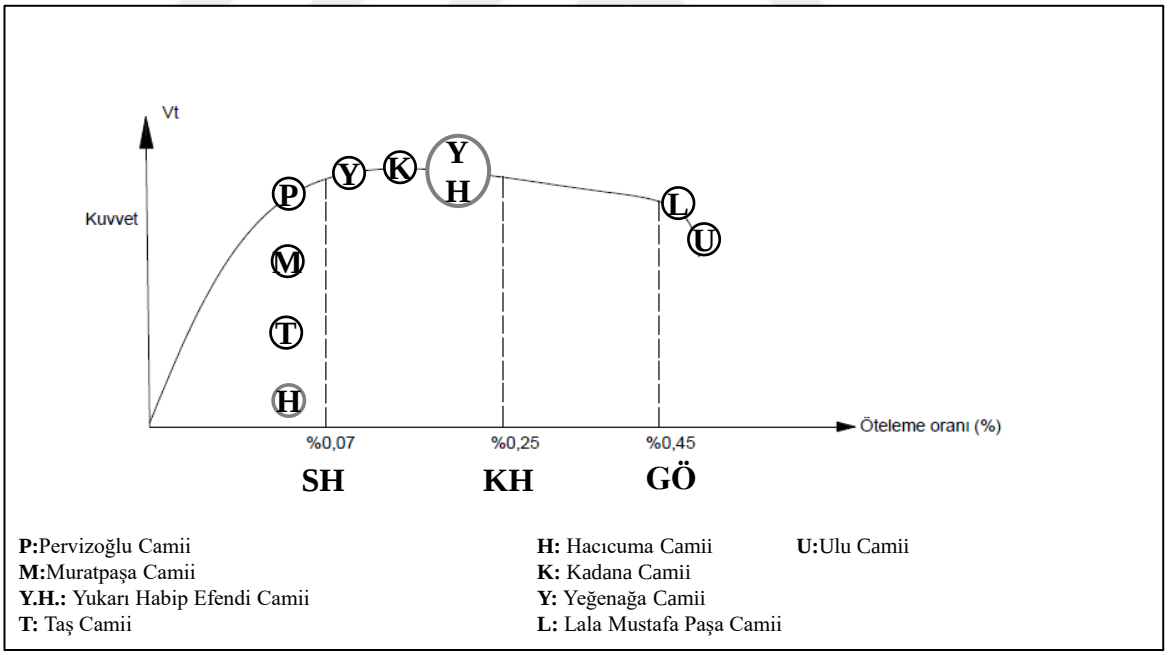
Cami Adı	Maksimum yanal deplasman (d) (mm)		Cami yüksekliği (h) (mm)	Yanal öteleme oranı (%)	
	X doğrultusu	Y doğrultusu		X doğrultusu	Y doğrultusu
Ulu Camii	115,00	300,00	9.000	1,27	3,33
Pervizoğlu Camii	0,70	0,70	9.500	0,01	0,01
Lala Mustafa Paşa Camii	108,00	206,00	7.400	1,46	2,79
Muratpaşa Camii	0,70	0,70	5.500	0,01	0,01
Yukarı Habip Efendi Camii	9,00	2,00	5.700	0,16	0,01
Taş Camii	2.50	0,20	5.600	0,05	0,01
Yeğenağa Camii	6.64	0,20	5.400	0,12	0,01
Kadana Camii	8,00	0,60	5.250	0,15	0,01
Hacıcuma Camii	3,00	0,20	5.800	0,05	0,01

Çizelge 8.4. incelendiğinde Ulu Camii ve Lala Mustafa Paşa camilerinin, göçmenin önlenmesi (GÖ) sınır durumu oranı olan %1,0'lik oranı geçtiği ve camilerin göçtüğü; kalan camilerin sınırlı hasar durumu (SH) sınır değeri %0,3 oranının altında kaldığı ve camilerin sınırlı bir hasar durumunda olduğu analiz sonuçlarından elde edilmiştir.

Tarihi camilerin öteleme limit değerleri için TYİDRYK (2017)'nin yanı sıra Kocaman and Kazaz (2023), çalışmasında farklı mimarideki tarihi camiler için Sınırlı Hasar, Kontrollü Hasar ve Göçmenin Önlenmesi öteleme performans noktaları için limit önerileri sunulmuştur. İncelenen teknik metin güncel bir çalışma olması nedeniyle burada değerlendirilmiştir. Çalışmada, SH durumu %0,01 ile %0,07 oranı arasında; KH durumu %0,07 ile %0,25 arasında, GÖ durumu ise %0,25 ile %0,45 oranı arasında tanımlanmıştır. Çizelge 8.4'te camiler için hesaplanan yatay öteleme oranları Kocaman and Kazaz (2023)'ın çalışmasındaki oranlar ile kıyaslanmıştır. Oranlar kıyaslandığında Ulu Camii ve Lala Mustafa Paşa Camii'nin hesaplanan yatay öteleme oranlarının, her iki doğrultuda da GÖ sınır oran değeri olan %0,45 değerini aştığı ve camilerin göçtüğü sonucuna ulaşılmıştır. Pervizoğlu, Muratpaşa, Aşağı Hasanı Basri Taş ve Hacıcuma Camii'nin yatay öteleme oranlarınun her iki doğrultuda da SH öteleme oran sınırları arasında kaldığı sonucu çıkarılmıştır. Yukarı Habip Efendi, Yeğenağa ve Kadana Camiilerinin, x yatay doğrultusunda TYİDRYK (2017)'deki yatay öteleme sınır oranlarına göre SH durumunu sağlarken, Kocaman and Kazaz (2023) öteleme oranlarına göre KH durumunda olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Camilerin y doğrultsundaki yatay öteleme oranında ise SH durumunda kalmıştır. Camilerin yatay öteleme oranlarına göre hasar durumları TYİDRYK (2017) ve Kocaman and Kazaz (2023) metinlerinde sunulan yatay öteleme limitleri esas alınarak oluşturulan şematik gösterimlerde sırasıyla Şekil 8.99 ve Şekil 8.100'de sunulmuştur.



Şekil 8.99. Camilerin TYİDRYK (2017)'deki limit değerlerine göre hasar durumları



Şekil 8.100. Camilerin Kocaman and Kazaz (2023) limit değerlerine göre hasar durumları

Yığma yapılar ve yapı elemanlarının yatay öteleme performans sınır değerleri için TYİDRYK (2017) *ve* Kocaman and Kazaz (2023) metinleri haricinde muhtelif kaynaklarda sınır değerler önerilmiştir. Bu değerleri içeren tablo,Kocaman(2022) tezinden alıntılanarak Çizelge 8.5'te sunulmuştur.

Çizelge 8.5. Literatürde bazı tarihi yapılar için belirlenen malzeme özellikleri ve hasar limitleri. (Kocaman 2022)

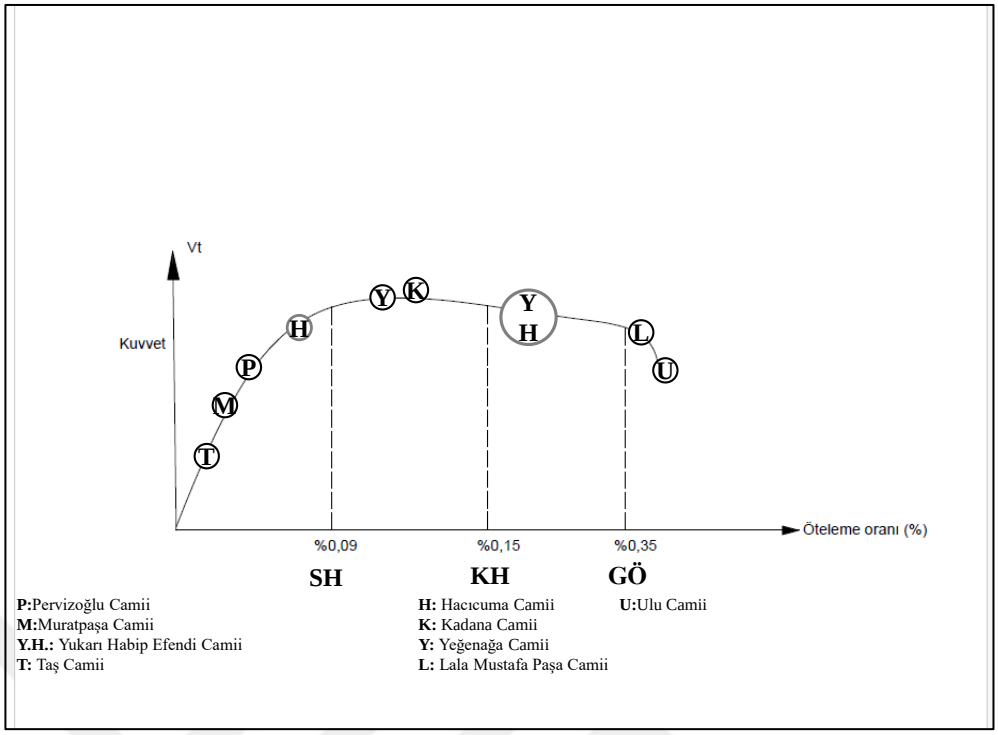
Çalışma	Yapı Tipi	SH(%)	KH (%)	GÖ (%)	E (MPa)	f_c (MPa)
Bal et al. (2010)	Cami Kemer	0,02	0,04	0,07	2.500	2,00
Portioli et al. (2011)	Cami	-	0,14	-	430	3,00
Soyluk and Tuna (2011)	Cami	-	0,02	-	8.500	-
Cattari et al. (2015)	Yapı	0,02	0,09	0,18	2.843	9,50
Milani and Valena (2015)	Kilise-1	0,11	0,34	-	1.600	1,40
	Kilise-2	0,07	0,27	-		
	Kilise-3	0,08	0,29	-		
	Kilise-4	0,05	0,26	-		
	Kilise-5	0,13	0,43	-		
	Kilise-6	0,11	0,58	-		
	Kilise-7	0,15	0,85	-		
Vintzileou et al. (2015)	Yapı	0,13	0,25	0,31	840	4,33
Mangia et al. (2016)	Cami	0,03	0,06	-	1.500	3,00
Mariano et al. (2016)	Yapı-1	0,05	0,20	0,44	10.280	20,55
	Yapı-2	0,04	0,20	0,66	2.010	6,68
Panto et al. (2016)	Kemer	0,05	0,06	0,08	1.650	3,30
	Duvar	0,03	0,06	-	5.000	4,00
Endo et al. (2017)	Kemer	0,06	0,15	-	2.000	4,00
	Kubbe					
Aşıkoğlu et al. (2019)	Cami	0,03	0,11	0,18	1.500	2,60
Kocaman et al. (2020)	Cami-1	0,05	0,13	0,18	785	3,92
	Cami-2	0,09	0,15	0,34	785	3,92
Altunışık et al (2022)	Cami-1	-	0,10	-	1.500	1,80
	Cami-2	-	0,07	-	1.500	1,80
Çakır (2021)	Cami	-	0,13	-	8.500	-
Dinani et al. (2022)	Cami	0,04	0,07	0,35	1.050	2,10

Çizelge 8.5 incelendiğinde tekil yapısal yığma elemanlar haricinde (kemer, kubbe) camii türü yapılar için SH durumuna karşılık %0,03-%0,09, KH durumu için %0,02-%0,15 ve GÖ durumu için %0,18-%0,35 aralığında değerler verildiği görülmektedir. Çizelge 8.5'te camii türü yapılar için sunulan yatay öteleme SH, KH, GÖ performans sınır değeleri için sırasıyla ortalama %0,05, %0,10 ve %0,26 değerleri hesaplanmış olsa da yeterli sayıda veri olmayışı bu değerlerden ziyade alt-üst sınır değerler ile bir irdeleme yapılmasının daha doğru olacağı kanaatini doğurmuştur. Bu durumda tez çalışmasında incelenen camii yapıları için üretilen yer hareketi etkisi altında yapılan analiz neticesinde elde edilen öteleme değerleri ve Çizelge 8.5'ten camii türü yapılar için çıkarılan performans limit değerleri toplu halde Çizelge 8.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 8.6. baz alınarak camilerin yatay öteleme oranlarına göre hasar durumları şematik şekilde Şekil 8.101'de gösterilmiştir.

Çizelge 8.6. Camilerin performans limit değerleri

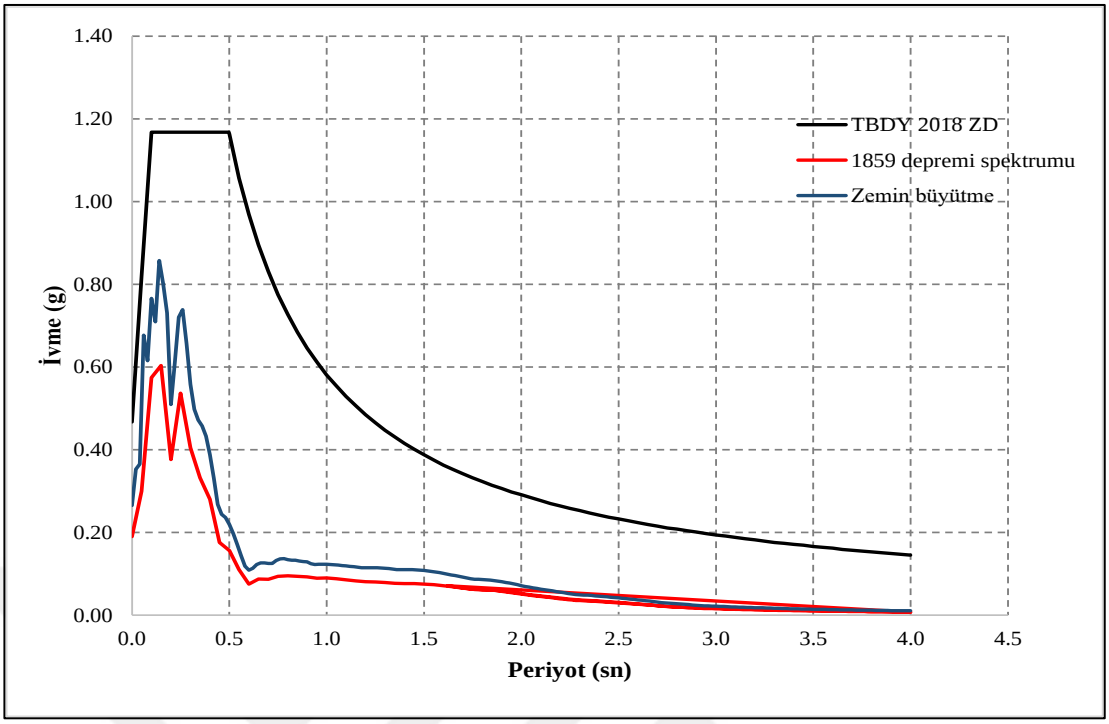
Cami Adı	**Yanal öteleme oranı (%)**			**Yanal öteleme oranı sınır değerler (%)**		
	X doğrultusu	**Y doğrultusu**		**SH**	**KH**	**GÖ**
Ulu Camii	1,27	3,33	GÖ sonrası	0,03-0,09	0,02-0,15	0,18-0,35
Pervizoğlu Camii	0,01	0,01	SH öncesi			
Lala Mustafa Paşa Camii	1,46	2,78	GÖ sonrası			
Muratpaşa Camii	0,01	0,01	SH öncesi			
Yukarı Habip Efendi Camii	0,16	0,01	KH-GÖ arası			
Taş Camii	0,05	0,01	SH öncesi			
Yeğenağa Camii	0,12	0,03	SH-KH arası			
Kadana Camii	0,15	0,01	SH-KH arası			
Hacıcuma Camii	0,05	0,01	SH öncesi			



Şekil 8.101. Camilerin literatürdeki hasar limitlerine göre hasar durumları

Çizelge 8.6. ve Şekil 8.101 incelendiğinde Ulu Camii ve Lala Mustafa Paşa Camii'nin hesaplanan yatay öteleme oranlarının, her iki doğrultuda da GÖ sınır oran değeri olan %0,45 değerini aştığı ve camilerin göçtüğü sonucuna ulaşılmıştır. Pervizoğlu, Muratpaşa, Aşağı Hasanı Basri Taş ve Hacıcuma Camii'nin yatay öteleme oranlarınun her iki doğrultuda da SH öteleme oran sınırları arasında kaldığı sonucu çıkarılmıştır. Yeğenağa ve Kadana Camiilerinin, x yatay doğrultusunda KH durumunda olduğu sonucuna ulaşılırken Yukarı Habip Efendi Camii'nin KH sınır durumunu aştığı sonucuna ulaşılmıştır.

Bu değerlendirmelerin ardından, camilerin hasar durumları için bir diğer değerlendirme yöntemi olarak camilerin depreme karşı çalışan düzlem içi duvar oranları ve camilerin ilk mod şekline gelen periyot değeri üzerinden kıyaslama yapılmıştır. Camilerin, zemin yönünden ZD sınfına tabidir. Deprem kaydı ZD zemin sınıfına göre üretilmiştir. AFAD'dan ZD sınıfına sahip deprem spektrumu ve 1859 depremine ait deprem spektrumu Şekil 8.10'de gösterilmiştir.



Şekil 8.102. AFAD veritabanından alınan ZD sınıfı zemine ait ve 1859 deprem spektrumları.

Şekil 8.102'de spektrumlar oluşturulduktan sonra camilerin ilk modal periyotları ve duvar alanları belirlenmiştir. Camilerin ilk periyotlarına karşılık gelen spektral ivmeler, spektrum üzerinden belirlenmiştir. Daha sonra camilerin duvar alanları toplam alanlarına bölünerek camilerin duvar yüzdeleri hesaplanmıştır. Çizelge 8.7.'de camilerin toplam duvar yüzdeleri ve deprem yönlerine karşı çalışan duvar yüzdeleri verilmiştir. Çizelge 8.8'de ise camilerin duvar oranlarına ek olarak, ilk periyotları ve Şekil 8.102'de 2 Haziran 1859 depreminin oluşturulan spektrumundan elde edilen spektral ivmeler verilmiştir.

Çizelge 8.7. Camilerin duvar oranları ve depreme karşı çalışan duvar yüzdeleri

Cami	Toplam duvar oranı (%)	X yönü depremine karşı düzlem içi çalışan duvar yüzdesi (%)	Y yönü depremine karşı çalışan düzlem içi duvar yüzdesi (%)
Ulu Camii	9,13	5,27	4,07
Lala Mustafa Paşa Camii	25,7	13,84	13,8
Pervizoğlu Camii	35,67	16,76	22,0
Muratpaşa Camii	32,42	17,10	18,0
Yukarı Habip Efendi Camii	26,50	11,62	16,8
Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii	22,84	10,81	9,81
Yeğenağa Camii	27,1	19,09	19,0
Kadana Camii	19,0	10.0	10.0
Hacıcuma Camii	35,48	22,46	16,8

Çizelge 8.8. Camilerin spektral ivmeleri

Cami	Duvar Elastisie Modülü (MPa)	Toplam duvar oranı (%)	Yapının ilk periyodu (sn)	Spektral ivme (g)	Zemin Büyütme Spektral İvme (g)	AFAD Maksium Spektral İvme (g)
Ulu Camii	850	9,13	0,28	0,47	0,66	1,17
Lala Mustafa Paşa Camii	1.050	25,7	0,27	0,49	0,69	1,17
Pervizoğlu Camii	720	35,67	0,18	0,52	0,73	1,17
Muratpaşa Camii	2.000	32,42	0,19	0,46	0,64	1,17
Yukarı Habip Efendi Camii	740	26,50	0,16	0,57	0,80	1,17
Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii	2.350	22,84	0,11	0,53	0,74	1,17
Yeğenağa Camii	255	27,1	0,23	0,48	0,68	1,17
Kadana Camii	255	19,0	0,23	0,48	0,67	1,17
Hacıcuma Camii	700	35,48	0,20	0,36	0,51	1,17

Çizelge 8.7. ve Çizelge 8.8 birlikte değerlendirildiğinde 2 Haziran 1859 depreminde ağır hasar alan camilerden olan Ulu Cami'de, toplam duvar alanı oldukça düşüktür. Camide her iki yönden maruz kalınan depreme karşı çalışan duvar yüzdelerinin oldukça düşük olduğu görülmüştür. Yapının ilk periyodunun diğer camilere göre yüksek olması, duvar elastisite modülünün de büyük camilere göre düşük kalması nedeniyle caminin ağır hasar aldığı ve GÖ sınır durumunu geçtiği düşünülebilir.

Kubbeli camiler olan Lala Mustafa Paşa, Muratpaşa ve Pervizoğlu Camii kendi içinde değerlendirilmiştir. Muratpaşa Camii duvar elastisite modülünün yüksekliği, ilk periyotunun düşüklüğü ve toplam duvar alanının yüksekliği gibi nedenlerden ötürü, cami yatay öteleme oranına göre SH bölgesinin altındadır. Kayıtlarda hasar aldığı bilinen Pervizoğlu Camii, diğer kubbeli camilere göre düşük duvar elastisite modülü ve yüksek spektral ivme değerine rağmen, yatay öteleme oranlarına göre SH bölgesinin altındadır. Pervizoğlu Camii'nin duvar oranının yüksek olmasının bu duruma neden olduğu yorumu yapılabilir. Lala Mustafa Paşa Camii'nin, Pervizoğlu Camii'nden daha yüksek duvar elastisite modülüne ve daha düşük spektral ivmeye sahiptir. Ancak, depremde diğer kubbeli camilere göre daha ağır hasar almıştır. Bu durumun nedenleri arasında Pervizoğlu Camii'ne oranla düşük duvar oranına sahip olması yorumu yapılabilir. Ayrıca tıpkı Ulu Cami'de olduğu gibi hakim zemin periyodu ile caminin ilk periyodunun denk gelmesi sonucunda camide bir rezonans etkisinin oluştuğu ve caminin bu sebeple ağır hasar aldığı yorumu yapılabilir.

Basit planlı ahşap destekli camilerden olan Taş Camii, yüksek duvar elastisite modülü ve duvar oranının yüksek olması nedeniyle SH sınır bölgesindedir. Hacıcuma Camii ise bu özelliklere ek olarak bulunduğu konumdaki düşük spektral ivme değeri nedeniyle yatay öteleme oranına göre SH hasar bölgsesinde kaldığı yorumu yapılabilir. Hacıcuma Camii'nden daha fazla duvar elastisite modül olmasına rağmen Yukarı Habip Efendi Camii'nin KH sınır durumunda olmasının, diğer basit planlı camilere göre cami konumundaki yüksek spektral ivmeye sahip olması nedeniyle olduğu yorumu yapılabilir. Yeğenağa ve Kadana Camii'nin düşük duvar elastisite modülü ve diğer basit planlı camilere göre daha yüksek periyoda sahip olması nedeniyle KH hasar durumunda olduğu düşünülebilir.

Camiler için bir diğer hasar değerlendirme kriteri olarak birim şekil değiştirmeler ele alınmıştır. Sonlu eleman modelleri kurgulanırken malzeme modeli olarak William-Warnke malzeme modeli kullanılmıştır. Şekil 7.4'te tek eksenli gerilme halinin yer aldığı eğri gösterilmiştir. Bu eğride, yığma duvarların ezilme basınç dayanımı $f_{c,}$ *ve* çekme dayanımı $f_{t,}$'nin kullanılarak cami elemanlarının elastik bölgedeki çekme ve basınç altındaki sınır şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır. Camilerin sonlu eleman modellemeleri gerçekleştirilirken duvar basınç dayanımı, Kocaman (2022) çalışmasında belirtildiği gibi ortalama 3 MPa olarak alınmıştır. Çekme gerilmesi ise bu değerin 10 da 1'ine denk gelen 0,3 MPa olarak alınmıştır. Ahşap malzemeler için Kaplan (2013) çalışmasında belirtildiği gibi basınç gerilmesi 10 MPa, çekme gerilmesi ise 10 MPa değeri alınmıştır. Camilerin elastik bölgedeki duvar elastisite modülü ve gerilme değerlerinden faydalanılarak sınır elastik birim şekil değiştirme sınır değerleri elde edilir. Analiz sonuçlarında, yığma duvarların birim şekil değiştirme değerleri elastik birim şekil değiştirme değerleri ile kıyaslanarak deformasyonlar hakkında yorum yapılabilir. Bu eğrideki bağıntılardan faydalanılarak, 2 Haziran 1859 depremine maruz kalan 9 caminin duvar, kubbe, sütun kemer ve ahşap elastik birim şekil değiştirme sınır değerleri belirlenmiştir. Bu değerler Çizelge 8.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 8.9. Cami elemanlarının elasitk birim şekil değiştirme sınır değerleri

	Duvar				**Kubbe**				**Kemer**			
	Çekme (εt)		**Basınç (εc)**		**Çekme (εt)**		**Basınç (εc)**		**Çekme (εt)**		**Basınç (εc)**	
Yapı	**Limit**	**Değer**	**Limit**	**Değer**	**Limit**	**Değer**	**Limit**	**Değer**	**Limit**	**Değer**	**Limit**	**Değer**
Pervizoğlu	0.0004	0.00	0.004	0.00	0.0006	0.00	0.006	0.00	0.0002	0.00	0.002	0.00
Muratpaşa	0.0001	0.00	0.001	0.00	0.0003	0.00	0.004	0.00	0.0001	0.00	0.001	0.00
Lala Mustafa Paşa	0.0002	**0.03**	0.002	**0.40**	0.0004	**0.03**	0.004	**0.40**	0.0001	**0.03**	0.001	**0.40**
Ulu Cami	0.0003	**0.01**	0.003	**0.02**	0.0003	**0.01**	0.003	**0.02**	0.0003	**0.01**	0.003	**0.02**
Yukarı Habip Efendi	0.0004	**3.55**	0.004	**0.14**								
Aşağı Hasan-ı Basri Taş	0.0001	**0.02**	0.001	**0.05**								
Yeğenağa	0.0010	**0.02**	0.011	**0.30**								
Kadana	0.0010	**2.24**	0.011	**0.10**								
Hacıcuma	0.0004	**0.03**	0.004	**0.11**								
	Tonoz				**Çekirdek**				**Ahşap**			
	Çekme (εt)		**Basınç (εc)**		**Çekme (εt)**		**Basınç (εc)**		**Çekme (εt)**		**Basınç (εc)**	
Yapı	**Limit**	**Değer**	**Limit**	**Değer**	**Limit**	**Değer**	**Limit**	**Değer**	**Limit**	**Değer**	**Limit**	**Değer**
Pervizoğlu												
Muratpaşa												
Lala Mustafa Paşa												
Ulu Cami	0.00001	**0.01200**	0.00010	**0.01700**	0.00001	**0.20000**	0.00010	**0.01700**				
Yukarı Habip Efendi									0.0001	**0.03**	0.001	**0.15**
Aşağı Hasan-ı Basri Taş									0.0001	**0.03**	0.001	**0.06**
Yeğenağa									0.0001	**0.03**	0.001	**0.33**
Kadana									0.0001	**0.03**	0.001	**0.18**
Hacıcuma									0.0001	**0.03**	0.001	**0.15**

Çizelge 8.9'daki camilerin elastik birim şekil değiştirme değerleri verildikten sonra camilerin ANSYS Mechanical (2016) yazılımında gerçekleştirilen deprem analizi sonucundaki şekil değiştirme değerleri elde edilerek camilerin hasar durumları için değerlendirmeler yapılmıştır. Hasar mekanizmaları tek tek incelendiğinde Ulu Camii için 1859 depreminin sentetik yer hareketi kaydının,başlangıcından itibaren duvarlarda basınç elastik birim şekil değiştirme sınırı geçilmiştir ve analiz başlangıcından itibaren cami duvarlarında elastik birim şekil değiştirme sınırları aşılmıştır. Cami duvarlarında kalıcı deformasyonlar görülmüştür. Bu deformasyonlar cami duvarında tamamen bir göçme durumu yaratmamıştır. Analizin caminin orta sahanındaki kemerlerde en yüksek çekme şekil değiştrime değerleri, 1,96. sn'de maksimum değerine cami göçmüştür. Literatürde 1859 depreminden ağır hasar aldığı bilinen Ulu Cami'nin, üretilen sentetik ivme kaydının etkisinde göçtüğü sonucuna ulaşılmıştır.

2 Haziran 1859 depreminde ağır hasar aldığı bilinen Lala Mustafa Paşa Camii için analizin 0,5. saniyesinden itibaren duvarlarda elastik şekil değiştirme sınırı geçilmiş, camide plastik deformasyonlar görülmeye başlanmıştır. Hareket süresi boyunca, kubbe, son cemaat yeri, küçük kubbeler ve duvarlar kalıcı hasarlar almıştır. Hareketin sonunda cami büyük ölçüde ağır hasar almıştır. Cami, 1859 depreminin sentetik yer hareketinin etkisinde ağır hasar almıştır. Ulu Cami ve Lala Mustafa Paşa Camii için literatürde belirtilen hasar kaydının, 2 Haziran 1859 depreminin sentetik ivme kaydıyla doğrulanmıştır.

Depremde hasar aldığı kaynaklarda bulunan Pervizoğlu Camii ise yer hareketi süresi boyunca elastik şekil değiştirme sınırında kalmıştır. Camide plastik deformasyonlar hareket süresi boyunca elde edilememiştir. Camide en yüksek şekil değiştirme değerleri caminin kubbesinde çekme, duvarlar ve kubbe kasnağı altında basınç şekil değiştirme değerleri görülmüştür. Caminin, 1859 depremi sonucunda bu bölümlerde hafif hasarlar alacağı ihtimali üzerinde düşünülmüştür.

Diğer bir kubbeli cami olan Muratpaşa Camii 'de Pervizoğlu Camii gibi hareket süresi boyunca elastik şekil değiştirme sınırında kalmıştır. En fazla şekil değiştirme değerleri kubbe kısmında, kasnak altında ve cami son cemaat yeri sütunlarında meydana

gelmiştir. Caminin, 1859 depremi sonucunda bu noktalardan yapı bütünlüğünü bozmayacak şekilde hafif hasarlar alma ihtimali üzerinde düşünülmüştür. Bu iki cami için Kocaman and Gürbüz (2024) çalışmasında, 1992 Erzincan depremi altında camilerin davranışları ile ilgili bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada 0,47 g maksimum yer ivmesi değerindeki 1992 Erzincan Depremi yer hareketi kaydı altında gerçekleştirilen analiz sonucunda camilerin duvarlarda şekil değiştirme değerleri Pervizoğlu Camii'nde 0,004, Muratpaşa Camii'nde de 0,008 olduğu ve camilerin göçmeden ayakta kaldığı ifade edilmiştir. 1992 Erzincan Depremi'ne göre maksimum yer ivmesi değeri oldukça küçük olan 2 Haziran 1859 depreminde camilerin bu değerlere göre çok küçük hasar almaması beklenen bir durumdur ve bu durum literatür çalışmasıyla desteklenmiştir. Bu camilerin, Lala Mustafa Paşa Camii'ne göre depreme karşı daha rijit bir davranış sergilediği yorumu yapılabilir.

Basit planlı ahşap destekli camilerde en fazla şekil değiştirme ahşap kalas döşemelerde görülmüştür. Ahşap destekli ve döşemeli camiler için Kaplan (2013), çalışmasındaki ahşap mekanik özelliklerinden faydalanılarak basınç, çekme dayanımları ve ahşap elastisite modül değerleri kullanılarak sınır limit şekil değiştirme değerleri 0,001 olarak hesaplanmıştır. Ahşap tavan döşemelerinde çekme birim şekil değiştirme değerleri yer hareketinin 0,5. saniyesinden itibaren aşılmış döşemelerde kalıcı deformasyonlar görülmeye başlanmıştr. Değerlendirme yapılırken hesaplanan birim şekil değiştirme değerleri yanıında literatürdeki ahşap malzeme için birim şekil değiştirme değerlerinden de faydalanılmıştır. Jin Syu et al. (2007), çalışmalarında yapılan kapsamlı deneyler neticesinde muhtelif ahşap numuneleri için elastik sınır basınç birim kısalması değerinin ortalama 0,004 olarak verildiği görülmektedir. Model kalibrasyonu neticesinde ahşap için hesaplanan 0,001 değerinin literatürden düşük olduğu değerlendirilmektedir. Ancak; literatürde erişim sağlanan 0,004 elastik sınır basınç birim kısalması değerine referansla bir değerlendirme yapılsa bile ahşap çatı örtüsünün hasar almış olabileceği görülmektedir. Yine Jin Syu et al. (2007) çalışmasında ahşabın basınç etkisi altında taşıyabileceği maksimum birim kısalma değerinin ortalama 0,014 olduğu rapor edilmektedir. Bu değere referansla; ahşap tavanlı tüm camilerde 0,014 basınç birim kısalması değerinin aşıldığı ve ahşap malzemelerin basınç etkisi altında tüm kapasitelerini kullandığı sonucuna varılmıştır. Benzer şekilde Senalik and Fabrer (2021)'in ahşabın mekanik özellikleri üzerindeki yaptıkları Rozzk et al. (2013)'ya atıf verdikleri çalışmalarında iflere dik yönde

çekme etkisi altında kopma birim uzaması değerlerinin %1-%3 aralığında verildiği görülmektedir. Bu değerlerin muhtelif su muhtevasına sahip farklı tür ahşaplar için ortalama değerler olduğu ifade edilmelidir. Elastik sınır değerleri konusunda sunulan veri çok değişken olduğundan, kopma uzaması üzerinden değerlendirme yapılması anlamlı bulunmuştur. Dinamik analizler sonucunda ahşap tavanlı camiilerin tavan yapılarında hesaplanan maksimum birim uzamalar 0,03 (%3) mertebesinde olmuştur ki; bu değer tüm ahşap camii tavanlarında çekme etkisi altında da hasar meydana gelmiş olacağı düşüncesini doğurmuştur. Daha bütüncül bir ifade ile; ahşap tavanlı camilerin tamamında basınç etkileri altında hasar oluşmuş olabileceği değerlendirilmiştir. Bu değerlerin liflere dik doğrultuda olduğu çalışmada ifade edilmiştir.

Camilerin, toplu halde ahşap sınırları değerlendirildikten sonra camilerin duvar sınır değerleri için ayrı ayrı değerlendirme aşamasına geçilmiştir. Yukarı Habip Efendi Camii'nin 1859 Erzurum sentetik yer hareketi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerlerinin, duvar mekanik özelliklerinden faydalanılarak hesaplanan elastik şekil değiştirme sınır değerlerini geçtiği görülmüştür. 1859 depremi için yapılan kapsamlı literatür çalışmalarında, Yukarı Habip Efendi Camii' nin 2 Hazitan 1859 depreminde hasar aldığına dair bir bilgiye ulaşılamamıştır. Ancak, üretilen sentetik ivme kaydı etkisinde yapılan dinamik analiz neticesinde caminin doğu ve batı duvarında hesaplanan maksimum birim kısalma değerinin, bu yapı duvarı için belirlenen elastik limit değerinin aştığı görülmüştür. Elastik sınırın ötesinde hesaplanan bu değer duvarda lokal hasar meydana gelmiş olacağını düşündümektedir. İlaveten cami üst ötrüsü olan ahşap tavan için hesaplanan makismum çekme ve basınç birin şekil değiştirmelerinin de ahşap malzeme elastik sınır değerlerinden fazla olduğu görülmekte, ahşap tavanın da depremde hasar almış olabileceği değerlendirmesinin yapılmasına yol açmaktadır. Yukarı Habip Efenci Camii' nin geçmişte 2 kez restore edildiği son olarak da 2016 yılında restitüsyon uygulaması ile yeninden yapıldığı dikkate alındığında, her ne kadar 2 Haziran 1859 Erzurum depreminde hasar aldığına dair net bir kayda ulaşılamamış olsa da yapının bu depremde hasar görmüş olma ihtimalinin yüksek olduğu değerlendirilmektedir.

Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii'nin 1859 depremi yer hareketi sonucunda duvarlarda elde edilen şekil değiştirme değerlerinin, cami için hesaplanan birim şekil değiştirme değerlerini aştığı görülmüştür. Caminin literatürde net bir hasarı bulunduğuna

dair bir bilgi yoktur. Caminin Tozlu (2000) çalışmasında ağır hasar alan mahallelerde bulunması ve ağır hasar alan camilere yakın olması nedeniyle depremde hasar alma ihtimali üzerinde durulmuştur. Cami üretilen sentetik ivme kaydı etkisinde yapılan dinamik analiz neticesinde yapı kuzey ve güney duvarında hesaplanan maksimum birim kısalma değerinin bu yapı duvarı için belirlenen elastik limit değerini aştığı görülmüştür. Elastik sınırın ötesinde hesaplanan bu değer duvarda lokal hasar meydana gelmiş olacağını düşündürmektedir. Daha önceden de belirtildiği üzere cami üst örtüsü olan ahşap tavan için hesaplanan makismum çekme ve basınç birin şekil değiştirmelerinin de ahşap malzeme elastik sınır değerlerinden fazla olduğu görülmekte, ahşap tavanın da depremde hasar almış olabileceği değerlendirmesinin yapılmasına yol açmaktadır.

Yeğenağa Camii'nin 1859 Erzurum sentetik yer hareketi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerlerinin, duvar mekanik özelliklerinden faydalanılarak hesaplanan elastik şekil değiştirme sınır değerlerini geçtiği görülmüştür. Caminin literatürde net bir hasarı bulunduğuna dair bir bilgi yoktur. Caminin Tozlu (2000) çalışmasında ağır hasar alan mahallelerde bulunması ve ağır hasar alan camilere yakın olması nedeniyle depremde hasar alma ihtimali üzerinde durulmuştur. Cami üretilen sentetik ivme kaydı etkisinde yapılan dinamik analiz neticesinde caminin tüm duvarlarında hesaplanan maksimum birim kısalma değerinin bu yapı duvarı için belirlenen elastik limit değerinin aştığı görülmüştür. Elastik sınırın ötesinde hesaplanan bu değer caminin tüm duvarlarında lokal hasar meydana gelmiş olacağını düşündürmektedir.

Kadana Camii'nin 1859 Erzurum sentetik yer hareketi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerlerinin, duvar mekanik özelliklerinden faydalanılarak hesaplanan elastik şekil değiştirme sınır değerlerini geçtiği görülmüştür. 1859 depremi için yapılan kapsamlı literatür çalışmalarında, Kadana Camii' nin 2 Hazitan 1859 depreminde hasar aldığına dair bir bilgiye ulaşılamamıştır. Caminin Tozlu (2000) çalışmasında ağır hasar alan mahallerde bulunması ve ağır hasar alan camilere yakın olması nedeniyle depremde hasar alma ihtimali üzerinde durulmuştur. Üretilen sentetik ivme kaydı etkisinde yapılan dinamik analiz neticesinde cami güney ve kuzey duvarılarında hesaplanan maksimum birim kısalma değerinin, cami duvarı için belirlenen elastik limit değerinin aştığı görülmüştür. Bu noktalarda caminin, 1859 depreminde duvarlarda lokal hasarlar almış olabileceği ihtimalini düşündürmektedir.

Haccıcuma Camii'nin 1859 depremi yer hareketi sonucunda duvarlarda elde edilen şekil değiştirme değerlerinin, cami için hesaplanan birim şekil değiştirme değerlerini aştığı görülmüştür. Caminin literatürde net bir hasarı bulunduğuna dair bir bilgi yoktur. Caminin Tozlu (2000) çalışmasında ağır hasar alan mahallerde bulunması ve ağır hasar alan camilere yakın olması nedeniyle depremde hasar alma ihtimali üzerinde durulmuştur. Üretilen sentetik ivme kaydı etkisinde yapılan dinamik analiz neticesinde camini dört duvarının üst kısımlarında maksimum birim kısalma değerleri aşılmıştır ve lokal duvar hasarları oluşmuştur. Camiler hasar durumuna göre kendi içlerinde değerlendirildiğinde Aşağı Hasan-ı Basri Taş ve Hacıcuma Camii en az hasarı alırken, en çok yerel hasarın Yukarı Habip Efendi Camii'nde gerçekleştiği görülmüştür. Yatay öteleme oranları açısından değerlendirildiğinde Taş Camii ve Hacıcuma Camii 'nin SH durumunda Yeğenağa Camii ve Kadana Camii SH ve KH sınır durumu arasında, Yukarı Habip Efendi Camii'nin ise KH ile GÖ arasında olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

8.4. 2 Haziran 1859 Depremi Sentetik Yer Hareketinin Değerlendirilmesi

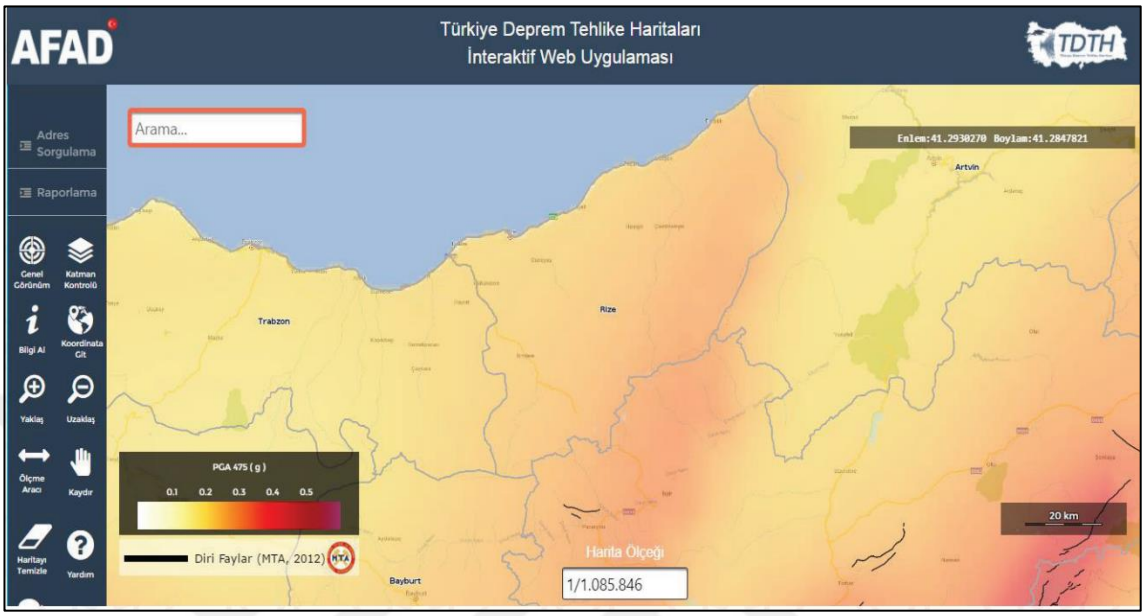
Sismik olarak dünyanın en aktif bölgelerinden birisi olan Anadolu yarımadası tarihsel süreçte çok sayıda büyük deprem yaşamış ve bu depremler muhtelif nedenlerle doğal afetlere dönüşmüşlerdir. 1939 Erzincan, 1992 Erzincan, 1999 Kocaeli-Gölcük, 2020 Elazığ-Sivrice, 2023 Kahramanmaraş depremleri dünyanın en büyük deprem felaketleri arasındaki yerlerini, maalesef, almışlardır.

Bir doğa olayı olan depremin felakete dönüşmesinin nedenleri arasında yapım kalitesi düşüklüğü genel olarak ilk sırada yer alsa da; 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin etki ettiği Hatay ilinde olduğu gibi öngörülemeyen büyüklükte düşey yer ivmelerinin yapılara etki ettiği de dikkate alınmalıdır. Depremin ne zaman ve hangi büyüklükte meydana geleceğinin tahmininin son derece zor olduğu açıktır. Bu tahminlerin daha güvenilir bir şekilde yapılabilmesi ve yapı tasarımına esas spektral ivmelerin üretilebilmesi; zemin yapısı hakkındaki bilginin artırılması, eldeki sayısal deprem verisinin çoğaltılması ve geçmiş depremlerin incelenmesi ile mümkün olabilecektir. Bu tez çalışmasının temel amacı Erzurum ilinin depremselliğinin

anlaşılmasına tarihi yapıların şahitliğinde 2 Haziran 1859 Erzurum depremi özelinde katkı sunulmasıdır.

Hâlihazırda yapı tasarımına esas spektral ivmeler T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından interaktif kullanıma açılmış olan Deprem Tehlike Haritası Uygulaması'ndan alınmaktadır. Tasarımda kullanılmak üzere üretilen spektral ivme değerlerinin arka planında bölgenin zemin özellikleri, diri fay haritası, deprem geçmişi gibi parametreler yer almaktadır. Bu noktada; 15 Aralık 2004 tarihinde saat 9:02'de Rize'nin Hemşin ilçesinde moment büyüklüğü 4,7 olan ve 12,85 km derinlikte meydana gelen depreme değinilmesinde yarar görülmektedir. Bu depremde Rize'nin Çamlıhemşin ilçesinde bulunan 5302 kodlu istasyonun kaydettiği en büyük yer ivmeleri (PGA) doğu-batı, kuzey-güney ve düşey doğrultuları için sırasıyla 71,19 cm/sn^2, 72,40 cm/sn^2 ve 54,83 cm/sn^2 olmuştur (Anonim 2024b). Nihai olarak bu deprem için maksimum yer ivmesi (PGA) 72,40 cm/sn^2 ölçülmüş; maksimum yer hızı (PGV) 1,25 cm/sn ve maksimum yer değiştirme (PGD) 0,08 cm olarak hesaplanmıştır. Rize ili için şaşırtıcı olan bu depremi değerlendirmek amacıyla T.C. Rize Valiliği AFAD İl Müdürlüğü tarafından 2019 yılında yayımlanan Rize İl Afet Risk Azaltma Planı incelenmiştir. (Anonim 2024c) kaynağında sunulan Rize İl Afet Risk Azaltma Planı'nda Rize ili sınırlarında bilinen aktif bir fay olmadığı; Kuzey Anadolu Fay zonunun küçük yüzey kırıklı iki adet fayının Rize ili merkez ilçesine 66 km uzaklıkta bulunan Erzurum-Pazaryolu ilçesinde yer aldığı ifade edilmektedir. Rize ili geçmişinde gerek aletsel dönemde ve gerekse alet öncesi dönemde 4 ve üstü büyüklükte bir deprem olmadığı belirtilmektedir. Bu durumda 15 Aralık 2024 tarihinde Hemşin'de meydana gelen 4,7 büyüklüğündeki deprem; burada haritalarda yer almayan aktif fay olduğu ya da yeni bir fayın oluştuğu şeklindeki bilimsel tartışmaların yoğunlaşmasına neden olmuştur. Rize'nin deprem geçmişinin yeterince çalışılmadığına dair yorumların yapıldığı da bilinmektedir. Rize İl Afet Risk Azaltma Planı'nda Şekil 8.103'te sunulan PGA haritasına göre Rize il sınırları içerisinde beklenen en büyük ivme değerlerinin 0.215-0.295g arasında olduğu ifade edilmektedir. Bu ivme değerleri ile Rize ilinin "düşük tehlike" kategorisinde olduğu vurgulanmaktadır. Tehlike haritasındaki en büyük ivme yoğunlaşmaları kırmızımsı renklerle gösterildiği gibi Çamlıhemşin ilçesinin doğusundaki alanlara kadar uzanım göstermekte ve bu alandaki yerleşim birimleri için tehlike potansiyeli taşımakta olduğunun altı çizilmektedir. Rize merkez ilçe dâhil olmak üzere

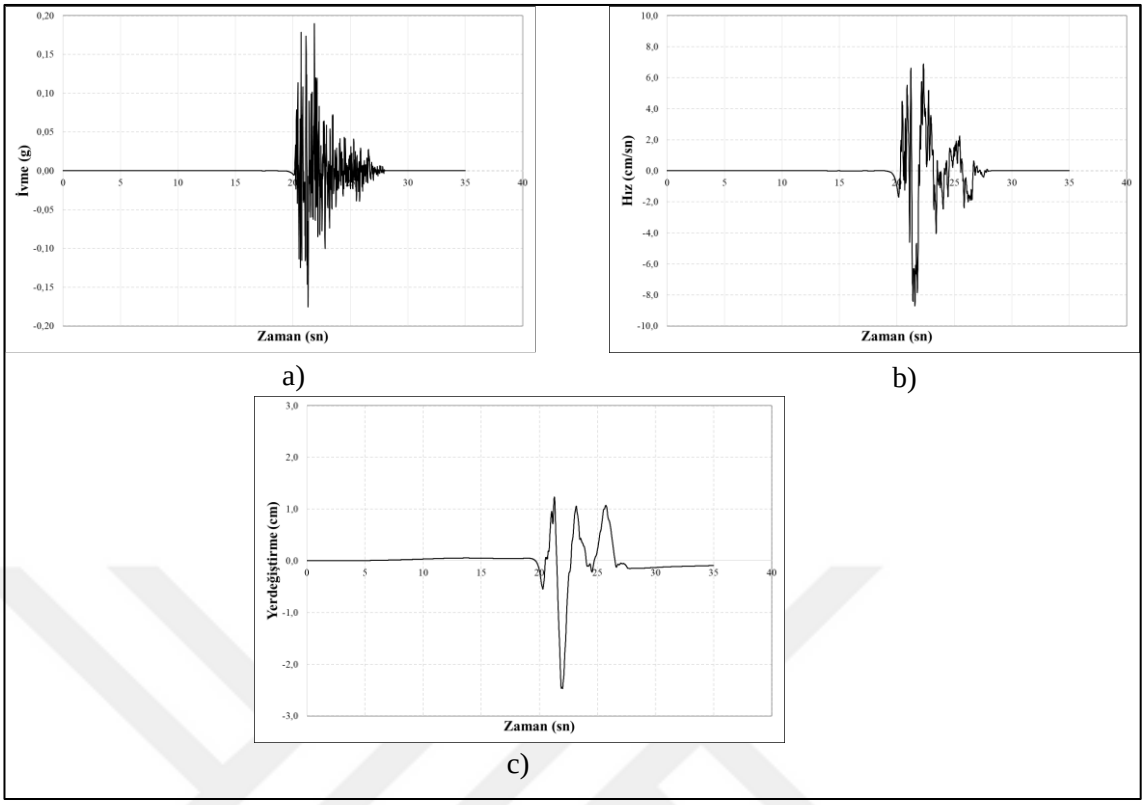
diğer lokasyonlar için beklenen en büyük ivme değerlerinin ise 0,20 g mertebelerinde kaldığı rapor edilmektedir.



Şekil 8.103. Rize ilinin PGA deprem tehlike haritasındaki yakınlaştırılmış konumu (Anonim 2024c).

Bir örnek olarak yukarıda sunulan değerlendirmelerin 15 Aralık 2004 tarihindeki deprem öncesi olduğu düşünüldüğünde; Rize ilinin depremselliğinin ve bölgenin deprem tehlikesinin daha detaylı bir şekilde çalışılması gerektiği kendiliğinden ortaya çıkmıştır. Rize için irdelenen bu durumun esasen ülkemizin her şehri için geçerli olduğu düşünülmekte; Erzurum ilinde meydana gelmiş en yıkıcı aletsel dönem öncesi depremlerden biri olan 2 Haziran 1859 Erzurum depremi sayısal ivme kaydının üretilmesi çalışmasının bölgenin depremselliğinin anlaşılmasına anlamlı katkılar sunması amaçlanmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında 2 Haziran 1859 Erzurum depremi için stokastik modelleme tekniği ile sentetik olarak üretilen ve tarihi yapı hasar kayıtları üzerinden doğrulama çalışmaları yapılan yatay ivme kaydı ve bu kayıt üzerinden SeismoSignal (2024) yazılımı kullanılarak hesaplanan hız ve yer değiştirme grafikleri toplu halde Şekil 8.106'da sunulmaktadır. 100 Hz veri frakansıyla üretilen kaydın toplam süresi 82 saniye olmasına rağmen verinin daha net sunulabilmesi için Şekil 8.104' te sunulan grafiklerde ilk 35 saniyeye yer verilmiştir.



Şekil 8.104. 2 Haziran 1859 Erzurum depremi için üretilen sentetik a) ivme b)hız c) yer değiştirme grafikleri.

2 Haziran 1859 Erzurum depremi için üretilen ve tarihi yapı hasar kayıtları üzerinden sağlaması yapılan sentetik yer hareketi için maksimum yer ivmesi (PGA) 0,19g, maksimum hız (PGV) 8,8 cm/sn ve maksimum yer değiştirme (PGD) 2,5 cm olarak hesaplanmıştır. Simülasyon neticesinde depremin odak derinliği 17,94 km, Ulu Camii - fay mesafesi 11,48 km olarak belirlenmiştir. Depremin moment büyüklüğü ise 6,1 olarak kayıtlara geçmiştir. Takip eden metinde sentetik yer hareketi için belirlenen parametrelerin literatür kapsamında irdelemesi yapılmaktadır.

Kuvvetli yer hareketi değerlendirme karakteristiklerini hareketin genliği, frekans içeriği ve süresi oluşturur. İnşaat mühendisliği disiplinini en çok ilgilendiren parametre ise genlik karakteristikleri ve hatta bu karakteristiklerden maksimum yatay yer ivmesi değeridir. Genlik parametreleri olarak ivme, hız ve yer değiştirme değişkenleri kullanılır. Deprem kayıt istasyonlarındaki kayıt cihazları büyük ölçüde yer ivmesi kaydı almaktadır. Yer hareketinin ivme – zaman grafiği oluşturulduktan sonra hız ve yer değiştirmenin zamana bağlı grafiklerinin integrasyon ile üretilmesi mümkündür. Yer hareketi genlik

parametresinde en çok kullanılan değişken maksimum yatay ivmedir (maksimum yer ivmesi: PGA). Bu ivme değeri katı yapıları etkileyen en büyük dinamik kuvvetin hesabında kullanılan önemli bir veridir. PGA değerinin değeri deprem şiddetiyle eşleştirilmesi de mümkündür. Bu nedenle; 2 Haziran 1859 Erzurum depremi sentetik kaydının değerlendirilmesinde genel olarak PGA değeri ve diğer parametrelerle olan ilişkileri üzerinde durulmuştur.

Bilindiği üzere depremin büyüklüğü ve şiddeti birbirinden farklı; ama karıştırılan kavramlardır. Büyüklük kırılan yerkabuğu parçasının hareketi neticesinde ortaya çıkan enerjiyi temsil amacıyla kullanılırken; şiddet yeryüzünde meydana gelen hasar ve insan hissiyatının toplu olarak ifade etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bir başka ifadeyle depremin şiddeti; depremlerin yer yüzeyindeki etkilerinin tasnif edilmesi amacıyla oluşturulmuş bir ölçek türü olarak tanımlanabilmektedir. Fiilen de depremi yaşayan insanları ilgilendiren deprem sınıflandırma parametresinin "şiddet" olduğunun ifade edilmesi mümkündür. Deprem şiddetini tayin amacıyla pek çok ölçek oluşturulmuştur. Ancak; Değiştirilmiş Mercalli Şiddet Ölçeği (MMI) en yaygın olarak kullanılan ölçektir. MMI ölçeği Romen rakamları ile belirlenen toplam on iki şiddet düzeyinden oluşur. (Anonim 2024d) kaynağında deprem şiddetini kontrol eden dört temel parametre olarak depremin;

- Büyüklüğü
- Merkez üssüne olan uzaklık
- Odak derinliği
- Yerel zemin koşulları

  olarak sıralanmaktadır.

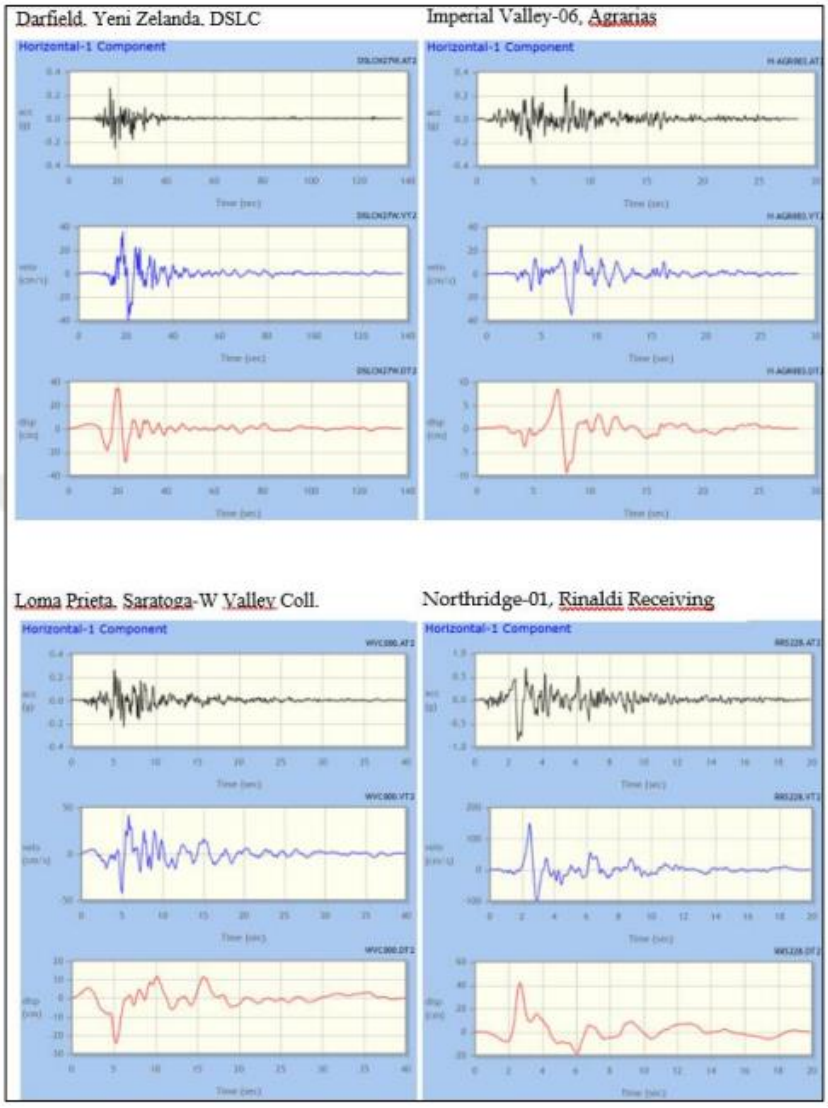
2 Haziran 1859 Erzurum depreminin moment büyüklüğü 6.1 olarak hesaplanmaktadır. Alaska Üniversitesi Deprem Araştırma Merkezi (Anonim 2024e) kaynağında depremleri Çizelge 8.10'da sunulan şekilde sınıflandırmaktadır.

Çizelge 8.10. Deprem büyüklük sınıfları (Anonim 2024e)

Deprem Sınıfı	Büyüklük	Beklenen Etki
Küçük	3,0 – 3,9	Hissedilebilir.
Hafif	4,0 – 4,9	Kısmen hissedilir.
Orta	5,0 – 5,9	Hafif hasar meydana gelebilir.
Güçlü	**6,0 – 6,9**	**Hasar meydana gelebilir.**
Büyük	7,0 – 7,9	Hasar beklenir.
Çok Büyük	8,0 – ya da daha büyük	Büyük hasar beklenir.

Anonim (2024d) kaynağından alıntılanan Çizelge 8.10. incelendiğinde; 2 Haziran 1859 Erzurum depreminin 6,1 büyüklük ile ***güçlü*** bir deprem olarak değerlendirildiği ve bu depremde hasar meydana gelebileceği çıkarımı yapılmaktadır. Literatürde yer bulan deprem değerlendirme kayıtları ve kişi beyanları bu çıkarımı desteklemektedir.

Hasar kaydı bulunan ve sentetik yer hareketi kaydının doğrulanması amacıyla öncelikli olarak dinamik analizleri yapılan Ulu Camii yapısı ile fay arası mesafe 11,48 km olarak hesaplanmıştır. Gerek Ulu Camii ve gerekse incelenen diğer tarihi yapılar birbirlerine oldukça yakın konumda bulunmaktadırlar. Tüm yapıların Ulu Camii merkez alınarak çizilecek 1 km yarıçaplı çember içerisinde kaldıklarını ifade etmek mümkündür. Türk Bina Deprem Yönetmeliği, TBDY (2018)'e göre yakın saha, depremin odak merkezinden yatayda yaklaşık 15 km mesafeye kadar olan alanlar olarak kabul edilmektedir. Bu durumda incelenen tarihi yapıların olduğu bölgenin; 2 Haziran 1859 Erzurum depremi için yakın saha olarak tanımlanması mümkündür. Numanoğlu (2023) yüksek lisans tez çalışmasında odak noktasına yakın yerlerdeki deprem kayıtlarının genellikle daha uzak mesafelerde kaydedilenlerden farklı özelliklere sahip olduğu ifade edilmekte; yakın sahadan alınan deprem kayıtları incelendiğinde, bazı kayıtlarda ivme-zaman grafiğinin ilk saniyelerinde ani değişimlerin olduğunun göze çarptığı belirtilmektedir. Hız-zaman grafiklerinde de oluşan bu değişimlerin literatürde **yönelim etkisi** olduğu açıklanmaktadır.Direktivite (yönelim) etkisi genellikle hız-zaman grafiğinin ilk saniyelerinde oluşup, çift taraflı darbelerle sonuçlandığı Hayden vd (2012) çalışmasında ifade edilmektedir. Ancak; yine aynı çalışmada yapılara hâkim titreşim periyoduna da bağlı olarak büyük hasar verebilen çift taraflı darbelerin tüm yakın saha depremlerinde oluşmayacağı da belirtilmektedir. Numanoğlu (2023) çalışmasından alıntılanan ve yönelim etkileri içeren yakın saha deprem kaydı örnekleri Şekil 8.105' te sunulmaktadır.



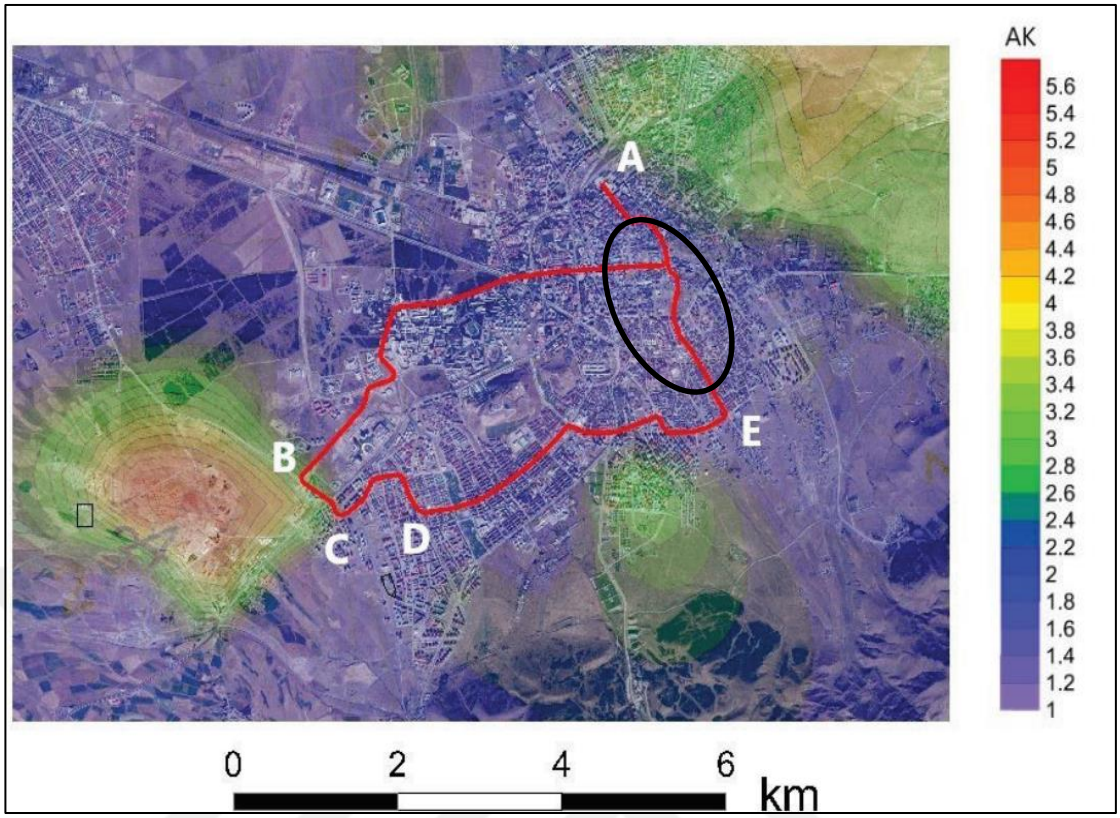
Şekil 8.105.. Yönelim etkileri içeren yakın saha deprem kayıt örnekleri (Numanoğlu 2023)

Şekil 8.105'de sunulan ve yönelim etkisi içeren yakın saha deprem kayıtları ışığında; Şekil 8.104' te sunulan 2 Haziran 1859 Erzurum depremi ivme-zaman grafiğinde bariz bir yönelim etkisi oluşmadığı değerlendirilmektedir. Çalışma kapsamında değerlendirilen tarihi yapıların bulunduğu Erzurum il merkezi için yakın saha depremi olarak sınıflandırılabilecek 2 Haziran 1859 Erzurum depreminde yönelim etkileri kaynaklı ilave hasar meydana gelmemiş olacağı düşünülmektedir.

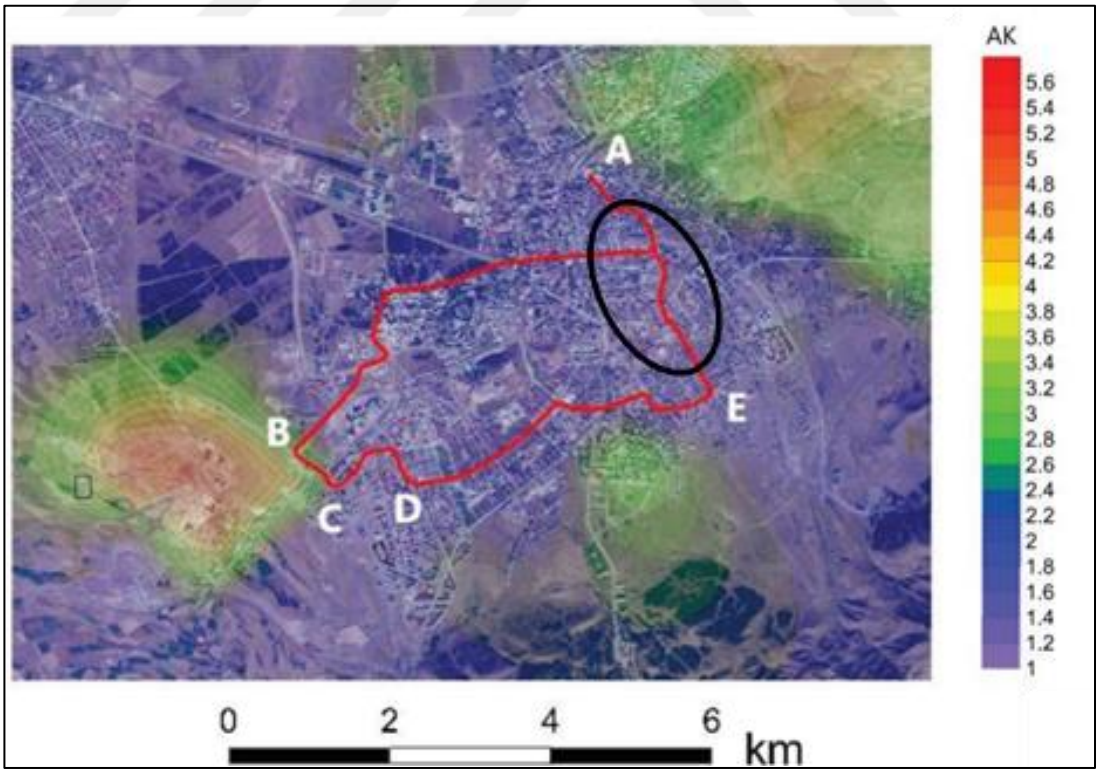
2 Haziran 1859 Erzurum depremi odak derinliği 17,94 km olarak hesaplanmıştır. (Anonim 2024f) kaynağında Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi tarafından

depremde enerjinin açığa çıktığı noktanın yeryüzünden en kısa uzaklığı, depremin odak derinliği olarak tanımlanmakta ve depremler odak derinliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Tektonik depremler için geçerli olduğu beyan edilen bu sınıflandırmada yerin 0-60 km derinliğinde olan depremler ***sığ deprem*** olarak tanımlanmaktadır. Yerin 70-300 km derinliklerinde olan depremler ***orta derinlikli*** depremler, yerin 300 km'den fazla derinliğinde meydana gelen depremler ***derin depremler*** olarak adlandırılmaktadır. Türkiye'de meydana gelen depremler genellikle sığ depremlerdir ve odak derinlikleri 0-60 km arasındadır. Orta ve derin depremlerin daha çok bir levhanın bir diğer levhanın altına girdiği bölgelerde meydana geldiği bilinmektedir. Derin depremler çok geniş alanlarda hissedilir; ancak meydana getirdikleri hasar azdır. Sığ depremler ise daha dar bir alanda hissedilir ve bu alan içinde çok büyük hasar yapabilirler. 19,94 km odak derinliği ile 2 Haziran 1859 Erzurum depremi sığ depremler sınıfına girmektedir. Literatürdeki hasar kayıtları incelendiğinde Erzurum il merkezinde çok sayıda mahallede yapı hasarı meydana geldiği görülmektedir. Söz konusu hasarda düşük yığma yapı kalitesi etkili olmakla birlikte; sığ deprem etkilerinin de hasarın artmasına neden olduğu düşünülebilir.

Deprem şiddetini etkileyen bir diğer unsur ise yerel zemin koşullarıdır. Tez çalışması kapsamında yapılan araştırmada inceleme konusu olan tarihi yapıların ve mahallelerin bulunduğu Erzurum ili şehir merkezinde yerel zemin sınıfının ZD olduğu belirlenmiştir. TBDY (2018) uyarınca orta sıkı-sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakalarından oluşan zeminler ZD grubu zeminler olarak değerlendirilmektedir. ZD grubu zeminlerin zayıf zemin olduğunu ve spektral deprem ivmelerini artırdığı ifade edilebilir. Depremin şiddeti ve dolayısıyla yapılara olan etkileri değerlendirilirken zemin hâkim titreşim periyodu, zemin büyütme katsayısı gibi parametrelerin ele alınması da önem arz etmektedir. Aydın vd (2021) çalışmasında Erzurum il merkezi için planlanan hafif raylı sistem için bir güzergâh önerisinde bulunulmuş ve güzergâh önerisi oluşturulurken sistemin depremlerden asgari düzeyde etkilenmesi amacıyla zemin hâkim titreşim periyodu ve zemin büyütme katsayısı haritaları dikkate alınmıştır. Şekil 8.106'da ve Şekil 8.107'de, Aydın vd (2021) çalışmasından alıntılanan Erzurum ili zemin büyütme katsayısı ve haritası zemin hâkim titreşim periyodu haritaları sunulmuştur.



Şekil 8.106. Erzurum ili zemin büyütme katsayısı haritası (Aydın vd 2021)



Şekil 8.107. Erzurum ili zemin hâkim titreşim periyodu haritası (Aydın vd 2021)

Şekil 8.106. ve Şekil 8.107.'de kırmızı çizgi ile tanımlanan hat Aydın vd (2021) çalışmasında Erzurum il merkezi için önerilen hafif raylı sistem güzergâhını ifade etmektedir. Bu güzergâhta A noktası olarak belirlenen bölge şehirlerarası tren garının yanında; E noktası ise şehirleşmenin arttığı, toplu konut yapımlarının yoğunlaştığı Abdurrahman Gazi Mahallesi sınırları içerisinde yer almaktadır. Şekil 8.106. ve Şekil 8.107' de siyah elips ile sınırlanan ve A-E noktaları arasında kalan bölgenin 2 Haziran 1859 Erzurum depreminde hasar alan mahallelerin bulunduğu yerleşim alanı olduğunu ifade etmek mümkündür. Çalışma kapsamında incelenen tarihi yapılar da bu alan içerisinde yer almaktadır. Söz konusu alan için Şekil 8.108. incelendiğinde zemin büyütme katsayısı değerinin 1,4–1,6 arasında olduğu görülmektedir. Bu değerlerin Erzurum ili geneli düşünüldüğünde düşük değerler olduğu Aydın vd (2021) çalışmasında ifade edilmektedir. Şekil 8.109. incelendiğinde ise 2 Haziran 1859 Erzurum depreminde hasar alan mahallelerin bulunduğu yerleşim alanı geneli için zemin hâkim titreşim periyodunun 0,25 – 0,30 saniye aralığında olduğu görülmektedir. Yapının doğal titreşim periyodu ile zemin hakim titreşim periyodunun çakışması rezonans etkisi olarak tanımlanmakta ve bu durumda kalan yapıların deprem hasarlarının arttığı bilinmektedir. 2 Haziran 1859 Erzurum depreminde en ağır hasar alan 2 tarihi yapı Ulu Cami ve Lala Mustafa Paşa camileridir. Her iki caminin doğal titreşim periyotları operasyonel modal analiz neticesinde 0,27 saniye olarak belirlenmiştir. Yapıların doğal titreşim periyotlarının Aydın vd (2021) çalışmasından elde edilen zemin hâkim titreşim periyodu aralığına (0,25 – 0,30 sn) düştüğü görülmektedir. Bu durum, daha önce Bulgular ve Tartışma bölümünde bahsedildiği üzere incelenen her iki yapıdaki ağır hasara rezonans etkilerinin de yol açmış olabileceğini düşündürmektedir.

2 Haziran 1859 Erzurum depremin şiddetine etki eden faktörler yukarıdaki şekilde değerlendirildikten sonra; maksimum yer ivmesi (PGA) ile deprem şiddeti arasındaki ilişkilerin irdelenmesinde yarar görülmektedir. 2 Haziran 1859 Erzurum depremi için hesaplanan PGA değeri 0,19g olmuştur. (Anonim 2024g)kaynağında Yeni Zelanda'nın Güney Adası' nda 2016 yılında meydana gelen 7,8 büyüklüğündeki Kaikōura depreminde ölçülen 3,23g değerindeki PGA değerinin aletsel dönemde tek yönde kaydedilen en büyük veri olduğu ifade edilmektedir. Yine aynı kaynakta 1964 yılında meydana gelen 9,2 büyüklüğündeki Alaska depreminde tek yönde kaydedilen PGA değerinin 0,18g olduğu görülmektedir. 25 km derinlikte meydana geldiği belirlenen 1964 Alaska

depreminde 131 can kaybı olduğu ifade edilmektedir. (Anonim 2024f) kaynağından alıntılanarak sunulan veri incelendiğinde depremin büyüklüğü ve PGA değeri arasında anlamlı bir ilişki olmadığı yorumlanmaktadır. Bu durumda sadece PGA değeri üzerinden 2 Haziran 1859 Erzurum depremi hasarlarının değerlendirilmesinin hatalı olabileceği düşünülmektedir.

Gözlemsel bilgilere dayanan deprem şiddeti ölçeğinin ampirik bağıntılar kullanılarak maksimum yer ivmesi (PGA) ve maksimum hız (PGV) cinsinden denkliğinin sağlanmasına dair çalışmalar ilgili literatürde yer almaktadır. Bu konuda Wald et al. (1996) çalışmasından alıntılanan eşleştirme tablosu Çizelge 8.11.' de sunulmaktadır.

Çizelge 8.11.MMI şiddet sınıfları için PGA ve PGV değerleri eşleştirmesi(Wald et al.1996).

Algılanan Sarsıntı	Yok	Zayıf	Hafif	Orta	**Güçlü**	Çok Güçlü	Şiddetli	Ağır	Aşırı
Potansiyel Hasar	Yok	Yok	Tok	Çok Hafif	**Hafif**	Orta	Orta/ağır	Ağır	Çok Ağır
PGA (g)	<.0.17	0.17-1.4	1,4-3,9	3,9-9,2	**9,2-18**	18-34	34-65	65-124	>124
PGV (cm/sn)	<0,1	0,1-1,1	1,1-3,4	3,4-8,1	**8,1-16**	16,31	31-60	60-116	>116
Şiddet ölçüüsü	I	II-III	IV	V	**VI**	VII	VIII	IX	X+

Çizelge 8.12. incelendiğinde 2 Haziran 1859 Erzurum depremi sentetik kaydından elde edilen 0,19g değerindeki PGA ve 8,8 cm/sn PGV değerlerine VI şiddet ölçüsünün karşılık geldiği; bu şiddette bir depremde yer hareketinin güçlü şekilde hissedilecek olmasına rağmen hafif hasar durumunun meydana gelebileceği çıkarımı yapılmaktadır. Ancak; literatürden elde edilen hasar verisi 2 Haziran 1859 Erzurum depreminde ağır hasar durumunun meydana geldiğini göstermektedir. Bu hasar durumuna istinaden yapılan değerlendirmede 2 Haziran 1859 Erzurum depremi için MMI ölçeği şiddetinin IX mertebesinde olduğu ifade edilmelidir.

Deprem büyüklüğü ve deprem şiddetinin eşleştirilmesine dair bir ölçek Polat (2015) yüksek lisans tez çalışmasından alıntılanarak Çizelge 8.12'de sunulmaktadır.

Çizelge 8.12. Deprem büyüklüğü ve MMI şiddeti eşleştirmesi Polat (2015)

Büyüklük	Şiddet	Açıklama
1.0 – 3.0	I	Hemen hemen hiç hissedilmez.
3.0 – 3.9	II	Özellikle üst katlardaki bazı insanlar tarafından hissedilir.
	III	Binalarda bulunanlar, özellikle üst katlarda yaşayanlar açıkça hissederler. Birçok insan sarsıntının deprem olduğunu fark edemez. Duran araçlar hafifçe sallanır. Sarsıntı, büyükçe bir kamyonun geçişi sırasındaki sarsıntıyı andırır. Başlangıcı ve bitişi insanlar tarafından hissedilebilir.
4.0 – 4.9	IV	Gündüz vakti binalarda bulunan hemen herkes tarafından hissedilir, dışarda bulunanların çok azı sarsıntıyı hisseder. Gece vakti bazılarını uykudan uyandırır. Evdeki eşyalar sarsıntının etkisiyle titreşime geçer. Büyük bir tırın binaya çarpmasına benzer bir etki uyandırır. Duran araçlar görünür bir şekilde sallanır.
	V	Hemen hemen herkes tarafından hissedilir ve gece vakti çoğu insanı uykusundan uyandırır. Bazı pencereler ve tabaklar kırılır. Dengesiz nesneler devrilir. Sarkaçlı saatler durabilir.
5.0 – 5.9	VI	Herkes tarafından hissedilir ve korku verir. Bazı ağır mobilyalar hareket eder; sıvalarda dökülmeler görülür. Genel olarak hafif hasarla sonuçlanır.
	VII	Tasarımı ve inşaatı çok iyi olan yapılarda göz ardı edilebilecek hasara yol açarken; iyi inşa edilmiş sıradan binalarda hafif ya da orta ölçekte hasar gözlenir; kötü malzeme kullanılmış ya da tasarımı kötü olan binalarda önemli ölçüde hasara neden olur. Bazı bacalar yıkılır.
6.0 – 6.9	**VIII**	**Özel olarak tasarlanmış binalarda hafif hasar; normal yapılarda orta hasar zayıf binalarda ise oldukça büyük hasara yol açar. Bacalar devrilir, üst üste yerleştirilmiş malzemeler devrilir, duvar ve kolonlar yıkılır. Ağır mobilyalar devrilir.**
	IX	**Özel olarak tasarlanmış binalarda orta ölçekte hasar oluşurken; iyi dizayn edilmiş kafes yapılar ekseninden kayar.**
		Normal binalarda büyük hasar oluşur ve yer yer yıkılmalar gözlenir. Binalar temellerinden kayarlar.
7.0 veya daha büyük	X	İyi inşa edilmiş ahşap yapılardan bazıları yıkılırken; taş ve kafes yapıların büyük bir çoğunluğu temelleriyle birlikte yıkılır. Demiryolları eğilir.
	XI	Birkaç yapı (özellikle taş) dışında tüm binalar ve köprüler yıkılır. Demiryolları büyük oranda eğilir ve bükülür.
	XII	Bütün binalar yerle bir olur. Ufuk çizgisi oynak bir yüzeye dönüşür. Nesneler havada uçar. Afet bölgesinin yeryüzü şekli değişir.

Çizelge 8.12.incelendiğinde 2 Haziran 1859 Erzurum depreminin 6.1 büyüklük ile MMI şiddet ölçeğinde VIII ya da IX şiddet sınıfında bir deprem olabileceği görülmektedir. Literatürdeki kayıtlar dikkate alındığında depremin şiddetinin IX mertebesinde olduğu sonucuna varılmıştır. Polat (2015) çalışmasında sunulan büyüklük-

şiddet ilişkisi tasnifinin 2 Haziran 1859 depremi verisi/bilgisi ile uyumlu olduğunun ifade edilmesi mümkündür.

MMI şiddet sınıfı ile PGA arasında kurulan ampirik bağıntılar deprem şiddeti haritaları üretilmesinde kullanılmaktadır. Bilal and Askan (2014) çalışmasında Türkiye'deki büyük depremler sonrası yapılar üzerinde gerçekleştirilen gözlemler neticesinde; farklı tip yapılardaki hasarların, yapının rijitlik özelliğine bağlı olarak PGA ile iyi bir korelasyon içinde olabileceğini gösterdiği ifade edilmektedir. Yer hareketinin PGA değerinin rijit duvarlardan oluşan yığma binaların hasarı ile bağlantılıyken; PGV değerinin nispeten daha esnek betonarme binalar için ana yer hareketi şiddeti parametresi olarak kullanılmasının anlamlı olacağı belirtilmektedir. 2 Haziran 1859 Erzurum depreminin meydana geldiği dönemdeki tüm yapıların yığma yapı olduğu; hatta önemli bir kısmının çamur harç ile moloz taştan imal edilmiş son derece zayıf yapısal sisteme sahip oldukları bilinmektedir. Deprem şiddeti açısından değerlendirilen yapı stoğunun yığma yapı olması nedeniyle PGA değeri üzerinden yapılan irdelemelere ağırlık verilmiştir.

Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmalar Merkezi (USGS) tarafından geliştirilen bir aletsel şiddet – maksimum yer ivmesi /hız ölçeği (Anonim 2024h) kaynağından alıntılanarak Çizelge 8.13'te sunulmaktadır.

Çizelge 8.13. Aletsel büyüklük – maksimum yer ivmesi/hız ilişkisi (Anonim 2024h)

Aletsel Şiddet	İvme (g)	Hız (cm/s)	Algılanan Sarsıntı	Potansiyel
I	< 0.000464	< 0.0215	Hissedilmez	Yok
II–III	0.000464 –	0.135 – 1.41	Zayıf	Yok
IV	0.00297 –	1.41 – 4.65	Hafif	Yok
V	0.0276 – 0.115	4.65 – 9.64	Orta	Çok Hafif
VI	**0.115 – 0.215**	**9.64 – 20**	**Güçlü**	**Hafif**
VII	0.215 – 0.401	20 – 41.4	Çok Güçlü	Orta
VIII	0.401 – 0.747	41.4 – 85.8	Şiddetli	Orta-Ağır
IX	0.747 – 1.39	85.8 – 178	Aşırı Şiddetli	Ağır
X+	> 1.39	> 178	En Şiddetli	Çok Ağır

Çizelge 8.13'te sunulan veri ile 2 Haziran 1859 Erzurum depremi sentetik kaydından hesaplanan 0,19g PGA ve 8,8 cm/sn PGV değerleri birlikte değerlendirildiğinde; depremin şiddetinin VI olduğu, güçlü sarsıntıların hissedilebileceği ve hafif hasarla sonuçlanacak bir deprem grubuna tekabül ettiği değerlendirilmektedir. Literatürdeki mevcut hasar kaydı değerlendirildiğinde depremin MMI ölçeğindeki şiddetinin IX mertebesinde olduğu; 0,19g maksimum yer ivmesi için Bilal and Askan (2014) çalışmasında sunulan bağıntı ile yapılan hesapta ise yine IX şiddetinde olduğu sonucuna ulaşılmıştır. MMI ölçeğine göre IX şiddeti ağır hasar grubu bir sarsıntıya karşılık gelmektedir. 2 Haziran 1859 Erzurum depremi için belirlenen IX şiddetinin temel nedeni olarak zayıf yapı kalitesi ve zayıf zemin etkilerinin gösterilmesi mümkündür.

1859 Erzurum depreminden kuvvetli yer hareketi kayıtları olmadığından, simüle edilmiş kayıtların doğrulanması işlemi, literatürden seçilmiş ampirik yer hareketi modelleri (YHM) ile gerçekleştirilir. Bir çok yer hareketi modeli arasında özellikle ülkemizde bu bölgede kayıtlarla yakın sonuçlar veren denklemler olan Akkar and Cağnan (2010) ve Kale et al. (2015) modelleri seçilmiştir. Çizelge 8.14'te simüle edilmiş yer hareketlerinin maksimum yer ivmesi değerleri bu denklemlerden elde edilen ortalama ve ±1 standart sapma değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda, ampirik yer hareketi denklemlerinde, simüle edilen depremle uygun olarak Mw değeri 6,1, uzaklık (R_{jb}) mesafesi 11 km ve saha koşulları V_s30= 240m/s kullanılarak maksimum yer ivmesi değerleri hesaplanmıştır

Çizelge 8.14. Maksimum yer ivme değerleri tablosu

Merkezi Yer İvmesi (g)	**Minimum MaksimumYer İvmesi (g)**	**Ortalama Maksimum Yer İvmesi (g)**	**Maksimum Yer İvmesi (g)**
Akkar and Cağnan (2010)	0,06	0,138	0,317
Kale et al. (2015)	0,07	0,140	0,281
Simülasyondan elde edilen yer ivmesi değeri (g)	0,231		
Net ivme kaydı yer ivmesi değeri (g)	0,190		

Çizelge 8.14.'te literatürde ülkemiz için sık kullanılan ampirik formüllerle hesaplanan maksimum yer ivmesi değerleri tablosu incelendiğinde, 2 Haziran 1859 depremi için sümülasyondan elde edilen makismum yer ivmesi değerinin, benzer şartlarda meydana gelen gerçek depremlere ait sınır ivme değerleri arasında olduğu görülmektedir. Hem ham deprem kaydına, hem de ölçeklendirilmiş kayda ait yer ivmesi değerlerinin, her iki kaynakta belirtilen sınır değerleri arasında olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışma ile, bu tez kapsamında yapılan simülasyonda elde edilen yer ivmesi değeri doğrulanmıştır.

Anonim (2024g) kaynağında sunulana benzer bir çalışma da Putri et al.(2022**)** tarafından yayınlanmıştır. Putri et al. (2022) çalışmasında Endonezya'da son 50 yılda meydana gelen deprem verisi üzerinde çalışma neticesinde maksimum PGA ve hissedilen sarsıntı arasında kurulan ilişkiye dair Çizelge 8.15' te sunulan tablo yayınlanmıştır.

Çizelge 8.15. Maksimum yer ivmesi – algılanan sarsıntı sınıflandırması (Putri et al. 2022)

PGA (g)	Algılanan Sarsıntı
< 0,00082	Hissedilmez
0,00082 – 0,003	Çok Hafif
0,003 – 0,008	Hafif
0,008 – 0,025	Zayıf
0,025 – 0,082	Orta
0,082 – 0,255	**Güçlü**
0,255– 0,408	Şiddetli
>0,408	En Şiddetli

Çizelge 8.15'te sunulan sınıflandırmaya göre 2 Haziran 1859 Erzurum depremi için hesaplanan 0,19g PGA değerinde hissedilen sarsıntı güçlü bir sarsıntı olarak değerlendirilmektedir. Literatürde yer alan depreme ilişkin kayıtlardaki beyanlar da depremin güçlü bir şekilde hissedildiğine dair ifadelerdir. Bu bakımdan; Putri et al. (2022) çalışmasında sunulan PGA sınıflandırmasının 2 Haziran 1859 Erzurum depreminde algılanan sarsıntı düzeyini daha gerçekçi bir şekilde tanımladığı düşünülmektedir.

2 Haziran 1859 Erzurum depreminin moment büyüklüğünün 6,1 olduğu ifade edilmiştir. Deprem büyüklüğü ve deprem etkilerinin birlikte değerlendirilmesi amacıyla; Michigan Teknik Üniversitesi tarafından (Anonim 2024i) kaynağında yayınlanan deprem büyüklük ölçeği Çizelge 8.16'da sunulmaktadır.

Çizelge 8.16. Deprem büyüklük ölçeği (Anonim 2024i)

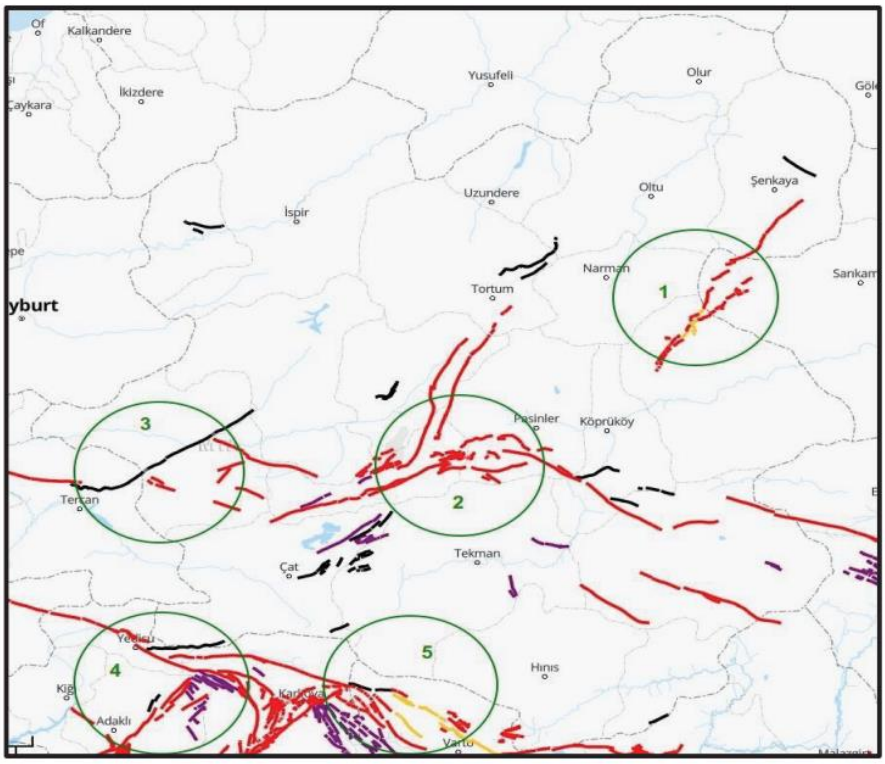
Büyüklük	Deprem Etkileri	Her Yıl Tahmini Sayı
2.5 ya da daha küçük	Genellikle hissedilmez ancak sismograf ile kaydedilebilir.	Milyonlarca
2.5 - 5.4	Çoğunlukla hissedilir ancak yalnızca küçük hasara neden olur.	500,000
5.5 - 6.0	Binalara ve diğer yapılara hafif hasar verebilir.	350
6.1 - 6.9	**Nüfusun yoğun olduğu bölgelerde çok fazla hasara neden olabilir.**	**100**
7.0 - 7.9	Büyük deprem. Önemli ölçüde hasar meydana gelebilir	10-15
8.0 ya da daha büyük	Çok büyük deprem. Merkez üssü yakınındaki yerleşimleri tamamen yok edebilir.	Yılda 1 ya da 2

Çizelge 8.16. incelendiğinde, 2 Haziran 1859 Erzurum depreminin 6.1 büyüklüğü ile nüfusun yoğun olduğu bölgelerde çok fazla hasara yol açabilecek bir deprem

olabileceği tahmini yapılmaktadır. Literatürde yer alan hasar kaydı dikkate alındığında bu tahminin Türk nüfusun yoğun olarak yaşadığı ve yapı kalitesinin son derece zayıf olduğu mahallelerde gerçekleşmiş olduğu sonucuna varılmaktadır.

Erzurum ilinin deprem geçmişinin kısa bir özetine (Anonim 2024i) kaynağında yer alan 25 Mart (M_w 5,5) Ve 28 Mart (M_w 5,5) 2004 Aşkale (Erzurum) Depremleri Değerlendirme Raporu'nda yer verilmektedir. Raporda aktif fay yoğunluğu nedeniyle tarihsel ve aletsel dönemde Erzurum ilinin çok sık yıkıcı depremlerin meydana geldiği bir bölge olduğunun altı çizilmektedir. Son yüzyılda bölgede meydana gelmiş 1924 Horasan (M:6,8), 1939 Tercan (M_s:5,9), 1966 Varto (M_s:6,9), 1983 Horasan-Narman (M_s:6,8) depremleri can ve mal kaybıyla sonuçlanmış depremlerdir. Alet öncesi tarihsel dönemde de bölgenin çok sık yıkıcı depremlerden etkilendiği bilinmektedir. 1766, 1769, 1852 ve 1859 depremlerinin son 250 yılda bölgede can ve mal kaybıyla sonuçlanmış önemli büyük depremler olduğu aynı raporda ifade edilmektedir. 02.06.1859 tarihinde Erzurum çevresinde meydana gelen depremde yaklaşık 15 000 kişinin yaşamını yitirdiğine de yine aynı raporda yer verilmektedir. Gelinen noktada, Erzurum ilinde 6 ve üstü büyüklükte depremlerin meydana geldiği ve bu depremlerin önemli kayıplara yol açmış olduğu görülmektedir.

(Anonim 2021d) kaynağında 2021 yılında T.C. Erzurum Valiliği İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü tarafından yayımlanan Erzurum İl Afet Risk Azaltma Planı'nda Erzurum'da yıkıcı deprem meydana gelebilecek 5 kuşak belirlenmiş ve bu bölgeler Şekil 8.108'deki ölçeksiz harita üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 8.108. Erzurum ili diri fay haritası ve olası yıkıcı (Ms>5) deprem üretebilecek kuşaklar (Anonim 2021d).

Şekil 8.108'de sunulan kuşaklardan ikinci bölge olarak tanımlanan bölge Erzurum-Pasinler-Köprüköy-yerleşimlerini ve bu yerleşimler içerisinde kalan Erzurum Fayı, Pasinler Fayı, Palandöken Fayı, Karayazı Fayı' nın bünyesine almaktadır. Bu çalışma kapsamında incelenen 2 Haziran 1859 Erzurum depreminin Erzurum Fayı üzerinde meydana geldiği çıkarımı yapıldığından (Anonim 2021d) kaynağında sunulan raporun ikinci bölge ile ilgili olan kısmına değinilmesinde yarar görülmüştür. Raporda Erzurum ilinin nüfus yoğunluğunun bu bölge içerisinde kaldığı ifade edilmektedir. Bu bölgede Erzurum'u etkileyen en önemli depremlerden birisi; 1901 yılında Köprüköy İlçesinin doğusunda meydana gelen 6,1 büyüklüğündeki depremdir. Depremde 10.000 kişi evsiz kalmış, yaklaşık 2000 konut ağır hasar görmüştür. 1924 yılında Pasinler'de (Köprüköy) meydana gelen 6,8 büyüklüğündeki depremde 60 kişi hayatını kaybetmiş 25.000 civarında binanın hasar gördüğü rapor edilmiştir. Yine aynı bölgede Pasinler'in kuzeyinde 1952 yılında meydana gelen 5,8 büyüklüğündeki depremde 41 kişi hayatını kaybetmiş, 701 ev hasar görmüştür. Risk analizi bakımından ikinci bölgede meydana gelebilecek en büyük depremin 6,9 M_w olabileceği tahmin edilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında yapılan çalışma Erzurum Fayı üzerinde meydana geldiği çıkarımı yapılan 6,1

büyüklüğündeki 2 Haziran 1859 Erzurum depreminin sentetik yer hareketi kaydı üzerinden daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacaktır. Öyle ki; 2 Haziran 1859 Erzurum depreminin Erzurum Fay zonu geçmişine eklenmesi bölgenin deprem tehlikesi hesaplarının +1 veri ile yapılmasına olanak sunacaktır.

9. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Erzurum ili depremselliğinin daha iyi anlaşılmasına katkı sunulması gayesiyle 2 Haziran 1859 Erzurum depreminin sentetik deprem kaydının üretilmesi amaçlanmıştır. İlk aşamada Erzurum ilinin tektonik yapısı, deprem geçmişi, aletsel dönem öncesi ve sonrası şehirde meydana gelen yıkıcı depremler konusunda araştırmalar yapılmıştır. Erzurum ili tarihinde meydana gelen en yıkıcı depremlerden birisi olarak kayıtlara geçen 2 Haziran 1859 Erzurum depremi üzerine incelemeler yoğunlaştırılmış ve depreme dair erişilebilen tüm kaynaklar dikkatle çalışılmıştır. İlgili depremde hasar alan tarihi yapılar ve hasar kayıtları muhtelif dillerdeki kaynaklardan derlenmiştir. İkinci aşamada 2 Haziran 1859 Erzurum depremi için sentetik deprem kaydı üretilmiş ve ilk doğrulama çalışması Ulu Camii yapısı sonlu eleman modeli üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu yapı üzerinde çalışmalara başlanmadan önce çalışmada değerlendirilecek olan toplam 9 adet tarihi camii yapısı için yasal çalışma izinleri alınmış, operasyonel modal analiz uygulamaları yapılarak sonlu eleman modelleri kalibre edilmiştir. İkinci doğrulama çalışması ise Ulu Camii dâhil, diğer tüm camii yapılarının sonlu eleman modelleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. İlk doğrulama çalışması neticesinde uygun bulunan sentetik deprem kaydı altında tüm yapı modelleri dinamik analize tabi tutulmuş ve yapısal performanslar yatay kat ötelemesi ve birim şekil değiştirme parametreleri üzerinden değerlendirilmiştir. Yapılan performans değerlendirmeleri literatürde yer alan hasar kayıtları ile birlikte değerlendirilerek 2 Haziran 1859 Erzurum depremi için üretilen sentetik deprem kaydı için sağlama çalışmaları yapılmıştır.

Çalışma neticesinde ulaşılan sonuç ve öneriler aşağıda sıralanmaktadır.

- 2 Haziran 1859 Erzurum depreminin Erzurum Fayı'nda meydana gelmiş olabileceği sonucuna varılmıştır.

- 2 Haziran 1859 Erzurum depremi için üretilen sentetik kayıt üzerinde PGA 0,19g, PGV 8,8 cm/sn ve PGD 2,5 cm olarak hesaplanmıştır. Simülasyon neticesinde depremin odak derinliği 17,94 km, Ulu Camii - fay mesafesi 11,48 km olarak belirlenmiştir.

- 2 Haziran 1859 Erzurum depreminin moment büyüklüğü ise 6.1 olarak kayıtlara geçmiştir. PGA, hissedilen sarsıntı ve oluşan hasar beyanları ve ilgili literatür birlikte değerlendirildiğinde depremin MMI şiddet ölçeği değerinin IX mertebesinde olduğu sonucuna varılmıştır. Bu bakımdan deprem yıkıcı bir deprem olarak değerlendirilmiştir.

- PGA değeri bakımından küçük olarak değerlendirilebilecek bir depremin Erzurum ilinde oluşturduğu hasarın depremin büyüklüğünden ziyade zayıf zemin özellikleri ve düşük yapı kalitesi ile ilişkilendirilebilecek bir durum olduğu sonucuna varılmıştır.

- Sentetik olarak üretilen 2 Haziran 1859 Erzurum depremi kaydının doğrulanması sürecinde Erzurum il merkezindeki tarihi yığma yapıların şahitliklerine müracaat edilmiştir. İlgili literatürde ağır hasar alan mahallelerde bulunan, hasar kaydı olan ya da hasar almış olabileceği tahmin edilen toplam 9 adet camii yapısının sonlu eleman modelleri oluşturulmuş, operasyonel modal analiz neticesinde elde edilen modal davranış parametreleri üzerinden model kalibrasyonları yapılmış, kalibre edilen modeller üretilen sentetik deprem kaydı altında dinamik analizler yapılmış, analizler neticesinde hesaplanan birim şekil değiştirme ve yatay öteleme değerleri kullanılarak hasar tahminleri yapılmış; bu tahminler literatürde yer alan hasar kayıtları ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

- Sentetik olarak üretilen 2 Haziran 1859 Erzurum depremi kaydı kullanılarak yapılan dinamik analizler neticesinde ilgili literatürde bu depremde ağır hasar aldığı ifade edilen Ulu Camii ve Lala Mustafa Paşa Camii için göçmenin önlenmesi performans sınırını aşan yatay öteleme değerleri ve hasara yol açtığı varsayılan birim şekil değiştirmeler hesaplanmıştır. Bu durumda üretilen deprem kaydının doğruluğunun sağlaması bu iki yapı özelinde gerçekleştirilmiştir.

- Ulu Cami ve Lala Mustafa Paşa Camii ağır hasar almasının nedenleri arasında camilerin 1843 ve 1852 yıllarında Erzurum'da gerçekleşen iki depremden ağır hasarlar alması sonucu 1859 depreminden ağır hasar alması yorumu yapılabilir.

Özellikle literatürde iki caminin hasar aldığının belirtilmesi, 2 Haziran 1859 depreminde camilerin ağır hasar almasına neden olabileceği ihtimali düşünülebilir.

- Pervizoğlu Camii ve Muratpaşa Camii'nin 2 Haziran 1859 depremi kaydı kullanılarak yapılan dinamik analizler neticesinde yapıların hasar almadığı sonucuna ulaşılmıştır. Camilerin, yatay öteleme değerlerinin, sınırlı hasar sınır durumunun altında kaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Ağır hasar alan mahallelerde bulunan basit planlı ahşap destekli beş küçük caminin, 2 Haziran 1859 depremi kaydı kullanılarak yapılan analiz sonuçlarında ayakta kaldığı sonucuna ulaşılmıştır.
- Her ne kadar Yukarı Habip Efendi, Yeğenağa ve Kadana Camilerinin 2 Haziran 1859 Erzurum depreminde hasar aldıklarına dair bir literatür kaydına erişilememiş olsa da; ağır hasar alan mahallelerde yer alan bu yapıların da söz konusu depremde lokal hasarlar almış olabileceği sonucuna varılmıştır.
- Literatürde 2 Haziran 1859 Erzurum depreminde hasar aldığı ifade edilen Pervizoğlu ve Murat Paşa Camii yapıları için sentetik kayıt etkisi altında yapılan analizlerde kayda değer bir hasar oluşmayacağı sonucuna varılmıştır. Bu iki camide taşıyıcı duvar alanının plan alanına oranları %35 mertebesindeki değerlerle incelenen tüm yapılar içerisinde en yüksek değer olarak belirlenmiştir. 2 Haziran 1859 Erzurum depreminde ağır hasar alan Ulu Camii ve Lala Mustafa Paşa Camii yapılarına ortalama 500 m mesafede ve eğimli arazide bulunan 1699 yapımı Kurşunlu Camii yapısında gerek literatürde gerekse gözlemsel olarak camii yapısında belirgin hasar olmaması dikkat çekmiştir. Yerinde yapılan incelemede taşıyıcı duvar alanının plan alanına oranının ~%40 olduğu görülmüştür. Bu durum; taşıyıcı duvar alanının plan alanına oranının tarihi yığma yapı deprem performansı üzerindeki etkisinin inceleneceği çalışmaların konuya açıklık getireceği kanaatinin oluşmasına neden olmuştur.
- 2 Haziran 1859 Erzurum depremi sentetik deprem kaydı etkisinde yapılan dinamik analizlerde zemin-yapı etkileşimlerinin dikkate alınmadığı ifade edilmelidir. Zemin koşullarının depremlerin yapı üzerindeki etkilerini önemli

ölçüde etkiledikleri açıktır. Tarihi yapılar özelinde zemin-yapı etkileşimi unsurlarının da dikkate alınarak yapılacak modelleme ve analiz çalışmalarının literatüre önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

- TBDY (2018) ile birlikte yürürlüğe giren Türkiye Deprem Tehlike Haritası'nda bir önceki haritadan farklı olarak deprem bölgeleri yerine en büyük yer ivmesi değerleri (PGA) gösterilmiştir. Türkiye Deprem Tehlike Haritasında Erzurum ili PGA 475(yıl) maksimum ivme değeri 0,20-0,70g arasında değişmektedir. 0,19g PGA değerindeki bir depremde ağır hasar aldığı bilinen Ulu Camii ve Lala Mustafa Paşa Camii gibi yapılarla birlikte; diğer tüm tarihi yapıların bölgede meydana gelebilecek bir depremde zarar görme ihtimali oldukça yüksektir. Anadolu coğrafyasının tapu senetleri niteliğindeki tarihi yapıların deprem etkilerinden korunması için tekil olarak çalışılmaları ve gerekli görülmesi halinde yapısal önlemlerin alınması önerilir.

- Çalışma kapsamında 2 Haziran 1859 Erzurum depremi hasar kayıtlarına erişim amacıyla yapılan taramalarda Türkçe, İngilizce ve bazı diğer batı dillerinde kaleme alınmış metinlere ulaşılmıştır. Bununla birlikte; Osmanlı arşivlerinde Anadolu'da meydana gelen depremler sonrası oluşan can kaybı, hasar ve afet yönetimine ilişkin çok sayıda belge olduğu bilinmektedir. Yaşadığımız coğrafyanın depremselliğinin daha iyi anlaşılabilmesi için bu kayıtların çalışılması ve günümüz Türkçesi ile literatüre kazandırılması son derece büyük önem taşımaktadır. Bu alanda çalışmalar yapılması önerilir.

- Stokastik modelleme tekniği araştırmacıları deprem kayıt cihazlarının olmadığı alet öncesi döneme götürmekte; geçmişte meydana gelmiş bir depremin sonradan kaydının alınmasına olanak tanımaktadır. Son derece heyecan verici bu yöntem ile ülkemizdeki alet öncesi dönem depremlerine ilişkin kayıtların üretilmesi ve bu tez çalışması benzeri çalışmalarla doğrulanmasının ülkemizin depremselliğinin ve deprem tehlikesinin daha iyi anlaşılmasına sunacağı katkı üst düzeyde olacaktır. Bu nedenle, alet öncesi dönem depremlerinin stokastik modelleme tekniği ile sentetik deprem kayıtlarının üretilmesi ve sonuçlarının inşaat mühendisliği disiplini açısından irdelenmesi konusunda çalışmalar yapılması önerilir.

- Operasyonel modal analiz çalışması neticesinde incelenen tarihi yapıların modal davranış parametreleri deneysel olarak yerinde elde edilmiştir. Çalışma sürecinde Ulu Camii ve Lala Mustafa Paşa yapıları için lokal mod şekilleri belirlenmiş; bu şekillere istinaden yapılan incelemelerde yapılarda hasar olduğu belirlenmiştir. Tahribatsız deneysel bir yöntem olan operasyonel modal analiz ile tarihi yapılarda hasar tespiti yapılması mümkündür. Sonlu eleman model kalibrasyonları için de oldukça değerli veri sunan operasyonel modal analiz uygulamasının tarihi yapılar üzerinde yapılacak restorasyon ve diğer değerlendirme çalışmalarında bir deneysel çalışma olarak yapılması önerilir.

- Tarihi yığma camilerin sonlu eleman modellerinde gerçekleştirilen teorik modal analiz sonucundaki modal davranış parametreleriyle ile camilerin Operasyonel modal analiz sonucundaki dinamik davranış parametrelerinin birbiriyle örtüştüğü sonucuna ulaşılmıştır. Camilerin sonlu eleman modellerinin deneysel modal analizler ile doğrulandığı görülmüştür. Mesnet koşulları ve camilerin geometrik özelliklerinin sabit olduğu camiler için elastisite modül kalibrasyon güncellemeleri yapılmıştır. Sonlu eleman model kalibrasyonları, camilerin deneysel dinamik parametrelerine oldukça yaklaştırılmıştır. Modal parametreler arasındaki düşük hata oranları, bu durumun en büyük göstergesidir.

KAYNAKLAR

Acito, M., Magrinelli, E., Milani, G. ve Tiberti, S. 2020. Seismic vulnerability of masonry buildings: Numerical insight on damage causes for residential buildings by the 2016 central Italy seismic sequence and evaluation of strengthening techniques. Journal of Building Engineering, 28, 101081.

Aki, K. 1957. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. Bulletin of the Earthquake Research Institute, 35, 415-456.

Aki, K. 1967. Scaling law of seismic spectrum, J. Geophys. Res. 72, 1217–1231.

Aki, K. 1968. Seismic displacement near a fault, J. Geophys. Res., 73, 5359-5376.

Akkar, S., ve Çağnan, Z. 2010. A local ground-motion predictive model for Turkey, and its comparison with other regional and global ground-motion models. Bulletin of the Seismological Society of America, 100(6), 2978-2995.

Altunışık, A. C., Kalkan, E., Okur, F. Y., Özgan, K., Karahasan, O. Ş., ve Bostancı, A. 2019. Non-destructive modal parameter identification of historical timber bridges using ambient vibration tests after restoration. Measurement, 146, 411-424.

Aksu, B. 2014. Erzurum şehir merkezinde kuzey güney doğrultulu bir hat boyunca yer alan yapı stokunun, zemin ve yapı periyodu açısından değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,74, Erzurum.

Altındal, A., ve Askan, A. 2022. Predictive kappa (κ) models for Turkey: Regional effects and uncertainty analysis. Earthquake Spectra, 38(4), 2479-2499.

Ambraseys, N.N. ve Finkel, C.F. 2003. Türkiye'de ve komşu bölgelerde Sismik etkinlikler (1500-1800), TÜBİTAK Yayınları, Akademik Dizi 4, s. 252.

Anderson, J. G., ve Hough, S. E. 1984. A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies. Bulletin of the Seismological Society of America, *74*(5), 1969-1993.

Anonim, 2021a: Web Sitesi. https://www.afad.gov.tr/turkiye-deprem-tehlike-haritasi Erişim Tarihi: 25.10.2021.

Anonim, 2021b: Web Sitesi. https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/doc/diri_fay_haritaları/erzurum.pdf Erişim Tarihi: 26.10.2021.

Anonim, 2021c: Web Sitesi. https://deprem.afad.gov.tr/downloadDocument?id=1933 Erişim Tarihi: 26.10.2021.

Anonim, 2021d. :Sitesi. https://erzurum.afad.gov.tr/kurumlar/erzurumafad/IRAP/ Erzurum_IRAP.pdf Erişim Tarihi: 14.03.2022.

Anonim, 2021e: Web Sitesi. https://erzurumansiklopedi.com/pervizoğlu-cami-ve medresesi/ Erişim Tarihi: 21.11.2021.

Anonim, 2021f: Web Sitesi. https://i.pinimg.com/originals/31/eb/41/31eb31eb41d2d4a737b65685ce8a422723dd.jpg Erişim Tarihi: 07.12.2021

Anonim, 2021g:Web Sitesi.https://www.collectif2015.org/tr/100Monuments/L-Eglise-de-la-Sainte-Mere-de-Dieu-Affiliee-de-Garin/ Erişim Tarihi: 03.12.2021

Anonim, 2021h:Web Sitesi. https://www.erzurumansiklopedi/yeğenağa-camii/. Erişim Tarihi: 25.12.2021.

Anonim, 2021i: Web Sitesi. https://www.erzurumansiklopedi/tas-camii-karakullukcu – camii. Erişim Tarihi: 25.12.2021.

Anonim, 2021j: Web Sitesi. https://www.erzurumansiklopedi/kadana–camii. Erişim Tarihi: 25.12.2021.

Anonim, 2021k. Web Sitesi. https://www.haberkaos.com/erzurum-yukari-habip-efendi-camii/ Erişim Tarihi: 25.12.2021

Anonim, 2022a. Web Sitesi. https://kulturportali.gov.tr./turkiye/erzurum/gezilecekyer/ulu-cami823578. Erişim Tarihi: 12.01.2022.

Anonim, 2022b. Web Sitesi. https://google.com/maps/placa//Erzurum+Pervizoğlu+Cami Erişim Tarihi: 15.01.2022

Anonim, 2022c. Web Sitesi. https://google.com/maps/place/Erzurum+Lala+Mustafa+ Paşa+Camii//Erişim Tarihi:17.01.2022

Anonim, 2022d. Web Sitesi. https://google.com/maps/place/Erzurum+Muratpaşa + Paşa+Camii//Erişim Tarihi:28.01.2022

Anonim, 2022e. Web Sitesi. https://google.com/maps/place/Erzurum+Ulu+Cami// Erişim Tarihi: 16.02.2022

Anonim, 2022f. Web Sitesi. https://erzurumarşivi.com/erzurum-ulu-camii/ Erişim Tarihi: 14.03.2022

Anonim, 2022g. Web Sitesi. https://google.com/maps/place/Erzurum+Yukarı Habip Efendi+ Cami. Erişim Tarihi: 16.02.2022

Anonim, 2022h. Web Sitesi. https://www.haberkaos.com/erzurum-yukari-habip-efendi-camii/ Erişim Tarihi: 12.03.2022

Anonim, 2022i. Web Sites:. https://google.com/maps/place/Erzurum+Tas+Cami//Erişim Tarihi: 13.03.2022

Anonim, 2022j. Web Sitesi: https://www.mustafacambaz.com/details.php?image_id=38830. Erişim tarihi:13.03.2022

Anonim, 2022k. Web Sitesi: https://google.com/maps/place/Erzurum+Kadana+Cami// Erişim Tarihi: 13.03.2022

Anonim, 2022l. Web Sitesi: https://google.com/maps/place/Erzurum+Hacıcuma+Cami// Erişim Tarihi: 13.03.2022

Anonim, 2023a. Web Sitesi: http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/deprem-bilgileri/tarihsel-depremler/ ErişimTarihi:18.10.2023

Anonim, 2024a. Web Sitesi. https.//www.tdth.gov.tr Erişim Tarihi: 21.10.2024

Anonim,2024b. Web Sitesi: https://tadas.afad.gov.tr/event-detail/32851. Erişim Tarihi: 20.11.2024

Anonim,2024c.Web Sitesi: https://rize.afad.gov.tr/kurumlar/rize.afad/E-Kutuphane/Il-Planlari/Irap-.pdf Erişim Tarihi: 20.11.2024

Anonim, 2024d. Web Sitesi: https:// www.iris.edu/hq/inclass/animation/Erişim Tarihi: 20.11.2024

Anonim, 2024e. Web Sitesi: https://earthquake.alaska.edu/earthquake-magnitude-classes#:~:text=The%20classification%20starts%20with%20%E2%80%9Cminor, used%20to%20describe%20earthquake%20size. Erişim Tarihi: 20.11.2024

Anonim, 2024f. Web Sitesi: https:// www.koeri.boun.edu.tr/ sismo/bilgi/ depremnedir/ index.htm#:~:text=ODAK %20DER %C4%B0N L%C4%B0 %C4%9E%C 4% B0%20%3A&text=Bu%20s%C4%B1n%C4%B1fland%C4%B1rma%20tektonik %20depremler%20i%C3%A7in,den. Erişim Tarihi: 20.11.2024.

Anonim, 2024g. Web Sitesi: https://en.wikipedia.org/wiki/Peak_ground_acceleration Erişim Tarihi: 20.11.2024.

Anonim, 2024h. Web Sitesi: https:// web.archive.org/web /20110623092131 /http // earthquake . usgs.gov/earthquakes/shakemap/background.php#intmaps.Erişim Tarihi: 20.11.2024

Anonim, 2024i. Web Sitesi: https:// www.mtu.edu/geo/ community/ seismology/ learn/ earthquake-measure/magnitüde. Erişim Tarihi: 20.11.2024.

Anonim, 2024j. Web Sitesi: https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi- merkezi / deprem/pdf/25_28_032004erzurum.pdf. Erişim Tarihi: 20.11. 2024

ANSYS 16, 2016. Computer software. Canonsburg, PA, Ansys.

Artemis Modal Pro V. 7.2, 2023. Operasyonel modal analiz programı, Erzurum Teknik Üniversitesi, 2023.

Askan, A., Şişman, F. N., ve Uğurhan, B. 2013. Stochastic strong ground motion simulations in sparsely-monitored regions: A validation and sensitivity study on the 13 March 1992 Erzincan (Turkey) earthquake. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 55, 170-181.

Askan A.,ve Karimzadeh S. 2019. A simulated strong ground motion database for potential earthquake scenarios on North Anatolian Fault Zone, Turk. J. Earthq. Res. 1 (1), 76-97.

Aslay, S. E.,ve Okuyucu, D. 2020. Erzincan Değirmenliköy Kilisesi apsis hasarının teknik olarak araştırılması. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 35(1), 387-402.

Aşıkoğlu, A., Vasconcelos, G., Lourenço, P. B., ve Pantò, B. 2020. Pushover analysis of unreinforced irregular masonry buildings: lessons from different modeling approaches. engineering structures, 218, 110830.

Atkinson, G. M. ve Beresnev, I. A. 2002. Ground motions at Memphis and St. Louis from M 7.5-8.0 earthquakes in the New Madrid seismic zone. Bulletin of the Seismological Society of America, 92(3), 1015-1024.

Atkinson, G., M. 2004. Empirical attenuation of ground-motion spectral amplitudes in southeastern Canada and the northeastern United States. Bulletin of the Seismological Society of America, *94*(3), 1079-1095.

Aydın, Ö. L., Kuşkapan, E., & Çodur, M. Y. 2021. Erzurum İli Hafif Raylı Sistem Güzergahının Zemin Emniyeti Açısından Yeterliliğinin Araştırılması. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 45(1), 41-66. https://doi.org/10.24232/jmd.935837

Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., ve Türker, T. 2009. Kömürhan Köprüsünün sonlu eleman model iyileştirilmesi ,İMO Teknik Dergi, 4675-4700.

Bayraktar, A., Altunışık, A. C., ve Özcan, M. 2012. Safety assessment of structures for near-field blast-induced ground excitations using operational modal analysis. Soil Dynamics And Earthquake Engineering, 39, 23-36.

Benetatos, C. A., & Kiratzi, A. A,. 2004. Stochastic strong ground motion simulation of intermediate depth earthquakes: the cases of the 30 May 1990 Vrancea (Romania) and of the 22 January 2002 Karpathos island (Greece) earthquakes. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24(1), 1-9.

Beresnev, I. A.,ve Atkinson, G. M. 1997. Modeling finite-fault radiation from the ω n spectrum. Bulletin of the Seismological Society of America, 87(1), 67-84.

Beresnev, I. A., ve Atkinson, G., M. 1998a. Stochastic finite-fault modeling of ground motions from the 1994 Northridge, California earthquake. I. Validation on rock sites, Bull. Seism. Soc. Am. 88, 1392–1401.

Beresnev, I. A., ve Atkinson, G. M. 1998. Stochastic finite-fault modeling of ground motions from the 1994 Northridge, California, earthquake. I. Validation on rock sites. Bulletin of the Seismological Society of America, 88(6), 1392-1401.

Beresnev, I. A., ve Atkinson, G. M. 1999. Generic finite-fault model for ground-motion prediction in eastern North America. Bulletin of the Seismological Society of America, 89(3), 608-625.

Berkli, Y., ve Özsağlıcak, Ş. 2019. Erzurum'da bir kısım ahşap direkli caminin restorasyon öncesi ve sonrası durumunun karşılaştırılması. Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 23(4), 1941-1962.

Bilgin, H., ve Hysenlliu, M. 2020. Comparison of near and far-fault ground motion effects on low and mid-rise masonry buildings. Journal of Building Engineering, 30, 101248.

Bilal. M., and Askan, A. 2014. Relationships between felt ıntensity and recorded ground-motion parameters for Turkey. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 104, No. 1, pp. 484–496,

Boore, D. M. ve Joyner, W. B. 1997. Site amplifications for generic rock sites. Bulletin of the seismological society of America, 87(2), 327-341.

Boore, D., M., 2003. Simulation of ground motion using the stochastic method, Pure and Applied Geophysics 160, 635-675.

Boore, D. M., ve Atkinson, G. M. 2008. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. Earthquake Spectra, 24(1), 99-138.

Brincker, R., ve Ventura, C. 2015. Introduction to operational modal analysis. John Wiley & Sons.

Brune, J. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, J. Geophys. Res. 75, 4997–5009.

Brune, J. 1971. Correction, J. Geophys. Res. 76, 5002.

Campbell, K. W., ve Bozorgnia, Y. 2008. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s. Earthquake Spectra, 24(1), 139-171.

Cui, C., Li, Z., Chen, Y., ve Zhu, Q. 2020. Seismic performance and repair of chuan-dou timber-framed masonry building. Engineering Failure Analysis, 118, 104941.

Curzon, R. 1854. A Year at Erzeroom and the Frontiers of Russia, Turkey and Persia. London, 159-162.

Çalayır, Y., Yetkin, M., and Erkek, H. 2021. Finite element model updating of masonry minarets by using operational modal analysis method. *In Structures* (Vol. 34, pp. 3501-3507). Elsevier.

Çalık, İ., Bayraktar, A., Türker, T., ve Karadeniz, H. 2014. Structural dynamic identification of a damaged and restored masonry vault using ambient vibrations. Measurement, 55, 462-472.

Çelemoğlu, Ş. 2015. Murad Paşanın (Kuyucu) vakfiyeleri ve vakıf eserleri. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, 264, Denizli.

Dang, P., Yang, H., Cui, J., & Song, J. 2023. Regional spectral characteristics, quality factor and site responses in western-central Sichuan, China (II): Application to stochastic ground motion simulation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 175, 108274.

Demirtaş, R., T., 2019. Türkiye Diri Fayları ve Deprem Etkinlikleri Paleosismolojik Çalışmalar ve Gelecek Deprem Potansiyelleri. Ankara. Search in.

Demirtaş, R., Yağyemez, B., Penirci, O., ve Uğraş M, 2010. Erzurum ili Büyükşehir Belediyesi yerleşim alanının 1/5000 ölçekli Nazım İmar Planına Esas Jeolojik-Jeoteknik Etüt Raporu.

Doğangün, A., ve Ural, A. 2007. Characteristics of Anatolian stone arch bridges and a case study for Malabadi Bridge. In ARCH'07–5th International Conference on Arch Bridges (pp. 179-86).

Duran, B., Tunaboyu, O, ve Avşar, Ö. 2017. Düşük dayanımlı betonun elastisite modülünün belirlenmesi ve RYTEİE ile yapılan risk değerlendirmesine etkisi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32(1).

Ergün, M., ve Tayfur, B. 2024. Evaluation of the seismic performance pre-and post-restoration of a masonry clock tower's FE model updated via experimental and optimization methods. Engineering Failure Analysis, 158, 107986.

Erkmen, E. 2022. Tarihi bir kümbet yapısı üzerinde dinamik kimliklendirme çalışması: Erzurum Üç Kümbetler Anonim-2 Kümbeti uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 149, Erzurum.

Eurocode 6, 1996 ,Design of Masonry Structures, 1995. Part 1.1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. European Committee for Standardization, ENV 1996-1-1:1995

Flores, C., Ojeda, J., Otarola, C., Arriola, S., & Ruiz, S. 2023. Stochastic strong-ground motion simulation in the Santiago metropolitan region considering an Mw 7.8 intraplate intermediate-depth earthquake. Journal of South American Earth Sciences, 130, 104501.

Genç, A. F., Ergün, M., Günaydın, M., Altunışık, A. C., Ateş, Ş., Okur, F. Y., ve Mosallam, A. S. 2019. Dynamic analyses of experimentally-updated fe model of historical masonry clock towers using site-specific seismic characteristics and scaling parameters according to the 2018 Turkey Building Earthquake Code. Engineering Failure Analysis, 105, 402-426.

Gülkan, P., Koçyiğit, A., Yücemen, M.S., Doyuran, V. ve Başöz, V. 1993. En Son Verie göre Hazırlanan Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası. Rapor no:METU/EERC 93-01, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi, 156

Gündoğdu, H., 1993. Erzurum Lalapaşa Külliyesi. Kültür Bakanlığı Yayınları, Acar Matbaacılık A.Ş., Ankara

Gündoğdu, H., Bayhan, A.,A, Arslan, M., 2010. Sanat tarihi açısından Erzurum. Atatürk Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü Yayını, Erzurum.

Gündoğdu, H., 2018. Tarihi Geçmişiyle Erzurum Kalesi. Selçuklu Medeniyeti Araştırmaları Dergisi, (3), 177-211.

Gür, K. 2018. Ground motion prediction equations based on simulated ground motions .M.S. - Master Of Science Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Scıences of Mıddle East Technıcal Unıversıty, 156, Ankara.

Hacıefendioğlu, K. 2020. Tahribatsız yöntemler kullanılarak trafik kaynaklı yer hareketi etkisindeki tarihi yapıların stokastik dinamik analizi. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10(2), 298-308.

Halder, L., Dutta, S. C., ve Sharma, R. P. 2020. Damage study and seismic vulnerability assessment of existing masonry buildings in Northeast India. Journal of Building Engineering, 29, 101190.

Hanks, T., C., ve McGuire, R. K. 1981. The character of high-frequency strong ground motion. Bulletin of the Seismological Society of America, 71(6), 2071-209.

Hanks, T., C. 1982. f max. Bulletin of the seismological Society of America, 72(6A), 1867-1879.

Hanks, T. C. ve Boore, D. M. 1984. Moment-magnitude relations in theory and practice. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 89(B7), 6229-6235.

Haskell, N. A. 1964. Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults. Bulletin of the Seismological Society of America, 54(6A),1811-1841.

Hayden, C. P., Bray, J. D., Abrahamson, N. A., ve Acevedo-Cabrera, A. L. 2012. Selection of near-fault pulse motions for use in design. In 15th World Conference on Earthquake Engineering.

He, X., ve Pan, H. 2024. A modified stochastic finite-fault method for estimating strong ground motion: Validation and application. Earthquake Science, *37*(1), 36-50.

Hökelekli, E. 2020. Yapı-zemin etkileşiminin tarihi yığma minarelerin deprem davranışına etkisi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 11(2), 825-838.

Jaihoon, E., H. 2019. TBDY 2018'e göre tarihi yığma yapıların analizi ve bir örnek Sille Ak Camii. Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 117, Konya.

Jin-Kyu, S., Sun-Young, K., ve Sang-Won, O. 2007. The compressive stress–strain relationship of timber. In *International conference on sustainable building Asia* (pp. 977-982).

Kaplan, B. 2013. Geleneksel Osmanlı mimarisine sahip ahşap yalıların deprem kuvvetleri altında incelenmesi ve güçlendirme teknikleri. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 175, İstanbul.

Kale, Ö., Akkar, S., Ansari, A., ve Hamzehloo, H. 2015. A ground-motion predictive model for Iran and Turkey for horizontal PGA, PGV, and 5% damped response spectrum: Investigation of possible regional effects. Bulletin of the Seismological Society of America, 105(2A), 963-980.

Karalar, M., ve Çavuşli, M. 2020. Tarihi Rombaki yığma yapısının performans değerlendirmesi. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(1), 226-247.

Karamağaralı, H. 1981. Erzurum Ulu Cami. Yıllık Araştırmalar Dergisi III 150,154, Ankara.

Karimzadeh, S., Kadaş, K., Askan, A., Erberik, M. A., ve Yakut, A. 2017. A study on fragility analyses of masonry buildings in Erzincan (Turkey) utilizing simulated and real ground motion records. Procedia engineering, 199, 188-193.

Karimzadeh, S., Kadas, K., Askan, A., ve Yakut, A. 2021. Comparison of real and simulated records using ground motion intensity measures. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 147, 106796.

Kazaz, İ., Yakut, A., Gülkan, P. 2006. Numerical simulation of dynamic shear wall tests: A benchmark study. Computers and structures, 84(8-9), 549-562.

Kazaz, İ. 2010. Dynamic characteristics and performance assessment of reinforced concrete structural walls. PhD thesis, Middle East Technical University, 379, Ankara.

Kebeasy, T. R. M., ve Husebye, E. S. 2003. Revising the 1759 Kattegat Earthquake questionnaires using synthetic wavefield analysis. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 139(3-4), 269-284.

Kızılpınar, Ç. 2018. Tarihi yığma yapıların yakın fay etkisi altındaki davranışının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü, 115, İstanbul.

Kocaman, İ. 2017. Tarihi yığma yapıların dinamik davranışının hesabında malzeme özelliklerinin tayini. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 122, Erzurum.

Kocaman, İ., Kazaz, İ., ve Okuyucu, D. 2018. Tarihi Erzurum Yakutiye Medresesi'nin yapısal davranışının incelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 20(58), 36-51.

Kocaman, İ. 2022. Tarihi yığma camilerin şekil değiştirme esaslı hasar sınırlarının belirlenmesi. Doktora Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,399, Erzurum.

Kocaman, İ. 2023. Effect of restoration interventions on the seismic behavior of historical masonry buildings: The case of Molla Siyah mosque. Engineering Failure Analysis, 148, 107206.

Kocaman, İ.,ve Kazaz, İ. 2023. Global drift ratio limits for historical masonry mosques. Bulletin of Earthquake Engineering, 21(5), 3011-3040.

Kocaman, İ., ve Gürbüz, M. 2024. Enhancing seismic performance of historic mosques through retrofitting measures. Engineering Structures, 301, 117245.

Konyalı, İ. H. 1960. Abideleri ve kitabeleri ile Erzurum tarihi. Ercan Matbaası, İstanbul

Korkmaz, M., Özdemir, M. A., Kavalı, E., & Çakır, F. 2018. Performance-based assessment of multi-story unreinforced masonry buildings: the case of Historical Khatib School İn Erzurum, Turkey. Engineering Failure Analysis, 94, 195-213.

Kotan, T. 2016. Erzurum'daki betonarme binaların malzeme ve taşıyıcı sistem özellikleri bakımından deprem güvenliğinin araştırılması. Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 206, Erzurum.

Kumbasaroğlu, A., ve Çelik, A. 2019. Eşdeğer deprem yükü yöntemi kullanılarak tarihi bir yığma yapının sismik performans düzeyinin belirlenmesi. Erzincan University Journal of Science and Technology, 12(3), 1590-1600.

Küçükuğurlu, M., 2013. Erzurum Tabyaları ve Kışlaları, Erzurum Büyükşehir Belediyesi Kültür Yayınları, 287, İstanbul.

Lay, T., and Wallace, T. C. 1995. Modern global seismology. Elsevier.

Mercuri, M., Pathirage, M., Gregori, A., ve Cusatis, G. 2021. On the collapse of the masonry Medici tower: An integrated discrete-analytical approach. Engineering Structures, 246, 113046.

Mohammedioun, B., ve Serva, L. 2001. Stress Drop, Slip Type, Earthquake Magnitude, and Seismic Hazard. Bulletin of the Seismological Society of America, 91, 4, pp. 694–707.

Motazedian, D., ve Atkinson, G. M. 2005. Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency. Bulletin of the Seismological Society of America, 95(3), 995-1010.

Motazedian, D. 2006. Region-specific key seismic parameters for earthquakes in Northern Iran. Bulletin of the Seismological Society of America, 96(4A), 1383-1395.

Nguyen, Q. T., & Livaoğlu, R. 2022.A health monitoring solution on damage detection of minarets. Engineering Failure Analysis, 135, 106154.

Numanoğlu, H., V. (2023), Yakın saha depremlerinin yönelim etkisinin yüksek katlı betonarme bir bina üzerinde irdelenmesi.Yüksek Lisans Tezi. Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü , İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Deprem ve Yapı Mühendisliği Bilim Dalı, 129, Gebze.

Okuyucu, D. 2020. Tek katlı betonarme bir yapı üzerinde operasyonel modal analiz uygulaması. DÜMF Mühendislik Dergisi, 11:3 (2020), pp. 1407-1419.

Orlando, M., Betti, M., ve Spinelli, P. 2020. Assessment of structural behaviour and seismic retrofitting for an Italian monumental masonry Building. Journal of Building Engineering, 29, 101115.

Özdoğan, D.,B.,2018. Schmidt çekici test yönteminin tarihi yığma yapılarda malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmasının araştırılması: Erzurum Kadana Camii Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 119, Erzurum.

Özer, Ç., Kocadağıstan, M. E., & Perk, S., 2019. Earthquake monitoring network of Erzurum: ATANET. International Journal of Scientific and Technological Research, 5(8), 35-47.

Özer, Ç. 2019. Investigation of the local soil effects of Erzurum and ıts surroundings using SSR and HVSR methods. Dokuz Eylul University Faculty Of Engineering Journal Of Science And Engineering, 21(61), 247-257.

Özsağlıcak, Ş. 2019. Erzurum merkezde bulunan ahşap direkli düz tavanlı cami ve mescitlerin restorasyon öncesi ve restorasyon sonrası genel durum. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü, 655, Erzurum.

Peeters, B., ve De Roeck, G. 2000. Reference based stochastic subspace identification in civil engineering. Inverse problems in Engineering, 8(1), 47-74.

Pellegrini, D., Girardi, M., Lourenço, P. B., Masciotta, M. G., Mendes, N., Padovani, C., ve Ramos, L. F. 2018. Modal analysis of historical masonry structures: Linear perturbation and software benchmarking. Construction and Building Materials, 189, 1232-1250.

Polat, H., E. 2015, Yedisu fayının (Kuzey Anadolu Fayı) sismik tehlike analizi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 101, İstanbul.

Putri, D., M., S., Wibiseno, P., S., Maharani, E., T., Aribowo, B., W., Fauzan, A., ve Alfaiz, K., (2022) Peak ground acceleration (PGA) analysis of Kendeng Fault

using earthquake information of the last 50 years. Proceedings PIT IAGI 51st, Makassar, South Sulawest, October 25-27, 2022

Rainieri, C., ve Fabbrocino, G. 2014. Operational modal analysis of civil engineering structures. Springer, New York, 142, 143.

Rota, M., Penna, A., ve Magenes, G., 2010. A methodology for deriving analytical fragility curves for masonry buildings based on stochastic nonlinear analyses. Engineering Structures, 32(5), 1312-1323.

Roszyk, E., Kwiatkowski, T., ve Moliński, W. 2013. Mechanical (2016) parameters of pine wood in individual annual rings under tensile stress along the grains in dry and wet state. *Wood Research, 58*(4), 571-580.

Sacco, G. L. S., Ferrero, C., Calderini, C., Battini, C., ve Vecchiattini, R. 2022. Effect of slow-moving landslides on a vaulted masonry building: The case of San Carlo Borromeo church in Cassingheno (Genova). In Geotechnical Engineering For The Preservation of Monuments and Historic Sites III (pp. 607-618). CRC Press.

Sağlam, T. 2021. Bir caddenin oluşum evreleri: Erzurum Cumhuriyet Caddesi. Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 25 (3), ss.1171-1199.

SeismoSignal, 2024 Kuvvetli hareket verinin sinyal işlemesine yönelik deprem yazılım, demo versiyon, 2024.

Senalik, C. A., ve Farber, B. 2021. Mechanical (2016) properties of wood. Chapter 5 in FPL- GTR-282, 5-1.

Sevim, B., Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Atamtürktür, S., ve Birinci, F. 2011. Finite element model calibration effects on the earthquake response of masonry arch bridges. Finite Elements İn Analysis And Design, 47(7), 621-634.

Shabani, A., Feyzabadi, M., ve Kioumarsi, M. 2022. Model updating of a masonry tower based on operational modal analysis: The role of soil-structure interaction. Case Studies in Construction Materials, 16, e00957.

Shi, S., Du, D., Xu, W., ve Wang, S., 2020. Theoretical and experimental study on an innovative seismic retrofit solution for old brick masonry buildings. Engineering Structures, 225, 111296

Soidworks (2022), 2022 Modeling Software.

Sözen, Ş., ve Çavuş, M. 2020. Tek açıklıklı tarihi taş köprülerde form değişikliğinin köprünün sismik davranışına etkisinin değerlendirilmesi: Niksar Yılanlı (Leylekli) Köprü örneği. Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi, 8(1), 48-59.

Stein, S., ve Wysession, M. 2003. An Introduction to Seismology, Earthquakes. Earth Structure.

Şaroğlu, F., Emre, Ö., ve Boray, A. 1987. Türkiye' nin Diri Fayları ve Depremsellikleri, (Rapor No: 8174), Ankara: Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü.

Şeker, B., Ş., Çakır, F., Doğangün, A., and Durmuş, A. 2015 Investıgatıon of structural behaviour of historical Erzurum Lala Pasha Mosque using finite element method. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 21(3).

Tarbassian, H. 1975. Erzurum (Garin):Its Armenian Historyand Traditions, The Garın Compatrıotıc Unıon Of The Unıted States, 275, United States of America.

Tanganelli, M., Rotunno, T., Cardinali, V., ve Viti, S. 2018. Public housing in Florence: seismic assessment of masonry buildings. Procedia Structural Integrity, 11, 266-273.

TBDY. 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

TYİDRYK, 2017. Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu. Vakıflar Genel Müdürlüğü, Ankara.

Torres, W., Almazán, J. L., Sandoval, C., ve Boroschek, R. 2017. Operational modal analysis and FE model updating of the Metropolitan Cathedral of Santiago, Chile. Engineering Structures, 143, 169-188.

Tozlu, S., 2000, Erzurum tarihinde depremler, Tarih Boyunca Anadolu'da Doğal Afetler ve Deprem Semineri, İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Tarih Araştırma Merkezi, 22-23 Mayıs 2000, İstanbul, ss. 93-117.

Uğurhan, B. 2010. Stochastıc strong ground motıon sımulatıons on North Anatolıan Fault Zone and Central Italy: valıdatıon, lımıtatıon and sensıtıvıty analyses, Phd Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Scıences of Mıddle East Technıcal Unıversıty, 126, Ankara.

Ugurhan, B., ve Askan, A. 2010. Stochastic strong ground motion simulation of the 12 November 1999 Düzce (Turkey) earthquake using a dynamic corner frequency approach. Bulletin of the Seismological Society of America, 100(4), 1498-1512.

Uzdil, O. 2020. Mevcut tarihi yığma yapıların sismik performansının belirlenmesi ve güçlendirme yöntemi: İstanbul Üniversitesi Rektörlük Binası. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 181, İstanbul.

Ünal, B., ve Askan, A., 2015. Bursa Bölgesi için erel sismik istasyon ağından elde edilen parametreler ile yer hareketi simülasyonu. 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Dokuz Eylül Üniversitesi, 14-16 Ekim 2015,İzmir.

Wald, D. J., Quitoriano, V., Heaton, T. H., ve Kanamori, H. 1999. Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli intensity in California. Earthquake spectra, 15(3), 557-564.

Wells, D. L., ve Coppersmith, K. J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bulletin of the seismological Society of America, 84(4), 974-1002.

Yapıcı, H. 2015. Tarih boyunca Erzurum'da meydana gelen zelzeleler. Mavi Atlas, (5), 14-20.

Yaghmaei-Sabegh, S., ve Lam, N. T. 2010. Ground motion modelling in Tehran based on the stochastic method. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30(7), 525-535.

Yetkin. M., Erkek. H., ve Calayır. Y, 2021. Operasyonel modal analiz yönteminde referanslı ve referanssız ölçümlerin karşılaştırılması: Bir minare örneği. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(3): 2069-2078.

Yıldızoğlu, H., 2019. Tarihi yığma yapıların performans analizi: Okul binası örneği. Yüksek Lisans Tezi, Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 112, Bayburt.

Yurttaş, H. 2001. Erzurum Ulu Camii'ne ait yeni bir kitabe ve yapı hakkında bazı düşünceler. Atatürk Üniversitesi Türkiyat Araştırmaları Enstitüsü Dergisi, 17, 191-207.

Yücemen, M.,S. ve Akkaya, A. 1993. Deprem Tehlikesi Tahmininde Değişik Stokastik Modeller ve Karşılaştırılmaları, Üniversitesi, Ankara, 466-475.

Zhang, L., Brincker, R., ve Andersen, R. 2005. An overview of operational modal analysis: Major development and issues. Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference, April 26-27, 2005, Copenhagen, Denmark (pp. 179-190). Aalborg Universitet.

EKLER

EK 1.1. Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden alınan resmi çalışma izin belgesi.

T.C.
KÜLTÜR VE TURİZM BAKANLIĞI
Vakıflar Genel Müdürlüğü
Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü

Sayı : E-99739598-150.05-356159 02.12.2022

Konu : Araştırma İzni Talebi

ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜNE
(Personel Dairesi Başkanlığı)

İlgi : a) Genel Müdür Yardımcılığı (Sn. Rifat Türker) (Kültürel İşler Müdürlüğü)'nın 01.12.2022 tarihli ve E-87772441-150.05-355419 sayılı olur.
b) 27.10.2022 tarihli ve E-16423269-605.01-2200037265 sayılı yazınız.

İlgi (b) yazıda; Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU'nun danışmanlığını yaptığı doktora öğrencileri Dursun Burak ÖZDOĞAN ve Tümer ESLEK'in doktora tez araştırmaları kapsamında tabloda sunulan yapılarda inceleme ve değerlendirme çalışmaları yapmak üzere ve çalışma sonuçlarının istenilen formatta birer kopyalarının sunulması kaydıyla İdaremizden araştırma izni talep edilmektedir.

İlgi (a) yazıyla; yapılacak araştırmanın bir suretinin Vakıflar Genel Müdürlüğü Kültür ve Tescil Dairesi Başkanlığı ile Basın ve Halkla İlişkiler Müşavirliğine gönderilmesi şartıyla, 28.05.2020 tarih ve 2020/23 sayılı genelge çerçevesinde adı geçen başvuru sahiplerine belirtilen konularda araştırma izni verilmiştir.

Gereğini arz ederim.

Cengiz KESKİN
Bölge Müdürü

Bu belge, güvenli elektronik imza ile imzalanmıştır.
Doğrulama Kodu: D241A7E2-0012-46C0-8206-E508752E3DDD Doğrulama Adresi: https://www.turkiye.gov.tr/vgm-ebys

Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü Gürcü Kapı Vakıflar Bankası Üstü Kat: 4-5
Yakutiye/Erzurum
Telefon No: (0442) 234 1202 Faks No: (0442) 2334741
İnternet Adresi: www.vgm.gov.tr
KEP Adresi: erzurum@vgm.hs01.kep.tr

Bilgi için:Atalay ULUKAYA
İnşaat Mühendisi
Telefon No:(442) 234 12 02-1141

EK 1.2. Resmi çalışma izni alınan tarihi camiler

T.C.
KÜLTÜR VE TURİZM BAKANLIĞI
Vakıflar Genel Müdürlüğü
Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü

Sayı : E-99739598-150.05-350505 24.11.2022

Konu : Araştırma İzni Talebi

ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜNE

İlgi : 27.10.2022 tarihli ve E-16423269-605.01-2200037265 sayılı yazınız.

İlgi yazıda; Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU'nun danışmanlığını yaptığı doktora öğrencileri Dursun Burak ÖZDOĞAN ve Tümer ESLEK'in doktora tez araştırmaları kapsamında aşağıdaki tabloda sunulan yapılarda inceleme ve değerlendirme çalışmaları yapmak üzere ve çalışma sonuçlarının istenilen formatta birer kopyalarının sunulması kaydıyla İdaremizden araştırma izni talep edilmektedir.

Yapılacak çalışmalarda **2863 Sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu'na** uygun şekilde hareket edilmesi, eserlerin ahşap ve taş elemanlarına zarar verilmemesi şartıyla aşağıdaki tabloda bulunan yapılarda inceleme ve değerlendirme çalışmalarının yapılmasında bir sakınca bulunmamaktadır.

Bilgilerini ve gereğini rica ederim.

Vakıflar Erzurum Bölge Müdürlüğü'nden İzin Alınacak Çalışma Alanları	**Erzurum İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü'nden İzin Alınacak Çalışma Alanları**
Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii	Erzurum Kalesi
Caferiye Camii	Erzurumlu Aşık Emrah Edebiyat Müze Kütüphanesi
Demirciler Fetih Camii	Atatürk Evi
Hacıcuma Camii	Yakutiye Medresesi
Kadana Camii	Erzurum Kongre Binası
Lala Paşa Camii	
Murat Paşa Camii	
Narmanlı Camii	
Pervizoğlu Camii	
Ulu Camii	
Yeğenağa Camii	
Yukarı Habip Efendi Camii	

Cengiz KESKİN
Bölge Müdürü

Bu belge, güvenli elektronik imza ile imzalanmıştır.
Doğrulama Kodu: B7DD5C8B-B854-43BE-874C-9FE71C61317E Doğrulama Adresi: https://www.turkiye.gov.tr/vgm-ebys

Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü Gürcü Kapı Vakıflar Bankası Üstü Kat: 4-5
Yakutiye/Erzurum
Telefon No: (0442) 234 1202 Faks No: (0442) 2334741
İnternet Adresi: www.vgm.gov.tr
KEP Adresi: erzurum@vgm.hs01.kep.tr

Bilgi için:Atalay ULUKAYA
İnşaat Mühendisi
Telefon No:(442) 234 12 02-1141