



**ERZURUM İL MERKEZİNDE BULUNAN TARİHİ
CAMİİ MİNARELERİNİN MODAL DAVRANIŞ
PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK ELDE
EDİLMESİ**

Aygökçe İrem ŞİMŞEK

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU**

2025

Her hakkı saklıdır.



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ERZURUM İL MERKEZİNDE BULUNAN TARİHİ CAMİİ
MİNARELERİNİN MODAL DAVRANIŞ PARAMETRELERİNİN DENEYSEL
OLARAK ELDE EDİLMESİ**

Aygökçe İrem ŞİMŞEK

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2025

Her hakkı saklıdır

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY FORMU

**ERZURUM İL MERKEZİNDE BULUNAN TARİHİ CAMİİ
MİNARELERİNİN MODAL DAVRANIŞ PARAMETRELERİNİN DENEYSEL
OLARAK ELDE EDİLMESİ**

Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU danışmanlığında, Aygökçe İrem ŞİMŞEK tarafından hazırlanan bu çalışma 29 / 08 / 2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oy birliği (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: 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.

29 / 08 / 2025

İmzası

Aygökçe İrem ŞİMŞEK

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERZURUM İL MERKEZİNDE BULUNAN TARİHİ CAMİİ MİNARELERİNİN MODAL DAVRANIŞ PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK ELDE EDİLMESİ

Aygökçe İrem ŞİMŞEK

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU

Geçmişten bugüne kadar birçok medeniyete ev sahibi olan Erzurum tarihi eser bakımından oldukça zengindir. Tarihi camiler bu zenginliğin başında gelmektedir. Erzurum deprem riski bakımından sık sık depremlerin yaşandığı ve tehlikeli bir konum üzerinde bulunmaktadır. Gelecek dönemde yaşanması kuvvetle muhtemele depremler öncesi önlemler alınması, kültür mirasımızın korunması ve geleceğe devredilmesi bakımından büyük önem arz etmektedir. Tahribatsız bir deney yöntemi olan operasyonel modal analiz, yapının doğal titreşimleri üzerinden modal parametrelerin belirlenmesine imkân tanımaktadır. Bu yönüyle tarihi yapılar için güvenilir bir değerlendirme aracı sunmaktadır. Bu tez çalışmasında, Erzurum il merkezinde yer alan tarihi cami minarelerinin dinamik davranışlarının belirlenmesi amacıyla operasyonel modal analiz yöntemi uygulanmıştır. Çalışma kapsamında Erzurum'da bulunan 9 tarihi cami minaresinin sonlu elemanlar modelleri SAP2000 yazılımında oluşturulmuş ve teorik modal analizler gerçekleştirilmiş, Operasyonel modal analiz uygulaması ile minarelerin dinamik davranış parametreleri deneysel olarak elde edilmiştir. Daha sonra teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak minare modellerinde model kalibrasyonları yapılmıştır. Model kalibrasyonları ile deneysel modal analiz sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır.

2025, 208 sayfa

Anahtar Kelimeler: Erzurum, Tarihi yığma minare, Operasyonel modal analiz, Dinamik kimliklendirme, Tahribatsız deney yöntemi

ABSTRACT

MS. Thesis

EXPERIMENTAL OBTAINING OF MODAL BEHAVIOR PARAMETERS OF HISTORICAL MOSQUE MINARATS IN ERZURUM CITY CENTER

Aygökçe İrem ŞİMŞEK

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

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Dilek OKUYUCU

Erzurum, which has hosted numerous civilizations throughout history, is remarkably rich in cultural heritage, particularly historical mosques. However, the city is located in a seismically active region where destructive earthquakes have occurred frequently. Taking preventive measures before possible future earthquakes is therefore of great importance in terms of protecting and transferring cultural heritage to future generations. Operational Modal Analysis, a non-destructive testing method, allows the identification of modal parameters based on the natural vibrations of a structure and thus provides a reliable tool for the assessment of historical buildings. In this thesis, Operational modal analysis was applied to determine the dynamic behavior of historical mosque minarets located in the city center of Erzurum. Within the scope of the study, finite element models of nine historical mosque minarets were created using SAP2000 software, and theoretical modal analyses were conducted. Subsequently, field measurements were carried out, and the dynamic behavior parameters of the minarets were experimentally obtained through operational modal analysis. The theoretical and experimental results were then compared, and model calibrations were performed. The calibration studies showed that the calibrated finite element models yielded modal analysis results in close agreement with the experimental findings.

2025, 208 pages

Keywords: Erzurum, Historical masonry minaret Operational modal analysis, Dynamic identifaciton ,Non-destructive test method,

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitim süresi ve çalışması boyunca her türlü desteğini ve yardımını esirgemeyen değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam için değerli katkılarını benden esirgemeyen jüri üyesi hocalarım Prof. Dr. Oğuz Akın DÜZGÜN ve Dr. Öğr. Üyesi Muhammed GÜRBÜZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasının deneysel aşamaları sırasında değerli katkıları ve yardımları için Sena REFAYELİ ve Merve BAYRAKTUTAN'a teşekkür ederim.

Son olarak Hayatım boyunca daha iyi bir seviyeye gelmem için maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her daim yanımda olan Vildan ŞİMŞEK, Nevzat ŞİMŞEK , Ayışıl Ecem ŞİMŞEK'e ve tüm desteğiyle her zaman yanımla olan Yusuf ADIGÜZEL'e teşekkür ederim.

Aygökçe İrem ŞİMŞEK

Ağustos 2025

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1.GİRİŞ	1
1.1. Tezin Önemi.....	4
1.2. Tezin Kapsamı	4
2.KAYNAK ÖZETLERİ	6
3.MATERYAL ve YÖNTEM	24
3.1.Erzurum'un Tarihsel Gelişimi.....	24
3.1.1.Türk Dönemi ve Saltuklular.....	24
3.1.2.Osmanlı Dönemi ve imar faaliyetleri.....	25
3.1.3.Coğrafi ve ekonomik konumu.....	25
3.1.4.Tarihi eserler ve kültürel miras	26
3.2.Türkiye'nin Depremselliği	27
3.2.1.Depremsel konum ve tektonik yapı.....	27
3.2.2.Deprem bölgeleri ve aktif fay hatları	27
3.2.3.Sismotektonik yapı ve fay sistemleri	28
3.2.4.Tarihsel deprem kayıtları	29
3.2.5.Depreme dayanıklı yapı yaklaşımları.....	29
3.2.6.6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri	29
3.2.7.6 Şubat 2023 depremleri sonrası Türkiye'de deprem düzenlemeleri.....	30
3.3.Erzurum'un Jeolojik ve Depremsel Özellikleri.....	31
3.3.1.Tarihsel depremler ve bölgesel etkileri	31
3.3.2.Erzurum'un deprem riski ve yapısal dayanıklılık	32
3.3.3.Güncel düzenlemeler ve risk azaltma çalışmaları	32
3.3.4.Erzurum ve 6 Şubat 2023 depremleri sonrası yığma yapılar	33

3.4.Cami Kavramı ve Tarihçesi	33
3.5.Minare Kavramı ve Tarihçesi.....	35
3.6.Narinlik.....	40
3.6.1. Narinlik oranının etkileri.....	40
3.7.Çalışmanın Gerçekleştirildiği Camiler.....	42
3.7.1.Pervizoğlu Camii.....	42
3.7.2.Lala Mustafa Paşa Camii	44
3.7.3.Erzurum Ulu Camii	46
3.7.4.Murat Paşa Camii	53
3.7.5.Yukarı Habip Efendi Camii	55
3.7.6.Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii	58
3.7.7.Yeğenağa Camii	61
3.7.8. Kadana Camii.....	64
3.7.8. Hacı Cuma Camii	67
3.8.Yapısal Modelleme Kavramı ve Yöntemleri	69
3.8.1.Mikro Modelleme.....	70
3.8.2.Makro Modelleme	71
3.8.3.Basitleştirilmiş mikro modelleme	72
3.8.4.Sonlu eleman modellerinin oluşturulması.....	72
3.9.Yapı Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi	74
3.9.1.Teorik modal analiz.....	75
3.9.2.Deneysel modal analiz	78
3.10.Yığma Yapıların Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması.....	85
3.10.1.Modelleme ilkeleri ve idealleştirilmesi	86
3.10.1.1. Geometrinin idealleştirilmesi	86
3.10.1.2. Malzemenin idealleştirilmesi	86
4.ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	88
4.1. Pervizoğlu Camii.....	89
4.1.1. Pervizoğlu Camii minaresi sonlu eleman modeli.....	90
4.1.2. Pervizoğlu Camii minaresi operasyonel modal analiz uygulaması.....	94
4.1.3. Pervizoğlu Camii minaresi sonlu eleman model kalibrasyon çalışması	101
4.2. Lala Mustafa Paşa Camii	103
4.2.1. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi sonlu eleman modeli	104

4.2.2. Lala Mustafa Paşa Camii operasyonel modal analiz uygulaması	107
4.3.3. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi model kalibrasyon çalışması	112
4.3. Erzurum Ulu Camii	114
4.3.1. Ulu Camii Minaresi sonlu eleman modeli	116
4.3.2. Ulu Camii Minaresi operasyonel modal analiz uygulaması	119
4.3.3. Ulu Camii minaresi model kalibrasyon çalışması.....	124
4.4. Murat Paşa Camii.....	126
4.4.1. Murat Paşa Camii teorik modal analiz uygulaması.....	127
4.4.2. Murat Paşa Camii minaresi operasyonel modal analiz uygulaması.....	130
4.4.3. Murat Paşa Camii minaresi model kalibrasyon çalışması.....	135
4.5. Yukarı Habip Efendi Camii	137
4.5.1. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi teorik modal analiz uygulaması	138
4.5.2. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi operasyonel modal analiz uygulaması.....	141
4.5.3. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi model kalibrasyon çalışması	145
4.6. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii	147
4.6.1. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresi teorik modal analiz uygulaması ...	149
4.6.2. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresi operasyonel modal analiz uygulaması	151
4.6.3. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresi model kalibrasyon çalışması.....	156
4.7. Yeğenağa Camii	158
4.7.1. Yeğenağa Camii minaresi teorik modal analiz uygulaması	159
4.7.2. Yeğenağa Camii minaresi operasyonel modal analiz uygulaması	162
4.7.3. Yeğenağa Camii minaresi model kalibrasyon çalışması.....	166
4.8. Kadana Camii.....	168
4.8.1. Kadana Camii teorik modal analiz uygulaması	169
4.8.2. Kadana Camii minaresi operasyonel modal analiz uygulaması.....	172
4.8.3. Kadana Camii minaresi model kalibrasyon çalışması	177
4.9. Hacı Cuma Camii.....	179
4.9.1. Hacı Cuma Camii minaresi teorik modal analiz uygulaması.....	179
4.9.2. Hacı Cuma Camii minaresi operasyonel modal analiz uygulaması.....	182
4.9.3. Hacı Cuma Camii minaresi model kalibrasyon çalışması.....	186
4.10. Minare Dinamik Davranış Parametrelerinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi	188
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	196

KAYNAKLAR.....	197
EKLER.....	208



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

Kısaltmalar

AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetim Müdürlüğü
ÇSDS	Çok Serbestlik Dereceli Sistemler
EMA	Geleneksel Deneysel Modal Analiz
EFDD	İleri Frekans Alanında Ayırıştırma Yöntemi
CFDD	Eğri Uyumlu Frekans Alanında Ayırıştırma Yöntemi
FDD	Frekans Alanında Ayırıştırma
MAC	Modal Güvence Kriteri
OMA	Operasyonel Modal Analiz
SSI	Stokastik Alt Alan Tanımlama

SSI UPC	Stokastik Alt Uzay Tanımlama Yöntemi Ağırlıksız Temel Bileşenler
SSI UPC-X	Stokastik Alt Uzay Tanımlama Genişletilmiş Ağırlıksız Temel Bileşenler
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TSDS	Tek Serbestlik Dereceli Sistemler



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Türkiye Deprem Tehlike Haritası (Anonim 2024a)	28
Şekil 3.2. Amr Bin Al-As camii (Anonim 2025a)	35
Şekil 3.3. Selimiye Camii (Anonim 2025c)	36
Şekil 3.4. Kutub Minar Camii (Anonim 2025d)	36
Şekil 3.5. Samerra Camii spiral minaresi (Anonim 2025e)	37
Şekil 3.6. Şeyh Mutahhar Camii minaresi (Anonim 2025f)	37
Şekil 3.7. Veledi Yaniç Camii minaresi	38
Şekil 3.8. Minare ana bölümleri	38
Şekil 3.9. Örnek minare basamağı – Erzurum Ulu Camii	39
Şekil 3.10. Pervizoğlu Camii konumu (Anonim 2025i)	42
Şekil 3.11. Pervizoğlu Camii genel görünümü	43
Şekil 3.12. Pervizoğlu Camii minare görünümü	43
Şekil 3.13. Lala Mustafa Paşa Camii konumu (Anonim 2025j)	44
Şekil 3.14. Lala Mustafa Paşa Camii	45
Şekil 3.15. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi	45
Şekil 3.16. Ulu Camii konumu (Anonim 2025k)	46
Şekil 3.17. Ulu Camii genel görünümü	47
Şekil 3.18. Ulu Camii minaresi	51
Şekil 3.19. Ulu Camii 1940’lı yıllar (Anonim 2025l)	52
Şekil 3.20. Ulu Camii restorasyonu (Anonim 2025m)	52
Şekil 3.21. Muratpaşa Camii konumu (Anonim 2025n)	53
Şekil 3.22. Muratpaşa Camii genel görünümü	53
Şekil 3.23. Murat Paşa Camii Minaresi	54
Şekil 3.24. Yukarı Habip Efendi Camii konumu (Anonim 2025o)	55
Şekil 3.25. Yukarı Habip Efendi Camii genel görünümü	56
Şekil 3.26. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi eski hali (Anonim 2025p)	57
Şekil 3.27. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi yeni hali	57
Şekil 3.28. Taş Camii konumu (Anonim 2025r)	58
Şekil 3.29. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii genel görünümü	59
Şekil 3.30. Taş Camii minaresi	60
Şekil 3.31. Yeğenağa Camii konumu (Anonim 2025s)	62

Şekil 3.32. Yeğenağa Camii genel görünümü.....	62
Şekil 3.33. Yeğenağa Camii minaresi.....	63
Şekil 3.34. Kadana Camii konumu (Anonim 2025t)	64
Şekil 3.35. Kadana Camii genel görünümü (Rota Erzurum)	65
Şekil 3.36. Kadana Camii minaresi.....	66
Şekil 3.37. Hacı Cuma Camii Konumu (Anonim 2025u)	67
Şekil 3.38. Hacı Cuma Camii genel görünümü.....	68
Şekil 3.39. Hacı Cuma Camii minaresi eski ve yeni hali.....	69
Şekil 3.40. Mikro modelleme tekniği	70
Şekil 3.41. Makro modelleme tekniği	71
Şekil 3.42. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği.....	72
Şekil 3.43. TSDS Basitleştirilmiş kütle-yay Modeli	76
Şekil 3.44. Serbest cisim diyagramı	76
Şekil 3.45. Deneyisel modal analiz şematik gösterimi (Özdoğan 2024)	79
Şekil 3.46. Geleneksel deneyisel modal analiz	80
Şekil 3.47. OMA yöntemi şematik gösterimi	81
Şekil 3.48. OMA yönteminde tepki titreşimi kayıtları için kullanılan hassas ivmeölçerler	83
Şekil 3.49. OMA uygulamasında kullanılan dinamik veri toplama sistemi.....	83
Şekil 4.1. Pervizoğlu Camii minare görünümü.....	89
Şekil 4.2. SAP2000 yazılımında modellenen örnek bir minare.....	90
Şekil 4.3. Pervizoğlu Camii minare rölevesi (Özdoğan 2024)	91
Şekil 4.4. Pervizoğlu Camii minaresi sonlu eleman modeli	92
Şekil 4.5. Pervizoğlu Camii Minaresi sonlu eleman modeli a) Kısa doğrultuda öteleme b) Uzun doğrultuda öteleme c) Burulma.....	93
Şekil 4.6. Pervizoğlu Camii minaresi ivmeölçer yerleşim krokisi	94
Şekil 4.7. Pervizoğlu Camii minaresi ivmeölçer sabitleme işlemi	95
Şekil 4.8. Pervizoğlu Camii minaresi OMA veri toplama sistemi.....	95
Şekil 4.9. Pervizoğlu Camii minaresi Artemis yazılım geometrisi.....	96
Şekil 4.10. Pervizoğlu Camii minaresi ivmeölçerlerin yazılımda tanıtılması	97
Şekil 4.11. Pervizoğlu Camii minaresi titreşim kayıtları	97
Şekil 4.12. Pervizoğlu Camii minaresi spektral yoğunluk fonksiyonu.....	98
Şekil 4.13. Pervizoğlu Camii minaresi MAC değerleri grafiği	100

Şekil 4.14. Lala Mustafa Paşa Camii genel görünümü ve minaresi	104
Şekil 4.15. Lala Mustafa Paşa Camii minare rölevesi	105
Şekil 4.16. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi sonlu eleman modeli	105
Şekil 4.17. Lala Mustafa Paşa Camii Minaresi a) kısa doğrultuda öteleme b) uzun doğrultuda öteleme c) burulma.....	106
Şekil 4.18. Lala Mustafa Paşa Camii minare ivmeölçer yerleşim krokisi	107
Şekil 4.19. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi ivmeölçer sabitleme işlemleri.....	108
Şekil 4.20. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi OMA çalışması veri toplama sistemi.....	108
Şekil 4.21. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi yazılım görüntüsü	109
Şekil 4.22. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi ivmeölçer yön tanımlanması.....	110
Şekil 4.23. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi titreşim kayıtları.....	110
Şekil 4.24. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi spektral yoğunluk fonksiyonu	111
Şekil 4.25. Lala Mustafa Paşa minaresi MAC grafiği	112
Şekil 4.26. Ulu Camii minaresinden çatıya geçiş kapısı.....	115
Şekil 4.27. Ulu Camii minaresinde gözlemlenen çatlaklar.....	115
Şekil 4.28. Ulu Camii minaresi.....	116
Şekil 4.29. Ulu Camii minare rölevesi.....	117
Şekil 4.30. Ulu Camii minaresi sonlu eleman modeli	117
Şekil 4.31. Ulu Camii minaresi a) kısa doğrultuda öteleme b)uzun doğrultuda öteleme c)burulma.....	119
Şekil 4.32. Ulu Camii minare ivmeölçer yerleşim krokisi.....	120
Şekil 4.33. Ulu Cami minaresi ivmeölçer sabitleme işlemi.....	120
Şekil 4.34. Ulu Cami minaresi OMA çalışması veri toplama sistemi	120
Şekil 4.35. Ulu Camii minaresi yazılım geometrisi	121
Şekil 4.36. Ulu Camii minaresi ivmeölçer ve yönlerin tanımlanması	121
Şekil 4.37. Ulu Camii minaresi titreşim kayıtları	122
Şekil 4.38. Ulu Camii minaresi spektral yoğunluk fonksiyonları.....	122
Şekil 4.39. Ulu Camii minaresi MAC değerleri	123
Şekil 4.40. Murat Paşa Camii minaresi.....	126
Şekil 4.41. Murat Paşa Camii minare rölevesi.....	128
Şekil 4.42. Murat Paşa camii minaresi sonlu eleman modeli	128
Şekil 4.43. Murat Paşa Camii minaresi a)kısa doğrultuda öteleme b)uzun doğrultuda Öteleme c)burulma.....	130

Şekil 4.44. Murat Paşa Camii minaresi ivmeölçer yerleşim krokisi.....	131
Şekil 4.45. Murat Paşa Camii minaresi ivmeölçer sabitleme işlemi	131
Şekil 4.46. Murat Paşa Camii minaresi OMA çalışması ve veri toplama sistemi	132
Şekil 4.47. Murat Paşa Camii minaresi yazılım modeli	133
Şekil 4.48. Murat Paşa Camii minaresi ivmeölçer yerleşim ve tanımlamaları.....	133
Şekil 4.49. Murat Paşa Camii minaresi titreşim kayıtları	133
Şekil 4.50. Murat Paşa Camii minaresi spektral yoğunluk fonksiyonu.....	134
Şekil 4.51. Murat Paşa Camii minaresi MAC değerleri grafiği.....	135
Şekil 4.52 Yukarı Habip Efendi Camii minaresi yeni hali	137
Şekil 4.53. Yukarı Habip Efendi Camii minare rölevesi	138
Şekil 4.54. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi sonlu eleman modeli.....	139
Şekil 4.55. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi a)kısa doğrultuda öteleme b)uzun doğrultuda öteleme c)burulma.....	140
Şekil 4.56. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi ivmeölçer yerleşim krokisi	141
Şekil 4.57. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi ivmeölçerlerin sabitlenmesi.....	142
Şekil 4.58. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi veri toplama sistemi.....	142
Şekil 4.59. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi yazılım modeli	143
Şekil 4.60. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi ivmeölçerlerin tanıtılması	143
Şekil 4.61. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi titreşim kayıtları.....	143
Şekil 4.62. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi spektral yoğunluk fonksiyonu	144
Şekil 4.63. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi MAC değerleri.....	145
Şekil 4.64. Aşağı Hasan-1 Basri Taş Camii minaresi.....	148
Şekil 4.65. Aşağı Hasan-1 Basri Taş Camii minare rölevesi.....	149
Şekil 4.66. Aşağı Hasan-1 Basri Taş Camii minaresi sonlu eleman modeli	150
Şekil 4.67. Aşağı Hasan-1 Basri Taş camii minaresi a) kısa doğrultuda öteleme b)uzun doğrultuda öteleme c)burulma.....	151
Şekil 4.68. Aşağı Hasan-1 Basri Taş Camii minaresi ivmeölçer yerleşim krokisi.....	152
Şekil 4.69. Aşağı Hasan-1 Basri Taş Camii minaresi ivmeölçer sabitleme işlemi.....	152
Şekil 4.70. Aşağı Hasan-1 Basri Taş Camii minaresi veri toplama sistemi	153
Şekil 4.71. Aşağı Hasan-1 Basri Taş Camii minaresi temsili modeli.....	153
Şekil 4.72. Aşağı Hasan-1 Basri Taş Camii minaresi ivmeölçer yerleşimi.....	154
Şekil 4.73. Aşağı Hasan-1 Basri Taş Camii minaresi titreşim kayıtları	154
Şekil 4.74. Aşağı Hasan-1 Basri Taş Camii minaresi spektral yoğunluk fonksiyonu ...	154

Şekil 4.75. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresi MAC değerleri grafiği.....	155
Şekil 4.76. Yeğenağa Camii minaresi.....	158
Şekil 4.77. Yeğenağa Camii minare rölevesi.....	159
Şekil 4.78. Yeğenağa Camii Minaresi sonlu eleman modeli.....	160
Şekil 4.79. Yeğenağa camii minaresi a) kısa doğrultuda öteleme b) uzun doğrultuda öteleme c) burulma.....	161
Şekil 4.80. Yeğenağa Camii minaresi ivmeölçer yerleşim krokisi.....	162
Şekil 4.81. Yeğenağa Camii minaresi ivmeölçer sabitleme işlemi.....	163
Şekil 4.82. Yeğenağa Camii minaresi veri toplama sistemi (Özdoğan 2024)	163
Şekil 4.83. Yeğenağa Camii minaresi yazılım geometrisi.....	164
Şekil 4.84. Yeğenağa Camii minaresi ivmeölçerlerin tanımlanması.....	164
Şekil 4.85. Yeğenağa Camii minaresi titreşim kayıtları	164
Şekil 4.86. Yeğenağa Camii minaresi spektral yoğunluk fonksiyonları.....	165
Şekil 4.87. Yeğenağa Camii minaresi MAC değerleri	166
Şekil 4.88. Kadana Camii minaresi.....	169
Şekil 4.89. Kadana Camii minare rölevesi.....	170
Şekil 4.90. Kadana Camii minaresi sonlu eleman modeli	170
Şekil 4.91. Kadana camii minaresi a) kısa doğrultuda öteleme b) uzun doğrultuda öteleme c) burulma	172
Şekil 4.92. Kadana Camii minaresi ivmeölçer yerleşim krokisi.....	173
Şekil 4.93. Kadana Camii minaresi ivmeölçer sabitleme işlemi	173
Şekil 4.94. Kadana Camii minaresi OMA çalışması veri toplama sistemi.....	174
Şekil 4.95. Kadana Camii minaresi temsili geometrisi.....	174
Şekil 4.96. Kadana Camii minaresi ivmeölçerlerin tanımlanması.....	175
Şekil 4.97. Kadana Camii minaresi titreşim kayıtları	175
Şekil 4.98. Kadana Camii minaresi spektral yoğunluk fonksiyonu.....	175
Şekil 4.99. Kadana Camii minaresi MAC değerleri grafiği.....	176
Şekil 4.100. Hacı Cuma Camii minaresi.....	179
Şekil 4.101. Hacı Cuma Camii minare rölevesi.....	180
Şekil 4.102. Hacı Cuma Camii minaresi sonlu eleman modeli.....	180
Şekil 4.103. Hacı Cuma camii minaresi a) kısa doğrultuda öteleme b) uzun doğrultuda öteleme c) burulma.....	181
Şekil 4.104. Hacı Cuma Camii minaresi ivmeölçer yerleşim krokisi.....	182

Şekil 4.105. Hacı Cuma Camii minaresi ivmeölçer sabitleme işlemi.....	183
Şekil 4.106. Hacı Cuma Camii minaresi veri toplama sistemi	183
Şekil 4.107. Hacı Cuma Camii minaresi temsili geometrisi.....	184
Şekil 4.108. Hacı Cuma Camii minaresi ivmeölçer yerleşimi.....	184
Şekil 4.109. Hacı Cuma Camii minaresi titreşim kayıtları.....	184
Şekil 4.110. Hacı Cuma Camii minaresi spektral yoğunluk fonksiyonu.....	185
Şekil 4.111. Hacı Cuma camii minaresi MAC değerleri	186
Şekil 4.112 Minare yüksekliği – hâkim titreşim periyodu dağılımı.....	191
Şekil 4.113 Minare gövde çapı – hâkim titreşim periyodu dağılımı.....	191
Şekil 4.114. Minare narinlik oranı – hâkim titreşim periyodu dağılımı.....	192



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Yazılım frekans-zaman çözümleme tablosu.....	84
Çizelge 3.2. Modal analiz yöntemlerinin kıyaslanması.....	85
Çizelge 4.1. Çalışmanın yapıldığı camilere ait minarelerin bilgileri.....	88
Çizelge 4.2. Pervizoğlu Camii minaresi teorik modal analiz sonuçları.....	93
Çizelge 4.3. Pervizoğlu Camii minaresi OMA sonuçları.....	99
Çizelge 4.4. Pervizoğlu Camii minaresi MAC değerleri tablosu.....	100
Çizelge 4.5. Pervizoğlu Camii minaresi ilk teorik modal analiz ve OMA sonuçları.....	101
Çizelge 4.6. Pervizoğlu Camii minaresi elastite modül kalibrasyon değerleri.....	102
Çizelge 4.7. Pervizoğlu Camii Minaresi kalibreli teorik modal analiz sonuçları ile OMA sonuçları.....	103
Çizelge 4.8. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi teorik modal analiz sonuçları.....	106
Çizelge 4.9. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi OMA çalışması sonuçları.....	111
Çizelge 4.10. Lala Mustafa Paşa minaresi MAC değerleri tablosu.....	112
Çizelge 4.11. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi ilk teorik modal analiz ve OMA sonuçları.	113
Çizelge 4.12. Lala Mustafa Paşa minaresi elastite modül kalibrasyon değerleri.....	113
Çizelge 4.13. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi kalibreli teorik modal analiz ve OMA sonuçları.....	114
Çizelge 4.14. Ulu Camii minaresi teorik modal analiz sonuçları.....	118
Çizelge 4.15. Ulu Camii minaresi OMA sonuçları.....	123
Çizelge 4.16. Ulu Camii minaresi MAC değerleri tablosu.....	124
Çizelge 4.17. Ulu Camii minaresi ilk teorik modal analiz ve OMA sonuçları.....	124
Çizelge 4.18. Ulu Camii minaresi elastite modül kalibrasyon değerleri.....	125
Çizelge 4.19. Ulu Camii Minaresi kalibreli teorik modal analiz sonuçları ile OMA sonuçları.....	125
Çizelge 4.20. Murat Paşa Camii minaresi teorik modal analiz sonuçları.....	129
Çizelge 4.21. Murat Paşa Camii minaresi OMA sonuçları.....	133
Çizelge 4.22. Murat Paşa Camii minaresi MAC değerleri tablosu.....	134
Çizelge 4.23. Murat Paşa Camii minaresi ilk teorik modal analiz ve OMA sonuçları.....	135
Çizelge 4.24. Murat Paşa Camii minaresi elastite modül kalibrasyon değerleri.....	135

Çizelge 4.25. Murat Paşa Camii minaresi kalibreli teorik modal analiz ve OMA sonuçları.....	136
Çizelge 4.26. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi teorik modal analiz sonuçları.....	139
Çizelge 4.27. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi OMA sonuçları.....	143
Çizelge 4.28. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi MAC değerleri tablosu.....	144
Çizelge 4.29. YHE Camii minaresi kalibreli teorik modal analiz ve OMA sonuçları....	145
Çizelge 4.30. YHE Camii minaresi elastiste modül kalibrasyon değerleri.....	145
Çizelge 4.31. YHE Camii Minaresi kalibreli teorik modal analiz ve OMA sonuçları....	146
Çizelge 4.32. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresi teorik modal analiz sonuçları...	150
Çizelge 4.33. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minare OMA sonuçları.....	154
Çizelge 4.34. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresi MAC değerleri tablosu.....	155
Çizelge 4.35. Taş Camii minaresi ilk teorik modal analiz ve OMA sonuçları.....	155
Çizelge 4.36. Taş Camii minaresi elastiste modül kalibrasyon değerleri.....	156
Çizelge 4.37. Taş Camii minaresi kalibreli teorik modal analiz ve OMA sonuçları.....	156
Çizelge 4.38. Yeğenağa Camii minaresi teorik modal analiz sonuçları.....	160
Çizelge 4.39. Yeğenağa Camii Minaresi OMA sonuçları.....	164
Çizelge 4.40. Yeğenağa Camii minaresi MAC değerleri tablosu.....	165
Çizelge 4.41. Yeğenağa Camii minaresi ilk teorik modal analiz sonuçları ile OMA sonuçları.....	166
Çizelge 4.42. Yeğenağa Camii minaresi elastiste modül kalibrasyon değerleri.....	166
Çizelge 4.43. Yeğenağa Camii minaresi kalibreli teorik modal analiz sonuçları ile OMA sonuçları.....	167
Çizelge 4.44. Kadana Camii minaresi teorik modal analiz sonuçları.....	170
Çizelge 4.45. Kadana Camii minaresi OMA sonuçları.....	175
Çizelge 4.46. Kadana Camii minaresi MAC değerleri tablosu.....	175
Çizelge 4.47. Kadana Camii minaresi ilk teorik modal analiz sonuçları ile OMA sonuçları.	176
Çizelge 4.48. Kadana Camii minaresi elastiste modül kalibrasyon değerleri.....	177
Çizelge 4.49. Kadana Camii minaresi kalibreli teorik modal analiz sonuçları ile OMA sonuçları.	177
Çizelge 4.50. Hacı Cuma Camii minaresi teorik modal analiz sonuçları.....	180
Çizelge 4.51. Hacı Cuma Camii minaresi OMA sonuçları.....	184
Çizelge 4.52. Hacı Cuma Camii minaresi MAC değerleri tablosu.....	185

Çizelge 4.53. Hacı Cuma Camii minaresi ilk teorik modal analiz sonuçları ile OMA sonuçları.	186
Çizelge 4.54. Hacı Cuma Camii minaresi elastite modül kalibrasyon değerleri.....	186
Çizelge 4.55. Hacı Cuma Camii minaresi kalibreli teorik modal analiz sonuçları ile OMA sonuçları.	187
Çizelge 4.56. Minare hakim titreşim periyotları.....	188
Çizelge 4.57. Minarelerin model kalibrasyonları öncesi ve sonrası durumları.....	192



1. GİRİŞ

Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesinde yer alan Erzurum, tarih boyunca birçok uygarlığın yerleşim alanı olmuştur. Bu zengin tarihsel geçmiş, kentin çok sayıda taşınabilir ve taşınamaz kültürel mirasa ev sahipliği yapmasını sağlamıştır. Bu bağlamda, tarihi kimliğe sahip yapıların korunması ve günümüze kadar sürdürülebilirliklerinin sağlanması hem kültürel değerlerin yaşatılması hem de gelecek kuşaklara aktarılması açısından büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, yapı hasarlarının tespiti ve gerekli onarımların gerçekleştirilmesinde, yapının bütünlüğünü ve özgünlüğünü koruyacak tahribatsız yöntemlerin tercih edilmesi gerekmektedir.

Tarihi kimliğine sahip olan birçok yapı, yığma yapı grubundadır. Bu tarz yapılar taş, tuğla, kerpiç ve benzeri ürünlerin harç ile bağlanmasıyla oluşturulduğu için diğer yapı çeşitlerine kıyasla daha kolay, hızlı ve ekonomik bir şekilde inşa edilebilirler. Fakat kayma ve depremden kaynaklanan çekme gerilmelerine karşı diğer yapılara kıyasla yeterince süneklikleri yoktur. Bu sebeple etkiyen enerjiyi sönümleyemeyebilirler. Aynı şekilde zaman içerisinde insan ve çevresel etkilerden kaynaklanan sebeplerle dayanım ve dayanıklılıklarında azalmalar görülebilmektedir. Tüm bunlar sonucunda hasarlar oluşabilir, kısmen ya da tamamen göçmeler meydana gelebilir. Koruma altında olan tarihi yapılardan tahribatlı yöntemlerle malzeme örnekleri alınması, ya da mevcut durum tespitlerinde tahribatlı yöntemler kullanılması çoğunlukla mümkün değildir. Bu bakımdan, tarihi yapıların mevcut durumlarının incelenmesine yönelik çalışmalarda tahribatsız yöntemlerin seçimi genel olarak bir tercih olmaktan ziyade zorunluluk arz etmektedir.

Bilindiği üzere yapısal sistemlerin mod şekilleri, modal frekansları ve sönüm oranları gibi dinamik davranış parametreleri her bir yapı için karakteristiktir. Modal davranış parametreleri olarak da adlandırılan bu parametrelerde meydana gelen değişimler ile yapının mevcut durumu hakkında değerlendirme yapılması mümkündür. Bu bakımdan, mevcut bir yapının dinamik davranış parametrelerinin deneysel olarak elde edilmesi, özellikle tarihi yığma yapılar için, değerli bir teknik veri niteliğindedir.

Tahribatsız deneysel uygulamalardan biri olan operasyonel modal analiz ile yapıların yerinde dinamik davranış parametreleri elde edilebilmektedir. Operasyonel modal analiz, mevcut bir yapının ya da sistemin kaynağı belli olmayan çevresel titreşim etkilerine verdiği tepkilerin ölçülmesi suretiyle elde edilen veri üzerinde gerçekleştirilen matematiksel analizlerle dinamik davranış parametrelerinin elde edilmesini ilke edinen bir yöntemdir. Bu yöntemde yapının kullanımı kesintiye uğramaz, kullanıcılara mümkün mertebe rahatsızlık verilmez, yapıyı tahrik etmek için herhangi bir yapay titreşim kaynağı kullanılmaz. Bu unsurların yöntemin tarihi yapılar üzerinde tercih edilmesinin temel nedenleri olduğunun ifade edilmesi mümkündür.

İlgili ulusal ve uluslararası dizinde tarihi yapılar üzerinde operasyonel modal analiz uygulamasını konu edinen çalışmalara erişim sağlanması mümkündür. Bu teknik metinlerde genel olarak, operasyonel modal analiz yöntemi ile elde edilen modal parametreler dikkate alınarak sonlu eleman model kalibrasyonları ve kalibre edilmiş modeller üzerinde gerçekleştirilen yapısal analizler, yapının mevcut durumunun ve modal davranışının incelenmesi gibi çalışmaların yapıldığının ifade edilmesi mümkündür. Tez çalışmasında kullanılan deneysel yöntem operasyonel modal analiz uygulamasıdır. Operasyonel modal analiz, titreşimi temel alarak yapının analiz edilmesine olanak sağlayan bir yöntemdir. İvme ölçerler vasıtasıyla elde edilen veriler kullanılarak yapının dinamik parametreleri belirlenebilmektedir. Bu yöntem ile elde edilen veriler sonlu eleman modellerini kalibre etmede kullanılabilir.

Deneysel modal analiz çalışmaları 1940 yıllarında başlamıştır. Başlarda dinamik kuvvetlerin ölçülmesinde fazla zaman gerektiren ve pratik olmayan uygulamalar yapılmıştır. Ancak 1960 yıllarında bilgisayarın gelişimi ile deneysel modal analizin gelişimi hızlanmıştır (Şahin 2009). Yapının maruz kaldığı titreşime göre vermiş olduğu tepkiyi ölçme temeline dayanan operasyonel modal analiz yöntemi; projede yapılan kabullerin pratikte sağlanıp sağlanmadığı, teorik olarak yapılan analizlerin sonlu elemanlar modeliyle kıyaslanması, yapının mevcut durumu veya hasarlı olup olmadığını belirleme gibi durumlarda kullanılabilir. Operasyonel modal analizde yapının maruz kaldığı etkinin bilinmesi zaruri değildir. Bu etki insan yükünden kaynaklanabileceği gibi taşıt, rüzgâr veya çevresel etkiler sebebiyle de oluşabilmektedir.

Yapının sahip olduğu sismik titreşimleri ölçerek sinyallerin analiz edilmesi amacına uygun olarak kullanılan operasyonel modal analiz oldukça yaygındır (Türker 2011).

Tarihi yığma kubbelerde operasyonel modal analizin, deneysel dinamik parametrelerin belirlenmesinde ve sonlu elemanlar modelinin iyileştirilmesinde kullanımının güvenilir olduğunu belirlemiştir (Uçak 2012).Çevresel titreşim kayıtları kullanılarak yapının sahip olduğu dinamik karakteristikleri gerçekçi bir şekilde ortaya koymak mümkündür(Boru vd.2015).Yapılan uygulama tam ve doğru bir şekilde yapıldığı ve olumsuz bir durum olmadığı sürece, oluşturulan sonlu elemanlar modeli ve yapılan teorik modal analiz sonuçlarının mod şekillerinin uyduğu görülmüştür(Okuyucu 2020). Minare benzeri ince, uzun ve narin yapıların dinamik karakteristiklerinin, özellikle de mod şekillerinin belirlenebilmesinin en güvenli şekli; yapı uzunluğu boyunca en yüksek ölçüm seviyesiyle birlikte uygun olan farklı seviyelerde de ölçüm noktalarının belirlenip ölçüm yapılmasıdır (Yetkin vd.2021).

Operasyonel modal analiz yönteminin uygulama alanı oldukça geniştir. Pek çok mühendislik çalışmasında yöntemin kullanıldığını görmek mümkündür. Boru vd., (2015) ve Yetkin vd., (2016) çalışmaları betonarme yapılar üzerinde gerçekleştirilen operasyonel modal analiz uygulamalarını konu edinen çalışmalara örnek teşkil etmektedir. Wojcicki et.al., (2016) çalışması Polonya Odra nehri üzerindeki betonarme su tutma yapısı üzerinde gerçekleştirilen operasyonel modal analiz uygulaması ile dikkat çekmektedir. Okuyucu, (2020) çalışmasında tek katlı betonarme bir yapı üzerinde ultrasonik ses ve Schmidt çekici ile malzeme özellikleri yerinde tespit edilmiş, sonlu elemanlar modeli oluşturularak teorik modal analiz yapılmış ve elde edilen sonuçlar operasyonel modal analiz sonucunda elde edilen değerlerle kıyaslanmıştır. Lorenzoni et al.(2017) çalışmasında 4 adet su kulesi için dinamik kimliklendirme yapılmış, oluşturulan modeller üzerinde nümerik hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında ise Erzurum il merkezinde yer alan tarihi cami minareleri üzerinde operasyonel modal analiz çalışması yapılarak minare yapılarının mod şekli, modal frekans ve sönüm oranı gibi modal davranış parametrelerinin deneysel olarak elde edilmesi amaçlanmıştır. İncelenen tüm minareler için aynı zamanda SAP2000

yazılımı kullanılarak sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve teorik modal analiz yapılarak modal davranış parametreleri teorik olarak hesaplanmıştır. Teorik ve deneysel modal davranış parametreleri kıyaslanmış ve gerekmesi durumunda sonlu eleman modeli üzerinde kalibrasyon çalışması yapılarak teorik olarak hesaplanan değerlerin deneysel modal davranış parametrelerine yaklaştırılmasına çalışılmıştır.

1.1. Tezin Önemi

Tez konusu çalışmanın önemi 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri sonrası bir kez daha anlaşılmıştır. Zira depremden etkilenen bölgelerde toptan göçme yaşayan tarihi yapıların yeniden ayağa kaldırılması çalışmalarında, bu yapılar hakkında zamanında toplanmış teknik bilgi olması hususu büyük bir gereklilik olarak kendini göstermiştir. Erzurum ilinin deprem tehlikesi oldukça yüksektir. Şehrin geçmişinde yaşadığı depremlerden büyük hasar aldığı bilinmektedir. Gelecek dönemde yaşanması kuvvetle muhtemele depremler öncesi önlemler alınması, depremler sonrası yapılması gerekebilecek çalışmalara referans teşkil etmesi bakımından Erzurum il merkezindeki tarihi cami minarelerinin incelenerek bu tez çalışması kapsamında literatürdeki yerlerini almaları kültür mirasımızın korunması ve geleceğe devredilmesi bakımından büyük önem arz etmektedir.

1.2. Tezin Kapsamı

Çalışma kapsamında incelenmiş tarihi cami yapıları için T.C. Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden yasal izinler alınmış ve sonrasında incelemelere başlanmıştır. Çalışma izni alınan yapılar;

- Pervizoğlu Camii
- Murat Paşa Camii
- Lala Paşa Camii
- Ulu Camii
- Yukarı Habip Efendi Camii
- Aşağı Hasani Basri Camii
- Yeğenağa Camii

- Kadana Camii
- Hacı Cuma Camii

Çalışma kapsamındaki yapılar hakkında gerekli bilgiler toplanmıştır. Minare öncelikli olmak üzere yapının mevcut durumu yerinde incelenmiş ve kayıt altına alınmıştır. SAP2000 yazılımı kullanılarak makro modelleme yaklaşımı benimsenmiş, katı elemanlarla minarenin sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve teorik modal analiz gerçekleştirilmiştir. Teorik modal analiz sonucunda elde edilen mod şekillerine göre, tepki titreşimi ölçümleri için ivmeölçer sensör yerleşim planları hazırlanmıştır. Minare yapısından tepki titreşimi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tepki titreşimi ölçümleri, Artemis Modal Pro (2023) yazılımı kullanılarak işlenmiş ve deneysel dinamik davranış parametreleri elde edilmiştir. Teorik ve deneysel modal analiz sonuçları karşılaştırılmış ve gerekmesi durumunda sonlu eleman model kalibrasyonları yapılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Tez metninin bu bölümünde minare dinamik davranış parametreleri ve operasyonel modal analizler ile ilgili yakın geçmişte gerçekleştirilen çalışmaların kronolojik olarak bir özeti sunulmuştur.

Doğangün ve Ural (2007) Anadolu'da taş malzemeden inşa edilmiş kemer köprüleri kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Çalışmada özellikle tarihi Malabadi Köprüsü ele alınmış ve köprünün yapısal davranışı, sonlu elemanlar yöntemiyle geliştirilen bir model aracılığıyla analiz edilmiştir.

Doğangün et al. (2008) Türkiye'deki tarihî yığma minarelerin deprem etkileri altındaki dinamik davranışı incelenmiştir. Çalışmada, yükseklikleri 20 m, 25 m ve 30 m olan üç minare modeli oluşturulmuş; malzeme özellikleri literatürden alınan taş ve tuğla yığma birimlerin ortalama değerleri ile tanımlanmıştır. Kullanılan malzeme için elastisite modülü yaklaşık 3000 MPa, elastisite modülü tanımlanmıştır. Modeller, 1999 Kocaeli ve Düzce depremlerine ait ivme kayıtlarıyla analiz edilmiştir. Zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda en kritik bölgelerin, minare gövdesinde sekizgen-daire geçişleri ve temel üzerindeki bağlantılar olduğu görülmüştür.

Acar (2009) anıtsal kule türü yapıların deprem davranışlarını incelemiştir. Çalışmada temsili bir minare seçilmiş, Türkiye Deprem Yönetmeliği esaslarına göre deprem performansı analiz edilmiş ve geleneksel minare ile payandalı minarenin deprem davranışları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, önerilen payandalı minarenin geleneksel betonarme minareye göre daha üstün performans sergilediğini göstermiştir.

Bayraktar vd. (2009) Kömürhan Köprüsü'nün sonlu eleman modelini kalibre etmek amacıyla Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemini kullanmıştır. Çalışmada, SAP2000 yazılımında oluşturulan köprünün teorik sonlu eleman modelindeki modal davranışlar, köprü üzerinde yapılan OMA ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, modeldeki elastisite modülü ve sınır koşulları, köprünün gerçek dinamik davranışını en doğru şekilde yansıtacak biçimde güncellenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bayraktar vd. (2010) çalışmada, farklı inşa aşamalarındaki üç betonarme binanın dinamik parametreleri deneysel ölçümlerle belirlenmiştir. Ölçümler sonucunda binaların mevcut durumları için doğal frekanslar, mod şekilleri ve modal sönüm oranları tespit edilmiştir. Ayrıca birinci doğal frekanslar, standartlarda yer alan yaklaşık hesap yöntemleriyle belirlenmiş ve ölçülen değerlerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, binaların mevcut durumları için beklenen modal davranış özelliklerini ortaya koymuş ve ölçülen birinci frekans değerlerinin hesaplanan değerlerden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Sevim et al. (2011) tarihi köprülerin deprem tepkilerini tahmin etmede sonlu eleman modellemesi ve saha titreşim testlerinin kritik bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Çalışmada, Rize Çamlıhemşin’de yer alan Osmanlı ve Şenyuva taş köprüleri ANSYS Workbench kullanılarak üç boyutlu olarak modellenmiş, köprülerin teorik modal şekilleri ve modal frekansları belirlenmiştir. Bunu takiben, Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemiyle köprülerin deneysel dinamik davranışları tespit edilmiş ve sonlu eleman modelleri, bu deneysel veriler ışığında kalibre edilerek gerçek davranışa uygun hâle getirilmiştir. Son olarak, hem başlangıç hem de kalibre edilmiş modeller, 13 Haziran 1992 Erzincan Depremi ivme kaydı uygulanarak incelenmiş ve köprülerin hasar durumları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Uçar ve Merter (2012) yaptıkları çalışmada zemin kat yüksekliğinin fazla olduğu konut binalarında kolonların narinlik oranının yapı davranışı üzerindeki etkilerini incelemiş; narinlik oranı arttıkça kritik kat davranışının önem kazandığını, özellikle narinlik etkisinin yumuşak kat oluşumuyla birlikte ortaya çıkması durumunda kolon uç momentlerinin yükseldiğini ve bu kesitlerin daha kritik hale geldiğini ortaya koymuşlardır.

Akansel vd. (2013) yaptıkları saha incelemelerinde, Van depremi sonrasında 500 yıl ve daha eski tarihe sahip kültürel miras yapılarının deprem etkilerine karşı büyük ölçüde sağlam kaldığını tespit etmişlerdir. Bu yapıların yüksek rijitlik temel alınarak tasarlanmış basit detaylara sahip olmaları, hasar oluşumunu sınırlamıştır. Benzer şekilde, köprüler de tasarım amacına uygun şekilde minimal hasar görürken, tüneller ve barajlarda herhangi bir hasar gözlemlenmemiştir.

Baştürk (2013) modal analiz yöntemiyle tarihi Bursa minarelerinin dinamik davranışını incelemiştir. Çalışmada 7 adet tarihi minare seçilerek bu minarelerin sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve bu modeller üzerinde modal analizler yapılarak teorik davranış parametreleri elde edilmiştir. Daha sonra minarelerin yerinde dinamik davranış parametrelerini belirlemek için çevresel titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlara göre, minarelerin sonlu eleman modelleri üzerinde model kalibrasyon güncellemeleri gerçekleştirilerek, dinamik davranış parametrelerine en yakın sonuçlar sağlanmıştır.

Çalık et al. (2014) hasar görmüş ve yenilenmiş yığma örtülerin dinamik davranışlarını çevresel titreşim ölçümleriyle değerlendirmiştir. Çalışmada örnek olarak Trabzon'daki Küçük Fatih Camii seçilmiş ve yapının örtüsünde bulunan üç yığma kemer üzerinde Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi uygulanmıştır. Bu kapsamda örtünün hasarlı hali, yenileme sürecindeki durumu ve aslına uygun şekilde onarıldıktan sonraki hali için modal frekanslar ile operasyonel mod şekilleri belirlenmiş, elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Koç (2016) yığma yapıların deprem davranışının incelendiği çalışmada, geçmiş depremler sonrası ortaya çıkan hasar şekilleri ve literatürde yer alan araştırmalar değerlendirilmiştir. Yığma yapılarda, özellikle deprem yükleri altında oluşan davranış biçimleri ele alınmış, literatürde dağınık şekilde bulunan öneriler derlenerek kırsal ve genel yığma yapı yapımında dikkate alınması gereken kurallar formüle edilmiştir.

Mutlu and Şahin (2016) Bursa Ulu Camii'nin doğu minaresinin sismik davranışı üzerinde farklı yapısal modelleme yaklaşımının etkisini incelemiştir. Minare, SAP2000 yazılımı kullanılarak sonlu eleman yöntemi ile modellenmiş ve dört farklı modelleme yaklaşımı geliştirilmiş; her birinde malzeme özellikleri yığma taş ve tuğla esas alınarak tanımlanmıştır. Literatürde rapor edilen değerlere uygun olarak taş için 10.000 MPa, tuğla için 3.500 MPa elastisite modül değerleri tanımlanmıştır. Modal analizler sonucunda, farklı modelleme tekniklerinin minarenin doğal frekanslarını, mod şekillerini ve kütle katılım oranlarını belirgin biçimde etkilediği görülmüştür.

Özkul (2016) çalışmasında 1894 yılında inşa edilen Rahmanlar Camii'nin ayakta kalabilen tek bölümü olan minaresinin deprem performansını deneysel verilerle

2. KAYNAK ÖZETLERİ

belirlemeyi amaçlamıştır. Minarenin kaidesi taş malzemeden; gövdesi tuğla yığma malzemeden oluşmakta olup, her malzemenin taşıma kapasitesi ayrı ayrı hesaplanmış ve yapı için bütünsel bir model oluşturmuştur. Yapı bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiş; statik ve dinamik analizler yapılarak minarenin doğal frekansı ve mod şekilleri belirlenmiştir. Deneysel modal analiz uygulamaları ile minarenin dinamik parametreleri ve malzeme mekanik özellikleri iyileştirilmiş, bilgisayar ortamında modellenen yapıya bölgedeki beklenen büyük ölçekli deprem ivme verileri uygulanarak minarenin gerilme ve yer değiştirme davranışı malzeme emniyet değerleri dikkate alınarak incelenmiştir.

Çalık (2017) farklı taşıyıcı sistemlere sahip tarihi cami ve minarelerin dinamik davranış parametrelerini çevresel titreşim testleriyle incelemiştir. Çalışmada bu yapılarda gerçekleştirilen dinamik kimliklendirme uygulamaları aracılığıyla restorasyonun etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen çevresel titreşim verileri kullanılarak cami ve minarelerin dinamik özelliklerini yansıtan teorik bağıntılar geliştirilmiş ve bu bağıntıların doğruluk düzeyi araştırılmıştır. Araştırma bulguları analitik olarak elde edilen doğal frekansların deneysel verilerden türetilen formülasyonlarla yaklaşık biçimde hesaplanabildiğini; sönüm oranı ve mod şekillerinin öngörülebileceğini ve restorasyon müdahalelerinin yapıların dinamik karakteristiklerini belirgin biçimde değiştirdiğini ortaya koymuştur.

Ekmen (2017) tarihi Urfa Camii minaresinin dinamik karakteristiklerini belirlemeye yönelik kapsamlı bir çalışma yürütmüştür. Bu kapsamda minarenin sonlu eleman modeli Abaqus yazılımında oluşturulmuş ve modal analiz ile yapının teorik doğal frekansları ve mod şekilleri elde edilmiştir. Ardından çevresel titreşim testleriyle deneysel dinamik parametreler belirlenmiş ve elde edilen veriler doğrultusunda model kalibre edilmiştir. Son aşamada minarenin deprem davranışını değerlendirmek amacıyla üç farklı deprem kaydı kalibre edilmiş sonlu eleman modeline uygulanmış ve olası hasar senaryoları analiz edilmiştir.

Kocaman (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, tarihi yığma yapıların dinamik davranışlarının belirlenmesinde kullanılacak malzeme özelliklerinin tayinine yönelik bir yöntem geliştirilmiştir. Araştırmada öncelikle tarihi yapıların taşıyıcı elemanları ve kullanılan malzemeler incelenmiş, ardından seçilen yapılara ait teknik ve

2. KAYNAK ÖZETLERİ

tarihi veriler değerlendirilmiştir. Bu kapsamda teorik analizler ile deneysel modal analiz sonuçları karşılaştırılmış ve önerilen yöntemin doğruluğu sorgulanmıştır. Ayrıca Erzincan 1992 depremi yer hareketleri kullanılarak yapıların deprem davranışları analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda geliştirilen yaklaşımın cami ve medrese gibi tarihi yığma yapıların dinamik özelliklerinin tespitinde uygulanabilir olduğu ortaya konmuştur.

Torres et al. (2017) Şili Santiago’da bulunan Metropolitan Kilisesi’nin dinamik davranış parametrelerini belirlemek için OMA yöntemini kullanmayı ve bu sonuçlar yardımıyla kilisenin sonlu eleman modelinde gerekli düzenlemeleri yapmayı amaçlamışlardır. Çalışmada kilisede gerçekleştirilen OMA yardımıyla önce kilisenin operasyonel davranış parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra bu sonuçlara bağlı olarak kilisenin sonlu eleman modeli üzerinde kilisenin dinamik davranış parametrelerine tam ya da yakın davranış parametrelerini yansıtmak amacıyla taş, harç ve betonarme malzemeler için uygun elastisite modül değer aralıkları belirlenmiştir.

Erdil et al. (2018) tarihi bir yığma minarenin yapısal parametrelerinin, minarenin deprem davranışına etkisini araştırmışlardır. Çalışmada 23 Ekim 2011 ($M_w = 7,2$) ve 9 Kasım 2011 ($M_w = 5,6$) tarihlerinde meydana gelen depremlerde hasar alan tarihi Ulu Camii minaresinin yapısal özelliklerinin, minarenin depremde aldığı hasara etkileri irdelenmiştir. Minarenin asimetric yapısal özellikleri ve düzensizliklerinin, minarenin deprem hasarında önemli ölçüde belirleyici olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Genç et al. (2018) tarihi yığma bir saat kulesinin dinamik analizi üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’ne (TBDY) ve Çorum’un sismik karakteristikleri baz alınmıştır. Kulenin sonlu eleman modeli ANSYS yazılımında oluşturulup teorik mod şekilleri ve modal frekans değerleri belirlenmiştir. OMA yöntemi kullanılarak kulesinin dinamik karakteristik özellikleri yerinde elde edilmiştir. OMA sonuçları baz alınarak sonlu eleman modelinde model kalibrasyon güncellemesi yapılmıştır. Son bölümde ise Çorum’un sismik karakteri baz alınarak ivme spektrumu oluşturulmuş, bu spektrum kulenin sonlu eleman modeline etkilerek kulenin hasar durumu incelenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Günaydın (2018) tarihi bir yığma minarenin onarım ve tadilat geçirdikten sonraki dinamik davranış parametrelerini deneysel olarak belirlemeyi amaçlamıştır. Çalışmada büyük ölçüde onarımdan geçen Trabzon'daki tarihi İskenderpaşa Camii minaresinin, onarımdan sonraki davranış parametreleri çevresel titreşim testi yardımıyla belirlenmiş ve bu değerleri caminin onarım geçirmeden önceki dinamik davranış parametreleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak onarımın minarenin doğal davranış parametrelerini büyük ölçüde artırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Işık ve Antep (2018) tarihi bir yığma minarenin yapısal analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada Ahlat'ta bulunan tarihi Kadı Mahmut Camii minaresinin sonlu eleman modeli SAP 2000 yazılımında oluşturularak farklı yük etkileri altında minarenin gerilme durumları incelenmiştir.

Kocaman vd. (2018) taşınmaz kültür varlığı olarak tescillenmiş tarihi Erzurum Yakutiye Medresesi'nin yapısal performansını statik ve dinamik açıdan incelemiştir. Çalışmada yapı malzemesi ve taşıyıcı eleman özelliklerini belirlemek için mevcut yığma mekanik modelleri incelenmiş ve teorik bir yaklaşım geliştirilmiştir. Dinamik analizler sonucunda, kritik kesitin minarenin duvarlarla birleştiği bölge olduğu ve uygulanan yer hareketleri altında minarenin duvar seviyesi üstündeki kısmının göçtüğü belirlenmiştir. Ana yapıda yalnızca kılcal çatlaklar gözlemlenmiş, hesaplanan deprem yükünün yönetmelik bağıntılarıyla elde edilen yapı yük kapasitesinin altında olduğu tespit edilmiştir.

Özdoğan (2018) yığma duvarların mekanik özelliklerini belirlemek için beton Schmidt çekicinin kullanıldığı metot amaçlamıştır. Çalışmanın deneysel kısmında tarihi bir yığma yapının inşasında kullanılan doğal taşların Schmidt dertlik değerleri ile deneysel çalışmalar yardımıyla mekanik özellikler belirlenip, sertlik değerlerini kullanarak taşın deneysel basınç mukavemetine ve elastisite modülüne ulaşacak denklemler türetilmiştir. Üretilen denklemlerin doğrulanması için, tarihi Erzurum Kadana Camii seçilmiştir. Caminin SAP2000 yazılımındaki sonlu eleman modeline denklemler kullanılarak ulaşılan duvar mekanik özellikleri tanıtılarak teorik mod şekilleri ve modal frekans değerleri elde edilmiştir. Daha sonra, OMA yöntemi ile caminin yerinde

2. KAYNAK ÖZETLERİ

belirlenen operasyonel mod şekilleri ve modal frekans değerleri ile teorik değerleri karşılaştırılarak denklemlerin doğruluğu araştırılmıştır.

Pellegrini et al. (2018) modal analizlerin tarihi yığma yapılardaki önemini araştırmışlardır. Yığma yapılar yüksek basınca karşı dirençli fakat düşük çekme mukavemetine sahip olduklarından çoğunlukla doğrusal olmayan davranış sergilemektedir. Ayrıca bu yapıların geçmişte maruz kaldıkları kalıcı yükler veya hasara yol açan olaylar sonucunda çatlak oluşumları gözlemlenmiştir. Bu tür çatlakların yapının genel dinamik tepkisi üzerinde etkili olduğu vurgulanmıştır. Bu bağlamda, farklı nümerik modelleme yaklaşımları kullanılarak teorik modal analizler gerçekleştirilmiş; bu modeller önce tarihi kemer köprüler üzerinde test edilmiştir. Ardından Mogaduro Saat Kulesi örneğinde, restorasyon öncesi ve sonrası durumlar OMA yöntemiyle analiz edilmiş, deneysel bulgular doğrultusunda model kalibrasyonları yapılmış ve iki durumun doğrusal bozulma oranları karşılaştırılmıştır.

Ural ve Çelik (2018) tek şerefeli yığma minarelerin deprem davranışı üzerinde çalışmışlardır. Aksaray'daki 7 adet tek şerefeli yığma minarelerin sonlu eleman modelleri oluşturularak bu modeller üzerinde deprem analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Altıok (2019) tarihi minarelerin dinamik özelliklerini deneysel ve nümerik yöntemler kullanarak incelemiştir. Çalışmada Manisa'daki Lala Mehmet Paşa ve İbrahim Çelebi camilerinin minareleri önce nümerik olarak modellenmiş ve temel davranış parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra, cami minareleri üzerinde gerçekleştirilen Operasyonel Modal Analiz (OMA) ile deneysel dinamik parametreler elde edilmiş ve bu sonuçlar doğrultusunda nümerik modeller kalibre edilmiştir. İlave olarak iyileştirilmiş malzeme özellikleri ve zemin-minare etkileşimi dikkate alınarak ikişer yeni model oluşturulmuş ve bu modeller üzerinde deprem analizleri gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Altunışık et al. (2019) OMA kullanarak restorasyon geçirmiş bir köprünün davranış parametrelerini belirlemeyi amaçlamıştır. Ahşap bir köprü olan tarihi Buzlupınar Köprüsü'nün sonlu eleman modeli üzerinde teorik modal parametreleri belirlendikten

2. KAYNAK ÖZETLERİ

sonra OMA ile köprünün operasyonel modal parametreleri elde edilmiştir. OMA sonuçlarına göre köprünün sonlu eleman modeli üzerinde model kalibrasyon güncellemeleri yapılmıştır.

Kocaman vd. (2019) Erzurum il merkezindeki Lala Mustafa Paşa Camii'nin malzeme özelliklerini ve dinamik davranışını incelemiştir. Çalışmada yığma malzeme modelleri incelenerek teorik bir yaklaşım geliştirilmiş ve yapının sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Teorik modal analiz ile Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemleri kullanılarak deneysel modal parametreler elde edilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda yapının malzeme özellikleri belirlenmiş ve sonlu eleman modeline 1992 Erzincan Depremi ivme kayıtları uygulanarak yapının göçme mekanizması araştırılmıştır.

Özer (2019) Erzurum ili ve çevresinde farklı zemin türleri üzerinde yer alan 10 ivmeölçerle kaydedilen 17 deprem verisi, Standart Spektral Oran (SSR) ve Yatay/Düsey Spektral Oran (HVSr) yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Zeminlerin jeolojik ve jeoteknik özelliklerine göre elde edilen büyütme değerleri belirli frekans aralıkları için incelenmiştir. Kuvaterner alüvyon üzerinde konumlanan Merkez, Merkez_SS, Ilıca ve Pasinler istasyonlarında düşük frekanslarda yüksek büyütme saptanmıştır. Bu alanlarda zemin hakim frekansları 0,5–1,0 Hz arasında değişmekte olup, belirli kat yüksekliğine sahip yapılarda rezonans riski ortaya çıkabilmektedir. Alüvyon birimler üzerinde yer alan şehir merkezi ve çevresinde düşük frekanslarda SSR büyütme değerlerinin yüksek olduğu, volkanitler üzerinde bulunan Şenkaya ve Narman istasyonlarında ise en düşük büyütme değerlerinin elde edildiği görülmüştür.

Serhatoğlu and Livaoğlu (2019) Osmanlı dönemine ait 18 tarihî minarenin temel titreşim periyotlarının hızlı ve pratik bir şekilde tahmin edilmesine yönelik ampirik formüller geliştirmiştir. Çalışmada minareler üzerinde ultrasonik hız ölçümleri ve ortam titreşim testleri gerçekleştirilmiş, elde edilen veriler sonlu eleman modellemesiyle desteklenmiş ve modeller deneysel sonuçlara göre güncellenmiştir. Minarelerin geometrik özellikleri ile malzeme parametreleri dikkate alınarak hakim periyot ile bu değişkenler arasındaki ilişki analiz edilmiş ve mevcut tahmin yöntemlerinin bazı durumlarda hatalı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu doğrultuda önerilen iki yeni ampirik formülün, önceki yöntemlere kıyasla daha güvenilir sonuçlar sunduğu belirtilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Sonuç olarak geliştirilen yaklaşımın tarihî minarelerin deprem güvenliği ön değerlendirmelerinde ve hızlı saha uygulamalarında pratik bir araç olarak kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Aslay ve Okuyucu (2020) 1939 Erzincan depreminde ana gövdesi ayakta kalmasına rağmen apsis kısmı yıkılan Erzincan Değirmenliköy Kilisesi'nin apsis bölgesindeki hasar üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada ulaşılabilen bilgiler ışığında kilisenin tamamının sonlu eleman modeli oluşturulmuş, kilisenin OMA ile yerinde dinamik davranış parametreleri belirlenmiş ve OMA sonuçlarına göre sonlu eleman modelinde model kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu model üzerine 1992 yılındaki Erzincan depreminin ivme kaydı etkileterek hasar durumu incelenmiştir. İnceleme sonuçları, kilise apsisinin deprem sırasında yapı gövdesiyle birleşim noktasında hasar gördüğünü ve sonrasında yapının geri kalanından ayrılmış olabileceğini göstermiştir.

Duman (2020) minare yüksekliğinin ve minarelerdeki şerefe sayısının minare davranışına etkisini araştırmıştır. Çalışmada farklı yükseklikte ve farklı şerefe sayısına sahip minarelerin ANSYS yazılımında sonlu eleman modelleri oluşturulup teorik modal davranış parametreleri elde edilmiştir. Daha sonra minarelerin doğal davranış parametreleri serbest titreşim testi yardımıyla belirlenip sonlu eleman modelleri üzerinde model kalibrasyon güncellemeleri yapılmıştır. Son olarak bu minarelere deprem ivme spektrumları etkililerek depreme karşı davranışları incelenmiştir.

Hökelekli et al. (2020) operasyonel modal analiz (OMA) yöntemi kullanarak dinamik özellikleri belirlenen tarihi Alaca Minaresi'nin farklı yer hareketleri altındaki hasar davranışını incelemiştir. ABAQUS V10 programı ile oluşturulan ilk sonlu eleman modeli, OMA verileriyle kalibre edilmiştir. Kalibre edilen model üzerinde lineer ve doğrusal olmayan sismik analizler gerçekleştirilmiş, doğrusal olmayan analizlerde Beton Hasar Plastikliği modeli kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre doğrusal analizlerin gerçeği tam yansıtmadığı ve depremlerin minarede yapısal hasara yol açabileceği belirlenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Kılıç vd. (2020) Hızırbey Camii minaresi üzerinde yaptıkları çalışmada tarihi minarelerin deprem davranışlarının belirlenmesi amacıyla malzeme özelliklerini tahribatsız yöntemlerle tayin etmişlerdir. Minarenin boyutları restorasyon raporları üzerinden elde edilmiş, taş malzeme için elastisite modülü ölçülmüştür. Daha sonra SAP2000 yazılımı kullanılarak mod birleştirme yöntemi ile lineer dinamik analizler yapılmış ve çubuk ile kabuk eleman modelleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca minarenin temel periyodu Rayleigh yöntemi ile hesaplanmış ve sonlu eleman sonuçları ile doğrulanmıştır. Çalışmada, 2007 ve 2018 Deprem Yönetmelikleri esas alınarak elde edilen kuvvet ve yer değiştirmeler karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, önerilen yöntemle tarihi minarenin dinamik davranışlarının güvenilir şekilde belirlenebildiği görülmüştür.

Okuyucu (2020) tek katlı ve iki açıklıklı bir betonarme yapı üzerinde operasyonel modal analiz (OMA) uygulamasıyla yapı karakteristik davranışlarını belirlemeyi amaçlamıştı. Yapının rölevesi çıkarılmış, taşıyıcı elemanların donatı detayları belirlenmiş ve beton malzeme özellikleri ultrasonik test ile Schmidt çekici kullanılarak tayin edilmiştir. SAP2000 yazılımında oluşturulan sonlu elemanlar modeli üzerinde teorik modal analiz yapılmış, ardından OMA ile deneysel mod şekilleri ve frekanslar elde edilmiştir. Sonuçlarda teorik ve deneysel mod şekillerinin uyumlu olduğunu ancak frekans değerlerinde farklılıklar bulunduğunu belirtilmiştir. Ayrıca, dolgu duvarların modele dahil edilmemesi durumunda deneysel modal parametrelerin doğru şekilde hesaplanamayacağı sonucu tespit edilmiştir.

Saygılı (2020) yapmış olduğu çalışmada minarelerin geometrik yapıları, yükseklikleri ve narinlik oranlarının deprem davranışları üzerindeki etkisini incelemiştir. Altı farklı yükseklik ve çapa sahip yığma minare sayısal olarak modellenmiş, dört farklı deprem seviyesi için sentetik yer hareketleri uygulanmıştır. Çalışmada, narinlik oranının yapıda meydana gelen maksimum yer değiştirme, gerilme ve burulma momenti gibi yapısal talepler üzerindeki etkisi iki farklı yöntemle değerlendirilmiştir.

Sözen ve Çavuş (2020) tek açıklıklı tarihi köprülerin geometrik şekillerinde zamanla oluşan değişikliklerin sismik davranış üzerindeki etkilerini araştırmıştır. İnceleme kapsamında, Tarihi Niksar Yılanlı Köprüsü'nün özgün simetrik hali ile günümüzdeki asimetrik durumu ANSYS yazılımında sonlu eleman modeli tekniğiyle

2. KAYNAK ÖZETLERİ

oluşturulmuştur. Her iki köprü modelindeki statik analizlerde en büyük basınç gerilmelerinin kemer tepe noktası yakınında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Ardından modellerde modal analizler gerçekleştirilmiş ve olası bir hasarın kemerin orta bölgesinde başlayabileceği değerlendirilmiştir.

Uzdil (2020) tarihi bir yığma yapının deprem davranışını incelemiştir. Tarihi İstanbul Üniversitesi Rektörlük Binası'nın sonlu eleman modeli oluşturularak modal analizler yapılmış, mod şekilleri ve modal frekans değerleri belirlenmiştir. Daha sonra bu modelin deprem altında olası hasar alacak yerler belirlenmiştir. Analizlerden elde edilen bulgular doğrultusunda, incelenen bina için uygun güçlendirme önerileri geliştirilmiştir.

Çalayır et al. (2021) OMA yöntemiyle ile Elazığ'daki tarihi Mustafa Paşa Camii'nin minaresinin dinamik davranış parametrelerini belirleyerek minarenin sonlu eleman modelini güncelleştirmeyi amaçlamışlardır. ANSYS Mechanical yazılımı kullanılarak oluşturulan sonlu eleman modelinde modal analizler ile teorik mod şekilleri ve modal frekans değerleri belirlenmiştir. Bu sonuçlar baz alınarak minare üzerinde OMA gerçekleştirilerek minarenin belirlenen dinamik davranış parametreleri yardımıyla minarenin sonlu eleman modelinde model kalibrasyon güncellemesi gerçekleştirilmiştir.

Durgut vd. (2021) Bursa'daki Hocaalızade, Arap Mehmed ve Ulu Camii (Doğu) minarelerinin deprem etkisi altındaki davranışlarını incelemişlerdir. 11 farklı deprem kaydı ve her kaydın iki yönü eş zamanlı olarak minarelere uygulanarak artımlı dinamik analizler gerçekleştirilmiş ve kırılma eğrileri elde edilmiştir. Analiz sonuçları, Tarihi Binalar için Deprem Riski Yönetimi Rehberi (2017) kapsamında belirlenen performans sınırlarına göre değerlendirilmiştir.

Kanbur (2021) Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi kullanarak tarihi kemer köprülerin dinamik davranışını incelemiştir. Çalışmada tek açıklıklı yığma yapı olan Erzurum Kireçli Köprüsü üzerinde, restorasyon öncesi, restorasyon sırası ve restorasyon sonrası dinamik davranış parametreleri belirlenmiş ve belirli zaman aralıklarıyla yapı sağlığı takibi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda düzenli aralıklarla

2. KAYNAK ÖZETLERİ

gerçekleştirilecek OMA uygulamaları ile elde edilen deneysel dinamik davranış parametreleri aracılığıyla tarihi köprülerin yapı sağlığının izlenebileceği tespit edilmiştir.

Porcu et al. (2021) tarihî yığma kulelerin sismik performansının belirlenmesinde model tanımlama ve analiz yöntemi seçiminin kritik rolünü vurgulamaktadır. Çalışmada İtalya L'Aquila'da bulunan Civic Kulesi üzerinde yapılan uygulamada doğrusal modal analizlerin yer değiştirme taleplerini düşük tahmin ettiği, buna karşın doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik analizlerin daha güvenilir sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Dinamik analizler sonucunda kulenin sonlu eleman modelinde oluşan deformasyonların, yapıda gözlenen çatlak desenleriyle uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Yetkin vd. (2021) operasyonel modal analiz yardımıyla betonarme bir minarenin dinamik davranış parametrelerini belirlemişlerdir. Çalışmada minarede üç farklı ölçüm yöntemi belirlenmiş; referanslı ve referanssız düzeneklerde minare yüksekliği boyunca farklı seviyelere yerleştirilen ivmeölçerlerle titreşim kayıtları alınmıştır. Analizler sonucunda minare doğal davranış parametrelerinde, ilk altı frekans değerinin tüm ölçümlerde benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Sadece en üst seviyeden yapılan ölçümlerde ise sınırlı sayıda mod şeklinin tanımlanabildiği görülmüştür. Sonuç olarak, minare gibi ince ve yüksek yapıların güvenilir dinamik parametrelerinin belirlenebilmesi için ölçümlerin yalnızca en üst seviyeden değil yapı boyunca farklı yüksekliklerden de alınması gerektiği ortaya konulmuştur.

Yurdakul et al. (2021) çalışmada, 12. yüzyılda Bayburt'ta inşa edilen tarihî bir yığma minarenin deprem etkileri altındaki zaman tanım alanı davranışı incelenmiştir. Minare, yöresel taşlar ve el yapımı tuğlalarla inşa edilmiş olup, boyuna konik geometriye sahiptir. Öncelikle Bayburt taşının mekanik özelliklerini belirlemek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneyler sonucunda Bayburt taşı için ortalama basınç dayanımı 25,97 MPa, Poisson oranı 0.12 ve elastisite modülü 16.649 MPa olarak bulunmuştur. Tuğla ve taşla harç birleşimi göz önüne alınarak analizlerde elastisite modülü 11.654 MPa kabul edilmiştir. Minarenin üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 ile oluşturulmuş ve bu modelde doğrusal elastik zaman tanım alanı analizler gerçekleştirilmiştir. 1992 Erzincan, 1999 Kocaeli-Düzce ve 2011 Van-Erciş depremlerine ait ivme kayıtları modele uygulanmıştır. Analiz sonuçlarına göre özellikle gövdenin sekizgen kesitten dairesel

kesite geçiş bölgelerinde çekme ve basınç gerilmeleri malzeme dayanımını aşmaktadır. Erzincan deprem ivme kaydı uygulanan modelde maksimum basınç gerilmesi 13,7 MPa, çekme gerilmesi ise 10,7 MPa olup, bu değerlerin malzeme sınır gerilme değerlerini geçtiği için yapıda hasar oluşabileceği görülmüştür. Kocaeli-Düzce ve Van-Erciş deprem ivme kayıtları modele uygulandığında ise basınç gerilmeleri sınır altında kalmış olmasına rağmen çekme gerilmeleri kritik bölgelerde limit değerleri aşmıştır.

Erkmen (2022) Erzurum'da Üç Kümbetler alanında bulunan Anonim-II kümbetinin dinamik olarak kimliklendirmesini amaçlamıştır. Çalışmada, kümbetini yapı malzemesi olan Sivişli taşının beton Schmidt çekici yardımıyla sertlik değerleri ve deneysel çalışmalar yardımıyla mekanik özellikleri belirlenip aralarında bir korelasyon oluşturacak bağıntılar türetilmiş ve bu bağıntılardan elde edilen değerler kümbetin SAP 2000 yazılımında oluşturulan sonlu eleman modeli için duvar mekanik özellikleri olarak tanımlanarak kümbetin teorik modal davranış parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra bu sonuçlar ışığında OMA yardımıyla Anonim-II kümbetinin operasyonel davranış parametreleri belirlenerek sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır.

Gedik (2022) Erzurum'daki tarihi Emir Saltuk Kümbeti'nin dinamik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada kümbeti oluşturan yapı malzemelerinin mekanik özellikleri deneysel yöntemlerle belirlenmiş; ardından kümbetin üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 yazılımı kullanılarak oluşturulmuş ve teorik modal davranış parametreleri hesaplanmıştır. Daha sonra, Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemiyle kümbetin deneysel dinamik parametreleri elde edilmiş ve teorik sonuçlarla karşılaştırılarak modal analizler arasındaki farklılıklar belirlenmiştir.

Shabani et al. (2022) OMA kullanarak yığma bir kulenin sonlu eleman modelini güncellemişlerdir. Kesme taştan inşa edilen Slottosfejl Kulesi'nin üç boyutlu yazıcılar ile sonlu eleman modeli oluşturulduktan sonra kulenin teorik davranış parametreleri elde edilmiştir. Kulenin OMA ile elde edilen operasyonel mod şekilleri ve modal frekans sonuçlarına bağlı olarak kulenin sonlu eleman modelinde gerekli model güncelleştirmeleri yapılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yanık vd. (2022) tarihi yığma minarelerin çevresel titreşim testi yardımıyla minarelerin zamana ve çevreye bağlı yapısal davranışlarının değişikliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında Trabzon'da bulunan tarihi Hacı Kasım Muhittin ve Tabakhane cami minarelerinin, çevresel titreşim testi yardımıyla farklı zaman aralıklarındaki dinamik davranış parametreleri elde edilmiş ve sonuçlar birbiriyle karşılaştırılarak minare davranışındaki zaman ve çevre etkisi irdelenmiştir.

Yılmaz (2022) Erzurum'da Üç Kümbetler alanında bulunan Anonim-I kümbetinin dinamik olarak kimliklendirmesini amaçlamıştır. Çalışmada kümbetini yapı malzemesi olan Sivişli taşının beton Schmidt çekici yardımıyla sertlik değerleri ve deneysel çalışmalar yardımıyla mekanik özellikleri belirlenip, aralarında bir korelasyon oluşturacak bağıntılar türetilmiş ve bu bağıntılardan elde edilen değerler kümbetin SAP 2000 yazılımında oluşturulan sonlu eleman modeli için duvar mekanik özellikleri olarak tanımlanarak kümbetin teorik modal davranış parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra bu sonuçlar ışığında OMA yardımıyla Anonim I kümbetinin operasyonel davranış parametreleri belirlenerek sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Çalışma, tarihi yığma yapıların malzeme karakterizasyonu ile deneysel modal analizlerin bütünleştirilmesinin yapı sağlığı takibinde uygulanabilirliğini göstermesi açısından önem taşımaktadır.

Erkek et al.(2023) minare yüksekliğinin dinamik davranış parametrelerine etkisini nümerik olarak incelemişlerdir. ANSYS yazılımında, yüksekliği 13,5 m ile 33,75 m arasında değişen 19 farklı yığma minare modeli oluşturulmuş ve tabanlarının ankastre mesnetli olduğu kabul edilmiştir. Modal analizler sonucunda minarelerin doğal frekansları, mod şekilleri ve kütle katılım oranları elde edilmiştir. Ayrıca, minare yüksekliğine bağlı olarak minarenin ilk iki doğal frekansına ulaşılabilecek bağıntı geliştirilmiştir.

Kocaman (2023) Trabzon'da yer alan tarihi Molla Siyah Camii'nin restorasyon işlemlerinin yapı üzerindeki sismik etkilerini değerlendirmiştir. 11. yüzyıldan kalma kiliseden çevrilen bu yapının restorasyonunda çatı kısmı betonarme elemanlarla güçlendirilmiş ve bu bölümün cami davranışına etkisi irdelenmiştir. ANSYS yazılımında oluşturulan sonlu eleman modelinde caminin teorik mod şekilleri ve modal frekans değerleri belirlendikten sonra bu değerler camide daha önce OMA ile yapılan dinamik

2. KAYNAK ÖZETLERİ

parametreleri ile karşılaştırılarak caminin sonlu eleman modelinde gerekli güncelleştirmeler yapılmıştır. Model üzerinde çeşitli deprem kayıtları etkilerek lası hasar mekanizmaları belirlenmiştir.

Nguyen and Livaoğlu (2023) minarelerin hasar durumlarını belirlemek için yalnızca temel mod şekli değişimine dayanan yeni bir “model bazlı olmayan normalizasyon yaklaşımı” geliştirmeyi amaçlamışlardır. Silindir şeklindeki minare ve giriş benzeri yapıların mod şekli açısından birbirine benzediği ve bir düğüm noktası altındaki hasarın, minarenin tüm hasarı hakkında fikir vereceği fikri ortaya atılmıştır. 1467 yılında inşa edilen Bursa’daki Hacılar Camii’ne ait 24,25 metrelik minare üzerinde yapılan analizlerle hipotez doğrulanmaya çalışılmıştır.

Onat et al. (2023) Alaca kapı Mir-Alay Şah Ali Bey Minaresinin mevcut durumunu ve sismik performansı incelemiştir. 2020 Sivrice-Elazığ depreminde minareye bitişik bir son cemaat yeri yıkılmış, diğeri ise orta hasar almıştır. Bu durum minarenin sınır koşullarını değiştirmiştir. Minarenin dinamik özellikleri beş ivmeölçerle belirlenmiş, ardından malzeme testleriyle sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve sekiz farklı model kalibrasyonu uygulanmıştır. Yapısal analizlerde yerel hasarlar tespit edilmiş ve altı farklı deprem kaydı ile yapılan analizlerle minarenin zayıf bölgeleri belirlenmiştir.

Soyluk and Demircan (2023) 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinde hasar almış tarihi cami minarelerinin deprem davranışını mimari açıdan incelemiştir. Çalışmada depremlerden sonra hasar görmüş ve çalışma için örnek olarak seçilen tarihi camii minarelerinin, hasar gören yerleri ve bu hasarların nedenleri değerlendirilmiş, hararların genel olarak minarelerin çekme gerilmelerini tam olarak karşılayamaması sonucunda minare şerefesi, peteği ve küp kısımlarında meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır.

Aslan (2024) tarihi yığma minarelerin yapı sağlığının incelenmesi için video kamera tabanlı bir yöntem önermiştir. Çalışmada geçmiş çalışmalar ışığında, laboratuvar ortamında ivmeölçer tabanlı, sahada video kamera tabanlı operasyonel modal analiz (OMA) çalışmaları ile deprem simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çalışma için laboratuvar ortamında inşa edilen minyatür minare modelleri ANSYS yazılımı ile sonlu

2. KAYNAK ÖZETLERİ

eleman yöntemi kullanılarak modellenmiş, endüstriyel kameralarla bu minarelerin görüntülerin alınmış ve Python tabanlı analizlerle minarelerin modal parametreleri belirlenerek ivmeölçer ölçümleri ile yapının frekans değerleri doğrulanmıştır. Laboratuvarındaki bu çalışmalar akabinde saha çalışmalarında Trabzon'daki tarihi Fatih Büyük Camii minaresi incelenmiş, video görüntüleri analiz edilerek modeli ile gerilme birikimlerinin maksimum olduğu noktalar belirlenmiş ve minarenin sonlu eleman modelinde dinamik analizler yapılmıştır.

Eren (2024) tarihi bir yığma minarenin güçlendirmesi üzerine çalışmıştır. Çalışmada İzmir Selçuk'taki tarihi İsa Bey Camii batı minaresinin sonlu eleman modeli SAP2000 yazılımında oluşturularak minarenin yapısal davranışları incelenmiştir. Daha sonra minarenin, çalışmada önerilen güçlendirilmiş durumu altındaki yapısal davranışları gerçekleştirilerek, güçlendirmenin minare davranışına etkisi incelenmiştir.

Ergün and Tayfur (2024) Bayburt'taki bir saat kulesi üzerinde restorasyonun deprem performansı üzerindeki etkisini çalışmışlardır. ANSYS yazılımı kullanılarak yığma bir yapı örneği olan kulenin restorasyon öncesi ve sonrasındaki sonlu eleman modelleri oluşturulup modal analizler gerçekleştirildikten sonra OMA yöntemiyle kulenin dinamik davranış parametreleri yerinde belirlenmiştir. OMA sonuçları yardımıyla sonlu eleman modellerinde model kalibrasyon güncellemeleri yapılmıştır. Güncellenen bu modellere 11 farklı deprem ivme kaydı uygulanarak restorasyonun etkisi irdelenmiştir. Deprem analizleri sonucunda, incelenen saat kulesinin mevcut yapısal özellikleri ve malzeme dayanımları göz önünde bulundurularak sismik yükler karşısında yeterli güvenliği sağladığı tespit edilmiştir. Analizler, yapının deprem sırasında kritik noktalarda herhangi bir yapısal hasar riski taşımadığını göstermektedir.

Eronat et al. (2024) yığma minarelerin farklı depremler altındaki deprem davranışlarını araştırmışlardır. Çalışmada Elazığ'da bir yığma minare inşa edildiği varsayılarak bu minarenin sonlu eleman modeline 1999 Gölçük, 2005 Bingöl ve 2011 Van depremlerinin ivme kaydı etkililerek minarenin deprem davranışı incelenmiştir.

Jadallah et al (2024) Gaziantep'teki tarihi Şirvani Camii minaresinin deprem davranışını incelemişlerdir. 35 metre yüksekliğindeki minare önemli bir yapısal zorluk

2. KAYNAK ÖZETLERİ

teşkil etmektedir. 6 Şubat 2023'te Türkiye'de meydana gelen yıkıcı depremde, Şirvani Camii minaresinin deprem sırasındaki davranışını anlamak için Extreme Loading for Structures (ELS) programı kullanılarak detaylı doğrusal olmayan zaman tanım analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları, minarenin deprem etkisi altında gerçek hayatta gözlenen çökme davranışını başarıyla yansıtmıştır.

Yayla (2024) yığma minarelerin deprem davranışında yükleme yönünün etkisini incelemiştir. Çalışmada Aksaray'daki yığma yapı tekniğiyle inşa edilen Zafer Camii minaresinin SAP 2000 yazılımında oluşturulan modeline, 7,2 büyüklüğündeki Düzce Kaynaşlı, Van Erciş ve Kahramanmaraş Pazarcık depremlerinin ivme kayıtları 15'er derecelik açılarla 12 farklı yükleme doğrultusunda deprem yükleri etkililerek minarenin deprem davranışı araştırılmıştır.

Duman et al. (2025) tarihî bir yığma minaredeki hasar senaryoları, makine öğrenmesi (ML) ve derin öğrenme (DL) algoritmaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmada Trabzon'daki tarihi Fatih Büyük Camii minaresinin doğal frekansları OMA yöntemiyle belirlenmiş ve sonlu eleman modeli ANSYS Workbench ve Response Surface yazılımları yardımıyla sonlu eleman modeli optimize edilmiştir. Hasar oranlarını temsil eden frekans temelli hasar indeksleri ve yapının mekanik özelliklerindeki değişimlere bağlı mod şekillerinden oluşan veri setleri hasar indeksleri ve mod şekilleri üzerinden ML ve DL algoritmalarına uygulanmış ve %96'ya kadar doğrulukla hasar tespiti sağlanmıştır.

Feizollahbeigi and Mendes (2025) yığma minarelerin deprem davranışını sayısal yöntemlerle incelemeyi amaçlamaktadır. Tipik bir minare üzerinde yapılan değerlendirmede, fiziksel ve geometrik doğrusal olmayan itme analizleri gerçekleştirilmiş ve deplasman ile hasar desenleri incelenmiştir. Ardından, Bam deprem kayıtları kullanılarak dinamik analizler yapılmış, kayıtlar farklı ölçeklerde uygulanarak minarenin dinamik yükler altındaki davranışı ve hasar mekanizmaları değerlendirilmiştir. Minarenin geçiş bölgesi ile silindirik gövdesi arasındaki gerilme ve kesme yoğunlaşmasının çöküşte belirleyici olduğunu göstermiştir. İtme analizi, hasar oluşumunu ve kritik bölgeleri belirlemede koruyucu bir yöntem olarak faydalı olsa da, dinamik etkileri ve aşamalı hasar ilerlemesini yakalayamamaktadır. Buna karşılık, doğrusal olmayan dinamik analiz, tüm dinamik kuvvetleri ve zemin hareketinin değişken

genlik ile frekans bileşenlerini hesaba katarak hasar desenini ve maksimum deplasmanı daha doğru bir şekilde ortaya koymuştur. İtme analizinin ön değerlendirme için yeterli olduğunu, ancak güvenlik ve hasar tahmini için doğrusal olmayan dinamik analizlerin daha uygun olduğu vurgulanmıştır.

Kocaman et al. (2025) Gaziantep ili Şahinbey ilçesinde bulunan tarihî Kabasakal Camii minaresinin 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremi sonrası sismik performansı incelenmiştir. Depremde minarenin külâh ve petek bölümlerinde ciddi hasarlar meydana gelmiştir. Osmanlı dönemine ait tipik yığma minare formuna sahip yapı için sonlu eleman modeli oluşturularak doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak minarenin orijinal modeli incelenmiş ve olası göçme mekanizmaları belirlenmiştir. Ardından, hasar gören külâh ve petek bölümlerinin çelik halkalarla güçlendirilmesi önerilmiş ve bu yöntem sayısal analizlerle test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen güçlendirme yönteminin kritik bölgelerdeki yer değiştirme taleplerini azalttığını ve yapının genel rijitliğini artırdığını göstermektedir. Ayrıca bölgede yaygın olarak kullanılan Urfa taşı gibi yerel malzemelerin dayanım ve deprem performansı da değerlendirilmiştir. Çalışma, tarihî yapıların korunmasında uygun güçlendirme yöntemlerinin önemini vurgulamakta ve önerilen çözümün benzer yapılar için uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır.

Pehlivanoğlu (2025) Gaziantep'teki tarihi Hüseyin Paşa Camii minaresinin deprem öncesi ve sonrası durumunu incelemiştir. 6 Şubat 2023 tarihindeki depremlerde 9 m'lik kısmı yıkılan minarenin hem deprem öncesi durumu hem de çelik sistemler yardımıyla yeniden inşa edilen durumu SAP 2000 yazılımında oluşturulan vokal modellerinde analizleri gerçekleştirilerek minare durumları karşılaştırılmıştır.

Taş et al. (2025) sonlu eleman yöntemi yardımıyla tarihi Nebi Camii minaresini modelleyip model üzerinde dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir. Minarenin sonlu eleman modeli ANSYS yazılımında oluşturulup 6 Şubat 2023 tarihindeki 7,7 büyüklüğündeki Pazarcık depreminin ivme kaydı minarenin sonlu eleman modeline etkitilip minarenin hasar durumu incelenmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çalışmanın bu bölümünde Erzurum ili tarihi ve jeolojik yapısı, Türkiye ve Erzurum ilinin depremselliği, cami, minare ve minarelerde narinlik, yapısal modelleme yöntemleri, modal analiz yöntemleri ve sonlu eleman modelleri kavramlarına ilişkin bilgiler verilmiştir.

3.1. Erzurum'un Tarihsel Gelişimi

Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesinde yer alan Erzurum'un bulunduğu alanda, tarih boyunca Karin, Karna, Garin, Kornoi, Kalai ve Karnak adlarıyla anılan yerleşimlerin varlığı bilinmektedir. Aynı dönemlerde Erzurum Ovası'nın batı kesiminde ise Erzen veya Erzeron adlı bir kentin bulunduğu kaydedilmiştir. Roma İmparatorluğu'nun M.S. 395 yılında ikiye ayrılmasıyla kurulan Doğu Roma İmparatorluğu döneminde Erzurum ve çevresi bu imparatorluğun hâkimiyeti altına girmiştir; ancak bu hâkimiyet sürekli olmamıştır. M.S. 395'ten VII. yüzyılın sonlarına kadar bölge, Bizans ile Sasani devletleri arasında gerçekleşen askeri ve siyasi çatışmalara sahne olmuştur. 11. yüzyıl başlarında Bizans yönetiminin yöre halkına yönelik olumsuz tutumları, Selçukluların küçük topluluklar hâlinde bölgeye yerleşmesine imkân sağlamıştır. Selçuklular, Malazgirt Savaşı'nın ardından bölge üzerinde egemenlik kurmayı başarmıştır. Bunu takiben Erzurum, Saltukoğulları, İlhanlılar, Karakoyunlu ve Akkoyunluların yönetimlerine geçmiştir; 1517 yılında Osmanlı topraklarına katıldığında ise 15 yıl süren Safevi yönetiminin etkisi altında bulunmaktaydı (T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü, 2008).

3.1.1. Türk Dönemi ve Saltuklular

1071 Malazgirt Zaferi'nden sonra Erzurum, Türk topraklarına katılmış ve Saltukoğulları beyliği yönetimi altına girmiştir. Bu dönemde Ulu Camii, Kale Mecidi, Emir Saltuk Kümbeti ve Tepsi Minare gibi önemli yapılar inşa edilmiştir. Türk döneminde Erzurum, Saltukluların ardından Selçuklular, Moğollar, İlhanlılar, Toğalılar, Celayırlılar, Eretna Beyliği, Karakoyunlular, Akkoyunlular ve Safeviler gibi çeşitli

yönetimlerin etkisi altında kalmıştır. 1517 yılında Yavuz Sultan Selim kenti kesin olarak Osmanlı topraklarına katmıştır (T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Bölge Müdürlüğü, 2014).

XVI. yüzyıldan itibaren Erzurum, surların dışına taşmış ve camiler etrafında mahalleler oluşmaya başlamıştır. Bu dönemde esnaf ve zanaatkarlar da sur dışına çıkmış, Taş Mağazalar, Gürcükapı gibi çarşılar kurulmuştur. Erzurum, 1828-1829, 1877-1878 ve 1916 yıllarında Rus işgaline uğramış, 1918’de Kazım Karabekir tarafından düşman işgalinden kurtarılmıştır (T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Bölge Müdürlüğü, 2014).

3.1.2. Osmanlı Dönemi ve imar faaliyetleri

Yavuz Sultan Selim döneminde Osmanlı’ya katılan Erzurum, Kanuni Sultan Süleyman zamanında baştan başa imar edilmiş ve Erzurum Kalesi tahkim edilmiştir. Kanuni Sultan Süleyman Irak Seferi sırasında 1534 yılında Erzurum’da konaklamış, harap olan kalenin onarılması için talimat vermiştir. Ayrıca metruk ve harap köylerde eski tekkeler ihya edilmiş, gerekli yerlere yeni yapılar inşa edilmiştir. Erzurum, Osmanlı döneminde doğuya açılan seferlerde üs konumunu korumuş ve askeri önemi devam etmiştir (Anabritannica 1998).

XVI. yüzyıldan itibaren camiler etrafında mahalleler oluşmuş, esnaf ve zanaatkarlar surların dışına taşmıştır. XVII. ve XVIII. yüzyılda şehrin ekonomik ve fiziki yapısı, seyyahların raporlarına göre oldukça güçlüydü. XIX. yüzyılda Rus tehditlerine rağmen Erzurum, tarım ve ticaret merkezi olarak önemini korumuş, endüstri ve yer altı kaynakları bakımından zengin bir kent olmuştur (Anabritannica 1998).

3.1.3. Coğrafi ve ekonomik konumu

Doğu Anadolu Bölgesi’nde il merkezi olan Erzurum’un kuzeyinde Artvin-Rize, batısında Gümüşhane-Erzincan, güneyinde Bingöl-Muş, doğusunda Ağrı-Kars illeri bulunmaktadır. Kent, Fırat Nehri’nin kaynağı Karasu’nun yukarı havzasında ve Palandöken Dağı’nın eteğinde yer almaktadır. Doğu ve batısında Pasinler ve Erzurum

Ovaları bulunurken, kuzey ve güneyi dağlık alanlarla çevrilidir. Türkiye'nin en yüksek ili olan Erzurum, sıradağlar ve yüksek yaylalarla kaplıdır (T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Bölge Müdürlüğü, 2014).

İlin ekonomisi tarım, hayvancılık, madencilik, sanayi ve ormancılığa dayanmaktadır. Erzurum, tarih boyunca Anadolu-Kafkasya-İran demiryolu bağlantısında önemli bir ticaret ve konaklama merkezi olmuştur. Tiflis-Kars üzerinden gelen Kafkas Yolu ve Tebriz-Doğubeyazıt'tan geçen Kuzey İran Yolu, Sivas üzerinden Diyarbakır, Irak, Suriye ve Basra Körfezi ile Akdeniz kıyılarına bağlanan yollarla birleşir. Ayrıca Erzurum, Kop ve Zigana geçitleri üzerinden Karadeniz'e ulaşan transit yolların kesişim noktasında yer almaktadır (Akpolat 2014 ;T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Bölge Müdürlüğü 2014).

3.1.4. Tarihi eserler ve kültürel miras

Erzurum'da günümüze ulaşan tarihi eserler arasında; V. yüzyılda Bizans İmparatoru II. Theodosious zamanında yapılan kalenin kalıntıları, Erzurum Kalesi, Oltu Kalesi, Avnik Kalesi, Hasan Kale, XII. yüzyılda İzzeddin Saltuk'un Kale Mescidi, Saltuklu yapısı Tepsi Minare (Saat Kulesi), Erzurum Ulu Camii, Çifte Minareli Medrese, Yakutiye Medresesi, Ahmediye Medresesi, Üç Kümbetler ve Osmanlı dönemine ait Mimar Sinan eserleri Lala Mustafa Paşa ve İbrahim Paşa Camileridir. Ayrıca Osmanlı ve Türk sivil mimarisi özelliklerini gösteren evler ile çok sayıda türbe ve hamam şehirde mevcuttur. 1965 yılında heykeltıraş Hakkı Atamulu tarafından yapılan Atatürk Anıtı da önemli bir kültürel miras olarak öne çıkar (Akpolat, 2014;T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Bölge Müdürlüğü 2014).

Arkeolojik kazılar, Karaz, Pulur ve Güzelova Höyükleri ile Cunni Mağarası'nda M.Ö. 4000 yılından beri bölgenin yerleşim gördüğünü ortaya koymaktadır. M.Ö. 2000 civarında Azzi ve Hayaşa kavimleri, daha sonra Huriler bölgede yaşamıştır. M.Ö. 900-600 yılları arasında kent Urartu Devleti sınırları içinde kalmış, Pasinler Kalesi inşa edilmiş ve Erzurum Kalesi içinde küçük bir yapı yer almıştır. Kafkaslar üzerinden gelen Kimmerler ve İskitler, Urartu Devleti'ni yıkmıştır. Roma, Bizans ve Pers egemenlikleri dönemi sonrası kent, 4. yüzyılın sonunda Roma İmparatorluğu tarafından alınmış ve

Teodosipolis adı verilmiştir. Justinien tarafından onarılan kent, Bizans-Arap mücadelelerinde el değiştirmiş, 1071 Malazgirt Zaferi'nden sonra Türklerin egemenliğine geçmiştir (Anabritannica 1998)).

Erzurum, 23 Temmuz 1919'da Kurtuluş Savaşı kararlarının alındığı Erzurum Kongresi'ne ev sahipliği yapmıştır ve bu nedenle Türk tarihinde önemli bir konuma sahiptir (Anabritannica 1998).

3.2. Türkiye'nin Depremselliği

3.2.1. Depremsel konum ve tektonik yapı

Türkiye, Alp-Himalaya tektonik/orojenik kuşağı üzerinde yer almakta ve jeolojik yapısı itibarıyla yüksek deprem riski taşımaktadır. Ülke, özellikle Anadolu Levhası'nın hareketli sınırları ve Ege, Doğu Anadolu gibi aktif fay sistemleri nedeniyle sık sık orta ve büyük ölçekli depremler yaşamaktadır. Bu fay hatları, tarih boyunca yıkıcı depremlere neden olmuş ve yerleşim bölgelerinin planlanması ile yapı teknolojilerini doğrudan etkilemiştir (Yalçın 2012).

3.2.2. Deprem bölgeleri ve aktif fay hatları

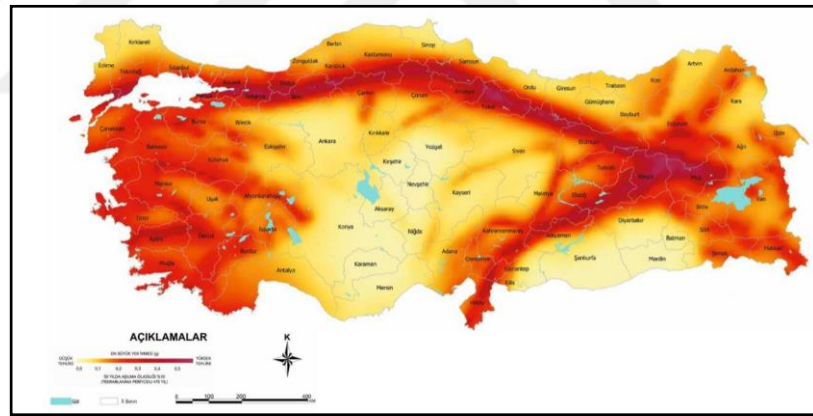
2018 yılında yayımlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre (TBDY 2018), Türkiye dört farklı deprem düzeyine ayrılmıştır.

- **DD-1 Deprem Düzeyi:** Deprem yer hareketi, spektral büyüklüklerin 50 yıl içerisinde aşılma olasılığı %2 olan ve yaklaşık 2475 yıllık tekrarlanma periyoduna karşılık gelen, oldukça seyrek meydana gelen yer hareketini ifade etmektedir. Bu düzeydeki yer hareketi, aynı zamanda dikkate alınabilecek en büyük deprem yer hareketi olarak da tanımlanmaktadır(TBDY 2018).
- **DD-2 Deprem Düzeyi:** Spektral büyüklüklerin 50 yıl içerisinde aşılma olasılığı %10 olan ve yaklaşık 475 yıllık tekrarlanma periyoduna karşılık gelen, görece seyrek meydana gelen deprem yer hareketini tanımlamaktadır. Bu düzeydeki yer

hareketi, standart tasarım deprem yer hareketi olarak da adlandırılmaktadır (TBDY 2018).

- **DD-3 Deprem Düzeyi:** Spektral büyüklüklerin 50 yıl içerisinde aşılma olasılığı %50 olan ve yaklaşık 72 yıllık tekrarlanma periyoduna karşılık gelen, sık meydana gelen deprem yer hareketini tanımlamaktadır. Bu düzeydeki yer hareketi, yapının kullanım ömrü boyunca karşılaşılabileceği küçük ve orta büyüklükteki depremleri temsil etmektedir(TBDY 2018).
- **DD-4 Deprem Düzeyi:** Spektral büyüklüklerin 50 yıl içerisinde aşılma olasılığı %68 (30 yıl için %50) olan ve yaklaşık 43 yıllık tekrarlanma periyoduna karşılık gelen, çok sık meydana gelen deprem yer hareketini tanımlamaktadır. Bu düzeydeki yer hareketi, servis deprem yer hareketi olarak da adlandırılmaktadır (TBDY 2018).

Bunlara ek olarak AFAD tarafından 2019 yılında Türkiye Deprem Tehlike Haritası yenilenmiş, sürekli bu harita gerçekleşen depremlerle güncellenmektedir. Şekil 3.1’de bu harita gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Türkiye Deprem Tehlike Haritası (Anonim 2024a)

3.2.3. Sismotektonik yapı ve fay sistemleri

Türkiye’nin sismotektonik yapısı, aktif fay hatları ve levha tektoniği süreçleri tarafından belirlenmektedir. Özellikle Kuzey Anadolu Fay Hattı (KAF) ve Doğu Anadolu Fay Hattı (DAF), ülkenin en önemli aktif fay sistemlerindendir. Bu fay hatlarında biriken gerilim, büyük depremlerin oluşma olasılığını artırmaktadır (Yalçın 2012).

Günümüzde, Türkiye'nin depremselliği konusunda yapılan bilimsel çalışmalar, erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi, yapıların depreme dayanıklı hale getirilmesi ve afet yönetimi stratejilerinin oluşturulması gibi önlemleri içermektedir. Bu önlemler, olası büyük depremlerin etkilerini azaltmak ve toplumun bu afetlere karşı dirençli hale gelmesini sağlamak amacıyla büyük önem taşımaktadır (Yalçın 2012).

3.2.4. Tarihsel deprem kayıtları

Türkiye'deki depremsellik, geçmişte yaşanan tarihsel depremlerle belgelenmiştir. Bu depremler, hem şehirlerin fiziki yapısını değiştirmiş hem de yerel halkın yaşam tarzlarını ve yapı tekniklerini etkilemiştir. Kaynaklarda, özellikle Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde yoğun sismik hareketliliğe işaret edilmektedir. (Yalçın 2012). Türkiye, tarihsel olarak büyük depremler yaşamış bir ülkedir. Örneğin, 1999 yılında meydana gelen İzmit Depremi ($M_w=7,4$), Marmara Bölgesi'nde büyük yıkıma yol açmıştır. Son yıllarda ise 2023 yılında Kahramanmaraş-Gaziantep arasında gerçekleşen 7,8 ve 7,5 büyüklüğündeki depremler, ülkenin doğu ve güneydoğusunda geniş bir alanda etkili olmuştur.

3.2.5. Depreme dayanıklı yapı yaklaşımları

Türkiye'de depreme karşı önlem alma gerekliliği, yığma ve kırsal yapıların davranışlarının incelenmesiyle anlaşılmaktadır. Yapıların malzeme kalitesi, taşıyıcı sistemlerin düzeni ve yerleşim planlaması, depreme karşı direnç geliştirmede temel etkenler olarak öne çıkmaktadır. Tarihsel yapı teknikleri ve günümüzde uygulanan mühendislik önlemleri, Türkiye'nin yüksek deprem riski dikkate alınarak geliştirilmektedir (Yalçın 2012).

3.2.6. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri

6 Şubat 2023 tarihinde Türkiye'nin güneydoğusunda, merkez üsleri Kahramanmaraş'ın Pazarcık ilçesi ($M_w=7,8$) ve Elbistan ilçesi ($M_w=7,5$) olan iki büyük deprem meydana gelmiştir (Akıncı ve Ünlügenç 2023). Depremler, yaklaşık 9 saat arayla gerçekleşmiş ve Modified Mercalli Intensity (MMI) şiddet ölçeğine göre XII (Afetsel)

seviyesinde sarsıntılar oluşturmuştur (Anonim 2024b). Bu depremler, Doğu Anadolu Fay Hattı üzerinde, sismik olarak uzun süredir nispeten sakin kabul edilen bir bölgede meydana gelmiş ve büyük enerji birikiminin varlığını ortaya koymuştur (Akıncı ve Ünlüoğlu 2023).

Resmî verilere göre, depremlerde 50.783 kişi hayatını kaybetmiş, 107.204 kişi yaralanmıştır. Ayrıca, 36.932 bina yıkılmış veya ağır hasar almıştır (Anonim 2024c). Özellikle Hatay, Kahramanmaraş, Adıyaman, Malatya ve Gaziantep illerinde ciddi yapı yıkımları yaşanmıştır (Anonim 2024c).

Depremler, sadece can ve mal kaybına yol açmamış, aynı zamanda bölgenin demografik yapısını da etkilemiştir. TÜİK verilerine göre, deprem öncesinde 14 milyon olan bölge nüfusu, afet sonrasında 13,8 milyona gerilemiş ve yaklaşık 740 bin kişi göç etmiştir (Anonim 2024d).

Ekonomik açıdan, depremin toplam maliyeti yaklaşık 2 trilyon TL olarak tahmin edilmektedir. Yıkım ve ağır hasar gören 890.861 bağımsız birimin 713.704'ü konutlardır; bu durum, Türkiye'nin bağımsız birim stokunun yaklaşık altıda birinin etkilenmiş olduğunu göstermektedir (Anonim 2024e).

Jeolojik açıdan, depremler yüzeyde 3,5 metreye kadar sola kayma hareketleri ve kaya devrilmeleri gibi deformasyonlara yol açmıştır. Bu bulgular, bölgedeki fay hatlarının daha önce öngörülemeyen bir şekilde aktive olduğunu ortaya koymaktadır (Akıncı ve Ünlüoğlu 2023).

Yaşanan bu büyük deprem sonrası bazı yeni düzenlemeler yapılmıştır.

3.2.7. 6 Şubat 2023 depremleri sonrası Türkiye'de deprem düzenlemeleri

6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş merkezli olarak meydana gelen büyük depremlerin ardından Türkiye'de 1996 ve 2007 tarihli deprem bölgesi sınıflandırma sistemi yürürlükten kaldırılmıştır. Bu değişiklik, afet sonrası yeniden yapılaşma ve risk azaltma stratejilerinin yeniden gözden geçirilmesi amacıyla yapılmıştır. Yeni

düzenlemeler, yapıların dayanıklılığını artırmaya yönelik bilimsel temelli ve kapsamlı deprem yönetmeliği yaklaşımını benimsemektedir (Anonim 2024d).

Bununla birlikte, değişikliklerin uygulanabilirliği ve etkinliği konusunda farklı değerlendirmeler bulunmaktadır. Mevcut yapı stokunun büyük bir kısmı eski yönetmeliklere göre inşa edildiği için, bu yapıların güçlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, yeni düzenlemenin yerel yönetimler ve inşaat sektöründeki tüm paydaşlar tarafından etkin bir şekilde uygulanabilmesi için kapsamlı bir eğitim ve denetim mekanizmasının oluşturulması önerilmektedir (Anonim 2024b).

Sonuç olarak, 6 Şubat 2023 depremleri sonrasında yapılan düzenleme, afet risklerini azaltmaya yönelik önemli bir adım olarak değerlendirilmekte, ancak etkin uygulanması için kapsamlı bir strateji ve paydaş iş birliği gerekmektedir (Strateji ve Bütçe Anonim 2024b; Anonim 2024c; Anonim 2024d).

3.3. Erzurum'un Jeolojik ve Depremsel Özellikleri

Erzurum, Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer almakta olup, Türkiye'nin en yüksek ve engebeli illerinden biridir (Koç 2016). Bölgenin jeolojik yapısı, Anadolu'nun karmaşık tektonik yapısının bir parçası olarak farklı fay hatları ve deprem odaklı kırılmalarla tanımlanmaktadır (Özer vd. 2022). Erzurum ve çevresi, Kuzey Anadolu Fayı (KAF) ve Doğu Anadolu Fayı'nın (DAF) etkileşim alanında bulunması nedeniyle yüksek sismik risk taşımaktadır (Maden vd. 2015).

3.3.1. Tarihsel depremler ve bölgesel etkileri

Tarih boyunca Erzurum ve çevresinde çok sayıda yıkıcı deprem meydana gelmiştir. Özellikle 20. yüzyılda kaydedilen depremler, bölgedeki yapı stokunun kırılgan olduğunu göstermektedir (Yapıcı 2015 ; Ergin ve Yılmaz 2020). Bu depremler, kentin hem yapısal hem de sosyal olarak afetlere hazırlıklı olmasının önemini ortaya koymaktadır (Ergin ve Yılmaz 2020). Araştırmalar, Erzurum'da geleneksel yığma yapıların deprem sırasında yüksek risk taşıdığını ortaya koymaktadır.

Tarihsel kayıtlara göre, 1859 yılında Erzurum ve çevresinde yaklaşık Mw 6,1 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. Bu deprem, dönemin yapı stokunun çoğunlukla taş ve kerpiçten oluşması nedeniyle birçok binanın ciddi şekilde hasar görmesine veya tamamen yıkılmasına yol açmıştır. Söz konusu deprem, bölgedeki yapıların deprem karşısında dayanıksız olduğunu göstermesi bakımından önemli bir örnek teşkil etmektedir (Anonim 2024f).

Buna ek olarak, 1983 yılında Erzurum merkezli yaklaşık Mw 6,6 büyüklüğünde başka bir deprem kaydedilmiştir. Bu deprem, daha geniş bir alanda şiddetli yıkıma neden olmuş, hem eski hem de bazı modern yapılar üzerinde etkili olmuştur. 1983 Erzurum Depremi, bölgenin sismik olarak aktif olduğunu ve yapıların depreme karşı dayanıklılığının artırılması gerekliliğini ortaya koymuştur (Anonim 2024g).

3.3.2. Erzurum'un deprem riski ve yapısal dayanıklılık

Erzurum'daki yapı stokunun önemli bir kısmı, eski teknikler ve yönetmelikler doğrultusunda inşa edilmiştir. Bu durum, özellikle düşük dayanımlı yığma ve kırsal yapı tipleri için yüksek deprem riskini beraberinde getirmektedir. Bölgedeki yeni düzenlemeler, yapıların dayanıklılığını artırmak ve olası deprem zararlarını azaltmak amacıyla yürürlüğe konmuştur.

3.3.3. Güncel düzenlemeler ve risk azaltma çalışmaları

6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş merkezli depremler sonrasında Türkiye'de deprem bölge derecelendirme sistemi kaldırılmış ve yerine dinamik bir risk yaklaşımı benimsenmiştir. Bu yeni düzenleme, özellikle Erzurum gibi yüksek riskli bölgelerde yapıların zemin etüdü, inşaat teknikleri ve dayanıklılık ölçütlerini dikkate alarak afet risklerini azaltmayı amaçlamaktadır (Özer 2016). Uzmanlar uygulamanın etkin olabilmesi için kapsamlı denetim ve eğitim mekanizmalarının oluşturulması gerektiğini vurgulamaktadır.

3.3.4. Erzurum ve 6 Şubat 2023 depremleri sonrası yığma yapılar

Erzurum’da özellikle kırsal alanlarda mevcut yapıların büyük bir kısmı yığma yapılar olup, eski inşaat teknikleri kullanılarak inşa edilmiştir (Anonim 2024h).

Bu tür yapılar, büyük ölçekli depremlerde ciddi hasar riski taşımaktadır. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş merkezli depremler Erzurum ilini doğrudan etkilememiş olsa da, bölgedeki yığma yapıların olası depremlere karşı zayıf noktalarını gözler önüne sermiştir. Erzurum'da yapıların yaklaşık %40'ı olası depremlerde risk taşımaktadır (Anonim 2024i).

Depremlerin ardından Erzurum’da kentsel dönüşüm projeleri hız kazanmıştır. Eski ve depreme dayanıksız yapıların yerine, modern inşaat teknikleriyle güçlendirilmiş binaların inşası hedeflenmektedir. Son 8 yılda yaklaşık 60 bin konut ve 10 milyon metrekarelik alan modern standartlarda yeniden inşa edilmiştir. (Anonim 2024j.). Erzurum Büyükşehir Belediyesi tarafından yürütülen kentsel dönüşüm çalışmaları, şehrin 500 farklı noktasında sürmekte olup, özellikle yerinde dönüşümü esas alan projeler hayata geçirilmektedir (Anonim 2024k)

Tüm bunların sonucunda 6 Şubat 2023 depremleri, Erzurum’daki yapıların depreme karşı dayanıklılığını artırma gerekliliğini bir kez daha ortaya koymuştur. Kentsel dönüşüm ve yapı güçlendirme çalışmaları, Erzurum’un olası depremlere karşı daha güvenli hale gelmesi için kritik öneme sahiptir.

3.4. Cami Kavramı ve Tarihçesi

Cami kelimesi, Arapça “cem” kökünden türetilmiş olup “toplamak” anlamına gelmektedir. Başlangıçta “mescid-i cami” ifadesi kullanılmış, zamanla yalnızca cami olarak anılmaya başlanmıştır. Küçük ibadethaneler mescid, üstü açık ibadet alanları ise namazgah olarak adlandırılmaktadır. Günümüzde cami terimi, minberi bulunan ve namazların kılındığı ibadethaneleri ifade etmektedir (Anonim 2024l).

İslam’ın ilk mescidi, Mekke-Medine yolu üzerindeki Kuba Mescidi olarak inşa edilmiştir. Daha sonra Hz. Peygamber Mescid-i Nebvi’yi kurmuştur. Bu yapı, kare planlı

bir avlu ve çevresinde küçük hücrelerden oluşan bir mimari plana sahiptir. Mescid-i Nebevi'nin plan şeması, sonraki cami tasarımlarını önemli ölçüde etkilemiştir. Hz. Ebubekir ve Hz. Ömer dönemlerinde fethedilen bölgelerde inşa edilen camiler genellikle ordugâh camisi niteliği taşımaktadır (Anonim 2024m).

Cami mimarisini geniş ölçüde etkileyen yapı, Şam'daki Emeviye Camii olarak kabul edilmektedir. Halife Velid I döneminde inşa edilen bu cami, Medine Camii ve kilise planlarının etkisiyle şekillenmiş, iç mekânda üç sahnın paralel ve bir orta sahnın ile dikey olarak kesişmiş, ortasında yer alan kubbe dört kemerle desteklenmiştir. Yapının taş ve tuğladan yapılan bölümleri ahşap çatı ile örtülmüş, avlu ise iki katlı revaklarla çevrilmiştir (Anonim 2024n).

750 yılında Abbasîler, Horasan Türklerinin desteğiyle Emevi saltanatına son vererek başkenti Bağdat'a taşımış ve İran etkisi mimaride belirginleşmiştir. Abbasîler döneminde dini mimariyi temsil eden başlıca camiler Semerra Ulu Camii ve Ebu Dulef Camii olmuştur. Semerra Ulu Camii, kibleye dikey 25 sahnın olarak inşa edilmiş, avlusu birkaç sıra revakla çevrilmiş ve spiral minaresi (Malviye) ile dikkat çekmiştir. Bu dönemde tuğla mimari ve sivri kemer kullanımı ile alçı süslemeler ön plana çıkmıştır (Anonim 2024o).

Fatımîler, Mısır'da 10. yüzyılda Kahire'yi kurmuş ve burada El-Ezher Camii'ni inşa etmişlerdir. Caminin planı Emeviye Camii'ni andırmakla birlikte, tromplu kubbelerde İran etkileri görülmektedir (Anonim 2024p).

Gazneliler, Karahanlılar ve Selçuklular döneminde Anadolu ve çevresinde çok sayıda cami, türbe ve kervansaray inşa edilmiştir (Arslan 2017). Büyük Selçuklular, 1040 yılında Horasan ve İran bölgelerini fethederek Anadolu'ya giriş yapmış ve önemli cami eserleri bırakmıştır. Bu dönemin önemli örneklerinden biri, İsfahan Mescid-i Cuması'dır (Arslan 2021). Anadolu Selçukluları döneminde cami mimarisi, sütunlu ve düz damlı yapılarla başlamış, zamanla tonoz ve kubbe ile üstü açık avlular eklenmiştir. Kayseri Ulu Cami ve Sahip Ata Camii önemli örnekler arasındadır (Arslan 2017; Arslan 2021).

Osmanlı döneminde cami mimarisi, XVI. yüzyıldan itibaren merkezi mekan anlayışına dayalı olarak gelişmiş; ferah ve çok kubbeli yapılardan, tek kubbeli yapı ve çeşitli düzenlemelere doğru evrilmiştir. Bursa, Edirne ve İstanbul'daki camiler, bu gelişimin somut örneklerini sunmaktadır (Yıldırım 1999).

3.5. Minare Kavramı ve Tarihçesi

Minare, İslam mimarisinde cami veya mescitlerin vazgeçilmez unsurlarından biridir. Sesin daha geniş alana yayılmasını sağlayan bu yapı genellikle ezan için kullanılan yüksek kule biçimindeki yapıdır (Anonim 2024r). Arapça “menara” kelimesi “ışık yeri” veya “fener” anlamına gelir; minareler ilk dönemlerde hem dini hem de yön bulma işlevi gören simgesel yapılar olarak tasarlanmıştır (Anonim 2024s).

İslam öncesi Arap mimarisinde kule benzeri yapılar bulunmasına rağmen, minare İslam mimarisine özgü bir yapı olarak ortaya çıkmıştır (Anonim 2024t). Hz. Peygamber döneminde minareler doğrudan inşa edilmemiş, ezan başlangıçta yüksek bir çardak veya basit bir yükselti üzerinden okunmaktaydı (Anonim 2024u). Minarenin sistematik olarak camilere eklenmesi ise Emevi Halifesi I. Velid döneminde Şam Emevi Camii ile başlamıştır. Bu dönemde minareler, genellikle kare veya dikdörtgen tabanlı ve sade süslemelere sahip kuleler olarak tasarlanmıştır (Anonim 2024v).

İslamiyette ilk minare Mısır'ın başkenti Yeni Kahire'deki Amr Bin Al-As camisinde inşa edilmiştir. Cami Şekil 3.2'te gösterilmiştir. Minare ana parçaya vali Meslem bin Muhalled tarafından 678 yılında eklenmiştir.



Şekil 3.2. Amr Bin Al-As camii (Anonim 2025a)

Zamanla minareler hem mimari çeşitlilik kazanmış hem de fonksiyonel açıdan geliştirilmiştir. Abbâsîler döneminde tuğla ve taş kullanımı yaygınlaşmış, bazı minareler spiral biçimde inşa edilmiştir (Anonim 2025b). Selçuklu ve Osmanlı dönemlerinde ise minareler, caminin genel mimari kompozisyonunu tamamlayan yüksek ve ince silüetli yapılar hâline gelmiş; taş, tuğla ve bazen ahşap malzemelerle inşa edilmiştir (Anonim 2025b). Osmanlı minarelerinde genellikle tek veya çift şerefe bulunurken, bazı büyük camilerde üç veya dört şerefe de görülmüştür. Bu camilere bir örnek Selimiye Camiidir.

Her biri üçer şerefeli dört minaresi olan Selimiye Camii minaresi, İslâm aleminin en uzun minareleridir. Kûlah ve alemi dahil edildiğinde 85 metre olan minareler yaklaşık olarak 4 metre çapındadır. Camii Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Selimiye Camii (Anonim 2025c)

Diğer bir minare örneği Kutub Minar, Delhi Kutup minaresi 73 metrelik yüksekliği ile 14. yüzyılda Tac Mahal'in inşa edilmesine kadar Hindistan'ın, en yüksek yapısı olarak kalmıştır. Taban çapı 14 metre ve en üst kısmın çapı 2 metre genişliğindedir. Minare Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Kutub Minar Camii (Anonim 2025d)

Irak, Samerra Camii'nin Spiral Minaresi, dünyadaki en büyük minaredir. Tamamen tuğla ve kerpiçten inşa edilmiştir. 50 metre yüksekliğe ve 156 metre ene sahiptir. Minare Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Samerra Camii spiral minaresi (Anonim 2025e)

Şeyh Mutahhar Camii (Diyarbakır) Anadolu'nun tek dört ayaklı minaresidir. 24 metre yüksekliğindedir. Minare Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Şeyh Mutahhar Camii minaresi (Anonim 2025f)

Veledi Yaniç (Bursa), Caminin karşısına inşa edilen çeşmenin üzerinde bulunmaktadır. 5 basamakla çıkılan kule biçimindeki minarenin 4 yüzü açıktır. Minare Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Veli Yanıç Camii minaresi

Minareler yalnızca ezan için değil, aynı zamanda cami ve şehrin silüetinde simgesel bir unsur olarak da işlev görmüştür (Anonim 2025g). Günümüzde ise minareler, tarihi dokuyu korumak ve estetik değer katmak amacıyla restorasyon projelerinde titizlikle ele alınmaktadır (Anonim 2025h).

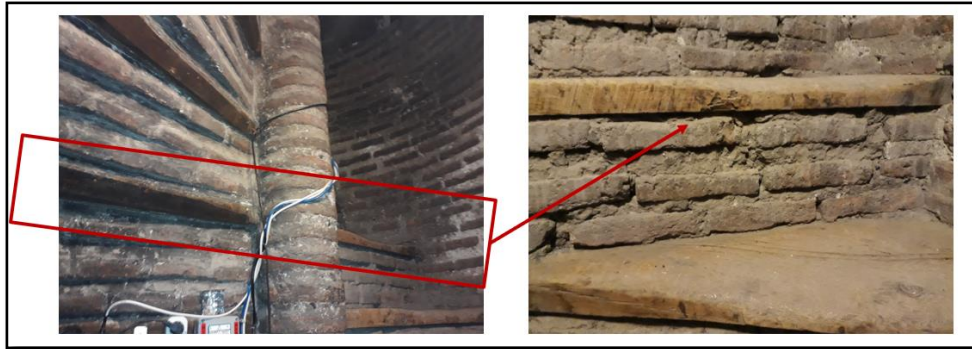
Minareler mimari olarak 7 bölümden oluşmaktadır. Minareleri oluşturan her taş taşıyıcı özellik göstermektedir. Minare ana bölümleri Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Minare ana bölümleri

- **Taban (Kaide):** Minarenin yere oturduğu bölüm. Genellikle sağlam taş veya betonla inşa edilir; yapıyı dengeler.
- **Gövde (Şaft / Silindir Bölümü):** Minarenin dik ve uzun gövdesi. Çoğu zaman silindirik, kare veya çokgen planlıdır.
- **Şerefe (Balkon):** Ezanın okunabileceği çıkıntılı bölüm. Genellikle bir veya birkaç kat olarak yapılır ve kemer veya parmaklıklarla çevrilidir.
- **Petek / Kûlah (Sivri Uç / Kaplama Bölümü):** Minarenin en üst kısmı. Çoğu zaman konik veya piramit şeklindedir; estetik ve simgesel işlev taşır.
- **Merdiven / İç Yolu:** Gövde içinde şerefeye ulaşan merdiven veya rampalar. Ziyaretçi ve müezzin ulaşımı için kullanılır.
- **Süslemeler:** Gövde ve şerefe çevresinde taş işçiliği, tuğla örgü, çini veya alçı süslemeler bulunabilir.

Minarelerin döner merdivenleri, basamaklar üst üste binecek şekilde yerleştirilmesiyle teşkil edilen merdivenlerde her basamak, merdivenin orta dikmesinin içinden geçen ahşap ile bütün olacak şekilde inşa edilmektedir. Örnek bir basamak Şekil 3.9'da gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Örnek minare basamağı – Erzurum Ulu Camii

Aynı hizadaki taşların oluşturduğu taş dizisine “kur” denilmektedir. Bir kur basamak ve çevresindeki duvarlardan oluşmaktadır. Ayrıca taşlar arasında ince bir tabaka halinde harçla da elemanların birbirine yapışması sağlanır (Acar 2009).

Ahşap minareler, seren direği gövde ile beraber basamakları ve kûlahı taşımaktadır. Tek şerefeli olarak inşa edilmektedir. Minareye ait ayrı bir kaide

bulunmamaktadır. Gövde ve petek kısmı genellikle aynı kalınlıkta olup yine ahşap külâh ve alem ile sonlanmaktadır. Şerefe altlarındaki çıkmalar çoğu zaman taş minarelerdeki gibi değil düz olarak yapılmaktadır. Ahşap elemanın özelliğinden dolayı salınım ve hasara taş minarelere oranla daha yatkındırlar (Ökten 2013).

3.6. Narinlik

Literatürde, betonarme çerçeveler için yapılan çalışmalar, narinlik oranı arttıkça yapıların daha esnek davranış gösterdiğini ve göçme riskinin yükseldiğini ortaya koymaktadır. Narinlik oranı, bir elemanın serbest uzunluğunun kesit boyutuna oranı şeklinde hesaplanır ve bu oran arttıkça elemanın burkulma veya yanal ötelenme eğilimi de artmaktadır (Uçar ve Merter 2012).

Yapısal analizlerde, yapıların deprem davranışı dinamik modeller aracılığıyla incelenir. Bu modellerde narinlik oranı ve yanal deplasman ilişkisi, mod sayısı ve doğal frekanslar dikkate alınarak değerlendirilir. Yüksek narinlik oranına sahip yapılar, deprem yönetmeliklerine göre özel güçlendirme önlemleri gerektirebilir (Uçar ve Merter 2012).

Narinlik, yapı elemanlarının boyutları ve yüksekliği arasındaki orantıyı ifade eder. Yüksek narinlik, yapının doğal frekanslarını ve burkulma riskini etkilerken; düşük narinlik daha rijit bir davranış sağlar. Serbest yükseklik, yapının yatay yükler altında serbestçe hareket edebilen kısmını ifade eder ve burkulmaya yatkın ana gövde yüksekliği hesaplamalarda esas alınır (Uçar ve Merter 2012).

3.6.1. Narinlik oranının etkileri

Narinlik oranı arttıkça minarelerin doğal titreşim frekansı azalmakta ve yatay deplasman ile dönme talepleri büyümektedir. Bu durum, deprem etkileri altında minarelerin hasar ve göçme olasılığını artırır. Narinliğin düşük olduğu durumlarda ise sistem daha rijit davranır; yanal ötelenmeler sınırlıdır ve burkulma riski görece düşüktür. Bu eğilim, minareler ve diğer ince-kule tipi yığma yapılar üzerine yapılan çalışmalarla uyumludur (Doğangün et al. 2008; Amato et al. 2014; Saygılı 2020).

Literatürde minareler için evrensel bir “düşük-orta-yüksek” narinlik eşik seti bulunmamaktadır. Bu çalışmada sayısal eşik verilmemiş olup, yalnızca narinliğin artışıyla sistem davranışındaki değişim nitel olarak değerlendirilmiştir. Betonarme kolonlar için TS 500’de verilen narinlik sınırları, minarelerde doğrudan uygulanabilir eşikler değildir (Uçar ve Merter 2012).

Literatürde, betonarme çerçeveler için yapılan çalışmalar, narinlik oranı arttıkça yapıların daha esnek davranış gösterdiğini ve göçme riskinin yükseldiğini ortaya koymaktadır (Uçar ve Merter 2012). Benzer şekilde, minarelerde de düşük narinlik oranları rijit bir davranış sağlarken, yüksek narinlik oranları deprem etkileri altında göçme riskini artırmaktadır (Uçar ve Merter 2012).

Yapısal analizlerde, minarelerin deprem davranışı dinamik modeller aracılığıyla incelenir. Bu modellerde narinlik oranı ve yanal deplasman ilişkisi, mod sayısı ve doğal frekanslar dikkate alınarak değerlendirilir. Yüksek narinlik oranına sahip minareler, deprem yönetmeliklerine göre özel güçlendirme önlemleri gerektirebilir (Uçar ve Merter, 2012). Yığma veya taş minarelerde narinlik oranı genellikle 12–18 arasında değişmektedir; bu da çok ince ve yüksek minarelerin yanal yükler karşısında hassas olduğunu göstermektedir (Saygılı 2020).

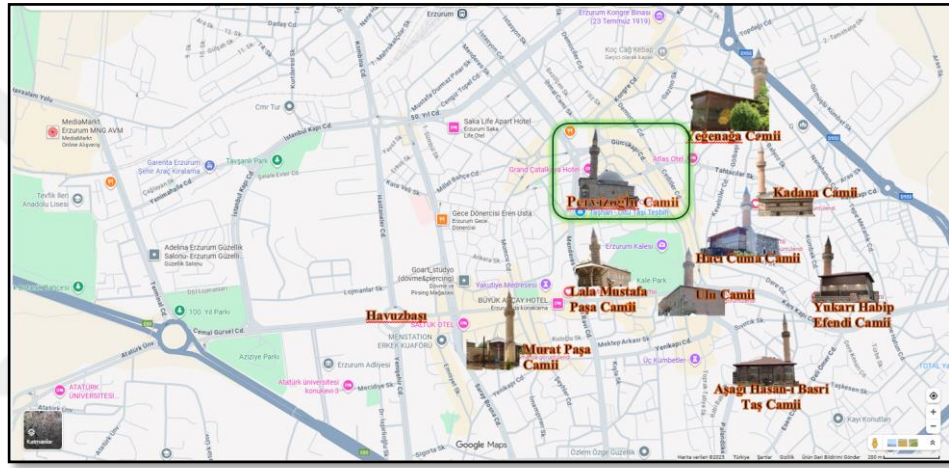
Minarelerin narinliği, yapının yüksekliğinin taban çapına oranıyla belirlenir. Bu oran, minarenin yatay yükler altındaki davranışını ve deprem gibi yatay kuvvetlere karşı dayanıklılığını doğrudan etkiler.

Serbest yükseklik, minarenin yatay yükler altında serbestçe hareket edebilen kısmını ifade eder. Genellikle şerefe altı yüksekliği esas alınır; çünkü şerefe ve üst kısmın geometrisi ile kesit değişimleri minarenin toplam rijitliğini ve burkulma davranışını etkiler. Standart narinlik hesaplamasında genellikle tabandan şerefeye kadar olan kısım dikkate alınır; yani minarenin tüm yüksekliği değil, burkulmaya yatkın ve rijitliği esas olan ana gövde yüksekliği kullanılır.

3.7. Çalışmanın Gerçekleştirildiği Camiler

3.7.1. Pervizoğlu Camii

Pervizoğlu Camii, Erzurum'un Ayaz Paşa Mahallesi'nde, İç Kale'nin kuzeyinde ve Taşhan Ambarlarının doğusunda konumlanmaktadır. Yapının yapım tarihiyle ilgili herhangi bir kitabe mevcut değildir; fakat, 1715 vakfiye belgesinde, Pervizoğlu Hacı Mehmet'in bu cami ve çevresindeki medreseyi yaptırdığı belirtilmektedir (Konyalı 1960). Caminin konumu Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Pervizoğlu Camii konumu (Anonim 2025i)

Cami, kare plan düzenine sahip olup tek bir kubbe ile örtülmüştür. Kuzey cephesinde, kubbe ile kaplanmış üç bölümlü bir son cemaat yeri bulunmaktadır. Son cemaat yerine sonradan büyük bir saçak eklenmiştir. Bu bölüm, dört sütun üzerine inşa edilmiştir ve sütun başlıkları ile kaideleri Osmanlı klasik üslubuna uygun olarak yapılmış olup, sütunlar demir bileziklerle güçlendirilmiştir. Caminin iç mekânı, kuzeyde iki, doğu ve batı cephelerinde altlı üstlü ikişer, güney cephesinde ise mihrabın her iki yanında birer pencere ile aydınlatılmaktadır. Alt sıradaki pencereler dikdörtgen, doğu ve batıdaki üst pencereler ise yuvarlak kemerli mazgallar şeklindedir. Caminin kuzey cephesindeki giriş kapısı, süslemesiz sade bir tasarımla yapılmıştır. Caminin minberi de basit bir şekilde inşa edilmiş olup, orijinal haliyle korunmaktadır. Caminin görünüşü Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Pervizoğlu Camii genel görünümü

Camide 1 adet minare bulunmaktadır. Cami kuzeybatı köşesinde bulunan duvarlarının üzerine ek olarak inşa edilen minaresi, silindirik bir yapıya sahip olup bazalt taşlardan yapılmıştır. Minarenin şerefe altı bölümü, iri ölçekte düzenlenmiş sarkıtlı mukarnaslarla süslenmiştir. Petek kısmı ise malzeme farklılığı göstermekte olup, yarısı kesme taş, diğer yarısı ise tuğla kullanılarak inşa edilmiştir. Cami yapımında ana duvarlarda bazalt kesme taşlar, petek kısmında ise tuğlalar kullanılmıştır. Cami minare görünüşü Şekil 3.12’te verilmiştir.



Şekil 3.12. Pervizoğlu Camii minare görünümü

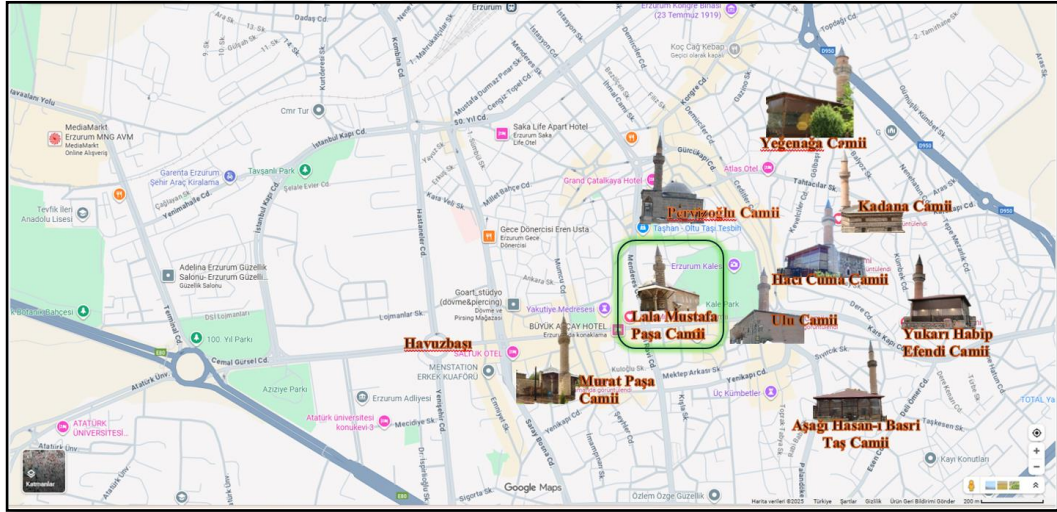
Cami minaresinin yerden yüksekliği üstüne konumladığı duvar yüksekliği dahil yaklaşık 19 m yüksekliğindedir. Minare gövdesinin dış yarıçapı 0,50 m’dir. Şerefe çapı

1,70 m olup yüksekliği ise 1,80 m’dir. Cami minaresi 4,60 m kuzeybatı duvarı üzerinde yükselip yaklaşık 80x80 cm’lik kare kaide üstüne oturmaktadır.

Camiyle ilgili 1859 depreminde hasar aldığı Özdoğan (2024) çalışmasında ifade edilmiştir. Cami minaresiyle ilgili bilinen bir restorasyon işlemine ulaşılamamıştır.

3.7.2. Lala Mustafa Paşa Camii

Erzurum’da Osmanlı döneminin ilk camisi olan Lala Mustafa Paşa Camii,1562 yılında Lala Mustafa Paşa (Kıbrıs Fatih) tarafından Mimar Sinan’ın ekibine yaptırılmıştır. Camii Rus işgalinde zarar görmüş ve bazı duvarlarında kurşun izlerine sahiptir ancak daha sonra restore edilmiştir. Yapı tarzı Sultan Ahmet Camii’nin daha küçük versiyonuna oldukça benzetilmektedir. Cami şehrin merkezinde yer almaktadır. Caminin konumu Şekil 3.13’da verilmiştir.



Şekil 3.13. Lala Mustafa Paşa Camii konumu (Anonim 2025j)

Dört büyük istalakitli (sarkıtlarla yapılmış mukarnas) ayak üzerinde taşınan kubbe sivri kemerler ile desteklenmiştir. Yanlarda ise 4 küçük kubbe ile binanın örtüsü tamamlanmıştır. Diğer camiler gibi bu caminin de mihrabı mukarnaslıdır. Caminin görünüşü Şekil 3.14’te verilmiştir.



Şekil 3.14. Lala Mustafa Paşa Camii

Camiinin kuzeybatı köşesinde 1 adet minare bulunmaktadır. Binanın azametine uygun olarak diğer cami minarelerine oranla kısa ama kalın bir minare yapısı seçen Mimar Sinan, kare bir kaide üzerine oturtulan minareyi yuvarlak ve tek şerefeli olarak tasarlamıştır. Taş basamaklarla çıkılan bu minare kırmızı taş bileziklerle süslenmiş, beyaz kesme taş diğer bir deyişle ak taştan yapılmıştır. Minarenin şerefe altı bölümü, iri sarkıtlı mukarnaslarla süslenmiştir. Cami minare görünüşü Şekil 3.15’te verilmiştir.



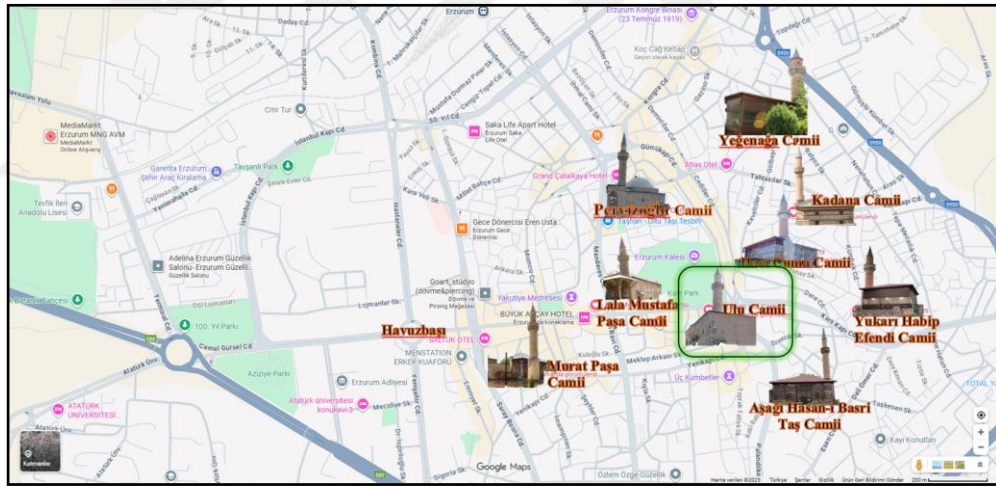
Şekil 3.15. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi

Cami minaresinin yerden yüksekliği yaklaşık 23 m’dir. Cami minaresi dış çapı 2,72 m’dir. Şerefe çapı 3,67 m’dir. Şerefe yüksekliği 14,29 m olup şerefeye 48 basamaklı merdivenle çıkılmaktadır.

Caminin tarih boyunca farklı zamanlarda hasar aldığı ve tamirattan geçtiği arşivlerde yer almaktadır (Gündoğdu 1993; Tozlu 2000; Özdoğan 2024). Cami en son restorasyonunu 2014 yılında geçirmiştir. Minaresinde ise yapısal boyutta detaylı bir restorasyon geçirmemiş olup, yüzey derzi ve taş temizlikleri yapılmıştır.

3.7.3. Erzurum Ulu Camii

Ulu Camii, il merkezinde, Cumhuriyet Caddesi üzerinde Çifte Minareli Sokak'ta konumlanmıştır. Caminin tam olarak ne zaman inşa edildiği bilinmemekle birlikte, Saltukoğulları dönemine ait olduğu kabul edilmektedir. Günümüze ulaşmamış bir kitabe bazı kaynaklarda yer almakta ve bu kitabelere göre cami, Hicri 575 / Miladi 1179 yılında Saltuklu hükümdarı Nasruddin Muhammed tarafından yaptırılmıştır. (Konyalı , 1960) Caminin konumu Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Ulu Camii konumu (Anonim 2025k)

Evliya Çelebi'nin Seyahatname adlı eserinde Ulu Camii hakkında önemli bilgilere yer verilmektedir. Çelebi'nin ifadesine göre, Erzurum kentinde toplam 77 cami ve mescit bulunmakta olup, bunlar arasında en eski yapı Ulu Camii'dir. Caminin, Tebriz Kapısı'nın iç tarafında, toprak damlı ve bir minareye sahip olduğu belirtilmektedir. Yapının Akkoyunlu hükümdarları döneminde var olduğu aktarılmakta; uzunluk ve genişliğinin yaklaşık iki yüz adım olduğu ifade edilmektedir. Ayrıca caminin minber ve mihrabının klasik mimari anlayışa uygun şekilde yapıldığı vurgulanmaktadır. İç mekânda simetrik bir düzen içinde yerleştirilmiş yaklaşık iki yüz ahşap sütunun bulunduğu, bu sütunların

üzerinin çam ağacından yapılmış kirişlerle örtüldüğü ve yapının kubbesinin ise kâgir olmadığı bilgileri verilmektedir. Bu tanımlamalar, dönemin mimari özellikleri ve yapı malzemeleri hakkında önemli ipuçları sunmaktadır. (T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Bölge Müdürlüğü 2014).

Kitabelerden elde edilen bilgilere göre, Atabek Camii olarak belirtilen Ulu Camii'nin ilk kapsamlı onarımı Hicrî 1039 / Miladi 1629-1630 yıllarında Nasuh Paşazade tarafından gerçekleştirilmiştir. Cami, ikinci kez Hicrî 1242 / Miladi 1826-1827 tarihlerinde, dönemin cami nazırı olan Ali Efendi tarafından onarılmıştır. (Konyalı 1960.) Caminin genel görünümü Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Ulu Camii genel görünümü

Ulu Cami'nin ilk inşa evresinde ahşap direkli bir yapıya sahip olduğu, ancak zamanla kâgir ayaklı ve tonoz örtülü bugünkü mimari yapısına dönüştüğü bilinmektedir. Ancak bu dönüşümün kesin olarak hangi tarihte gerçekleştiğini saptamak mümkün değildir. Bu konuda Konyalı (1960)'nın aktardığı bilgiler dikkat çekicidir. Konyalı (1960) caminin 17. yüzyıldan sonra mevcut mimari görünümüne kavuştuğunu belirtir. Ayrıca bu kapsamlı değişimin, bir dönem Erzurum'da bulunduğu ifade edilen ve “Kara Kilise” olarak bilinen büyük bir kilisenin kalıntılarından faydalanılarak gerçekleştirildiğini öne sürmektedir. Konyalı, söz konusu kiliseye ait bazı yapı taşlarının caminin inşasında kullanıldığını ifade eder; ancak bu taşların caminin hangi bölümlerinde yer aldığına dair kesin bir tespit bulunmamaktadır.

Özetle, Erzurum Ulu Camii Miladi 1179 yılında inşa edilmiştir. İlk yapının kâgiri mi yoksa ahşap taşıyıcılığı mı olduğu kesin olarak bilinmemekle birlikte, henüz belirlenemeyen bir sebeple yıkılmıştır. 17. yüzyıl öncesinde gerçekleştirilen bir onarım sürecinde cami, ahşap direkli olarak yeniden inşa edilmiş; ancak mihrap önü kubbesi orijinal formunda yapılamamış, bunun yerine mevcut haliyle ahşap malzemeden kırlangıç örtü sistemiyle yeniden düzenlenmiştir. 18. yüzyılda meydana gelen bir yangın neticesinde bu ahşap direkli yapı tamamen yanmış; bunun üzerine günümüzdeki kâgiri ayaklı cami inşa edilmiştir. Bu süreçte mihrap önü kubbesinin ahşap örtüsü de yenilenmiştir.

Sanat tarihi raporlarında belirtildiği üzere, yapı çeşitli tarihlerde onarımlar geçirmiştir. 1957 yılından önce, doğu tarafında bulunan duvarın bir kısmı ve güneydoğu tarafında bulunan köşesindeki yuvarlak kule görünümlü paye yenilenerek, yapının bugünkü görünümüne kavuşmuştur. 1957-1958 yılları ile 1961-1962 yıllarında farklı onarımlar gerçekleştirilmiştir. 1965 senesinde, Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilen onarımda, yapının ahşap kubbesi dışında orta sahin ve sonrasında doğu ile batı yönlerindeki tüm sahinler çökme yaşamıştır. Çökmeden kısa bir süre önce, Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından yapının rölövesi alınmıştır.

1965 yılında yaşanan büyük yıkımın ardından, zemin temizlenip döşeme altına inildiğinde, payelerin altında daha önce bilinen temellerin kuzey-güney doğrultusunda boydan boya uzandığı ortaya çıkmıştır. 1967 yılında kapsamlı bir yeniden inşa süreci başlatılmış ve bu çalışmalar 1971 yılında tamamlanarak cami, tekrar ibadete açılmıştır. Cami, 54x41 metre boyutlarında olup, mihraba dikey olarak yerleştirilmiş 7 sahindan oluşmaktadır. İç kullanım alanı ise 2000 m²'dir. Günümüzde cami aktif bir şekilde kullanılmakta olup, 6000 kişilik kapasiteye sahiptir.

Cami duvarları yığma sistem ile yapılmıştır. Caminin duvarları renkli kesme taşlardan oluşmakta olup, iç duvarlar sıvasız olarak yapılmıştır. Cami, beş kapıya sahiptir; bu kapıların 2 tanesi doğu tarafında, diğer 3 tanesi kuzeyde yer almaktadır. Yapının üç kubbesi bulunmaktadır. İlk inşa edildiği dönemde, mihrap duvarının ön kısmı, sivri kemerler üzerine oturan büyük bir pandantifli kubbe ile örtülmüştür. Bu kubbe, kırlangıç örtü olarak bilinen ahşap malzeme ile yapılmıştır. Yapımındaki planlama özelliği

sayesinde, kırlangıç örtü, cami içerisindeki nemi toplayarak dışarıya boşaltır. Ayrıca, kırlangıç örtüden doğu, batı ve güney yönlerine açılan üç küçük pencere bulunmaktadır. Ahşap kubbenin kuzey duvarına bakan bölümünde kitabe bulunmaktadır.

Güney-kuzeye yönünde, kırlangıç kubbe ve mukarnas taş oyma kubbe arasında bulunan 2. kubbe, tavanındaki gökyüzüne açılan pencere ile caminin aydınlatma unsurlarındandır. Kible yönünden bakıldığında, ilk sıradaki Kırlangıç kubbeden sonra, ikinci sıradaki orta kubbenin ardından üçüncü kubbe olarak yer alan ve caminin tam orta noktasına denk gelen mukarnas işlemeli kubbe, üzerinde bulunan büyük penceresiyle gökyüzüne açılmaktadır. Bu kubbe, hem caminin doğal aydınlanmasını hem de mevcut sesin on kat daha yüksek tonda yayılmasını sağlamaktadır. Aritmetik hesaplamalarla, sert kaya zemin üzerine işlenmiş kendine özgü şekillerle inşa edilen bu mukarnas örtü şekli, yalnızca Erzurum Ulu Camii’de bulunan ve başka hiçbir yapıda örneği bulunmayan bir özelliğe sahiptir. Kırlangıç kubbeyi taşıyan 4 sütuna "fil ayağı" denmektedir. Cami içindeki ahşap kubbeyi taşıyan fil ayakları, caminin güney bölümünde yer almaktadır.

Kible yönünde bulunan 2 fil ayağının en üst tarafında bulunan yuvarlak pencerelere "fil gözü" adı verilmektedir. Fil gözü pencerelerinin sol tarafındaki, güneydoğu, sağ tarafındaki ise güneybatı yönündedir, her ikisi de gökyüzüne doğru bir bakış açısı sunmaktadır. Pencereler, cami içerisinde aydınlatma sağlamaktadır. Soldaki pencereden gelen güneş ışığının, cami zemininde oluşturduğu elips şekli, daralarak tam daire şeklini aldığı an, öğle namazı için ezan vaktinin geldiği anlaşılar. Sağdaki pencereden gelen ışıkla ise ikinci namazı için ezan vaktinin geldiği aynı şekilde anlaşılar. Kible duvarında üç mihrap bulunmaktadır; ortadaki mihrap ibadetlerde kullanılan mihraptır.

Sağ ve soldaki mihrap, cami içerisinde akustik mimari ses sisteminin mevcut olmasına rağmen, ses iletilmesinin yeterli olmayacağı düşüncesiyle, imamın namazdaki tekbirlerinin tekrarıyla cemaate duyurulması amacıyla "Mihrabiye" olarak adlandırılan, kayyım olarak bilinen müezzin yardımcılarının bulunduğu özel alanlar oluşturulmuştur.

Caminin üst örtüsünü taşıyan kırk payeden 16 tanesi duvarlara bitişik olup, bu payeler yapıdaki taşıyıcı elemanlardır. Caminin ilk kısmı, beşik tonoz ile örtülüdür. İkinci

kısımın ön tarafındaki iki alan ise, on sütunun taşıdığı tonoz örtüsüyle kaplanmıştır. 3. ve 4. bölümlerin üst örtüsünü ise, payeler taşımaktadır.

Camii mihrabının bulunduğu bölüm, 5 payenin taşıdığı bir kubbeyle örtülüdür. Camii içerisinde toplamda 47 adet sütun bulunmaktadır. Caminin orta kısmında, batı-doğu yönünde bakıldığında; sağ tarafta 4, sol tarafta ise 4 sütun yer almakta olup, her iki taraftaki sütunlar arasında 15 cm'lik çıkıntılar gözlemlenmektedir. Bu düzenleme, sütunların imar edilme biçimi, cami içinde imamın sesinin "U" şeklinde yayılmasını sağlamayı amaçlamaktadır.

Cami içerisindeki sütun dizilişindeki ileri ve geri çıkıntılar, depreme karşı dayanıklılık göz önünde bulundurularak tasarlanmış ve cami binasının yükü bu sütunlara dağıtılmıştır.

16. yüzyıla kadar caminin tarihiyle ilgili aydınlatıcı herhangi bir belge bulunmamaktadır. Ancak, Kanuni Sultan Süleyman'ın 1548 İran Seferi sonrasında, Doğu Anadolu'da, Erzurum'un da dâhil olduğu bazı önemli merkezlerin Şah Tahmasb tarafından tahrip edildiği bilinmektedir. Araştırmacılar, Erzurum Ulu Camii'nin de bu süreçte tahrip olduğunu öne sürmektedir. Bu olayın ardından, caminin önemli bir onarım geçirdiği ve minarenin de bu dönemde inşa edildiği bazı kaynaklarda ifade edilmektedir. (T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Bölge Müdürlüğü 2014.)

Minare, caminin kuzeybatı köşesinde konumlanmıştır. Ulu Camii'nin minaresi, alt bölgesi moloz taş, üst bölgesi ise kesme taşla yapılmış yüksek kare planlı bir kaide üzerine oturan silindirik bir gövdeye sahiptir. Kaide kısmı, kesme taş ve moloz taş malzemelerin bir arada kullanılmasıyla inşa edilmiştir. Minarenin üst kısmındaki kapıya, kaide ile caminin kuzey duvarı arasında konumlandırılmış bir merdivenle ulaşılmaktadır. Minarenin pabucu, çatı seviyesinde başlamaktadır. Bu bölümün doğusunda yer alan kapıdan, çatıya çıkılabilmektedir. Cami minaresi Şekil 3.18'de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Ulu Camii minaresi

Gövde, şerefe altına kadar tuğladan örülmüş olup, bu seviyeden itibaren yeniden kesme taş kullanılarak devam ettirilmiştir. Şerefe korkulukları da kesme taştan yapılmıştır. Minarenin şerefesiyle şerefenin altında bulunan 2 sıra mukarnas, taş malzemeye inşa edilmiştir. Şerefenin üst kısmında yer alan tuğla petek bölümünün üzeri, bakır levhalarla kaplanmış külah ile taçlandırılmıştır.

Caminin minaresinin de bulunduğu batı tarafında Papuccuzade Hazretlerinin türbesi ve kesme taş ile yapılmış camiye bitişik olan bir çeşme bulunmaktadır.

Cami minaresinin yerden yüksekliği yaklaşık 30 m'dir. Cami minaresi camiye bitişik bir vaziyette 10 m'lik bir kaide üzerinde konumlanmıştır. Cami minaresinin dış çapı 1,80 m'dir. Cami şerefesi yerden 20 m yükseklikte konumlanmış olup yüksekliği 80 cm'dir. Şerefe çapı 4,13 m'dir. Şerefeye 45 basamaklı merdivenle çıkılmaktadır.

Cami, tarihsel süreç içerisinde birçok kez onarım görmüştür. Bazı kaynaklarda yapının beş defa onarıldığı belirtilmektedir (Konyalı, 1960). 1858–1859 yıllarında gerçekleştirilen onarıma ait kitabe, günümüzde caminin doğu kapısında yer almaktadır. 1965 yılında gerçekleştirilen kapsamlı restorasyon kapsamında, yapının orijinal olarak korunmuş bölümleri arasında minaresi de vardır. Minarenin bu restorasyona kadar petek kısmının bulunmadığı ve petek kısmının sonradan minareye eklendiği bilinmektedir.

Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de bu durum görsellerle ifade edilmiştir (T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Bölge Müdürlüğü 2014.)



Şekil 3.19. Ulu Camii 1940’lı yıllar (Anonim 2025l)



Şekil 3.20. Ulu Camii restorasyonu (Anonim 2025m)

3.7.4. Murat Paşa Camii

1572 senesinde Osmanlı sadrazamı Kuyucu Murat Paşa tarafından yaptırılan cami, Osmanlı dönemine ait geleneksel tek kubbeli cami tipolojisinin bir örneğini teşkil etmektedir. Caminin konumu Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Muratpaşa Camii konumu (Anonim 2025n)

Camii, genel olarak dikdörtgen bir plan sergilemekte olup, ön kısmında 6 silindirik taş sütun tarafından desteklenen ve 5 bölümlü beşik tonozla örtülü bir son cemaat yeri bulunmaktadır. Bu alan dıştan kurşunla kaplanmış olup, estetik ve işlevsel bir bütünlük sunmaktadır. Sütunlar, kesme taşlardan inşa edilen sivri kemerlerle birbirine bağlanarak yapının yapısal stabilitesini güçlendirmektedir. Caminin genel görünümü Şekil 3.22’de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Muratpaşa Camii genel görünümü

Ana ibadet mekânı kare planlı olup, her 4 yönü kesme taşlardan yapılan, iki kademeli kemerli tromplarla geçilen büyük bir kubbe ile örtülüdür. Tromplar, 4 cephede yine aynı türde kemerlerle birbirine bağlanmış olup, bu da mekânın görsel ve yapısal bütünlüğünü sağlamaktadır. Kubbenin eteğinde, derin nişler içerisinde yer alan dört küçük pencere, iç mekâna doğal ışık girmesini sağlayan bir düzenleme olarak dikkat çekmektedir. Ana mekânın iç düzeni, dairesel bir form ile başlamakta ve dışarıdan sekizgen bir yapıyı sergilemektedir. Güney cephesinin ortasında, düzgün kesme taşlardan inşa edilmiş mihrap, yapının dini işlevini simgeleyen bir unsur olarak yerini almaktadır. 12 ahşap direk üzerine inşa edilen mahfile çıkış; girişin solundaki merdiven aracılığıyla sağlanmaktadır.

Minare, diğer camilerin aksine cami yapısından bağımsız olarak, kuzey cephesinin doğu köşesine birkaç metre uzaklıkta konumlandırılmış olup, tümüyle düzgün kesme taş malzeme ile inşa edilmiştir. Plan düzleminde, minarenin kaidesi dıştan sekizgen, içten dairesel olarak tasarlanmış; bu geometrik kurgu, yapının yükselmesiyle birlikte dışta dairesel bir forma evrilmiş ve bu biçimsel devamlılık şerefe kotuna kadar sürdürülmüştür. Murat Paşa Camii minaresi Şekil 3,23'te gösterilmiştir.



Şekil 3.23. Murat Paşa Camii Minaresi

Şerefe altında, taş malzeme kademeli olarak dışa doğru taşırılarak, şerefe çıkıntısı mimari bir düzen içerisinde oluşturulmuştur. Minare gövdesinde, zemin seviyesinden şerefeye kadar düzgün örgü sistemi uygulanmış; şerefe hizasından itibaren ise bu örgü sistemi, estetik ve zanaatkârlık açısından farklılık arz eden mozaik örgü sistemine

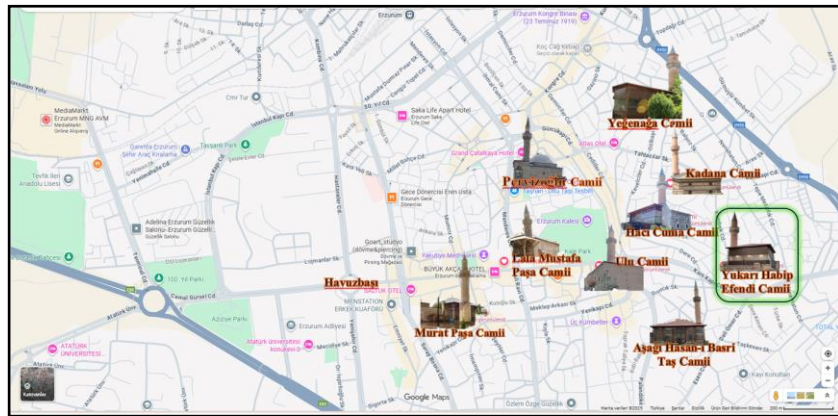
dönüştürülmüştür. Külah kısmına yaklaşırken örgü sistemi yeniden düz örgüye evrilmiş; bu düz örgü, külahın başlangıcına kadar yaklaşık bir metre boyunca devam ettirilmiştir. Minare, konik formlu külah ile sonlandırılmış ve külahın ucuna, geleneksel Osmanlı minare mimarisinin tamamlayıcı unsurlarından biri olan alem yerleştirilmiştir. Minare yapıldığı şekli ile korunmuş, herhangi bir değişikliğe uğramamıştır.

Cami minaresinin yerden yüksekliği yaklaşık 30 m’dir. Cami minaresi camiden bağımsız şekilde ayırık bir vaziyettedir. Caminin 6,89 m kotuna kadar olan dış çapı 3,89 m, bu kottan yukarı dış çapı ise 3,03 m’dir. Şerefe çapı 3,04 m’dir. Şerefenin yerden yüksekliği 17,28 m olup şerefenin yüksekliği 2,56 m’dir. Şerefeye 72 basamaklı merdivenle çıkılmaktadır.

Cami en son 2007 yılında restorasyon geçirmiştir (Çelemoğlu 2015; Özdoğan 2024) Bu restorasyonda minare kısmı ise yapısal boyutta detaylı bir restorasyon geçirmemiş olup şerefedeki kesme taşlar değiştirilmiştir.

3.7.5. Yukarı Habip Efendi Camii

Erzurum kent merkezinde, adını taşıyan Yukarı Habip Efendi Mahallesi’nde, Mektep Sokak ile Camii Sokak’ın kesiştiği köşede konumlanan cami, dönemin taşra cami mimarisi bağlamında değerlendirildiğinde, dikdörtgen plan üzerine kurgulanmış ve ahşap dikmelerle taşınan düz dam örtüsüyle tipolojik olarak klasik bir örnek teşkil etmektedir. Caminin konumu Şekil 3.24’te gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Yukarı Habip Efendi Camii konumu (Anonim 2025o)

Yapıya, birçok geleneksel camide de gözlemlendiği üzere, sonradan kapatıldığı anlaşılan son cemaat mahallinden giriş yapılmaktadır. Cephe üzerinde yer alan dış giriş kapısı, harim mekânının kuzey duvarındaki iç giriş kapısıyla simetrik bir düzen içerisinde konumlandırılmıştır. Caminin genel görünümü Şekil 3.25’te gösterilmiştir.



Şekil 3.25. Yukarı Habip Efendi Camii genel görünümü

Son cemaat mahalline açılan girişin her iki yanında, yaklaşık 30 santimetre yüksekliğinde ahşap malzeme ile oluşturulmuş seki düzenlemeleri yer almakta olup, bu yüzeylerin üstü halı ile kaplanmıştır. Mekânın sağ kenarında bulunan sekinin kenarından, kadınlar mahfiline çıkışı sağlayan ahşap basamaklı bir merdiven konumlandırılmıştır. Son cemaat yeri, genel yapısal düzeni itibarıyla alçak tavanlı olup, tavan ve duvar yüzeyleri çitalı kontrplak malzeme ile kaplanmış; bu kaplamaların üzeri beyaz yağlı boya ile boyanarak tekdüze bir görünüm elde edilmiştir. Bu yapı, özellikle taşra camilerinde yaygın olarak kullanılan ekonomik ve yerel malzeme tercihleri, basit plan düzeni ve fonksiyonel iç mekân organizasyonu ile 20. yüzyıl geleneksel cami mimarisine dair önemli veriler sunmaktadır.

Komşu yapıların bitişik nizamda konumlanması nedeniyle, yapının çatısı tek kırma formunda tasarlanmış olup, çatı eğimi doğu ve batı cephelerine yönlendirilmiştir. Çatı örtüsünde çitalı sac kaplama tercih edilmiştir. Kalkan duvar, yağmur suyunun her iki yöne doğru tahliyesini sağlamak amacıyla olağanın üzerinde bir yükseklikte inşa edilmiştir.

2009 yılında tamiratlar geçiren cami, 2016 yılında geniş çaplı restorasyon geçirmiştir. Caminin eski sac minaresi, merdiven ve iç silindir kısmı hariç sökülerek

gövde tuğladan şerefe ve kaide ise kesme taştan aslını yansıtacak şekilde yeniden yapılmıştır. Caminin minaresi galvanizli bir sac şeklindeki minare taş kaideli, tuğla gövdeli, taş şerefeli şeklinde yeniden inşa edilmiştir (Anonim 2025p; Özdoğan 2024). Eski minaresi ve yeni minare Şekil 3.26 ve 3.27’de gösterilmiştir.



Şekil 3.26. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi eski hali (Anonim 2025p)

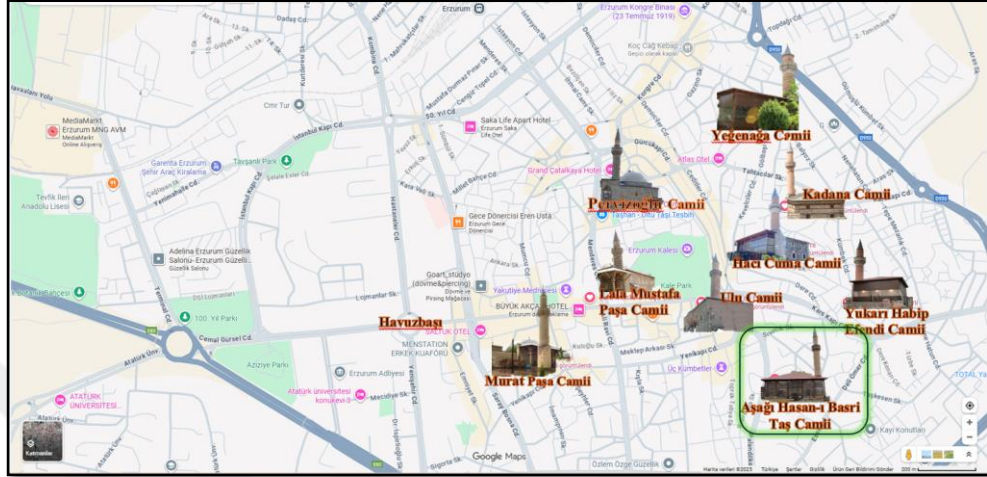


Şekil 3.27. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi yeni hali

Cami minaresinin yerden yüksekliği yaklaşık 20 m’dir. Cami minaresi caminin kuzeybatı köşesine bitişik bir vaziyette 4,85 m lik bir kare kaide üzerinde konumlanmıştır. Cami dış gövde silindiri ve peteği tuğladan, kaide, şerefe ve iç silindiri taştan imal edilmiştir. Dış çapı 2,20 m’dir. Cami şerefesi yerden 10,48 m yükseklikte konumlanmış olup yüksekliği 2.04 m’dir. Şerefe çapı 3,44 m’dir. Şerefeye 36 basamaklı merdivenle çıkılmaktadır. Şerefe ile alem arası 7,10 m’dir. Kûlah ise kurşun sac ile kaplıdır.

3.7.6. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii

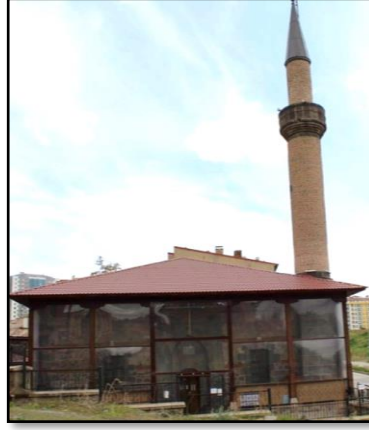
Karakullukçu Camii, halk arasında Taş Camii olarak da bilinmekte olup, Erzurum'un Aşağı Hasan-i Basri Mahallesi'nde yer almaktadır. Caminin konumu Şekil 3.28'de gösterilmiştir.



Şekil 3.28. Taş Camii konumu (Anonim 2025r)

Hicri 1323 (Miladi 1905) yılına tarihlenen yenileme süreciyle önemli bir dönüşüm geçiren bu yapı, Erzurum'daki düz dam örtülü cami örneklerinden biri olarak mimari açıdan dikkat çekicidir. Yapının giriş kapısında yer alan iki satırlık nesih yazıttan, caminin tarihî süreci ve inşa süreciyle ilgili şu bilgiler edinilmektedir:

"Bu caminin yerinde Karakullukçu Ömer Ağa'nın yaptırdığı bir cami vardı. H. 1323 (M. 1905) yılında harap olan bu cami, Erzurumlu Hacı Cumazade Hacı Mehmet Efendi tarafından temelinden yıktırılarak bu mabed yaptırılmıştır." Caminin genel görünümü Şekil 3.29'da gösterilmiştir.



Şekil 3.29. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii genel görünümü

Bu yazıt, caminin önceki yapısının Karakullukçu Ömer Ağa tarafından inşa edildiğini ve zamanla harabe hale gelerek yeniden inşa edilmesinin, Erzurumlu Hacı Cumazade Hacı Mehmet Efendi'nin desteğiyle gerçekleştirildiğini ortaya koymaktadır. Yenileme çalışmaları, hem yapının fiziksel bütünlüğünü koruma amacı güdülerek hem de dönemin mimari anlayışını yansıtarak gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla, bu cami, yerel mimarlık tarihinde önemli bir yer tutmakta ve o dönemin restorasyon anlayışına dair değerli veriler sunmaktadır.

Yapı, dört ahşap direğe oturan düz tavanı ile sade ve işlevsel bir mekân anlayışına sahiptir. Güney duvarında mukarnas kavsaralı, kaval silmeli ve taş malzemedен inşa edilmiş mihrap; yüzeyi geometrik panolarla bezenmiş ahşap minberle birlikte, iç mekânın estetik ve işlevsel değerini öne çıkarmaktadır. Bu öğeler, dönemin mimari ve süsleme anlayışını yansıtarak yapıya bütüncül bir kimlik kazandırmaktadır.

Duvar örgüsünde köşelerde düzgün kesme taş, ara bölümlerde ise kaba yonu taş ve ahşap hatıl kullanılmıştır. Bu karma teknik, hem deprem etkilerine karşı esneklik sağlamış hem de geleneksel inşa yöntemlerinin tipik bir örneğini sunmuştur. Batı cephede yer alan pencereler, göbekli kilit taşlarıyla vurgulanmış kemerleri ve taş söveleriyle dikkat çekmektedir. Ancak cephede kullanılan çimento sıva ve düşük işçilikli bir kapı, özgün estetik bütünlüğü olumsuz etkilemiştir. Buna karşın cephe, malzeme çeşitliliği ve işçilik özellikleriyle tarihî dokunun izlenmesine imkân vermektedir.

Kuzey cephesi, son cemaat yeri nedeniyle kısmen özgünlüğünü yitirse de giriş kapısındaki basık sivri kemerli taş açıklık ve çevresindeki taş işçiliğiyle tarihî karakterini korumaktadır. Batı ucunda bulunan taş minare kaidesi, yapı ile bütünlük oluştururken malzeme uyumu sayesinde estetik katkı sağlamaktadır. Erzurum yöresinde yaygın form ve malzeme özelliklerine sahip olan minare, bu yapıya özgü örneğiyle döneminin mimari üslubunu günümüze taşımış; yapının kimlik kazanmasında ve tarihî sürekliliğinin korunmasında belirleyici bir unsur olmuştur.

Yapı, kuzey cephesinde 6 ahşap direk üzerine oturan ahşap tavanlı son cemaat mahalli ile dikkat çekmektedir. Kuzeybatı köşesinde yer alan minare, taş kaide üzerinde yükselen silindirik tuğla gövdesi, taş şerefesi, tuğla petek kısmı ve külahı ile özgün bir form sergilemektedir. Giriş kapısının batısındaki köşeye yerleştirilen minare kaidesi, son cemaat mahalline doğru yaklaşık 73 cm'lik bir girinti oluşturmaktadır. Bu alanda pencere seviyesine kadar yükselen sabit bir ayakkabı dolabı yapı ile bütünleşik şekilde uzanmaktadır. Kaidede kullanılan kaba yontu taşlar yüzey işlemi yapılmadan bırakılmıştır. Pencere söveleri sonradan boyanmış olsa da taş dokusu ve işçiliği izlenimini korumaktadır. Bu durum, bazı bölümlerde özgün malzemenin muhafaza edildiğini, diğerlerinde ise müdahaleler nedeniyle bütünlüğün bozulduğunu göstermektedir. Cami minaresi Şekil 3.30'da gösterilmiştir.



Şekil 3.30. Taş Camii minaresi

Batı cephesi özgün mimari özelliklerini büyük ölçüde korumaktadır. Derzli moloz taşla inşa edilen duvar, yatay yerleştirilen ahşap hatıllarla desteklenmiştir. Batı duvarının kuzey köşesinde, son cemaat yeri ile minare kütüğü arasında kalan bölümde 2,19 m yüksekliğe kadar tuğla duvar üzerine yonu taş kaplama yapılmış, üst kısım ise ahşap camekânla kapatılmıştır. Minare kaidesi yonu taş malzeme ile inşa edilmiş ve gövde başlangıcına kadar aynı taş dokusu sürdürülmüştür.

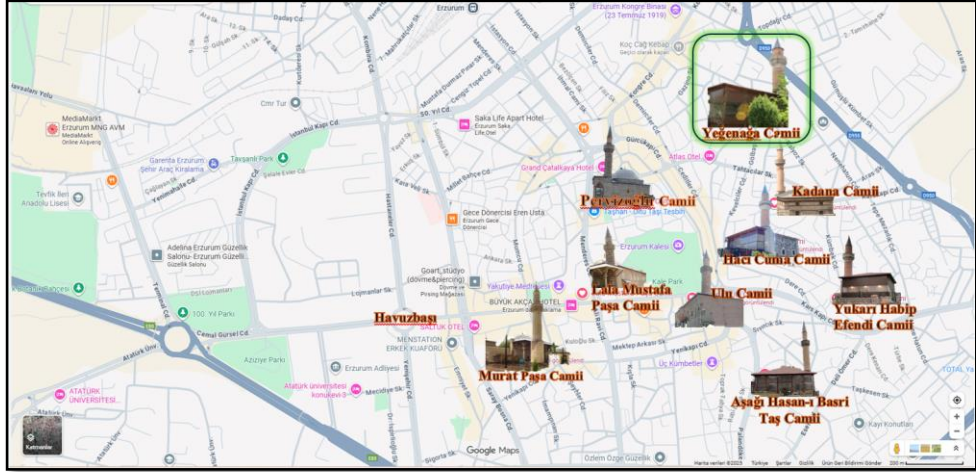
Kuzeybatı cephesindeki minare, Erzurum'daki benzer dönem camileriyle tipolojik açıdan örtüşmektedir. Gövde ve petek kısmı ateş tuğlasından, şerefe kesme taştan, külâh ve sereni ahşaptan yapılmıştır. Külâh kurşunla kaplanmış, basamak ve çekirdek kısmı kesme taşla oluşturulmuştur. Kaide, kuzey duvarına bağlanmaktadır. Minare taş yüzeylerinde doğal etkilere bağlı bozulmalar, şerefe altındaki tuğlalarda ise bölgesel erime ve aşınmalar görülmektedir.

Cami minaresinin yerden yüksekliği 23,84 m'dir. Cami minaresi caminin kuzeybatı köşesine bitişik bir vaziyette 6,15 m'lik bir kare kaide üzerinde konumlanmıştır. Minare dış silindiri ve peteği tuğladan; kaide, şerefe ve iç silindiri taştan imal edilmiştir. Dış çapı 2,18 m'dir. Minare şerefesi yerden 14,92 m yükseklikte konumlanmış olup yüksekliği 1,81 m' dir. Şerefe çapı 2,80 m'dir. Şerefeye 36 basamaklı merdivenle çıkılmaktadır. Şerefe ile alem arası 7,34 m'dir. Külâh kurşun sacı kaplıdır.

2016 yılında restorasyonu tamamlanan camide minare kısmında kapsamlı bir restorasyon planlanamış olup dış silindirdeki tuğlalarda var olan çatlaklar onarılmıştır (Özdoğan 2024).

3.7.7. Yeğenağa Camii

Cami kubbesiz ve çatı örtülü oluşuyla dikkat çeken, dikdörtgen planlı küçük cami tipolojisinin karakteristik bir örneğini teşkil etmektedir. Caminin konumu Şekil 3.31'de gösterilmiştir.



Şekil 3.31. Yeğenağa Camii konumu (Anonim 2025s)

Tümüyle dikdörtgen plana sahip olan caminin kuzey cephesinde, 6 adet köşegen yerleştirilmiş ahşap sütun üzerine oturan, 5 bölümlü ve basık kemerli bir son cemaat mahalli yer almaktadır. Bu alan, özgün açıklıklarını kaybetmiş; sütun aralıkları tuğla malzeme ile doldurularak kapatılmıştır. Caminin genel görünümü Şekil 3.32’de gösterilmiştir.



Şekil 3.32. Yeğenağa Camii genel görünümü

Sonradan yapılan müdahaleler sonucunda, bu mahallin iç kısmına ara kat (asma kat) eklenmiş, böylece iç hacimde işlevsel bir bölünme gerçekleştirilmiştir. Yapının iç mekân düzenlemesi kapsamında oluşturulan asma kat, duvarda açılan bir kapı aracılığıyla kadınlar mahfiline bağlanmış ve bu alan kadın cemaatin kullanımı için düzenlenmiştir. Bu müdahale, yapının işlevselliğini artırmıştır.

Yapının tavan döşemesi tamamen ahşap malzeme ile yapılmış olup, taşıyıcı sistem olarak 4 adet, her biri 30x30 cm kesit ölçüsünde ahşap kolon kullanılmaktadır. Bu kolonlar, tavan yükünü aşağıya ileten önemli strüktürel elemanlar olarak iç mekân düzeninde belirgin şekilde yer almaktadır. Ana ibadet mekânı kare planlı olup, 3 cephesi moloz taş duvarla inşa edilmiştir. İç yüzeyler, düzgün sıva ile kaplanarak yağlı boya ile boyanmış, böylece yüzey korunumu sağlanırken aynı zamanda mekânın iç estetiği de sade bir biçimde tanımlanmıştır. Bunlar ışığında, yapının hem tarihsel süreklilik içinde geçirdiği işlevsel dönüşümleri hem de özgün malzeme ve tekniklerinin kısmen korunmuş olduğu gözlemlenmektedir.

Yapıya bitişik olarak konumlandırılmış olan minareye, kadınlar mahfiline açılan pencere boşluğu içerisine yerleştirilen bir merdiven aracılığıyla ulaşım sağlanmaktadır. Minare, zemin seviyesinden yaklaşık 450 cm yüksekliğe kadar düzgün kesme taş malzeme ile inşa edilmiş; bu kotun üzerinde ise yapı, tuğla kullanılarak örülmüştür. Minarenin planı, zeminde dıştan kare, içten daire formunda başlamış, yükseldikçe iç formunu korurken dış formu kareden daireye dönüşerek bu plan karakteriyle şerefeye kadar devam etmiştir. Şerefenin alt kısmında, tuğlaların yerini alan taşlar kademe kademe dışa taşırılarak bir korniş görünümünde şerefe çıkıntısı oluşturulmuştur. Minare, külah ile tamamlanmakta, külahın tepe noktasına yerleştirilen alem ile sonlandırılarak geleneksel Osmanlı minare mimarisi doğrultusunda bütüncül bir estetik anlayış sergilemektedir. Minarenin görünümü Şekil 3.33'te gösterilmiştir.



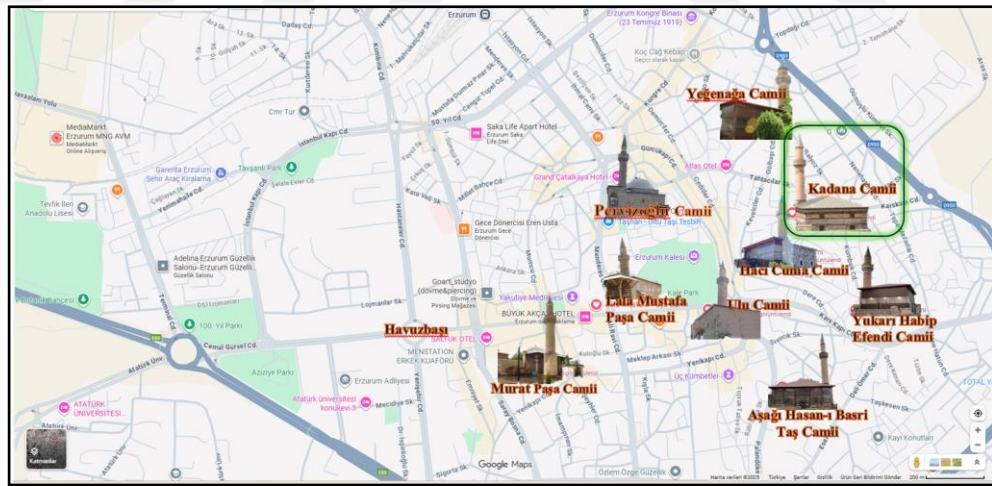
Şekil 3.33. Yeğenağa Camii minaresi

Cami minaresinin yerden yüksekliği 21,60 m'dir. Cami minaresi caminin kuzeybatı köşesine bitişik bir vaziyette 7,57 m lik bir kare kaide üzerinde konumlanmıştır. Yaklaşık 1 m lik dolgu bir zemin üzerindedir. Minare dış silindiri ve peteği tuğladan; kaide, şerefe ve iç silindiri taştan imal edilmiştir.. Dış silindir çapı 1,96 m'dir. Cami şerefesi yerden 14,11 m yükseklikte konumlanmış olup yüksekliği 2,07 m' dir. Şerefe çapı 2,60 m'dir. Şerefeye 42 basamaklı merdivenle çıkılmaktadır. Şerefe ile alem arası 5,60 m'dir. Kûlah kurşun saca kaplıdır.

Cami en son 2006 yılında restore edilmiştir. Minarede kapsamlı bir restorasyon olmamıştır (Özdoğan 2024).

3.7.8. Kadana Camii

İl Merkezinde bulunan Kadana Mahallesi'nde, Mahallebaşı semtinde, Muradiye Sokak ile Öğretmen Sokak arasında konumlanmaktadır. Caminin konumu Şekil 3.34'te gösterilmiştir.



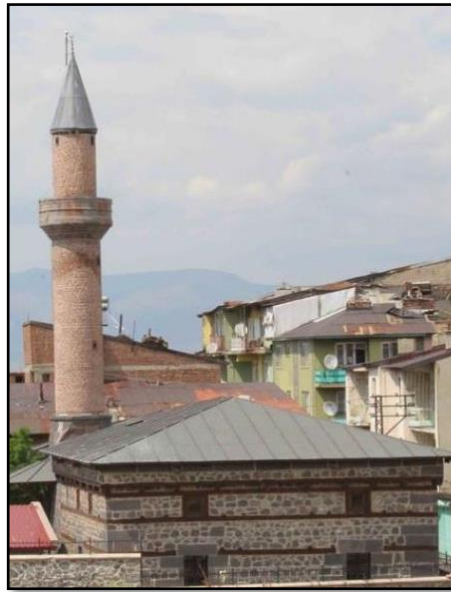
Şekil 3.34. Kadana Camii konumu (Anonim 2025t)

Günümüzde cami olarak kullanılan yapının, ilk olarak bir mescit olarak inşa edildiği ve daha sonra camiye dönüştürüldüğü anlaşılmaktadır. Bu dönüşüm süreci, caminin harim kapısı üzerinde yer alan 4 satırlık inşa kitabesi aracılığıyla belgelenmiştir. Arap harfleriyle yazılmış ve günümüzde üzeri boyanmış olan bu kitabe, yapının tarihî

süreci açısından önemli bir belge niteliğindedir. Kitabenin Türkçeye çevrilmiş metni şu şekildedir:(Konyalı , 1960)

**Mescid iken eyledi cami bu zıba ma’bedi
Eylesin mağfur Kadana zade-i Rab-ül enam
Mu’ceme harfiyle Abdi söyledi tarihini
Aldı İsmail efendiden bu camide nizam
1165 Hicri (1751 Miladi)**

Cami 1751 yılında mescitten camiye dönüştürülmüş ve bu dönüşüm Kadana Zade İsmail Efendi tarafından gerçekleştirilmiştir. Söz konusu yapının daha öncesinde de bir mescit olarak varlık gösterdiği, yalnızca kitabe ile değil, aynı zamanda farklı belgelerle de desteklenmektedir. Nitekim Pasinler’in Gerdek Kaya Köyü’nden Siyavuşzade Ahmed’in oğlu Veysi Efendi, Hicri 1156 (1743 Miladi) yılında bu mescide bir şamdan bağışında bulunmuştur. Bu bağış, yapının 1743 yılında ibadete açık bir mescit olduğunu kanıtlamaktadır. Yaklaşık 8 yıl sonra, 1751 yılında, Kadana Zade İsmail Efendi tarafından kapsamlı bir yenileme yapılarak yapı camiye dönüştürülmüştür. Caminin genel görünümü Şekil 3.35’te gösterilmiştir.



Şekil 3.35. Kadana Camii genel görünümü (Rota Erzurum)

Bu belgeler ışığında Kadana Camii, 18. yüzyıl Osmanlı taşra mimarisine ait bir dönüşüm yapısı olarak değerlendirilebilir ve dönemindeki hayırseverlik anlayışının mimariye yansıyan somut bir örneği olarak önem taşımaktadır. Cami günümüzde hala ibadete açıktır. Harim bölümü, mihrap yönünde uzanan dikdörtgen planlı, ahşap tavanlı ve çatı örtülü bir yapıya sahiptir. Kadana Camii'nin kuzey cephesinde, son cemaat yeri bulunmaktadır. Caminin kuzeybatı köşesinde ise özgünlüğünü büyük ölçüde koruyan, silindirik gövdeli, tuğladan inşa edilmiş minare yer almaktadır.

Minare, klasik Osmanlı taşra cami mimarisi özelliklerini yansıtmaktadır. Taş kaide üzerine oturtulmuş olan minare, silindirik tuğla gövde, taş malzemedan yapılmış tek şerefeli bir minaredir. Şerefe altı, klasik üsluba uygun olarak beş sıra taş silme ile hareketlendirilmiştir. Minarenin petek kısmı, gövdeyle aynı biçimde silindirik ve tuğla malzeme ile inşa edilmiş olup, son kısmı konik formda kurşun kaplı külâh ile sonlanmaktadır. Gövde boyunca dikey olarak yerleştirilmiş mazgal tipinde taş ışıklık açıklıkları, minare iç mekânına doğal aydınlık sağlamaktadır. Minarenin formu, yapım tekniği ve kullanılan malzemeler açısından döneminin mimari karakteristiğini yansıtmaktadır ve özgün niteliğini korumaktadır. Kadana Camii minaresinin klasik tuğla gövdesinde zamanla oluşmuş olan derz boşalmaları, gözlemlenmektedir. Minarenin görünümü Şekil 3.36'da gösterilmiştir.



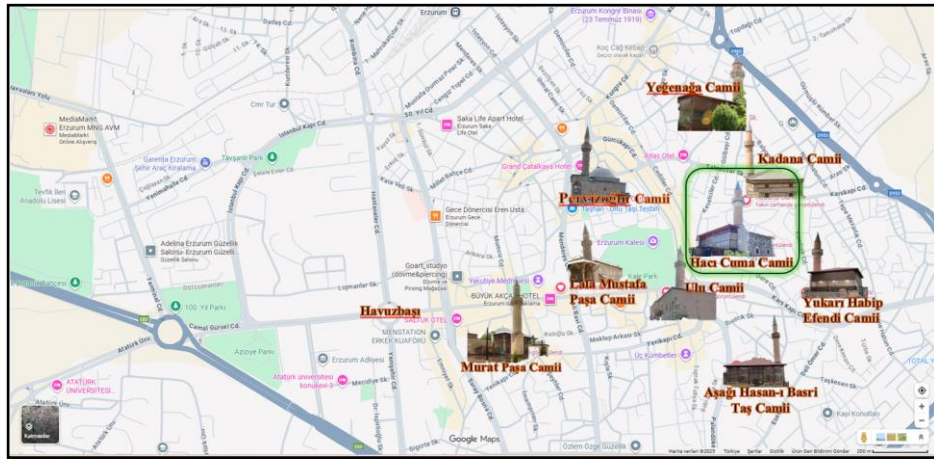
Şekil 3.36. Kadana Camii minaresi

Cami minaresinin yerden yüksekliği 23,16 m'dir. Cami minaresi caminin kuzeybatı köşesine bitişik bir vaziyette 6,15 m lik bir kare kaide üzerinde konumlanmıştır. Minare dış silindiri ve peteği tuğladan; kaide, şerefe ve iç silindiri taştan imal edilmiştir. Dış silindir çapı 2,00 m'dir. Cami şerefesi yerden 13,92 m yükseklikte konumlanmış olup yüksekliği 1,85 m' dir. Şerefe çapı 3,00 m'dir. Şerefeye 53 basamaklı merdivenle çıkılmaktadır. Şerefe ile alem arası 7,50 m'dir. Külah kurşun saca kaplıdır.

En son 2016 yılında restorasyon geçiren camide, minare kısmında dış silindir kısmındaki hasarlı tuğlalar ve şerefedeki hasarlı taşlar yenilenmiştir. Derzlerin yerini kireçli derzler alırken külah kısmı ise değiştirilip levha ile kaplanmıştır (Özsağlıcak 2019; Özdoğan 2024).

3.7.8. Hacı Cuma Camii

Hacı Cuma Camii, 1630 (Miladi) senesinde Karayazıcızade Abdullah İbn-i Seyyid Ahmed tarafından inşa ettirilmiştir. Yapı, erken Osmanlı dönemi taşra camilerinde sıklıkla rastlanan mimari özellikleri barındırmaktadır. Caminin konumu Şekil 3.37'de gösterilmiştir.



Şekil 3.37. Hacı Cuma Camii Konumu (Anonim 2025u)

Caminin inşasında ahşap direk destekli sistem kullanılmış olup, duvar örgüsünde yerel nitelikli adi taş tercih edilmiştir. Harım kısmını örten düz ahşap tavan, herhangi bir müdahaleye uğramadan özgünlüğünü günümüze kadar koruyabilmiştir. Giriş cephesinde,

cemaati karşılayan ahşap kanatlı ve kemerli kapı, dönemin ahşap işçiliğini yansıtan dikkat çekici bir detaydır. Girişin tam karşısında yer alan mihrap, düzgün kesme taşla inşa edilmiş olup, üst kısmı mukarnas kavsaralı olarak tasarlanmıştır. Mukarnas kavsaralar, mihrap nişini taçlandıran üç boyutlu, geometrik bezemelerdir ve bu yönüyle mihrap, hem estetik hem de sembolik değer taşımaktadır. Caminin genel görünümü Şekil 3.38’de gösterilmiştir.



Şekil 3.38. Hacı Cuma Camii genel görünümü

Minare caminin kuzeybatı yönünde bulunmaktadır. Kesme taş kaide üzerine oturtulan minare gövdesi tuğladan oluşmaktadır. Tek şerefeli olup konik külâh ve alem ile sonlanmaktadır. Cami minaresinin yerden yüksekliği 24,66 m’dir. Cami minaresi caminin kuzeybatı köşesine bitişik bir vaziyette 6,80 m’lik bir kare kaide üzerinde konumlanmıştır. Cami dış silindiri ve peteği tuğladan, kaide, şerefe ve iç silindiri taştan imal edilmiştir. Dış gövde çapı 2,20 m’dir. Cami şerefesi yerden 14,46 m yükseklikte konumlanmış olup yüksekliği 2,04 m’ dir. Şerefe çapı 3,40 m’dir. Şerefeye 38 basamaklı merdivenle çıkılmaktadır. Şerefe ile alem arası 8,09 m’dir. Külâh kurşun saca kaplıdır.

Cami, belirli aralıklarla onarımlardan geçirilmiş olup, 2017 restorasyonu ile bugünkü hâline ulaşmıştır. 2009’daki tamiratlarda ise eski sac minare ile merdiven ve iç silindir kısmı korunmuş; gövde tuğladan, şerefe ve kaide ise kesme taştan, özgün yapıyı yansıtabilecek şekilde yeniden inşa edilmiştir. Caminin minaresi önceden galvanizli sac iken, yeniden inşa edilerek taş kaideli, tuğla gövdeli ve taş şerefeli hâle getirilmiştir.

(Özsağlıcak 2019; Özdoğan 2024). Eski minaresi ve yeni minare Şekil 3.39’da gösterilmiştir.



Şekil 3.39. Hacı Cuma Camii minaresi eski ve yeni hali

3.8. Yapısal Modelleme Kavramı ve Yöntemleri

Bir yapının, gerçek yapısal ve mimari formlarına uygun bir şekilde bilgisayar ortamında belirli kurallar ve disiplinler çerçevesinde oluşturulmasına yapısal modelleme adı verilmektedir. Yapısal modelleme, yapıların davranışlarını incelemek açısından önemlidir. Çünkü yapıların dinamik davranışlarının belirlenmesi, yapının maruz kalabileceği depremlere karşı davranışı veya olası hasarı, yapının hayata geçmeden tasarım kısmındaki belirlenen statik ve dinamik şartların uygunluğu veya emniyeti vb. özelliklerin bir ön fikrini yapısal modelleme bize sunmaktadır.

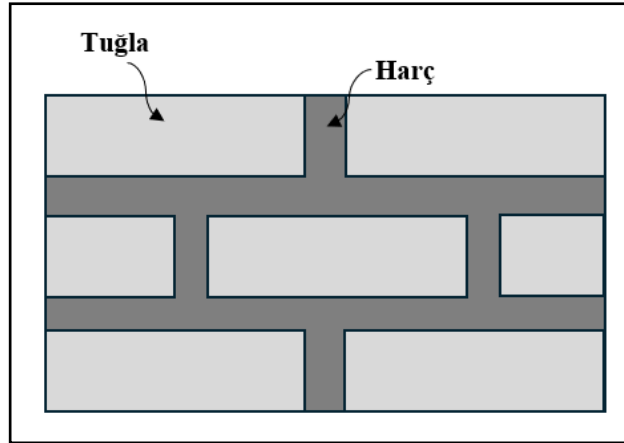
Sadece günümüz yapıları için tarihi yığma yapıların davranışları için de yapısal modelleme önemli bir araçtır. Tarihi yığma yapıların davranışları yıllardır ayakta kalması inşaat mühendisliği açısından merak edilen konulardandır. Yapıların misyonu gereği herhangi bir tahribatlı muayene deneyleri yapılamadığından, bu yapıların davranışları için tahribatsız muayeneler ve yapısal modelleme önemli seçeneklerdendir. Yapıların doğal dinamik davranış parametreleri, yapının olası bir depremdeki hasar durumu veya

geçmişte yaşadığı bir depremde aldığı hasarlar, vb. sorular için yapısal modelleme oldukça faydalıdır.

İnşaat mühendisliği açısından çeşitli yazılımlar sayesinde yapısal modellemeler yapılabilmektedir. Fakat yapısal modelleme yapılırken, yapı elemanlarının modellenmesinde belli başlı tekniklere ve kurallara dikkat edilir. Özellikle yığma yapıların yapısal modelleri gerçekleştirilirken, yapıyı oluşturan taş ve harç malzemelerinin nasıl modelleneceği, hangi kurallara dikkat edileceği önemli bir husustur. Bu durum için literatür incelendiğinde Lourenço (1996)'nın yığma yapıların yapısal modelleri için üç farklı teknik önerdiği görülmüştür.

3.8.1. Mikro Modelleme

Bu modelleme tekniği, yapıdaki taş ve harç malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin ayrı ayrı modelde tanımlanması gerektiğini ilke edinir. Aslında her bir malzeme kendi başına bağımsız bir modeldir. Modelin temsili görüntüsü Şekil 3.40'da gösterilmiştir.



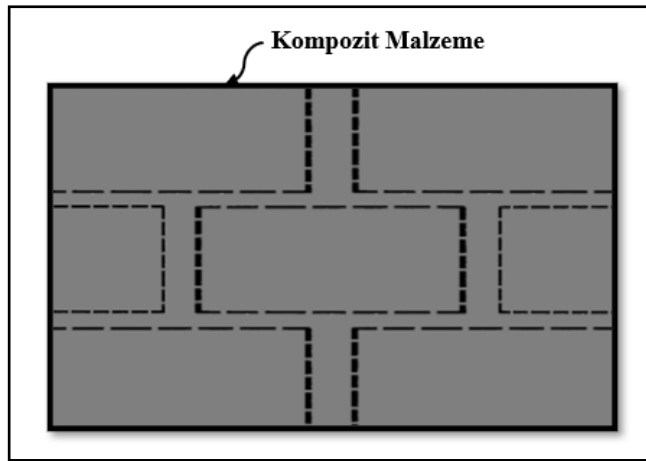
Şekil 3.40. Mikro modelleme tekniği

Bu yöntem, küçük ölçekli malzeme davranışlarını incelemek için uygundur ve daha gerçekçi sonuçlar sağlar. Ancak, üç boyutlu yapıların tamamının modellenmesinde pratik değildir. Yapı içerisindeki belirli bir bölgenin detaylı analizinde mikro modelleme yöntemi daha etkili sonuçlar sunmakta olup, doğruluğu yüksek değerlendirmelere olanak

tanınmaktadır(Özkul 2016). Bu modelleme tekniği, yüksek hesaplama gücü gerektiren bilgisayarlara ihtiyaç duyulması ve genellikle tüm yapı yerine yalnızca yapının belirli bölümlerinin modellenmesi için uygun olması nedeniyle çok tercih edilmemektedir. (Özdoğan 2018).

3.8.2. Makro Modelleme

Makro modelleme yaklaşımında, taş, tuğla ve harç gibi bileşenler ayrı ayrı ele alınmaksızın, yapı elemanı tek ve homojen bir kompozit malzeme olarak kabul edilir. Büyük yapıların modellenmesi için çok uygun bir teknik olan bu yöntemde, duvarların gerilme-şekil değiştirme eğrileri dikkate alınmaktadır (Özdoğan 2018). Makro modellemenin uygulanmasında karşılaşılan temel zorluklardan biri, malzemelere ait yeterli deneysel verilerin bulunmaması ve malzeme özelliklerinin her yönde aynı davranışı sergilememesidir. Bu durum, malzeme tanımlamasında belirsizliklere neden olarak modelin doğruluğunu olumsuz etkileyebilmektedir. Buna rağmen, makro modellemede anizotrop olan malzeme davranışının ve plastisite teorisinin kullanılabilmesi sayesinde, farklı yönlerde değişken pekleşme veya yumuşama davranışları sergileyen yapılarda oldukça başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir (Özkul 2016). Modelin temsili görüntüsü Şekil 3.41’de gösterilmiştir.



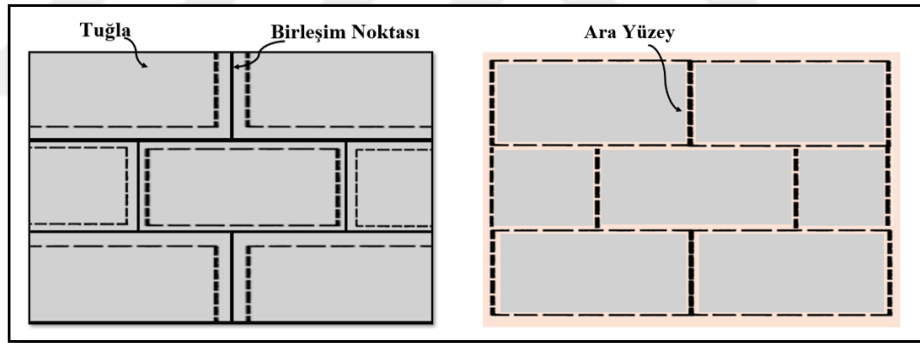
Şekil 3.41. Makro modelleme tekniği

Modelleme tekniğindeki kompozit malzeme tanımlaması malzemelerin doğru bir şekilde tanımlanmasına aykırı olmasına rağmen, yapının anizotropik davranışa sahip

olması ve diğer yöntemlerden ayrı şekilde plastisite varlığı ve daha önceki bu teknikle yapılan yapıların davranışlarının, gerçek yapı davranışına en yakın olması nedeniyle bu modelleme tekniği yığma yapıların modelleme tekniği açısından en uygun yöntemdir (Özdoğan 2018). Çalışmamızdaki yığma minarelerin modellemesinde makro modelleme tekniği kullanılmıştır.

3.8.3. Basitleştirilmiş mikro modelleme

Bu yaklaşımda harç tabakası modellenmeye doğrudan dahil edilmeden; yığma birimlerin boyutları, harç kalınlığının yaklaşık yarısı kadar artırılarak modellenmektedir. Bu yöntemde, harç ve yığma birimler doğrudan modellenmeden, aralarındaki ayırım ara yüzey çizgileriyle tanımlanmaktadır. Duvar içinde oluşabilecek muhtemel çatlakların, yığma birimler ile harç arasındaki ortalama ara yüzey çizgisi boyunca gelişeceği varsayılmaktadır (Özkul 2016). Poisson etkileri ihmal edilmesi sebebiyle oluşan sonuçlar hatalı sonuç verebilmektedir. (Özdoğan 2018). Modelin temsili görüntüsü Şekil 3.42’de gösterilmiştir.



Şekil 3.42. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği

3.8.4. Sonlu eleman modellerinin oluşturulması

Minarelerin yapısal analize esas modelleri makro modelleme tekniği kullanılarak oluşturulmuştur. Modeller SAP2000 (2021) yazılımında katı (solid) elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Modelleme yapılırken 9 adet minarenin röleve çizimleri Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü’nden temin edilmiştir. Minarelerin röleveleri oluşturulurken, rölevedeki boyutlara bağlı kalınmıştır. Fakat minarelerin yerinde yapılan keşifler yardımıyla da minarelerin boyutları tam olarak belirlenerek model çiziminde boyut hataları en aza indirilmiştir. Minare modellenirken minarenin yapısal davranışına

etki etmeyen her türlü detay modellemeye dahil edilmemiştir. Minarelerin kaideden başlayarak iç silindir, dış silindir, merdiven, şerefe balkon, petek ve külah kısımları katı elemanlar (solid) yardımıyla SAP2000 (2021) yazılımında ayrı ayrı modellenip düğüm noktalarının birleştirilmesiyle birbirine bağlanmıştır. Daha sonra minarenin mesnet ve sınır koşulları tanımlanmasıyla minarenin sonlu eleman modelleme işlemleri tamamlanmıştır.

Modelleme tamamlandıktan sonra, minareyi oluşturan dış gövde, merdiven, şerefe ve külah için malzeme özellikleri tanımlanarak minarenin yapısal davranış parametreleri teorik olarak belirlenmiştir. Malzeme özelliklerinin belirlenirken tahribatsız deney yöntemlerinden faydalanılmıştır. Bu yöntemlerin en kolay olanı Beton Schmidt çekici yöntemidir. Yöntem basitçe tanımlanacak olursa çekicinin etki ettiği yüzeye uygulanıp bu etkiye yüzeyin verdiği tepki sertlik değeri olarak adlandırılır. Bu sertlik değeri kullanılarak çekiç üzerindeki kalibrasyon eğrileri yardımıyla malzemenin basınç dayanımı belirlenebilmektedir. Fakat bu yöntem doğal taşların mekanik özelliklerinin tam olarak belirlenebilmesi için doğru ve kullanışlı bir yöntem değildir. Bu yöntemi doğal taşlara uygulamak için Özdoğan (2018) çalışmasında bir öneri sunmuştur. Eğer bir taşın andezit veya bazalt taşı olduğu bilinir ve bu taşlara beton Schmidt çekici uygulanırsa sertlik değerleri yardımıyla;

$$\text{Andezit için; } f_c = 1,01 * (R_h)^{0.97} \quad (3.1)$$

$$\text{Bazalt için ; } f_c = 0,00012 * (R_h)^{3.43} \quad (3.2)$$

Bağıntılarıyla taşların basınç mukavemetlerini tahribatsız ve kolay bir biçimde belirlenebilir. f_c basınç mukavemeti, R_h ise yatay schmidt sertlik değerini ifade etmektedir (Özdoğan 2024).

Erkmen (2022) çalışmasında ise eğer bir taşın Erzurum yöresine ait Sivişli taşı olduğu bilinirse etkitildiğinde basınç mukavemetinin,

$$f_c = 0,4751R_h + 5,5717 \quad (3.3)$$

hesaplanacağı belirtilmiştir.

Taş mekanik özelliklerinin belirlenmesinin ardından ana hedef olan duvar mekanik özelliklerinin belirlenme aşaması gelmektedir. Bunun için taş basınç mukavemetlerinin yanı sıra inşa sırasında kullanılan harç malzemenin basınç mukavemetinin bilinmesi gerekmektedir. Eurocode 6 (1995) bu aşamada bir öneri getirmektedir. Eğer bu iki parametre bilinirse;

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (3.4)$$

$$E=200 f_k \quad (3.5)$$

bağıntıları yardımıyla duvar basınç mukavemeti ve duvar elastisite modülü belirlenmektedir. f_k duvar basınç mukavemeti, f_b taş basınç mukavemeti, f_m harç basınç mukavemetidir. K sabit olup 0,50 değerine eşittir. α ve β ise duvarın örülme şekline bağlı olup eğer duvar düz bir şekilde örülmüş ise sırasıyla 0,70 0,30; moloz bir şekilde örülmüş ise sırasıyla 0,65 ve 0,25 değerlerine eşittir (Özdoğan 2024).

3.9. Yapı Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Her yapı, kendine özgü doğal frekanslara ve mod şekillerine sahip olup, bu özellikler yapının dinamik karakteristikleri olarak tanımlanmaktadır. Söz konusu karakteristikler, yapının kütle dağılımı ve rijitlik düzeyiyle doğrudan ilişkilidir. Bir yapının yapısal davranışının doğru bir şekilde bilinmesi, olası dış yükler altındaki tepkisinin öngörülebilmesi ve bu yolla yapısal güvenliğin sağlanabilmesi açısından oldukça önemlidir.

Günlük yaşamda sıkça karşılaşılan titreşimler, yapı üzerinde zaman içerisinde yapısal hasara neden olabilmektedir. Bu titreşimler, yapı üzerinde dinamik etkiler oluşturarak iç kuvvetler, şekil değiştirmeler ve yer değiştirmeler gibi yapısal tepkilerde çeşitli belirsizliklerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Dinamik yüklerin tam olarak bilinmemesi, bu belirsizliklerin başlıca sebeplerinden biridir. Bunun yanı sıra, yapısal özellikler, malzeme nitelikleri, sınır koşulları, hasar durumu ve inşa sürecine ilişkin eksiklikler de dinamik davranışın gerçekçi biçimde belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Mevcut tüm bu belirsizliklerin azaltılması, her yapıya özgü dinamik parametrelerin

belirlenmesiyle mümkün olabilmektedir. Yıllar içerisinde bu konuya yönelik bilimsel ilgi artış göstermiş; yapıların dinamik özelliklerinin teorik veya deneysel olarak belirlenmesine yönelik çalışmalar, literatürde "modal analiz" başlığı altında ele alınmıştır (Boru 2015)

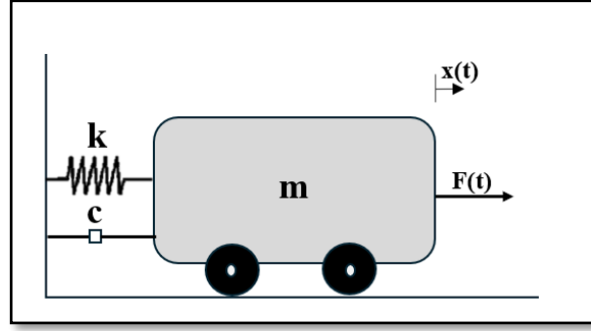
Modal analiz sonuçlarının doğru yorumlanabilmesi için titreşim teorisine hakim olmak gerekmektedir; sistemin serbest veya zorlanmış titreşim davranışı bu bağlamda değerlendirilmektedir (Chopra 2017). Bir sistemin uygulanan titreşim, sınır koşulları ve benzeri etkiler karşısında gösterdiği tepki, genel olarak sistemin titreşimi olarak tanımlanmaktadır. Başlangıçta belirli bir yer değiştirme ya da hız gibi ilk koşullar altında hareketine başlayan ve dış etki olmaksızın salınımını sürdüren sistemlerin davranışı serbest titreşim olarak adlandırılırken, dış kuvvetlerin etkisiyle oluşan titreşimler zorlanmış titreşim olarak ifade edilmektedir (Kocaman 2017).

3.9.1. Teorik modal analiz

Yapı geometrisi, malzeme özellikleri ve sınır şartlarına göre sonlu eleman modelleri oluşturulmaktadır. Gerçekleştirilen modal analizler sonucunda doğal frekanslar ve mod şekilleri elde edilir. Teorik modal analiz iki başlık altında incelenmektedir.

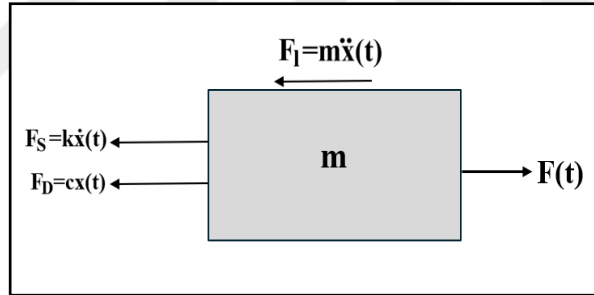
3.9.1.1. Tek serbestlik dereceli sistemler (TSDS)

Gerçek mühendislik yapıları, farklı kütle ve rijitlik bileşenlerine sahip olmaları nedeniyle çok serbestlik dereceli sistemler olarak tanımlanır (Chopra 2017). Ancak bazı durumlarda, özellikle düzenli ve simetrik yapılar, analizlerin kolaylaştırılması amacıyla eşdeğer tek serbestlik dereceli modellere indirgenebilir (Clough and Penzien 2003). Bu tür yaklaşımlar, mühendislik hesaplamalarında pratiklik sağlasa da her yapı için yeterli düzeyde temsil kabiliyetine sahip olmayabilir. Titreşim analizlerinde ise yapıların dinamik davranışları, temsili bir kütle-yay sistemi oluşturularak incelenmekte; bu model yapının ataletsel ve rijitlik özelliklerini temsil eden temel bir çerçeve sunmaktadır (Craig 2006; Kocaman 2017). Tek serbestlik dereceli sistemlerin (TSDS) basitleştirilmiş kütle-yay modeli Şekil 3.43'te verilmektedir.



Şekil 3.43. TSDS Basitleştirilmiş kütle-yay Modeli

Yapıların zamana bağlı dinamik davranışını açıklamak amacıyla kullanılan kütle-yay sistemi, dış kuvvetler altında tek serbestlik dereceli bir model olarak ele alınmaktadır. Bu idealize edilmiş sistem, kütle m , sönüm katsayısı c ve yay rijitliği k ile tanımlanmaktadır (Bathe, 1996). Sisteme uygulanan $F(t)$ dış kuvveti karşısında, kütlede $x(t)$ yer değiştirmesi oluşmaktadır (Chopra 2012). Şekil 3.43'ün serbest cisim diyagramı Şekil 3. 44'te gösterilmektedir. (Kocaman 2017)



Şekil 3.44. Serbest cisim diyagramı

Şekil 3.44'te verilen serbest cisim diyagramı incelendiğinde, yapı üzerinde üç temel iç kuvvetin etkili olduğu görülmektedir:

- atalet kuvveti $F_I = m\ddot{x}(t)$,
- sönüm kuvveti $F_D = c\dot{x}(t)$ ve
- elastik geri çağırma kuvveti $F_S = kx(t)$.

Newton'un ikinci hareket yasası esas alınarak bu kuvvetlerin dış kuvvet ile dengesi kurulabilir ve sistemin hareket denklemi:

$$\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \text{ olur.} \quad (3.6)$$

Bu diferansiyel denklem, sistemin zamana bağlı titreşim tepkisini belirlemenin temelini oluşturmaktadır (Chopra 2012; Inman 2014). Özellikle tarihi yığma yapılara yönelik modal analiz çalışmalarında, bu tür basitleştirilmiş modeller hem yapısal özelliklerin çıkarılmasında hem de deprem gibi dinamik yükler altındaki performansın değerlendirilmesinde önemli bir yaklaşım sunmaktadır.

3.9.1.2. Çok serbestlik dereceli sistemler (ÇSDS)

Gerçek mühendislik sistemleri çoğunlukla birden fazla serbestlik derecesine sahiptir ve her serbestlik derecesi, kendine özgü bir doğal frekans ve hareket denklemi ile tanımlanmaktadır (Chopra 2012). Tek serbestlik dereceli sistemlerde skaler büyüklüklerle ifade edilen titreşim denklemleri, çok serbestlik dereceli sistemlerde yer değiştirme, hız ve ivme vektörleri ile kütle (M), sönüm (C) ve rijitlik (K) matrislerini içeren bir matris formuna dönüşmektedir (Inman 2014). Çok serbestlik dereceli sistemlerin genel hareket denklemi bağıntı 3.7'deki gibi ifade edilmektedir:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (3.7)$$

Burada $x(t)$, sistemdeki serbestlik derecelerine karşılık gelen yer değiştirmelerden oluşan vektörü; $F(t)$ ise zamanla değişen harici kuvvetler vektörünü ifade etmektedir. Bu denklem, çok serbestlik dereceli sistemlerin dinamik analizinde temel bir model olarak kullanılmaktadır (Chopra 2012).

Yapının serbest titreşim yaptığı varsayıldığında, sisteme ait hareket denklemi sönüm etkisi göz ardı edilerek bağıntı 3.8'deki gibi yazılabilir:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (3.8)$$

Bu denklemden hareketle, yapının dinamik özelliklerini belirleyen özdeğer denklemi bağıntı 3.9'da verilmiştir.

$$/[K] - \omega^2[M]/=0 \quad (3.9)$$

Denklem 3.8'in çözümü sonucunda sistemin serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal frekans (ω_n) elde edilir. Her doğal frekans, yapının kendine özgü bir mod şekli ile ilişkilidir; mod şekli, yapının o frekanstaki titreşim davranışını göstermektedir (Chopra 2012).

Yapının doğal frekanslarını ve mod şekillerini belirlemenin bir diğer yöntemi ise nümerik modelleme yaklaşımıdır. Günümüzde sonlu elemanlar yöntemi (FEM) tabanlı bilgisayar programları, karmaşık yapıların nümerik modellerini oluşturmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemle elde edilen kütle ve rijitlik matrisleri, çeşitli sayısal çözüm yöntemleriyle analiz edilerek yapıya ait dinamik karakteristikler hesaplanabilmektedir (Bathe, 1996; Zienkiewicz et al.2013; Boru 2015).

3.9.2. Deneysel modal analiz

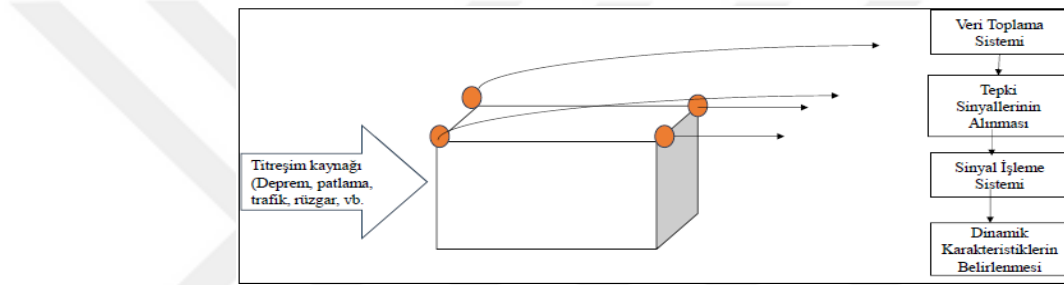
Günümüz teknolojisi, inşaat mühendisliği için önemli yenilikler getirilmiştir. Özellikle yapıların dinamik kimliklendirmesi için yeni bir yöntem açığa çıkmıştır. Yapı üzerinde doğrudan yapılan ölçümlerle dinamik karakteristiklerin tespit edilmesine olanak sağlayan “Deneysel Modal Analiz Yöntemleri” günümüzde sıkça tercih edilmektedir. Deneysel modal analiz ve yapıların dinamik davranışlarının belirlenmesi yapıların dış etkilere karşı gösterdiği titreşim davranışlarının belirlenmesinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu yöntem sayesinde, yapıların titreşim altındaki doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları gibi parametreleri doğrudan belirlenebilmektedir (Boru 2015). Sadece dinamik kimliklendirme için değil yapı sağlığı, hasar tespiti, yapının kalitesi ve sonlu eleman model güncellemesi gibi işlemler için de deneysel modal analiz yöntemleri önem arz etmektedir (Zhang et al. 2005; Okuyucu 2020; Yetkin vd. 2021; Özdoğan 2024).

Nümerik yöntemlerle yapılan analizlerde, yapı elemanlarının malzeme özellikleri, sınır koşulları ve inşaa sürecindeki işçilik farklılıkları gibi unsurların modele idealize edilerek dahil edilmesi, sonuçların güvenilirliğini düşürebilmektedir. Ancak deneysel yöntemlerde, yapıdan doğrudan alınan veriler herhangi bir kabul veya varsayıma gerek duyulmadan kullanılmakta, bu da deneysel verilerin doğruluğunu artırmaktadır. Özellikle mevcut yapıların dijital modellerinin oluşturulmasında yaşanan zorluklar göz önüne

alındığında, Deneysel Modal Analiz Yöntemleri, analitik modellere kıyasla daha pratik ve güvenilir bir çözüm sunmaktadır (Boru 2015).

Yapının dinamik özelliklerinin belirlenmesi süreci üç temel aşamadan oluşmaktadır: İlk olarak, yapıdan titreşim verileri ölçülmektedir. Daha sonra bu veriler analiz edilerek doğal frekans, sönüm oranı ve mod şekilleri gibi modal karakteristikler ortaya çıkarılmaktadır. Son olarak ise bu karakteristikler temel alınarak yapının genel dinamik davranışı modellenmektedir (Kocaman, 2017; Özdoğan, 2018).

Şematik olarak deneysel modal analiz yöntemi Şekil 3.45’te gösterilmiştir.



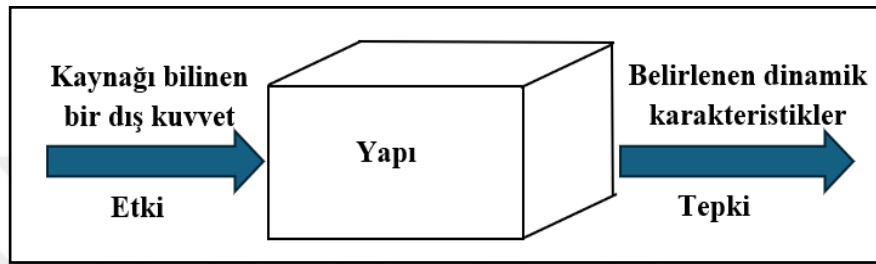
Şekil 3.45. Deneysel modal analiz şematik gösterimi (Özdoğan 2024)

Yöntemin seçiminde, yapıya uygulanan titreşimin kaynağının bilinip bilinmemesi önemli bir kriterdir. Eğer uygulanan titreşim kontrollü ve biliniyorsa, “Geleneksel Modal Analiz (Forced Vibration Test)” yöntemi tercih edilmektedir. Titreşimlerin çevresel etkenlerden (rüzgâr, trafik, yaya hareketi vb.) kaynaklandığı ve kaynağın tam olarak bilinmediği durumlarda ise “Operasyonel Modal Analiz (Ambient Vibration Test)” yöntemi uygulanmaktadır. Gerçekleştirilen birçok uygulamada, çevresel titreşimlerin kullanıldığı operasyonel modal analiz yöntemine odaklanılmaktadır (Kocaman 2017).

Yöntemin başarısı için deneysel süreç boyunca bazı varsayımların yapılması gerekmektedir. Örneğin, yapının ölçüm süresince bütünlüğünü koruduğu, sistemin zamana bağlı olarak değişmediği ve yapı davranışının lineer kaldığı varsayılmaktadır. Bu kabuller, ölçüm sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliği açısından büyük önem taşımaktadır (Kocaman 2017; Özdoğan 2018).

3.9.2.1. Geleneksel deneysel modal analiz yöntemi (EMA)

Geleneksel Deneysel Modal Analiz yönteminde, yapıyı titreştiren etkinin kaynağı bilinmektedir. Yapıya mekanik bir darbe ya da titreşim üreten bir cihaz (örneğin darbe çekici veya hidrolik uyarıcı) ile uyarım uygulanmakta ve bu uyarım sonucunda ortaya çıkan titreşim verileri hassas sensörlerle kaydedilmektedir. Bu yöntem şematik olarak Şekil 3.46’da gösterilmiştir.



Şekil 3.46. Geleneksel deneysel modal analiz

Titreşimler genel anlamda iki şekilde sınıflandırılabilir: Serbest titreşim, yapının dış etkilerden bağımsız olarak kendi doğal frekanslarında titreşmesidir. Bu durumda yapı, ilk uyarımdan sonra titreşmeye başlar ve zamanla titreşim enerjisini kaybederek sönümlenir. Zorlanmış titreşim ise dışarıdan sürekli olarak uygulanan periyodik yükler sonucu ortaya çıkar ve bu titreşim, yük devam ettiği sürece sönümlenmeden sürer (Ewins 1995; Özkul 2016).

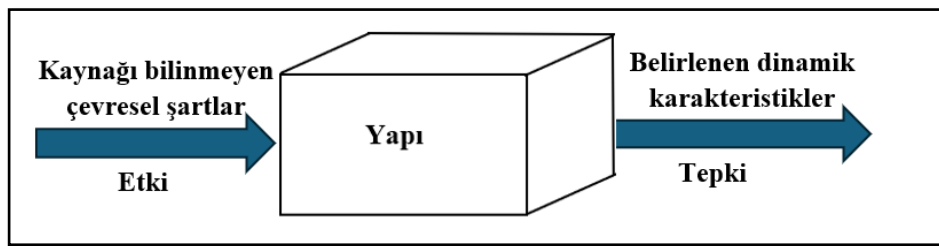
Yapı mühendisliği uygulamalarında bu yöntemlerin önemi her geçen gün artmaktadır. Özellikle yapının büyüklüğü, kullanım amacı ve çevresel etkilerle maruz kaldığı titreşim türleri gibi etkenler, hangi deneysel modal analiz yönteminin tercih edileceğini belirlemektedir. Uygulama sahasında, doğrudan yapıdan alınan verilerle yapılan analizler sayesinde hem mevcut yapıların performansı değerlendirilebilmekte hem de yapının olası deprem gibi dinamik yükler altındaki davranışı daha doğru biçimde öngörülebilmektedir (Ewins 1995; Boru 2015; Özkul 2016; Kocaman 2017; Özdoğan 2018). Bu yöntemde, yapıda gerekli titreşimi sağlayıp yapının dinamik davranış parametrelerini kolaylıkla vermesine rağmen, gerek kullanılan cihazların büyük, ağır, pahalı olması, sadece düşük frekanslarda kullanılması, büyük yapıların dinamik kimliklendirilmesi için uygun olmaması gibi dezavantajları nedeniyle deneysel modal

analiz çalışmalarında da tercih edilmemektedir (Zhang et al. 2005; Ranieri and Fabrocinno 2014; Özdoğan 2024). Bu yöntem yerine daha kullanışlı bir yöntem olan Operasyonel Modal Analiz Yöntemi (OMA) tercih edilmektedir.

3.9.2.2. Operasyonel modal analiz yöntemi (OMA)

Operasyonel modal analiz (OMA) yöntemi, 1990'lı yılların başından itibaren büyük mühendislik yapılarında, bina, köprü, gökdelen gibi yapılarda yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntem, düşük maliyetle tahribatsız veri toplama imkânı sunması nedeniyle sadece dinamik tasarım ve yapı kontrolü için değil, aynı zamanda yapı sağlığı izleme ve hasar tespiti gibi alanlarda da tercih edilmektedir (Boru 2015).

Çevresel titreşim testi adıyla da bilinen bu yöntemde, EMA yönteminden farklı olarak yapının dışarıdan bilinen bir titreşim kaynağı olmadan, çevresel etkilerden (araç geçişleri, rüzgâr, insan hareketleri, makine titreşimleri gibi) kaynaklanan doğal titreşimlere verdiği dinamik tepkilerin incelenmesini sağlar (Özkul 2016; Kocaman 2017; Okuyucu 2020). Bu sayede, yapının doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları gibi dinamik parametreleri, yapıya herhangi bir yapay müdahale olmaksızın tespit edilebilir (Ercan, 2010; Okuyucu 2020; Yılmaz 2022). Şekil 3.47'de OMA yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.47. OMA yöntemi şematik gösterimi

İnşaat mühendisliği alanında OMA belli başlı avantajları için sıklıkla kullanılmaktadır. Öncelikle gerekli kurulumun hızlı ve çabuk bir biçimde yapılması en önemli avantajıdır. Aynı zamanda maliyet olarak düşük olması da OMA'nın tercih edilmesini öne çıkaran unsurlardandır. Sınır koşullarından bağımsızlığı, bütün bir yapının dinamik parametrelerinin eldesi, bir noktanın davranışının yapının tümünü yansıtması, gibi avantajlara da sahip olması OMA yöntemini daha tercih edilebilir olarak öne

çıkarmaktadır. EMA yöntemine kıyasla OMA düşük frekanslı titreşimleri de ölçmektedir. Büyük ve yüksek yapıların dinamik davranışlarının belirlenmesinde, yapı sağlığı izlenmesinde ve hasar tespiti de OMA yöntemi öne çıkmaktadır. (Zhang et al. 2005; Ranieri and Fabrocinno 2014; Özdoğan 2024).

Yöntemin bir diğer avantajı ise, yapının dinamik davranışını grafiksel olarak ortaya koyabilmesidir. Bu sayede titreşim kaynaklı sorunlar ve olası hasar bölgeleri önceden tespit edilerek, koruyucu önlemler alınabilir (Kocaman 2017).

Operasyonel modal analiz, geleneksel modal analiz yöntemlerine kıyasla özellikle büyük ölçekli yapılar ve tarihi yapılar gibi hassas yapılarda tercih edilmektedir. Geleneksel modal analizde, yapıya belirli bir titreşim kaynağı uygulanarak ölçüm yapılırken, büyük yapılar için bu uygulamanın maliyeti yüksek ve riskleri fazladır. Operasyonel modal analizde yapının mevcut çevresel titreşimlerine dayanarak parametrelerin belirlenmesini sağlanmaktadır. (Boru and Kutanis, 2015; Gedik 2022;). Sonlu eleman modeli ile yapılan teorik analizler, malzeme özellikleri ve sınır şartları gibi belirsizlikler nedeniyle gerçek yapıdan farklı sonuçlar verebilmektedir. Bu nedenle model kalibrasyonu için gerçek yapının dinamik parametreleri ile karşılaştırma yapılması önemlidir.

Bir yapıda OMA yapılmadan önce yapının basit bir sonlu eleman modeli oluşturularak yapının tahmini modal davranış parametreleri belirlenmektedir. Bu davranışlardan yola çıkılarak OMA için yapının tahmini davranış parametreleri uyarınca planlama yapılmaktadır. Öncelikle yapıyı titreştirecek yeterli çevresel kaynağın varlığı yerinde belirlenmektedir. Eğer bu kaynak yeterli değilse yapıyı titreştirecek yapay titreşimler etkililmektedir. Yapıdaki bu titreşimleri ölçmek için yapının muhtelif noktalarına hassas ivmeölçerler yerleştirilmektedir. Bu ivmeölçerler, en ufak bir titreşime dahi duyarlı ve bu titreşimleri ölçecek kadar duyarlıdır. Yapıya yerleştirilen ivmeölçerler, titreşim verilerini gerçek zamanlı olarak toplar ve bu veriler özel yazılımlar yardımıyla analiz edilir. İvmeölçerlerin seçimi sırasında hassasiyet, ölçüm frekans aralığı, ortam sıcaklığı gibi kriterler dikkate alınarak doğru sonuçlar elde edilmeye çalışılır (Türker 2011; Özdoğan 2018). İvmeölçerler tek eksenli ölçüm yapabileceği gibi yapının şartlarına göre üç eksenli ölçüm alabilir. Hassas ivmeölçer örneği Şekil 3.48’de gösterilmiştir.



Şekil 3.48. OMA yönteminde tepki titreşimi kayıtları için kullanılan hassas ivmeölçerler

İvmeölçerlerin yerleşimi tamamlanıp yapının gerekli noktalarına sabitleme işlemleri yapıldıktan sonra ivmeölçerlerin ölçeceği veriler özel kablolar yardımıyla bir veri toplama sistemine bağlanır. Bu veri toplama sisteminde hem ivmeölçerin hem de kabloların ön kontrolü yapılır. Herhangi bir sıkıntı var ise yenileri ile değiştirilir. Örnek bir veri toplama sistemi Şekil 3.49’da gösterilmiştir.



Şekil 3.49. OMA uygulamasında kullanılan dinamik veri toplama sistemi

Çevresel uyarıların büyüklük ve frekanslarının bilinmemesi nedeniyle, modal parametrelerin belirlenmesinde farklı algoritmalar kullanılır. Yaygın olarak Stokastik Alt Alan Belirleme (Stochastic Subspace Identification – SSI) ve Tepe Seçme (Peak Picking – PP) yöntemleri tercih edilir. SSI, zaman serisi verilerinin matris temelli analizine dayanırken, PP yöntemi frekans spektrumundaki tepe noktalarının incelenmesiyle modal parametreleri belirlemektedir (Özkul 2016).

Tez çalışmasında Artemis Modal Pro (2023) yazılımı kullanılmıştır. İvmeölçerlerde kaydedilen titreşim kayıtları yazılıma tanımlanarak, belirli matematik seri açılım çözümleri yardımıyla yapının dinamik davranış parametrelerine dönüştürülmektedir.

Bu dönüşüm yazılımında belirli aşamalar içermektedir. Öncelikle yapının kabataslak bir modeli yazılımda oluşturulur. Oluşturulan bu model üzerinde ivmeölçerlerin konumu ve yönleri, OMA esnasındaki konumu ve yönleri ile birebir örtüşecek şekilde tanımlanır. İvmeölçerlerdeki titreşim kayıtları, yazılımda ivme-zaman kayıtlarına dönüştürülür. Dönüştürülen bu kayıtlarda yazılımda spektral yoğunluk fonksiyonlarına dönüştürülür. Bu fonksiyonlar, zaman ve frekans alanında iki ayrı çözümleme yöntemiyle çözülerek yapının operasyonel mod şekilleri ve modal frekans değerleri elde edilir. Yazılımda bulunan çözümleme yöntemleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Yazılım frekans-zaman çözümleme tablosu

Frekans Alanında	Zaman alanında
Frekans Alanında Ayırıştırma Yöntemi (FDD)	Stokastik Alt Uzay Tanımlama Yöntemi Ağırlıksız Temel Bileşenler (SSI UPC)
İleri Frekans Alanında Ayırıştırma Yöntemi (EFDD)	Stokastik Alt Uzay Tanımlama Yöntemi Genişletilmiş Ağırlıksız Temel Bileşenler (SSI UPC-X)
Eğri Uyumlu Frekans Alanında Ayırıştırma Yöntemi (CFDD)	

Çizelge 3.1’de verilen çözümleme yöntemleri sayesinde titreşim kayıtları çözülerek yapının dinamik davranış parametreleri olarak adlandırılan mod şekli ve modal frekans değerleri belirlenmektedir. En yaygın kullanılan çözüm yöntemi Frekans Alanında Ayırıştırma (FDD) iken en detaylı çözümler Stokastik Alt Alan (SSI-UPC) yöntemleridir. (Özdoğan 2024)

Dinamik davranış parametreleri belirlendikten sonra en önemli aşama, modal güvence kriteri (MAC) aşamasıdır. Elde edilen mod şekillerinin birbirinden ayrık veya aynı mod olduğunu bu aşama belirlemektedir. Vektörel olan bu modlar eğer ayrık ise MAC değeri 0, aynı ise 1'dir. Bu aşamada istenen, vektörel modların ayrık olması yani MAC değerinin 0'a yakın olmasıdır. Bu sayede elde edilen dinamik davranış parametrelerinin doğruluğu sağlanır.

Bütün bilgilerin ardından Deneysel Modal analiz yöntemleri, Çizelge 3.2'de toplu bir şekilde karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.2. Modal analiz yöntemlerinin kıyaslanması

EMA (Geleneksel)Modal Analiz)	OMA (Operasyonel Modal Analiz)	ODS (Operasyonel Şekil Değiştirme Analizi)
Başlangıç Kuvveti: VAR	Başlangıç Kuvveti: YOK	Başlangıç Kuvveti: YOK
Titreşim kaynağı: BİLİNİYOR	Titreşim kaynağı: BİLİNMIYOR	Titreşim kaynağı: BİLİNMIYOR
Zorlanmış Titreşim Yöntemi	Çevresel Titreşim Yöntemi	-
Sarma tablası, darbe çekici, sarsıcılar	Rüzgâr, taşıt yükü, deprem, patlatma veya yaya hareketi	-
SONUÇ		
-Doğal Frekans -Mod Şekilleri -Sönüm	-Doğal Frekans -Mod Şekilleri -Sönüm	-Zorlanmış Tepki -Deformasyon Şekli

Tez çalışmamız için seçilen tarihi yığma minarelerinin dinamik davranış parametrelerinin belirlenmesi için OMA yöntemi kullanılmıştır.

3.10. Yığma Yapıların Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması

Yapı tasarımı sürecinde, yapının ihtiyaçlara uygunluğu, dayanıklılığı, uygulanabilirliği ve maliyeti temel kriterler arasında yer almaktadır. Tarihsel olarak, yapılar genellikle hesaplamaya dayanmayan, deneyim ve gözleme dayalı yöntemlerle inşa edilmiştir. Mimarlar, önceki deneyimlerine ve deneme-yanılma yoluyla elde edilen

sonuçlara dayanarak, yapı elemanlarının taşıma kapasitesi ve açıklıklarını belirlemiştir. Zamanla, yapısal stabilite ve sağlamlık açısından geometrik oranların kritik bir rol oynadığı anlaşılmıştır.

Günümüzde bilgisayar destekli programlar sayesinde, yığma yapıları oluşturan her bir malzemenin mekanik özellikleri deneysel olarak belirlenmekte ve gerçekçi, detaylı modeller bilgisayar ortamında oluşturulabilmektedir. Modelleme sürecinde, analiz amaçları ve bütçe gibi faktörler dikkate alınarak farklı ayrıntı seviyelerinde modeller geliştirilmektedir. Lokal alanlarda detaylı malzeme bazlı modeller hazırlanabilirken, yapının genel analizi için daha basit ve hızlı modeller tercih edilmektedir. Bu süreçte, gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için belirli varsayımlar ve idealleştirmeler yapılması gerektiğini Özkul (2016) çalışmasında belirtmiştir.

3.10.1. Modelleme ilkeleri ve idealleştirilmesi

3.10.1.1. Geometrinin idealleştirilmesi

Tarihi ve mimari açıdan önemli yığma yapılarda, taşıyıcı sistemlerdeki süslemeler modellemede sadeleştirilmektedir. Ancak yapı elemanlarının gerçek konumları ve şekillerinin doğruluğu korunmaktadır. Karmaşık yapılar için farklı modeller denenir ve sonuçlar karşılaştırılarak analitik çözüme en uygun model seçilmektedir. Bu yaklaşım, modelin doğruluğunu artırmaya yardımcı olmaktadır (Özkul 2016).

3.10.1.2. Malzemenin idealleştirilmesi

İnşaat mühendisliğinde, malzemelerin mekanik davranışı genellikle gerilme ile birim şekil değiştirme arasındaki ilişkiyle tanımlanmaktadır. Malzemelerin gerçek davranışlarını simüle etmek için sayısal yöntemler kullanılsa da, çoğunlukla malzemenin lineer elastik bölgedeki şekil değiştirmesi esas alınmaktadır. Hooke Kanunu'na göre, gerilme ile şekil değiştirme arasında doğrusal bir ilişki bulunur ve bu durum " $\sigma=E.\epsilon$ " formülüyle ifade edilir. Yığma yapılar heterojen malzemelerden oluştuğu için, mekanik özellikleri tüm yapıda farklılık gösterir ve bu nedenle beton veya çelik gibi homojen malzemelerle karşılaştırılması zor olmaktadır (Özkul 2016).

Yığma yapıların mekanik özellikleri doğrultuya bağımlı olup homojenlik göstermemektedir. Basınç altında lineer elastik davranış sergilemez; malzeme kırılğan bir tepki verir ve kalıcı deformasyonlar oluşur. Uzun süreli çekme yüklerinde dayanımı oldukça düşüktür ve kayma gerilmelerine karşı sınırlı süneklik göstermektedir. Yapıdaki çatlaklar ve harç bölgeleri dikkate alınarak rijitlik hesaplamaları yapılması gerekmektedir (Dabanlı 2008; Özkul 2016).

Malzeme modellemesinde, özellikle makro ölçekte, malzemenin genellikle izotropik ve homojen olduğu kabul edilmektedir. Düşük gerilme seviyelerinde malzemenin lineer-elastik davrandığı varsayılır; ancak yüksek gerilme ve çekme etkileri altında kalıcı hasar oluştuğunda lineer olmayan davranış modelleri uygulanmaktadır. (Özkul 2016).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde çalışmada kullanılan cami minarelerinin tarihçelerinden, sonlu eleman modellerinin oluşturulmasından, modelde gerçekleştirilen teorik ve yerinde gerçekleştirilen operasyonel modal analiz uygulamalarından ve en sonunda model üzerinde gerçekleştirilen model güncellemelerinden bahsedilmiştir. Çalışmanın yapıldığı camilere ait minarelerin bilgileri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Çalışmanın yapıldığı camilere ait minarelerin bilgileri

Cami İsimleri	Minare Tipi	Gövde	Şerefe Sayısı	Külâh	Yerleşim
Pervizoğlu Camii	Osmanlı dönemi klasik	Silindirik formda, düzgün kesme taştan yapılmış	Tek şerefeli	İnce ve konik	Kuzeybatı köşesinde
Lala Mustafa Paşa Camii	Osmanlı dönemi klasik	Silindirik formda, düzgün kesme taştan yapılmış	Tek şerefeli	İnce ve konik	Kuzeybatı köşesinde
Erzurum Ulu Camii	Saltuklu dönemi / erken Türk-İslam minaresi	Silindirik, tuğla malzemeli (üst kısmı onarımlar görmüştür)	Tek şerefeli	İnce ve konik	Kuzeybatı köşesinde
Murat Paşa Camii	Osmanlı dönemi klasik	Silindirik ve kesme taş malzemeli	Tek şerefeli	İnce, konik ve kurşun kaplı külâh	Camiden ayrı
Yukarı Habip Efendi Camii	Geç Osmanlı dönemi minaresi	Silindirik, düzgün kesme taş malzemeli	Tek şerefeli	İnce ve konik, kurşun kaplı külâh	Kuzeybatı köşesinde
Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii	Geç Osmanlı dönemi minaresi	Silindirik, kesme taştan inşa edilmiş	Tek şerefeli	İnce, konik ve kurşun kaplı külâh	Kuzeybatı köşesinde
Yeğenağa Camii	Geç Osmanlı dönemi minaresi	Silindirik, kesme taş	Tek şerefeli	İnce, konik ve kurşun kaplı külâh	Kuzeybatı köşesinde
Kadana Camii	Geç Osmanlı dönemi minaresi	Silindirik, kesme taş	Tek şerefeli	İnce, konik ve kurşun kaplı külâh	Kuzeybatı köşesinde
Hacı Cuma Camii	Geç Osmanlı dönemi minaresi	Silindirik, kesme taş	Tek şerefeli	İnce, konik ve kurşun kaplı külâh	kuzeybatı köşesinde

4.1. Pervizoğlu Camii

1712 yılında inşa edilen Pervizoğlu Cami ile ilgili ayrıntılı bilgiler Bölüm 3.7.1’de verilmiştir. Bu kısımda, cami minaresi ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

Camide 1 adet minare bulunmaktadır. Cami kuzeybatı köşesinde bulunan duvarlarının üzerine ek olarak inşa edilen minaresi, silindirik bir yapıya sahip olup bazalt taşlardan yapılmıştır. Minarenin şerefe altı bölümü, iri ölçekte düzenlenmiş sarkıtlı mukarnaslarla süslenmiştir. Petek kısmı ise malzeme farklılığı göstermekte olup, yarısı kesme taş, diğer yarısı ise tuğla kullanılarak inşa edilmiştir. Cami yapımında ana duvarlarda bazalt kesme taşlar, külahında ise tuğlalar kullanılmıştır. Cami minare görünüşü Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Pervizoğlu Camii minare görünümü

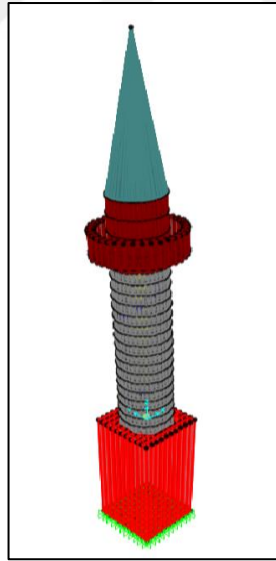
Cami minaresinin yerden yüksekliği üstüne konumladığı duvar yüksekliği dahil yaklaşık 19 m yüksekliğindedir. Minare gövdesinin dış yarıçapı 0,50 m’dir. Şerefe çapı 1,70 m olup yüksekliği ise 1,80 m’dir. Cami minaresi 4,60 m kuzeybatı duvarı üzerinde yükselip yaklaşık 80x80 cm’lik kare kaide üstüne oturmaktadır.

Camiyle ilgili 1859 depreminde hasar aldığı Özdoğan (2024) çalışmasında ifade edilmiştir. Cami minaresiyle ilgili bilinen bir restorasyon işlemine ulaşılamamıştır.

4.1.1. Pervizoğlu Camii minaresi sonlu eleman modeli

Minarelerin sonlu eleman modelleri SAP2000 (2021) yazılımında oluşturulmuştur. Minareler modellenmeden önce Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğünden camiler ile ilgili gerekli röleve çizimleri ve materyaller elde edilmiştir. Daha sonra cami minaresine gidilerek minare yerinde keşifler yapılmıştır. Keşiflerin ardından röleve ve keşif sonuçları birbiriyle karşılaştırılıp minarenin nihai boyutları belirlenmiştir. Minare modellenirken minarenin yapısal davranışına etki etmeyen her türlü detay modellemeye dahil edilmemiştir.

Minareler SAP2000(2021) yazılımında makro modelleme tekniğiyle katı elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Katı elemanlar üç boyutlu geometrik şekle sahiptir. Modelleme yapılırken minareyi oluşturan dış gövde, merdiven, şerefe ve külah ayrı ayrı oluşturulup düğüm noktaları birbirine bağlanmıştır. Modellenen örnek bir minare Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



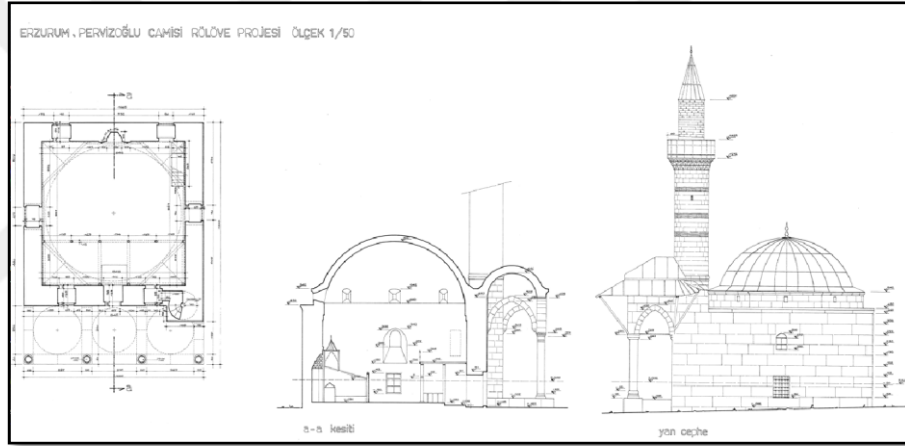
Şekil 4.2. SAP2000 yazılımında modellenen örnek bir minare

Daha sonra minarenin mesnet ve sınır koşulları da SAP2000 yazılımında tanımlanmıştır. Modelleme tamamlandıktan sonra, minareyi oluşturan dış gövde, merdiven, şerefe ve külah için malzeme özellikleri tanımlanarak minarenin yapısal davranış parametreleri teorik olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar baz alınarak minarede OMA uygulaması yapıp, OMA çalışmasından elde edilen sonuçlarla teorik modal analiz

sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar eğer birbirinden farklı ise model üzerinde model kalibrasyon çalışması yapılarak modelin OMA sonuçlarına yakınsaması sağlanır.

Çalışmanın bu kısmında Pervizoğlu Camii minaresinin sonlu eleman modelleme aşamasına geçilmiştir. Minarenin modelleme aşaması, tez çalışmasının Materyal ve Metot Bölümünde bahsedilen sonlu eleman modelleme aşamasında bahsedilen koşullara bağlı kalarak gerçekleştirilmiştir.

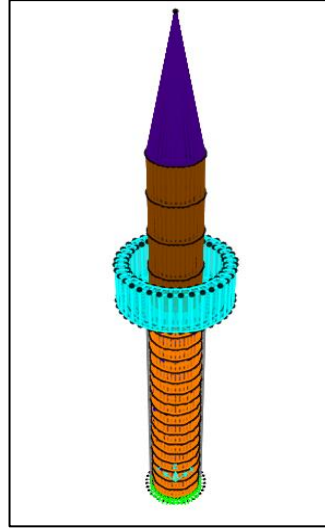
Minarenin rölevesi incelendikten sonra minareye keşif için gidilmiştir. Minarenin yerinde boyutları belirlendikten sonra rölevedeki boyutlarla karşılaştırılarak minarenin nihai boyutları elde edilmiştir. Minare rölevesi Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Pervizoğlu Camii minare rölevesi (Özdoğan 2024)

Pervizoğlu Camii'nin minaresi ve minare merdivenleri incelendiğinde minarenin ağırlıklı olarak tek bir malzemedен inşa edildiği ve bu malzemenin cami duvarlarıyla aynı olduğu tespit edilmiştir. Cami duvarlarının inşasında kullanılan koyu ve siyah renkli bazalt taşının minarenin şerefe bölümüne kadar kullanıldığı görülmüştür. Minarenin şerefe ile külah arası kısmı tuğla, külah kısmı ise sac malzeme ile kaplanmıştır (Özdoğan 2024).

Pervizoğlu Camii minaresi sonlu eleman modeli SAP2000 (2021) yazılımında makro modelleme tekniğiyle katı elemanlar yardımıyla oluşturulmuştur. Bu model Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Pervizoğlu Camii minaresi sonlu eleman modeli

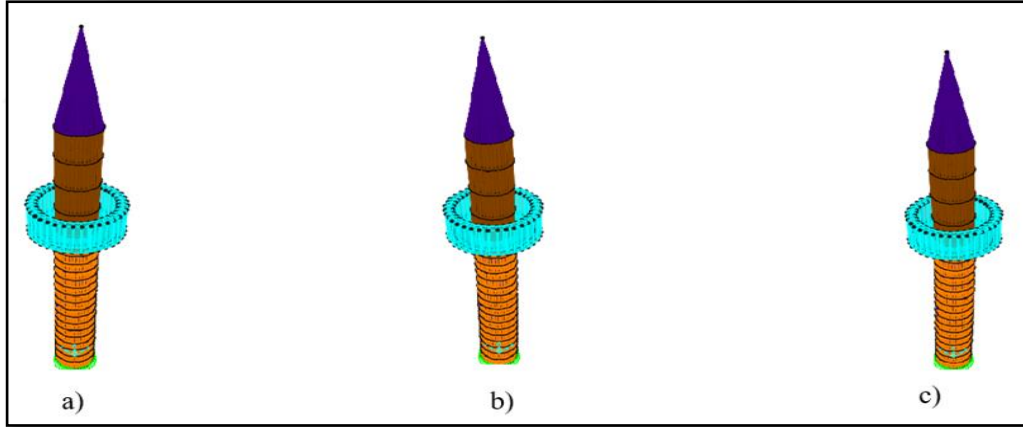
Minarenin sonlu eleman modeli 3.126 düğüm noktalı ve 1.718 katı elemanlı bir modeldir. Model oluşturulduktan sonra Pervizoğlu Camii minaresi sonlu eleman modeli için minare duvar mekanik özellikleri belirleme aşamasına geçilmiştir. Beton Schmidt çekici minare merdiven ve gövdesine uygulanıp sertlik değerleri belirlenmiştir. Bu işlem sonucunda sertlik değeri ortalama 27 olarak belirlenmiştir. Minare inşasında kullanılan taş bazalt olduğu için Denklem 3.1 kullanılabilmektedir. Bu denklem yardımıyla taşın basınç mukavemeti 9,87 MPa olarak hesaplanmıştır. Minarenin inşasında kullanılan harcın Horasan harcı olduğu ve bu harcın basınç mukavemetinin 1,15 MPa olduğu Özdoğan (2018) çalışmasında belirtilmiştir. Taş ve harç basınç mukavemetleri bilindikten sonra Denklem 3.4 ve Denklem 3.5 yardımıyla duvar basınç mukavemeti ve elastisite modülü belirlenmektedir. Denklem 3.4'teki K sabit değeri 0,50 olarak alınmıştır. Denklem 3.4'teki diğer sabit katsayılar olan α ve β , minare düzgün bir biçimde örüldüğü için sırasıyla 0,70 ve 0,30 olarak alınmıştır. Bu değerler yardımıyla minare gövdesinin duvar basınç mukavemeti 2,58 MPa, duvar elastisite modülü ise 516 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, sonlu eleman modelinde minarenin taş kısımları olan iç silindir, dış gövde, merdiven ve şerefeye tanıtılmıştır. Minarenin tuğladan inşa edilen petek kısmı için tuğlanın taşa göre daha yumuşak bir yüzeye sahip olması nedeniyle beton Schmidt çekici uygulanamamış ve bunun sonucunda duvar mekanik özellikleri elde edilememiştir. Bu durumu aşmak için Özdoğan (2018) çalışmasında tuğlanın deneysel basınç mukavemeti değerlerinden faydalananarak ile örülü minare gövdesi için Eurocode 6 (1995) yardımıyla 850 MPa elastisite modülü değerini kullandığı görülmüştür.

Hesaplanan bu değer Pervizoğlu minaresinin petek kısmı için duvar mekanik özelliği olarak minarenin sonlu eleman modeline tanımlanmıştır.

Duvar mekanik özelliklerinin tamamlanmasının ardından minare üzerinde teorik modal analiz yapılarak mod şekilleri ve modal frekans değerleri belirlenmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Teorik mod şekilleri Şekil 4.5’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Pervizoğlu Camii minaresi teorik modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (x yönü)	1,710
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (y yönü)	1,713
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (z yönü)	10,33

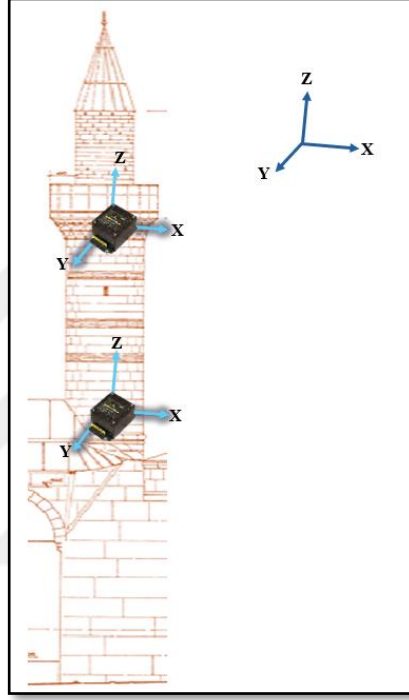


Şekil 4.5. Pervizoğlu Camii Minaresi sonlu eleman modeli a) Kısa doğrultuda öteleme b) Uzun doğrultuda öteleme c) Burulma.

Minare sonlu eleman modelinde kısa doğrultu x yönü, uzun doğrultu y yönü, düşey doğrultu ise z yönü olarak ifade edilmiştir. Teorik modal analiz sonuçlarına göre, ilk mod şekli minarenin kısa doğrultuda (x yönü) yatay öteleme hareketi, ikinci mod şekli uzun doğrultuda (y yönü) yatay öteleme hareketi olarak elde edilmiştir. Üçüncü mod şekli ise minarenin düşey eksen (z yönü) etrafında yanal burulma hareketidir. Bu sonuçlara bağlı olarak minare şerefesine, ortasına ve tabanına ivmeölçerler bağlayıp minarede operasyonel modal analiz uygulaması yapılmıştır.

4.1.2. Pervizoğlu Camii minaresi operasyonel modal analiz uygulaması

Minarenin, dinamik davranış parametrelerinin yerinde belirlenmesi için minare üzerinde OMA uygulaması yapılmıştır. Minare içine ivmeölçer yerleşimi minarenin sonlu eleman modeli üzerinde gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçlarına göre yerleştirilmiştir. Minare ivmeölçer yerleşim krokisi Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Pervizoğlu Camii minaresi ivmeölçer yerleşim krokisi

Cami minaresinin sonlu eleman modelinde gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçlarına göre ilk iki mod minare öteleme modları, üçüncü mod ise burulma modudur. Bu sonuçlar ele alındığında minarenin tabanına, merdiven ortasına ve minare şerefesine ivmeölçerler yerleştirilme kararı verilmiştir. Cami minaresinin dinamik parametrelerinin elde edilme işlemi cami gövdesiyle beraber gerçekleştirilmiştir. Caminin dinamik parametrelerinin belirlenmesi için cami köşelerine 8 adet tek eksenli ivmeölçer yerleştirilmiştir (Özdoğan 2024). Yetersiz kablo uzunluğu, ivmeölçer sayısındaki azlık gibi nedenlerden ötürü minareye 3 eksenli ivmeölçerler yerleştirilmiştir.

3 eksenli ivmeölçerlerin yönü kuzeyi gösterecek şekilde minare ortasına ve şerefesine yerleştirilmiştir. Minarenin tabanı caminin kuzeybatı duvar köşesiyle bitişiktir. Bu sebeple minare tabanı için ayrı bir ivmeölçer yerleşimi yapılmamıştır. Caminin duvar köşesine bağlanan tek eksenli 2 ivmeölçer minarenin dinamik davranış parametreleri için kullanılmıştır. Sabitleme işlemi çabuk donan alçı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. İvmeölçer sabitleme işlemi Şekil 4.7’de verilmiştir. İvmeölçerler minareye sabitlendikten sonra özel kabloları ile veri toplama ünitesine bağlanmıştır. Yapılan OMA çalışması için oluşturulan veri toplama sistemi Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Pervizoğlu Camii minaresi ivmeölçer sabitleme işlemi



Şekil 4.8. Pervizoğlu Camii minaresi OMA veri toplama sistemi

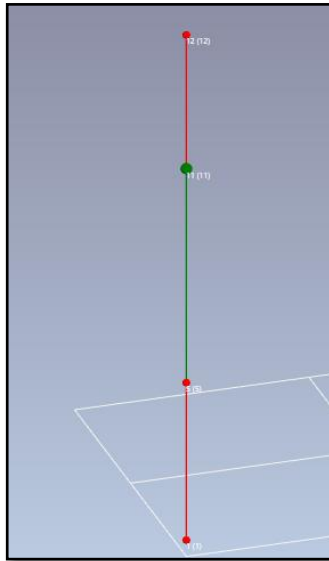
Titreşim kayıtlarının elde edilmesi için Testlab Network veri yazılımından faydalanılmıştır. İvmeölçerlerin bağlı olduğu kablolar veri toplama sisteminde ilgili kanal numarasına yerleştirilir ve kalibrasyon çarpanlarıyla veri sistemine tanıtılır. Tüm işlemler

tamamlandıktan sonra kontrol için deneme kaydı alınmış ve bu kontrollerin ardından kayıt alma işlemine geçilmiştir (Özdoğan 2024)

Kayıt süresi için Okuyucu (2020) yapının minimum süre olarak yapının hâkim titreşim periyot değerinin 500 katı sürede olması gerektiğini önermiştir. Gerekli değerlendirmeler yapıldıktan sonra kayıt süresinin 900 sn (15 dk) olmasına karar verilmiştir. Toplamda 6 adet titreşim kaydı alınmıştır. Bunların 3'ü 100Hz'lik, 3'ü de 200Hz'lik frekanstadır. Minare araç trafiğinin sürekli olduğu bir bölgede bulunmasından dolayı çevresel titreşim sürekli camiye etki etmektedir. Ancak bu titreşimlere karşı caminin bu etkiye karşı tepkisi bilinmediğinden cami minaresine plastik tokmak ile vurularak yapay bir titreşim oluşturulmuştur (Özdoğan 2024).

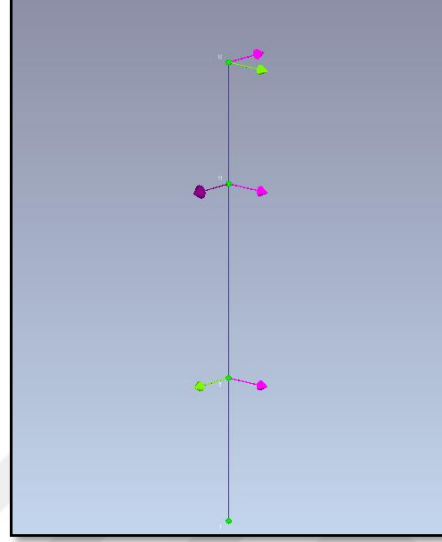
Kayıt işlemlerinin ardından elde edilen kayıtlar minarenin deneysel mod şekillerini belirlemek için kullanılmıştır. Bu kayıtlar Artemis Modal Pro(2023) yazılımına aktarılmıştır. Yazılım bu kayıtları özel denklem ve çözüm yöntemleri yardımıyla minarenin operasyonel mod şekilleri elde edilmektedir.

Yazılımda ilk aşamada yapının temsili bir modeli yazılımda oluşturulur. Pervizoğlu Camii minaresinin temsili modeli Şekil 4.9 'da gösterilmektedir.



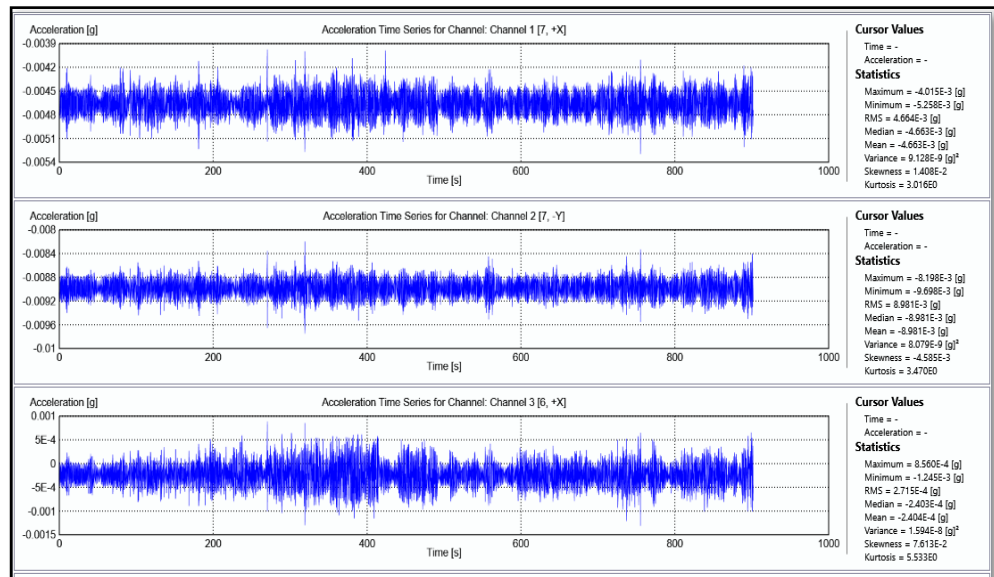
Şekil 4.9. Pervizoğlu Camii minaresi Artemis yazılım geometrisi

Daha sonra ivmeölçerler temsili geometride tanımlanmıştır. İvmeölçerler yazılımda tanımlanırken ölçüm sırasındaki yön ve yerleşimleri dikkate alınarak tanımlanır. İvmeölçerlerin yazılımda tanımlanması Şekil 4.10'da verilmiştir.



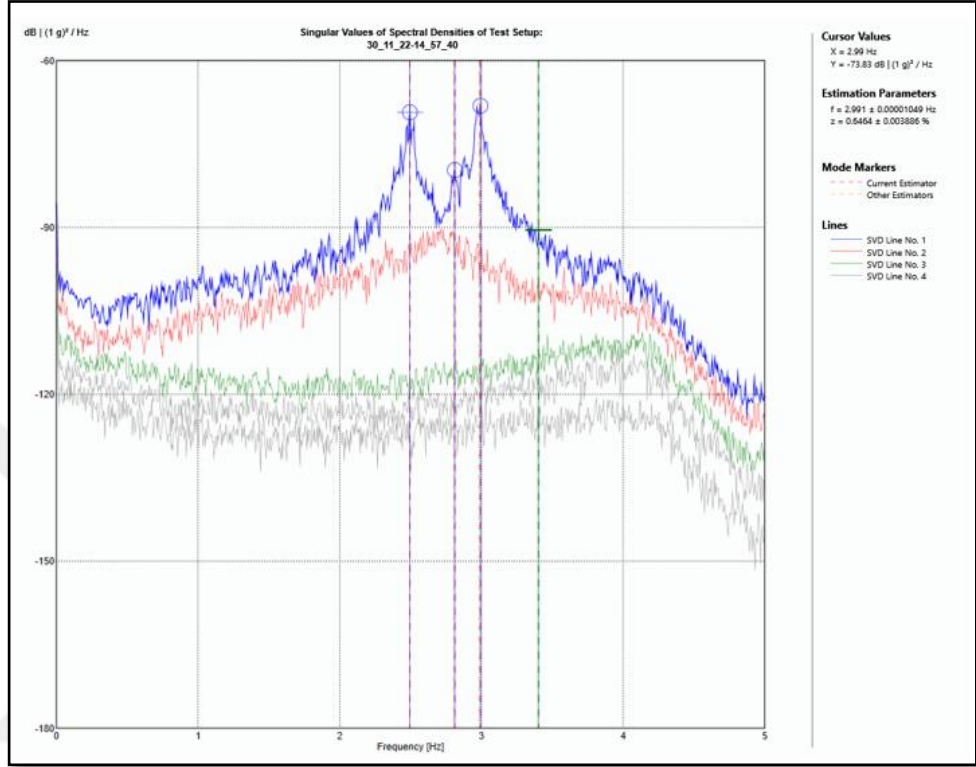
Şekil 4.10. Pervizoğlu Camii minaresi ivmeölçerlerin yazılımda tanıtılması

Oluşturulan model sonrasında yapıda kaydedilen titreşim kayıtları yazılım vasıtasıyla ivme-zaman grafiğine çevrilmiştir. Titreşim kayıtları Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Pervizoğlu Camii minaresi titreşim kayıtları

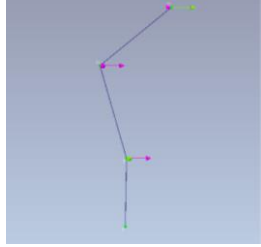
Daha sonra bu titreşim kayıtlarının çözümü ve modal parametrelerin belirlenmesi için yazılımda spektral yoğunluk fonksiyonlarından faydalanılır. Pervizoğlu Camii minaresine ait spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. Pervizoğlu Camii minaresi spektral yoğunluk fonksiyonu

Titreşim kayıtları frekans alanında ayrıştırma (FDD) analiz yöntemi ile çözümlenerek minarenin modal davranış parametreleri belirlenmiştir. Pervizoğlu Camii minaresinin Operasyonel mod şekilleri ve modal frekans değerleri Çizelge 4.3.’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Pervizoğlu Camii minaresi OMA sonuçları

Mod Şekli	Frekans (Hz)	
X yönünde (Kısa doğrultuda) öteleme hareketi		2,495
Y yönünde (Uzun doğrultuda) yatay öteleme hareketi		2.802
Z yönünde burulma hareketi	-	-

Çizelge 4.3'teki OMA sonuçlarına göre, minarenin ilk modu kısa doğrultuda yani doğu batı (X) yönünde öteleme hareketi, 2. Modu uzun doğrultuda yani kuzey-güney (Y) yönünde öteleme hareketi yapmaktadır. OMA sonuçlarında minare burulma modu tüm çözümlemelere rağmen elde edilememiştir.

OMA sonuçlarının güvenilirliğini değerlendirmede kullanılan en önemli ölçütlerden biri MAC (Modal Assurance Criterion) değeridir. Bu kriter, elde edilen mod şekillerinin doğruluğunu ve birbirlerinden ayrıklığını (lineer bağımsızlığını) sayısal olarak değerlendirmeyi sağlar.

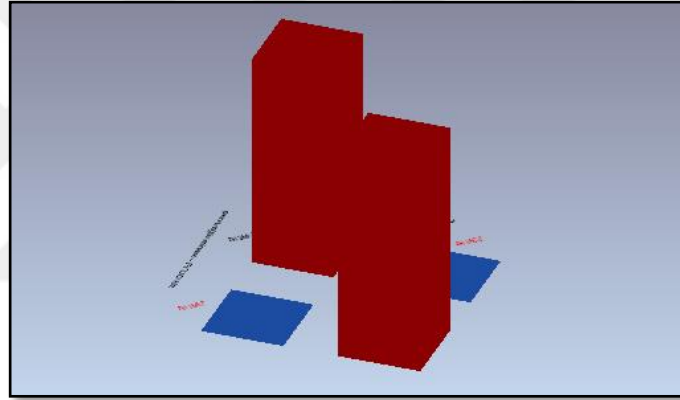
MAC değeri, iki mod şekli arasındaki benzerlik derecesini 0 ile 1 arasında bir skala ile ifade eder ve eğer;

- $MAC \approx 1$: Mod şekilleri birbirine oldukça benzer ya da aynıdır (yüksek korelasyon).

- $MAC \approx 0$: Mod şekilleri birbirinden bütünüyle farklıdır (düşük korelasyon).

Bu değerlerin değerlendirilmesi hem modal parametrelerin güvenilirliğini hem de ölçüm ve modelleme süreçlerinin doğruluğunu test etmek açısından önemlidir. Özellikle farklı modal testlerde ,sayısal–deneysel karşılaştırmalarda, sonlu elemanlar analizinden (FEA) elde edilen mod şekilleri ile deneysel modal analizlerden elde edilen mod şekillerinin karşılaştırılmasında MAC mod şekillerinin eşleşip eşleşmediğini belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Pervizoğlu Camii minaresi OMA sonuçlarına ait MAC değerleri grafiği Şekil 4.13'te ; MAC değerler tablosu ise Çizelge 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Pervizoğlu Camii minaresi MAC değerleri grafiği

Çizelge 4.4. Pervizoğlu Camii minaresi MAC değerleri tablosu

Frekans (Hz)	2,495	2,802
2,495	1	0,1111
2,802	0,1111	1

Çizelge 4.4'te MAC değerleri tablosu incelendiğinde modlar arasındaki MAC değerlerinin 0'a yakın olduğu ve modların birbirinden ayrık olduğu görülmüştür. Bu tablo gerçekleştirilen OMA çalışmasının güvenilir olduğunun göstergesidir.

4.1.3. Pervizoğlu Camii minaresi sonlu eleman model kalibrasyon çalışması

Cami minaresinde gerçekleştirilen OMA çalışması sonrası, minarenin hem teorik hem de dinamik davranış parametreleri belirlenmiştir. Bu sonuçlar karşılaştırılarak, sonlu eleman modelinde herhangi bir güncellenmeye gerek olup olmadığı değerlendirilmiştir. Pervizoğlu camii minaresinin ilk teorik analiz ve OMA çalışması sonuçları toplu halde Çizelge 4.5’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Pervizoğlu Camii minaresi ilk teorik modal analiz ve OMA sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (X yönü)	2,495	0,405	83,76
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (Y yönü)	2,802	0,406	85,51
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (Z yönü)	-	2,620	-

Çizelge 4.5’teki sonuçlar karşılaştırıldığında minare sonlu eleman modelinde gerçekleştirilen ilk teorik modal analiz sonuçları ile minarenin OMA çalışması sonuçlarının birbirinden çok farklı olduğu ve hata oranlarının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu farkın asgari düzeye indirilmesi ve sonlu eleman model davranış parametrelerinin, minarenin dinamik davranış parametrelerini yansıtabilmesi için minarenin sonlu eleman modelinin güncellenmesi yani model kalibrasyon gerekmektedir.

Model kalibrasyon yöntemleri içinde yapının mesnet koşullarının kontrolü, yapı ölçülerinin kontrolü ve malzeme özelliklerinin kontrolü bulunmaktadır. (Okuyucu 2020) Cami minaresinin teorik modal analiz ve OMA çalışması sonuçları karşılaştırıldığında teorik ve modal davranış parametrelerinin benzer şekilde olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçtan hareketle model kalibrasyon işlemi için minarenin malzeme özelliklerinin güncellenmesi yeterli olacaktır. Cami minaresinin, inşa edilen malzemelerine minarenin

dinamik davranış parametrelerine en yakın veya dinamik davranış parametrelerini tam olarak yansıtacak şekilde deneme yanılma yöntemleri ile elastisite modülü değeri tanımlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu tekrarlı işlemler için, minarenin ilk teorik modal analizi için kullanılan elastisite modül değerleri baz alınarak elastisite modülü değerleri güncellenmiştir. Güncellenen değerler yardımıyla minarenin sonlu eleman modelinde modal analizler gerçekleştirilerek, minarenin dinamik davranış parametrelerine en yakın elastisite modül değerleri bulunmuştur.

Pervizoğlu Camii minaresi için ilk teorik modal analizdeki değerler baz alınarak taş ve tuğla kısımları için elastisite modül kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Pervizoğlu Camii minaresi için tekrarlı işlemler sonucunda ulaşılan elastisite modül değerleri Çizelge 4.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Pervizoğlu Camii minaresi elastisite modül kalibrasyon değerleri

Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)
Taş	19.500 MPa
Tuğla	2.000 MPa

Çizelge 4.6’daki değerler, Pervizoğlu camii minaresinin sonlu eleman modeline tanıtıldığında, minare dinamik davranış parametrelerine en yakın davranış parametrelerinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 4.7.’de bu sonuçlar ile minare OMA sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.7. Pervizoğlu Camii Minaresi kalibreli teorik modal analiz sonuçları ile OMA sonuçları.

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi (X yönü)	2,495	2,492	0,12
2	Uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi (Y yönü)	2,802	2,497	10,88
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (Z yönü)	-	16,180	-

Çizelge 4.7.'deki sonuçlar karşılaştırıldığında kalibrasyonu tamamlanmış minare sonlu eleman modeliyle, OMA çalışma sonuçlarının yakın olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Özellikle ilk mod şeklindeki hata oranı %0,12 gibi çok düşük bir değerdir. Buna karşın caminin diğer mod şeklinde hata oranı %11 mertebesinde. Yapılan bu yöntemde, üç mod şeklinin aynı hata oranlarında yakalanamayacağı Özdoğan (2018) çalışmasında belirtilmiştir. Fakat minarenin kütle katılım oranları incelendiğinde hakim modun ilk mod şekli olması nedeniyle sadece bu mod şekli üzerinde kalibrasyon güncellemesinin yapılması yeterli olacaktır.

4.2. Lala Mustafa Paşa Camii

1562 yılında inşa edilen Lala Mustafa Paşa Camii ile ilgili ayrıntılı bilgiler Bölüm 3.7.2'de verilmiştir. Bu kısımda, cami minaresi ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

Camiinin kuzeybatı köşesinde 1 adet minare bulunmaktadır. Binanın azametina uygun olarak diğer cami minarelerine oranla kısa ama kalın bir minare yapısı seçen Mimar Sinan, kare bir kaide üzerine oturtulan minareyi yuvarlak ve tek şerefeli olarak tasarlamıştır. Taş basamaklarla çıkılan bu minare kırmızı taş bileziklerle süslenmiş, beyaz kesme taş diğer bir deyişle ak taştan yapılmıştır. Minarenin şerife altı bölümü, iri sarkıtlı mukarnaslarla süslenmiştir. Caminin görünüşü ve minaresi Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14. Lala Mustafa Paşa Camii genel görünümü ve minaresi

Cami minaresinin yerden yüksekliği yaklaşık 23 m'dir. Cami minaresi dış çapı 2,72 m'dir. Şerefe çapı 3,67 m'dir. Şerefe yüksekliği 14,29 m olup şerefeye 48 basamaklı merdivenle çıkılmaktadır.

Caminin tarih boyunca farklı zamanlarda hasar aldığı ve tamirattan geçtiği arşivlerde yer almaktadır (Gündoğdu 1993; Tozlu 2000; Özdoğan 2024). Cami en son restorasyonunu 2014 yılında geçirmiştir. Minare kısmında ise yapısal boyutta detaylı bir restorasyon yapılmamış sadece yüzey derzi ve taş temizlikleri yapılmıştır.

4.2.1. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi sonlu eleman modeli

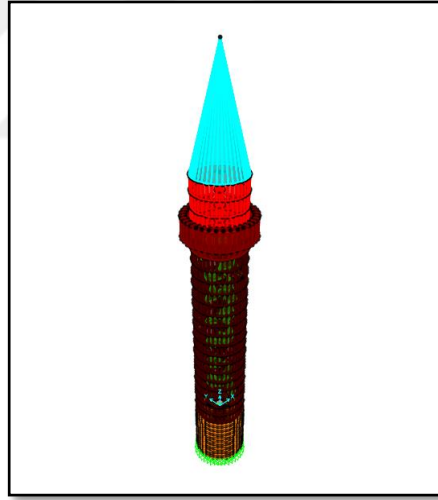
Pervizoğlu Camii minaresinin sonlu eleman modellemesini ardından Lala Mustafa Paşa Camii'nin minaresinin sonlu eleman modellemesi gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman modelleme aşamaları, Pervizoğlu Camii minaresi sonlu eleman modeli için bahsedilen koşullarla aynı koşullar altında gerçekleştirilmiştir.

Lala Mustafa Paşa Camii minaresinin rölevesi incelendikten sonra minarenin sonlu eleman modellemesi için kullanılacak nihai boyutlarının belirlenmesi için minareye keşfe gidilmiş ve nihai boyutlar belirlenmiştir. Minare rölevesi Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Lala Mustafa Paşa Camii minare rölevesi

Nihai boyutların belirlenmesinin ardından Lala Mustafa Paşa Camii'nin minaresi SAP 2000 yazılımında oluşturulmuştur. Minarenin sonlu eleman modeli Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



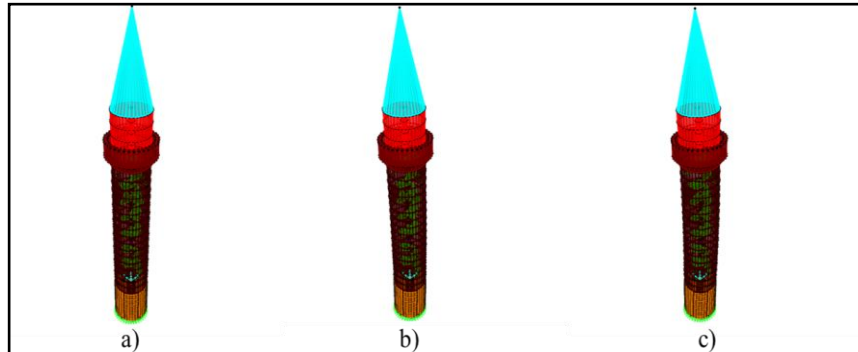
Şekil 4.16. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi sonlu eleman modeli

Cami minaresinin sonlu eleman modeli 3.411 düğüm noktalı ve 2.265 katı elemandan oluşmaktadır. Sonlu eleman modelinin malzeme özellikleri için tahribatsız deney yöntemi olan beton Schmidt çekicinden faydalanılmıştır. Lala Mustafa Paşa Camii minaresinin taş yapısının cami duvarlarıyla benzer olduğu tespit edilmiştir. Özdoğan (2024), andezit ve bazaltın duvarlarda eşit oranda olduğunu ifade etmiştir. Cami minaresi için de benzer bir durum söz konusudur. Minaredeki andezit ve bazalta beton Schmidt

çekici uygulandığında andezit için 28,0 bazalt için 27,0 değeri belirlenmiştir. Bu değerler, Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 de yerine yazıldığında andezitin basınç mukavemeti 36,89 MPa, bazaltın basınç mukavemeti 9,77 MPa olarak yazıldığında andezitin Minarenin eşit taş oranlarıyla hesaplanan taş basınç mukavemeti 23,31 MPa olarak hesaplanmıştır. Minarenin duvar basınç mukavemeti ve duvar elastisite modülü hesapları için Denklem 3.4 ve Denklem 3.5'ten faydalanılmıştır. Minarenin örülme şekli düzgün bir biçimde örüldüğünden Denklem 3.4'teki α ve β katsayıları sırasıyla 0,70 ve 0,30'tur. K değeri 0,5; harç basınç mukavemeti ise minare inşasında harç olarak Horasan harcı kullanıldığından 1,15 MPa'tır. Denklem 3.4'e bu değerler yazıldığında minarenin duvar basınç mukavemeti 4,72 MPa olarak hesaplanmıştır. Denklem 3.5 kullanılarak hesaplanan duvar elastisite modülü ise bu değer 200 katı olan 945 MPa'tır. (Özdoğan 2024). Cami minaresinde tek taş malzeme kullanıldığından sonlu eleman modelinde başka bir malzeme tanımlanmamış ve bu değer sonlu eleman modeline tanımlanmıştır. Bu şekilde minarenin teorik modal analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Çizelge 4.8'te gösterilmiştir. Minarenin teorik mod şekilleri Şekil 4.17'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi teorik modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (x yönü)	0,868
2	Uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi (y yönü)	0,889
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (z yönü)	5,502

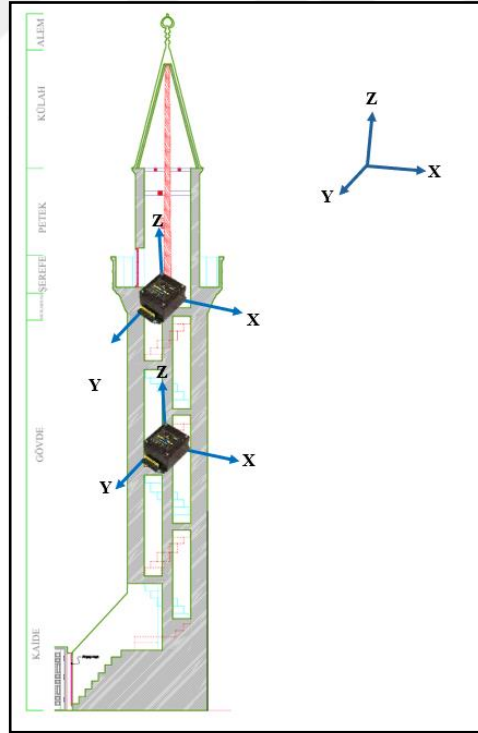


Şekil 4.17. Lala Mustafa Paşa Camii Minaresi a) kısa doğrultuda öteleme b)uzun doğrultuda öteleme c) burulma.

Minare sonlu eleman modelinde kısa doğrultu x yönü, uzun doğrultu y yönü, düşey doğrultu ise z yönü olarak ifade edilmiştir. Teorik modal analiz sonuçlarına göre, 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 hareketidir. Bu sonuçlara bağlı olarak minare şerefesine, ortasına ve tabanına ivmeölçerler bağlayıp minarede operasyonel modal analiz uygulaması yapılmıştır.

4.2.2. Lala Mustafa Paşa Camii operasyonel modal analiz uygulaması

Minarenin, dinamik davranış parametrelerinin yerinde belirlenmesi için minare üzerinde OMA uygulaması yapılmıştır. Minare içine ivme ölçer yerleşimi minarenin sonlu eleman modeli üzerinde gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçlarına göre yerleştirilmiştir. Minare ivme ölçer yerleşim krokisi Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Lala Mustafa Paşa Camii minare ivmeölçer yerleşim krokisi

Cami minaresinin sonlu eleman modelinde gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçlarına göre ilk iki mod minare öteleme modları, üçüncü mod ise burulma modudur.

Bu sonuçlar ele alındığında minarenin tabanına, merdiven ortasına ve minare şerefesine ivmeölçerler yerleştirilme kararı verilmiştir. Cami minaresinin dinamik parametrelerinin belirleme işlemi caminin gövdesiyle beraber gerçekleştirilmiştir. Caminin dinamik parametrelerinin belirlenmesi için cami köşelerine 8 adet tek eksenli ivmeölçer yerleştirilmiştir (Özdoğan 2024). Yetersiz kablo uzunluğu, ivmeölçer sayısındaki azlık gibi nedenlerden ötürü minareye 3 eksenli ivmeölçerler yerleştirilmiştir. 3 eksenli ivmeölçerlerin yönü kuzeyi gösterecek şekilde minare ortasına ve şerefesine yerleştirilmiştir. Minarenin tabanı caminin kuzeybatı duvar köşesiyle bitişiktir. Bu sebeple minare tabanı için ayrı bir ivmeölçer yerleşimi yapılmamıştır. Caminin duvar köşesine bağlanan tek eksenli 2 ivmeölçer minarenin dinamik davranış parametreleri için kullanılmıştır. Sabitleme işlemi çabuk donan alçı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. İvmeölçer sabitleme işlemi Şekil 4.19’da verilmiştir. İvmeölçerler minareye sabitlendikten sonra özel kabloları ile veri toplama ünitesine bağlanmıştır. Veri toplama sistemi Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi ivmeölçer sabitleme işlemleri

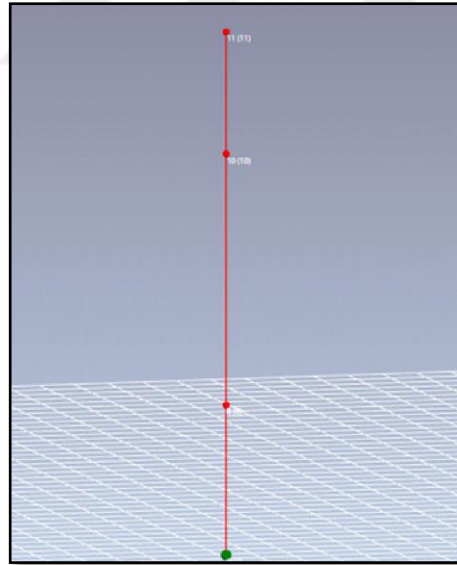


Şekil 4.20. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi OMA çalışması veri toplama sistemi

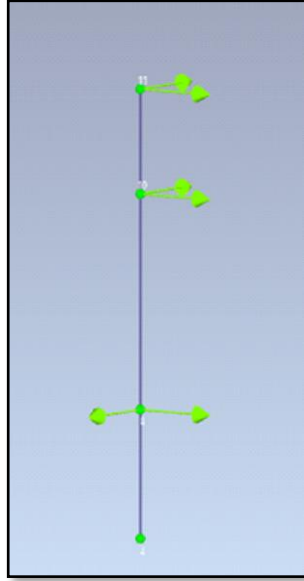
İvmeölçer sabitleme ve kontrollerin ardından kayıt alma işlemine geçilmiştir. Kayıt süresi ve sayısı olarak Pervizoğlu Camii minaresinde olduğu gibi 15'er dakikalık 6 adet kayıt alınmıştır. Bunların 3'ü 100Hz'lik, 3'ü de 200Hz'lik frekanstadır. Sürekli araç trafiğinin yoğun olduğu bir bölgede bulunmasından dolayı çevresel titreşim sürekli camiye etki etmektedir. Ancak her ihtimale karşı cami minaresine plastik tokmak ile vurularak yapay bir titreşim oluşturulmuştur(Özdoğan 2024).

Kayıt işlemlerinin ardından elde edilen kayıtlar minarenin deneysel mod şekillerini belirlemek için kullanılmıştır. Bu kayıtlar Artemis Modal Pro (2023) yazılımına aktarılmıştır. Yazılım bu kayıtları özel denklem ve çözüm yöntemleri yardımıyla analiz ederek minarenin deneysel mod şekillerini ortaya çıkarmaktadır

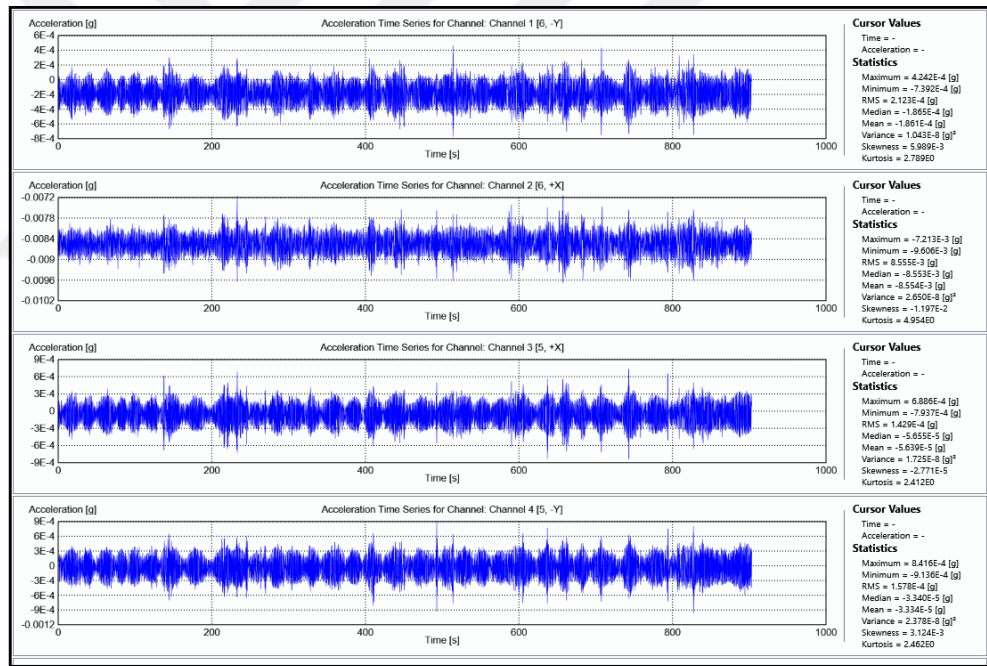
Oluşturulan Lala Mustafa Paşa Camii ve minaresi temsili modeli Şekil 4.21'de, ivmeölçer tanımlamaları Şekil 4.22'de, titreşim kayıtları Şekil 4.23'te ve spektral yoğunluk fonksiyonları de Şekil 4.24'te gösterilmektedir.



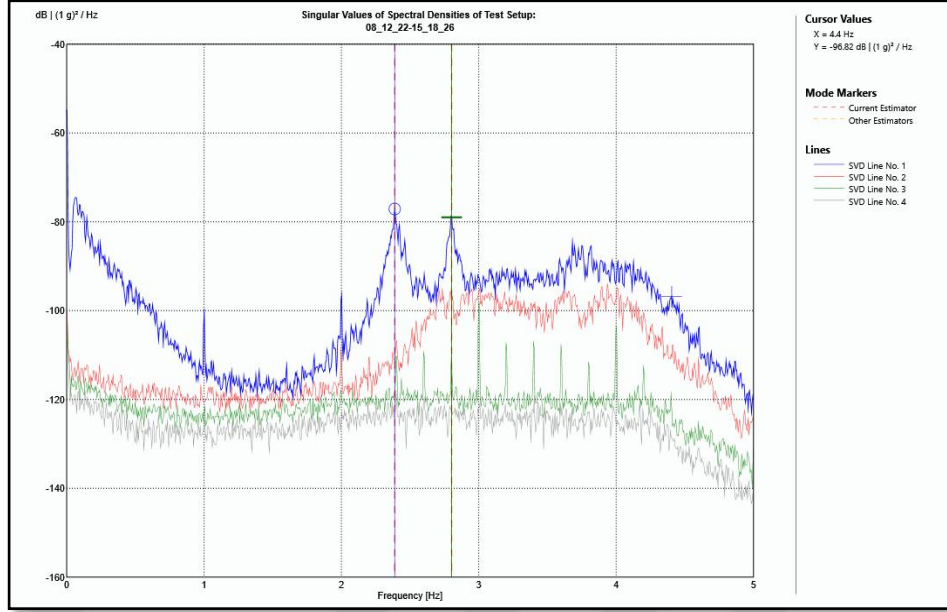
Şekil 4.21.Lala Mustafa Paşa Camii minaresi yazılım görüntüsü



Şekil 4.22. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi ivmeölçer yön tanımlanması



Şekil 4.23. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi titreşim kayıtları



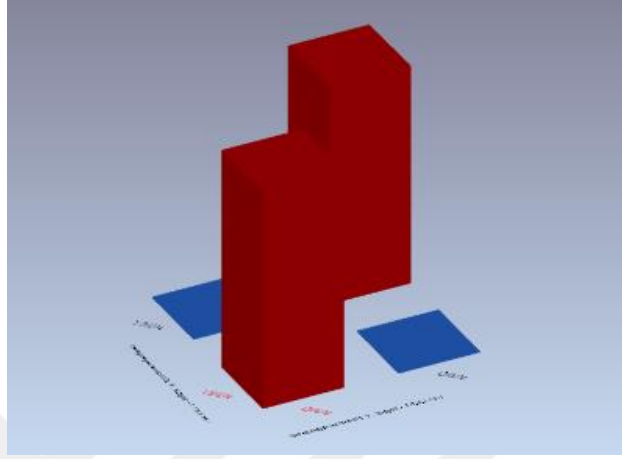
Şekil 4.24. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi spektral yoğunluk fonksiyonu

Titreşim kayıtları frekans alanında ayrıştırma (FDD) analiz yöntemi ile çözümlenerek minarenin modal davranış parametreleri belirlenmiştir. Lala Mustafa Paşa Camii minaresinin Operasyonel mod şekilleri ve modal frekans değerleri Çizelge 4.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi OMA çalışması sonuçları

Mod Şekli	Frekans (Hz)
X yönünde (kısa doğrultuda) öteleme hareketi	2,368
Y yönünde (uzun doğrultuda) yatay öteleme hareketi	2,808

Yapılan OMA sonuçlarının güvenilir olup olmadığının belirlenmesi için MAC değerleri kontrol edilmiştir. Şekil 4.25'te Lala Mustafa Paşa Camii minaresi OMA sonuçlarına ait MAC değerleri grafiği ve Çizelge 4.10'da ise OMA değerlerine ait MAC tablosu aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.25. Lala Mustafa Paşa minaresi MAC grafiği

Çizelge 4.10. Lala Mustafa Paşa minaresi MAC değerleri tablosu

Frekans (Hz)	2,368	2,808
2,368	1	0,002042
2,808	0,002042	1

Çizelge 4.10'da MAC değerleri tablosu incelendiğinde modlar arasındaki MAC değerlerinin 0'a yakın olduğu ve modların birbirinden ayrık olduğu görülmüştür. Bu tablo gerçekleştirilen OMA'nın güvenilir olduğunun göstergesidir

4.3.3. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi model kalibrasyon çalışması

Lala Mustafa Paşa Camii minaresinde gerçekleştirilen OMA sonrası, minarenin hem teorik hem de dinamik davranış parametreleri belirlenmiştir. Bu sonuçlar karşılaştırılarak, sonlu eleman modelinde herhangi bir güncellenmeye gerek olup olmadığı değerlendirilmiştir. Lala Mustafa Paşa camii minaresinin ilk teorik ve OMA sonuçları toplu halde Çizelge 4.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi ilk teorik modal analiz ve OMA sonuçları.

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi (X yönü)	2,368	0,868	63,34
2	Uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi (Y yönü)	2,808	0,889	68,34
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (Z yönü)	-	5,502	-

Çizelge 4.11'deki sonuçlar karşılaştırıldığında minare sonlu eleman modelinde gerçekleştirilen ilk teorik modal analiz sonuçları ile minarenin OMA sonuçlarının birbirinden çok farklı olduğu ve hata oranlarının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu farkın asgari düzeye indirilmesi ve sonlu eleman model davranış parametrelerinin, minarenin dinamik davranış parametrelerini yansıtabilmesi için minarenin sonlu eleman modelinin güncellenmesi yani model kalibrasyon gerekmektedir. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi için ilk teorik modal analizdeki değerler baz alınarak taş malzeme için elastisite modül kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi için tekrarlı işlemler sonucunda ulaşılan elastisite modül değerleri Çizelge 4.12'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.12. Lala Mustafa Paşa minaresi elastisite modül kalibrasyon değerleri

Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)
Taş	7.000 MPa

Çizelge 4.12'deki elastisite modül değeri Lala Mustafa Paşa minaresinin sonlu eleman modeline tanıtıldığında, minare dinamik davranış parametrelerine en yakın davranış parametrelerinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 4.13'te bu sonuçlar ile minare OMA sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.13. Lala Mustafa Paşa Camii minaresi kalibreli teorik modal analiz ve OMA sonuçları.

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi (X yönü)	2,368	2,362	0,25
2	Uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi (Y yönü)	2,802	2,397	14,00
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (Z yönü)	-	16,180	-

Çizelge 4.13'teki sonuçlar karşılaştırıldığında kalibrasyonu tamamlanmış minare sonlu eleman modeliyle, OMA sonuçlarının yakın olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Özellikle ilk mod hata oranı % 0,25'tir. Bu sonuçlar, Lala Mustafa Paşa minaresi için gerçekleştirilen model kalibrasyon güncellenmesinin doğru olduğunu göstermektedir.

4.3. Erzurum Ulu Camii

1179 yılında inşa edilen Ulu Camii ile ilgili ayrıntılı bilgiler Bölüm 3.7.3'te verilmiştir. Bu kısımda, cami minaresi ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

Minare, caminin kuzeybatı köşesinde konumlanmıştır. Ulu Camii'nin minaresi, alt bölgesi moloz taş, üst bölgesi ise kesme taşla yapılmış yüksek kare planlı bir kaide üzerine oturan silindirik bir gövdeye sahiptir. Kaide kısmı, kesme taş ve moloz taş malzemelerin bir arada kullanılmasıyla inşa edilmiştir. Minarenin üst kısmındaki kapıya kaide ile caminin kuzey duvarı arasında konumlandırılmış bir merdivenle ulaşılmaktadır. Minarenin pabucu, çatı seviyesinde başlamaktadır. Bu bölümün doğusunda yer alan çatıya çıkılabilen kapı Şekil 4.26'da gösterilmiştir.



şekil 4.26. Ulu Camii minaresinden çatıya geçiş kapısı

Minare içerisinde bazı sorunlar ve derin kılcal çatlaklar gözlemlenmektedir. Ayrıca minarenin tuğla yüzeylerinde ufalanmalar ve renk değişimleri gözlemlenmektedir. Gözlemlenen çatlaklar şekil 4.27’de gösterilmiştir.



şekil 4.27. Ulu Camii minaresinde gözlemlenen çatlaklar

Ulu Cami minaresinin dış görünümü şekil 4.28’de gösterilmiştir.



Şekil 4.28. Ulu Camii minaresi

Gövde, şerefe altına kadar tuğladan örülmüş olup, bu seviyeden itibaren yeniden kesme taş kullanılarak devam ettirilmiştir. Şerefe korkulukları da kesme taştan yapılmıştır. Minarenin şerefesiyle şerefenin altında bulunan 2 sıra mukarnas, taş malzemeyle inşa edilmiştir. Şerefenin üst kısmında yer alan tuğla petek bölümünün üzeri, bakır levhalarla kaplanmış külâh ile taçlandırılmıştır.

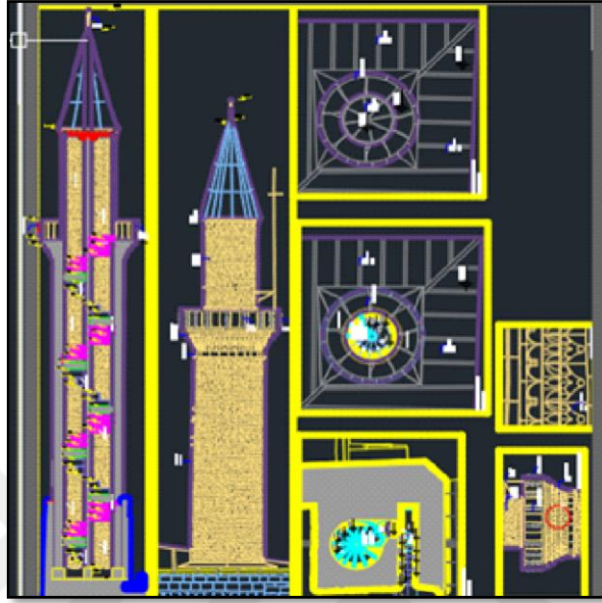
Caminin minaresinin de bulunduğu batı tarafında Papuccuzade Hazretlerinin türbesi ve kesme taş ile yapılmış camiye bitişik olan bir çeşme bulunmaktadır.

Cami minaresinin yerden yüksekliği yaklaşık 30 m'dir. Cami minaresi camiye bitişik bir vaziyette 10 m'lik bir kaide üzerinde konumlanmıştır. Cami minaresinin dış çapı 1,80 m'dir. Cami şerefesi yerden 20 m yükseklikte konumlanmış olup yüksekliği 80 cm'dir. Şerefe çapı 4,13 m'dir. Şerefeye 45 basamaklı merdivenle çıkılmaktadır.

4.3.1. Ulu Camii Minaresi sonlu eleman modeli

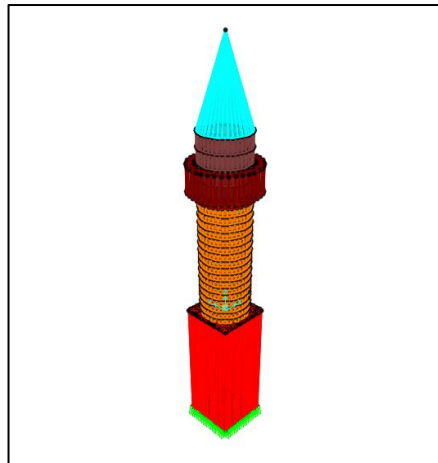
Lala Mustafa Paşa Camii minaresinin sonlu eleman modellemesini ardından Ulu Camii'nin minaresinin sonlu eleman modellemesi gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman modelleme aşamaları, Lala Mustafa Paşa Camii minaresi sonlu eleman modeli için bahsedilen koşullarla aynı koşullar altında gerçekleştirilmiştir.

Ulu camii minaresinin rölevesi incelendikten sonra minarenin modellemede kullanılacak nihai boyutlarının belirlenmesi için keşfe gidilmiş ve nihai boyutlar belirlenmiştir. Minare rölevesi Şekil 4.29’da gösterilmiştir.



Şekil 4.29. Ulu Camii minare rölevesi

Nihai boyutların belirlenmesinin ardından Ulu Camii’nin minaresi SAP 2000 yazılımında oluşturulmuştur. Minarenin sonlu eleman modeli Şekil 4.30’da gösterilmiştir.



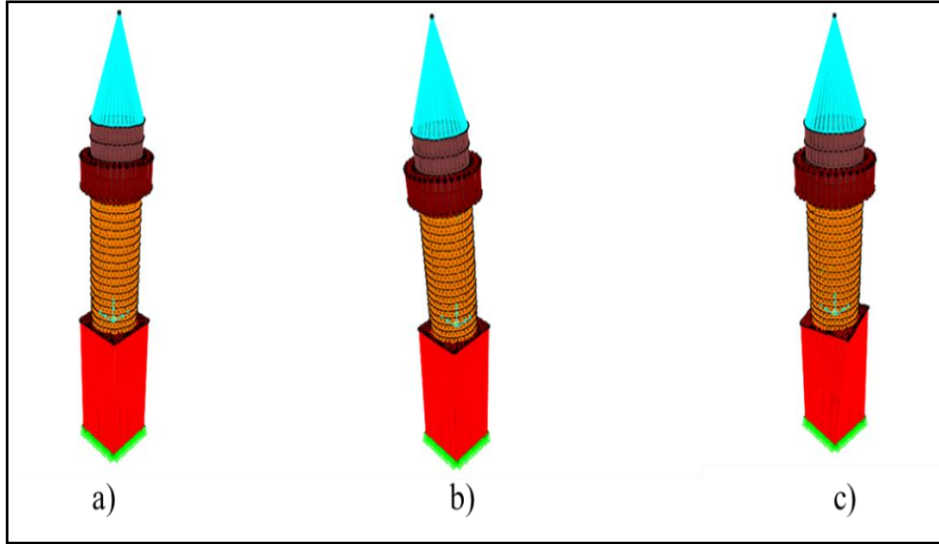
Şekil 4.30. Ulu Camii minaresi sonlu eleman modeli

Cami minaresinin sonlu eleman modeli 3.483 düğüm noktalı ve 1.936 katı elemandan oluşmaktadır. Sonlu eleman modelinin malzeme özellikleri için tahribatsız deney yöntemi olan beton Schmidt çekicinden faydalanılmıştır. Diğer camilerden farklı olarak Ulu Camii'nin duvar taşlarının Erzurum'a özgü Sivişli taşından inşa edildiği Erkmen (2022) çalışmasında bahsedilmiştir. Bu nedenle, duvar mekanik özellikleri hesaplanırken Denklem 3.3'ten yararlanılmıştır.

Ulu Cami minaresi incelendiğinde caminin dış sütunu ve petek kısmının tuğladan; kaide, merdiven, iç silindir ve şerefe kısmının Sivişli taşından imal edildiği gözlenmiştir. Minarenin bu kısımlarının sertlik değerleri beton Schmidt çekici yardımıyla 24,48 olarak elde edilmiştir. Bu sertlik değeri, Denklem 3.3'te yerine konulduğunda ortalama Sivişli taşı basınç mukavemeti değeri 17,20 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değer kullanılarak, minarenin taş kısımlarının duvar basınç mukavemeti ve duvar elastisite modülleri Denklem 3.4 ve Denklem 3.5 yardımıyla belirlenmiştir. K değeri 0,5; α ve β değerleri duvarlar düzgün bir biçimde örüldüğü için sırasıyla 0,70 ve 0,30; kullanılan harç türü Horasan harcı olduğu için harç basınç mukavemeti 1,15 MPa alınmıştır. Bu bağıntı kullanarak ortalama minare duvar basınç mukavemeti 4,89 MPa, minare duvarı elastisite modül değeri ise 978 MPa olarak hesaplanmıştır (Özdoğan 2024) Tuğla kısmı için ise Schmidt çekici testi sonucunda tuğlanın taşa göre daha yumuşak bir yüzeye sahip olması nedeniyle sertlik değeri elde edilememiştir. Pervizoğlu Camii minaresinde tuğla kısım için kullanılan 850 MPa elastisite modül değeri, Ulu Camii minaresinin tuğla kısmı için de tanımlanmıştır. Bu değerler yardımıyla minarenin teorik modal analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.14'te gösterilmiştir. Minarenin teorik mod şekilleri Şekil 4.31'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.14. Ulu Camii minaresi teorik modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (x yönü)	0,890
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (y yönü)	0,913
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (z yönü)	4,064

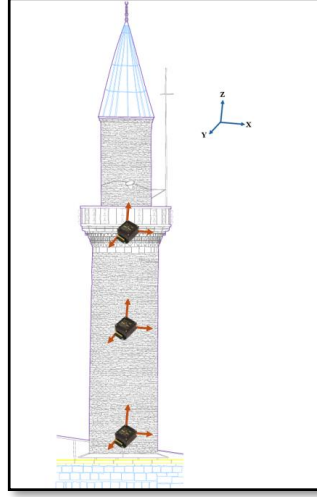


Şekil 4.31. Ulu Camii minaresi a) kısa doğrultuda öteleme b)uzun doğrultuda öteleme c)burulma.

Minare sonlu eleman modelinde kısa doğrultu x yönü, uzun doğrultu y yönü, düşey doğrultu ise z yönü olarak ifade edilmiştir. Teorik modal analiz sonuçlarına göre, 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 hareketidir. Bu sonuçlara bağlı olarak minare şerefesine, ortasına ve tabanına ivmeölçerler bağlayıp minarede operasyonel modal analiz uygulaması yapılmıştır.

4.3.2. Ulu Camii Minaresi operasyonel modal analiz uygulaması

Ulu Cami minaresinin dinamik davranış parametrelerinin yerinde belirlenmesi için minare üzerinde operasyonel modal analiz uygulaması yapılmıştır. Caminin uzun ve geniş olması sebebiyle minaresi cami gövdesinden ayrı çalışılmıştır. Cami minaresinin OMA ölçümünde diğer camilerden farklı olarak minare tabanına 3 eksenli ivmeölçer yerleştirilmiştir. Minare ivme ölçer yerleşim krokisi Şekil 4.32’de gösterilmiştir



Şekil 4.32. Ulu Camii minare ivmeölçer yerleşim krokisi

3 eksenli ivmeölçerlerin yönü kuzeyi gösterecek şekilde minare girişine, ortasına ve şerefesine yerleştirilmiştir. Sabitleme işlemi sıcak silikon ve çabuk donan alçı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sabitleme işlemi Şekil 4.33'te gösterilmiştir. İvmeölçerler minareye sabitlendikten sonra özel kabloları ile veri toplama ünitesine bağlanmıştır. Şekil 4.34'te veri toplama sistemi gösterilmiştir.



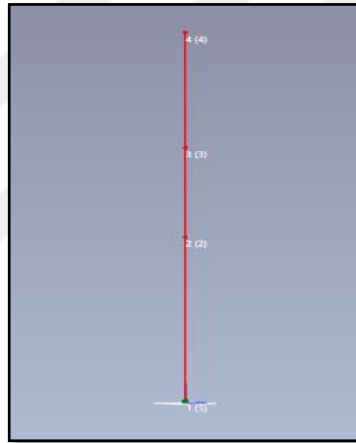
Şekil 4.33. Ulu Cami minaresi ivmeölçer sabitleme işlemi



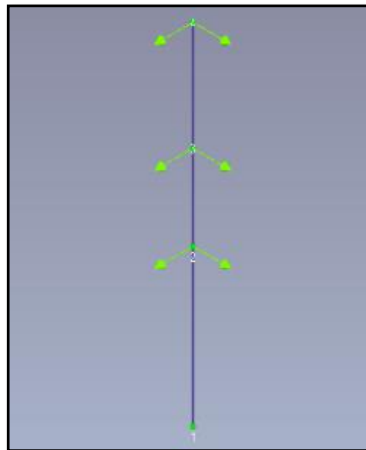
Şekil 4.34. Ulu Cami minaresi OMA çalışması veri toplama sistemi

Bütün kontroller yapıldıktan sonra minareden 15'er dakikalık 6 adet kayıt alınmıştır. Bunların 3'ü 100Hz'lik, 3'ü de 200Hz'lik frekanstadır. Sürekli araç trafiğinin yoğun olduğu bir bölgede bulunmasından dolayı çevresel titreşim sürekli camiye etki etmektedir. Ancak her ihtimale karşı cami minaresine plastik tokmak ile vurularak yapay bir titreşim oluşturulmuştur (Özdoğan 2024). Kayıt işlemlerinin ardından elde edilen kayıtlar minarenin deneysel mod şekillerini belirlemek için kullanılmıştır. Bu kayıtlar Artemis Modal Pro (2023) yazılımına aktarılmıştır. Yazılım bu kayıtları özel denklem ve çözüm yöntemleri yardımıyla analiz ederek minarenin deneysel mod şekillerini ortaya çıkarmaktadır.

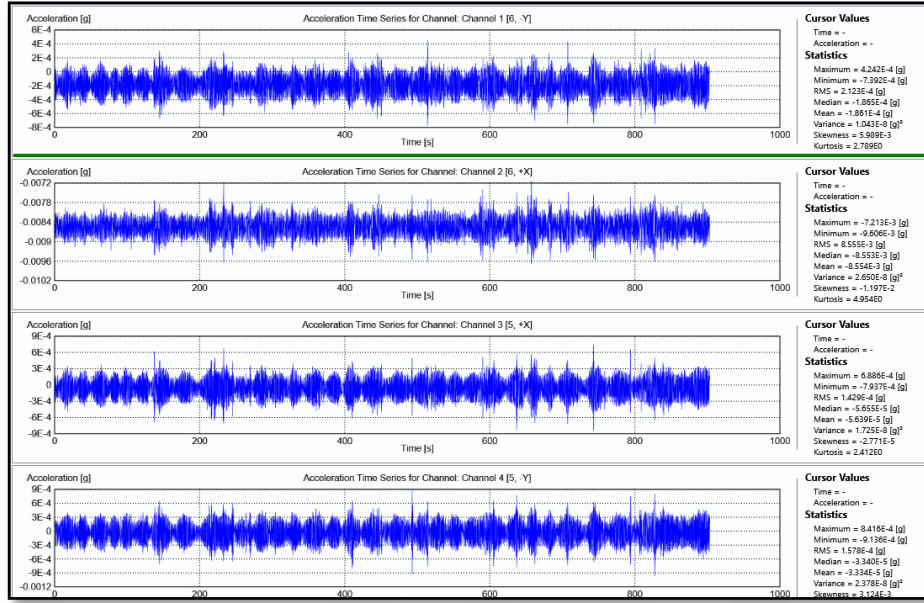
Ulu Camii minare temsili modeli Şekil 4.35'te, ivmeölçer tanımlamaları Şekil 4.36'da, titreşim kayıtları Şekil 4.37'de ve spektral yoğunluk fonksiyonları de Şekil 4.38'de gösterilmektedir.



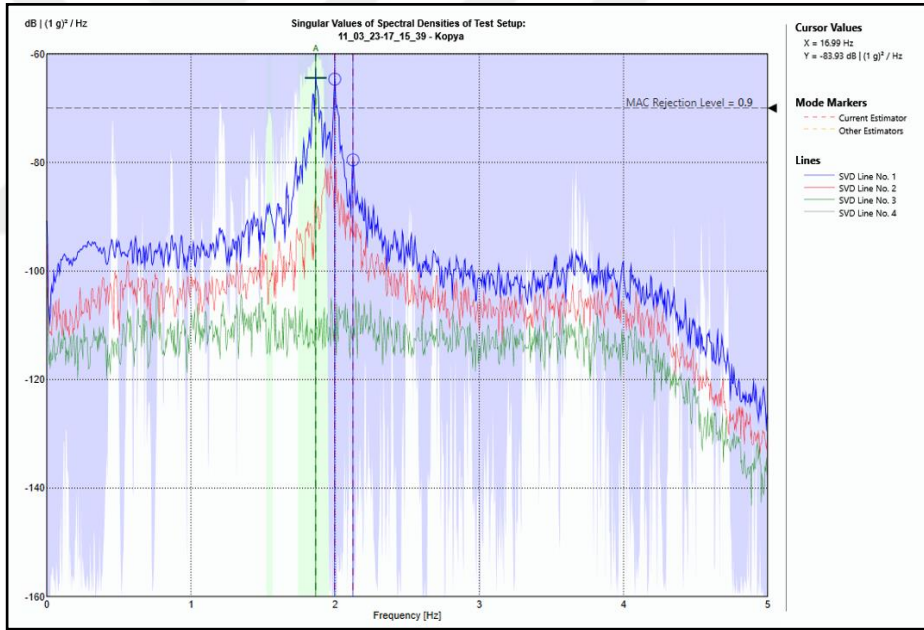
Şekil 4.35. Ulu Camii minaresi yazılım geometrisi



Şekil 4.36. Ulu Camii minaresi ivmeölçer ve yönlerin tanımlanması



Şekil 4.37. Ulu Camii minaresi titreşim kayıtları



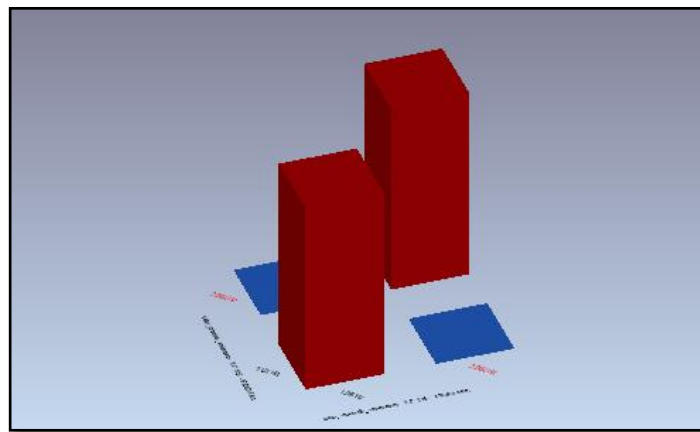
Şekil 4.38. Ulu Camii minaresi spektral yoğunluk fonksiyonları

Titreşim kayıtları frekans alanında ayrıştırma (FDD) analiz yöntemi ile çözümlenerek minarenin modal davranış parametreleri belirlenmiştir Ulu Camii minaresinin Operasyonel mod şekilleri ve modal frekans değerleri Çizelge 4.15'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.15. Ulu Camii minaresi OMA sonuçları

Mod Şekli	Frekans (Hz)
Kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi	1,865
Uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi	1,997

Yapılan OMA sonuçlarının güvenilir olup olmadığının belirlenmesi için MAC değerleri kontrol edilmiştir. Şekil 4.47’de Ulu Camii minaresi OMA sonuçlarına ait MAC değerleri grafiği ve Çizelge 4.29’da ise MAC değerleri tablosu verilmiştir.

**Şekil 4.39.** Ulu Camii minaresi MAC değerleri

Çizelge 4.16. Ulu Camii minaresi MAC değerleri tablosu

Frekans (Hz)	1,865	1,997
1,865	1	0,0007733
1,997	0,0007733	1

Çizelge 4.16’da MAC değerleri tablosu incelendiğinde modlar arasındaki MAC değerlerinin 0’a yakın olduğu ve modların birbirinden ayrık olduğu görülmüştür. Bu tablo gerçekleştirilen OMA çalışmasının güvenilir olduğunun göstergesidir.

4.3.3. Ulu Camii minaresi model kalibrasyon çalışması

Ulu Camii minaresinde gerçekleştirilen OMA çalışması sonrası, minarenin hem teorik hem de dinamik davranış parametreleri belirlenmiştir. Bu sonuçlar karşılaştırılarak, sonlu eleman modelinde herhangi bir güncellenmeye gerek olup olmadığı değerlendirilmiştir. Ulu camii minaresinin ilk teorik ve OMA sonuçları toplu halde Çizelge 4.17’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.17. Ulu Camii minaresi ilk teorik modal analiz ve OMA sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (X yönü)	1,865	0,890	52,2
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (Y yönü)	1,997	0,913	54,28
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (Z yönü)	-	4,064	-

Çizelge 4.17’deki sonuçlar karşılaştırıldığında minare sonlu eleman modelinde gerçekleştirilen ilk teorik modal analiz sonuçları ile minarenin OMA sonuçlarının birbirinden çok farklı olduğu ve hata oranlarının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu farkın asgari düzeye indirilmesi ve sonlu eleman model davranış parametrelerinin,

minarenin dinamik davranış parametrelerini yansıtabilmesi için minarenin sonlu eleman modelinin güncellenmesi yani model kalibrasyon gerekmektedir.

Çizelge 4.18. Ulu Camii minaresi elastite modül kalibrasyon değerleri

Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)
Taş	3.600 MPa
Tuğla	3.900 MPa

Çizelge 4.18'deki değerler, Ulu Camii minaresinin sonlu eleman modeline tanıtıldığında, minare dinamik davranış parametrelerine en yakın davranış parametrelerinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 4.19'da bu sonuçlar ile minare OMA sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.19. Ulu Camii Minaresi kalibreli teorik modal analiz sonuçları ile OMA sonuçları.

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (X yönü)	1,865	1,861	0,21
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (Y yönü)	1,997	1,907	4,50
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (Z yönü)	-	7,21	-

Çizelge 4.19'daki sonuçlar karşılaştırıldığında kalibrasyonu tamamlanmış minare sonlu eleman modeliyle, OMA sonuçlarının yakın olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Özellikle ilk iki mod şeklindeki hata oranları % 0,21 ve % 4,50 düzeyindedir. Bu sonuçlar, Ulu Camii minaresi için gerçekleştirilen model kalibrasyon güncellenmesinin doğru olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

4.4. Murat Paşa Camii

1572 yılında inşa edilen Murat Paşa Camii ile ilgili ayrıntılı bilgiler Bölüm 3.7.4’te verilmiştir. Bu kısımda, cami minaresi ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

Minare, diğer camilerin aksine cami yapısından bağımsız olarak caminin kuzey cephesinin doğu köşesine birkaç metre uzaklıkta konumlandırılmış olup tümüyle düzgün kesme taş malzeme ile inşa edilmiştir. Plan düzleminde, minarenin kaidesi dıştan sekizgen, içten dairesel olarak tasarlanmış; bu geometrik kurgu, yapının yükselmesiyle birlikte dışta dairesel bir forma evrilmiş ve bu biçimsel devamlılık şerefe kotuna kadar sürdürülmüştür. Şekil 4.40’da minare gösterilmiştir.



Şekil 4.40. Murat Paşa Camii minaresi

Şerefe altında, taş malzeme kademeli olarak dışa doğru taşırılarak, şerefe çıkıntısı mimari bir düzen içerisinde oluşturulmuştur. Minare gövdesinde, zemin seviyesinden şerefeye kadar düzgün örgü sistemi uygulanmış; şerefe hizasından itibaren ise bu örgü sistemi, estetik ve zanaatkârlık açısından farklılık arz eden mozaik örgü sistemine dönüştürülmüştür. Külâh kısmına yaklaşırken örgü sistemi yeniden düz örgüye evrilmiş; bu düz örgü, külâhın başlangıcına kadar yaklaşık bir metre boyunca devam ettirilmiştir. Minare, konik formlu külâh ile sonlandırılmış ve külâhın ucuna, geleneksel Osmanlı minare mimarisinin tamamlayıcı unsurlarından biri olan alem yerleştirilmiştir. Minare yapıldığı şekli ile korunmuş, herhangi bir değişikliğe uğramamıştır.

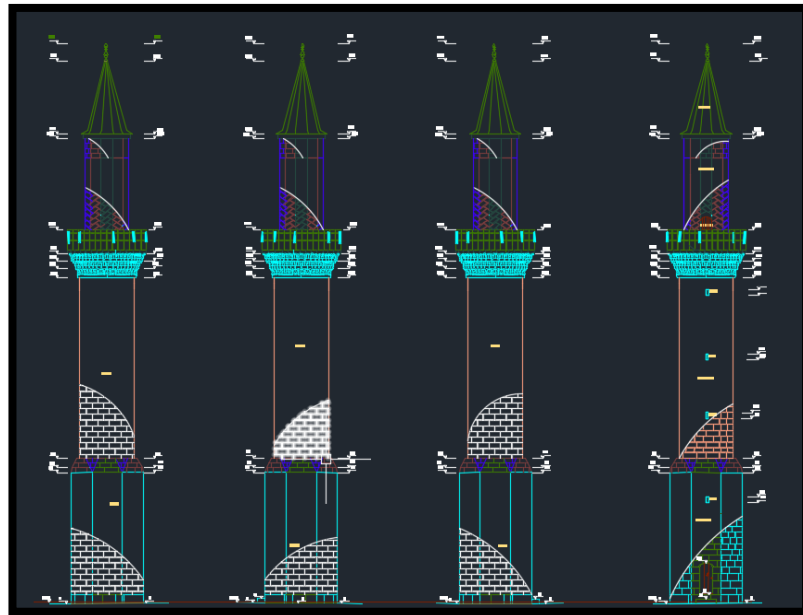
Cami minaresinin yerden yüksekliği yaklaşık 30 m'dir. Cami minaresi camiden bağımsız şekilde ayrı bir vaziyettedir. Caminin 6,89 m kotuna kadar olan dış çapı 3,89 m; bu kottan yukarı dış çapı ise 3,03 m'dir. Şerefe çapı 3,04 m'dir. Şerefenin yerden yüksekliği 17,28 m olup şerefenin yüksekliği 2,56 m'dir. Şerefeye 72 basamaklı merdivenle çıkılmaktadır.

Cami en son 2007 yılında restorasyon geçirmiştir (Çelemoğlu 2015; Özdoğan 2024) Bu restorasyonda minare kısmı ise yapısal boyutta detaylı bir restorasyon geçirmemiş olup şerefedeki kesme taşlar değiştirilmiştir.

4.4.1. Murat Paşa Camii teorik modal analiz uygulaması

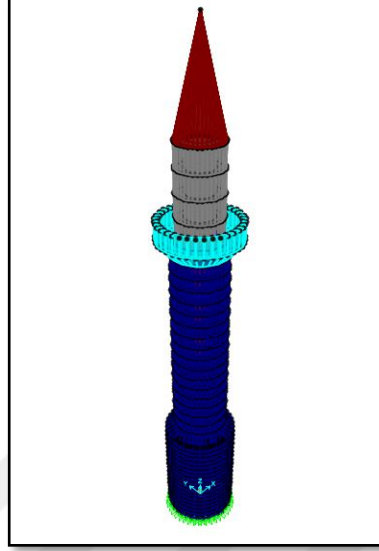
Ulu Camii minaresinin sonlu eleman modellemesini ardından Murat Paşa Camii'nin minaresinin sonlu eleman modellemesi gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman modelleme aşamaları, önceki cami minarelerin sonlu eleman modeli için bahsedilen koşullarla aynı koşullar altında gerçekleştirilmiştir.

Murat Paşa camii minaresinin rölevesi incelendikten sonra minarenin modellemede kullanılacak nihai boyutlarının belirlenmesi için yerinde keşfe gidilmiş ve nihai boyutlar belirlenmiştir. Minare rölevesi Şekil 4.41'de gösterilmiştir.



Şekil 4.41. Murat Paşa Camii minare rölevesi

Nihai boyutların belirlenmesinin ardından Murat Paşa Camii minaresi SAP 2000 yazılımında oluşturulmuştur. Minarenin sonlu eleman modeli Şekil 4.42’de gösterilmiştir.



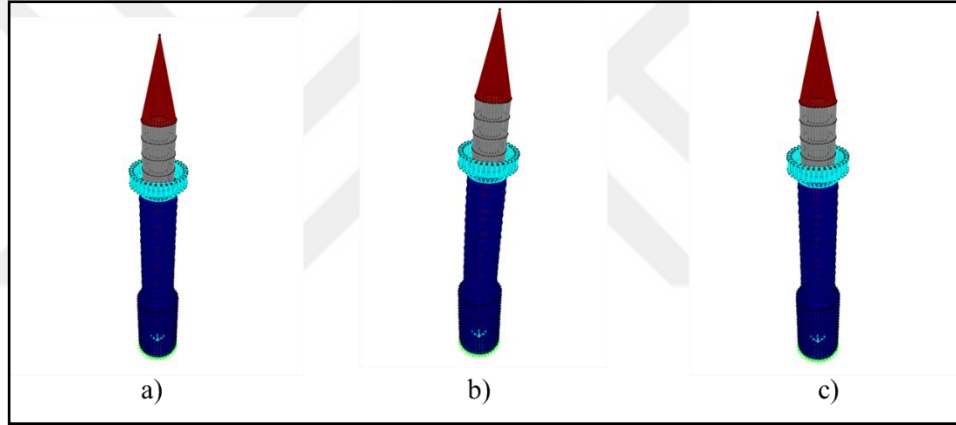
Şekil 4.42. Murat Paşa camii minaresi sonlu eleman modeli

Minarenin sonlu eleman modeli 4.438 düğüm noktalı ve 2.397 katı elemandan oluşmaktadır. Sonlu eleman modelinin malzeme özellikleri için tahribatsız deney yöntemi olan beton Schmidt çekicinden faydalanılmıştır. Murat Paşa Camii minaresinin taş yapısı cami duvarıyla benzer yapıdadır. Özdoğan (2024), camide ağırlıklı olarak andezit taşının hâkim olduğunu, az da olsa bazalt taşlarının bulunduğunu belirtmiştir. Cami minaresi için de benzer bir durum söz konusudur. Minaredeki andezit ve bazalt taşlarına beton Schmidt çekici etkitildiğinde andezit için 25,5 bazalt için 19,5 değeri belirlenmiştir. Bu değerler, Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 de yerine yazıldığında andezitin basınç mukavemeti 23,40 MPa; bazaltın basınç mukavemeti 8,00 MPa olarak belirlenmiştir. Minaredeki taş oranları yüzdesel olarak %70 andezit %30 bazalt biçimindedir ve bu oranlara göre ortalama taş basınç mukavemeti 20,05 MPa olarak hesaplanmıştır. Minarenin duvar basınç mukavemeti ve duvar elastisite modülü hesapları için Denklem 3.4 ve Denklem 3.5’ten faydalanılmıştır. Minarenin örülme şekli düzgün bir biçimde örüldüğünden Denklem 3.4’teki α ve β katsayıları sırasıyla 0,70 ve 0,30’tur. K değeri 0,5; harç basınç mukavemeti ise imalatla Horasan harcı kullanıldığından 1,15 MPa’dır. Denklem 3.4’e bu değerler yazıldığında minarenin duvar basınç mukavemeti 4,28 MPa; duvar elastisite modülü ise bu değer 200 katı olan 856 MPa’dır. (Özdoğan 2024). Cami minaresinde tek taş

malzeme kullanıldığından sonlu eleman modelinde başka bir malzeme tanımlanmamış ve bu değer sonlu eleman modeline tanımlanmıştır. Bu şekilde minarenin teorik modal analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.20’de gösterilmiştir. Minarenin teorik mod şekilleri Şekil 4.43’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.20. Murat Paşa Camii minaresi teorik modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (x yönü)	0,528
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (y yönü)	0,531
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (z yönü)	3,265

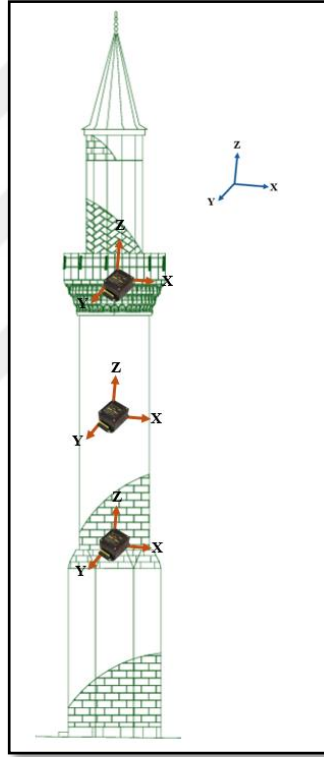


Şekil 4.43. Murat Paşa Camii minaresi a)kısa doğrultuda öteleme b) uzun doğrultuda öteleme c) burulma.

Minare sonlu eleman modelinde kısa doğrultu x yönü, uzun doğrultu y yönü, düşey doğrultu ise z yönü olarak ifade edilmiştir. Teorik modal analiz sonuçlarına göre, 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 hareketidir. Bu sonuçlara bağlı olarak minare şerefesine, ortasına ve tabanına ivmeölçerler bağlayıp minarede operasyonel modal analiz uygulaması yapılmıştır.

4.4.2. Murat Paşa Camii minaresi operasyonel modal analiz uygulaması

Murat Paşa Camii minaresinin dinamik davranış parametrelerinin yerinde belirlenmesi için minare üzerinde OMA çalışması yapılmıştır. Cami diğer kubbeli camilerden farklı bir özelliğe sahiptir. Caminin minaresi diğer camilerde olduğu gibi camiye bitişik değildir. Minare camiden ayrı olarak inşa edilmiştir. Bu sebeple ivmeölçer yerleşimi Ulu Camii minaresi OMA çalışmasındaki gibi gerçekleştirilmiştir. Minare şerefesinde ve orta noktasında olduğu gibi cami tabanına da 3 eksenli ivmeölçer yerleştirilmiştir. Minare krokisi Şekil 4.44'te gösterilmiştir.

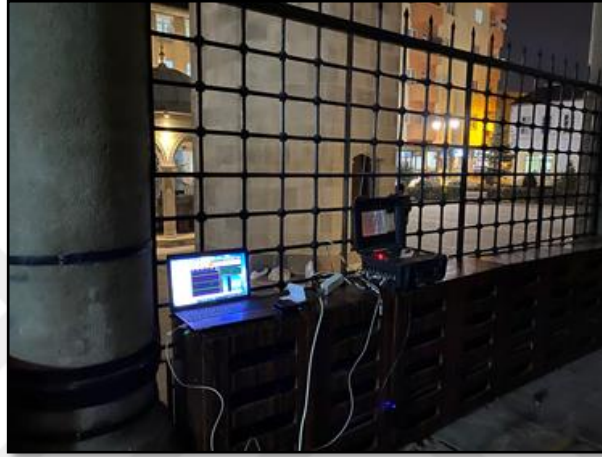


Şekil 4.44. Murat Paşa Camii minaresi ivmeölçer yerleşim krokisi

3 eksenli ivmeölçerlerin yönü kuzeyi gösterecek şekilde minare girişine, ortasına ve şerefesine yerleştirilmiştir. Sabitleme işlemi çabuk donan alçı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sabitleme işlemi Şekil 4.45'te gösterilmiştir. İvmeölçerler minareye sabitlendikten sonra özel kablolar yardımı ile veri toplama ünitesine bağlanmıştır. Şekil 4.46'da veri toplama sistemi gösterilmiştir.



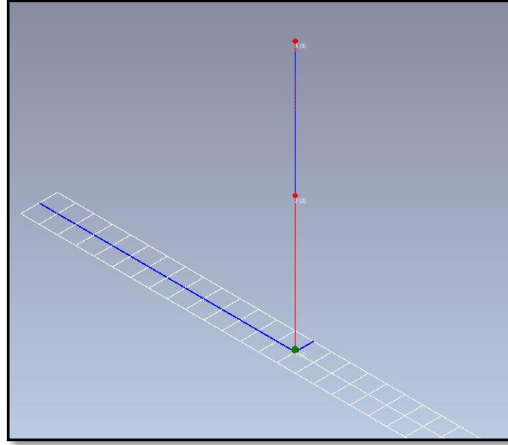
Şekil 4.45. Murat Paşa Camii minaresi ivmeölçer sabitleme işlemi



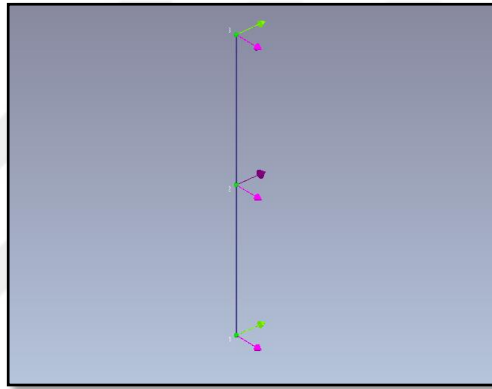
Şekil 4.46. Murat Paşa Camii minaresi OMA çalışması ve veri toplama sistemi

Bütün kontroller yapıldıktan sonra minareden diğer minarelerdeki gibi 15'er dakikalık 6 adet kayıt alınmıştır. Bunların 3'ü 100Hz'lik, 3'ü de 200Hz'lik frekanstadır. Cami, araç trafiğinin yoğun olduğu bir bölgede bulunmadığından camiye ve minareye titreşim sürekli etki etmemektedir. Bu nedenle cami minaresine plastik tokmak ile vurularak yapay bir titreşim oluşturulmuştur (Özdoğan 2024). Kayıt işlemlerinin ardından elde edilen kayıtlar Artemis Modal Pro (2023) yazılımına aktarılarak minarenin operasyonel mod şekillerini belirlenmiştir. Bu kayıtlar yazılımda var olan özel denklem ve çözüm yöntemleri yardımıyla analiz ederek minarenin operasyonel mod şekillerini ortaya çıkarmaktadır.

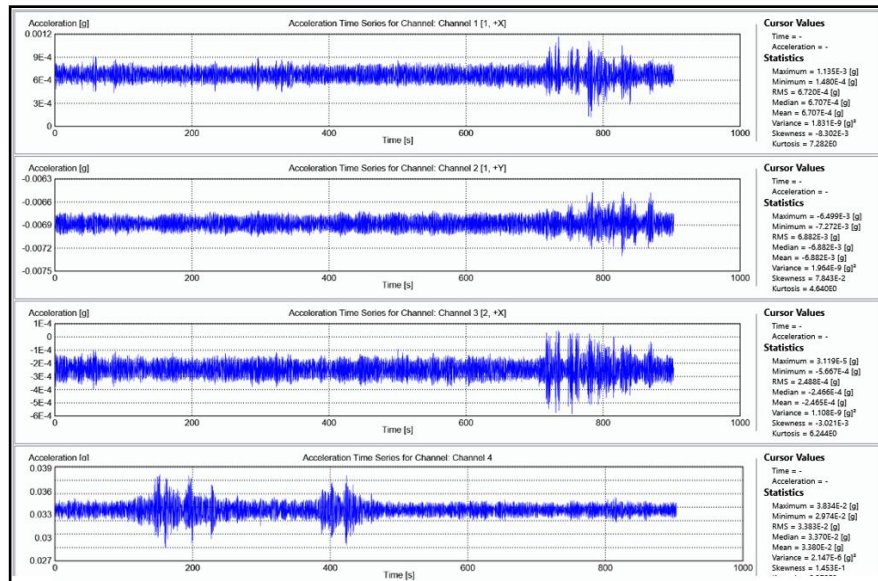
Murat Paşa minare temsili modeli Şekil 4.47'de, ivmeölçer tanımlamaları Şekil 4.48'te, titreşim kayıtları Şekil 4.49'da ve spektral yoğunluk fonksiyonları de Şekil 4.50'da gösterilmiştir.



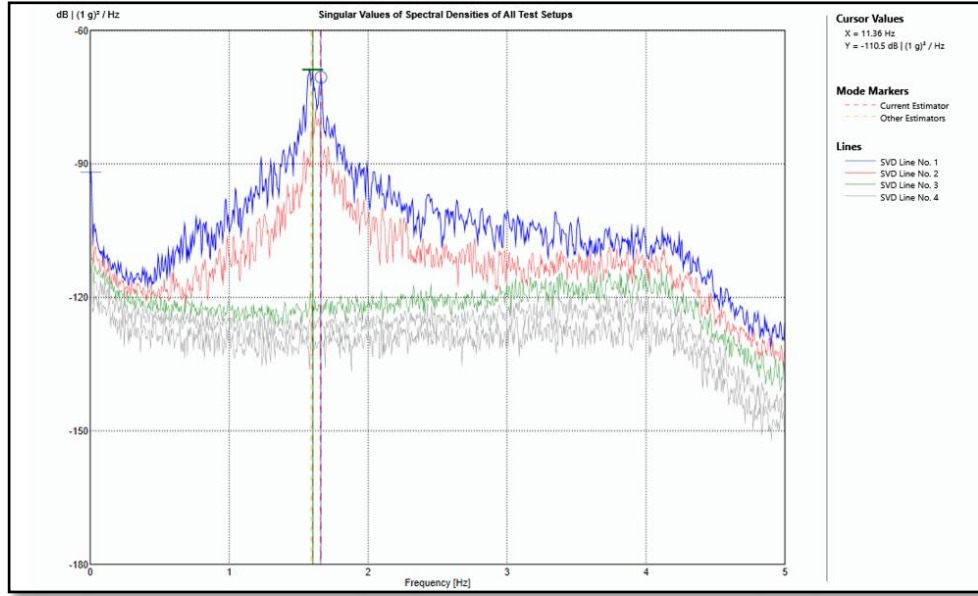
Şekil 4.47. Murat Paşa Camii minaresi yazılım modeli



Şekil 4.48. Murat Paşa Camii minaresi ivmeölçer yerleşim ve tanımlamaları



Şekil 4.49. Murat Paşa Camii minaresi titreşim kayıtları



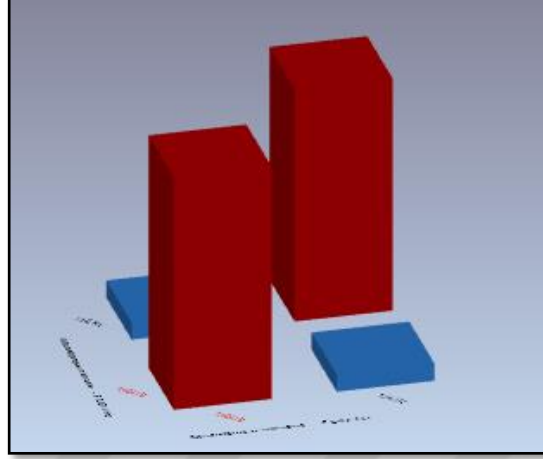
Şekil 4.50. Murat Paşa Camii minaresi spektral yoğunluk fonksiyonu

Titreşim kayıtları frekans alanında ayrıştırma (FDD) analiz yöntemi ile çözümlenerek minarenin modal davranış parametreleri belirlenmiştir. Murat Paşa Camii minaresinin Operasyonel mod şekilleri ve modal frekans değerleri Çizelge 4.21’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.21. Murat Paşa Camii minaresi OMA sonuçları

Mod Şekli	Frekans (Hz)
Kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi	1,602
Uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi	1,660
Düşey eksen etrafında burulma hareketi	-

Yapılan OMA sonuçlarının güvenilir olup olmadığının belirlenmesi için MAC değerleri kontrol edilmiştir. Şekil 4.51’de Murat Paşa Camii minaresi MAC değerleri grafiği ve Çizelge 4.21’de MAC tablosu verilmiştir.



Şekil 4.51. Murat Paşa Camii minaresi MAC değerleri grafiği

Çizelge 4.22. Murat Paşa Camii minaresi MAC değerleri tablosu

Frekans (Hz)	1,602	1,660
1,602	1	0,07356
1,660	0,07356	1

Çizelge 4.22’de MAC değerleri tablosu incelendiğinde modlar arasındaki MAC değerlerinin 0’a yakın olduğu ve modların birbirinden ayrık olduğu görülmüştür. Bu tablo gerçekleştirilen OMA çalışmasının güvenilir olduğunun göstergesidir.

4.4.3. Murat Paşa Camii minaresi model kalibrasyon çalışması

Muratpaşa Camii minaresinde gerçekleştirilen OMA sonrası, minarenin hem teorik hem de dinamik davranış parametreleri belirlenmiştir. Bu sonuçlar karşılaştırılarak, sonlu eleman modelinde herhangi bir güncellenmeye gerek olup olmadığı değerlendirilmiştir. Murat Paşa camii minaresinin ilk teorik analiz ve OMA sonuçları toplu halde Çizelge 4.23’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.23. Murat Paşa Camii minaresi ilk teorik modal analiz ve OMA sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (X yönü)	1,602	0,528	67,04
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (Y yönü)	1,660	0,531	68,01
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (Z yönü)	-	3,265	-

Çizelge 4.23'teki sonuçlar karşılaştırıldığında minare sonlu eleman modelinde gerçekleştirilen ilk teorik modal analiz sonuçları ile minarenin OMA sonuçlarının birbirinden çok farklı olduğu ve hata oranlarının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu farkın asgari düzeye indirilmesi ve sonlu eleman model davranış parametrelerinin, minarenin dinamik davranış parametrelerini yansıtabilmesi için minarenin sonlu eleman modelinin güncellenmesi yani model kalibrasyon gerekmektedir. Murat Paşa Camii minaresi için ilk teorik modal analizdeki değerler baz alınarak taş malzeme için elastisite modül kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Murat Paşa Camii minaresi için tekrarlı işlemler sonucunda ulaşılan elastisite modül değerleri Çizelge 4.24'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.24. Murat Paşa Camii minaresi elastisite modül kalibrasyon değerleri

Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)
Taş	7.900 MPa

Çizelge 4.24'teki elastisite modül değeri Murat Paşa minaresinin sonlu eleman modeline tanıtıldığında, minare dinamik davranış parametrelerine en yakın davranış parametrelerinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 4.25'te bu sonuçlar ile minare OMA sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.25. Murat Paşa Camii minaresi kalibreli teorik modal analiz ve OMA sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (X yönü)	1,602	1,606	0,24
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (Y yönü)	1,660	1,614	2,77
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (Z yönü)	-	9,91	-

Çizelge 4.25'teki sonuçlar karşılaştırıldığında kalibrasyonu tamamlanmış minare sonlu eleman modeliyle, OMA sonuçlarının yakın olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Özellikle ilk iki mod şeklindeki hata oranları %0,24 ve %2,77 dir. Bu sonuçlar, Murat Paşa camii minaresi için gerçekleştirilen model kalibrasyon güncellenmesinin doğru olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

4.5. Yukarı Habip Efendi Camii

1702 yılında inşa edilen Yukarı Habip Efendi Camii ile ilgili ayrıntılı bilgiler Bölüm 3.7.5'te verilmiştir. Bu kısımda, cami minaresi ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir. Yukarı Habip Efendi Camii minaresinin yeni hali şekil 4.52'de gösterilmiştir.

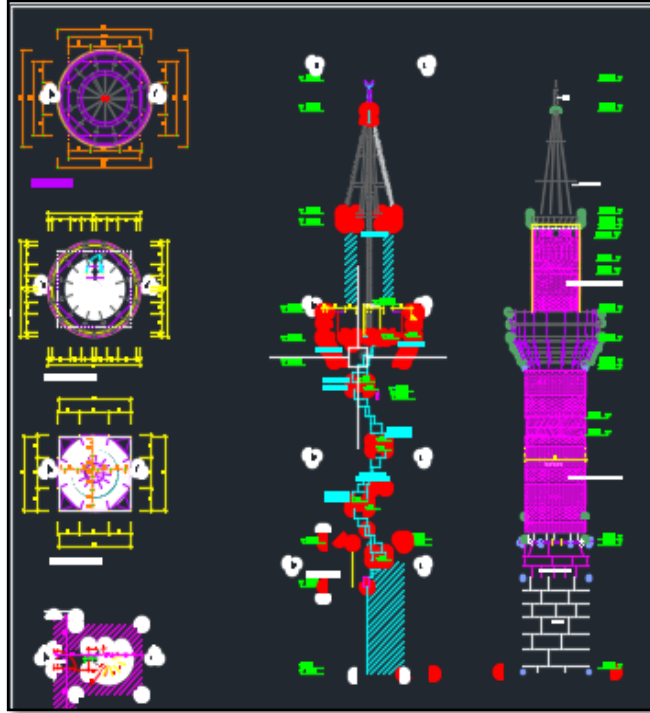
**Şekil 4.52** Yukarı Habip Efendi Camii minaresi yeni hali

Cami minaresinin yerden yüksekliği yaklaşık 20 m'dir. Cami minaresi caminin kuzeybatı köşesine bitişik bir vaziyette 4,85 m'lik bir kare kaide üzerinde konumlanmıştır. Cami dış gövde silindiri ve peteği tuğladan, kaide, şerefe ve iç silindiri taştan imal edilmiştir. Dış çapı 2,20 m'dir. Cami şerefesi yerden 10,48 m yükseklikte konumlanmış olup yüksekliği 2.04 m'dir. Şerefe çapı 3,44 m'dir. Şerefeye 36 basamaklı merdivenle çıkılmaktadır. Şerefe ile alem arası 7,10 m'dir. Kûlah ise kurşun sac ile kaplıdır.

4.5.1. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi teorik modal analiz uygulaması

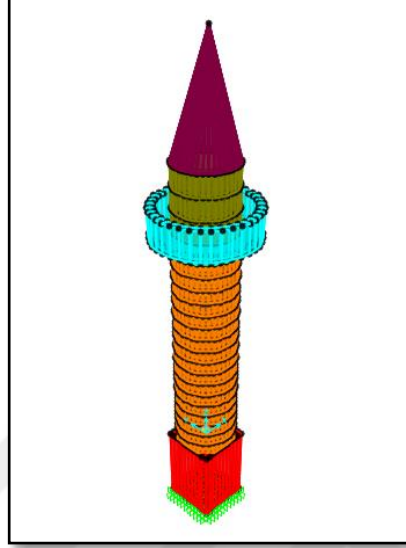
Murat Paşa Camii minaresinin sonlu eleman modellemesini ardından Yukarı Habip Efendi Camii'nin minaresinin sonlu eleman modellemesi gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman modelleme aşamaları, daha önceki minarelerin sonlu eleman modeli için bahsedilen koşullarla aynı koşullar altında gerçekleştirilmiştir.

Yukarı Habip Efendi minaresinin rölevesi incelendikten sonra minarenin modellemede kullanılacak nihai boyutlarının belirlenmesi için keşfe gidilmiş ve nihai boyutlar belirlenmiştir. Minare rölevesi Şekil 4.53'te gösterilmiştir



Şekil 4.53. Yukarı Habip Efendi Camii minare rölevesi

Nihai boyutların belirlenmesinin ardından Yukarı Habip Efendi Camii'nin minaresi SAP 2000 yazılımında oluşturulmuştur. Minarenin sonlu eleman modeli Şekil 4.54'te gösterilmiştir.



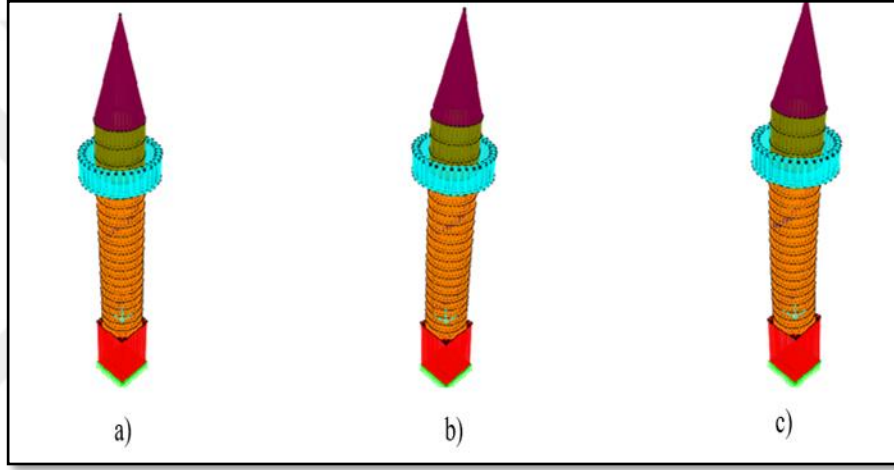
Şekil 4.54. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi sonlu eleman modeli

Minarenin sonlu eleman modeli 4.741 düğüm noktalı ve 2.241 katı elemandan oluşmaktadır. Sonlu eleman modelinin malzeme özellikleri için tahribatsız deney yöntemi olan beton Schmidt çekicinden faydalanılmıştır. Caminin andezit taşı kullanılarak inşa edilmiştir. Cami minaresi incelendiğinde caminin dış sütunu ve petek kısmının tuğladan; kaide, merdiven, iç silindir ve şerefe kısmının taştan imal edildiği gözlenmiştir. Andezit taşının yüzey sertlik değerinin 24,76 olduğu belirlenmiştir. Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanan taşın basınç mukavemeti 22,71 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değer kullanılarak, minarenin taş kısımlarının duvar basınç mukavemeti ve duvar elastisite modülleri Denklem 3.4 ve Denklem 3.5'teki yardımıyla belirlenmiştir. 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 4,64 MPa, duvar elastisite modül değeri ise 928 MPa olarak hesaplanmıştır (Özdoğan 2024). Tuğla kısımlarına Schmidt çekici uygulandığında sertlik değeri alınamamıştır. Bu kısımların elastisite modül değeri için Pervizoğlu Camii'nde tuğla kısım için kullanılan 850 MPa değeri, tuğla kısımların elastisite modül değeri olarak tanımlanmıştır. Bu değerler yardımıyla minarenin teorik

modal analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.26’da gösterilmiştir. Minarenin teorik mod şekilleri Şekil 4.55’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.26. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi teorik modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (x yönü)	0,915
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (y yönü)	0,931
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (z yönü)	5,254

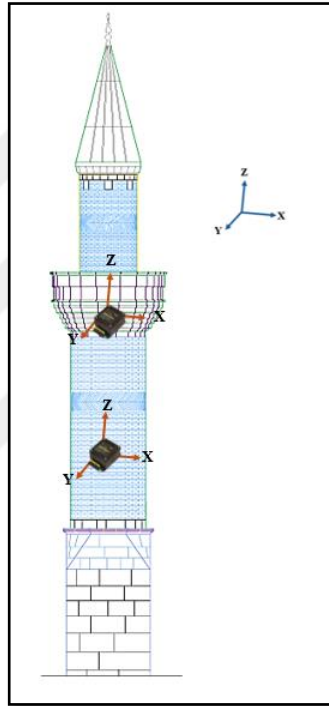


Şekil 4.55. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi a)kısa doğrultuda öteleme b)uzun doğrultuda öteleme c)burulma.

Minare sonlu eleman modelinde kısa doğrultu x yönü, uzun doğrultu y yönü, düşey doğrultu ise z yönü olarak ifade edilmiştir. Teorik modal analiz sonuçlarına göre, 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 hareketidir. Bu sonuçlara bağlı olarak minare şerefesine, ortasına ve tabanına ivmeölçerler bağlayıp minarede operasyonel modal analiz uygulaması yapılmıştır.

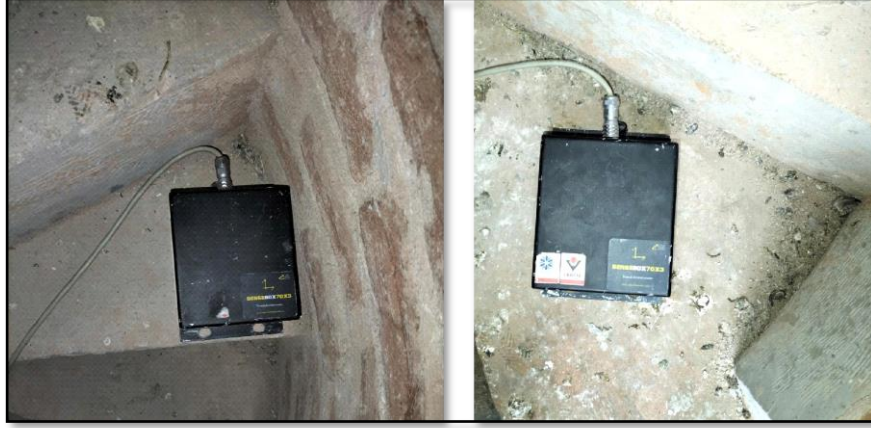
4.5.2. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi operasyonel modal analiz uygulaması

Minarenin dinamik davranış parametrelerinin yerinde belirlenmesi için minare üzerinde OMA uygulaması yapılmıştır. Yukarı Habip Efendi Camii minaresinin dinamik davranış parametreleri Pervizoğlu ve Lala Mustafa Paşa Camiindeki gibi cami gövdesiyle beraber belirlenmiştir. Cami minare alt kısmı cami duvarının kuzeybatı köşesine denk gelmektedir. Dolayısıyla minare tabanı için caminin bu köşesine yerleştirilen 2 tane tek eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. Minare şerefe ve orta kısmına 3 eksenli 2 ivmeölçer yerleştirilmiştir. İvmeölçer yerleşim krokisi Şekil 4.56’da gösterilmiştir.



Şekil 4.56. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi ivmeölçer yerleşim krokisi

3 eksenli ivmeölçerlerin yönü kuzeyi gösterecek şekilde minare, ortasına ve şerefesine yerleştirilmiştir. Sabitleme işlemi sıcak silikon yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sabitleme işlemi Şekil 4.57’de gösterilmiştir. İvmeölçerler minareye sabitlendikten sonra özel kabloları ile veri toplama ünitesine bağlanmıştır. Şekil 4.58’de veri toplama sistemi gösterilmiştir.



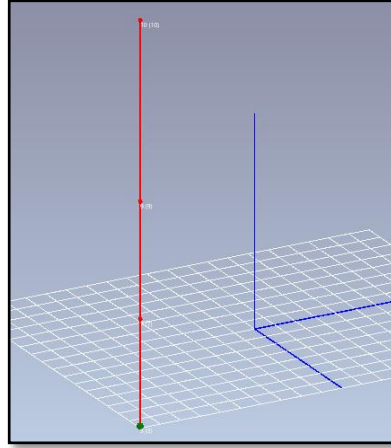
Şekil 4.57. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi ivmeölçerlerin sabitlenmesi



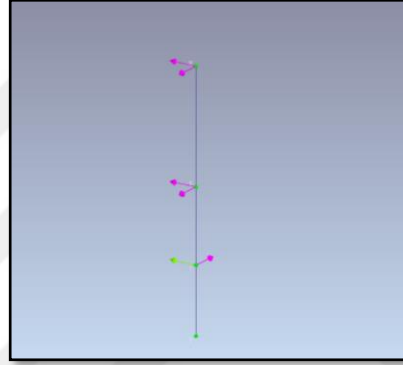
Şekil 4.58. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi veri toplama sistemi

Bütün kontroller yapıldıktan sonra minareden 15'er dakikalık 6 adet kayıt alınmıştır. Bunların 3'ü 100Hz'lik, 3'ü de 200Hz'lik frekanstadır. Cami araç trafiği bakımından seyrek bir bölgede yer almakta ve çevresel titreşime az maruz almaktadır. Bu yüzden cami minaresine plastik tokmak ile vurularak yapay bir titreşim oluşturulmuştur (Özdoğan 2024). Kayıt işlemlerinin ardından elde edilen kayıtlar Artemis Modal Pro (2023) yazılımına aktarılarak minarenin operasyonel mod şekillerini belirlenmiştir. Bu kayıtlar yazılımda var olan özel denklem ve çözüm yöntemleri yardımıyla analiz ederek minarenin operasyonel mod şekillerini ortaya çıkarmaktadır.

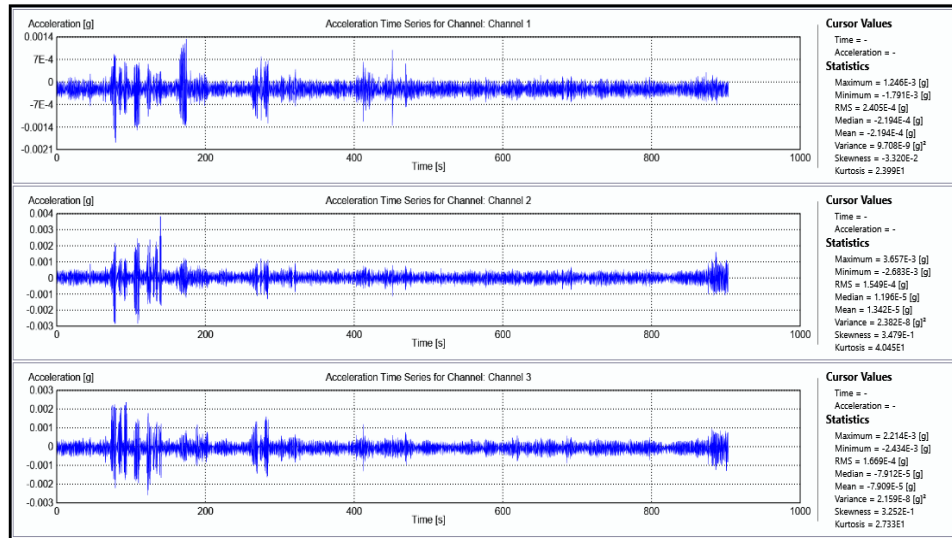
Yukarı Habip Efendi minare temsili modeli Şekil 4.59'de, ivmeölçer tanımlamaları Şekil 4.60'da, titreşim kayıtları Şekil 4.61'de ve spektral yoğunluk fonksiyonları de Şekil 4.62'de gösterilmiştir.



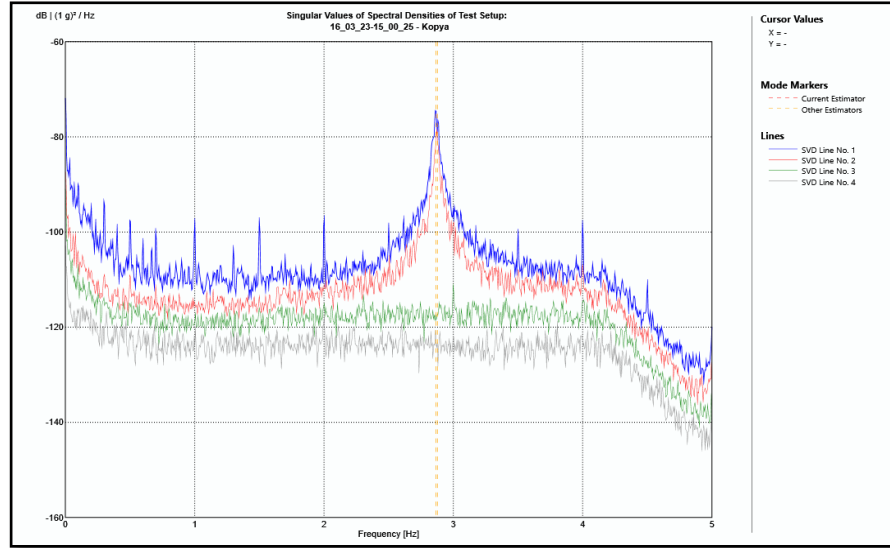
Şekil 4.59. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi yazılım modeli



Şekil 4.60. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi ivmeölçerlerin tanıtılması



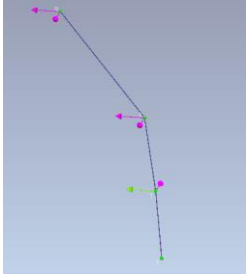
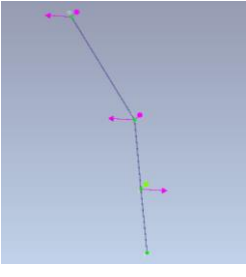
Şekil 4.61. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi titreşim kayıtları



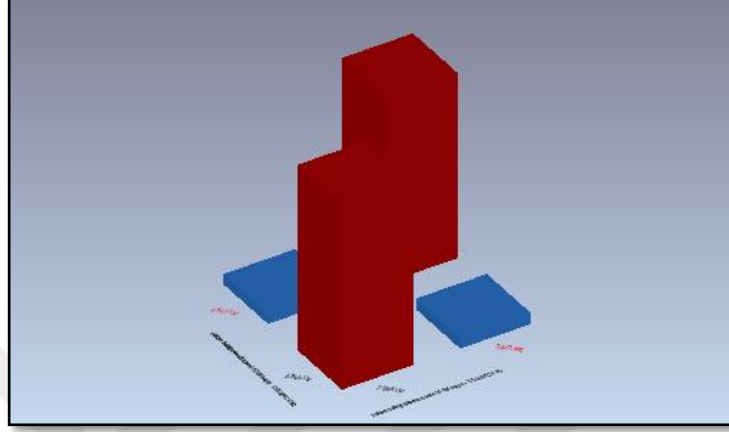
Şekil 4.62. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi spektral yoğunluk fonksiyonu

Titreşim kayıtları frekans alanında ayrıştırma (FDD) analiz yöntemi ile çözümlenerek minarenin modal davranış parametreleri belirlenmiştir. Yukarı Habip Efendi Camii minaresinin Operasyonel mod şekilleri ve modal frekans değerleri Çizelge 4.27’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.27. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi OMA sonuçları

Mod Şekli	Frekans (Hz)	
Kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi		2,865
Uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi		2,877
Düşey eksen etrafında burulma hareketi	-	-

Doğrultu tanımları için kısa doğrultu x yönü yani doğu-batı yönü, uzun doğrultu y yönü kuzey-güney olarak tanımlanmıştır. OMA sonuçlarının güvenilir olup olmadığının belirlenmesi için MAC değerleri kontrol edilmiştir. Şekil 4.63'te Yukarı Habip Efendi Camii minaresi MAC değerleri grafiği ve Çizelge 4.28'de ise MAC tablosu verilmiştir.



Şekil 4.63. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi MAC değerleri

Çizelge 4.28. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi MAC değerleri tablosu

Frekans (Hz)	2,865	2,877
2,865	1	0,05727
2,877	0,05727	1

Çizelge 4.28'de MAC değerleri tablosu incelendiğinde modlar arasındaki MAC değerlerinin 0'a yakın olduğu ve modların birbirinden ayrık olduğu görülmüştür. Bu tablo gerçekleştirilen OMA'nın güvenilir olduğunun göstergesidir.

4.5.3. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi model kalibrasyon çalışması

Yukarı Habip Efendi Camii minaresinde gerçekleştirilen OMA sonrası, minarenin hem teorik hem de dinamik davranış parametreleri belirlenmiştir. Bu sonuçlar karşılaştırılarak minarenin sonlu eleman modelinde herhangi bir güncellenmeye gerek olup olmadığı değerlendirilmiştir. Yukarı Habip Efendi Camii minaresinin ilk teorik ve OMA sonuçları toplu halde Çizelge 4.29'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.29. YHE Camii minaresi kalibreli teorik modal analiz ve OMA sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (X yönü)	2,865	0,915	68,06
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (Y yönü)	2.877	0,931	67,63
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (Z yönü)	-	5,265	-

Çizelge 4.29'daki sonuçlar karşılaştırıldığında minare sonlu eleman modelinde gerçekleştirilen ilk teorik modal analiz sonuçları ile minarenin OMA sonuçlarının birbirinden çok farklı olduğu ve hata oranlarının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu farkın asgari düzeye indirilmesi ve sonlu eleman model davranış parametrelerinin, minarenin dinamik davranış parametrelerini yansıtabilmesi için minarenin sonlu eleman modelinin güncellenmesi yani model kalibrasyon gerekmektedir. Cami minaresinin teorik ve OMA sonuçları karşılaştırıldığında teorik ve modal davranış parametrelerinin benzer şekilde olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçtan hareketle model kalibrasyon işlemi için minarenin malzeme özelliklerinin güncellenmesi yeterli olacaktır.

Yukarı Habip Efendi Camii minaresi için ilk teorik modal analizdeki değerler baz alınarak taş ve tuğla kısımları için elastisite modül kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yukarı Habip Efendi Camii minaresi için tekrarlı işlemler sonucunda ulaşılan elastisite modül değerleri Çizelge 4.30'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.30. YHE Camii minaresi elastisite modül kalibrasyon değerleri

Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)
Taş	12.500 MPa
Tuğla	6.000 MPa

Çizelge 4.30'daki değerler, Yukarı Habip Efendi Camii minaresinin sonlu eleman modeline tanıtıldığında, minare dinamik davranış parametrelerine en yakın davranış

parametrelerinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 4.31’de bu sonuçlar ile minare OMA sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.31. YHE Camii Minaresi kalibreli teorik modal analiz ve OMA sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (X yönü)	2,865	2,843	0,76
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (Y yönü)	2.877	2,895	0,62
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (Z yönü)	-	15,956	-

Çizelge 4.31’deki sonuçlar karşılaştırıldığında kalibrasyonu tamamlanmış minare sonlu eleman modeliyle, OMA sonuçlarının yakın olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Özellikle ilk iki mod şeklindeki hata oranları %0,76 ve %0,42’dir. Bu sonuçlar, Yukarı Habip Efendi minaresi için gerçekleştirilen model kalibrasyon güncellenmesinin doğru olduğunu göstermektedir.

4.6. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii

1905 yılında inşa edilen Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii ile ilgili ayrıntılı bilgiler Bölüm 3.7.6’da verilmiştir. Bu kısımda, cami minaresi ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

Yapı, kuzey cephesinde 6 ahşap direk üzerine oturan ahşap tavanlı son cemaat mahalli ile dikkat çekmektedir. Kuzeybatı köşesinde yer alan minare, taş kaide üzerinde yükselen silindirik tuğla gövdesi, taş şerefesi, tuğla petek kısmı ve külahı ile özgün bir form sergilemektedir. Giriş kapısının batısındaki köşeye yerleştirilen minare kaidesi, son cemaat mahalline doğru yaklaşık 73 cm’lik bir girinti oluşturmaktadır. Bu alanda pencere seviyesine kadar yükselen sabit bir ayakkabı dolabı yapı ile bütünleşik şekilde uzanmaktadır. Kaidede kullanılan kaba yontu taşlar yüzey işlemi yapılmadan bırakılmıştır. Pencere söveleri sonradan boyanmış olsa da taş dokusu ve işçiliği izlenimini korumaktadır. Bu durum, bazı bölümlerde özgün malzemenin muhafaza edildiğini,

diğerlerinde ise müdahaleler nedeniyle bütünlüğün bozulduğunu göstermektedir. Cami minaresi Şekil 4.64'te gösterilmiştir.



Şekil 4.64. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresi

Batı cephesi özgün mimari özelliğini önemli ölçüde korumaktadır. Derzli moloz taşla inşa edilen duvar, yatay yerleştirilen ahşap hatıllarla desteklenmiştir. Batı duvarının kuzey köşesinde, son cemaat yeri ile minare kütüğü arasında kalan bölümde 2,19 m yüksekliğe kadar tuğla duvar üzerine yontu taş kaplama yapılmış, üst kısım ise ahşap camekânla kapatılmıştır. Minare kaidesi yontu taş malzeme ile inşa edilmiş ve gövde başlangıcına kadar aynı taş dokusu sürdürülmüştür.

Kuzeybatı cephesindeki minare, Erzurum'daki benzer dönem camileriyle tipolojik açıdan örtüşmektedir. Gövde ve petek kısmı ateş tuğlasından, şerefe kesme taştan, külah ve sereni ahşaptan yapılmıştır. Külah kurşunla kaplanmış, basamak ve çekirdek kısmı kesme taşla oluşturulmuştur. Kaide, kuzey duvarına bağlanmaktadır. Minare taş yüzeylerinde doğal etkilere bağlı bozulmalar, şerefe altındaki tuğlalarda ise bölgesel erime ve aşınmalar görülmektedir.

Cami minaresinin yerden yüksekliği 23,84 m'dir. Cami minaresi caminin kuzeybatı köşesine bitişik bir vaziyette 6,15 m'lik bir kare kaide üzerinde konumlanmıştır. Minare dış silindiri ve peteği tuğladan; kaide, şerefe ve iç silindiri taştan

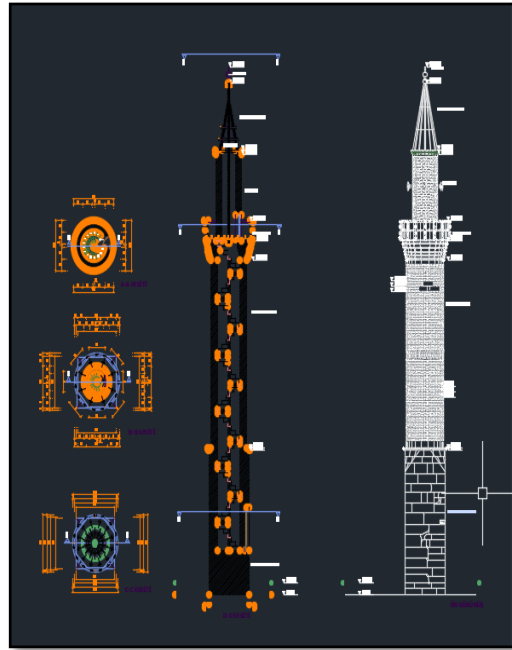
imal edilmiştir. Dış çapı 2,18 m'dir. Minare şerefesi yerden 14,92 m yükseklikte konumlanmış olup yüksekliği 1,81 m'dir. Şerefe çapı 2,80 m'dir. Şerefeye 36 basamaklı merdivenle çıkılmaktadır. Şerefe ile alem arası 7,34 m'dir. Kûlah kurşun saca kaplıdır.

2016 yılında restorasyonu tamamlanan camide minare kısmında kapsamlı bir restorasyon planlamamış olup dış silindirdeki tuğlalarda var olan çatlaklar onarılmıştır (Özdoğan 2024).

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

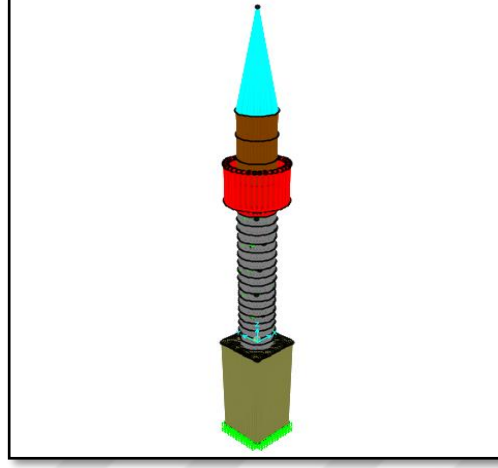
Yukarı Habip Efendi Camii minaresinin sonlu eleman modellemesini ardından Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii'nin minaresinin sonlu eleman modellemesi gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman modelleme aşamaları, sonlu eleman modeli tamamlanan minareler için bahsedilen koşullarla aynı koşullar altında gerçekleştirilmiştir.

Taş Camii minaresinin rölevesi incelendikten sonra minarenin modellemede kullanılacak nihai boyutlarının belirlenmesi için keşfe gidilmiş ve nihai boyutlar belirlenmiştir. Minare rölevesi Şekil 4.65'te gösterilmiştir.



Şekil 4.65. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minare rölevesi

Nihai boyutların belirlenmesinin ardından Taş Camii'nin minaresi SAP 2000 yazılımında oluşturulmuştur. Minarenin sonlu eleman modeli Şekil 4.66'da gösterilmiştir.

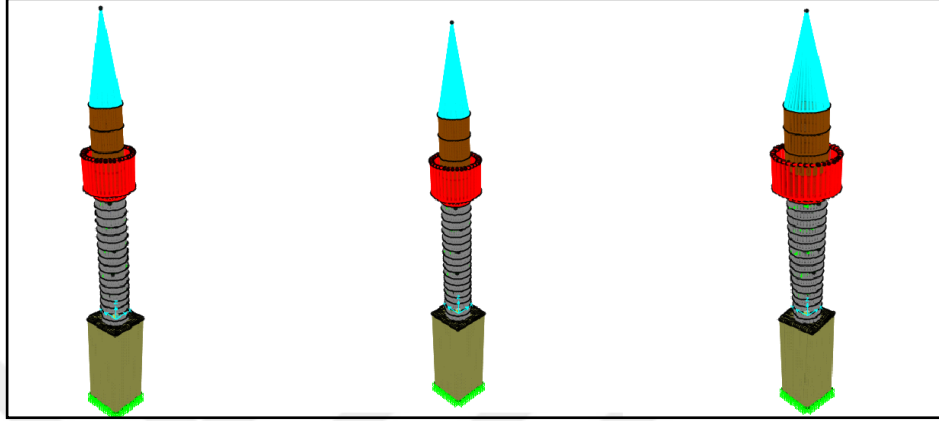


Şekil 4.66. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresi sonlu eleman modeli

Minarenin sonlu eleman modeli 3.490 düğüm noktalı ve 1.959 katı elemandan oluşmaktadır. Sonlu eleman modelinin malzeme özellikleri için tahribatsız deney yöntemi olan beton Schmidt çekicinden faydalanılmıştır. Cami minaresi incelendiğinde caminin dış sütunu ve petek kısmının tuğladan; kaide, merdiven, iç silindir ve şerefe kısmının bazalttan imal edildiği gözlenmiştir. Bazalt taşının yüzey sertlik değerinin 20,33 olduğu belirlenmiştir. Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanan taşın basınç mukavemeti 3,68 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değer kullanılarak, minarenin taş kısımlarının duvar basınç mukavemeti ve duvar elastisite değeri Denklem 3.4 ve Denklem 3.5 yardımıyla belirlenmiştir. K değeri 0,5; α ve β değerleri duvarlar düzgün bir biçimde örüldüğü için sırasıyla 0,70 ve 0,30; kullanılan harç Horasan harcı olduğu için harç basınç mukavemeti 1,15 MPa alınmıştır. Bu bağıntı kullanarak ortalama duvar basınç mukavemeti 1,29 MPa, duvar elastisite modül değeri ise 258 MPa olarak hesaplanmıştır (Özdoğan 2024). Tuğla kısımlarına Schmidt çekici uygulandığında sertlik değeri alınamamıştır. Bu kısımların elastisite modül değeri içi Özdoğan (2018)'de tuğla için hesaplanan 850 MPa elastisite modül değeri, tuğla kısımların elastisite modül değeri olarak tanımlanmıştır. Bu değerler yardımıyla minarenin teorik modal analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.30'da gösterilmiştir. Minarenin teorik mod şekilleri Şekil 4.67'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.32. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresi teorik modal analiz sonuçları

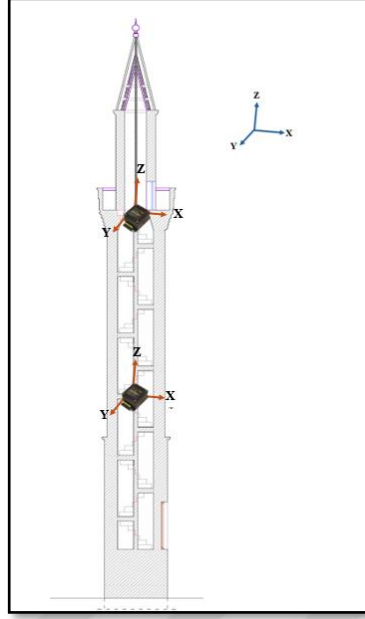
Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (x yönü)	0,640
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (y yönü)	0,641
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (z yönü)	4,601

**Şekil 4.67.** Aşağı Hasan-ı Basri Taş camii minaresi a) kısa doğrultuda öteleme b)uzun doğrultuda öteleme c)burulma.

Minare sonlu eleman modelinde kısa doğrultu x yönü, uzun doğrultu y yönü, düşey doğrultu ise z yönü olarak ifade edilmiştir. Teorik modal analiz sonuçlarına göre, 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 hareketidir. Bu sonuçlara bağlı olarak minare şerefesine, ortasına ve tabanına ivmeölçerler bağlayıp minarede operasyonel modal analiz uygulaması yapılmıştır.

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

Minarenin, dinamik davranış parametrelerinin yerinde belirlenmesi için minare üzerinde OMA uygulaması yapılmıştır. Taş Camii minaresinin dinamik davranış parametreleri Yukarı Habip Efendi Camiindeki gibi cami gövdesiyle beraber belirlenmiştir. Minare alt kısmı cami duvarının kuzeybatı köşesine denk gelmektedir. Dolayısıyla minare tabanı için caminin bu köşesine 2 tane tek eksenli ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Minare şerefe ve orta kısmına 3 eksenli 2 ivmeölçer yerleştirilmiştir. İvmeölçer yerleşim krokisi Şekil 4.68’de gösterilmiştir.



Şekil 4.68. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresi ivmeölçer yerleşim krokisi

3 eksenli ivmeölçerlerin yönü kuzeyi gösterecek şekilde minare ortasına ve şerefesine yerleştirilmiştir. Sabitleme işlemi sıcak silikon yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sabitleme işlemi Şekil 4.69’da gösterilmiştir. İvmeölçerler minareye sabitlendikten sonra özel kabloları ile veri toplama ünitesine bağlanmıştır. Şekil 4.70’de veri toplama sistemi gösterilmiştir.



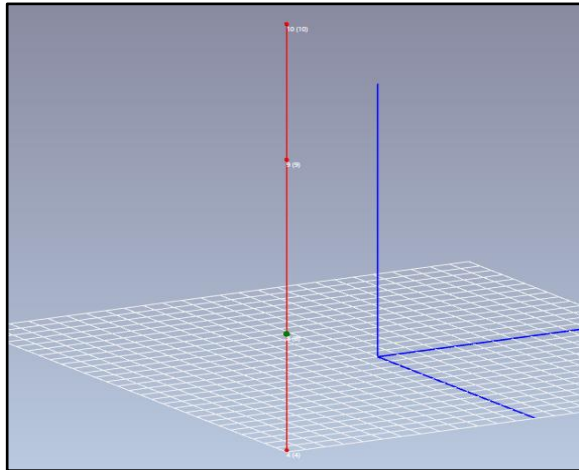
Şekil 4.69. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresi ivmeölçer sabitleme işlemi



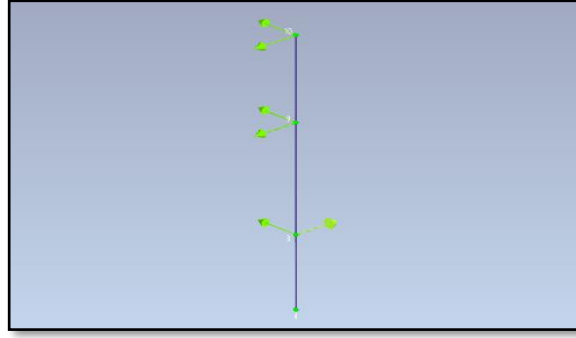
Şekil 4.70. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresi veri toplama sistemi

Bütün kontroller yapıldıktan sonra minareden 15 ‘er dakikalık 6 adet kayıt alınmıştır. Bunların 3’ü 100Hz’lik, 3’ü de 200Hz’lik frekanstadır. Sürekli araç trafiğinin yoğun olduğu bir bölgede bulunmasından dolayı çevresel titreşim sürekli camiye etki etmektedir. Ancak her ihtimale karşı cami minaresine plastik tokmak ile vurularak yapay bir titreşim oluşturulmuştur (Özdoğan 2024). Kayıt işlemlerinin ardından elde edilen kayıtlar Artemis Modal Pro (2023) yazılımına aktarılarak minarenin operasyonel mod şekillerini belirlenmiştir. Bu kayıtlar yazılımda var olan özel denklem ve çözüm yöntemleri yardımıyla analiz ederek minarenin operasyonel mod şekillerini ortaya çıkarmaktadır.

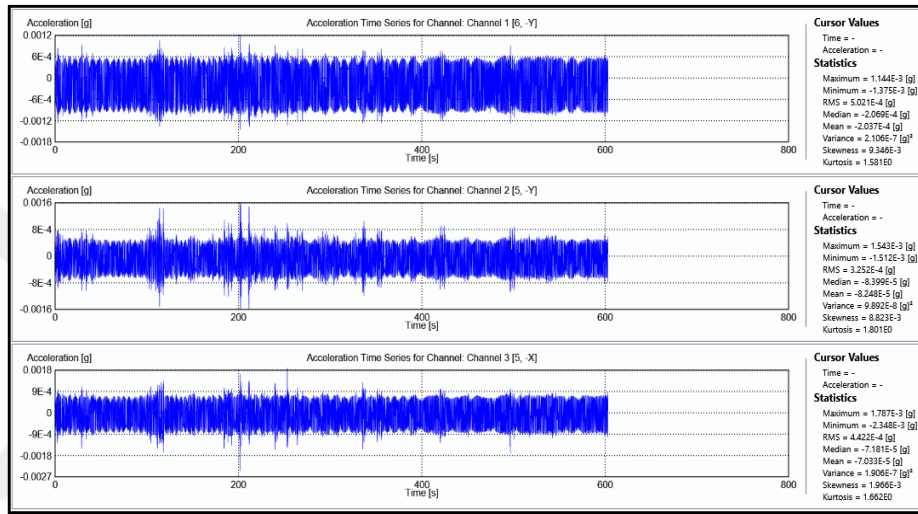
Taş Camii minare temsili modeli Şekil 4.71’de, ivmeölçer tanımlamaları Şekil 4.72’de, titreşim kayıtları Şekil 4.73’te ve spektral yoğunluk fonksiyonları de Şekil 4.74’te gösterilmiştir.



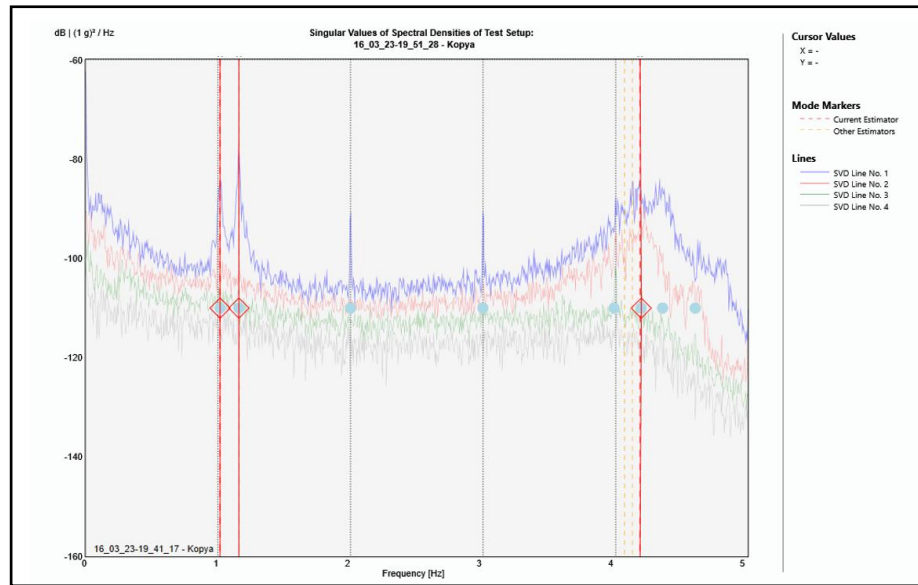
Şekil 4.71. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresi temsili modeli



Şekil 4.72. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresi ivmeölçer yerleşimi



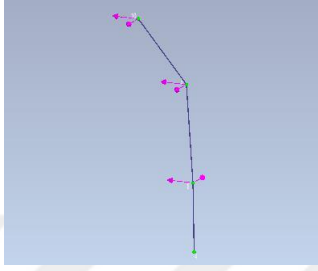
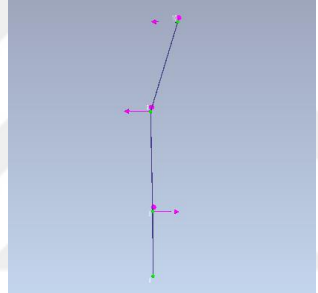
Şekil 4.73. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresi titreşim kayıtları



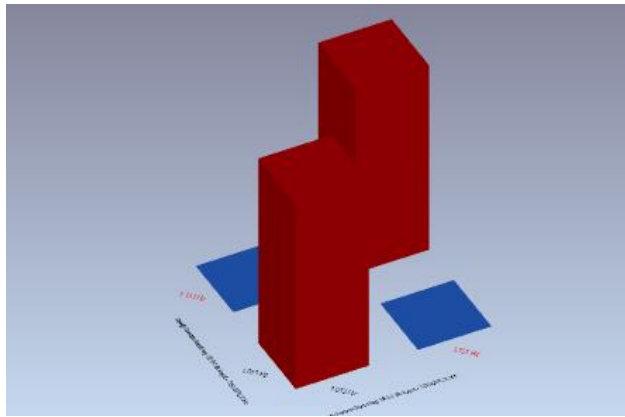
Şekil 4.74. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresi spektral yoğunluk fonksiyonu

Titreşim kayıtları Stokastik alt alanda çözümleme ağırlıksız temel bileşen (SSI-UPC-X) yöntemi ile analizler yapılmıştır. Taş Camii minaresinin Operasyonel mod şekilleri ve modal frekans değerleri Çizelge 4.33'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.33. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minare OMA sonuçları

Mod Şekli	Frekans (Hz)	
Kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi		1,016
Uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi		1,159

Minare doğrultu seçimi, Yukarı Habip Efendi Camii minaresi için belirtilen doğrultular ile aynıdır. Yapılan deneysel modal analiz sonuçlarının güvenilir olup olmadığının belirlenmesi için MAC değerleri kontrol edilmiştir. Hasan-ı Basri Taş Camii minaresi Şekil 4.75'de MAC değerleri grafiği ve Çizelge 4.34'te ise MAC tablosu gösterilmiştir.



Şekil 4.75. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresi MAC değerleri grafiği

Çizelge 4.34. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresi MAC değerleri tablosu

Frekans (Hz)	1,016	1,159
1,016	1	0,001066
1,159	0,001066	1

Çizelge 4.34'te MAC değerleri tablosu incelendiğinde modlar arasındaki MAC değerlerinin 0'a yakın olduğu ve modların birbirinden ayrık olduğu görülmüştür. Bu tablo gerçekleştirilen OMA çalışmasının güvenilir olduğunun göstergesidir.

4.6.3. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresi model kalibrasyon çalışması

Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresinde gerçekleştirilen OMA çalışması sonrası, minarenin hem teorik hem de dinamik davranış parametreleri belirlenmiştir. Bu sonuçlar karşılaştırılarak, sonlu eleman modelinde herhangi bir güncellenmeye gerek olup olmadığı değerlendirilmiştir. Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresinin ilk teorik ve OMA sonuçları toplu halde Çizelge 4.35'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.35. Taş Camii minaresi ilk teorik modal analiz ve OMA sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (X yönü)	1,016	0,640	37,00
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (Y yönü)	1,159	0,641	44,70
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (Z yönü)	-	4,601	-

Çizelge 4.35'teki sonuçlar karşılaştırıldığında minare sonlu eleman modelinde gerçekleştirilen ilk teorik modal analiz sonuçları ile minarenin OMA sonuçlarının birbirinden çok farklı olduğu ve hata oranlarının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu farkın asgari düzeye indirilmesi ve sonlu eleman model davranış parametrelerinin, minarenin dinamik davranış parametrelerini yansıtabilmesi için minarenin sonlu eleman

modelinin güncellenmesi yani model kalibrasyon gerekmektedir. Cami minaresinin teorik analiz ve OMA sonuçları karşılaştırıldığında teorik ve modal davranış parametrelerinin benzer şekilde olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçtan hareketle model kalibrasyon işlemi için minarenin malzeme özelliklerinin güncellenmesi yeterli olacaktır.

Taş Camii minaresi için ilk teorik modal analizdeki değerler baz alınarak taş ve tuğla kısımları için elastisite modül kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Taş Camii minaresi için tekrarlı işlemler sonucunda ulaşılan elastisite modül değerleri Çizelge 4.36’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.36. Taş Camii minaresi elastisite modül kalibrasyon değerleri

Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)
Taş	3.000 MPa
Tuğla	1.200 MPa

Çizelge 4.36’daki değerler, Taş Camii minaresinin sonlu eleman modeline tanıtıldığında, minare dinamik davranış parametrelerine en yakın davranış parametrelerinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge4 .37’de bu sonuçlar ile minare OMA sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.37. Taş Camii minaresi kalibreli teorik modal analiz ve OMA sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (X yönü)	1,016	1,013	0,29
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (Y yönü)	1,159	1,017	12,25
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (Z yönü)	-	6,586	-

Çizelge 4.37’deki sonuçlar karşılaştırıldığında kalibrasyonu tamamlanmış minare sonlu eleman modeliyle, OMA sonuçlarının yakın olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Özellikle ilk mod şeklindeki hata oranı %0,29’dur. Bu sonuçlar, Taş Camii minaresi için gerçekleştirilen model kalibrasyon güncellenmesinin doğru olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

4.7. Yeğenağa Camii

1661 yılında inşa edilen Yeğenağa Camii ile ilgili ayrıntılı bilgiler Bölüm 3.7.7’de verilmiştir. Bu kısımda, cami minaresi ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

Yapıya bitişik olarak konumlandırılmış olan minareye, kadınlar mahfiline açılan pencere boşluğu içerisine yerleştirilen bir merdiven aracılığıyla ulaşım sağlanmaktadır. Minare, zemin seviyesinden yaklaşık 450 cm yüksekliğe kadar düzgün kesme taş malzeme ile inşa edilmiş; bu kotun üzerinde ise minare tuğla kullanılarak örülmüştür. Minarenin planı, zeminde dıştan kare, içten daire formunda başlamış, yükseldikçe iç formunu korurken dış formu kareden daireye dönüşerek bu plan karakteriyle şerefeye kadar devam etmiştir. Şerefenin alt kısmında tuğlaların yerini alan taşlar kademe kademe dışa taşırılarak bir korniş görünümünde şerefe çıkıntısı oluşturulmuştur. Minare külah ile tamamlanmakta, külahın tepe noktasına yerleştirilen alem ile sonlandırılarak geleneksel Osmanlı minare mimarisi doğrultusunda bütüncül bir estetik anlayış sergilemektedir. Minarenin görünümü Şekil 4.76’da gösterilmiştir.



Şekil 4.76. Yeğenağa Camii minaresi

Cami minaresinin yerden yüksekliği 21,60 m’dir. Cami minaresi caminin kuzeybatı köşesine bitişik bir vaziyette 7,57 m lik bir kare kaide üzerinde konumlanmıştır. Yaklaşık 1 m lik dolgu bir zemin üzerindedir. Minare dış silindiri ve peteği tuğladan;

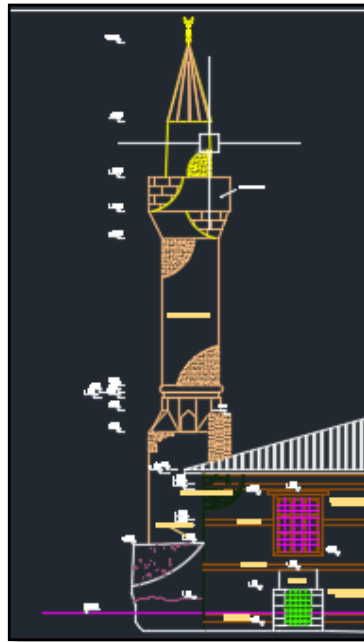
kaide, şerefe ve iç silindiri taştan imal edilmiştir. Dış silindir çapı 1,96 m'dir. Cami şerefesi yerden 14,11 m yükseklikte konumlanmış olup yüksekliği 2,07 m' dir. Şerefe çapı 2,60 m'dir. Şerefeye 42 basamaklı merdivenle çıkılmaktadır. Şerefe ile alem arası 5,60 m'dir. Kûlah kurşun saca kaplıdır.

Cami en son 2006 yılında restore edilmiştir. Minarede kapsamlı bir restorasyon olmamıştır (Özdoğan 2024).

4.7.1. Yeğenağa Camii minaresi teorik modal analiz uygulaması

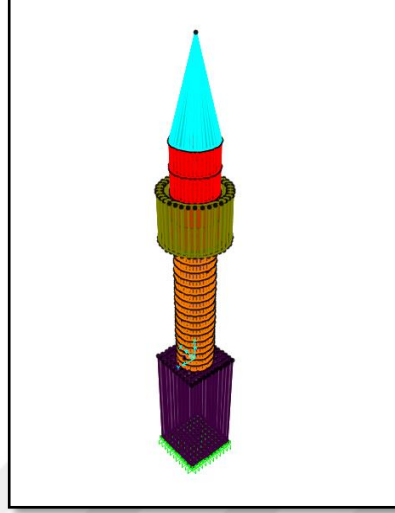
Aşağı Hasan Basri Taş Camii minaresinin sonlu eleman modellemesini ardından Yeğenağa Camii'nin minaresinin sonlu eleman modellemesi gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman modelleme aşamaları, sonlu eleman modeli tamamlanan minareler için bahsedilen koşullarla aynı koşullar altında gerçekleştirilmiştir.

Yeğenağa Camii minaresinin rölevesi incelendikten sonra minarenin modellemede kullanılacak nihai boyutlarının belirlenmesi için keşfe gidilmiş ve nihai boyutlar belirlenmiştir. Minare rölevesi Şekil 4.77'te gösterilmiştir



Şekil 4.77. Yeğenağa Camii minare rölevesi

Nihai boyutların belirlenmesinin ardından Yeğenağa Camii'nin minaresi SAP 2000 yazılımında oluşturulmuştur. Minarenin sonlu eleman modeli Şekil 4.78'de gösterilmiştir.



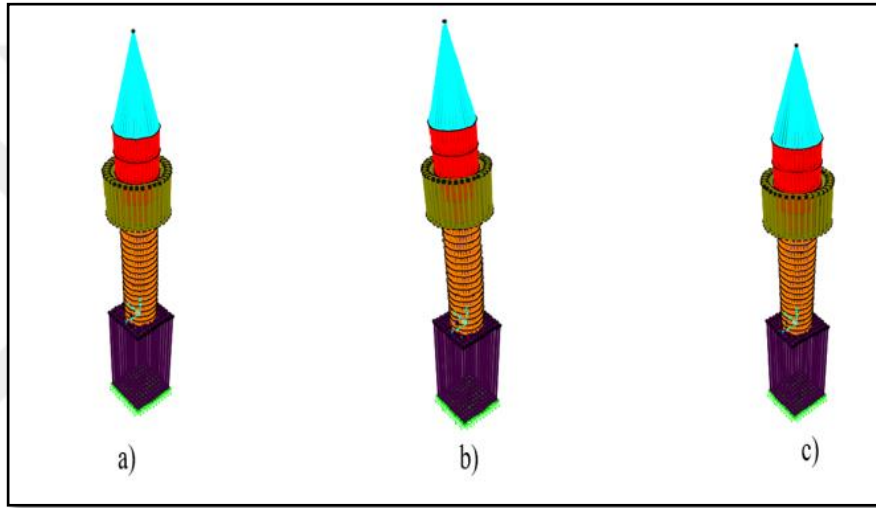
Şekil 4.78. Yeğenağa Camii Minaresi sonlu eleman modeli

Minarenin sonlu eleman modeli 3.190 düğüm noktalı ve 1.747 katı elemandan oluşmaktadır. Sonlu eleman modelinin malzeme özellikleri için tahribatsız deney yöntemi olan beton Schmidt çekicinden faydalanılmıştır. Caminin inşa edildiği taş durumunda andezit taşı kullanılmıştır. Cami minaresi incelendiğinde caminin dış sütunu ve petek kısmının tuğladan; kaide, merdiven, iç silindir ve şerefe kısmının andezitten imal edildiği gözlenmiştir. Beton Schmidt çekici yardımıyla andezitin yüzey sertlik değerinin 25,03 MPa olduğu belirlenmiştir. Denklem 3.1. kullanılarak taşın basınç mukavemeti 22,96 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değer kullanılarak, minarenin taş kısımlarının duvar basınç mukavemeti ve duvar elastisite değeri Denklem 3.4 ve Denklem 3.5 yardımıyla belirlenmiştir. K değeri 0,5; α ve β değerleri duvarlar düzgün bir biçimde örüldüğü için sırasıyla 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 4,67 MPa, duvar elastisite modül değeri ise 934 MPa olarak hesaplanmıştır. (Özdoğan 2024). Tuğla kısımlarına Schmidt çekici uygulandığında sertlik değeri alınamamıştır. Bu kısımların elastisite modül değeri için diğer camilerde olduğu gibi Özdoğan (2018)'de tanımlanan tuğla kısım için kullanılan 850 MPa değeri, tuğla kısımların elastisite modül değeri olarak tanımlanmıştır. Bu değerler yardımıyla

minarenin teorik modal analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.38’de gösterilmiştir. Minarenin teorik mod şekilleri Şekil 4.79’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.38. Yeğenağa Camii minaresi teorik modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (x yönü)	0,907
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (y yönü)	0,923
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (z yönü)	5,016

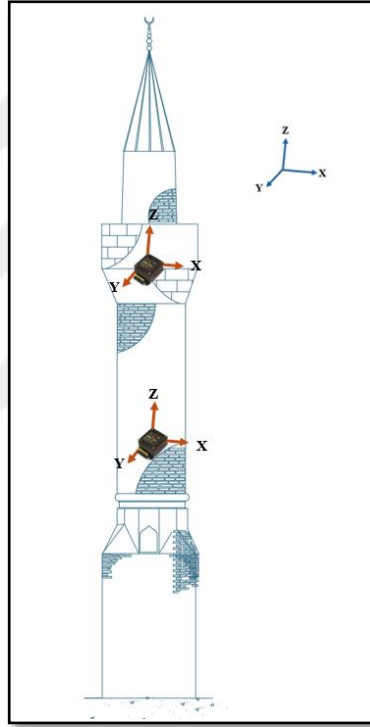


Şekil 4.79. Yeğenağa camii minaresi a)kısa doğrultuda öteleme b)uzun doğrultuda öteleme c)burulma.

Minare sonlu eleman modelinde kısa doğrultu x yönü, uzun doğrultu y yönü, düşey doğrultu ise z yönü olarak ifade edilmiştir. Teorik modal analiz sonuçlarına göre, 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 hareketidir. Bu sonuçlara bağlı olarak minare şerefesine, ortasına ve tabanına ivmeölçerler bağlayıp minarede operasyonel modal analiz uygulaması yapılmıştır.

4.7.2. Yeğenağa Camii minaresi operasyonel modal analiz uygulaması

Minarenin, dinamik davranış parametrelerinin yerinde belirlenmesi için minare üzerinde OMA uygulaması yapılmıştır. Yeğenağa Camii minaresinin dinamik davranış parametreleri Yukarı Habip Efendi ve Taş Camiindeki gibi cami gövdesiyle beraber belirlenmiştir. Cami minare alt kısmı cami duvarının kuzeybatı köşesine denk gelmektedir. Dolayısıyla minare tabanı için caminin bu köşesine 2 tane tek eksenli ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Minare şerefe ve orta kısmına 3 eksenli 2 ivmeölçer yerleştirilmiştir. İvmeölçer yerleşim krokisi Şekil 4.80’de gösterilmiştir.



Şekil 4.80. Yeğenağa Camii Minaresi ivmeölçer yerleşim krokisi

3 eksenli ivmeölçerlerin yönü kuzeyi gösterecek şekilde minare ortasına ve şerefesine yerleştirilmiştir. Sabitleme işlemi sıcak silikon yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sabitleme işlemi Şekil 4.81’de gösterilmiştir. İvmeölçerler minareye sabitlendikten sonra özel kabloları ile veri toplama ünitesine bağlanmıştır. Şekil 4.82’de veri toplama sistemi gösterilmiştir.

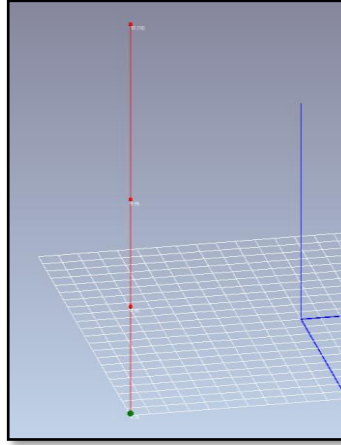


Şekil 4.81. Yeğenağa Camii minaresi ivmeölçer sabitleme işlemi

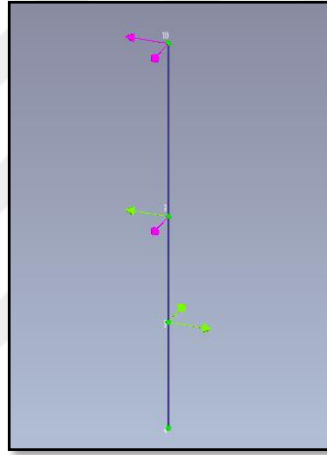


Şekil 4.82. Yeğenağa Camii minaresi veri toplama sistemi (Özdoğan 2024)

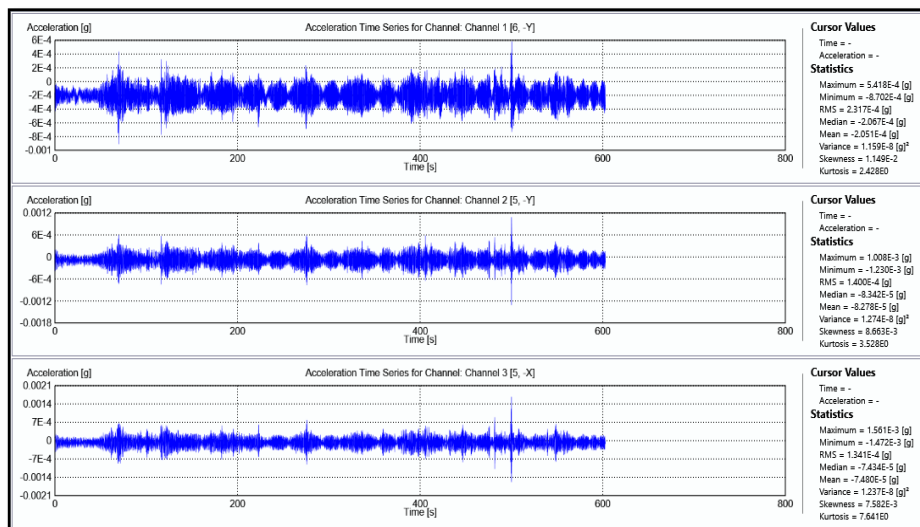
Bütün kontroller yapıldıktan sonra minareden 15'er dakikalık 6 adet kayıt alınmıştır. Bunların 3'ü 100Hz'lik, 3'ü de 200Hz'lik frekanstadır. Cami araç trafiği bakımından seyrek bir bölgede yer almakta ve çevresel titreşime az maruz almaktadır. Bu yüzden cami minaresine plastik tokmak ile vurularak yapay bir titreşim oluşturulmuştur (Özdoğan 2024). Kayıt işlemlerinin ardından elde edilen kayıtlar Artemis Modal Pro (2023) yazılımına aktararak minarenin operasyonel mod şekillerini belirlenmiştir. Bu kayıtlar yazılımda var olan özel denklem ve çözüm yöntemleri yardımıyla analiz ederek minarenin operasyonel mod şekillerini ortaya çıkarmaktadır. Yeğenağa Camii minare temsili modeli Şekil 4.83'te, ivmeölçer tanımlamaları Şekil 4.84'te, titreşim kayıtları Şekil 4.85'te ve spektral yoğunluk fonksiyonları de Şekil 4.86'da gösterilmiştir.



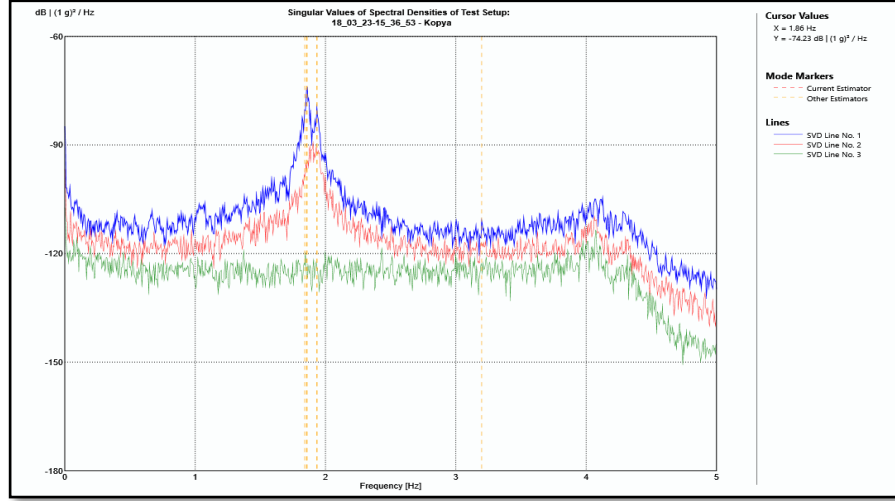
Şekil 4.83. Yeğenağa Camii minaresi yazılım geometrisi



Şekil 4.84. Yeğenağa Camii minaresi ivmeölçerlerin tanımlanması



Şekil 4.85. Yeğenağa Camii minaresi titreşim kayıtları



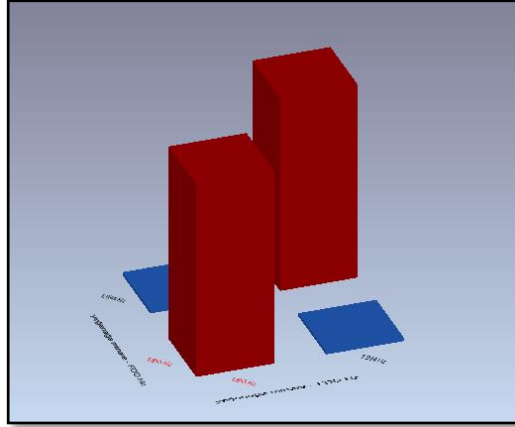
Şekil 4.86. Yeğenağa Camii minaresi spektral yoğunluk fonksiyonları

Titreşim kayıtları frekans alanında ayrıştırma (FDD) analiz yöntemi ile çözümlenerek minarenin modal davranış parametreleri belirlenmiştir. Yeğenağa Camii minaresinin Operasyonel mod şekilleri ve modal frekans değerleri Çizelge 4.39’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.39. Yeğenağa Camii Minaresi OMA sonuçları

Mod Şekli	Frekans (Hz)
Kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi	1,855
Uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi	1,934

OMA sonuçlarının güvenilir olup olmadığının belirlenmesi için MAC değerleri kontrol edilmiştir. Yeğenağa Camii minaresi MAC değerleri grafiği Şekil 4.87’de ve tablosu ise Çizelge 4.40’ta gösterilmiştir.



Şekil 4.87. Yeğenağa Camii minaresi MAC değerleri

Çizelge 4.40. Yeğenağa Camii minaresi MAC değerleri tablosu

Frekans (Hz)	1,855	1,934
1,855	1	0,01643
1,934	0,01643	1

Çizelge 4.40'ta MAC değerleri tablosu incelendiğinde modlar arasındaki MAC değerlerinin 0'a yakın olduğu ve modların birbirinden ayrık olduğu görülmüştür. Bu tablo gerçekleştirilen OMA çalışmasının güvenilir olduğunun göstergesidir.

4.7.3. Yeğenağa Camii minaresi model kalibrasyon çalışması

Yeğenağa Camii minaresinde gerçekleştirilen OMA sonrası, minarenin hem teorik hem de dinamik davranış parametreleri belirlenmiştir. Bu sonuçlar karşılaştırılarak, sonlu eleman modelinde herhangi bir güncellenmeye gerek olup olmadığı değerlendirilmiştir. Yeğenağa Camii minaresinin ilk teorik analiz ve OMA sonuçları toplu halde Çizelge 4.41'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.41. Yeğenağa Camii minaresi ilk teorik modal analiz sonuçları ile OMA sonuçları.

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (X yönü)	1,855	0,907	47,70
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (Y yönü)	1,934	0,923	52,27
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (Z yönü)	-	5,016	-

Çizelge 4.41'deki sonuçlar karşılaştırıldığında minare sonlu eleman modelinde gerçekleştirilen ilk teorik modal analiz sonuçları ile minarenin OMA sonuçlarının birbirinden çok farklı olduğu ve hata oranlarının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu farkın asgari düzeye indirilmesi ve sonlu eleman model davranış parametrelerinin, minarenin dinamik davranış parametrelerini yansıtabilmesi için minarenin sonlu eleman modelinin güncellenmesi yani model kalibrasyon gerekmektedir. Cami minaresinin teorik analiz ve OMA sonuçları karşılaştırıldığında teorik ve modal davranış parametrelerinin benzer şekilde olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçtan hareketle model kalibrasyon işlemi için minarenin malzeme özelliklerinin güncellenmesi yeterli olacaktır.

Yeğenağa Camii minaresi için ilk teorik modal analizdeki değerler baz alınarak taş ve tuğla kısımları için elastisite modül kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Taş Camii minaresi için tekrarlı işlemler sonucunda ulaşılan elastisite modül değerleri Çizelge 4.42'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.42. Yeğenağa Camii minaresi elastisite modül kalibrasyon değerleri

Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)
Taş	7.000 MPa
Tuğla	3.500 MPa

Çizelge 4.42'deki değerler, Yeğenağa Camii minaresinin sonlu eleman modeline tanıtıldığında, minare dinamik davranış parametrelerine en yakın davranış

parametrelerinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 4.43'te bu sonuçlar ile minare OMA sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.43. Yeğenağa Camii minaresi kalibreli teorik modal analiz sonuçları ile OMA sonuçları.

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (X yönü)	1,855	1,849	0,32
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (Y yönü)	1,934	1,882	2,68
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (Z yönü)	-	10,269	-

Çizelge 4.43'teki sonuçlar karşılaştırıldığında kalibrasyonu tamamlanmış minare sonlu eleman modeliyle, OMA sonuçlarının yakın olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Özellikle ilk iki mod şeklindeki hata oranları %0,32 ve %2,68'dir. Bu sonuçlar, Yeğenağa Camii minaresi için gerçekleştirilen model kalibrasyon güncellenmesinin doğru olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

4.8. Kadana Camii

1751 yılında inşa edilen Kadana Camii ile ilgili ayrıntılı bilgiler Bölüm 3.7.8'de verilmiştir. Bu kısımda, cami minaresi ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

Minare klasik Osmanlı taşra cami mimarisi özelliklerini yansıtmaktadır. Taş kaide üzerine oturtulmuş olan minare, silindirik tuğla gövde, taş malzemeden yapılmış tek şerefeli bir minaredir. Şerefe altı, klasik üsluba uygun olarak beş sıra taş silme ile hareketlendirilmiştir. Minarenin petek kısmı, gövdeyle aynı biçimde silindirik ve tuğla malzeme ile inşa edilmiş olup, son kısmı konik formda kurşun kaplı külah ile sonlanmaktadır. Gövde boyunca dikey olarak yerleştirilmiş mazgal tipinde taş ışıklık açıklıkları, minare iç mekânına doğal aydınlık sağlamaktadır. Minarenin formu, yapım tekniği ve kullanılan malzemeler açısından döneminin mimari karakteristiğini yansıtmaktadır ve özgün niteliğini korumaktadır. Kadana Camii minaresinin klasik tuğla

gövdesinde zamanla oluşmuş olan derz boşalmaları, gözlemlenmektedir. Minarenin görünümü Şekil 4.88’de gösterilmiştir.



Şekil 4.88. Kadana Camii minaresi

Cami minaresinin yerden yüksekliği 23,16 m’dir. Cami minaresi caminin kuzeybatı köşesine bitişik bir vaziyette 6,15 m lik bir kare kaide üzerinde konumlanmıştır. Minare dış silindiri ve peteği tuğladan; kaide, şerefe ve iç silindiri taştan imal edilmiştir.. Dış silindir çapı 2,00 m’dir. Cami şerefesi yerden 13,92 m yükseklikte konumlanmış olup yüksekliği 1,85 m’ dir. Şerefe çapı 3,00 m’dir. Şerefeye 53 basamaklı merdivenle çıkılmaktadır. Şerefe ile alem arası 7,50 m’dir. Külâh kurşun saca kaplıdır.

En son 2016 yılında restorasyon geçiren camide, minare kısmında dış silindir kısmındaki hasarlı tuğlalar ve şerefedeki hasarlı taşlar yenilenmiştir. Derzlerin yerini kireçli derzler alırken külâh kısmı ise değiştirilip levha ile kaplanmıştır (Özsağlıcak 2019; Özdoğan 2024).

4.8.1. Kadana Camii teorik modal analiz uygulaması

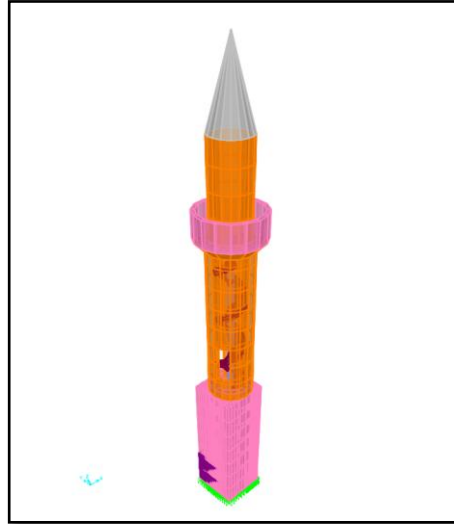
Yeğenağa Camii minaresinin sonlu eleman modellemesini ardından Kadana Camii’nin minaresinin sonlu eleman modellemesi gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman modelleme aşamaları, sonlu eleman modeli tamamlanan minareler için bahsedilen koşullarla aynı koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Kadana Camii minaresinin rölevesi incelendikten sonra minarenin modellemede kullanılacak nihai boyutlarının belirlenmesi

için keşfe gidilmiş ve nihai boyutlar belirlenmiştir. Minare rölevesi Şekil 4.89’da gösterilmiştir.



Şekil 4.89. Kadana Camii minare rölevesi

Nihai boyutların belirlenmesinin ardından Kadana Camii’nin minaresi SAP 2000 yazılımında oluşturulmuştur. Minarenin sonlu eleman modeli Şekil 4.90’da gösterilmiştir.



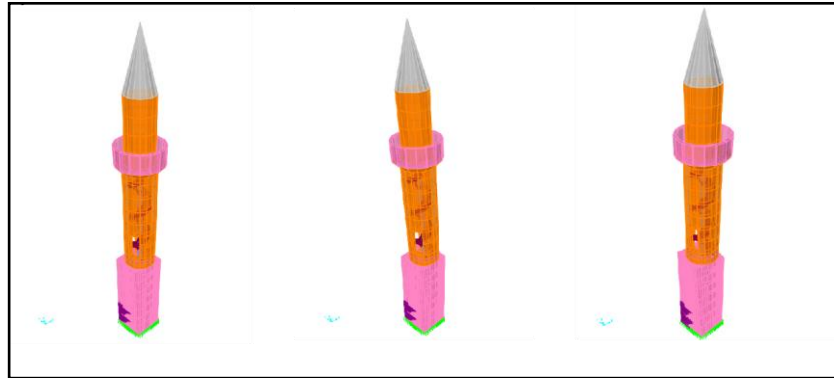
Şekil 4.90. Kadana Camii minaresi sonlu eleman modeli

Minarenin sonlu eleman modeli 3.794 düğüm noktalı ve 2.320 katı elemandan oluşmaktadır. Sonlu eleman modelinin malzeme özellikleri için tahribatsız deney yöntemi olan beton Schmidt çekicinden faydalanılmıştır. Cami minaresi incelendiğinde caminin

dış sütunu ve petek kısmının tuğladan; kaide, merdiven, iç silindir ve şerefe kısmının andezit ve bazalttan imal edildiği gözlenmiştir. Bazalt taşının yüzey sertlik değerinin 20,65, andezit için 19,9 olduğu belirlenmiştir. Denklem 3.2. kullanılarak andezitin basınç mukavemeti 18,37 MPa, bazalt için 3,88 MPa olarak hesaplanmıştır. Eşit oranda hesaplanan taş basınç mukavemeti 11,12 MPa olarak bulunmuştur. Bu değer kullanılarak minarenin taş kısımlarının duvar basınç mukavemeti ve duvar elastisite modülleri Denklem 3.4 ve Denklem 3.5 yardımıyla belirlenmiştir. K değeri 0,5; α ve β değerleri duvarlar düzgün bir biçimde örüldüğü için sırasıyla 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 2,81 MPa, duvar elastisite modül değeri ise 562 MPa olarak hesaplanmıştır. (Özdoğan 2024) Tuğla kısımlarına Schmidt çekici uygulandığında sertlik değeri alınamamıştır. Bu kısımların elastisite modül değeri için Özdoğan (2018)'de tanımlanan tuğla kısım için kullanılan 850 MPa değeri, tuğla kısımların elastisite modül değeri olarak tanımlanmıştır. Bu değerler yardımıyla minarenin teorik modal analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.44'te gösterilmiştir. Minarenin teorik mod şekilleri Şekil 4.91'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.44. Kadana Camii minaresi teorik modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (x yönü)	0,306
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (y yönü)	0,307
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (z yönü)	1,645

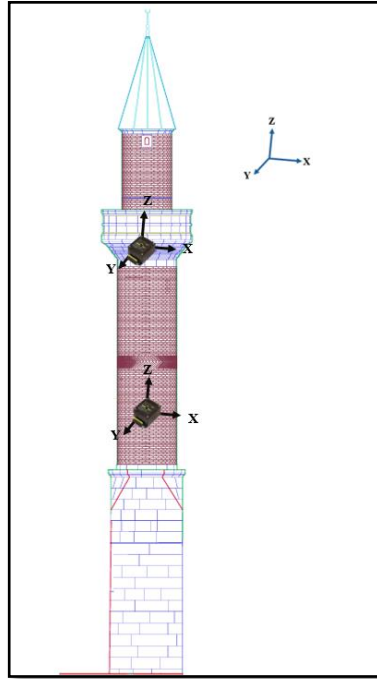


Şekil 4.91. Kadana camii minaresi a) kısa doğrultuda öteleme b)uzun doğrultuda öteleme c) burulma.

Minare sonlu eleman modelinde kısa doğrultu x yönü, uzun doğrultu y yönü, düşey doğrultu ise z yönü olarak ifade edilmiştir. Teorik modal analiz sonuçlarına göre, 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 hareketidir. Bu sonuçlara bağlı olarak minare şerefesine, ortasına ve tabanına ivmeölçerler bağlayıp minarede operasyonel modal analiz uygulaması yapılmıştır.

4.8.2. Kadana Camii minaresi operasyonel modal analiz uygulaması

Minarenin, dinamik davranış parametrelerinin yerinde belirlenmesi için minare üzerinde OMA uygulaması yapılmıştır. Kadana Camii minaresinin dinamik davranış parametreleri önceki kare planlı kubbesiz camiler gibi cami gövdesiyle beraber belirlenmiştir. Cami minare alt kısmı cami duvarının kuzeybatı köşesine denk gelmektedir. Dolayısıyla minare tabanı için caminin bu köşesine 2 tane tek eksenli ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Minare şerefe ve orta kısmına 3 eksenli 2 ivmeölçer yerleştirilmiştir. İvmeölçer yerleşim krokisi Şekil 4.92’de gösterilmiştir.



Şekil 4.92. Kadana Camii minaresi ivmeölçer yerleşim krokisi

3 eksenli ivmeölçerlerin yönü kuzeyi gösterecek şekilde minare ortasına ve şerefesine yerleştirilmiştir. Sabitleme işlemi sıcak yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sabitleme işlemi Şekil 4.93'te gösterilmiştir. İvmeölçerler minareye sabitlendikten sonra özel kablolar ile veri toplama ünitesine bağlanmıştır. Şekil 4.94'te veri toplama sistemi gösterilmiştir.



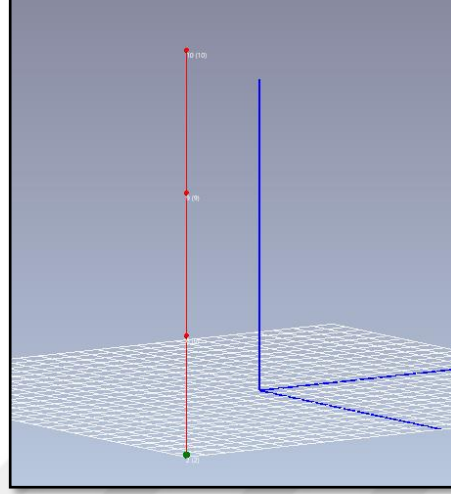
Şekil 4.93. Kadana Camii minaresi ivmeölçer sabitleme işlemi



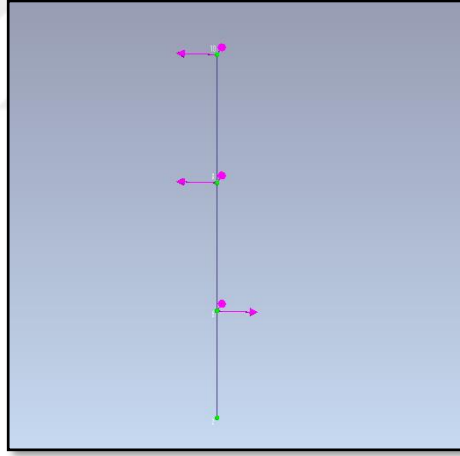
Şekil 4.94. Kadana Camii minaresi OMA çalışması veri toplama sistemi

Bütün kontroller yapıldıktan sonra minareden 15'er dakikalık 6 adet kayıt alınmıştır. Bunların 3'ü 100Hz'lik, 3'ü de 200Hz'lik frekanstadır. Cami araç trafiği bakımından seyrek bir bölgede yer almakta ve çevresel titreşime az maruz almaktadır. Bu yüzden cami minaresine plastik tokmak ile vurularak yapay bir titreşim oluşturulmuştur (Özdoğan 2024). Kayıt işlemlerinin ardından elde edilen kayıtlar Artemis Modal Pro (2023) yazılımına aktararak minarenin operasyonel mod şekillerini belirlenmiştir. Bu kayıtlar yazılımda var olan özel denklem ve çözüm yöntemleri yardımıyla analiz ederek minarenin operasyonel mod şekillerini ortaya çıkarmaktadır.

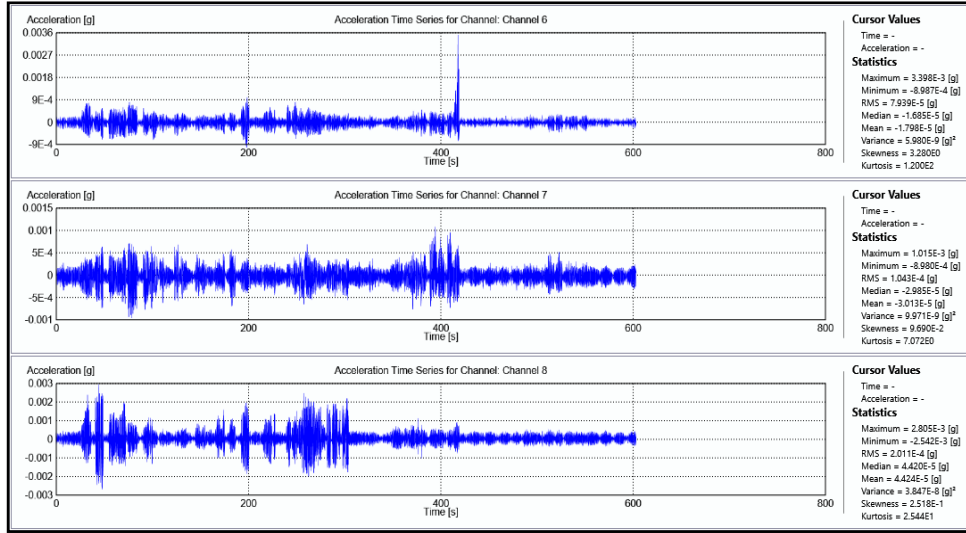
Kadana Camii minare temsili modeli Şekil 4.95'te, ivmeölçer tanımlamaları Şekil 4.96'da, titreşim kayıtları Şekil 4.97'de ve spektral yoğunluk fonksiyonları de Şekil 4.98'de gösterilmiştir.



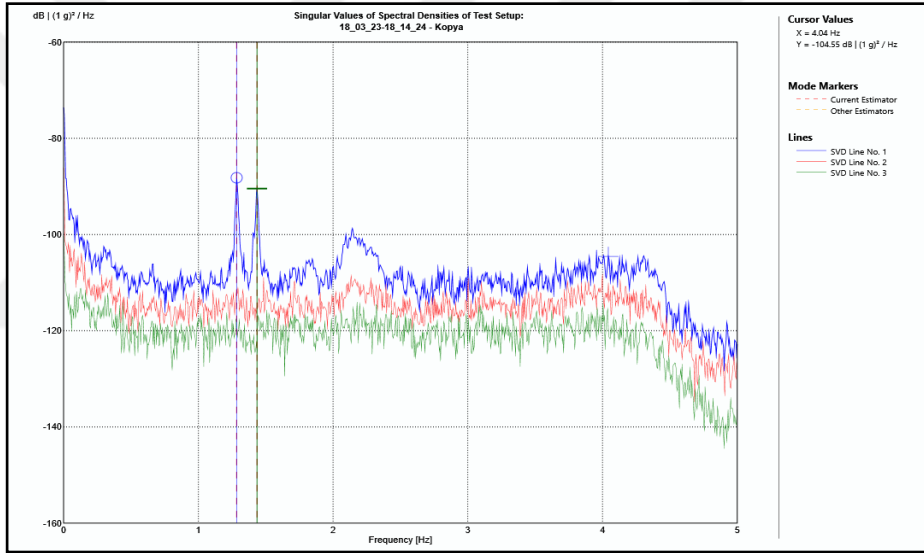
Şekil 4.95. Kadana Camii minaresi temsili geometrisi



Şekil 4.96. Kadana Camii minaresi ivmeölçerlerin tanımlanması



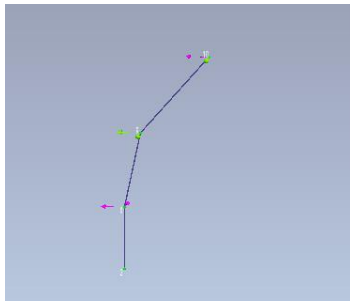
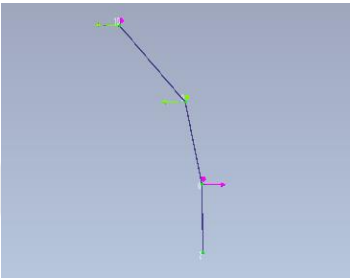
Şekil 4.97. Kadana Camii minaresi titreşim kayıtları



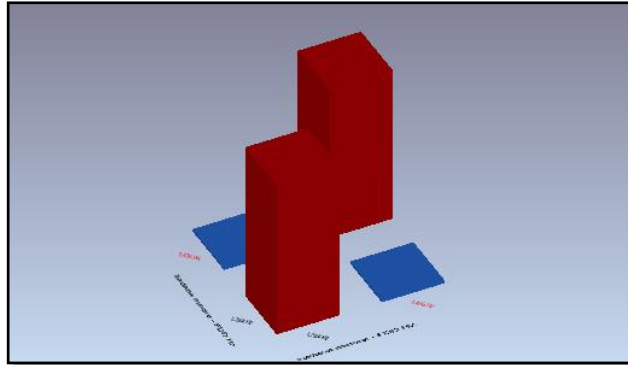
Şekil 4.98. Kadana Camii minaresi spektral yoğunluk fonksiyonu

Titreşim kayıtları frekans alanında ayrıştırma (FDD) analiz yöntemi ile çözümlenerek minarenin modal davranış parametreleri belirlenmiştir. Kadana Camii minaresinin Operasyonel mod şekilleri ve modal frekans değerleri Çizelge 4.45'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.45. Kadana Camii minaresi OMA sonuçları

Mod Şekli	Frekans (Hz)	
Kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi		1,264
Uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi		1,436

Yapılan OMA sonuçlarının güvenilir olup olmadığının belirlenmesi için MAC değerleri kontrol edilmiştir. Şekil 4.99’da Kadana Camii MAC değerleri grafiği ve Çizelge 4.46’da MAC değerleri tablosu gösterilmiştir.



Şekil 4.99. Kadana Camii minaresi MAC değerleri grafiği

Çizelge 4.46. Kadana Camii minaresi MAC değerleri tablosu

Frekans (Hz)	1,284	1,436
1,284	1	0,009056
1,436	0,009056	1

Çizelge 4.46’da MAC değerleri tablosu incelendiğinde modlar arasındaki MAC değerlerinin 0’a yakın olduğu ve modların birbirinden ayrık olduğu görülmüştür. Bu tablo gerçekleştirilen OMA çalışmasının güvenilir olduğunun göstergesidir.

4.8.3. Kadana Camii minaresi model kalibrasyon çalışması

Kadana Camii minaresinde gerçekleştirilen OMA sonrası, minarenin hem teorik hem de dinamik davranış parametreleri belirlenmiştir. Bu sonuçlar karşılaştırılarak, sonlu eleman modelinde herhangi bir güncellenmeye gerek olup olmadığı değerlendirilmiştir. Kadana Camii minaresinin ilk teorik ve OMA sonuçları toplu halde Çizelge 4.47’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.47. Kadana Camii minaresi ilk teorik modal analiz sonuçları ile OMA sonuçları.

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (X yönü)	1,264	0,306	75,80
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (Y yönü)	1,436	0,307	78,62
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (Z yönü)	-	1,645	-

Çizelge 4.47’deki sonuçlar karşılaştırıldığında minare sonlu eleman modelinde gerçekleştirilen ilk teorik modal analiz sonuçları ile minarenin OMA sonuçlarının birbirinden çok farklı olduğu ve hata oranlarının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu farkın asgari düzeye indirilmesi ve sonlu eleman model davranış parametrelerinin, minarenin dinamik davranış parametrelerini yansıtabilmesi için minarenin sonlu eleman modelinin güncellenmesi yani model kalibrasyonu gerekmektedir. Cami minaresinin teorik ve OMA sonuçları karşılaştırıldığında teorik ve modal davranış parametrelerinin benzer şekilde olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçtan hareketle model kalibrasyon işlemi için minarenin malzeme özelliklerinin güncellenmesi yeterli olacaktır.

Kadana Camii minaresi için ilk teorik modal analizdeki değerler baz alınarak taş ve tuğla kısımları için elastisite modül kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kadana Camii minaresi için tekrarlı işlemler sonucunda ulaşılan elastisite modül değerleri Çizelge 4.48’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.48. Kadana Camii minaresi elastisite modül kalibrasyon değerleri

Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)
Taş	12.000 MPa
Tuğla	6.000 MPa

Çizelge 4.48’deki değerler, Kadana Camii minaresinin sonlu eleman modeline tanıtıldığında, minare dinamik davranış parametrelerine en yakın davranış parametrelerinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 4.49’da bu sonuçlar ile minare OMA sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.49. Kadana Camii minaresi kalibreli teorik modal analiz sonuçları ile OMA sonuçları.

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (X yönü)	1,264	1,267	0,23
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (Y yönü)	1,436	1,315	8,42
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (Z yönü)	-	6,785	-

Çizelge 4.49’daki sonuçlar karşılaştırıldığında kalibrasyonu tamamlanmış minare sonlu eleman modeliyle, OMA sonuçlarının yakın olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Özellikle ilk iki mod şeklindeki hata oranları %0.23 ve %8.42’dir. Bu sonuçlar Kadana Camii minaresi için gerçekleştirilen model kalibrasyon güncellenmesinin doğru olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

4.9. Hacı Cuma Camii

1630 yılında inşa edilen Hacı Camii ile ilgili ayrıntılı bilgiler Bölüm 3.7.8’de verilmiştir. Bu kısımda, cami minaresi ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

Minare caminin kuzeybatı yönünde bulunmaktadır. Kesme taş kaide üzerine oturtulan minare gövdesi tuğladan oluşmaktadır. Tek şerefeli olup konik külâh ve alem ile sonlanmaktadır. Cami minaresinin yerden yüksekliği 24,66 m’dir. Cami minaresi caminin kuzeybatı köşesine bitişik bir vaziyette 6,80 m’lik bir kare kaide üzerinde konumlanmıştır. Cami dış silindiri ve peteği tuğladan, kaide, şerefe ve iç silindiri taştan imal edilmiştir. Dış gövde çapı 2,20 m’dir. Cami şerefesi yerden 14,46 m yükseklikte konumlanmış olup yüksekliği 2.04 m’ dir. Şerefe çapı 3,40 m’dir. Şerefeye 38 basamaklı merdivenle çıkılmaktadır. Şerefe ile alem arası 8,09 m’dir. Külâh kurşun saca kaplıdır. Minare görünüşü Şekil 4.100’de verilmiştir.

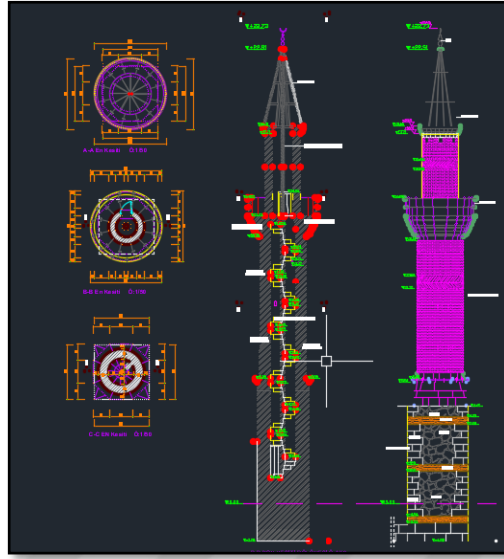


Şekil 4.100. Hacı Cuma Camii minaresi

4.9.1. Hacı Cuma Camii minaresi teorik modal analiz uygulaması

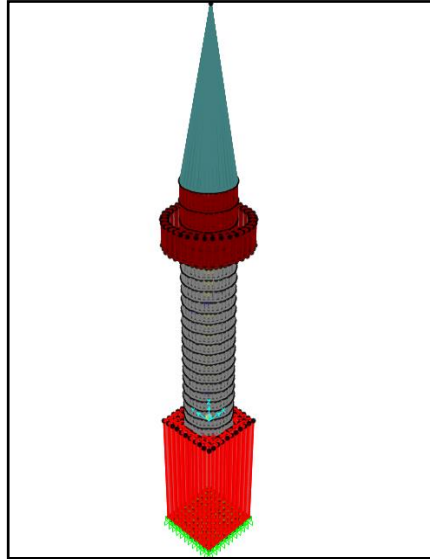
Kadana Camii minaresinin sonlu eleman modellemesini ardından Hacı Cuma Camii’nin minaresinin sonlu eleman modellemesi gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman modelleme aşamaları, sonlu eleman modeli tamamlanan minareler için bahsedilen koşullarla aynı koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Hacı Cuma Camii minaresinin rölevesi incelendikten sonra minarenin modellemede kullanılacak nihai boyutlarının

belirlenmesi için keşfe gidilmiş ve nihai boyutlar belirlenmiştir. Minare rölevesi Şekil 4.101’de gösterilmiştir.



Şekil 4.101. Hacı Cuma Camii minare rölevesi

Nihai boyutların belirlenmesinin ardından Hacı Cuma Camii’nin minaresi SAP 2000 yazılımında oluşturulmuştur. Minarenin sonlu eleman modeli Şekil 4.102’de gösterilmiştir.



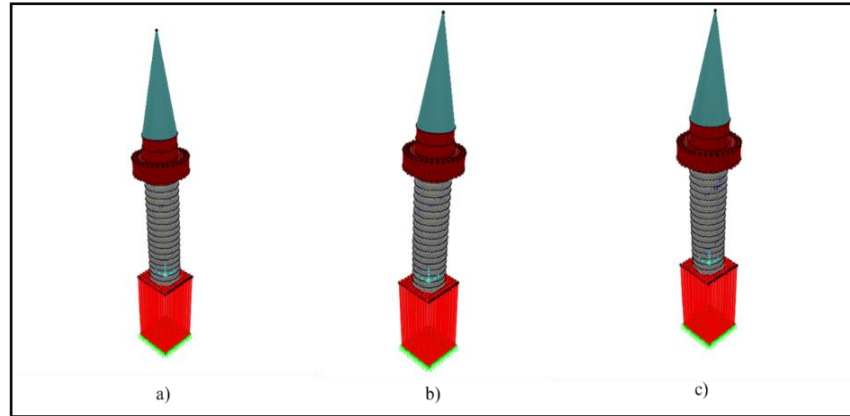
Şekil 4.102. Hacı Cuma Camii minaresi sonlu eleman modeli

Minarenin sonlu eleman modeli 3.583 düğüm noktalı ve 1.633 katı elemandan oluşmaktadır. Sonlu eleman modelinin malzeme özellikleri için tahribatsız deney yöntemi

olan beton Schmidt çekicinden faydalanılmıştır. Caminin inşa edildiği taş durumunda andezit taşı kullanılmıştır. Cami minaresi incelendiğinde caminin dış sütunu ve petek kısmının tuğladan; kaide, merdiven, iç silindir ve şerefe kısmının andezitten imal edildiği gözlenmiştir. Andezit taşının yüzey sertlik değerinin 24,85 MPa olduğu belirlenmiştir. Denklem 3.1. kullanılarak taşın basınç mukavemeti 22,79 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değer kullanılarak, minarenin taş kısımlarının duvar basınç mukavemeti ve duvar elastisite modülleri Denklem 3.4. ve Denklem 3.5. yardımıyla belirlenmiştir. K değeri 0,5; α ve β değerleri duvarlar düzgün bir biçimde örüldüğü için sırasıyla 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 4,65 MPa, duvar elastisite modül değeri ise 930 MPa olarak hesaplanmıştır. (Özdoğan 2024) Tuğla kısımlarına Schmidt çekici uygulandığında sertlik değeri alınamamıştır. Bu kısımların elastisite modül değeri içi Özdoğan (2018)'de tanımlanan tuğla kısım için kullanılan 850 MPa değeri, tuğla kısımların elastisite modül değeri olarak tanımlanmıştır. Bu değerler yardımıyla minarenin teorik modal analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.50'de gösterilmiştir. Minarenin teorik mod şekilleri Şekil 4.103'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.50. Hacı Cuma Camii minaresi teorik modal analiz sonuçları

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (x yönü)	0,725
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (y yönü)	0,778
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (z yönü)	4,581



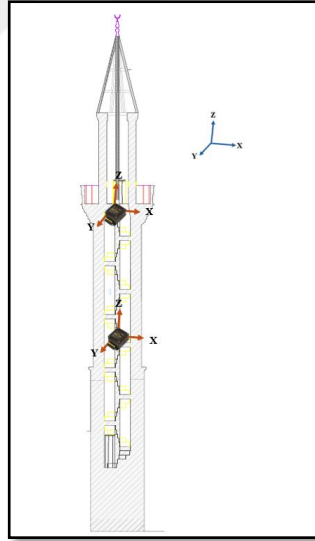
Şekil 4.103. Hacı Cuma camii minaresi a)kısa doğrultuda öteleme b)uzun doğrultuda öteleme c)burulma.

Minare sonlu eleman modelinde kısa doğrultu x yönü, uzun doğrultu y yönü, düşey doğrultu ise z yönü olarak ifade edilmiştir. Teorik modal analiz sonuçlarına göre,

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 hareketidir. Bu sonuçlara bağlı olarak minare şerefesine, ortasına ve tabanına ivmeölçerler bağlayıp minarede operasyonel modal analiz uygulaması yapılmıştır.

4.9.2. Hacı Cuma Camii minaresi operasyonel modal analiz uygulaması

Minarenin, dinamik davranış parametrelerinin yerinde belirlenmesi için minare üzerinde OMA uygulaması yapılmıştır. Hacı Cuma Camii minaresinin dinamik davranış parametreleri önceki kare planlı kubbesiz camiler gibi cami gövdesiyle beraber belirlenmiştir. Cami minare alt kısmı cami duvarının kuzeybatı köşesine denk gelmektedir. Dolayısıyla minare tabanı için caminin bu köşesine 2 tane tek eksenli ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Minare şerefe ve orta kısmına 3 eksenli 2 ivmeölçer yerleştirilmiştir. İvmeölçer yerleşim krokisi Şekil 4.104'te gösterilmiştir.



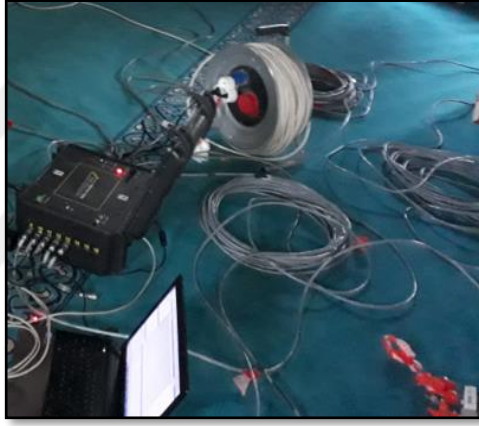
Şekil 4.104. Hacı Cuma Camii minaresi ivmeölçer yerleşim krokisi

3 eksenli ivmeölçerlerin yönü kuzeyi gösterecek şekilde minare ortasına ve şerefesine yerleştirilmiştir. Sabitleme işlemi sıcak silikon yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sabitleme işlemi Şekil 4.105'te gösterilmiştir. İvmeölçerler minareye sabitlendikten

sonra özel kabloları ile veri toplama ünitesine bağlanmıştır. Şekil 4.106’da veri toplama sistemi gösterilmiştir.

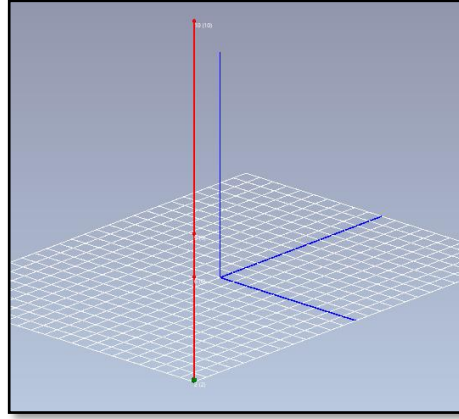


Şekil 4.105. Hacı Cuma Camii minaresi ivmeölçer sabitleme işlemi

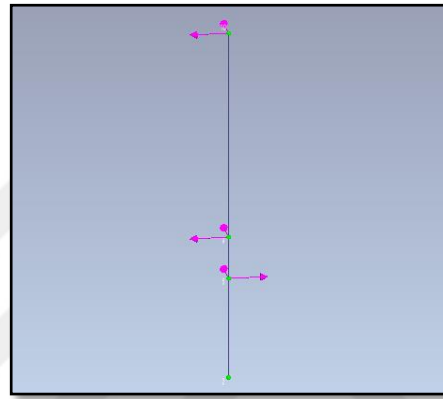


Şekil 4.106. Hacı Cuma Camii minaresi veri toplama sistemi

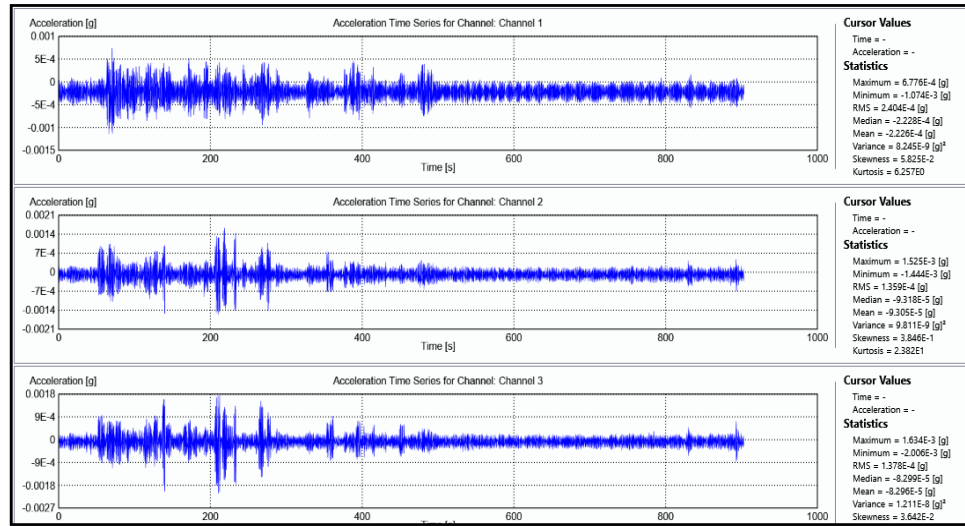
Bütün kontroller yapıldıktan sonra minareden 15’er dakikalık 6 adet kayıt alınmıştır. Bunların 3’ü 100Hz’lik, 3’ü de 200Hz’lik frekanstadır. Cami araç trafiği bakımından seyrek bir bölgede yer almakta ve çevresel titreşime az maruz almaktadır. Bu nedenle cami minaresine plastik tokmak ile vurularak yapay bir titreşim oluşturulmuştur (Özdoğan 2024). Kayıt işlemlerinin ardından elde edilen kayıtlar Artemis Modal Pro (2023) yazılımına aktarılarak minarenin operasyonel mod şekillerini belirlenmiştir. Bu kayıtlar yazılımda var olan özel denklem ve çözüm yöntemleri yardımıyla analiz ederek minarenin operasyonel mod şekillerini ortaya çıkarmaktadır. Hacı Cuma Camii minare temsili modeli Şekil 4.107’de, ivmeölçer tanımlamaları Şekil 4.108’de , titreşim kayıtları Şekil 4.109’da ve spektral yoğunluk fonksiyonları de Şekil 4.110’da gösterilmiştir.



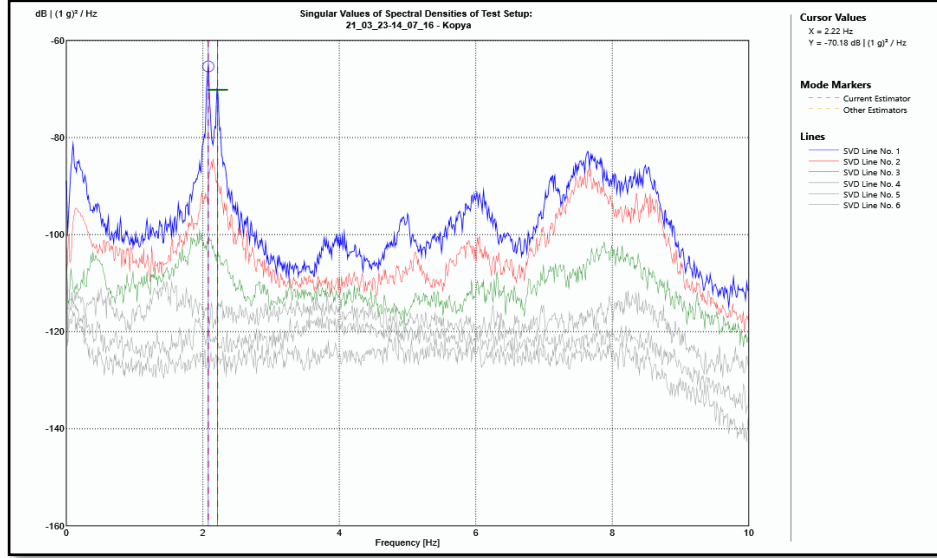
Şekil 4.107. Hacı Cuma Camii minaresi temsili geometrisi



Şekil 4.108. Hacı Cuma Camii minaresi ivmeölçer yerleşimi



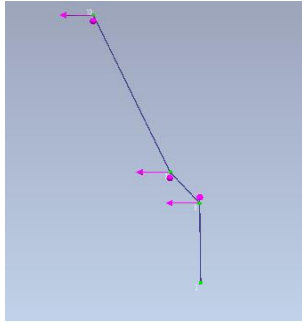
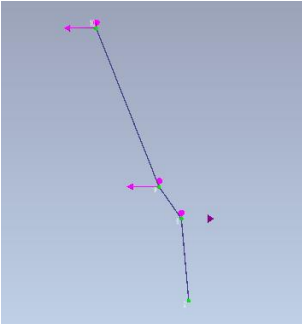
Şekil 4.109. Hacı Cuma Camii minaresi titreşim kayıtları



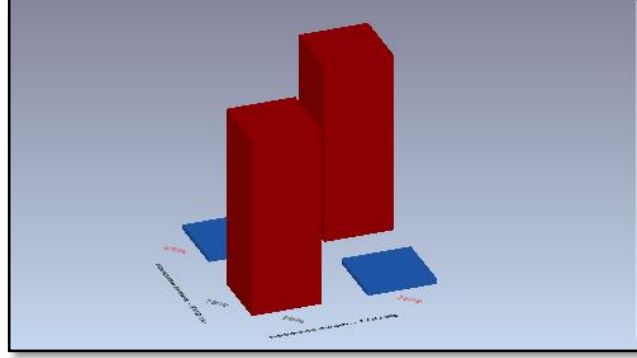
Şekil 4.110. Hacı Cuma Camii minaresi spektral yoğunluk fonksiyonu

Titreşim kayıtları frekans alanında ayrıştırma (FDD) analiz yöntemi ile çözümlenerek minarenin modal davranış parametreleri belirlenmiştir. Hacı Cuma Camii minaresinin Operasyonel mod şekilleri ve modal frekans değerleri Çizelge 4.51’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.51. Hacı Cuma Camii minaresi OMA sonuçları

Mod Şekli	Frekans (Hz)	
Kısa doğrultuda yatay öteleme hareketi		2.080
Uzun doğrultuda yatay öteleme hareketi		2.217

Yapılan OMA sonuçlarının güvenilir olup olmadığının belirlenmesi için MAC değerleri kontrol edilmiştir. Şekil 4.111’de Hacı Cuma Camii minaresi MAC değerleri grafiği ve Çizelge 4.52’de MAC değerleri tablosu aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.111. Hacı Cuma camii minaresi MAC değerleri

Çizelge 4.52. Hacı Cuma Camii minaresi MAC değerleri tablosu

Frekans (Hz)	2,080	2,217
2,080	1	0,02941
2,217	0,02941	1

Çizelge 4.52’de MAC değerleri tablosu incelendiğinde modlar arasındaki MAC değerlerinin 0’a yakın olduğu ve modların birbirinden ayrık olduğu görülmüştür. Bu tablo gerçekleştirilen OMA’nın güvenilir olduğunun göstergesidir.

4.9.3. Hacı Cuma Camii minaresi model kalibrasyon çalışması

Hacı Cuma Camii minaresinde gerçekleştirilen OMA sonrası, minarenin hem teorik hem de dinamik davranış parametreleri belirlenmiştir. Bu sonuçlar karşılaştırılarak, sonlu eleman modelinde herhangi bir güncellenmeye gerek olup olmadığı değerlendirilmiştir. Hacı Cuma Camii minaresinin ilk teorik modal analiz ve OMA sonuçları toplu halde Çizelge 4.53’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.53. Hacı Cuma Camii minaresi ilk teorik modal analiz sonuçları ile OMA sonuçları.

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (X yönü)	2,080	0,725	65,14
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (Y yönü)	2,217	0,778	64,90
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (Z yönü)	-	4,581	-

Çizelge 4.53'teki sonuçlar karşılaştırıldığında minare sonlu eleman modelinde gerçekleştirilen ilk teorik modal analiz sonuçları ile minarenin OMA sonuçlarının birbirinden çok farklı olduğu ve hata oranlarının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu farkın asgari düzeye indirilmesi ve sonlu eleman model davranış parametrelerinin, minarenin dinamik davranış parametrelerini yansıtabilmesi için minarenin sonlu eleman modelinin güncellenmesi yani model kalibrasyon gerekmektedir. Cami minaresinin teorik ve OMA sonuçları karşılaştırıldığında teorik ve modal davranış parametrelerinin benzer şekilde olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçtan hareketle model kalibrasyon işlemi için minarenin malzeme özelliklerinin güncellenmesi yeterli olacaktır.

Hacı Cuma Camii minaresi için ilk teorik modal analizdeki değerler baz alınarak taş ve tuğla kısımları için elastisite modül kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Hacı Cuma Camii minaresi için tekrarlı işlemler sonucunda ulaşılan elastisite modül değerleri Çizelge 4.54'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.54. Hacı Cuma Camii minaresi elastisite modül kalibrasyon değerleri

Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)
Taş	8.000 MPa
Tuğla	6.000 MPa

Çizelge 4.54'teki değerler, Hacı Cuma Camii minaresinin sonlu eleman modeline tanıtıldığında, minare dinamik davranış parametrelerine en yakın davranış

parametrelerinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 4.55'te bu sonuçlar ile minare OMA sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.55. Hacı Cuma Camii minaresi kalibreli teorik modal analiz sonuçları ile OMA sonuçları.

Mod Numarası	Mod Şekli	Frekans (Hz)		Hata Oranı (%)
		OMA	Teorik	
1	Kısa doğrultuda öteleme hareketi (X yönü)	2,080	2,000	3,84
2	Uzun doğrultuda öteleme hareketi (Y yönü)	2,217	2,145	3,24
3	Düşey eksen etrafında yanal burulma hareketi (Z yönü)	-	12,38	-

Çizelge 4.55 incelendiğinde ilk teorik modal analiz sonuçlarıyla OMA sonuçları karşılaştırıldığında sonlu eleman modeline tanıtılan malzeme özelliklerinin, OMA sonucuyla uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Özellikle ilk mod şeklindeki %3,84 ve ikinci mod şeklindeki %3,24 hata oranları nedeniyle, Hacı Cuma Camii minaresi üzerinde model kalibrasyon çalışması yapılmasına gerek olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

4.10. Minare Dinamik Davranış Parametrelerinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

Minareler üzerinde OMA çalışmalarının ve sonlu eleman model kalibrasyonlarının tamamlanmasının ardından sonuçlar değerlendirilmiştir. İlk değerlendirilme aşamasında, minarelerin narinlik ve rijitlik durumları sorgulanmıştır. Bunun için minarelerin gövde yüksekliği ve gövde yarıçapları belirlenerek bu iki parametrenin oranları hesaplanmıştır. Başka bir parametre olarak da minarelerin hâkim titreşim periyotları belirlenmiştir. Bu periyot değeri, minarelerin operasyonel modal analiz sonucu belirlenen ilk modal şekline denk gelen modal frekans değerinin 1'e bölünmesiyle hesaplanır. Bu periyot değeri de minarelerin rijitlik durumunu belirlemek için önemli bir parametredir. Çizelge 4.56'da bu parametreler kullanılarak elde edilen tablo gösterilmiştir.

Çizelge 0.1. OMA sonucu deneysel olarak belirlenen minare hakim titreşim periyotları

Cami	Minare Gövde Yüksekliği (Mm)	Minare Gövde Çapı (Mm)	Minare Hakim Titreşim Periyodu (Sn)	Narinlik oranı
Ulu Camii	9360	1800	0,54	5,20
Lala Mustafa Paşa Camii	9270	2720	0,42	3,40
Pervizoğlu Camii	8120	950	0,40	8,54
Muratpaşa Camii	16430	3460	0,62	4,74
Yukarı Habip Efendi Camii	5870	2200	0,35	2,66
Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii	8700	2180	0,98	3,99
Yeğenağa Camii	5160	1960	0,53	2,63
Kadana Camii	7320	2000	0,79	3,66
Hacı Cuma Camii	9750	2200	0,48	4,48

Çizelge 4.56 değerlendirildiğinde;

Minare yüksekliği:

- En yüksek minare: Muratpaşa Camii (16.430 mm)
- En düşük minare: Yeğenağa Camii (5.160 mm)

Minare gövde çapı:

- En Yüksek(geniş) : Muratpaşa Camii (3.460 mm)
- En Düşük (dar) : Pervizoğlu Camii (950 mm)

Hakim titreşim periyodu (sn):

- En kısa periyot : Yukarı Habip Efendi Camii (0,35 sn)

- En uzun periyot : Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii (0,98 sn)

Yükseklik/Çap oranı:

- En yüksek oran: Pervizoğlu Camii (8,54) → görece ince bir minare
- En düşük oran: Yeğenağa Camii (2,63) → görece kalın minare

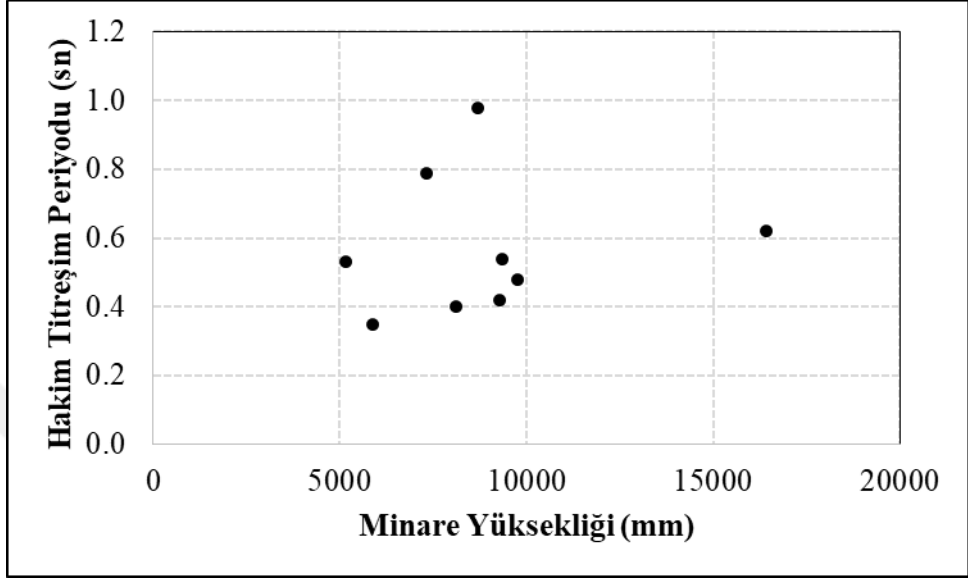
Oransal ilişki:

- Yükseklik/çap oranı yüksek olan minareler daha uzun ve ince bir profile sahip.
- Daha düşük yükseklik/çap oranı olan minareler daha kısa ve kalın profilli.

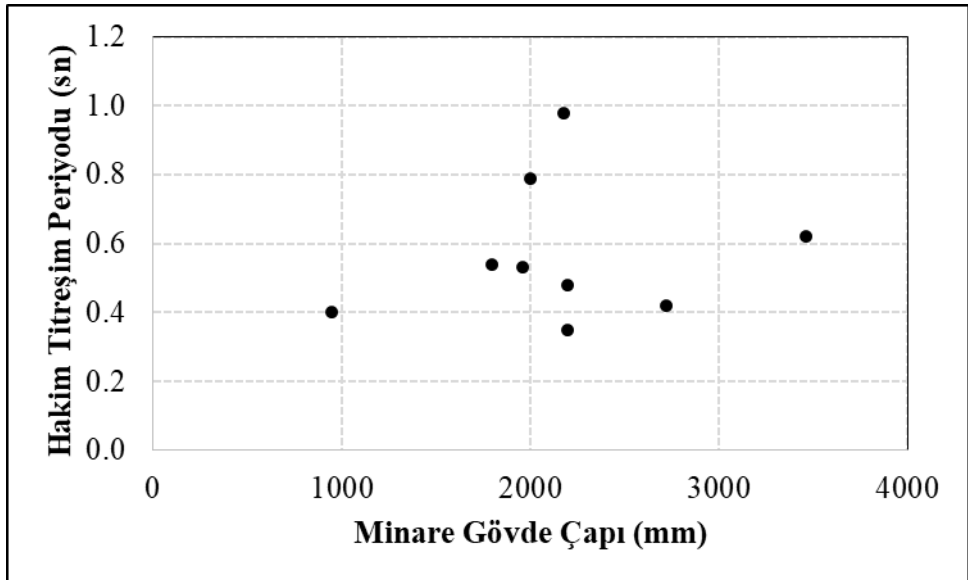
Minareler rijitliğe göre kendi içlerinde birbiriyle karşılaştırılmıştır. Bunun için minare hâkim titreşim periyodu değerlerinden faydalanmıştır. Genellikle minare gövde yüksekliği arttığında genellikle minare periyodunun arttığı, kısa boyutlu minarelerin daha rijit davrandığı görülmüştür. Fakat Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii minaresinin, Lala Mustafa Paşa, Murat Paşa ve Ulu Camii minarelerinden daha kısa olmasına rağmen, bu minarelere göre daha az rijit olduğu minare hâkim titreşim periyodunda görülmüştür.

Minarelerin narinlik oranları ile ilgili değerlendirme yapıldığında Yukarı Habip Efendi ve Yeğenağa Camii'nin minarelerinin, minareler arasında narinliği en düşük olan minareler oldukları görülmektedir. Benzer narinlik oranlarına sahip Taş Camii ile Kadana Camii minarelerinin, hâkim titreşim periyotlarına göre rijitliklerinin birbirine benzer olduğu yorumu yapılabilir. Gövde çapı yüksekliğinin minare rijitliğine etkisi değerlendirildiğinde hemen hemen aynı yüksekliğe sahip olan Ulu Camii ve Hacı Cuma Camii arasında, Hacı Cuma Camii'nin daha kalın gövde çapına sahip olmasından dolayı Ulu Camii minaresine göre daha rijit bir davranış sergilediği görülmektedir. Aynı şekilde Yeğenağa ve Yukarı Habip Efendi Camii minareleri arasında, Yukarı Habip Efendi Camii minaresinin daha kalın gövde çapı sayesinde daha rijit davrandığı görülmektedir. Sonuç olarak minare gövde çapının minare rijitliğine önemli bir etkisi olduğu sonucu çıkarılabilir. Minarelerin yüksekliği arttıkça, minare rijitliğinin azaldığı ve buna bağlı olarak periyodun arttığı sonucu çıkarılabilir.

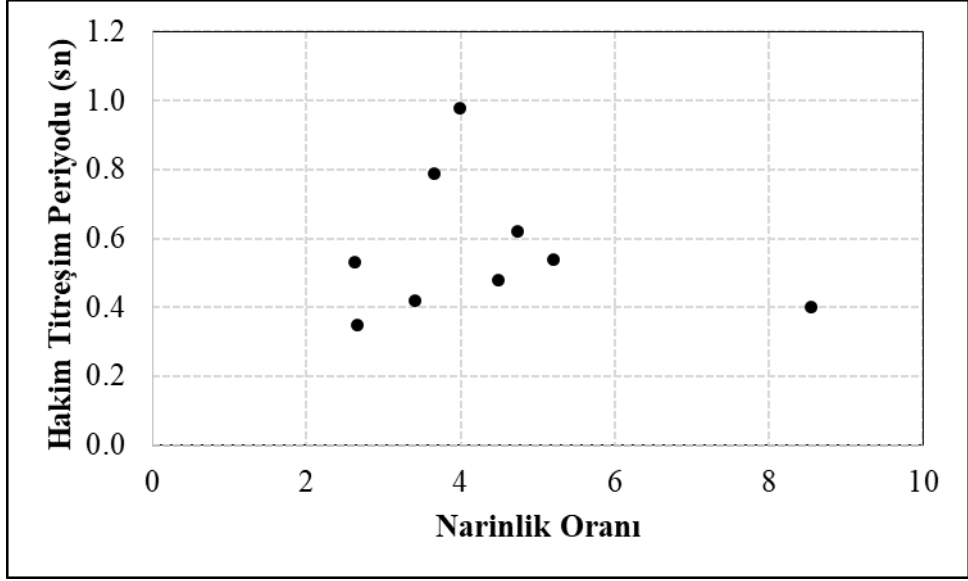
Gelinen noktada, minare hâkim titreşim periyotları ile minare yüksekliği, minare gövde çapı ve minare narinlik oranı gibi geometrik parametreler arasında anlamlı bir ilişki olup olmadığının değerlendirilebilmesi amacıyla Şekil 4.112, Şekil 4.113, Şekil 4.114’te sunulan grafik gösterimler hazırlanmıştır.



Şekil 4.112. Minare yüksekliği – hâkim titreşim periyodu dağılımı



Şekil 4.113. Minare gövde çapı – hâkim titreşim periyodu dağılımı



Şekil 4.114. Minare narinlik oranı – hâkim titreşim periyodu dağılımı

Şekil 4.112, Şekil 4.113, Şekil 4.114’te sunulan grafikler üzerinde yapılan sayısal irdellemelerde minare hâkim titreşim periyotları ile minare yüksekliği, minare gövde çapı ve minare narinlik oranı parametreleri arasında anlamlı bir matematiksel ilişki ortaya konulamamıştır. Sunulan grafiklerdeki verinin saçılımı ve bariz bir eğilim göstermemesi; tarihi minarelerinin her birinin kendine has karakteristik davranışının olduğunu ve genelleme yapılabilmesinin güçlüğüne ortaya koyan bir bulgu olarak değerlendirilmektedir.

Tez çalışmasının amaçlarından biri minarelerin sonlu eleman modellerinin, minarenin dinamik davranış parametrelerine mümkün olduğunca yakınsatırken takip edilebilecek genel bir yöntem varlığının irdelenmesidir. Başlangıç modelleri oluşturulurken benimsenen malzeme mekanik özellikleri kestirim yönteminin minare yapıları için tutarlı sonuçlar vermediği görülmüştür. Genel olarak; sonlu eleman modellerinde ve sınır koşullarında minare model davranışını etkileyecek bir sorun olmadığından model kalibrasyonu elastisite modül güncellemesiyle gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.57’de minarelerin model kalibrasyonu öncesi ve sonrası durumları gösterilmiştir.

Çizelge 0.2. Sonlu eleman model kalibrasyonu sonucu belirlenen mekanik özellikler

Minare	Başlangıç Modeli			Kalibrasyon Sonrası		
	Taş Elastisite Modülü (Mpa)	Tuğla Elastisite Modülü (Mpa)	Hata Oranı* (%)	Taş Elastisite Modülü (Mpa)	Tuğla Elastisite Modülü (Mpa)	Hata Oranı* (%)
Ulu Camii	978	850	52,2	3.600	3900	0,21
Lala Mustafa Paşa Camii	945	-	63,34	7.000	-	0,25
Pervizoğlu Camii	516	850	83,76	19.500	2.000	0,12
Muratpaşa Camii	856	-	67,04	7.900	-	0,24
Yukarı Habip Efendi Camii	928	850	68,06	12.500	6.000	0,76
Aşağı Hasan-ı Basri Taş Camii	258	850	37,00	3.000	1.200	0,29
Yeğenağa Camii	934	850	47,70	7.000	3.500	0,32
Kadana Camii	562	850	75,80	12.000	6.000	0,23
Hacı Cuma Camii	930	850	65,14	8.000	6.000	3,84

*: Hata oranı OMA sonucu bulunan hakim titreşim periyodu ile sonlu eleman modeli üzerinde teorik olarak hesaplanan değer için hesaplanmıştır.

Minarelerin malzeme özelliklerinin belirlenmesi için tahribatsız bir deney yöntemi olan beton Schmidt çekici yöntemi kullanıldığı tez çalışmasında belirtilmiştir. Taşların türü bilindiği takdirde, Özdoğan (2018) ve Erkmen (2022) çalışmalarında önerilen kalibrasyon bağıntılarından yararlanılarak malzeme özellikleri belirlenmiş ve bu değerler minarenin sonlu eleman modeline tanıtılmıştır. Çizelge 4.57 incelendiğinde

temelinde yığma duvar mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla oluşturulan bu bağıntıların, minarelerin dinamik davranış parametrelerini belirlemekte yetersiz kaldığı, minarelerde gerçekleştirilen OMA ile kanıtlanmıştır. Bu değerler baz alınarak minareler üzerinde model kalibrasyonu çalışması yapılmıştır. Model kalibrasyon işlemi, minarelerin hâkim titreşim periyodu olan ilk mod şekline karşılık gelen modal frekans değerine göre gerçekleştirilmiştir. Minareler için yapılan model kalibrasyonlarının doğruluğu Çizelge 4.56'daki düşük hata oranları ile kanıtlanmıştır. Minareler için tanımlanan model kalibrasyon değerlerinin duvar elastisite modüllerine göre yüksek değerlerde olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu elastisite modül değerlerinin başka bir doğrulaması ise literatür çalışmaları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Literatür incelendiğinde iki malzeme veya sadece tek malzemeden inşa edilen minareler için, Erdil et al. (2018), tuğla elastisite modülü için 2.250 MPa, Mutlu and Şahin (2016) tuğla elastisite modülü için 3.350 MPa, Erdoğan et al (2019) da ise tuğla için 21.000 MPa elastisite modülü tanımlanmıştır. Literatürde var olan bu örnekler baz alındığında, model kalibrasyonu için elde edilen tuğla elastisite modül değerlerinin bu değerler arasında sonucuna ulaşılmıştır. Pervizoğlu Camii minaresi için kalibresi gerçekleştirilen tuğla elastisite modülü 2.000 MPa olmasına rağmen alt sınır değerine yakındır. Restorasyonu yakın zamanda tamamlanan Yukarı Habip Efendi ve Hacı Cuma Camii minarelerinde tuğla elastisite modülünün diğerlerine göre daha yüksek, 6.000 MPa değerinde olmasının; restorasyon sırasında yeni malzeme eklenmesi ve minarenin sağlam bir şekilde yeniden inşa edilmesi ile açıklanabileceği söylenebilir. Taş Cami minaresinin, diğer camilere göre tuğlasının daha düşük kalmasının, minarede hasarların veya hasarlı malzemeye ilişkili olduğu yorumu yapılabilir.

Taştan imal edilmiş minarelerin elastisite modülleri incelendiğinde, Yurdakul et al. (2021) çalışmasında minare elastisite modülü 11.654 MPa olarak kabul edilmiştir. Doğangün et al. (2008) çalışmasında taştan imal edilmiş yığma minareler için 3.000 MPa değeri esas alınmıştır. Mutu ve Şahin (2016), Bursa Ulu Camii minaresi üzerine yaptıkları çalışmalarında elastisite modülü için 10.000 MPa değerini kabul etmiştir. Kocaman et al. (2025) ise çalışmalarında, Serhatoğlu ve Livaoğlu (2019), Hökelekli et al. (2020) ve Onat et al. (2023) çalışmalarından yararlanarak Osmanlı dönemi minareleri için elastisite modülü değerlerini 3.000 MPa ile 25.000 MPa arasında önermiştir. Literatürde verilen bu değerler dikkate alındığında, tez çalışmasında seçilen minarelerin taş elastisite

modüllerinin Kocaman et al. (2025) tarafından belirtilen değerler aralığında olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Minare operasyonel modal analiz sonuçlarında burulma modu net olarak elde edilememiştir. Dolayısıyla model kalibrasyonları gerçekleştirilirken   mod şeklinin düşük hata oranlı model kalibrasyonu yapmak mümkün olmamıştır.



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Erzurum'daki tarihi yığma minarelerin dinamik davranışlarının tahribatsız deney yöntemleriyle belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada boyutlarına göre seçilen 9 tarihi cami minaresinin sonlu eleman modelleri oluşturulan minarelerin OMA yöntemiyle dinamik davranış parametreleri belirlenip sonlu eleman modelleri kalibre edilmiştir. Çalışmada ulaşılan başlıca sonuçlar şunlardır:

- Minarelerin sonlu eleman modelinde malzeme özelliklerini belirlemek için kullanılan Schmidt çekici kullanılarak elde edilen kalibrasyonların, yığma duvarların mekanik özelliklerini belirlemede yardımcı olurken minarede uygun sonuçlar vermemiştir.
- Minarelerin yüksekliği arttıkça hâkim titreşim periyotlarının arttığı görülmüştür. Kısa gövdeli minarelerin, uzun minarelere göre daha rijit bir davranış sergilediği OMA sonuçları ile belirlenmiştir.
- Minare yüksekliği, minare gövde çapı ve narinlik oranı gibi geometrik parametreler ile hakim titreşim periyodu arasında anlamlı matematik ilişkiler kurulamamıştır. Kültür mirası minare yapılarının her birinin kendine has karakteristik modal davranışı olduğu sonucuna varılmıştır.
- Minare sonlu eleman model kalibrasyonlarında, minarenin kütle katılım oranlarına göre ilk iki mod şeklinin, minare davranışını daha iyi yansıtması nedeniyle model kalibrasyonları bu iki mod şekli üzerinden gerçekleştirilmiştir. Model kalibrasyon değerleriyle gerçekleştirilen model analizlerin, OMA sonuçlarıyla uyumlu olduğu belirlenmiştir. Burulma modunun da içinde olduğu bir kalibrasyon mümkün olmamıştır.
- Model kalibrasyonları için belirlenen taş ve tuğlanın elastisite modül değerlerinin, literatürdeki elastisite modül değerleriyle uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Daha yakın tarihte restorasyon geçiren cami minarelerinin, daha yüksek elastisite modülüne sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Minarelerin deprem etkileri altındaki performans değerlendirmeleri bu tez çalışması kapsamı dışındadır, yapılmamıştır.

KAYNAKLAR

- Acar, R., 2009. Anıtsal kule türü yapıların deprem davranışlarının incelenmesi ve alternatif sistemlerin geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Akansel, V. H., Ameri, G., Askan, A., Caner, A., Erdil, B., Kale, Ö., ve Okuyucu, D., 2013. The 23 October 2011 Mw 7.0 Van (Eastern Turkey) Earthquake: Interpretations of recorded strong ground motions and post-earthquake conditions of nearby structures. Earthquake Spectra.
- Altıok, T., Y., 2019. Tarihi minarelerin dinamik özelliklerinin deneysel ve nümerik yöntemler ile araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Manisa CELAL BAYAR Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- 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.
- Anonim 2024a. Web Sitesi. Web Sitesi. <https://www.afad.gov.tr/turkiye-deprem-tehlike-haritasi> , Erişim Tarihi: 25.10.2024.
- Anonim, 2024b Web Sitesi. <https://www.imo.org.tr/Eklenti/8624%2Cdeprem-rapor-2-webpdf.pdf> , Erişim Tarihi: 18.09.2024 .
- Anonim, 2024c. Web Sitesi. <https://www.tmmob.org.tr/sites/default/files/mo06022023depremtespit.pdf>, Erişim Tarihi 18.09.2024.
- Anonim, 2024d. Web Sitesi <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2024/02/Kahramanmaras-ve-Hatay-Depremleri-Yeniden-Imar-ve-Gelisme-Raporu-1.pdf> , Erişim Tarihi 19.09.2024.
- Anonim, 2024e Web Sitesi. <https://kriterdergi.com/dosya-deprem/6-subat-depremleri-ve-deprem-ekonomisi> , Erişim Tarihi 20.09.2024.
- Anonim, 2024f. Web Sitesi. https://en.wikipedia.org/wiki/1859_Erzurum_earthquake Erişim Tarihi:21.10.2024.
- Anonim, 2024g. Web Sitesi https://en.wikipedia.org/wiki/1983_Erzurum_earthquake Erişim Tarihi:21.10.2024.
- Anonim, 2024h. Web Sitesi. https://www.mo.org.tr/_docs/MODEPREMRAPOR2.pdf Erişim Tarihi: 21.10.2024.
- Anonim, 2024i. Web Sitesi. <https://www.iahaber.com/erzurumda-yapilarin-yuzde-40i-deprem-riski-tasiyor/1783/> Erişim Tarihi:22.10.2024.

- Anonim, 2024j. Web Sitesi. <https://www.yenisafak.com/foto-galeri/gundem/erzurumda-9-buyuklugundeki-depreme-dayanikli-yeni-konutlar-50-yillik-binalar-hizla-donusturuluyor-2043103> Erişim Tarihi: 23.10.2024.
- Anonim, 2024k. Web Sitesi. <https://www.aa.com.tr/tr/pg/foto-galeri/erzurum-deprem-riskine-karsi-kentsel-donusumle-guclendiriliyor/0>. Erişim Tarihi: 23.10.2024.
- Anonim, 2024l. Web Sitesi. <https://islamansiklopedisi.org.tr/cami> Erişim Tarihi: 24.12.2024.
- Anonim, 2024m. Web Sitesi. https://tr.wikipedia.org/wiki/Kuba_Mescidi Erişim Tarihi: 24.12.2024.
- Anonim, 2024n. Web Sitesi. https://tr.wikipedia.org/wiki/Emev%C3%AE_Camii Erişim Tarihi: 24.12.2024.
- Anonim, 2024o. Web Sitesi. https://tr.wikipedia.org/wiki/Samarra_Ulu_Cami Erişim Tarihi: 24.12.2024.
- Anonim, 2024p. Web Sitesi. <https://www.britannica.com/art/minaret-architecture> Erişim Tarihi: 24.12.2024.
- Anonim, 2024r. Web Sitesi. <https://en.wikipedia.org/wiki/Minaret> , Erişim Tarihi: 24.12.2024.
- Anonim, 2024s. Web Sitesi. <https://iranicaonline.org/articles/minaret-1> , Erişim Tarihi: 24.12.2024.
- Anonim, 2024t Web Sitesi. <https://islamweb.net/en/fatwa/44381/the-first-minaret-in-islam> , Erişim Tarihi: 24.12.2024.
- Anonim, 2024v. Web Sitesi. https://madainproject.com/minaret_of_the_bride Erişim Tarihi: 24.12.2024.
- Anonim, 2025a. Web Sitesi. https://www.tripadvisor.com.tr/Attraction_Review-g294202-d3720964-Reviews-Egypt_Papyrus_MuseumGiza_Giza_Governorate.html, Erişim Tarihi: 18.04.2025.
- Anonim, 2025b. Web Sitesi. <https://archeyes.com/the-great-mosque-of-samarra-the-abu-dulaf-mosque/> Erişim Tarihi: 18.04.2025.
- Anonim, 2025c. Web Sitesi. <https://www.trakyanet.com/tr/multimedya/fotograflar/sehirler-foto> , Erişim Tarihi: 18.04.2025.
- Anonim, 2025d. Web Sitesi. <https://www.gezi-yorum.net/etiket/delhi-gezilecek-yerler/> Erişim Tarihi: 18.04.2025.
- Anonim, 2025e. Web Sitesi. https://tr.wikipedia.org/wiki/Selahaddin_%28il%29 Erişim Tarihi: 18.04.2025.

Anonim, 2025f. Web Sitesi. <https://tarihtenfotograflar.blogspot.com/2021/10/dort-ayakl-minare-seyh-matar-camii.html> Erişim Tarihi:18.04.2025.

Anonim, 2025g. Web Sitesi. <https://worldhistoryedu.com/seljuk-minarets-in-persia/> Erişim Tarihi:18.04.2025.

Anonim, 2025h. Web Sitesi. <https://www.theguardian.com/world/2025/may/14/hagia-sophia-restoration-works-istanbul-earthquakes> Erişim Tarihi:18.04.2025.

Anonim, 2025i. Web Sitesi. <https://google.com/maps/placa//Erzurum+Pervizoğlu+Cami> Erişim Tarihi:18.08.2025.

Anonim, 2025j. Web Sitesi. <https://google.com/maps/place/Erzurum+Lala+Mustafa+Paşa+Cami/> Erişim Tarihi:18.08.2005.

Anonim, 2025k. Web Sitesi. <https://google.com/maps/place/Erzurum+Ulu+Cami/> Erişim Tarihi: 18.08.2025.

Anonim, 2025l. Web Sitesi. <https://www.sanatinyolculugu.com/erzurum-ulu-camii/erzurum-ulu-cami/> Erişim Tarihi: 18.08.2025.

Anonim, 2025m. Web Sitesi. <https://erzurumarşivi.com/erzurum-ulu-camii/> Erişim Tarihi: 18.08.2025.

Anonim, 2025n. Web Sitesi. <https://google.com/maps/place/Erzurum+Muratpaşa+Paşa+Cami/> Erişim Tarihi: 18.08.2025.

Anonim, 2025o. Web Sitesi. <https://google.com/maps/place/Erzurum+Yukarı+Habip+Efendi+Cami> Erişim Tarihi: 18.08.2025.

Anonim, 2025p. Web Sitesi. <https://www.haberkaos.com/erzurum-yukari-habip-efendi-camii/> Erişim Tarihi: 18.08.2025.

Anonim,2025r. Web Sitesi: <https://google.com/maps/place/Erzurum+Tas+Cami/> Erişim Tarihi:18.08.2025.

Anonim,2025s.Web Sitesi.<https://www.google.com/maps/place/Ye%C4%9Fena%C4%9Fa+Cami> , Erişim Tarihi:18.08.2025.

Anonim, 2025t. Web Sitesi <https://google.com/maps/place/Erzurum+Kadana+Cami/> Erişim Tarihi:18.08.2025.

Anonim,2025u.Web Sitesi: <https://google.com/maps/place/Erzurum+Hacı+Cuma+Cami/> Erişim Tarihi:18.08.2025.

Artemis Modal Pro V. 7.2, 2023. Operasyonel modal analiz programı, Erzurum Teknik Üniversitesi, 2023.

Aslan, T. 2024. Tarihi Yığma Minarelerin Video Kamera Tabanlı Dapı Sağlığı

İzlenmesi.Yüksek Lisans Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 71, Trabzon.

- 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.
- Baştürk, M. H. 2013. Bursa tarihi yığma minarelerinin dinamik davranışlarının modal analiz yöntemi ile incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- 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., Sevim, B., ve Türker, T. 2009. Kömürhan Köprüsünün sonlu eleman model iyileştirilmesi ,İMO Teknik Dergi, 4675-4700.
- Boru,E.O.,Kutanis,M.,2015. Çevrel titreşim kayıtları kullanılarak yapı dinamik parametrelerinin belirlenmesi, SAÜ Fen Bil Der 19. Cilt, 1. Sayı, s. 59-66.
- Chopra, A. K., 2012. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering (4th ed.). Prentice Hall.
- Chopra, A. K., 2017. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering (5th Ed.), Prentice Hall. Chapter 11: Approximate Methods for MDOF Systems.
- Clough, R. W., and Penzien, J., 2003. Dynamics of Structures (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Craig, R. R., and Kurdila, A. J., 2006. Fundamentals of Structural Dynamics (2nd ed.).
- 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.
- Doğangün, A., 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).
- Doğangün, A., Acar, R., Sezen, H., ve Livaoğlu, R. 2008. Investigation of dynamic

response of masonry minaret structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(3), 505–517.

Duman, C., 2020. Minare yüksekliği ve şerefe sayısının minarelerin dinamik davranışına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Adıyaman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adıyaman.

Duman, C., Hacıfendioğlu, K., ve Gültop, T. 2025. Damage assessment in historical masonry minarets with supervised machine learning and deep learning methods. *International Journal of Architectural Heritage*, 1-20.

Durgut, E., Kuran, F., Ispir, M., Demir, C., Turan, Ö., T., ve İlki, A., 2021. Bursa İlindeki tarihi minarelerin kırılma eğrilerinin elde edilmesi. 27 Kasım 2021, İstanbul, Türkiye.

Eren, E. 2024. Tarihi yığma minare yapısının güçlendirilmesinin bir örneği. Yüksek Lisans Tezi. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 94, İzmir.

Ekmen, Ş., 2017, Tarihi Urfa Ulu Cami minaresinin çevresel titreşim yöntemiyle dinamik özelliklerinin belirlenmesi. Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa.

Erdik, M. 2013. Yapı Dinamiği ve Deprem Mühendisliği. Boğaziçi Üniversitesi.

Erdil, B., Tapan, M., Akkaya, İ., ve Korkut, F. 2018. Effects of structural parameters on seismic behaviour of historical masonry minaret. *Periodica Polytechnica-Civil Engineering*, 62(1).

Erdogan, Y. S., Kocatürk, T., ve Demir, C. 2019. Investigation of the seismic behavior of a historical masonry minaret considering the interaction with surrounding structures. *Journal of Earthquake Engineering*, 23(1), 112-140.

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.

Erkek, H., Yetkin, M., & Dedeoğlu, İ. Ö. 2023. Numerical investigation of the effect of minaret height on its dynamic characteristics. *CHALLENGE*, 9(1), 24-33.

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.

Eronat, Ş. S., Sayın, E., & Özmen, A. 2024. Seismic assessment of masonry minarets under different earthquakes. *Turkish Journal of Science and Technology*, 19(2), 427-442.

- Erzurum İli Kadana Camii Raporu, Emine Altıntaş, Sanat Tarihçi; Aydın Y. Kesici, Y. Mimar. Erzurum Ulu Camisi Sanat Tarihi Raporu, 2014 Prof. Dr. Mustafa S. Akpolat, Eylül 2014.
- 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
- Feizolahbeigi, A., ve Mendes, N. (2025). Evaluation of different types of advanced analysis for the study of the seismic behavior of masonry minarets. In Structures (Vol. 78, p. 109134). Elsevier.
- Gedik, Y., 2022. Tarihi Emir Saltuk Kümbeti Dinamik Kimliklendirme Çalışması. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Erzurum.
- 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.
- Günaydın, M. 2018. Tarihi bir yığma minarenin onarım sonrasındaki dinamik karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesi. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8(2), 381-395.
- Hökelekli, E., Demir, A., Ercan, E., Nohutçu, H., & Karabulut, A. 2020. Seismic assessment in a historical masonry minaret by linear and non-linear seismic analyses. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 64(2), 438-448.
- Işık, E., ve Antep, B. 2018. Ahlat ilçesinde yer alan tarihi yığma minarenin yapısal analizi. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 7(1), 46-56.
- Jadallah, M., Cicos, C., & Doğançün, A. 2024.. Evaluation of earthquake behaviour of historic Şirvani Mosque's stone minaret. 6th International Black Sea Modern Scientific Research Congress August 23-25, 2024 / Trabzon, Türkiye, 791-800.
- Jeoloji Mühendisleri Odası. 2023. 6 Şubat 2023 Depremleri Gözlem ve Değerlendirme Raporu. Ankara: JMO Yayını.
- Kanbur, A., Y., 2021. Tek açıklıklı tarihi kemer bir köprünün dinamik davranış parametrelerinin deneysel olarak incelenmesi : Erzurum Kireçli Köprüsü örneği. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Kılıç, İ., Bozdoğan, K. B., Aydın, S., Gök, S. G., ve Gündoğan, S. (2020). Kule Tipi yapıların dinamik davranışının belirlenmesi: Kırklareli Hızırbey Camii minaresi örneği. Journal Of Polytechnic, 23(1).

- Konyalı, İ. H. 1960. Abideleri ve kitabeleri ile Erzurum tarihi. Ercan Matbaası, 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., Okuyucu, D., & Kazaz, İ., 2019. Tarihi Yapı Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesinde Yeni Bir Yöntem Önerisi: Lala Paşa Camii Örneği. Teknik Dergi, 30(537), 9125-9146.
- 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., Ertosun Yıldız, M., Yıldız, M. A., Eroğlu, E., ve Çetin, S. 2025. A proposal for reinforcement of historical masonry minarets: Gaziantep Kabasakal Mosque Minaret. Buildings, 15(8), 1213.
- Koç, V. 2016. Depreme maruz kalmış yığma ve kırsal yapı davranışlarının incelenerek yığma yapı yapımında dikkat edilmesi gereken kuralların derlenmesi. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2(1), 36–57.
- Lourenço, P., J., B., B., 1996. Computational Strategies for Masonry Structures. PhD Thesis. Delft University of Technology, 207, the Netherlands .
- Lorenzoni F, Valluzzi MR, Salvalaggio M, Minello A, Modena C, 2017. Operational modal analysis for the characterization of ancient water towers in Pompeii. Procedia engineering, 199, 3374-3379.
- Mutlu, Ö., ve Şahin, A. 2016. Investigating the effect of modeling approaches on earthquake behavior of historical masonry minarets-Bursa Grand Mosque case study. Sigma, 7(2), 123-136.
- Nguyen, Q. T., & Livaoğlu, R. 2022. A health monitoring solution on damage detection of minarets. Engineering Failure Analysis, 135, 106154.
- Okuyucu, D. 2020. Tek katlı betonarme bir yapı üzerinde operasyonel modal analiz uygulaması. DÜMF Mühendislik Dergisi, 11:3 (2020), pp. 1407-1419.
- Onat, O., Toy, A. T., ve Özdemir, E. 2023. Block masonry equation-based model updating of a masonry minaret and seismic performance evaluation. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 13(6), 1221-1241.
- Ökten, M. S., Ökten, B. B., Haydaroğlu, C., Bozdağ, B. 2013. Tarihi Eserlerin

Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, İTÜ, İstanbul.

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.

Özdoğan, D.,B.,2024. Stokastik Modelleme Yöntemiyle Üretilen Tarihi Erzurum Deprem Kayıtları Kullanılarak Tarihi Yapıların Dinamik Davranışlarının İncelenmesi Doktora Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 447, Erzurum.

Özkul, M. 2016. Tarihi bir yapının deneysel modal analiz ile yapısal güvenliğinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 138, İzmir.

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.

Pehlivanoğlu, M. 2025. Tarihi Gaziantep Hüseyin Paşa Cami Hasar Almış ve kısmi yıkılmış minaresinin deprem öncesi ve sonrası vokal modelle modellenmesi, içeriden yapılacak çelik taşıyıcı sistemle onarımı ve diriltilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 77, Ankara.

Pellegrini, D., Girardi, M., Lourenço, P. B., Masciotta, M. G., Mendes, N., Padovani, C., and Ramos, L. F. 2018. Modal analysis of historical masonry structures: Linear perturbation and software benchmarking. Construction and Building Materials, 189, 1232-1250.

Porcu, M. C., Montis, E., ve Saba, M. 2021. Role of model identification and analysis method in the seismic assessment of historical masonry towers. Journal of Building Engineering, 43, 103114.

Rota Erzurum, 2022. Mobil Uygulama, Erzurum Büyükşehir Belediyesi, 2024, Erzurum.

SAP2000, 2021 V., 121. .Structure Analysis Program, Erzurum Teknik Üniversitesi, 2016.

Saygılı, B. 2020. Yığma Minarelerin Yapısal Davranışına Narinlik Oranı Etkisinin İncelenmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(1), 366–376.

Serhatoğlu, C., ve Livaoğlu, R. 2019. A fast and practical approximations for fundamental period of historical Ottoman minarets. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 120, 320-331.

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 In Analysis And Design, 47(7), 621-634.

Shabani, A., Feyzabadi, M., ve Kioumars, 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.

Soyluk, A., ve Demircan, B. (2023). An architectural review of the behavior of historical masonry minarets under earthquake load on mosque samples damaged in the 6 February Kahramanmaraş Earthquake. Journal of Architectural Sciences and Applications, 8, 329-354.

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.

Şahin, A.2009. Yapıların deneysel ve operasyonel modal analizleri için sayısal sinyal işleme, dinamik karakteristik belirleme ve sonlu eleman model iyileştirme yazılımları: Signalcad-Modalcad-Femup. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 361, Trabzon

Taş, Ö. F., İnce, O., Çakıl, B., Osmanlı, Ö. F., Karaton, M., Sayın, E., ve Gör, M. 2025. Numerical analysis of historical masonry Nebi Mosque minaret using finite element method. ICEARC-25 ,4th International Civil Engineering & Architecture Conference 17-19 May 2025, Trabzon, Türkiye, 93-100.

Türker, T. 2011.Çevresel titreşim verileri kullanılarak yapıların hasar durumlarının tespiti ve değerlendirilmesi. .Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 247, Trabzon

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 2018. T.C. Çevre Şehircilik Bakanlığı, Ankara.

T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Bölge Müdürlüğü. 2014. Erzurum. Ulu Camii Rölöve ve Çevre Tanzim Projesi Proje Raporu. Ağustos 2014. ARTI Bir Proje Grubu, Mimarlık, Restorasyon, İnşaat, Danışmanlık Tic. ve San. Ltd. Şti.

T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü. 2008. Erzurum-Merkez Taş (Aşağı Hasan-İ Basrı) Camii Rölöve, Restitüsyon, Restorasyon ve Sanat Tarihi Raporu.

T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü. 2008. Erzurum-Merkez Yukarı Habip Efendi Camii Rölöve, Restitüsyon, Restorasyon ve Sanat Tarihi Raporu. Garanti Müh. İnş. Taah. Ltd. Şti.

T.C. Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü. 2006. Murat Paşa Camii Raporu.

T.C. Vakıflar Genel Müdürlüğü Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü. 2006. Yeğen Ağa

Camii Rölöve Raporu.

- 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.
- Uçak,Ş.,2012. Tarihi Yığma Kubbelerin Dinamik Davranışlarının Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Uçar,T., & Merter, O. 2012. Narinlik Oranının Yanal Ötelenmeli Betonarme Çerçevelerin Göçme Davranışına Etkisinin Doğrusal Olmayan ve Enerji Esaslı Yöntemlerle Araştırılması . *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* :Cilt:2 Sayı:1 s.13-25, 2012.
- Ural, A., ve Celik, T. 2018. Tek şerefeli yığma minarelerin deprem davranışı ve dinamik analizi. *Aksaray University Journal of Science and Engineering*, 2(1), 13-27.
- 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.
- Yanık, Y., Türker, T., Çalık, İ., ve Yıldırım, Ö. 2022. Tarihi yığma minarelerde çevresel ve zamana bağlı etkilerin titreşim testi yardımıyla incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(2), 799-814.
- Yayla, K. 2024. Yığma minarelerin deprem davranışına yükleme yönünün etkisi: Aksaray Zafer Camisi minaresi örneği. Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 44, Ordu.
- Yetkin, M., Erkek, H., & Calayır, Y. (2021). Operasyonel modal analiz yönteminde referanslı ve referanssız ölçümlerin karşılaştırılması: Bir minare örneği. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(3), 2069-2078.
- Yetkin M, Calayır Y, Erkek H, 2016. Çevresel titreşim verileri kullanılarak yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ve sonlu eleman modellerinin güncelleştirilmesi. *International Symposium on Natural Hazards and Hazard Management (Uluslararası Doğal Afetler ve Afet Yönetimi Sempozyumu)*, Karabük Üniversitesi, Karabük, s.133-138.
- Yıldırım, M. 2010. Selçuklu Dönemi Cami Mimarisi. İstanbul: Mimarlık Yayınları.
- Yılmaz , M., 2022. Erzurum Üç Kümbetler Anonim-I Kümbeti dinamik kimliklendirme çalışması. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.Erzurum.

- Yurdakul, M., Yılmaz, F., Artar, M., Can, Ö., Öner, E., ve Daloğlu, A. T. (2021, April). Investigation of time-history response of a historical masonry minaret under seismic loads. In Structures (Vol. 30, pp. 265-276). Elsevier.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., ve Zhu, J. Z. 2013. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals (7th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Wojcicki Z, Kostecki S, Grosel J, 2016. Operational Modal Analysis of weir on Odra river in Poland. Procedia Engineering, 153, 874-881.



EKLER

EK-1



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 İdareimizden 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

Bilgi için: Atalay ULUKAYA

Yakutiye/Erzurum

İnşaat Mühendisi

Telefon No: (0442) 234 1202 Faks No: (0442) 2334741

Telefon No: (442) 234 12 02-

İnternet Adresi: www.vgm.gov.tr

1141

KEP Adresi: erzurum@vgm.hs01.kep.tr



EK-2



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

Bilgi için: Atalay ULUKAYA

Yakutiye/Erzurum

İnşaat Mühendisi

Telefon No: (0442) 234 1202 Faks No: (0442) 2334741

Telefon No: (442) 234 12 02-

İnternet Adresi: www.vgm.gov.tr

1141

KEP Adresi: erzurum@vgm.hs01.kep.tr

