



**TARİHİ MELİK SUNULLAH CAMİİ MİNARESİ
DEPREM PERFORMANS ANALİZİ**

Ferhat TÖM

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği

Ana Bilim Dalı

Prof. Dr. Musa ARTAR

2025

(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

TARİHİ MELİK SUNULLAH CAMİİ MİNARESİ DEPREM PERFORMANS
ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ferhat TÜM

Danışman: Prof. Dr. Musa ARTAR

BAYBURT- 2025

KABUL VE ONAY

Prof. Dr. Musa ARTAR danışmanlığında, Ferhat TM tarafından hazırlanan “Tarihi Melik Sunullah Camii Minaresi Deprem Performans Analizi” başlıklı bu çalışma, 26.06.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Musa ARTAR

ye : Doç. Dr. Osman TUNCA

ye : Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ERGÜN

Bu tezin kabul Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Bünyamin ALIM
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Prof. Dr. Musa ARTAR danışmanlığında hazırlamış olduğum “Tarihi Melik Sunullah Camii Minaresi Deprem Performans Analizi” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

26.06.2025

Ferhat TÖM



ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının başlangıcından itibaren her daim yanımda olan, bilgi, deneyim ve tecrübeleriyle beni destekleyen, engin bilgilerini ilmek ilmek işleyerek akademik hayatta yetişmemi sağlayan, kendisiyle çalışmaktan onur duyduğum çok saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Musa ARTAR'a en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, yüksek lisans tez savunma sınavımda yer alarak değerli görüş ve katkılarıyla çalışmamı zenginleştiren Sayın Doç. Dr. Osman TUNCA ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ERGÜN'e de teşekkür ederim.

Yapmış olduğum tez çalışmasındaki tarihi esere ait her türlü rölöve, restorasyon, restitüsyon, eski fotoğraflar, kurur kararları, zemin etüdü gibi bilgi ve belgelere ulaşmamı sağlayıp, yapmış olduğum çalışmaya önemli derecede katkıda bulunan T.C. Malatya Vakıflar Bölge Müdürlüğü'ne teşekkürlerimi sunarım.

Ferhat TÜM

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TARİHİ MELİK SUNULLAH CAMİİ MİNARESİ DEPREM PERFORMANS ANALİZİ

Ferhat TÜM

Bayburt Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Musa ARTAR

Bayburt-2025, Sayfa: 126

Bu tez çalışmasında, Osmanlı dönemine ait önemli bir kültürel miras olan Tarihi Melik Sunullah Camii Minaresi'nin deprem performansı değerlendirilmiştir. Yapının mevcut durumu, mimari ve yapısal özellikleri ile birlikte ele alınmış; zemin özellikleri ve yapı malzeme karakteristikleri detaylı biçimde belirlenmiştir. Malatya Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden temin edilen özgün röleve çizimleri kullanılarak yapı, SAP2000 yazılımında üç boyutlu olarak modellenmiştir.

Yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla modal analiz yapılmış ve birinci doğal titreşim periyodu 0.669 saniye olarak elde edilmiştir. Ayrıca, toplam 20 mod üzerinden yapılan analizde, sekizinci moddan itibaren toplam kütle katılım oranı %95'in üzerine çıkmıştır. Bu durum, modelin dinamik davranışının yeterli şekilde temsil edildiğini göstermektedir.

Deprem performansı analizi kapsamında yapı modeline, biri Türkiye'de meydana gelen 2023 Kahramanmaraş Depremi olmak üzere, farklı coğrafyalarda yaşanmış 11 adet gerçek deprem kaydı uygulanmıştır. Değerlendirmeler, doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri (Nonlinear Time History Analysis) yöntemi ile gerçekleştirilmiş, bu sayede yapının elastik sınırları aşan davranışı da dikkate alınmıştır.

Analiz sonuçlarında, özellikle minarenin gövde kısmında (tuğla bölgelerde) yüksek çekme gerilmeleri olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuç, modellemede restorasyon sonrası malzeme özelliklerinin değil, yapının tarihi, özgün malzeme özelliklerinin esas alınmasıyla ilişkilidir. Gerçekte ise, 2017 yılında gerçekleştirilen restorasyon sürecinde gövde kısmı modern tuğlalar ve yüksek dayanımlı bağlayıcılarla büyük ölçüde yenilenmiştir. Buna karşın, taban kısmındaki doğal taşlar korunmuş, sadece derz dolgusu yapılmıştır. Bu farklılık nedeniyle, analizlerde gerilmeler gövdede yüksek çıkarken, gerçek deprem sonrası gözlemlenen çatlaklar taban kısmında yoğunlaşmıştır. Bu durum, restorasyonun yapısal davranış üzerindeki etkisini ve malzeme müdahalelerinin kapsamının ne kadar kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışması, tarihi yapıların deprem davranışının doğru şekilde analiz edilebilmesi için hem yapı özgünlüğünün hem de geçirdiği müdahale süreçlerinin dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Deprem performansı, dinamik analiz, Melik Sunullah Camii, sonlu elemanlar yöntemi, tarihi yapılar.



ABSTRACT

M. SC. THESIS

EARTHQUAKE PERFORMANCE ANALYSIS OF HISTORICAL MELİK SUNULLAH MOSQUE MINARET

Ferhat TÖM

Bayburt University

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor: Prof. Dr. Musa ARTAR

Bayburt-2025, Pages: 126

In this thesis study, the seismic performance of the Historical Melik Sunullah Mosque Minaret, a significant example of Ottoman-era architectural heritage, has been investigated. The current condition of the structure was examined in detail along with its architectural and structural characteristics. The soil properties and material specifications of the building were identified, and a 3D structural model was developed using SAP2000 software based on original measured drawings obtained from the Malatya Regional Directorate of Foundations.

A modal analysis was conducted to determine the dynamic characteristics of the structure, and the first natural vibration period was calculated as 0.669 seconds. Furthermore, the cumulative mass participation ratio exceeded 95% starting from the eighth mode out of a total of 20 modes, indicating that the dynamic behavior of the structure was sufficiently represented in the analysis.

For seismic performance evaluation, a total of 11 real earthquake records including the 2023 Kahramanmaraş Earthquake in Türkiye were applied to the model. The analyses were performed using the Nonlinear Time History Analysis method, which allows the structural response beyond the elastic range to be considered, thus providing a more realistic representation of the behavior under seismic loads.

The results showed that significant tensile stresses occurred particularly in the shaft region of the minaret, where brick masonry is present. This outcome is attributed to the modeling being based on the original historical material properties, rather than the upgraded materials used in the 2017 restoration. In reality, the brick portion of the shaft had been largely replaced with modern materials and higher-strength mortars during the restoration, while the base section made of natural stone remained mostly unaltered, with only surface-level repairs such as joint filling. Consequently, although the analysis indicated higher stresses in the shaft, post-earthquake field observations revealed cracking primarily at the base, reflecting the real-world effects of differential material intervention.

This study emphasizes that a comprehensive seismic performance assessment of historical structures must account for both the original construction characteristics and any structural interventions introduced during restoration processes.

Keywords: Seismic performance, dynamic analysis, melik sunullah mosque, finite element method, historical structures.



İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	II
BEYANNAME	III
ÖN SÖZ	IV
ÖZET	V
ABSTRACT	VII
İÇİNDEKİLER.....	IX
TABLOLAR.....	XII
ŞEKİLLER.....	XIII
KISALTMALAR.....	XVI
SİMGELER.....	XVII
GİRİŞ.....	1
Araştırmanın Konusu ve Problemi	1
Araştırmanın Amacı	1
Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi	2
Araştırmanın Sınırlılıkları	2
Varsayımlar	2
Terim ve Tanımları	3
BİRİNCİ BÖLÜM.....	4
1. LİTERATÜR ÖZETİ.....	4
İKİNCİ BÖLÜM	12
2. GENEL BİLGİLER	12
2.1. TARİHİ YAPI KAVRAMI	12
2.1.1. Tarihi Yapıların Önemi	12
2.1.2. Tarihi Yapıların Korunma Nedenleri	12
2.1.3. Tarihi Yapıların Korunma Yöntemleri	13
2.1.3.1. Restorasyon	13
2.1.3.2. Yapısal güçlendirme	13
2.1.3.3. Periyodik bakım ve izleme	13
2.1.3.4. Deprem yalıtımı ve sönümleyiciler	14
2.1.3.5. Zemin iyileştirmesi	14
2.1.4. Tarihi Yapı Türleri.....	14
2.1.4.1. Malzeme türüne göre	14
2.1.4.2. Taşıyıcı sistem yapısına göre.....	15
2.1.4.3. Kullanım amaçlarına göre	15
2.2. TARİHİ YAPILARDA KULLANILAN MALZEME VE ÖZELLİKLERİ.....	16
2.2.1. Taşıyıcı Sistem Malzemeleri	16
2.2.1.1. Yığma (kârgir) taş ve tuğla duvarlar.....	16
2.2.1.2. Ahşap karkas sistemler	17
2.2.1.3. Kerpiç duvar sistemleri.....	17
2.2.1.4. Metal takviyeli sistemler	18
2.2.1.5. Hibrit sistemler	18
2.3. TARİHİ YAPIYI OLUŞTURAN TAŞIYICI SİSTEMLER	19

2.4. DEPREMİN ÜLKEMİZE ETKİLERİ VE TARİHİ YAPILARIN DEPREM DAVRANIŞI	20
2.4.1. Tarihi Yapıların Deprem Tehlikesi ve Koruma Yöntemleri	21
2.4.2. Minareler	21
2.4.2.1. Tarihsel gelişim ve tipoloji	21
2.4.2.2. Yapısal bileşenler ve malzemeler	22
2.4.2.3. Deprem davranışı ve kritik kesitler	22
2.4.2.4. Koruma ve güçlendirme yaklaşımları	23
2.4.3. Tarihi Yapıların Yaşadığı Zemin ve Çevresel Etkiler	23
2.4.3.1. Zemin koşullarının yapısal performansa etkisi.....	23
2.4.3.2. Hidrojeolojik faktörler	24
2.4.3.3. İklimsel ve atmosferik koşullar	24
2.4.3.4. Antropojenik etkiler.....	24
2.4.3.5. Koruma için zemin-çevre odaklı yaklaşımlar	25
2.5. MELİK SUNULLAH CAMİİ MİNARESİ'NE GENEL BAKIŞ	25
2.5.1. Yapının Mimari ve Tarihi Özellikleri.....	25
2.5.2. Malzeme Özellikleri ve Yapı Teknikleri	35
2.5.3. Mevcut Durum ve Gözlemler	35
2.6. KARMAŞIK YAPILARIN MODELLENMESİ (YIĞMA YAPILARIN MODELLENMESİ)	36
2.6.1. Modelleme Teknikleri	37
2.6.1.1. Detaylı mikro modelleme	38
2.6.1.2. Basitleştirilmiş mikro modelleme.....	39
2.6.1.3. Makro modelleme.....	40
2.6.1.4. SAP2000 programı ile modelleme	42
2.6.1.5. Sap2000 programında kullanılan kavramlar.....	43
2.6.1.6. Sonlu elemanlar yöntemi	45
2.6.1.7. Yığma yapıların analizi	47
2.7. MELİK SUNULLAH CAMİİ MİNARESİ YAPISAL MODELLEMESİ	48
2.8. MELİK SUNULLAH CAMİİ MİNARESİNİN MALZEME ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ	54
2.8.1. Tuğla Özelliklerinin Belirlenmesi	54
2.8.2. Taşın Özelliklerinin Belirlenmesi.....	55
2.8.2.1. Bölgesel jeoloji	55
2.8.2.2. Mimari gözlem ve fotoğraf analizi	55
2.8.2.3. Tarihi yapı teknikleri	55
2.8.2.4. Literatür desteği.....	55
2.8.3. Harcın Özelliklerinin Belirlenmesi.....	57
2.8.4. Kompozit Malzemenin Özelliklerinin Belirlenmesi.....	58
2.8.4.1. Kompozit malzeme basınç ve çekme dayanımı hesaplama.....	59
2.8.4.2. Kompozit malzemenin elastisite modülü, poisson oranı ve birim hacim ağırlığının belirlenmesi	61
2.9. MELİK SUNULLAH CAMİİ MİNARESİ ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ	63
2.10. MELİK SUNULLAH CAMİİ MİNARESİ KONUMUNUN DEPREMSELLİĞİ.....	66
2.10.1. Yerel Zemin Sınıfları.....	67

2.10.2. Yerel Zemin Etki Katsayıları.....	67
2.10.4. Yatay Elastik Tasarım Spektrumu.....	69
2.11. MELİK SUNULLAH CAMİ MİNARESİ İÇİN DEPREM YÜKÜ AZALTMA KATSAYISI.....	70
2.11.1. R ve D Değerlerinin Belirlenmesi	71
2.11.2. Bina Kullanım Sınıfı ve Bina Önem Katsayısının Belirlenmesi	72
2.11.3. Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı Hesaplanması.....	73
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....	74
3. MELİK SUNULLAH CAMİİ MİNARESİNİN FARKLI DEPREM KARAKTERİSTİKLERİ ALTINDAKİ YAPISAL DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ	74
3.1. YAPININ MODAL ANALİZİ.....	74
3.2. YAPININ DEPREM ANALİZLERİ.....	78
3.2.1. Mod Birleştirme Yöntemiyle Deprem Analizi	78
3.2.2. Yapıya Uygulanan 11 Adet Deprem Analizleri	79
3.2.2.1. Imperial Valley depremi (1940)	80
3.2.2.2. Parkfield depremi (1966).....	82
3.2.2.3. Managua depremi (1972).....	85
3.2.2.4. Friuli depremi (1976).....	88
3.2.2.5. Coyote Lake depremi (1979).....	90
3.2.2.6. Imperial Valley depremi (1979)	93
3.2.2.7. Mammoth Lakes depremi (1980)	95
3.2.2.8. Superstition Hills depremi (1987)	98
3.2.2.9. Sierra depremi (1991).....	100
3.2.2.10. Joshua depremi (1992)	103
3.2.2.11. Kahramanmaraş depremi (2023)	105
SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	109
Sonuç	110
Tartışma	111
Öneriler	112
KAYNAKÇA.....	114
EKLER	122
Ek 1: Yirmi Moda Ait Periyot Değerleri İle Kütle Katılım Oranları	122
Ek 2: 2023 Kahramanmaraş Depremi Sonrası Tabanda Oluşan Çatlaklar.....	124
Ek 3: 2023 Kahramanmaraş Depremi Sonrası Tabanda Oluşan Çatlaklar.....	124
Ek 4: 2023 Kahramanmaraş Depremi Sonrası Tabanda Oluşan Çatlaklar.....	125
ÖZ GEÇMİŞ	126

TABLolar

Tablo 1: Tuğlaların Ortalama Fiziksel Özellikleri	16
Tablo 2: Tarihi Yapılarda Kullanılan Taşların Fiziksel Özellikleri	17
Tablo 3: Kilin Fiziksel Özellikleri	17
Tablo 4: Metallerin Fiziksel Özellikleri	18
Tablo 5: Harçların Fiziksel Özellikleri	19
Tablo 6: Modelde Kullanılan Eleman Sayısı.....	49
Tablo 7: Literatürdeki Farklı Araştırmacılara Göre Tuğlanın Mekanik Özellikleri	54
Tablo 8: Malatya Ulu Cami Taş Örneklerinin Temel Fiziksel Test Sonuçları.....	56
Tablo 9: Andezit Maden Ocağından Çıkan Andezit Taşının Mekanik Özellikleri	57
Tablo 10: Harçların Ortalama Dayanım Değerleri	58
Tablo 11: K, α ve β Katsayıları Değerleri ve Anlamları	59
Tablo 12: Değer Tablosu	60
Tablo 13: Literatürdeki Çalışmaların Taş-Harç Kompozit Malzeme İncelemesi	61
Tablo 14: Literatürdeki Çalışmaların Tuğla-Harç Kompozit Malzeme İncelemesi	62
Tablo 15: Melik Sunullah Camii Minaresinde Kullanılan Kompozit Malzemenin Mekanik Özellikleri	63
Tablo 16: AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması'ndan Alınan Zemin Sınıf Raporu	64
Tablo 17: Melik Sunullah Camii Minaresi Zemin Özellikleri	65
Tablo 18: Yerel Zemin Sınıfları	67
Tablo 19: Yerel Zemin Etki Katsayıları (Kısa periyot).....	68
Tablo 20: Yerel Zemin Etki Katsayıları (1.0 saniye periyot).....	68
Tablo 21: R ve D Değerleri	71
Tablo 22: Bina Kullanım Sınıfı ve Bina Önem Katsayısı	72
Tablo 23: Uygulanan Depremlerin Analizleri Sonucunda Oluşan S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri.....	108

ŞEKİLLER

Şekil 1: Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası	20
Şekil 2: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Harita Üzerindeki Konumu	25
Şekil 3: Melik Sunullah Camii Minare Kitabesi	26
Şekil 4: Melik Sunullah Camii Minare Kitabesi	26
Şekil 5: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Genel Görünümü	27
Şekil 6: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Restorasyon Öncesi Fotoğrafı	28
Şekil 7: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Restorasyon Öncesi Fotoğrafı	29
Şekil 8: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Restorasyon Sonrası Fotoğrafı	29
Şekil 9: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Kahramanmaraş Depremi Sonrası Fotoğrafı....	30
Şekil 10: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Kahramanmaraş Depremi Sonrası Fotoğrafı...	30
Şekil 11: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Kahramanmaraş Depremi Sonrası Fotoğrafı...	31
Şekil 12: Autocad Programında Hazırlanmış Rölevedeki Melik Sunullah Camii Minaresi Plan Kesit ve Görünüşü	32
Şekil 13: Autocad Programında Hazırlanmış Rölevedeki Melik Sunullah Camii Minaresi Ön Görünüşü	33
Şekil 14: Autocad Programında Hazırlanmış Rölevedeki Melik Sunullah Camii Minaresi Arka Görünüşü	33
Şekil 15: Autocad Programında Hazırlanmış Rölevedeki Melik Sunullah Camii Minaresi Sağ Yan Görünüşü.....	34
Şekil 16: Autocad Programında Hazırlanmış Rölevedeki Melik Sunullah Camii Minaresi Sol Yan Görünüşü.....	34
Şekil 17: Melik Sunullah Camii Minaresi Makro Modellemesi	41
Şekil 18: Melik Sunullah Camii Minaresi Solid Kullanılan Kısımlar	45
Şekil 19: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Sonlu Elemanlar Modelli Plan Görünüşü.....	49
Şekil 20: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Modellemesine Ait Aşamaları	50
Şekil 21: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Modellemesine Ait Aşamaları	50
Şekil 22: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Modellemesine Ait Aşamaları	51
Şekil 23: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Modellemesine Ait Aşamaları	51
Şekil 24: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Modellemesine Ait Aşamaları	52
Şekil 25: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Modellemesine Ait Aşamaları	52
Şekil 26: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Modellemesine Ait Aşamaları	53
Şekil 27: Zemin Modeli ve Sınır Koşullarının Sap2000 Üzerindeki Gösterimi	64
Şekil 28: Tabatabaiefar ve Massumi'nin Çalışmalarında Kullandıkları Sonlu Eleman Modelleri	65
Şekil 29: Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması.....	66
Şekil 30: Yatay Elastik Tasarım Spektrumu Grafiği.....	69
Şekil 31: Düşey Elastik Tasarım Spektrumu Grafiği.....	69
Şekil 32: 1. Mod ($T = 0,669$)	75
Şekil 33: 2. Mod ($T = 0,662$)	75
Şekil 34: 3. Mod ($T = 0,164$)	75
Şekil 35: 4. Mod ($T = 0,164$)	75
Şekil 36: 5. Mod ($T = 0,096$)	76
Şekil 37: 6. Mod ($T = 0,094$)	76

Şekil 38: 7. Mod ($T = 0,073$)	76
Şekil 39: 8. Mod ($T = 0,072$)	76
Şekil 40: 9. Mod ($T = 0,053$)	77
Şekil 41: 10. Mod ($T = 0,048$)	77
Şekil 42: 11. Mod ($T = 0,047$)	77
Şekil 43: 12. Mod ($T = 0,039$)	77
Şekil 44: Y(U2) Yönünde Uygulanan S33 Maksimum Çekme Gerilmesi	79
Şekil 45: X(U1) Yönünde Uygulanan S33 Maksimum Çekme Gerilmesi	79
Şekil 46: Imperial Valley Depremi İvme Kayıtları.....	81
Şekil 47: Imperial Valley (1940) Depremi Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U1 Yönünde, MPa).....	82
Şekil 48: Imperial Valley (1940) Depremi Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U2 Yönünde, MPa).....	82
Şekil 49: Parkfield Depremi İvme Kayıtları	84
Şekil 50: Parkfield Depremi (1966) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U1 Yönünde, MPa).....	84
Şekil 51: Parkfield Depremi (1966) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U2 Yönünde, MPa).....	85
Şekil 52: Managua Depremi İvme Kayıtları	86
Şekil 53: Managua Depremi (1972) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U1 Yönünde, MPa).....	87
Şekil 54: Managua Depremi (1972) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U2 Yönünde, MPa).....	87
Şekil 55: Friuli Depremi İvme Kayıtları	89
Şekil 56: Friuli Depremi (1976) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U1 Yönünde, MPa)	89
Şekil 57: Friuli Depremi (1976) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U2 Yönünde, MPa)	90
Şekil 58: Coyote Lake Depremi İvme Kayıtları	91
Şekil 59: Coyote Lake Depremi (1979) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U1 Yönünde, MPa).....	92
Şekil 60: Coyote Lake Depremi (1979) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U2 Yönünde, MPa).....	92
Şekil 61: Imperial Valley Depremi İvme Kayıtları.....	94
Şekil 62: Imperial Valley Depremi (1979) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U1 Yönünde, MPa).....	94
Şekil 63: Imperial Valley Depremi (1979) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U2 Yönünde, MPa).....	95
Şekil 64: Mammoth Depremi İvme Kayıtları	96
Şekil 65: Mammoth Lakes Depremi (1980) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U1 Yönünde, MPa).....	97
Şekil 66: Mammoth Lakes Depremi (1980) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U2 Yönünde, MPa).....	97
Şekil 67: Supersition Hills Depremi İvme Kayıtları.....	99
Şekil 68: Superstition Hills Depremi (1987) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U1 Yönünde, MPa).....	99

Şekil 69: Superstition Hills Depremi (1987) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U2 Yönünde, MPa).....	100
Şekil 70: Sierra Depremi İvme Kayıtları	101
Şekil 71: Sierra Depremi (1991) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U1 Yönünde, MPa)	102
Şekil 72: Sierra Depremi (1991) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U2 Yönünde, MPa)	102
Şekil 73: Joshua Depremi İvme Kayıtları	104
Şekil 74: Joshua Depremi (1992) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U1 Yönünde, MPa)	104
Şekil 75: Joshua Depremi (1992) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U2 Yönünde, MPa)	105
Şekil 76: Kahramanmaraş Depremi İvme Kayıtları.....	106
Şekil 77: Kahramanmaraş Depremi (2023) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U1 Yönünde, MPa).....	107
Şekil 78: Kahramanmaraş Depremi (2023) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U2 Yönünde, MPa).....	107

KISALTMALAR

AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
BKS	: Bina Kat Sayısı
BYS	: Bina Yükseklik Sınıfı
BOUNDARY3D	: 3 Boyutlu Sınır Koşulu
CFRP	: Carbon Fiber Reinforced Polymer (Karbon Fiber Takviyeli Polimer)
CSI	: Computer and Structures, Inc.
CQC	: Complete Quadratic Combination (Tam Karesel Kombinasyon)
DAF	: Doğu Anadolu Fayı
DEM	: Dijital Elevation Model (Sayısal Yükseklik Modeli)
DİŞÇE	: Deprem İzolatörlü Sönümleyici Çerçeve Elemanı
DSP	: Double Sliding Pendulum (Çift Kaymalı Sarkacı)
Eeq	: Eşdeğer Elastisite Modülü
Fc	: Beton Basınç Dayanımı
Ft	: Çekme Dayanımı
FPS	: Fiction Pendulum System (Sürtünmeli Sarkac)
Geq	: Eşdeğer Kesme Modülü
HDRB	: High Damping Rubber Bearing (Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnet)
ICOMOS	: International Council on Monuments and Sites (Uluslararası Anıtlar ve Siteler Konseyi)
İNŞAR	: Interferometric Synthetic Aperture Radar (Radar interferometrisi)
KAF	: Kuzey Anadolu Fayı
LRB	: Lead Rubber Bearing (Kurşunlu Kauçuk Mesnet)
MPa	: Megapascal (Basınç Birimi)
OSB	: Oriented Strand Board (Yönlendirilmiş Yonga Levha)
PGA	: Peak Ground Acceleration (Zemin Maksimum İvmesi)
PGV	: Peak Ground Velocity (Zemin Maksimum Hızı)
Plaxis	: Sonlu Elemanlar Programı (Zemin Mekaniği Analiz Yazılımı)
SD	: Serbestlik Derecesi
SD1	: 1.0 Saniye Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı
SDS	: Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
SRSS	: Square Root of Sum of Squares (Kareler Toplamının Karekökü)
SSI	: Site-Structure Interaction (Zemin-Yapı Etkileşimi)
TB	: Tasarım Spektrumunun İlk Köşe Periyodu
TLD	: Tuned Liquid Damper (Ayarlı Sıvı Sönümleyici)
TMD	: Tuned Mass Damper (Ayarlı Kütle Sönümleyici)
ZC	: Zeminin Konsolidasyon Katsayısı

ZD/ZE

: Zemin Deformasyon/Elastisite Katsayısı

SİMGELER

D	: Dayanım Fazlalığı Katsayısı
Ha	: Hektar
I	: Bina Önem Katsayısı
Km	: Kilometre
M	: Metre
m²	: Metrekare
m³	: Metreküp
P	: Korelasyon Katsayısı
R	: Yapı Sisteminin Davranış Katsayısı (Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı)
Ra	: Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı
T	: Yapının Doğal Titreşim Periyodu
Γ	: Birim Hacim Ağırlığı
N	: Poisson Oranı
Φ	: İç Sürtünme Açısı
<i>u_x, u_y, u_z</i>	: Doğrusal Yer Değiştirmeleri (X, Y, Z eksenleri)
<i>θ_x, θ_y, θ_z</i>	: Açısal Yer Değiştirmeleri (X, Y, Z eksenleri)

GİRİŞ

Türkiye, jeolojik konumu itibariyle dünyada önemli deprem kuşakları üzerinde bulunmaktadır. Bu durum, ülkemizin tarih boyunca çok sayıda büyük ölçekli depreme maruz kalmasına neden olmuş, birçok can ve mal kaybının yanı sıra tarihi yapıların büyük ölçüde hasar görmesine yol açmıştır. Özellikle kültürel mirasımızın vazgeçilmez parçaları olan tarihi minareler, estetik ve mimari değerlerinin yanı sıra deprem karşısındaki hassasiyetleri nedeniyle özel önem arz etmektedir. Bu bağlamda, tarihi yapıların korunması, restorasyonu ve sürdürülebilirliğinin sağlanması için depreme karşı performanslarının değerlendirilmesi büyük bir gereklilik haline gelmiştir. Bu tez çalışması, bu ihtiyaca yönelik olarak, Malatya'nın tarihi ilçesi Battalgazi'de bulunan Melik Sunullah Camii minaresinin deprem güvenliğini, SAP 2000 mühendislik yazılımı kullanılarak gerçekleştirilecek ayrıntılı analizlerle incelemektedir.

Araştırmanın Konusu ve Problemi

Araştırmanın temel konusu, Malatya Battalgazi'de yer alan ve 14. yüzyıl sonlarında inşa edilmiş olan tarihi Melik Sunullah Camii minaresinin depreme karşı dayanıklılığı ve yapısal güvenliğinin ayrıntılı olarak değerlendirilmesidir. Minarenin mevcut durumunda, şerefe seviyesinin üst bölümünün yıkılmış olması, bu yapının deprem karşısındaki davranışının ve olası risklerin detaylı analizini zorunlu kılmaktadır. Minarenin tarih boyunca geçirdiği depremler ve yapılan restorasyon müdahalelerinin, mevcut yapısal durumunu nasıl etkilediği önemli bir sorunsaldır. Bu kapsamda, minarenin taşıyıcı sistemi, malzeme özellikleri, restorasyonların etkileri ve yapısal bütünlüğünün korunup korunmadığı gibi hususların incelenmesi gerekmektedir.

Araştırmanın Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, Melik Sunullah Camii minaresinin mevcut yapısal durumunun bilimsel yöntemlerle değerlendirilmesi ve deprem güvenliğinin analiz edilmesidir. Bu genel amaç kapsamında aşağıdaki spesifik hedefler belirlenmiştir:

- Minarenin mevcut fiziksel ve yapısal durumunun saha çalışmaları ve mühendislik testleri ile detaylı olarak tespiti,
- Minarenin deprem performansının, SAP 2000 yazılımı ile sayısal modelleme teknikleri kullanılarak incelenmesi ve deprem davranışının bilimsel yöntemlerle ortaya konması hedeflenmektedir.

Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi

Türkiye'nin aktif bir deprem bölgesi olması sebebiyle, tarihi ve kültürel miras niteliği taşıyan yapıların korunması hem kültürel kimlik açısından hem de kamu güvenliği açısından büyük önem arz etmektedir. Özellikle Melik Sunullah Camii minaresi gibi tarihi değeri yüksek yapıların korunması, kültürel sürekliliğin ve tarih bilincinin gelecek nesillere aktarılmasını sağlamaktadır. Bu çalışmanın önemi, minarenin mimari özellikleri ve malzeme yapısını dikkate alarak yapılacak detaylı analizler sayesinde, benzer tarihi yapıların korunması için örnek teşkil edebilmesidir. Ayrıca çalışmada kullanılacak mühendislik yaklaşımları ve SAP 2000 analiz yöntemleri, ülkemizdeki diğer benzer tarihi yapıların deprem performans değerlendirmeleri için metodolojik bir referans sağlayacaktır.

Araştırmanın Sınırlılıkları

Çalışmanın içeriği ve uygulanacak yöntemler aşağıdaki sınırlılıklar çerçevesinde belirlenmiştir:

- Tarihsel belge ve kaynakların sınırlı ve kimi durumlarda tutarsız olması nedeniyle, minarenin tarihi gelişimine ilişkin bazı belirsizliklerin bulunması,
- Arazi çalışmalarında gerçekleştirilecek mühendislik testleri ve malzeme analizlerinin kapsamının, resmi izin süreçleri ve ekonomik kısıtlamalar nedeniyle sınırlanması,
- Çalışmanın yalnızca minare ile sınırlı tutulması ve cami, türbe gibi diğer yapı bileşenlerinin incelenme kapsamı dışında bırakılmasıdır.

Varsayımlar

Bu çalışma kapsamında aşağıdaki varsayımlar temel alınmaktadır:

- Mevcut durumda minarenin özgün yapısal özelliklerinin büyük ölçüde korunduğu,
- Minarenin kaidesinin taş, gövdesinin ise tuğladan inşa edildiği; bu malzeme özelliklerinin ise yapının deprem performansında temel parametreler arasında değerlendirildiği,
- Tarihsel kaynaklardaki eksiklik ve belirsizliklere rağmen, yapı hakkında yapılan saha ve mühendislik gözlemlerinin geçerli olduğu varsayılmaktadır.

Terim ve Tanımları

Minare: Camilerin yapısal bir bileşeni olup, ezan okumak amacıyla inşa edilmiş, genellikle taş veya tuğla malzemeden yapılan uzun, dikey yapı elemanıdır.

Deprem Analizi: Yapıların depreme maruz kaldıklarında gösterecekleri yapısal davranışın sayısal yöntemlerle tahmin edilmesini sağlayan mühendislik değerlendirme sürecidir.

Tarihi Yapı Koruma: Tarihi değer taşıyan yapıların özgün özellikleri ve mimari niteliklerini koruyarak, sürdürülebilirliğini sağlamaya yönelik restorasyon ve güçlendirme uygulamalarıdır.

SAP 2000 Programı: Yapıların mühendislik analiz ve tasarımında kullanılan, özellikle deprem analizlerinde sıkça tercih edilen, sonlu elemanlar yöntemi tabanlı mühendislik yazılımıdır.

BİRİNCİ BÖLÜM

1. LİTERATÜR ÖZETİ

Yılmaz (2006), Sakarya Rahime Sultan Camii örneğinde, yapının deprem güvenliği açısından sonlu eleman modeli ile analizini gerçekleştirmiş ve farklı yükleme durumlarını incelemiştir. Kubbe, kemer ve duvar kesimlerinde yüksek çekme gerilmelerinin gözlenmesi, restorasyon sürecinde bu elemanlara odaklanılmasını gerekli kılmıştır.

Livaoğlu ve Doğanğün (2007a), farklı zemin özellikleri altında silindirik biçimli yüksek su depolarının deprem davranışını değerlendirmiştir. Özellikle tank-çerçeve birleşimindeki sismik tepkiler incelenmiş; zemin rijitliği azaldıkça tankın doğal periyodunun arttığı ve yanal yer değiştirmelerin belirgin şekilde yükseldiği vurgulanmıştır. Sonuç olarak, deprem tasarımında hem sıvı-yapı hem de zemin-yapı etkileşiminin bütünlük bir şekilde ele alınması gerektiği ifade edilmiştir.

Aköz (2008), deprem etkisi altındaki tarihi yığma yapıların onarımı ve güçlendirilmesine ilişkin çalışmada, yapının özgünlüğünü korumaya yönelik müdahaleleri ve bu müdahaleleri destekleyen malzeme deneyleri ile SEM analizlerini ortaya koymuştur.

Bağbancı (2009), Bursa Ördekli Hamamı'nda yapının taşıyıcı elemanlarının davranışı ve hasar bölgelerini, farklı malzeme deneyleriyle elde edilen özellikler doğrultusunda sonlu elemanlar yöntemi (SEM) kullanarak analiz etmiştir. Özellikle kubbe geçişi ile üst örtü-duvar bağlantılarında çekme gerilmelerinin yoğunlaştığı; bu nedenle restorasyon öncesinde kritik kesitlerin öncelikli olarak güçlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Örmecioğlu (2010), tarihi yapıların yapısal güçlendirilmesinde temel ilke ve yaklaşımları ele aldığı çalışmada, tarihi dokunun korunması açısından onarım yöntemlerinin geri dönüştürülebilir olmasının önemini vurgulamıştır. Modern malzeme ve tekniklerin ise özgün yapıya uyumlu şekilde uygulanması gerektiğini belirtmiştir.

Bayraktar vd. (2011), İskenderpaşa tarihi minaresi üzerinde gerçekleştirdiği çalışmada, çevresel titreşim verileri kullanılarak sonlu eleman modelinin kalibrasyonunu yapmış; ardından deprem yükü etkisini incelemiştir. Analizler, minarenin tepe bölgesinde büyük yer değiştirmelerin oluşabildiğini ve kritik kesimlerin güçlendirilmesine ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymuştur.

Armağan (2012), tarihi yapılarda kullanılan kemer, tonoz ve kubbe gibi eğrisel elemanların farklı basıklık oranlarıyla SAP2000 ortamında modellenmesini incelemiştir. Analiz

sonuçları, basıklık oranının gerilme dağılımı üzerinde belirgin etkileri olduğunu ve yüksek oranların çekme gerilmesi riskini artırdığını göstermiştir.

Şeker vd. (2014), Merzifonlu Kara Mustafa Paşa Camii üzerine yaptığı çalışmada, yapının geçmiş onarımları ve yığma taşıyıcı sistem özelliklerini dikkate alarak, farklı yükleme senaryoları altında gerilme dağılımlarını incelemiştir. Özellikle kubbe-duvar birleşim bölgesinde çekme gerilmesi riskinin bulunduğu ve onarım sürecinde orijinal malzeme bütünlüğünün korunması gerektiği saptanmıştır.

Çaktı vd. (2013), Edirnekapı Mihrimah Sultan Camii minaresi örneğinde, yakın dönemdeki depremlerde oluşan hasarları değerlendirerek minarenin mevcut davranışını titreşim ölçümleri aracılığıyla analiz etmiştir. Özellikle minarenin küp-gövde geçişi ile şerefe üstü bölümlerinin deprem sırasında kritik olduğu; bu alanların, onarım ve güçlendirme yaklaşımlarında öncelikli olarak ele alınması gerektiği ifade edilmiştir.

Erkek vd. (2013), Malatya Ulu Camii için bir sonlu eleman modeli oluşturmuş ve 1992 Erzincan Depremi kaydıyla doğrusal olmayan analizler gerçekleştirmiştir. Yayılı çatlak modeliyle yapılan değerlendirme sonucunda, caminin özellikle üst örtü ve duvar birleşim bölgelerinde deprem anında göçme sınırına yaklaştığı tespit edilmiştir.

Baştürk (2013), Bursa'daki yedi adet tarihi yığma minare üzerinde çevresel titreşim testleri gerçekleştirmiş ve elde edilen mod parametrelerini sayısal modellerle karşılaştırmıştır. Model kalibrasyonu sonucunda, minarelerin periyot değerlerinin ve deprem altındaki kritik kesimlerin özellikle gövde-küp geçişinde yoğunlaştığı belirlenmiştir.

Sesli (2013), yapı-zemin etkileşiminde farklı sınır şartlarının (viskoz, geçirgen vb.) dinamik davranış üzerindeki etkilerini analiz etmiştir. Deprem dalgalarının yansımaları ve sönümünü kontrol eden bu sınır koşullarının hem yapıdaki sismik talepleri hem de zemindeki gerilme dağılımlarını değiştirdiği gösterilmiştir. Visköz sınır yaklaşımının yansıyan dalgaları azaltarak yapıdaki tepkileri belirli oranda düşürdüğü; geçirgen sınırda ise enerjinin yayılma biçiminin farklı olduğu sonucuna varılmıştır.

Mumyakmaz (2015), Gedik Ahmet Paşa Camii'nde ANSYS Workbench kullanılarak gerçekleştirilen zaman tanım alanı analizleriyle kubbe ve minare gibi bileşenlerin yüksek çekme gerilmelerine maruz kaldığını ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar, restorasyon ve güçlendirme çalışmalarının özellikle kubbe çevresi ile minarede acil olarak gerçekleştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Serhatoğlu (2015), Bursa'daki 15 adet tarihi yığma minare üzerinde çevresel titreşim testleri ve doğrusal olmayan itme analizleri uygulayarak ampirik bir periyot bağıntısı

önermiştir. Çalışmada, en kritik bölgelerin yine küp-gövde birleşiminde toplanan çekme gerilmeleri olduğu raporlanmıştır.

Usta (2016), İzmir kent merkezindeki tarihi yapıların deprem davranışına odaklanarak, anıtsal yapıların sismik risk analizini gerçekleştirmiştir. Çalışma kapsamında Kemeraltı bölgesindeki ticaret ve ibadet binaları tek tek modellenmiş ve SAP2000 kullanılarak zaman tanım alanında dinamik analizler yapılmıştır. Farklı deprem kayıtlarıyla yapıların kırılma eğrileri çıkarılmış ve olasılıklı performans düzeyleri incelenmiştir. Elde edilen veriler ışığında, İzmir'deki Osmanlı dönemi yapılarına yönelik yeni bir sismik risk değerlendirme yöntemi geliştirilmiş ve anıtsal binaların deprem güvenliklerinin hızlı, parametre bazlı şekilde tahmin edilebileceği gösterilmiştir.

Döndüren (2017), çeşitli tarihi yığma yapılarda duvar, sütun, payanda, tonoz ve kubbe gibi strüktürel elemanlarda görülen farklı çatlak türleri ve oluşum mekanizmalarını sunmuştur. Çalışmada, deprem sırasında düzgün olmayan rijitlik geçiş noktalarının kritik hasarlara yol açtığı ifade edilmiştir.

İpek (2017), tarihi yapıların onarım teknikleri ve deprem performansını inceleyerek, yerinde yapılan ölçümler ve statik analizler doğrultusunda hasar gören bölümlere çözüm önerileri sunmuştur. Taşıyıcı sistemdeki yetersizliklerin giderilmesi için enjeksiyon ve çelik donatı ekleme gibi güçlendirme yöntemlerine odaklanmıştır. SolidWorks tabanlı sonlu eleman analizinden elde edilen sonuçlar, duvarlarda oluşan eğrilerin yerinde ölçülen verilerle uyumlu olduğunu ve dolayısıyla analizin tarihi yapının gerçek davranışını yeterince yansıttığını göstermiştir.

Aşık (2018), Zenburi Mescidi'nin taşıyıcı sistem analizinde malzeme bozulmaları ve zemin etkilerini belirleyerek uygulanacak onarım ve güçlendirme yaklaşımını tanımlamıştır. Çalışmada, yığma duvarların özgün yapısı dikkate alınarak uygun onarım malzemesi seçimi önerilmiştir.

Özdemir (2018), Patara Antik Kent Tiyatrosu sahne yapısında makro modelleme tekniği kullanarak, taş duvarları kabuk eleman olarak temsil eden kapsamlı bir sonlu eleman analizi gerçekleştirmiştir. Farklı deprem senaryoları uygulanarak sahne yapısının gerilme dağılımları ve şekil değiştirme kapasiteleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, özellikle üst kısımlarda çekme gerilmelerinin kritik düzeye ulaştığını ve yapının korunabilmesi için yerinde güçlendirme veya restorasyon çalışmalarının gerekliliğini ortaya koymuştur.

Aşıkoğlu (2018), Kütahya Kurşunlu Camii'nin deprem performansını inceleyen çalışmada, çevresel titreşim ölçümleriyle kalibre edilen 3B sonlu eleman modeli

kullanmıştır. Güçlendirme öncesi ve sonrası durumların karşılaştırılması, kubbe ve üst katmanlarda güçlendirme sayesinde çekme gerilmelerinin belirgin şekilde azaldığını ve yapısal bütünlüğün arttığını göstermiştir.

Ural ve Çelik (2018), Aksaray merkezindeki yedi tarihi minarenin geometrisini fotogrametrik ölçümlerle belirlemiş ve LUSAS programı ile dinamik analizler gerçekleştirmiştir. Özellikle küp-gövde birleşim bölgesinde yüksek kesme gerilmeleri tespit edilmiş ve bu bölge güçlendirme projelerinde öncelikli hedef olarak belirlenmiştir.

Kocaman vd. (2018), Erzurum Yakutiye Medresesi'nin statik ve dinamik davranışını makro modelleme yaklaşımıyla ve zaman tanım alanında analiz ederek belirlemişlerdir. Analizler sonucunda, minare-duvar birleşimlerinde düzlem dışı devrilme riskinin yüksek olduğu ve özellikle geçiş elemanlarının güçlendirmeye ihtiyaç duyduğu raporlanmıştır.

Işık ve Antep (2018), Bitlis Ahlat minare örneğinde sonlu elemanlar yöntemiyle modellenen yapı üzerinde farklı deprem senaryoları altında analizler gerçekleştirmiş ve gövde-küp birleşiminde çekme gerilmesi riskine dikkat çekmiştir.

Bayramı (2018), taban izolasyonlu çelik çerçeve yapıların farklı zemin tipleri (yumuşak, orta, sert) ve çeşitli deprem kayıtları altındaki sismik performansını incelemiştir. Zemin-yapı etkileşimi hem doğrudan hem de alt sistem yaklaşımlarıyla analiz edilmiş ve çeşitli izolasyon malzemelerinin (LRB, HDRB vb.) etkinliği araştırılmıştır. Sonuçlar, esnek zeminlerde izolasyonun beklenen avantajı sağlamadığı ve bu nedenle yapı periyodu ile yer değiştirmelerde öngörülenden daha fazla artışlar meydana gelebileceği sonucuna varmıştır.

Kazaz ve Kocaman (2018), taş yığma camilerde dış duvarların düzlem içi ve düzlem dışı kapasitelerini incelemek amacıyla Lalapaşa Camii'ni, 1992 Erzincan Depremi kaydı kullanarak analiz etmiştir. Çalışmada, mevcut yönetmelik formüllerinin tarihi yığma camiler için çeşitli uyarlamalara ihtiyaç duyduğu ve minare ile dış duvarların dışa devrilme potansiyelinin yüksek olduğu belirlenmiştir.

Usta ve Bozdağ (2021), tarihi Başdurak Camii'nin SAP2000 programında gerçekleştirilen zaman tanım alanı analizleriyle, farklı deprem seviyeleri altında maksimum yer değiştirme ve gerilme dağılımlarını tespit etmiştir. Minare ve kubbe gibi yapı elemanlarındaki potansiyel zayıf noktalar belirlenmiş ve bu doğrultuda güçlendirme stratejileri önerilmiştir.

Aydoğmuş (2019), tarihi yapıların modellenmesinde “klasik model” ile voxel (küpsel) model yaklaşımlarını karşılaştırmış ve nokta bulutu verilerinin doğrudan voxel elemanlara dönüştürülmesinin sağladığı avantajları değerlendirmiştir. Ancak, voxel modellemenin çözüm

süresini uzattığı ve bu nedenle karmaşık geometrilere model seçiminin dikkatle yapılması gerektiği belirtilmiştir.

Fırat vd. (2020), tarihi yapıların temel sistemlerinin güçlendirilmesine yönelik çalışmada, Gazi Mustafa Kemal Paşa Muallim Mektebi'nde Plaxis 2D programı ile zemin analizleri gerçekleştirmiştir. Oturma ve şişme problemlerinin azaltılması amacıyla uygulanan zemin iyileştirme ve drenaj çözümlerinin, yapının deprem güvenliğine katkı sağladığı belirlenmiştir.

Metin (2020), Aspendos Antik Kenti'nde yer alan hamam, su kemeri ve benzeri yapılarda kullanılan harç ve tuğla malzemeleri üzerinde gerçekleştirdiği deneysel analizlerle, tarihi yapıların özgün malzeme özelliklerinin belirlenmesine katkı sağlamış ve restorasyon uygulamalarına yönelik öneriler sunmuştur.

Kır (2020), tarihi yapıların temel sistemleri ve takviye metotlarını ele aldığı çalışmada, Nur-u Osmaniye Camii temelinde enjeksiyon, mini kazık ve jet grout gibi uygulamaların performansını incelemiş; bu yöntemlerin taşıma kapasitesini artırmasının yanı sıra oturma farklılıklarını da azalttığını vurgulamıştır.

Hökelekli (2020), yapı-zemin etkileşiminin tarihi yığma minarelerin deprem davranışı üzerindeki etkisini araştırmış ve esnek zeminlerde ankastre mesnet varsayımının yetersiz kalabileceğini ortaya koymuştur. Gerçeğe yakın yer değiştirme ve gerilme dağılımları için esnek mesnetli modellerin tercih edilmesi gerektiği belirtilmiştir.

İzgi (2020), Diyarbakır Surları Yedikardeş Burcu'nda makro modelleme yaklaşımıyla deprem altındaki gerilme dağılımlarını incelemiş ve zemin etkileşiminin de dikkate alındığı analizlerde, üst kısımlarda çekme gerilmelerinin ciddi boyutta arttığını, bu nedenle yapının korunması için güçlendirme gerektiğini saptamıştır.

Çakır (2021), 2011 Van Depremi'nde hasar gören Kaya Çelebi Camii'nin deprem performansını, basitleştirilmiş deplasman esaslı yöntemle değerlendirmiştir. Özellikle minare kesimindeki deplasman talebinin yüksek olduğu ve acil müdahale gerektirdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Yetkin vd. (2021), 24 Ocak 2020 Sivrice Depremi sonrası Elazığ'daki minarelerde yapılan gözlem ve raporlama çalışmalarıyla, gövde-küp birleşimi ile şerefe altı bölgelerinde çatlaklar ve lokal göçmelerin yaygın olduğunu; bu nedenle deprem yönetmeliklerinin onarım ve yeni tasarımlarda güncellenmesi gerektiğini belirtmiştir.

Zhang ve Far (2022), yüksek katlı çerçeve-kütük (core tube) sistemlerin zemin-yapı etkileşimini hem yakın fay hem de uzak fay depremleri altında analiz etmiştir. 20, 30 ve 40 katlı

prototip yapılarda zeminin esnekliğinin yatay ötelenmeleri ve kat ötelemelerini artırdığı, kat kesme kuvvetlerini ise azalttığı; özellikle yakın fay depremlerinde bu etkilerin daha belirgin olduğu vurgulanmıştır.

Şakalak (2021), TBDY 2018, Eurocode 8 ve IS 1893:2016 yönetmeliklerini karşılaştırarak, Konya'daki Tarihi Şeyh Sadreddin Konevi Camii'nde statik analizler gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçlar, TBDY 2018 ve Eurocode 8'in benzer çıktılar sunduğunu; IS 1893:2016'nın ise farklı kesit zorlanmalarına yol açan ilave hesaplar içerdiğini göstermiştir.

Yurdakul vd. (2021), Bayburt'taki 12. yüzyıla ait bir minarede, bölgesel taş ait basınç ve çekme özelliklerini deneysel olarak belirleyerek bu verileri sonlu eleman modeline aktarmış; Erzincan, Düzce ve Van deprem kayıtları altında yapılan analizlerde, minare gövdesinde çekme dayanımının aşıldığını ve yüksek hasar riski bulunduğunu ortaya koymuştur.

Aslan ve Satıcı (2022), tarihi yapılarda görülen fiziksel ve kimyasal bozulmalar ile deprem riskinden korunma yöntemlerini değerlendirmiş; onarım ve güçlendirme ilkelerinin doğru uygulanmaması durumunda yapıların daha hassas hâle gelebileceğini belirtmiştir.

Şeker (2022), tarihi Yozgat Saat Kulesi'ni hassas geometrik ölçümlerle modelleyerek statik ve dinamik analizler uygulamıştır. Kule tabanı ve balkon gibi ani rijitlik geçiş bölgelerinde deprem altında gerilme birikimi tespit edilmiş, bu bölgelerde hasar riskinin yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Türker vd. (2022), yakın ve uzak fay kayıtlarının eğik minareler üzerindeki etkilerini zaman tanım alanında analiz ederek karşılaştırmış; yakın fay depremlerinin tepe yer değiştirmelerini ve taban kesme kuvvetlerini ciddi şekilde artırdığı, kritik çekme gerilmelerinin geçiş bölgelerinde hasarı tetiklediği belirtilmiştir.

Yanık vd. (2022), Hagia Sophia Çan Kulesi'nde restorasyon sonrası dinamik parametre değişimleri ile sismik performans analizleri gerçekleştirmiştir. Restorasyonun doğal frekanslarda kısmi artış sağladığı ve güçlendirilen bölgelerin depreme karşı dayanımı artırdığı gözlemlenmiştir.

Soyluk ve Demircan (2023), 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinde hasar gören yığma minarelerdeki hasar tipleri ve nedenlerini incelemiş; en yoğun hasarın petek, şerefe ve küp bölümlerinde olduğu, bu bölgelerde yaygın çekme çatlakları bulunduğu ve güçlendirmenin öncelikle bu alanlara odaklanması gerektiği sonucuna varmıştır.

Yanık vd. (2024), tarihi minarelerde uzun süreli çevresel titreşim ölçümleriyle sıcaklık ve nem gibi çevresel etkenlerin doğal frekanslar üzerindeki etkisini incelemiş; frekanslarda

yaklaşık %7 oranında dalgalanma tespit edilmiş ve restorasyon sonrası frekanslarda belirgin artış gözlemlenmiştir.

Kumar ve Pallav (2024), 106 yıllık bir yığma kuleyi görsel inceleme, tahribatsız muayene (NDT) ve makro modelleme yöntemleriyle rüzgâr ve deprem etkisi altında analiz etmiş; özellikle tepe bölgesi ve zayıf kesitlerin bu etkiler karşısında duyarlı olduğunu saptamıştır.

Aymelek vd. (2023), İskenderpaşa Camii minaresinde rüzgâr ve deprem yükleri altındaki davranışı “model kalibrasyonu” öncesi ve sonrası karşılaştırarak değerlendirmiş; kalibrasyon sonrası elde edilen sonuçların daha gerçekçi olduğu ve uzun, narin minarelerde rüzgâr etkisinin depremle benzer büyüklükte salınımlara yol açabildiği belirtilmiştir.

Kalın (2023), çelik malzemeli endüstriyel bacaların rüzgâr ve deprem yükleri altındaki davranışını farklı zemin rijitlikleri (yumuşak, orta, sert) altında analiz etmiştir. Esnek zeminlerde tepe deplasmanları ve salınımların belirgin şekilde arttığı, baca tasarımında zemin-yapı ve rüzgâr-deprem etkileşimlerinin birlikte dikkate alınması gerektiği sonucuna ulaşmıştır.

Yiğit (2024), tarihi minarelerin deprem tepkisini iyileştirmek amacıyla üst kısımlarda sıvı sönümleyici (Tuned Liquid Damper) kullanımını lineer dinamik analizlerle değerlendirmiştir. Sonuçlar, bu sistemin görece yer değiştirme ve çekme gerilmelerini azalttığını; ancak basınç gerilmelerinde kısmi artışa yol açtığını göstermiştir.

Yayla (2024), Aksaray Zafer Camii minaresinde 1999 Düzce, 2011 Van ve 2023 Kahramanmaraş depremlerini farklı yönlerden etkileyerek kritik deprem eksenini araştırmıştır. Kapı boşluğu eksenini yakınında yüksek gerilme birikimi olduğu, bu nedenle tasarım sürecinde sismik yön ile kapı konumunun birlikte değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Jasim vd. (2024), taban izolasyonu sistemleri (HDRB, LRB, DSP) ile Tuned Mass Damper (TMD) sistemlerini yumuşak, orta ve sert zemin tiplerinde kurulu binalarda karşılaştırmıştır. Çalışmada, izolatör ve TMD sistemlerinin hem tekil hem de birlikte kullanımlarının etkileri incelenmiş; özellikle yumuşak zeminlerde taban kesme kuvvetinin azaldığı, ancak üst kat deplasmanlarının arttığı belirlenmiştir. TMD’nin tek başına izolatör kadar etkili olmadığı, ancak her iki sistemin birlikte kullanılması durumunda sismik tepkilerin önemli ölçüde iyileştirilebileceği ifade edilmiştir.

Özmen (2024), tarihi Taşhoron Kilisesi benzeri yığma yapıların zemin-yapı etkileşimini içeren deprem davranışını incelemiştir. Doğrusal olmayan analiz yaklaşımıyla farklı deprem kayıtları uygulanmış ve yumuşak zeminlerde duvar kesimlerinde çekme gerilmelerinin arttığı

belirlenmiştir. Daha rijit zemin veya uygun zemin iyileştirme yöntemleriyle yapının deprem performansının iyileştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Özbey (2024), tipik bir betonarme konut binasını dört ayrı zemin profili (S1, S2, S3, S4) ve farklı deprem senaryoları altında SAP2000 ile Plaxis 3D kullanarak analiz etmiştir. Rijit temel ile esnek temel kabullerini karşılaştırdığında, esnek zeminde üst kat yer değiştirmelerinin artarken taban kesme kuvvetinin kısmen azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca, zemin iyileştirme veya kazık sistemlerinin binayı sert zemin davranışına yaklaştıracak; yumuşak zeminde ise yapının salınımlarının yüksek kalabileceği belirtilmiştir.



İKİNCİ BÖLÜM

2. GENEL BİLGİLER

2.1. TARİHİ YAPI KAVRAMI

Tarihi yapılar, inşa edildikleri dönemin malzeme, teknik ve estetik anlayışını somutlayan; toplumsal, kültürel ve ekonomik bağlamları yansıtan insan yapımı eserlerdir. Bu yapılar, sadece mimari objeler olarak değil, aynı zamanda yaşadıkları döneme ilişkin belge ve anlatı niteliği de taşır (Aşık, 2018). Tarihi yapıların korunması, geçmişten günümüze kadar aktarılmış bilgi birikiminin ve kültürel kimliğin sürekliliğini sağlamak açısından kritik bir öneme sahiptir. Doğal aşınım, ani veya uzun süreli iklim değişiklikleri, yer altı su seviyesi dalgalanmaları ve insan müdahaleleri gibi faktörler tarihi yapıların orijinal dokusunu bozar ve yapısal bütünlüğünü zayıflatır (Ünay, 2002). Bu nedenle, tarihi yapı kavramı, sadece eski veya anıtsal yapılara atıf yapmaktan öte, zaman içinde değer ve işlev kazanmış, koruma ve müdahale gerektiren her yapıyı kapsar.

2.1.1. Tarihi Yapıların Önemi

Tarihi yapılar, toplumsal belleğin somutlaştırıldığı, kültürel kimliğin nesilden nesile aktarılmasını sağlayan temel unsurlardır. Bu yapılar, yalnızca birer mimari eser olmanın ötesinde, dönemin inşa tekniklerini, estetik değerlerini ve yaşam biçimlerini belgeleyen “taşınabilir tarih kayıtları” işlevi görür (Eskici, 1993). Ayrıca, tarihi yapıların korunması hem akademik araştırmalara zengin bir veri kaynağı oluşturur hem de günümüz mimarlık ve mühendislik pratiklerine ilham verir. Ekonomik açıdan, UNESCO Dünya Mirası Listesi gibi tescilleriyle turizm gelirini artıran bu kültürel varlıklar, yerel ve ulusal kalkınmaya önemli katkılar sunar (Mahrabel, 2006). Dolayısıyla tarihi yapıların önemi; kültürel süreklilik, eğitim-araştırma fırsatları ve ekonomik fayda üçgeninde ele alınmalıdır.

2.1.2. Tarihi Yapıların Korunma Nedenleri

Tarihi yapıların korunması, bir yandan kültürel mirasın gelecek nesillere aktarılmasını sağlarken diğer yandan bilimsel, ekonomik ve toplumsal faydalar sunar (Aşık, 2018). Bu nedenler şu başlıklar altında toplanabilir:

Kültürel kimlik ve süreklilik: Tarihi yapılar, bir toplumun ortak belleğini oluşturur ve kültürel kimliğin korunmasına katkı sağlar. Bu yapılar; mimari üslupları, süslemeleri ve işçilik teknikleri aracılığıyla geçmiş kuşakların estetik anlayışını ve değer sistemlerini günümüze taşır (Eskici, 1993).

Bilimsel ve eğitimsel katkı: Tarihi yapılar, mimarlık, arkeoloji ve malzeme bilimi gibi pek çok disipline zengin birer araştırma alanı sunar. Geleneksel inşa yöntemleri ve kullanılan malzemelerin incelenmesi, çağdaş mühendislik-pratiklerine ışık tutar ve yeni koruma stratejilerinin geliştirilmesine temel oluşturur (Ünay, 2002).

Ekonomik ve sosyal faydalar: UNESCO Dünya Mirası Listesi gibi tesciller sayesinde korunan yapılar, kültürel turizmi canlandırarak bölgesel ve ulusal ekonomiye katkı sağlar. Turistik cazibe merkezi haline gelen tarihi yapılar, yerel halk için gelir kaynağı oluştururken toplumsal dayanışmayı ve yerel kimlik bilincini güçlendirir (Mahrabel, 2006).

2.1.3. Tarihi Yapıların Korunma Yöntemleri

Tarihi yapıların uzun ömürlü olması, özgün dokunun korunması ve yapısal güvenliğin sağlanması için çeşitli müdahale teknikleri uygulanır. Bu yöntemler, hem yapının tarihi değerine sadık kalmayı hem de modern mühendislik gereksinimlerini dengede tutmayı hedefler (Aşık, 2018).

2.1.3.1. Restorasyon

Restorasyon, yapının özgün mimari ve malzeme karakterini mümkün olduğunca koruyarak bozulmuş veya eksilmiş kısımların onarılması veya yeniden inşa edilmesidir. Bu süreçte rölöve, restitüsyon ve restorasyon projeleri titizlikle hazırlanır; müdahale edilecek bölümlerde belgeleme ve analiz çalışmaları yapılır (Eskici, 1993).

2.1.3.2. Yapısal güçlendirme

Deprem, rüzgâr veya diğer yüklemelere karşı yapının taşıma kapasitesini artırmak amacıyla uygulanır. Çelik donatı ekleme, karbon lifli polimer (CFRP) kuşaklama, metal gergi sistemleri veya çimento enjeksiyonu gibi modern malzemeler; tarihi dokuya zarar vermeyecek şekilde, tersine çevrilebilir (reversible) olarak tasarlanır (Ünay, 2002).

2.1.3.3. Periyodik bakım ve izleme

Çatlak izleme, nem kontrolü, biyolojik üremenin engellenmesi ve kaplama onarımları gibi düzenli bakım faaliyetleri; yapının pasif hasar birikimini yavaşlatır. Uzun dönemli performans takibi için çevresel sensör sistemleri ve düzenli saha kontrolleri önerilir (Günaydın, 2018).

2.1.3.4. Deprem yalıtımı ve sönümleyiciler

Yapı temeline yerleştirilen sarkaç izolatörler (FPS), lineer veya tunable likit damper (TLD) sistemleri; sismik titreşimleri azaltarak üst yapıdaki talebi düşürür. Bu yöntem, özellikle yığma veya karma sistemlerde deprem davranışını iyileştirmek için etkin bir çözüm sunar (Yiğit, 2024).

2.1.3.5. Zemin iyileştirmesi

Tarihi yapıların temel performansını desteklemek amacıyla jet-grout, mikrokazık veya drenaj sistemleri gibi zemin iyileştirme teknikleri uygulanabilir. Zemin iyileştirmesi, diferansiyel oturmaları azaltarak yapısal stabiliteyi artırır (Fırat vd., 2020).

2.1.4. Tarihi Yapı Türleri

Tarihi yapılar, malzeme türü, taşıyıcı sistem yapısı ve kullanım amaçlarına göre çeşitli kategorilere ayrılır. Bu sınıflandırma, müdahale yöntemlerinin seçimi ve koruma stratejilerinin belirlenmesi açısından önem taşır (Mahrabel, 2006).

2.1.4.1. Malzeme türüne göre

Tarihi yapıların malzeme türlerini şu şekilde sınıflandırmak mümkündür:

Taş yapılar: Genellikle kesme taş veya moloz taş malzeme kullanılarak inşa edilir. Yüksek basınç dayanımı ve uzun ömür sunar, ancak düşük çekme dayanımı nedeniyle çatlaklara duyarlıdır (Ünay, 2002).

Tuğla yapılar: Fırınlanmış tuğla bloklar kullanılarak örülen duvarlar, hafiflik ve modülerlik avantajı sağlar. Ancak tuğla kalitesi ve harç uyumu kritik rol oynar (Ekşi Akbulut, 2006).

Ahşap yapılar: Karkas sistemli veya hatıllı yapılar, yüksek süneklik ve şok emme kapasitesiyle depreme karşı avantajlıdır. Yangın ve biyolojik bozulmaya karşı korunmalıdır (Saydamer, 2014).

Kerpiç ve horasan sistemleri: Sıklıkla kerpiç veya bağlayıcı kireç harçla oluşturulan yığma duvarlar, ekonomik ve yerel kaynaklıdır ancak suya ve neme hassastır (Mahrabel, 2006).

Metal ve karma (hibrit) sistemler: Demir veya çelik taşıyıcılarla takviye edilmiş karma yapılar, hem tarihi hem de endüstriyel döneme ait eserleri içerir. Korozyon kontrolü önemlidir (Mahrabel, 2006).

2.1.4.2. Taşıyıcı sistem yapısına göre

Tarihi yapıları sistem yapısına göre şu şekilde sınıflandırmak mümkündür (Mahrabel, 2006).:

Kârgir (Yığma) yapılar: Taş veya tuğla blokların harçla birleştirilmesiyle oluşur. Basınca dayanıklı, çekmeye zayıf sistemlerdir.

Ahşap yapılar: Ahşap kolon-kiriş iskelesi içine dolgu malzemesi yerleştirilerek oluşturulan sistemler. Depremde süneklik avantajı sağlar.

Kerpiç yapılar: Killi toprak karışımının kalıplarda basılmasıyla elde edilen blokların üst üste konmasıyla meydana gelir; sıcak ve kuru iklimlerde yaygındır.

Çelik ve betonarme sistemler: Endüstri devri sonrası gelişmiş yapılar; tarihi fabrikalar, sanat galerileri veya köprüler bu gruba girer. Gürültü, titreşim ve korozyon faktörlerine dikkat edilmelidir.

Hibrit sistemler: Ahşap, taş, metal gibi malzemelerin bir arada kullanıldığı veya modern takviyelerle birleştirildiği yapılar.

2.1.4.3. Kullanım amaçlarına göre

Tarihi yapıları kullanım amaçlarına göre şu şekilde sınıflandırmak mümkündür (Mahrabel, 2006):

Dini yapılar: Camiler, kiliseler, sinagoglar. İbadet pratiklerine yönelik mimari düzenlemeler ve estetik öğeler içerir.

Savunma yapıları: Kaleler, surlar, kuleler. Stratejik konumlandırma, kalın duvar ve savunma mimarisi öne çıkar.

Ticari ve sosyal yapılar: Bedesten, han, çarşı, hamam. Hem ticari hem de sosyo-kültürel faaliyetlere hizmet eder.

Eğitim-kültür yapıları: Medreseler, kütüphaneler, müzeler. Bilgi aktarımı ve toplumsal eğitim işlevi yüklenir.

Ulaştırma ve altyapı: Su kemerleri, köprüler, iskeleler. Zaman içinde şehirlerin gelişimine altyapı desteği sağlamıştır.

Sivil yapılar: Konutlar, köşkler, saraylar. Dönemsel konut tipolojilerine dair bilgi sunar.

Özel anıtsal yapılar: Türbeler, anıtlar, heykeller. Bireysel veya toplu anma işlevi taşır.

2.2. TARİHİ YAPILARDA KULLANILAN MALZEME VE ÖZELLİKLERİ

Taşıyıcı sistem malzemesi olarak; doğal taşlar, seramikler (tuğla, kiremit vb.), kerpiç, harç, ahşap, demir. Koruyucu sistem malzemesi olarak; doğal taş, kurşun ve çinko levhalar, seramikler. Süsleyici olarak; doğal taş, seramik, cam, harçlar, sıva ve boyalar kullanılır.

2.2.1. Taşıyıcı Sistem Malzemeleri

Tarihi yapılarda taşıyıcı sistemler, birden fazla malzemenin farklı kombinasyonlarıyla oluşturulur. Her malzeme türü, yapının genel davranışını; özellikle deprem, rüzgâr ve ölü yük gibi etkilere karşı gösterdiği performansı belirler. Aşağıda en yaygın beş taşıyıcı sistem malzemesi ayrıntılı şekilde incelenmiştir.

2.2.1.1. Yığma (kârgir) taş ve tuğla duvarlar

Yığma sistemler, kesme taş ya da fırın tuğlası bloklarının birbirine harçla bağlanmasıyla kurulur. Bu yapı tipinde:

Basınç dayanımı: Taş duvarlar 15–70 MPa, tuğla duvarlar 10–30 MPa arasında basınca direnç sağlar. Bu yüksek değere karşın, duvar kalınlığı ve örgü düzeni yük taşıma kapasitesini etkiler (Ünay, 2002).

Çekme ve eğilme zayıflığı: Taş ve tuğlanın çekme mukavemeti basınç dayanıma oranla çok düşüktür ($<10\%$); depremde yatay kuvvetler çatlak oluşumuna neden olur (Ekşi Akbulut, 2006).

Tuğlaların ortalama fiziksel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Tuğlaların Ortalama Fiziksel Özellikleri (Mahrabel, 2006)

Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)
10-30	2,5-5	10-20

Termo-izolasyon ve nem direnci: Kalın taş duvarlar ısı depolayıcı (termal kütle) özelliğe sahipken, tuğla duvarlar daha geçirgendir. Ancak her iki tür de su yalıtımı gerektirir.

Müdahale yaklaşımı: Restorasyonda harç uyumuna ve malzeme renk tonuna dikkat edilerek benzer tür ve oranlarda kireç harç kullanılır. Duvar içi boşluklar enjeksiyon yöntemiyle doldurulabilir. Tablo 2’de tarihi yapılarda kullanılan taşların fiziksel özellikleri belirtilmiştir (Mahrabel, 2006).

Tablo 2: Tarihi Yapılarda Kullanılan Taşların Ortalama Fiziksel Özellikleri (Mahrabel, 2006)

Taşın Cinsi	Basın Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Granit	30-70	14-33	4-7	15000-70000
Mermer	25-65	9-45	1-15	25000-70000
Kireç Taşı	18-65	6-20	2-6	10000-55000
Kum Taşı	5-30	2-10	2-4	13000-50000
Tüf	6-31	2-6	0-0,2	800-3000
Kuvars	10-30	3-10	3-4	15000-55000
Serpantin	7-30	2-10	6-11	23000-45000

2.2.1.2. Ahşap karkas sistemler

Ahşap karkas sistemler, kolon-kiriş elemanlarının bir ızgara oluşturduğu ve dolgu malzemelerinin bu ızgaraya oturtulduğu yapı tipleridir. Özelliklerini şu şekilde açıklayabiliriz:

Süneklik ve enerji sönümü: Ahşabın çekme (>40 MPa) ve eğilme dayanımı yüksek olup, titreşim enerjisini absorbe edebilir. Deprem yüklerinde hem rijit hem esnek davranış sergiler (Mahrabel, 2006).

Ağırlık avantajı: Ahşap karkas yapılar, yığma sistemlere kıyasla çok daha hafiftir; bu da atalet kuvvetini azaltarak deprem etkisini düşürür.

Koruma gereksinimi: Biyolojik bozulma (çürük, böcek) ve yangın riskine karşı emprenye, yangın geciktirici ve bakımlar uygulanmalıdır.

Müdahale yaklaşımı: Çürümüş elemanlar cam veya epoksi reçine enjeksiyonuyla güçlendirilebilir; hasarlı parçalar benzer tür ve kesitte ahşapla değiştirilir.

2.2.1.3. Kerpiç duvar sistemleri

Kerpiç; kil, saman veya ot karışımından elde edilen bloklarla örülen yığma sisteme verilen addır. Kerpiç duvar sistemlerinin özelliklerini şu şekilde incelemek mümkündür:

Basınç dayanımı: Kerpiç bloklar genellikle <5 MPa basınca dayanacak şekilde tasarlanmıştır; bu nedenle kat yüksekliği ve yük sınırlandırması zorunludur (Mahrabel, 2006).

Kilin fiziksel özellikleri Tablo 3'te verilmiştir (Mahrabel, 2006).

Tablo 3: Kilin Fiziksel Özellikleri (Mahrabel, 2006)

Ortalama Kil	Basınç Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Kil	0,29-3,00	0,1-0,5	0,1-0,4	250-500

Nem ve su hassasiyeti: Kerpiç duvarlarda kaplama ve çatı detayları su geçişini önleyecek şekilde düzenlenmelidir. Aksi halde erozyon ve şekil bozulması hızlanır.

Termal konfor: Kerpiç, iyi bir ısı ve ses yalıtımı sağlar; yazın serin, kışın sıcak ortamlar yaratır.

Müdahale yaklaşımı: Zemin seviyesinde ve çatıda su tutucu elemanlar eklenir; bozulmuş kerpiç bloklar orijinal karışım oranlarına sadık kalınarak yenilenir.

2.2.1.4. Metal takviyeli sistemler

Tarihi yapı restorasyonunda, çelik veya dökme demir gergi, kuşak ve bağlantı elemanları kullanılır. Metal takviyeli sistemlerin özelliklerini inceleyecek olursak:

Çekme ve süneklik: Çelik donatılar 250 MPa'nın üzerinde çekme dayanımı gösterir; sismik kuvvetlerin etkisini azaltmak için minare kuşaklamalarında ve duvar-eklem hatlarında tercih edilir (Mahrabel, 2006).

Metalin fiziksel özellikleri Tablo 4'te belirtilmiştir (Mahrabel, 2006).

Tablo 4: Metallerin Fiziksel Özellikleri (Mahrabel, 2006)

Metalin Cinsi	Basınç Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Demir	60-120	800-840	150-300	205000-215000
Pirinç	50-80	350-360	50-100	95000-100000
Bakır	50-90	450-470	100-300	100000-120000
Kurşun	4-12	12-20	46-84	12000-16000
Çinko	45-75	350-400	90-200	30000-96500

Korozyon kontrolü: Metal malzemeler paslanmaya eğilimlidir; galvaniz, epoksi kaplama veya pas önleyici boya uygulamaları zorunludur.

Müdahale yaklaşımı: Metal elemanlar reversibl olarak tasarlanır; gerektiğinde sökülüp yapıdan ayrılabilir. Bu sayede özgün doku korunur.

2.2.1.5. Hibrit sistemler

Hibrit sistemler, tarihi malzeme ve modern takviyelerin birlikte kullanıldığı yapılardır. Bu sistemlerin özelliklerini inceleyecek olursak:

Kompozit davranış: Yiğma duvarların iç yüzeyine uygulanan CFRP kuşaklar, çekme mukavemetini %200'e varan oranlarda artırabilir (Serhatoğlu, 2015).

Deprem performansı: Betonarme ankastre kuşaklar veya mikro kazık uygulamaları, temeldeki diferansiyel oturmayı kontrol eder.

Müdahale yaklaşımı: Hibrit sistem tasarımında literatür örnekleri (Bayraktar vd., 2011; Yiğit, 2024) baz alınarak davranış testleri yapılmalı, malzeme uyumu ve reversibilitate göz önünde bulundurulmalıdır.

Tablo 5'te harçların fiziksel özellikleri verilmiştir (Solak & Çüçen, 2023).

Tablo 5: Harçların Fiziksel Özellikleri (Solak & Çüçen, 2023)

Harcın Cinsi	Basınç Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
Horasan Harcı	6-8	0,1-4	0,1-1
Kireç Harcı	1-2	0,1-1	0,1-0,5

2.3. TARİHİ YAPIYI OLUŞTURAN TAŞIYICI SİSTEMLER

Tarihi yapılarda taşıyıcı sistemler; kubbe, tonoz, kemer, sütun, temeller, döşemeler ve duvarlar gibi elemanlardan oluşur. Her biri, yapının kendi ağırlığını ve dış yükleri zemine aktaracak şekilde tasarlanmıştır.

Kubbe: Merkezi planlı yapılarda yaygın olarak kullanılan kubbeler, dairesel veya çokgen taban üzerinde yükselir. Ağırlığı kemerlere ve pendentiflere ileterek yan duvarları sıkıştırır; böylece basınç kubbe çizgisinin içindeki gerilmeler dengelenir (Mahrabel, 2006).

Tonoz: Dikdörtgen veya dikensi açıklıkları örtmek için kemerlerin ardışık düzenlenmesiyle ortaya çıkar. Tonoz, dış genel yükleri yan duvarlara dağıtarak basınca çalışan kabuk davranışı gösterir (Coşkun & Türk, 2012).

Kemer: Ağırlığı yan ayaklara aktaran kemerler, çekme gerilmelerine karşı dayanıksız taş ve tuğla malzemeyi basınç altında tutar. Yapının yatay açıklıklarını geçerken gerilme düzenini kontrol eder (Ünay, 2002).

Sütun: Dikdörtgen veya silindirik kesitli taş ya da mermer sütunlar, üst örtü ve kemer yüklerini doğrudan temele aktarır. Taş sütunların basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı ise düşüktür (Mahrabel, 2006).

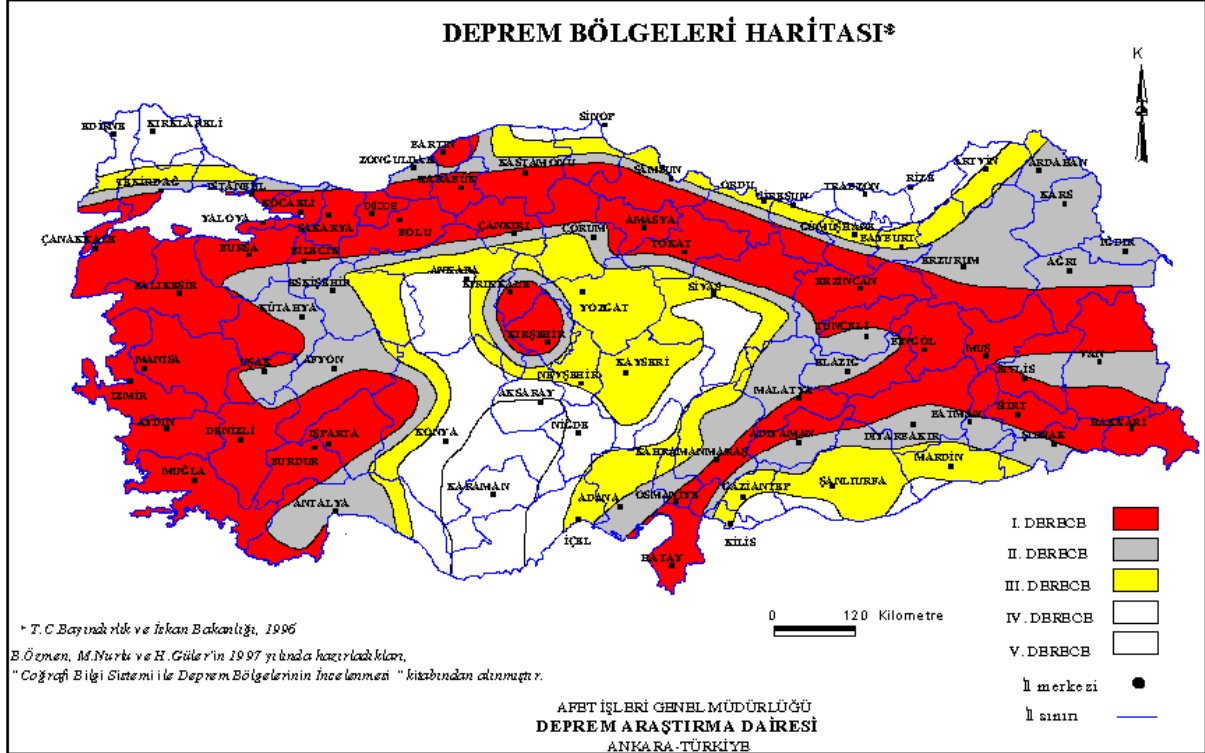
Temeller: Genellikle geniş hatıllı yığma dolgu veya ahşap kazık temeller, duvar yüklerini zemin yüzeyine yayar. Temel sistemi, zemin taşıma gücü ve oturmaların kontrolü için kritik öneme sahiptir (Hökelekli, 2020).

Döşemeler: Ahşap hatıllı veya taş plak döşemeler, kat döşemesini oluşturur ve yükleri kirişlere iletir. Tarihi yapıda döşeme sistemi, hem kullanım konforu hem de yapısal bütünlük açısından değerlendirilir (Mahrabel, 2006).

Duvarlar: Yığma taş veya tuğla duvarlar, hem taşıyıcı hem de bölme elemanı işlevi görür. Kalınlıkları, malzeme kalitesi ve harç uyumu duvarların taşıma gücünü ve deprem dayanımını belirler (Ekşi Akbulut, 2006).

2.4. DEPREMİN ÜLKEMİZE ETKİLERİ VE TARİHİ YAPILARIN DEPREM DAVRANIŞI

Türkiye, Alp-Himalaya kuşağının batı kolunda yer alır ve yılda ortalama 1.500'den fazla deprem üretir. Kuzey Anadolu Fay Hattı (KAF) ve Doğu Anadolu Fay Hattı (DAF) boyunca meydana gelen yıkıcı sismik olaylar; Erzincan (1939), Kocaeli (1999) ve Kahramanmaraş (2023) depremleri gibi büyük afetlere sahne olmuştur (Şakalak, 2021). Şekil 1'de Türkiye deprem bölgeleri haritası verilmiştir (AFAD, 2019).



Şekil 1: Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası (AFAD, 2019)

Tarihi yapılar deprem yüklerine karşı şu davranışları gösterir:

Düşük süneklik: Taş ve tuğla yığma sistemler, çekmeye karşı zayıf olduğundan yatay titreşimler çatlak oluşumuna yol açar (Ünay, 2002).

Standart dışı malzeme: Orijinal malzeme özellikleri; yapı içinde bileografik farklılıklar gösterdiğinden, malzeme heterojenitesi deprem performansını tahmin etmeyi güçleştirir (Ekşi Akbulut, 2006).

Zemin–yapı etkileşimi: Yumuşak zemin koyu rezonans riskini artırarak yer değiştirmeler ve diferansiyel oturmalar yaratır (Hökelekli, 2020).

Ağırlık kaynaklı atalet kuvveti: Kalın yığma duvarlar ve kubbeler, yüksek atalet kuvvetlerine neden olarak yapısal bağlantı bölgelerinde lokalize hasar oluşturur (Serhatoğlu, 2015).

2.4.1. Tarihi Yapıların Deprem Tehlikesi ve Koruma Yöntemleri

Deprem riski yüksek bölgelerde, tarihi yapıların korunması için:

Yapısal güçlendirme: Çelik gergi, CFRP kuşaklama ve çimento enjeksiyonu gibi modern tekniklerle taşıyıcı kapasite artırılmalı (Ünay, 2002).

Deprem yalıtımı ve sönümleyiciler: FPS, LRB veya TLD sistemleriyle temel izolasyonu sağlanmalı (Yiğit, 2024).

Dijital modelleme: SAP2000 ve ANSYS gibi yazılımlarda doğrusal olmayan analizlerle müdahale senaryoları test edilmeli (Serhatoğlu, 2015).

2.4.2. Minareler

Minare ezan okunmasını sağlayan, İslâm kent silüetinde hemen tanınan kule biçimli yapı ögesi zaman içinde yalnızca işlevsel bir eleman olmaktan çıkmış; kent kimliğini, estetik beğeniyi ve yapım teknolojisindeki ilerlemeyi yansıtan simgesel bir mimari dile dönüşmüştür (Doğangün vd., 2006). İlk örnekler, Emevi dönemi camilerine eklenen mütevazı “çağrı kuleleri” iken; Abbâsi ve Selçuklu devrinde silindirik gövde, çokgen kaide ve mukarnaslı şerefe ayrıntılarıyla zenginleşmiş, Osmanlı döneminde ise Mimar Sinan sayesinde zarif oranlı, ince silüetli biçimiyle doruk noktasına ulaşmıştır (Eskici, 1993).

2.4.2.1. Tarihsel gelişim ve tipoloji

Minarelerin tarihsel gelişim ve tipoloji dönemleri şu şekildedir:

Erken islâm dönemi: Suriye ve Irak'ta kare planlı, kütsel minareler egemen olmuştur.

Selçuklu dönemi (11.–13. yy.): Anadolu'da çoğunlukla silindirik gövdeli, sırlı tuğla ya da taş işçiliği ile süslenen, bükölgen kuşaklı minareler yapılmıştır. Taç kapıyla ilişkili tek şerefeli tip yaygındır (Ünay, 2002).

Osmanlı dönemi (14.–19. yy.): Tek ya da çift şerefeli, ince ve yüksek oranlı minareler hâkimdir. Taş kaide, tuğla gövde, mukarnas dolgulu şerefe ve kurşun kaplı külâh standartlaşmıştır. İstanbul'daki Şehzade, Süleymaniye ve Selimiye camilerindeki çok şerefeli minareler süreklilik ve zarafet örneğidir (Serhatoğlu, 2015).

Cumhuriyet sonrası: Betonarme ya da çelik iskeletli, çoğu kez ön üretimli elemanlardan oluşan çağdaş tasarımlar görülür. Ancak tarihi dokuya yakın bölgelerde geleneksel form ve malzeme hâlen tercih edilir (Yiğit, 2024).

2.4.2.2. Yapısal bileşenler ve malzemeler

Minare, işlevsel olarak dört ana kısımdan oluşur:

- **Kaide:** Zemine geniş bir iz bırakır, temele gelen dikey yükleri yayar.
- **Gövde:** Taş, tuğla veya karma (taş + tuğla) yığma sistemle örölür; eğilme ve kesme kuvvetlerine karşı rijitliği belirler.
- **Şerefe:** Ezan balkonudur; konsollu mukarnas kuşaklı taş kursak, çekme gerilmelerinin en yoğun olduğu dilime karşılık gelir (Coşkun & Türk, 2012).
- **Külâh / Petek:** Ahşap veya kurşun kaplı konik örtü; genelde bakır âlemlerle biter.

Selçuklu minarelerinde sırlı tuğla işçiliği, Osmanlı örneklerinde ise küfeki taşı veya kesme kalker kullanılmıştır. Taşın basınç dayanımı 20–70 MPa'a kadar çıkarken, tuğlada bu değer 10–30 MPa aralığındadır; her iki malzemenin çekme kapasitesi ise basıncın onda biri civarındadır (Ekşi Akbulut, 2006). Mimar Sinan, gövdeye yerleştirdiği demir gergi çubuklarıyla (karma sistem) deprem sünekliğini artırmış; bu yenilik 16. yüzyıl sonrasında Anadolu'daki minarelerde yaygınlaşmıştır (Doğangün vd., 2006).

2.4.2.3. Deprem davranışı ve kritik kesitler

Çevresel titreşim testleri, minarelerde en büyük çekme gerilmelerinin “küp–gövde geçişi”, “şerefe altı” ve “külâh başlangıcı” kesitlerinde yoğunlaştığını göstermektedir (Çaktı vd., 2013; Bayraktar vd., 2011). Yığma gövdenin ağır kütsesi yüksek atalet kuvveti üretirken, kesme gerilmeleri sarmal çatlaklara zemin hazırlar. Yumuşak zemin üzerine oturan

minarelerde, esnek mesnet davranışı periyodu uzatarak deplasman taleplerini büyütür (Hökelekli, 2020).

2.4.2.4. Koruma ve güçlendirme yaklaşımları

Güncel restorasyonlarda üç temel strateji öne çıkar:

- **Çelik veya CFRP kuşaklama:** Gövdeye dıştan reversibl kuşak uygulanarak çekme kapasitesi artırılır (Aşık, 2018).
- **Enjeksiyon ve taş dikişi:** Boşluklu harç fugaları mikrokalsit bazlı kireç enjeksiyonuyla doldurulur; çatlak boyunca paslanmaz çelik dübelleri yerleştirilir.
- **Temel iyileştirmesi ve izolasyon:** Jet grout veya mikro kazıkla temelin rijitliği yükseltilir; sarkaç tip izolatörlerle yatay ivme azaltılabilir (Yiğit, 2024).

Bu yöntemler, minarenin özgün silüetini bozmadan deprem dayanımını yükseltmeyi hedefler ve Uluslararası Anıtlar ve Sitler Konseyi (ICOMOS) ilkelerine uygun şekilde “kuramsal asgari müdahale” anlayışını benimser.

2.4.3. Tarihi Yapıların Yaşadığı Zemin ve Çevresel Etkiler

Tarihi yapılar, inşa edildikleri günden itibaren yalnızca taşıyıcı malzemenin sınırlılıklarıyla değil; oturdukları zemin özellikleri, iklimsel süreçler ve insan kaynaklı çevresel değişimlerle de sürekli etkileşim hâlinindedir. Dolayısıyla uzun ömürlü koruma stratejileri geliştirmek için yapının ve zeminin ortak davranışını anlamak gerekir (Mahrabel, 2006).

2.4.3.1. Zemin koşullarının yapısal performansa etkisi

Zemin koşullarının yapısal performansa etkisi şu şekilde açıklanır:

- **Taşıma gücü ve diferansiyel oturma:** Yumuşak kil, silt veya gevşek kum tabakaları üzerinde oturan tarihi yığma duvarlar, diferansiyel oturmalar sonucu eğilme çatlaklarına maruz kalır. Fırat vd., 2020’nin Plaxis 2D modellemeleri, gevşek zeminlerde oturma izole temellerde %30’a varan oranda artabildiğini göstermiştir.
- **Sıvılaşma ve dinamik büyütme:** Zayıf, suya doygun kumlu zeminler, deprem sırasında sıvılaşmaya uğrayarak temelin gömülü kısmında taşıma kaybı oluşturur. Hökelekli (2020) ağır yığma minare modellerinde bu olgunun, tepe deplasmanını 1,4 kat yükselttiğini rapor etmiştir.
- **Zemin–yapı etkileşimi (SSI):** Tarihi yapılar genelde rijit mesnetli varsayımla projelendirilmiş olsa da, gerçek davranış elastik yaylarla modellenen esnek temellere

yakındır. Dinamik analizler, SSI'nin yapının doğal frekansını aşağı çekerek rezonans riskini artırdığını göstermektedir (Serhatoğlu, 2015).

2.4.3.2. Hidrojeolojik faktörler

Hidrojeolojik faktörler tarihi yapılara etkileri şu şekildedir:

- **Yeraltı suyu dalgalanmaları:** Yükselen su tablası, temelde kapilariteyle tuz taşınımını hızlandırır; kılcal kuruma–ıslanma döngüleri harç ve taşın mikroyapısını zayıflatır (Ekşi Akbulut, 2006).
- **Erozyon ve kimyasal çözünme:** Kireçtaşı içeren bloklar, suda çözünebilir kalsiyum bikarbonat oluşumuyla yüzey kayıplarına uğrar. Uzun vadede malzeme gözenekliliği artar ve birim basınç dayanımı azalır (Ünay, 2002).

2.4.3.3. İklimsel ve atmosferik koşullar

İklimsel ve atmosferik koşulların tarihi yapıları etkileri şu şekildedir:

- **Sıcaklık döngüleri:** Günlük ve mevsimsel sıcaklık farkları, özellikle tuğlada termal genleşme–büzülme çatlaklarına yol açar. Mahrabel (2006), 14. yüzyıl tuğlalarında $\Delta T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ döngüsünün birkaç yıl içinde yüzey kabuklaşması başlattığını gözlemiştir.
- **Nem ve biyolojik bozunma:** Yüksek bağıl nem, mikroorganizma ve bitki köklerinin taş arası boşluklara girerek fiziksel genişlemeye sebep olmasına zemin hazırlar. Günaydın (2018), restorasyonda mekanik temizlik ve biyosit uygulamasının sürdürülebilir bir çözüm olduğunu vurgular.
- **Hava kirliliği ve asidik yağış:** Kükürt dioksit (SO_2) ve azot oksitler (NO_x) içeren atmosfer, özellikle mermer ve kalker yüzeylerde sülfat kristallenmesine neden olarak taş yüzeyini pul pul döker.

2.4.3.4. Antropojenik etkiler

Antropojenik faktörlerin tarihi yapılara etkileri şu şekildedir:

- **Trafik titreşimleri:** Modern kent merkezlerine sıkışan tarihi yapılar, araç kaynaklı mikro titreşimlere sürekli maruz kalır. Bu titreşimler, özellikle çatlak uçlarını mikro ölçekte zorlarken zamanla birikimli hasara dönüşebilir (Yiğit, 2024).
- **Altyapı kazıları ve yeraltı su deşarjı:** Metro tünelleri veya derin temel çukurları, yeraltı su düzeyini düşürerek oturmayı tetikleyebilir. Böyle durumlarda izole olarak

kalan tarihi yapılar, yanal toprak basıncı değişimleri nedeniyle beklenmedik gerilmeler yaşar (Selçuk, 2019).

2.4.3.5. Koruma için zemin–çevre odaklı yaklaşımlar

Tarihi yapıları koruma için izlenen zemin–çevre odaklı yaklaşımlar şu şekildedir:

- **Jeoteknik izleme:** Piezometre, InSAR ve eğim ölçer ağlarıyla zemin hareketleri gerçek zamanlı izlenmeli.
- **Temel iyileştirmesi:** Jet grout, mikro kazık veya enjeksiyon hatılarıyla taşıma gücü ve rijitlik iyileştirilmeli (Hökelekli, 2020).
- **Nem yönetimi:** Yeraltı drenajı, saçak uzatımı ve kapilarite kesici zemin şerbetleriyle su–tuz taşınımı sınırlandırılmalı (Ekşi Akbulut, 2006).
- **Çevresel planlama:** Yeni altyapı projeleri, tarihi eser çevresinde minimum tahribat ilkesiyle tasarlanmalı; titreşim kaynağı makinelerde sönümleyici bariyerler uygulanmalı (Günaydın, 2018).

2.5. MELİK SUNULLAH CAMİİ MİNARESİ'NE GENEL BAKIŞ

2.5.1. Yapının Mimari ve Tarihi Özellikleri

Melik Sunullah Camii ve bitişiğindeki türbe yapısı, Malatya ili, Battalgazi ilçesi, Eski Malatya Mahallesi'nde, sur içi yerleşim alanında, Ulu Cami ile Sıptırız kapısı arasında kalan bölgede konumlanmaktadır. Şekil 2'de Camii'nin, 38.42031° kuzey enlemi ile 38.36315° doğu boylamı arasında harita üzerindeki konumu belirtilmiştir (Google Maps, 2025).



Şekil 2: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Harita Üzerindeki Konumu (Google Maps, 2025)

Cami halk arasında “Vaiz Baba” ya da “Adile Camii” olarak da bilinmektedir. Yapı, 14. yüzyıl sonlarında, Memlük Sultanı Melikü’z-Zahir Berkuk döneminde (h. 796 / m. 1394) inşa edilmiştir. Minare üzerinde yer alan Arapça kitabede, minarenin Alâuddin Hüsnü oğlu

Çerkes bin Abdullah tarafından yaptırıldığı ifade edilmektedir (Eskici, 1993, s. 62; Gabriel, 1940, s. 263, 354). Şekil 3 ve 4'te kitabeler ve altlarında latin alfabesiyle yazılışları verilmiştir.



Şekil 3: Melik Sunullah Camii Minare Kitabesi (Malatya Vakıflar Bölge Müdürlüğü, 2017)

- 1) Fi eyyamı devlet Es-Sultan El-Melik El-Zahir
- 2) Berkuk halledu mülkehu fi şuhur-u sene sıtt ve tıs'in ve seb'amiete



Şekil 4: Melik Sunullah Camii Minare Kitabesi (Malatya Vakıflar Bölge Müdürlüğü, 2017)

- 1) İnşa haze'l mezinetü'l mübarek Alâ'il Kelimetullah
- 2) El-Kerim ve ibtiga-i levculullah el-kadim El-Fakir Âli
- 3) Allahu te'ala Çerkes bin Abdullah El-Hüsni tekbilullah menâ (Gabriel, 1940, s. 354)

Yapının mimarı ya da inşa ustasına dair doğrudan bir bilgi bulunmamakla birlikte, minarenin yapıdan farklı mimari üslupta olması, cami ve minarenin farklı dönemlerde tamamlandığını göstermektedir. Nitekim minarenin orijinal olduğu, caminin ise muhtemelen sonradan minareye bitişik olarak inşa edildiği yahut farklı bir yapıdan dönüştürüldüğü

düşünülmektedir (Eskici, 1993). Bu yorum, minare ve bina arasındaki mimari bütünlüğün eksikliği ve yapı tekniklerindeki farklılıkla da desteklenmektedir.

Cami, kare planlı kubbeli ana mekânı, bitişiğindeki türbesi ve silindirik gövdeli minaresiyle klasik Anadolu-Türk mimarisinin dini yapı karakterini taşır. Minarenin kaidesi kesme taştan, gövdesi ise tuğladan örülmüştür. Şerefe altından itibaren üst kısmının bir bölümünün geçmiş dönemlerde yıkıldığı belgeler ve fotoğraflarla ortaya konmuştur. Türbe kısmında Tevabil Gazi, Vaiz Baba (adıyla anılan zat) ve Battalgazi'nin aile fertlerinden birine ait olduğu düşünülen üç mezar yer almaktadır (Eskici, 1993). Şekil 5'te Camii'nin genel görünümü verilmiştir (Malatya Vakıflar Bölge Müdürlüğü, 2017).



Şekil 5: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Genel Görünümü (Malatya Vakıflar Bölge Müdürlüğü, 2017)

Yapı bazı kaynaklarda “Karacaköy Camii” ismiyle anılmış; A. Gabriel tarafından “Adile Camii” olarak tanımlanmış; halk arasında ise “Koca Vaiz Türbesi” olarak bilinmiştir. Günümüzde hâlâ bazı kesimler tarafından ziyaretgâh olarak görülmekte, özellikle hastalık, korku ve sıkıntı gibi durumlarda şifa aramak amacıyla ziyaret edilmektedir (Gabriel, 1940).

Yapının tarihi süreç içerisinde birçok kez onarıldığı anlaşılmaktadır. Özellikle 2000’li yıllardan sonra Malatya Vakıflar Bölge Müdürlüğü tarafından yapılan rölöve, restitüsyon ve restorasyon çalışmaları ile yapı belgelenmiş, restorasyon uygulamalarında özgün dokunun korunmasına özen gösterilmiştir. 2006, 2007 ve 2017 yıllarında alınan kurul kararlarında, hem minare hem de cami için statik analiz ve güçlendirme önerileri değerlendirilmiş; türbenin yapısal risklerine yönelik arşivleme, söküm ve yeniden değerlendirme kararları alınmıştır (Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2006; 2007; 2017). Şekil 6 ve 7’de restorasyon öncesi, 8’de restorasyon sonrası fotoğraflar sunulmuştur (Malatya Vakıflar Bölge Müdürlüğü, 2017). 9, 10 ve 11’de ise araştırmacının bizzat kendisi tarafından fotoğraflanan Kahramanmaraş depremi sonrası fotoğraflarına yer verilmiştir.



Şekil 6: Melik Sunullah Camii Minaresi’nin Restorasyon Öncesi Fotoğrafı (Malatya Vakıflar Bölge Müdürlüğü, 2025)



Şekil 7: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Restorasyon Öncesi Fotoğrafı (Malatya Vakıflar Bölge Müdürlüğü, 2017)



Şekil 8: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Restorasyon Sonrası Fotoğrafı (Malatya Battalgazi Belediyesi, 2023)



Şekil 9: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Kahramanmaraş Depremi Sonrası Fotoğrafı

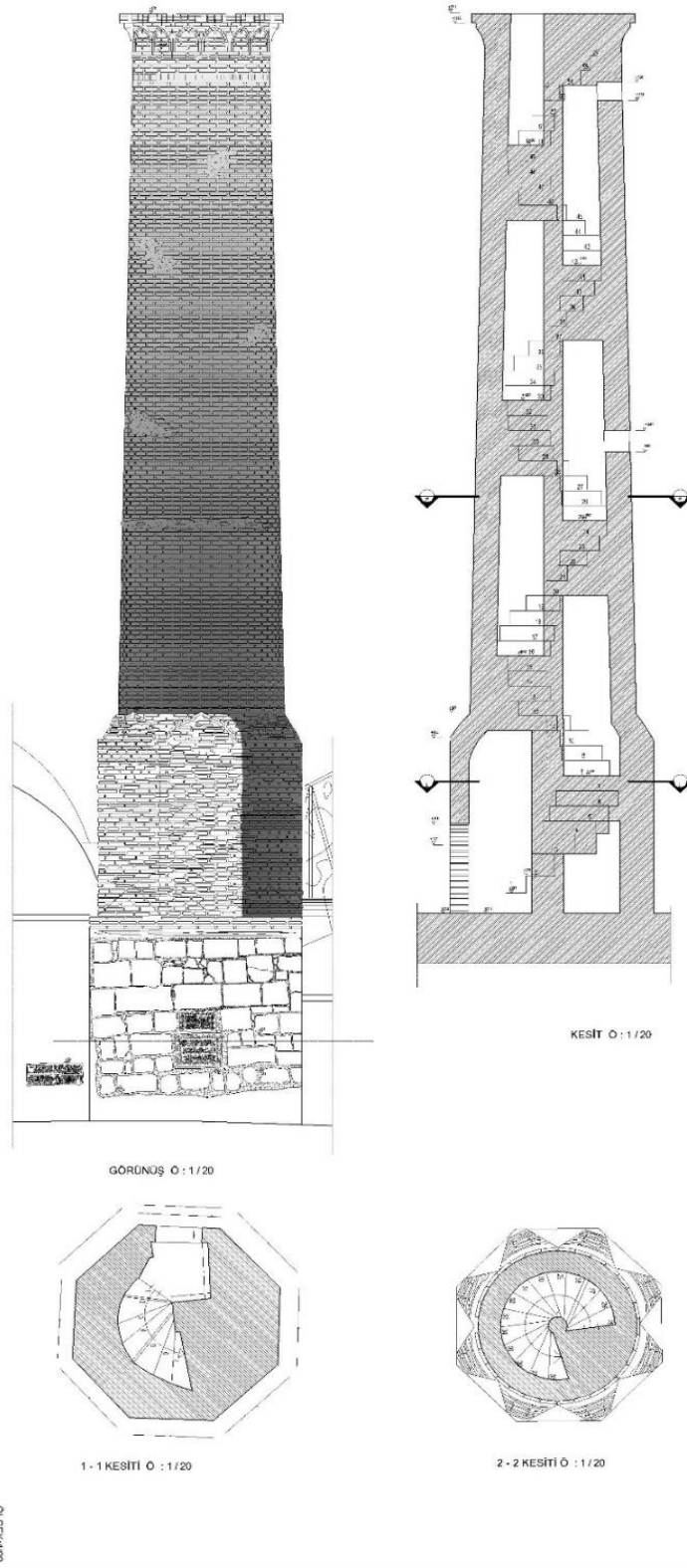


Şekil 10: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Kahramanmaraş Depremi Sonrası Fotoğrafı

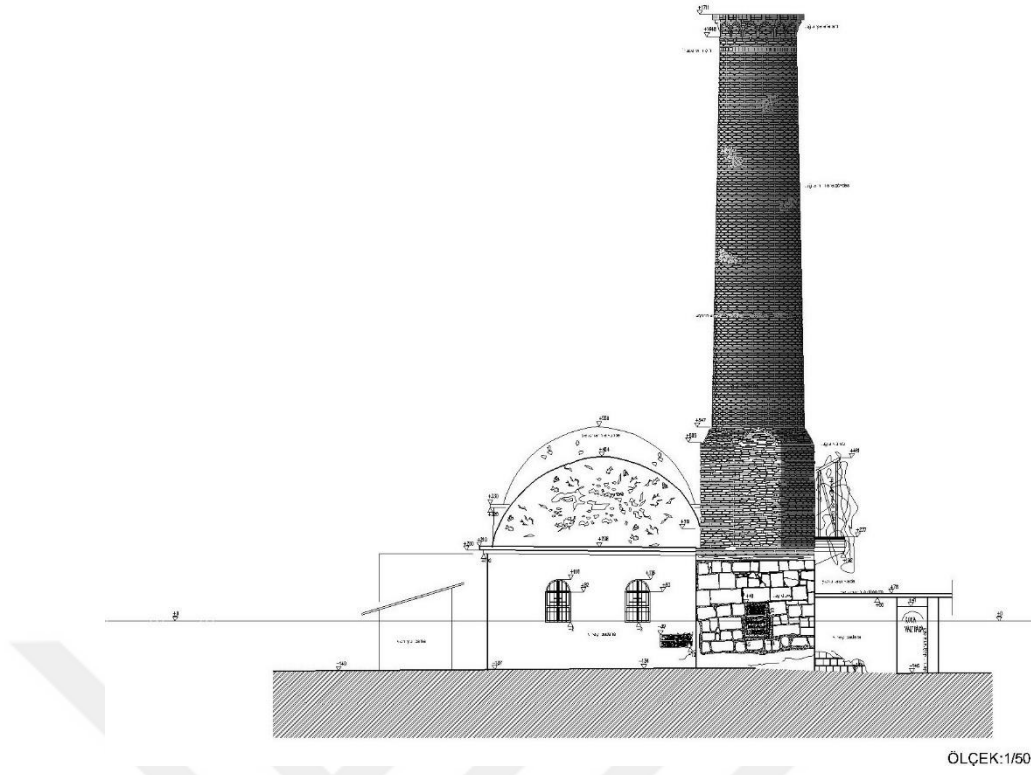


Şekil 11: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Kahramanmaraş Depremi Sonrası Fotoğrafı

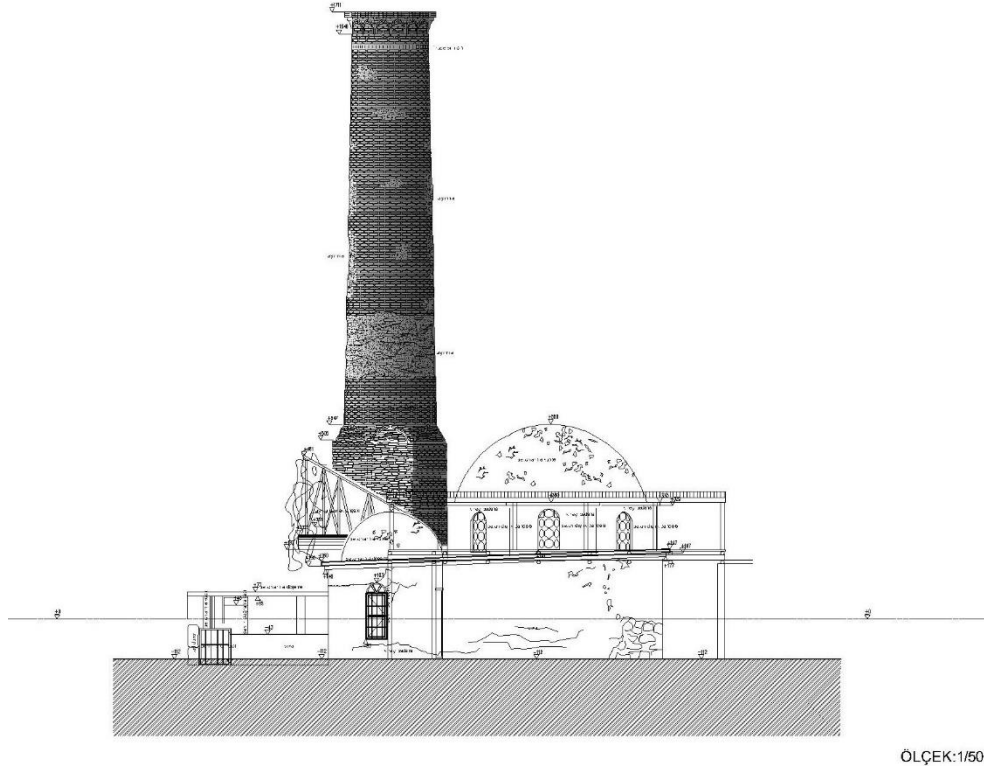
Yapının coğrafi konumu, hem tarihi hem de mühendislik çalışmaları açısından önemlidir. Camii ve minaresi, 38.42031° kuzey enlemi ile 38.36315° doğu boylamı arasında konumlanmıştır. Bu konum, özellikle deprem tehlike haritalarında yerel sismik parametrelerin belirlenmesinde kullanılmıştır. Şekil 12-16 aralığında Malatya Vakıflar Bölge Müdürlüğü tarafından AutoCAD programında hazırlanmış rölevedeki Melik Sunullah Camii, Minaresi Plan Kesit ve Görünüşü, ön, arka, sağ ve sol görünüşleri verilmiştir (Malatya Vakıflar Bölge Müdürlüğü, 2017).



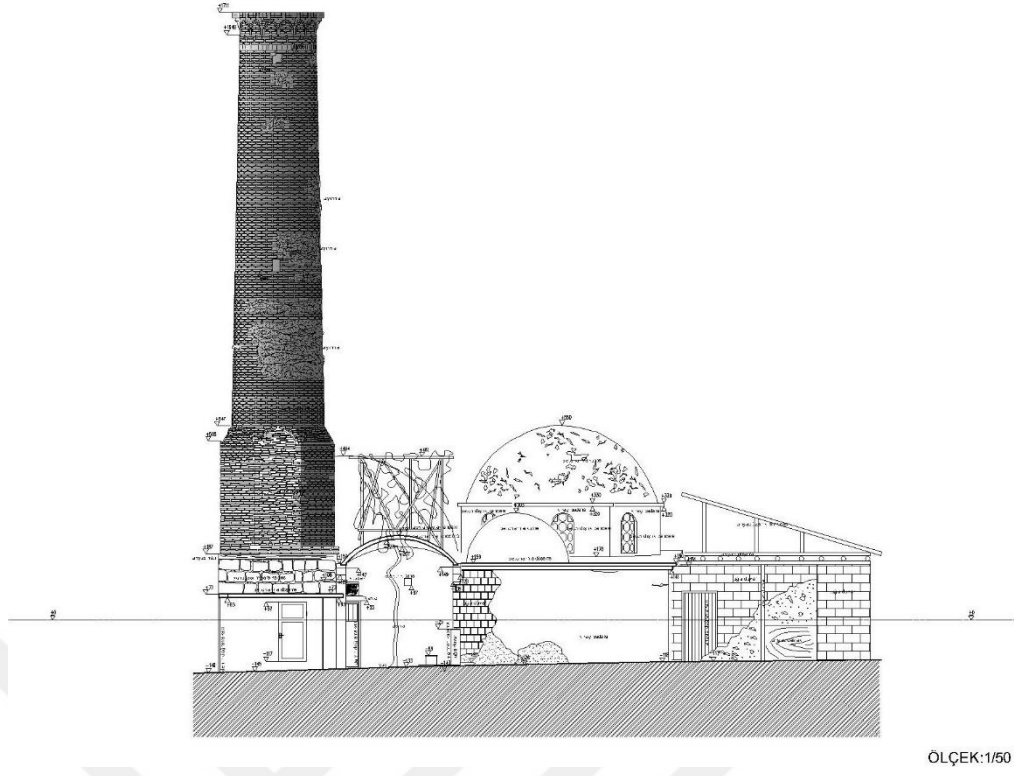
Şekil 12: AutoCAD Programında Hazırlanmış Rölevedeki Melik Sunullah Camii Minaresi Plan Kesit ve Görünüşü (Malatya Vakıflar Bölge Müdürlüğü, 2017)



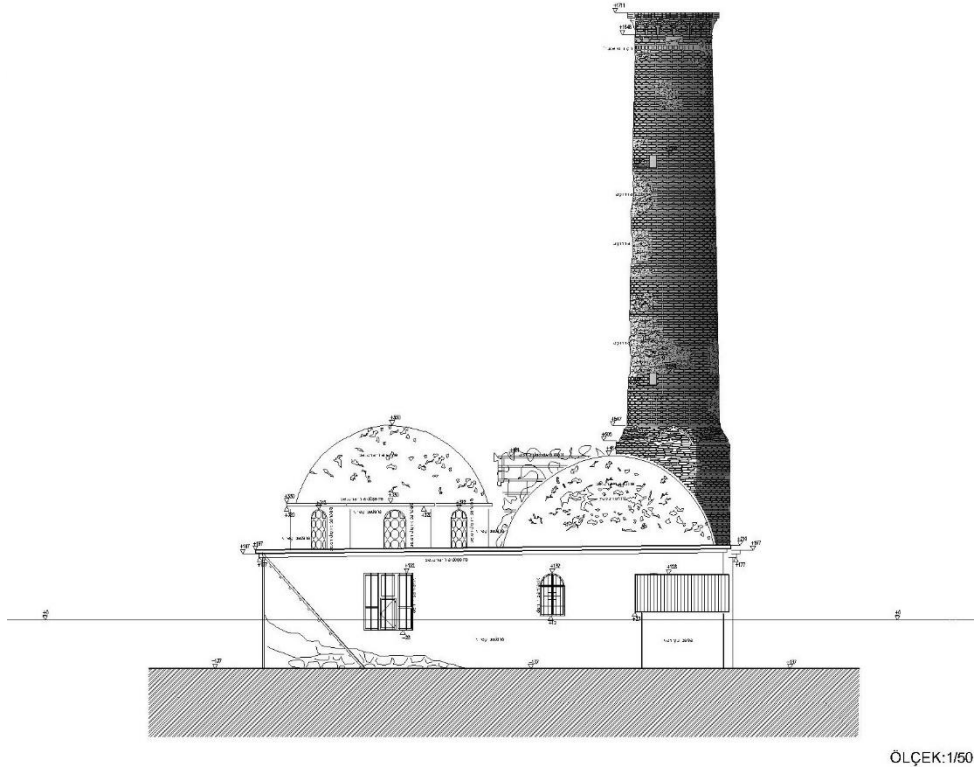
Şekil 13: Autocad Programında Hazırlanmış Rölevedeki Melik Sunullah Camii Minaresi Ön Görünüşü (Malatya Vakıflar Bölge Müdürlüğü, 2017)



Şekil 14: Autocad Programında Hazırlanmış Rölevedeki Melik Sunullah Camii Minaresi Arka Görünüşü (Malatya Vakıflar Bölge Müdürlüğü, 2017)



Şekil 15: Autocad Programında Hazırlanmış Rölevedeki Melik Sunullah Camii Minaresi Sağ Yan Görünüşü (Malatya Vakıflar Bölge Müdürlüğü, 2017)



Şekil 16: Autocad Programında Hazırlanmış Rölevedeki Melik Sunullah Camii Minaresi Sol Yan Görünüşü (Malatya Vakıflar Bölge Müdürlüğü, 2017)

Yapının mimari özellikleri, yığma taş yapı sistemine dayalı olup, özellikle kesme taş kullanımıyla oluşturulan taşıyıcı sistem, günümüzde de ayakta kalabilmiştir. Ancak hem doğal yaşlanma hem de geçmişteki yetersiz restorasyon uygulamaları, özgün yapının belirli bölümlerinde bozulmalara neden olmuştur (Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2006). Buna ek olarak, 3. Derece Arkeolojik Sit Alanı içerisinde yer alması nedeniyle yapı, sadece mimari değil aynı zamanda arkeolojik açıdan da önem taşımaktadır.

Minareye yönelik incelemeler kapsamında yapılan gözlemler, taşıyıcı gövdede yer yer çatlaklar, taş kayıpları ve malzeme bozulmaları bulunduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, özellikle deprem gibi dinamik etkiler altında yapının güvenliğini tehdit etmektedir (Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2007).

2.5.2. Malzeme Özellikleri ve Yapı Teknikleri

Yapının inşasında kullanılan malzeme özellikleri, Anadolu'daki benzer tarihi yapılarda görülen geleneksel taş-harç yığma sistemine dayanmaktadır. Sonlu eleman modellemesinde kritik öneme sahip elastisite modülü, Poisson oranı ve yoğunluk gibi parametreler doğrudan ölçülememiş; bu nedenle eşdeğer yığma yapılarda raporlanan deneysel veriler referans alınmıştır (Metin, 2020; Yurdakul vd., 2021).

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nin (TBDY 2018) zemin sınıflandırmasına göre yapı, ZC grubuna dâhil orta-sıkı kum-kil birimlerinin egemen olduğu bir tabaka üzerinde konumlanmaktadır. ZC zeminin birim kesme dalga hızının (vs,30) 250 – 400 m/s aralığında olması, oturma ve sıvılaşma riskini ZD/ZE sınıflarına göre azaltmakla birlikte; yine de minare gibi uzun ve narin elemanlarda periyot büyümesine ve tepe deplasmanlarının artmasına yol açmaktadır (Livaoğlu & Doğançın, 2007b).

Tarihi yapılarda yürütülen pek çok araştırma, özellikle kubbe, kemer ve gövde birleşimlerinde çekme gerilmelerinin yoğunlaştığını; bu nedenle restorasyon çalışmalarında kritik kesitlerin öncelikli olarak bu bölgelere odaklanması gerektiğini vurgulamıştır (Yılmaz, 2006; Bağbancı, 2009; Mumyakmaz, 2015).

2.5.3. Mevcut Durum ve Gözlemler

Melik Sunullah Camii minaresinin mevcut durumuna ilişkin birçok teknik kurul kararı bulunmaktadır. 15.09.2017 tarihli 3869 sayılı kararda, yapının bazı bölümlerinde taşıyıcılık niteliğini kaybetmiş malzemeler tespit edilmiş, restorasyonun bu alanlarda güçlendirme ile birlikte gerçekleştirilmesi gerektiği belirtilmiştir (Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2017a). Ayrıca, özgün olmayan müdahalelerin kaldırılması ve statik güçlendirme projelerinin hazırlanması yönünde tavsiyeler sunulmuştur.

Zeminle ilgili yapılan değerlendirmelerde ise yer altı su seviyesinin yapının temel kotuna yakın olduğu, zeminin killi-kumlu ve gevşek yapısının taşıma gücünü sınırladığı ve yapı temelinde oturmaya sebep olabileceği saptanmıştır (Zemin Bilgileri, 2025). Sesli (2013) ve Hökelekli (2020), bu tür zemin koşullarında rijit mesnet kabulünün yapı davranışını doğru yansıtmayacağını ve esnek temel modelleriyle analiz yapılması gerektiğini vurgulamıştır.

Minarenin özellikle gövde-küp geçişı, şerefe altı ve petek üstü gibi ani rijitlik değişimi gösteren Yapının mimari ve zemin özellikleri birlikte değerlendirildiğinde bölgelerinde sismik tehlike potansiyeli yükselmektedir. Bu alanlarda hem çekme hem de eğilme gerilmeleri yoğunlaşmakta, deprem anında lokal hasarların göçmeye dönüşme riski artmaktadır (Çaktı vd., 2013; Serhatoğlu, 2015; Soyluk & Demircan, 2023).

2.6. KARMAŞIK YAPILARIN MODELLENMESİ (YIĞMA YAPILARIN MODELLENMESİ)

Yığma yapılar; taş, tuğla ve harç katmanlarının heterojen birleşiminden oluşan, malzeme süreksizlikleri ve geometri düzensizlikleri nedeniyle “karmaşık sistemler” başlığı altında incelenir. Sonlu eleman yaklaşımı bu yapılarda yaygın olarak kullanılsa da analizin güvenilir olabilmesi için kabuk davranışı, eklemlerdeki blok-arası sürtünme ve malzeme çatlama süreçlerinin birlikte tanımlanması gerekir (Lourenco, 1996). Güncel araştırmalar, modelleme stratejilerini üç temel düzeyde toplar:

Makro-model yöntemi, yığma duvarı eşdeğer sürekli bir ortama indirger; ortalama elastisite modülü, kesme modülü ve masif yoğunluk kullanılarak hem malzeme kolayca tanımlanır hem de karmaşık anıt geometrileri ekonomik ağlarla çözümlenebilir (Yurdakul vd., 2021). Bununla birlikte makro yaklaşım, fugadaki çatlak oluşumlarının yerini ve ilerleme doğrultusunu doğru yakalamakta sınırlıdır.

Mikro-model şeması, taş/tuğla blokları ve harç yataklarını farklı elemanlar olarak tanımlar; bloklar rijit kabuk ya da hacim elemanı, harç ise elastik-plastik kontakt elemanı biçiminde temsil edilir. Bu sayede çatlak açılımı ve kayma yırtılmaları ayrıntılı olarak simüle edilir ancak model boyutunun büyümesi hesap zamanını artırır (Roca vd., 2010).

DİSCE (discrete element) ve limit analiz yaklaşımları ise blokların ayrı rijit cisimler olarak ele alındığı, blok ara yüzlerine bağlı dönme ve kayma yayları atandığı tekniklerdir; özellikle minareler gibi yüksek ve ince elemanlarda devrilme, blok geçmeli mekanizmaları yakalamada avantaj sağlar (Sarhosis, 2016).

Model kalibrasyonu kritik bir aşamadır. Çevresel titreşim ölçümleri, lazer tarama ile elde edilen geometri verisi ve Schmidt çekici-ultrasonik testler yardımıyla elastisite modülü,

yoğunluk ve sönüm katsayısı geri hesaplanır (Bayraktar vd., 2011). Dinamik uyum, ilk üç doğal frekansın $\pm\%10$ içinde sağlandığında kabul edilebilir olarak değerlendirilir (Serhatoğlu, 2015). Doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizlerinde, Coulomb kayma kriteri ve çatlak açılımına dayalı hasar modelleri tercih edilir; bu sayede deprem sonrası çatlak yayılım paternleri öngörülebilir (Aşık, 2018).

Sonlu eleman türü seçiminde, kubbe ve tonoz gibi kabuk elemanlar için dört düğümlü kabuk elemanlar; kalın duvarlı kaideler için sekiz düğümlü hacim elemanları önerilir. Harç yataklarının kalınlığı modele doğrudan yansıtılmıyorsa “basınç yumuşayan plastikleşme” bağıntısıyla etkisi benzeştir (Ekşi Akbulut, 2006). Aşırı hesap maliyetini düşürmek amacıyla karma (çoğul ölçekli) modeller geliştirilmekte; kritik bölgelerde mikro, geri kalan kütlede makro yaklaşım birlikte kullanılmaktadır (Yurdakul vd., 2021).

Yığma yapılarda deformasyon, çatlak ilerlemesi ve taşıma kapasitesini doğru tahmin edebilen, kalibre edilmiş karma modeller; güçlendirme senaryolarının güvenle test edilmesini, ayrıca malzeme eklemekten “en az müdahale” ilkesine uygun restorasyon tasarımlarını mümkün kılar.

2.6.1. Modelleme Teknikleri

Yığma yapıların karmaşık mekanik davranışı, malzeme heterojenliği ve blok-harç ara yüzlerindeki süreksizlikler nedeniyle klasik lineer elastik modellerle tam olarak açıklanamaz. Bu nedenle araştırmacılar, farklı ayrıntı düzeylerinde çalışan üç ana sayısal modelleme yaklaşımı geliştirmiştir: makro-model, mikro-model ve ayrık (discrete) blok modeller.

Makro-modelleme, tüm yığma kesiti “eşdeğer sürekli ortam” varsayımıyla temsil eder. Elastisite modülü, kesme sertliği ve yorulma parametreleri; deneysel ortalama değerler kullanılarak tanımlanır. Böylece karmaşık anıt geometrilerinin (ör. kubbe, tonoz, minare) düşük eleman sayısı ile ekonomik olarak çözümlenmesi sağlanır (Lourenco, 1996). Bununla birlikte makro yaklaşım, derz çatlaklarının yerini ve ilerleyişini tahmin etme konusunda sınırlıdır; bu yetmezlik, özellikle şerefe altı veya kemer ayağı gibi gerilme yoğun bölgelerde kırılma paternini yakalamayı zorlaştırır (Bayraktar vd., 2011).

Mikro-modelleme, tuğla/taş blokları ve harç fugalarını ayrı elemanlar olarak tanımlayarak derz kayması, blok dönerliği ve çekme çatlaklarını doğrudan izler. Bloklar doğrusal elastik kabuk veya hacim elemanı, ince harç tabakası ise plastikleşebilen ara yüz elemanı olarak modellenir. Bu yöntem, çatlak açılımına dayalı hasar izleyici algoritmalarla birleştiğinde deprem sonrası çatlak ağının güvenilir biçimde simüle edebilir; ancak yüksek hesap

maliyeti ve kalibrasyon için yoğun deneysel veri gereksinimi önemli dezavantajlar oluşturur (Roca vd., 2010).

DİSCE (discrete element) veya blok temel limit analiz modelleri, yığma kesiti birbirine temas eden rijit cisimler topluluğu olarak ele alır. Bloklar arası sürtünme, normal bağıl sertlik ve dönme serbestlikleri yaylarla temsil edilir; devrilme mekanizmaları, dönme yetersizlikleri ve kısmi göçme senaryoları açık biçimde incelenebilir (Sarhosis, 2016). DEM yaklaşımı, minareler gibi yüksek ve ince yapı elemanlarında blok-taban etkileşiminden kaynaklı devrilme tehlikesini yakalamada öne çıkar; öte yandan, makro ölçekte deprem ivme kaydı ile senkronize çözümler için zaman adımı küçültme zorunluluğu doğurur (Yurdakul vd., 2021).

Son yıllarda bu üç yöntemin avantajlarını birleştiren çok ölçekli karma (hybrid) modeller öne çıkmaktadır. Kritik bölgelerde mikro veya ayırık blok türevi ağlar kurularak hasar lokalizasyonu izlenirken, gövdenin geri kalanına makro homojen parametreler atanır (Aşık, 2018). Kalibrasyon safhasında çevresel titreşim testleri, lazer tarama ile çıkarılan gerçek geometri ve Schmidt çekici-ultrason verileri birlikte kullanılır; ilk üç doğal frekansın $\pm 10\%$ içinde tutturulması yeterli uyum kriteri olarak kabul edilir (Serhatoğlu, 2015).

Giderek artan işlemci gücü ve açık kaynak kodlu FE/DEM paketleri (ör. OPA-MAT, 3DEC, GiD-based CRM) sayesinde, makro-mikro geçişli modellerin rutin restorasyon projelerinde uygulanabilirliği artmıştır. Böylece “en az müdahale” ilkesini ihlâl etmeden, taşıma kapasitesini yükseltecek karbon lifli polimer kuşaklama, çelik gergi ekleme ya da zemin iyileştirme senaryoları önceden test edilerek güvenli karar süreçleri desteklenmektedir.

2.6.1.1. Detaylı mikro modelleme

Detaylı mikro modelleme (explicit micro-model) tekniği, yığma birimi (tuğla veya taş) ile harç yatağını ayrı sonlu eleman (ayırık blok) öğeleri olarak tanımlar; bu sayede blok-harç ara yüzündeki bağıl kayma, dönme ve çekme çatlakları doğrudan izlenebilir (Lourenco, 1996). Yöntem, üç temel bileşene sahiptir: rijit ya da elastik blok eleman, plastikleşebilen harç elemanı ve bloklar arası ince ara yüz (joint) elemanı. Bloklar genellikle doğrusal elastik tanımlanırken, harç için kapasitif Drucker-Prager ya da Mohr-Coulomb akma bağıntıları tercih edilir; ara yüz elemanında ise yumuşayan Coulomb sürtünme modeli veya çift eksenli kohezif zon (CZ) yaklaşımı uygulanır (Roca vd., 2016).

Mikro model gerekli parametre setini üç adımda belirler:

- **Malzeme karakterizasyonu:** Basınç, çekme ve kayma testlerinden elde edilen elastisite modülü E, kayma modülü G ve kohezyon c değerleri numune düzeyinde ölçülür (Van der Pluijm, 1999).

- **Ara yüz kalibrasyonu:** Blok-harç etkileşiminin gerçekçi temsil edilmesi için düzlem kesme deneyleriyle sürtünme açısı ϕ ve kohezyon c_j geri hesaplanır (D’Altri vd., 2019).
- **Model doğrulama:** Çevresel titreşim veya itme testlerinden elde edilen doğal frekans ve yanal yük-deplasman eğrileriyle sayısal model çıktıları karşılaştırılır (Lourenco, 1996).

Çatlak izleme, artımsal-iteratif çözümde gerilme-gerinim eşiği aşıldığında ara yüz elemanının açılma (mode I) ve kayma (mode II) rijitliklerini düşürerek hasarı yerelleştirir. Böylece çatlak yayılımı, temas kaybı ve blok dönerliği gerçek zamanlı izlenebilir; göçme mekaniği güvenle yakalanır (Sarhosis, 2016). Özellikle kubbe-pendantif geçişlerinde veya minare şerefe altı kuşağında gözlenen halka çatlaklarının numerik izlenmesinde mikro model, makro eşdeğer kabuk modellerine göre %20-30 daha düşük frekans sapmasıyla sonuç vermiştir (Yurdakul vd., 2021).

Bununla birlikte, blok adedi arttıkça giderek büyük hesap maliyetleri ortaya çıkar. Bu nedenle çözümü hızlandırmak için paralel iş parçacıklı çözücüler, adaptif ağ inceltme (mesh refinement) ve çok ölçekli bağlaç teknikleri kullanılmaktadır (D’Altri vd., 2019). Güncel uygulamalarda, kritik bölgelerde mikro; geri kalan kütlede makro eleman atanarak karma (embedded) ağlar kurulmakta, böylece işlem süresi önemli oranda düşürülmektedir (Pelà vd., 2013). Mikro modele dayalı senaryolar, karbon lifli polimer kuşaklama veya çelik gergi ekleme gibi güçlendirme stratejilerinin blok-harç ara yüzünde yarattığı gerilme azaltımını kantitatif olarak ölçme imkânı verir; bu da en az müdahale ilkesini somut verilerle destekler (Aşık, 2018).

2.6.1.2. Basitleştirilmiş mikro modelleme

Basitleştirilmiş mikro modelleme (simplified micro-model) yöntemi, ayrıntılı mikro modelin yüksek hesap maliyetini düşürmek amacıyla geliştirilmiştir. Yaklaşımında, tuğla/taş bloklar hâlen ayrı sonlu elemanlar olarak tanımlanırken, harç yatakları doğrudan eleman içine “yayılmış (smeared) harç” özellikleriyle gömülür; bloklar arasındaki yapışma-sürtünme davranışı ince ara yüz elemanlarıyla temsil edilir (Lourenco, 1996). Böylece gerçek derz kalınlığını sıfıra yakın kabul eden tek katmanlı ağ ile blok dönerliği, ara yüz kayması ve sınırlı çatlak açılımı makul doğrulukta yakalanır.

Yöntemin en önemli avantajı, model düğüm sayısının ayrıntılı mikro modele göre %60–70 azalması ve doğrusal olmayan çözüm adımlarının daha kararlı ilerlemesidir (Roca vd., 2016). D’Altri ve diğerleri (2019), konut ölçeğindeki bir yığma duvarda ayrıntılı mikro modelin 18 saat süren dinamik analizini basitleştirilmiş mikro modelle 5 saatte tamamlamış; ilk çatlak lokasyonu ve periyot sapmasının $\pm\%12$ içinde kaldığını rapor etmiştir.

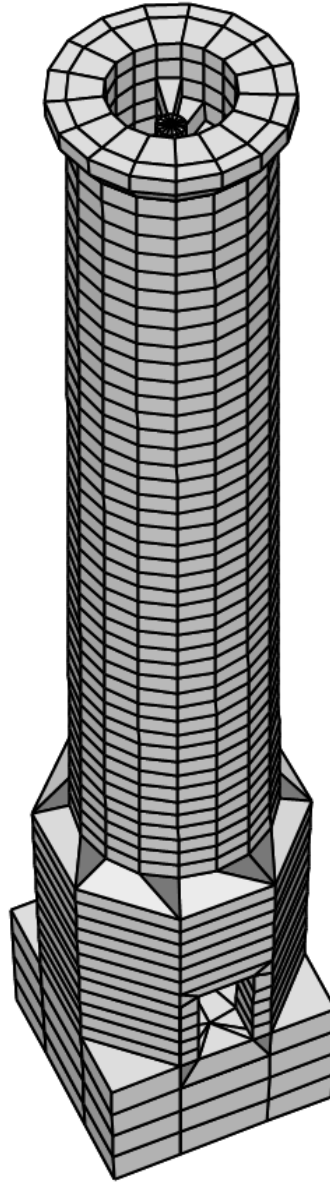
Model kalibrasyonunda, blok elastisite modülü E_b ve ara yüz sürtünme açısı ϕ_j doğrudan deneysel verilerden alınırken; “yayılmış harç” parametreleri (eşdeğer basınç dayanımı ve gerilme yumuşama eğrisi) blok-harç hacim oranına (V_m/V_b) bağlı ampirik katsayılarla hesaplanır (Van der Pluijm, 1999). Bu sayede harç kalınlığına duyarlı gerilme yığılmaları makro düzeyde tutulur fakat ek harç elemanı eklemeye gerek kalmaz (Yurdakul vd., 2021).

Basitleştirilmiş mikro model, minare gövdesi, kubbe kasnağı veya kalın perde duvar gibi “blok dizilimi düzenli” kısımlarda güvenle kullanılabilir; çünkü çatlakların büyük bölümü yatay derz düzleminde veya eğilme eksenine paralel gelişir (Serhatoğlu, 2015). Ancak blok boyutlarının rastgele değiştiği moloz duvarlarda veya yüksek kesme kaymasının hâkim olduğu kemer ayaklarında, harç derzlerinin iki boyutlu plastisite etkisi ihmal edildiği için çatlak ağ tahmininde sapma görülebilir (Roca vd., 2010). Bu durumda kritik bölge, ayrıntılı mikro veya ayrık blok alt-ağı ile zenginleştirilerek karma ağ yaklaşımı önerilmektedir.

Güncel açık kaynak FE paketleri (ör. OOFEM, HistrA) basitleştirilmiş mikro eleman kütüphaneleri ve adaptif ağ rafinman seçenekleri sunarak; büyük ölçekli tarihi anıtların deprem, rüzgâr ve yeraltı titreşim analizlerinde mühendislik pratiğine uygun sürelerde sonuç alınmasını sağlamaktadır. Böylece restorasyon projelerinde tersine çevrilebilir CFRP kuşaklama, çelik gerdirme veya enjeksiyonlu taş dikişi müdahaleleri, çatlak açıklığı ve dönme kapasitesi üzerindeki etkileriyle birlikte hızlıca senaryolaştırılabilmektedir (Aşık, 2018).

2.6.1.3. Makro modelleme

Makro modelleme, yığma birimin (taş veya tuğla) ve harç yataklarının ayrıntılı ayrımına girmeden, duvar kesitini “mekanik olarak eşdeğer sürekli ortam” şeklinde tanımlayan en yaygın mühendislik yaklaşımıdır. Yöntem, karmaşık geometrili tarihi anıtların (kubbe kasnakları, kemer zincirleri ve kalın kârgir duvarlar) sonlu eleman ağını makul eleman sayısı ile çözmeye olanak tanır; böylece doğrusal olmayan itme, zaman tanım alanı ve titreşim analizleri mühendislik pratiği süresinde tamamlanabilir (Lourenco, 1996). Şekil 17’de Melik Sunullah Camii Minaresi makro modellemesi verilmiştir.



Şekil 17: Melik Sunullah Camii Minaresi Makro Modellemesi

Makro modellerde esas nokta, eşdeğer malzeme parametrelerinin-elastisite modülü E_{eq} , kesme modülü G_{eq} , basınç dayanımı f_c , e_q ve kayma bağıntıları-özgün yığma bileşenlerini temsil edebilecek şekilde belirlenmesidir. Deneysel çalışmalar, tuğla/taş blokların elastik modülünü E_b , harç yataklarının modülünü E_m ve hacim oranlarını (V_m/V_b) kullanarak doğrusal kural-karışım formülasyonlarının yeterli yaklaşıklık verdiğini göstermiştir (D’Altri vd., 2019). Çatlama sonrasını modellemek için iki ana doğrusal olmayan model kullanılmaktadır:

- **Smeared crack (dağılmış çatlak) modeli:** Çekme bölgesinde gerilme yumuşaması tanımlanır; böylece çatlak yoğunluğu makro ölçekte gerilme düşümü olarak temsil edilir. Model, betonarme kabuklarda kullanılan Hillerborg türü dayanım-süneklik eğrisine benzer biçimde uyarlanmıştır (Roca vd., 2016).

- **Hasar-plastik (damage-plasticity) modeli:** Basınçta plastik akma, çekmede kümülatif hasar bileşenleriyle eşlenir. Taş duvarlarda Mohr–Coulomb akma yüzeyi ve ikiz hasar değişkeni, çatlak dönmesi ile kaymayı aynı anda yakalayabilmektedir (Roca vd., 2010).

Kalibrasyon, titreşim testleriyle çıkarılan ilk doğal frekansların $\pm \%10$ içinde eşleştirilmesi ve itme eğrisindeki ilk çatlak “yumuşama çentiğinin” deneysel değerine yakınsaması gibi iki adımlı kıstasla yapılır (Serhatoğlu, 2015). Bayraktar ve diğerleri (2011), kalibre edilmiş makro modelde minare gövdesi için belirlenen $E_{eq}=4,2$ GPa ve $G_{eq}=1,6$ GPa parametrelerinin, çevresel titreşim yönteminden ölçülen mod şekillerini başarıyla yakaladığını göstermiştir. Makro yaklaşımın temel üstünlükleri;

- Karmaşık anıt geometrisini makul ağ yoğunluğunda temsil etmesi
- Parametrik deprem senaryolarının hızla incelenmesini mümkün kılması
- Güçlendirme tasarımlarını (CFRP kuşak, çelik gergi, enjeksiyon) “ön-tasarım” safhasında elemesine olanak tanınmasıdır (Aşık, 2018).

Bununla birlikte, harç derzlerindeki lokal kayma çatlaklarını açıkça tarif edemediğinden, göçme mekaniğini ayrıntılı mikro modele göre daha kaba tahmin eder (Yurdakul vd., 2021). Bu eksikliği kapatmak için son yıllarda çok ölçekli makro–mikro bağlanmış modeller geliştirilmiş; kritik zonlarda mikro, geri kalan kütlede makro parametrelerin kullanılmasıyla hem hesap süresi düşürülmüş hem de lokal hasar kestirimindeki belirsizlik azaltılmıştır (D’Altri vd., 2019).

2.6.1.4. SAP2000 programı ile modelleme

SAP2000, genel amaçlı sonlu eleman (SE) paketlerinin tüm standart kütüphanesini (çubuk, kabuk, hacim, bağlantı ve kablo elemanları) tek kullanıcı arayüzünde toplayan bir mühendislik yazılımıdır. Tarihi yığma yapılarda, özellikle karma geometriye sahip kubbe–kemer sistemleri ve ince–uzun minare gövdeleri için yaygın biçimde tercih edilmesinin dört temel nedeni vardır: gelişmiş kabuk kabiliyetiyle yüzey elemanlarının çokgen veya serbest formda tanımlanabilmesi, kabuk-katı karma modelleri tek ağ üzerinde birleştirme olanağı, doğrusal-olmayan statik (pushover) ve zaman tanım alanı (time-history) çözümlerini yerleşik algoritmalarla sunması ve arayüzünde API/Excel bağlantılarıyla hızlı parametre değişikliği sağlayan açık veri formatı (Computers and Structures Inc. [CSI], 2024).

Güçlendirme senaryoları

SAP2000’in “Section Designer” modülü, CFRP kuşak veya paslanmaz çelik gergi eklenmiş kabuk kesitlerini tanımlamaya imkan verir. Güçlendirme elemanı kabuk katmanına

orthotropic membrane olarak eklenir; bu sayede yatay çekme rijitliğindeki artış grafiksel olarak izlenir (Aşık, 2018). Zemin iyileştirme için jet-grout çevre perdesi, temelin etrafına ek “area spring” kuşak atarak modellenenabilir (Selçuk, 2019).

Avantajlar ve sınırlılıklar

Avantaj: Karmaşık geometri içe aktarımı, çok ölçekli kabuk-katı kombinasyonu ve yerleşik deprem yönetmeliği fonksiyonları, projelendirme süresini kısaltır.

Sınırlılık: Harç derzlerindeki lokal kayma çatlakları tek katmanlı kabukta doğrudan temsil edilemez; kritik bölgelerde kabuk kalınlığının “cracking modifiers” ile düşürülmesi veya çok katmanlı kabuk kullanılması önerilir (Roca vd., 2010).

Ayrıca, aşırı ince kabuk eleman boyutlarının seçilmesi durumunda sayısal kilitlenme ve dönme çökmesi hataları oluşabileceği için mesh convergence kontrolü yapılmalıdır (D’Altri vd., 2019).

Sonuç olarak, SAP2000, makro tabanlı yığma modellemeyi basitleştirirken doğrusal-olmayan deprem senaryolarının hızlı biçimde test edilmesini sağlar; kritik kesitlerde çatlak yoğunluğu ve deplasman hedefleri karşılaştırılarak minimum müdahale ilkesi doğrultusunda koruma tasarımını destekler.

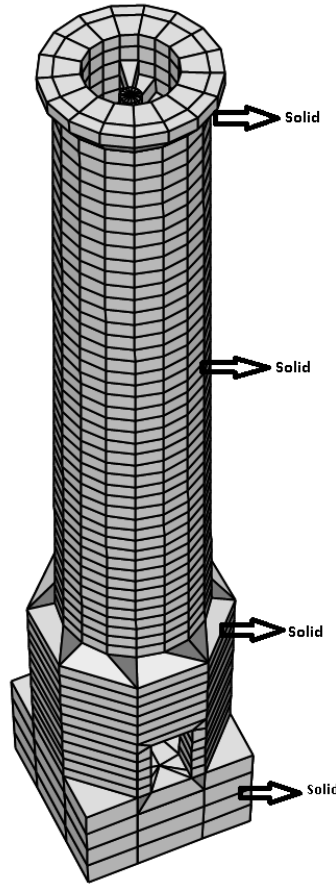
2.6.1.5. Sap2000 programında kullanılan kavramlar

SAP2000, nesne tabanlı (object-oriented) arayüzü sayesinde karmaşık tarihi yapıları sezgisel olarak tanımlamaya olanak tanır. Uygulamada yaygın terimler ve işlevleri aşağıda özetlenmiştir:

- **Joint (Düğüm):** Modelin geometri ve serbestlik derecelerini belirleyen sıfır boyutlu noktalardır. Her düğüm ux , uy , uz , θ_x , θ_y , θ_z olmak üzere altı serbestlik derecesini (SD) taşır; kabuk elemanlarının köşe noktaları ve minare tepe ivmeölçer konumları bu kavramla temsil edilir (Computers and Structures Inc. [CSI], 2024).
- **Frame / Shell Object:** Lineer elemanlar (Frame) çubuk veya kiriş-kolon davranışı için kullanılırken, iki boyutlu kabuk elemanlar (Shell) hem çekme-eğilme hem de zarlı (membran) gerilmeleri birlikte taşır (Bayraktar vd., 2011).
- **Material Property:** Eşdeğer elastisite modülü E_{eq} , kesme modülü G_{eq} , Poisson oranı ν ve birim hacim ağırlığı γ malzeme penceresinde tanımlanır. Yığma için çekme yumuşaması “Tension Cut-off” eğrisiyle, basınç plastikleşmesi “Multilinear Isotropic” metoduyla betimlenebilir (Roca vd., 2016).

- **Section Designer:** Kabuk veya çerçeve elemanlarına harici kuşak (CFRP), çelik gergi ya da çok katmanlı sıva eklemek için kullanılan alt modüldür. Katman yönelimleri ve ortotropik rijitlik matrisleri burada tanımlanır; böylece güçlendirme öncesi–sonrası rijitlik artışı doğrudan karşılaştırılır (Selçuk, 2019).
- **Constraint:** Düğümler arası kinematik ilişkiyi tanımlar. Minarede temelin rijit davranışı “Rigid Body” bağı ile, gövde-kaide geçişindeki monolitik koşul ise “Equal DOF” kısıtlaması ile kurulmuştur (Yurdakul vd., 2021).
- **Link / Spring:** Zemin–yapı etkileşimini modellemek için Area Spring (Winkler yastığı) veya tek eksenli Link yaylar atanır. Yay katsayıları TBDY 2018’in ZC zemini için 30 MN/m³ olarak alınmıştır (Livaoğlu & Doğançın, 2007b).
- **Load Pattern ve Load Case:** Sürekli (Dead), hareketli (Live), kar, rüzgâr ve deprem etkileri ayrı “Load Pattern” olarak girilir; çözüm tipini belirleyen “Load Case” ise doğrusal statik, doğrusal dinamik (Response Spectrum) veya doğrusal olmayan zaman tanım alanı (Nonlinear Time History) biçiminde seçilir (CSI, 2024).
- **Mass Source:** Modal ve dinamik analizde kullanılacak kütle kombinasyonudur. Tarihi yapılarda döşeme diyaframı bulunmadığından, kütle otomatik olarak kabuk eleman kalınlığıyla ilişkilendirilir (Serhatoğlu, 2015).
- **P-Δ ve Geometrik Rijitlik:** Uzun minare gövdelerinde ikinci mertebe etkiler kritiktir. SAP2000’de “P-Delta Iterative” seçeneği etkinleştirilerek deprem altındaki eksenel kuvvetler çerçevesinde ek yanal deplasmanlar hesaba katılır (Aşık, 2018).
- **Plastic Hinge / Shell Layer Plasticity:** Çerçeve modellerinde FEMA 356 plastik mafsalları eğrileri, kabuk modellerinde ise “Shell Layer Plasticity” ile malzeme hasarı tanımlanır.
- **Modal Combination (CQC / SRSS):** Birden fazla modun süperpozisyonu CQC (Complete Quadratic Combination) veya SRSS (Square Root of Sum of Squares) yöntemleriyle yapılır. Yığma minare gibi yakın frekanslı modlar için CQC önerilmektedir (Bayraktar vd., 2011).

Bu kavramlar, SAP2000 ortamında tarihi minarenin geometrik doğruluğunu, malzeme davranışını ve dinamik tepkisini birlikte tanımlayarak; güçlendirme önerilerinin (CFRP kuşaklama, çelik gergi, zemin yay iyileştirmesi) etkinliğini sayısal olarak değerlendirmeye olanak sağlamıştır. Şekil 18’de Melik Sunullah Cami Minaresi için solid eleman kullanılan kısımlar gösterilmiştir.



Şekil 18: Melik Sunullah Cami Minaresi Solid Kullanılan Kısımlar

2.6.1.6. Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), sürekli bir ortamda tanımlanan elastik-plastik denge denklemlerini sonlu sayıda düğüm ve eleman kullanarak çözen, tarihi yığma anıtların deprem performans analizinde standart hâline gelmiş sayısal tekniktir. Yöntemin temeli, sanal iş ilkesi ile elde edilen zayıf formun eleman-bazlı şekil fonksiyonları aracılığıyla sayısal tümceleştirilmesine dayanır; sonuçta yapı matris biçiminde $Ku=f$ denklem takımına indirgenir (Lourenco, 1996).

Ağ (mesh) oluşturma

Yığma duvarların kalınlığı ve karmaşık geçiş -elemanları (kubbe, kemer, pandantif) göz önüne alınarak üç temel eleman türü kullanılır:

- **Çubuk / Frame:** Minarelerde içteki takviye çelikleri veya dış gergi halkalarının bir eksenli davranışını temsil eder.
- **Kabuk / Shell:** İnce cidarlı kubbe, kemer ve minare gövdesi gibi yüzey elemanlarında çekme-eğilme ile zarlı gerilmeleri eşzamanlı taşır.

- **Hacim / Solid:** Kalın kaide blokları veya karma temel yastıklarında eksenel--kesme etkileşimini yakalar (Roca vd., 2010).

Ağ yoğunluğu, modal frekans sapması ve yer değiştirme yakınsaması kontrolü ile belirlenir; Bayraktar ve diğerleri (2011), eleman boyunun gövde çapının 1/8'i olduğunda ilk modun %3 altındaki sapmanın yeterli olduğunu rapor etmiştir.

Malzeme modellemesi

Tarihi yığma için iki yaygın sürekli malzeme bağıntısı kullanılır:

- **Dağılmış Çatlak (Smeared-Crack):** Çekmede gerilme yumuşaması, basınçta plastik akma içeren gerilme--gerinim eğrisi; basınç-çekme çift yönlü davranış simetriğini korur.
- **Hasar-Plastisite:** Mohr-Coulomb akma yüzeyi + izotropik hasar değişkenleri; çatlağın birikimli yön bağımlı yumuşamasını tanımlar (Roca vd., 2016).

Malzeme parametreleri (E_{eq} , G_{eq} , f_c , f_t , c , ϕ) laboratuvar numuneleri ve sahada Schmidt çekici--ultrason verileriyle geri hesaplanır; sonrasında çevresel titreşim ölçüsüyle kalibre edilir (Serhatoğlu, 2015).

Doğrusal olmayan çözüm

Malzeme doğrusalsızlığı Newton–Raphson artımsal formülasyonu ile çözülür, artımsal rijitlik matrisi KT her adım güncellenir.

Geometrik doğrusalsızlık ($P-\Delta$) minare-gövde gibi ince yüksek elemanlarda “Updated Lagrangian” şemasıyla hesaba katılır.

Zaman tanım alanı için ortalama doğruluk/sönüm dengesini koruyan Hilber–Hughes–Taylor (α -HHT) entegrasyonu önerilir (Yurdakul vd., 2021).

Sınır koşulları ve SSI

Rijit mesnet varsayımının ağır yığma yapılarda güvenilir olmadığı bilinmektedir. Zemin–yapı etkileşimi, temele doğrusal yay elemanları (Winkler modeli) eklenerek veya yarı sonsuz yarı-uzay elemanı (BOUNDARY 3D) ile modellenir; Hökelekli (2020) temele eklenen yatay yayların doğal periyodu %15 uzattığını göstermiştir.

Model doğrulama ve hassasiyet

Model doğruluğu, İlk üç doğal frekansın saha ölçümüne $\pm\%10$ yakınlığı, İtme eğrisinde ilk çatlak ötelenmesinin deneysel değerle uyumu, Göçme mekanizmasının tarihi hasar izleriyle eşleşmesi kriterleriyle test edilir (D’Altri vd., 2019). Parametre duyarlılık analizi E , f_t ve ϕ

değişkenlerinin itme kapasitesi üzerindeki etkisinin %20'ye kadar çıkabildiğini ortaya koymuştur.

Uygulama kısıtları ve iyileştirme eğilimleri

Süreksiz derz çatlakları tek katmanlı kabukta tam temsil edilemediği için kritik zonlarda yerel mikro-alt ağ eklenmesi önerilir (Roca vd., 2010). Artan işlemci gücüyle çok ölçekli (macro-micro embedded) modeller ve GPU tabanlı çözücüler, büyük hacimli anıtların saatler mertebesinde çözülmesini mümkün kılmaktadır (D'Altri vd., 2019).

2.6.1.7. Yığma yapıların analizi

Yığma yapılar, blok (taş ya da tuğla) + harç bileşiminden doğan heterojen ve süreksiz karakterleri nedeniyle betonarme veya çelik taşıyıcılara kıyasla farklı bir analiz yaklaşımı gerektirir. Değerlendirme süreci, tanılama–modelleme–doğrulama–güçlendirme döngüsü olarak dört aşamada ele alınır.

Tanılama (diagnostic)

İlk adımda yapı, tarihi belgeler, malzeme karakterizasyonu ve in-situ test sonuçlarıyla bütüncül biçimde belgelenir. Taş/tuğla basınç–çekme deneyi, harç prizması kayma deneyi ve Schmidt çekici ölçümleri ile eşdeğer elastik parametreler belirlenir (Van der Pluijm, 1999). Çevresel titreşim testi, doğal frekansların ölçülerek yapı rijitliğinin ön kalibrasyonuna hizmet eder (Bayraktar vd., 2011).

Modelleme yaklaşımı

Analiz karmaşıklığı, yapı ölçeği ve hedef çıktıya göre seçilir:

- **Makro modeller:** Yığma kesiti eşdeğer sürekli ortam olarak tanımlanır; karmaşık anıt geometrileri hızlı şekilde çözümlenir (Roca vd., 2016).
- **Basitleştirilmiş mikro modeller:** Bloklar ayrı, harç “gömülü” kabul edilir; çatlak bandı yaklaşımıyla makul hesap süresinde çatlak lokalizasyonu yakalanır (D'Altri vd., 2019).
- **Detaylı mikro modeller:** Blok ve harç ayrıntılı temsil edilerek devrilme, bloğun yer değiştirme kilitlenmeleri izlenir (Sarhosis, 2016).

Çözüm düzeyleri

Yığma yapılarda analiz genellikle artan karmaşıklıkta üç düzeyde yürütülür:

- **Doğrusal statik ve modal:** İlk hasar sınırı öngörüsü, yönetmelik spektrumuna göre dayanım oranı.

- **Doğrusal olmayan itme (pushover):** Yatay kapasite eğrisi, plastik mafsallı dağılımı ve göçme mekanizması (Lourenco, 1996).
- **Doğrusal olmayan zaman tanım alanı:** Gerilme patikası, çatlak gelişimi ve artımsal çökme senaryosu; deprem kayıtları yakınsama ivme özelliklerine ölçeklenerek uygulanır (Roca vd., 2010).

Doğrulama ve Hassasiyet

Analitik sonuçlar, saha gözlemi ve geçmiş deprem hasar izleriyle karşılaştırılır; özellikle kubbe-pendantif birleşimleri, kemer ayakları ve minare şerefe altı bölgelerinde çatlak konumlarının tutarlılığı kontrol edilir (Serhatoğlu, 2015). Parametre duyarlılık analizi, eşdeğer elastisite modülü, çekme dayanımı ve sürtünme açısının itme kapasitesini %15–30 bandında etkileyebileceğini göstermiştir (Yurdakul vd., 2021).

Güçlendirme stratejilerinin değerlendirilmesi

SE modelleri, CFRP kuşaklama, çelik gergi halkası, harç enjeksiyonu veya temel iyileştirme gibi müdahalelerin deprem talebini ne ölçüde azalttığını kantitatif olarak test eder. “En az müdahale” ilkesi gereği, çatlak gerilme konsantrasyonunu belirgin biçimde düşüren ancak yapı dokusuna minimum ek kütle getiren çözümler öncelik kazanır (Aşık, 2018).

Yığma yapı analizi, kalibre edilmiş sayısal modeller aracılığıyla taşıyıcı kapasiteyi, göçme mekanizmalarını ve olası güçlendirme senaryolarının etkinliğini öngörerek, tarihi mirasın deprem güvenliğinin kanıta dayalı biçimde artırılmasına olanak tanır.

2.7. MELİK SUNULLAH CAMİİ MİNARESİ YAPISAL MODELLEMESİ

Melik Sunullah Camii Minaresi, SAP2000 sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak bilgisayar ortamında üç boyutlu olarak modellenmiştir. Modelleme yapılırken SAP2000 programının 16 ve 23 versiyonları kullanılmıştır. Modelleme aşaması yaklaşık olarak 5 hafta sürmüştür. Modelleme sürecinde Malatya Vakıflar Bölge Müdürlüğü tarafından hazırlanan rölöve projesi esas alınmış, yapının geometrik özellikleri bu projeye uygun şekilde modellenmiştir. Yapısal davranışın gerçeğe en yakın biçimde temsil edilebilmesi amacıyla, modelde özellikle kritik bölgeler daha küçük sonlu elemanlara ayrılarak yerel gerilmelerin ve deformasyonların daha hassas biçimde belirlenmesi hedeflenmiştir.

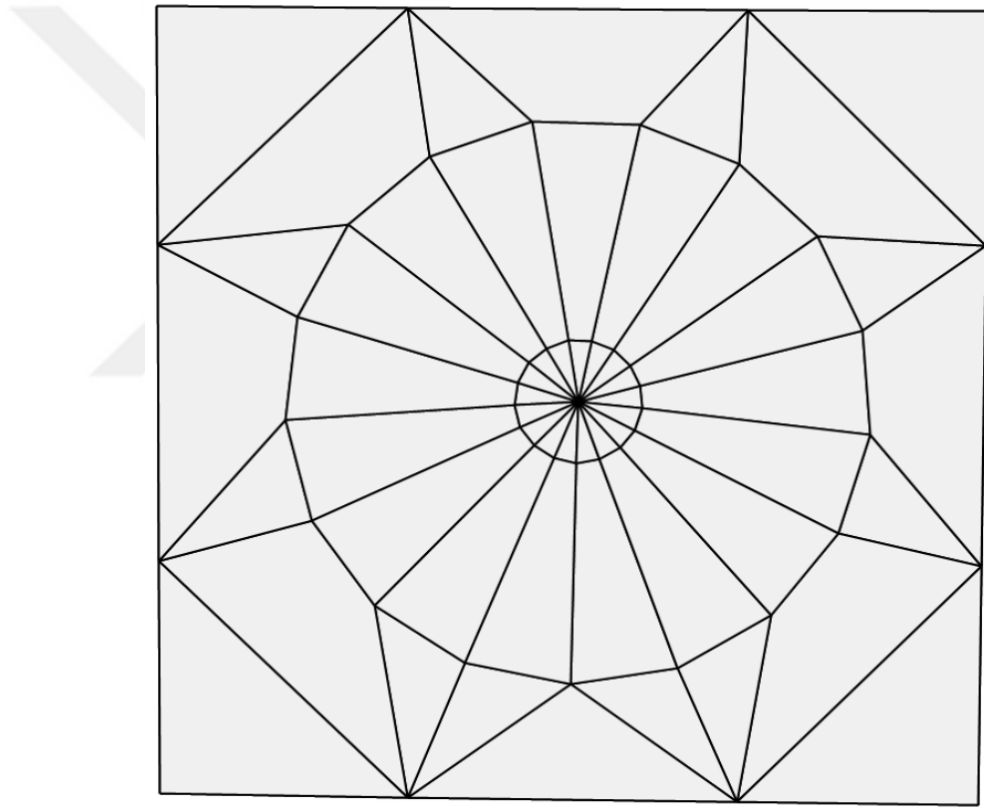
Modelleme sırasında minareyi oluşturan parçaların birleşim noktalarına özel önem verilmiş; bu bağlantılar dikkatli bir şekilde tanımlanarak yapının bütünsel davranışının sağlıklı bir şekilde analiz edilmesi sağlanmıştır. Yapının taban ve gövde bölümleri tamamen katı (solid)

elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Bu yaklaşım, özellikle tarihi yapılarda önemli olan yerel rijitlik değişimlerinin ve potansiyel zayıf bölgelerin analizinde yüksek doğruluk sağlar.

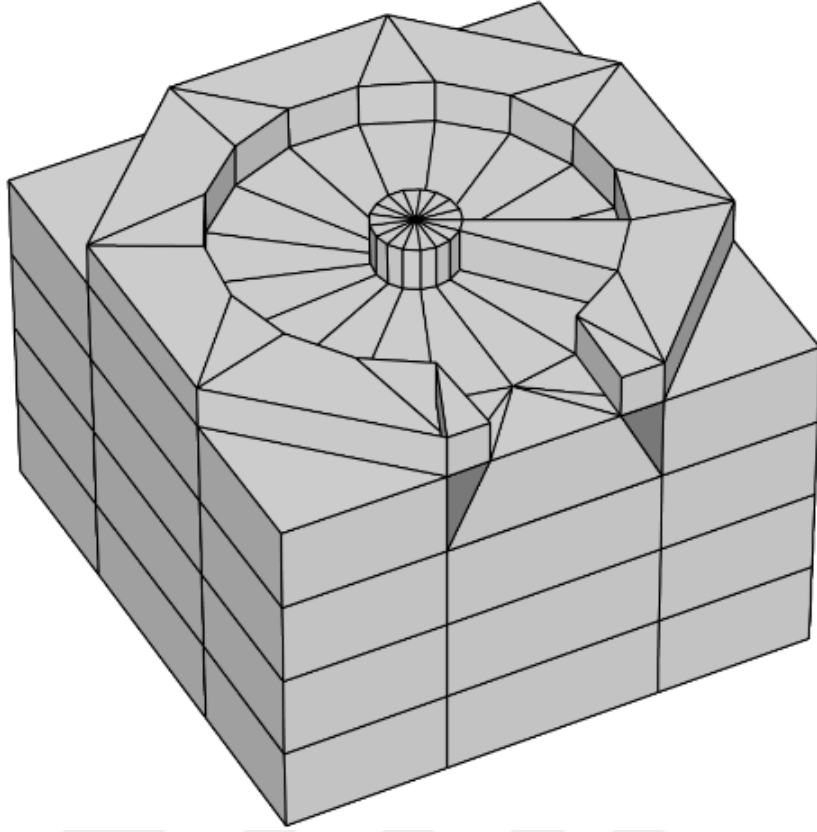
Modelde kullanılan eleman sayıları Tablo 6’da verilmiştir. Model X ekseninde 3,22 m, Y ekseninde 3,2 m, Z ekseninde 17,12 m bir alan içerisinde yer almaktadır. Yapıya ait modelleme aşamaları Şekil 19- Şekil 26’da gösterilmiştir.

Tablo 6: Modelde Kullanılan Eleman Sayısı

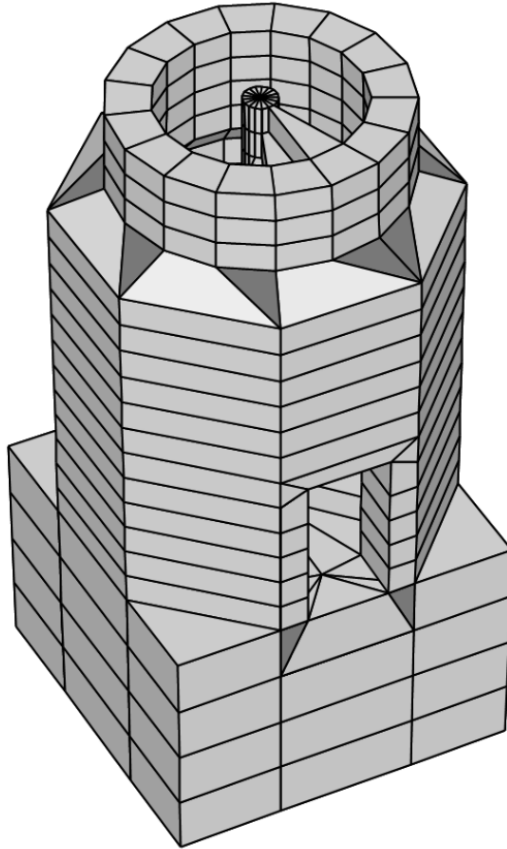
Modelde Kullanılan Elemanlar	Modelde Kullanılan Eleman Sayısı
Katı (Solid) Eleman Sayısı	2298
Düğüm Noktası Sayısı (Point)	3482



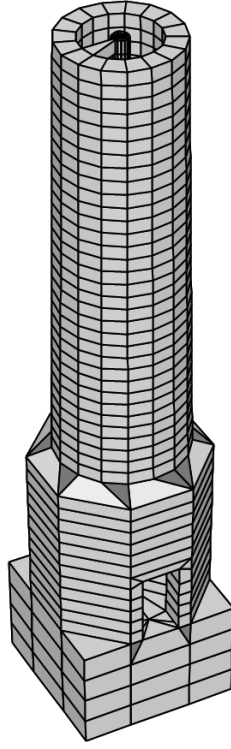
Şekil 19: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Sonlu Elemanlar Modeli Plan Görünüşü



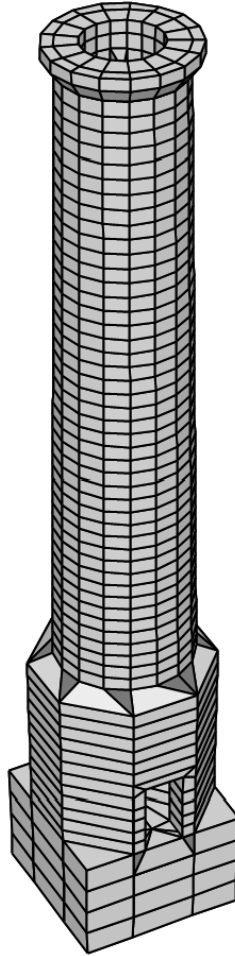
Şekil 20: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Modellemesine Ait Aşamaları



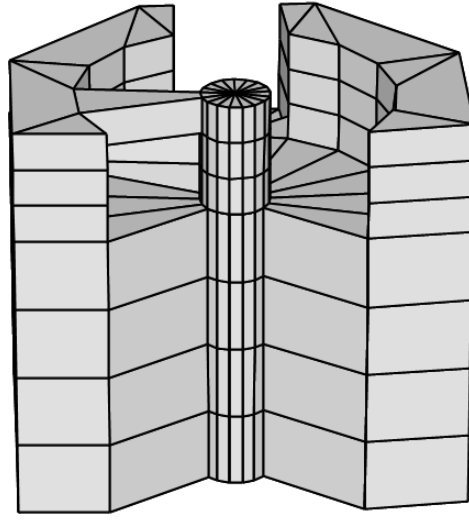
Şekil 21: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Modellemesine Ait Aşamaları



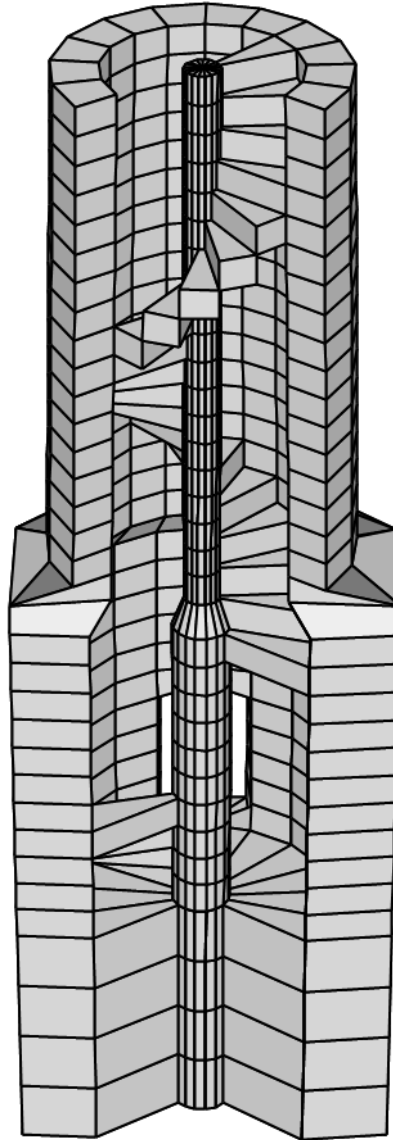
Şekil 22: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Modellemesine Ait Aşamaları



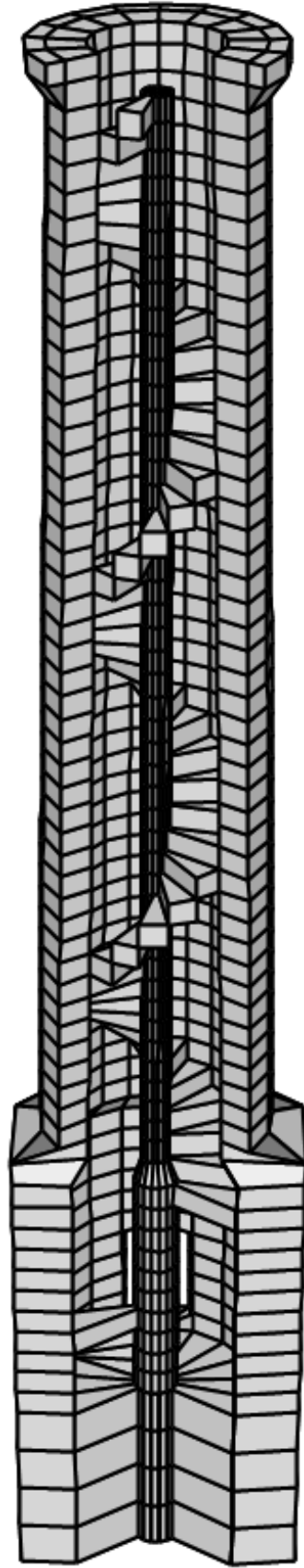
Şekil 23: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Modellemesine Ait Aşamaları



Şekil 24: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Modellemesine Ait Aşamaları



Şekil 25: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Modellemesine Ait Aşamaları



Şekil 26: Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Modellemesine Ait Aşamaları

2.8. MELİK SUNULLAH CAMİİ MİNARESİNİN MALZEME ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Tarihi yapıların malzeme özelliklerinin belirlenmesi çoğu zaman oldukça karmaşık bir süreçtir. Yapının uzun yıllar boyunca çeşitli çevresel koşullara maruz kalması, malzemenin doğal yapısında değişikliklere yol açabilmekte ve aynı kaynaktan temin edilen örnekler dahi farklı mekanik özellikler sergileyebilmektedir. Ayrıca, yapı elemanlarının güneş ve rüzgar gibi dış etkilere açık cephelerde farklı düzeyde yüklere maruz kalması da bu belirleme sürecini daha da güçleştirmektedir. Malatya Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden edinilen bilgilere göre, söz konusu yapı üzerinde malzeme özelliklerinin belirlenmesine yönelik doğrudan bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Kültürel miras niteliği taşıyan bu yapıların korunması öncelikli olduğu için, tahribatlı yöntemlerin kullanımı genellikle tercih edilmemektedir. Bu nedenle modellemede kullanılan, taş, tuğla ve harç gibi yapı malzemelerinin dayanımı, elastisite modülünü, birim hacim ağırlığını ve poison oranının belirlenmesinde yapının inşa edildiği dönemin malzeme özellikleri araştırılmış ve literatür çalışmaları incelenmiştir.

2.8.1. Tuğla Özelliklerinin Belirlenmesi

İncelemiş olduğumuzu Melik Sunullah Camii Minaresi'nde gövde kısmında bulunan tuğlalar ile alakalı mekanik özelliklerine ait herhangi bir çalışma yapılamamasından kaynaklı, literatürdeki çalışmalar incelenmiş olup Tablo 7'de verilen (Yurdakul vd., 2021), literatürde yapılan araştırmalar sonucunda tuğlaların mekanik özelliklerine yer verilmiştir. Bu çalışmaların incelenmesi sonucunda yapımız için gerekli olan tuğlanın mekanik özellikleri belirlenmiştir.

Tablo 7: Literatürdeki Farklı Araştırmacılara Göre Tuğlanın Mekanik Özellikleri (Yurdakul vd., 2021)

Araştırmacılar	Çakır vd.	Doğangün vd.	Erkek vd.	Gedik ve Celep	Mutlu ve Şahin	Şeker vd.	Yıldız vd.
Poisson Oranı	0,22	0,2	0,16	0,2	-	0,15	-
Basınç Dayanımı (MPa)	-	-	-	-	-	17,49	17,7
Çekme Dayanımı (MPa)	-	-	-	-	-	2,69	-
Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	1850	2000	1700	2000	1800	2037	-
Elastisite Modülü (MPa)	3500	3000	3500	2000	3000	3490	3540

Yapımızın tuğla basınç dayanımı literatürdeki çalışmalardan alınan değerlerden Şeker vd. (2014) bulmuş oldukları 17,49 MPa değer baz alınmıştır.

2.8.2. Taşın Özelliklerinin Belirlenmesi

Malatya'daki Melik Sunullah Camii minaresinde kullanılan taş türünü yapının tarihi, mimari stili, bölgesel jeolojik yapı ve literatürde yapılan çalışmaları dikkate alınarak değerlendirdiğimizde şu sonuca ulaşabiliriz:

2.8.2.1. Bölgesel jeoloji

Malatya ve çevresi, volkanik kökenli kayaçların yoğun olarak bulunduğu bir bölgedir. Özellikle Doğu Toroslar boyunca andezit, bazalt, tuf ve dazit gibi volkanik kayaçlar yaygındır. Malatya'da çıkarılan taşlar arasında andezit hem tarihi hem modern yapılarda en çok kullanılan taş türlerinden biridir (Özdoğan, 1973).

2.8.2.2. Mimari gözlem ve fotoğraf analizi

Minarenin kaide kısmı koyu gri renkte, düzgün kesilmiş ve sert bir yapıdadır. Bu, kaba yontu andezit taşına oldukça benzer. Bu tür taşlar, yapıların alt bölümlerinde sağlamlık sağlamak için tercih edilir (Bell, 2007).

2.8.2.3. Tarihi yapı teknikleri

Selçuklu ve Memlük dönemlerinde Anadolu'daki minarelerde kaide taşları olarak andezit ve bazalt, gövde ve süsleme içinse genellikle tuğla ve çini kullanılmıştır. Melik Sunullah Camii Minaresi de bu şemaya uymaktadır (Dinçer vd., 2004):

- Alt kısım (kaide): Taş – büyük olasılıkla andezit
- Üst kısım (gövde): Tuğla ve çini

2.8.2.4. Literatür desteği

Malatya'daki diğer tarihi yapılar (örneğin Battalgazi Ulu Camii) incelendiğinde, bu yapıların temel taşı olarak andezit tercih edildiği akademik çalışmalarda belirtilmiştir (Akyol vd., 2022).

Tarihi Melik Sunullah Camii Minaresi'nde kaide kısmında kullanılan taşların türü hakkında yapılan bir çalışma ve gerekli bilgiler olmamasından kaynaklı aynı bölgede bulunan (Malatya Battalgazi bölgesi), Melik Sunullah Camii Minaresine çok yakın bir konumda olan ve aynı tarihlerde inşa edildikleri öngörülen Tarihi Malatya Ulu Camisi'nin yapımında kullanılan taşların yapısı baz alınmıştır (Eskici, 1993). Malatya Ulu Camii'nin yapımında kullanılan

taşların türü hakkında literatürde yapılan çalışmalar sonucunda, Malatya Ulu Cami'nin yapısını oluşturan taşlar yoğunlukla traki-andezit (volkanik), kireçtaşı (sedimanter) ve andezit (volkanik) türlerindedir (Akyol vd., 2022). Akyol vd. çalışmalarında yapıdan aldıkları taş örneklerine temel fiziksel testler (gözeneklilik durumu, su emme kapasitesi ve birim hacim ağırlığı) uygulamışlardır, Tablo 8'de bu taş örneklerinin temel fiziksel test sonuçları listelenmiştir (Akyol vd., 2022).

Örneklerin kuru ağırlıkları doğrudan, Arşimet (su içerisinde) ve doymuş ağırlıkları (50 ton basınç altında, saf su içerisinde, gözeneklerin dolması sonucu sulu ağırlık) yardımıyla, gözeneklilik durumu (%P), su emme kapasitesi (%SEK) ve birim hacim ağırlıkları (doymuş-kuru BHA, g/cm³) belirlenmiştir (Akyol vd., 2022).

Tablo 8: Malatya Ulu Cami Taş Örneklerinin Temel Fiziksel Test Sonuçları (Akyol vd., 2022)

Örnekler	BHA-Doygun (g/cm ³)	BHA-Kuru (g/cm ³)	SEK (%)	P (%)	Tür
MUC-T1	2,43	2,24	3,48	7,81	Traki-andezit
MUC-T2	2,54	2,25	4,95	11,17	Traki-andezit
MUC-T3	2,44	2,21	4,29	9,48	Traki-andezit
MUC-T4	2,44	2,42	0,33	0,81	Traki-andezit
MUC-T5	2,40	2,39	0,29	0,68	Traki-andezit
MUC-T6	2,62	2,49	2,06	5,13	Kireçtaşı
MUC-T7	2,35	2,25	1,95	4,39	Kireçtaşı
MUC-T8	2,46	2,30	2,84	6,52	Traki-andezit
MUC-T9	2,45	2,39	1,03	2,47	Traki-andezit
MUC-T10	2,49	2,26	4,10	9,27	Traki-andezit
MUC-T11	2,47	2,25	4,02	9,03	Traki-andezit
MUC-T12	2,54	2,38	2,63	6,27	Traki-andezit
MUC-T13	2,24	1,75	12,44	21,78	Andezit
MUC-T14	2,49	2,25	4,40	9,88	Traki-andezit
Trakiandezit Ort.	2,46	2,30	2,97	6,71	Traki-andezit Ort.

Tüm bu bilgiler ışığında Melik Sunullah Cami Minaresi'nde kaide kısmında kullanılan taşın andezit türünde olduğu belirlenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda andezit taşının basınç dayanımına ilişkin araştırmalar sonucunda;

- Andezit taşlarının tek eksenli basınç dayanımı 60–160 MPa aralığındadır (Dinçer vd., 2004).
- Bu dayanım seviyesi, taşıyıcı kaide gibi elemanlarda uzun ömürlü stabilite sağlar (Dinçer vd., 2004).

Gölbaşı Andezit taş ocağı tarafından (2012) alınan bilgiler ışığında ise andezit taşın mekanik özellikleri Tablo 9’da gösterilmiştir.

Tablo 9: Andezit Maden Ocağından Çıkan Andezit Taşının Mekanik Özellikleri (Gölbaşı Andezit, 2012)

Özellik	Değer
Özgül Ağırlığı	2.67 gr/cm ³
Birim Hacim Ağırlığı	2.35 gr/cm ³
Gözeneklilik Derecesi	%10,1
Doluluk Oranı	%83,9
Basınç Dayanımı	716 kg/cm ²
Eğilme Dayanımı	163 kg/cm ²
Darbe Dayanımı	12 kg.cm/cm ³
Aşınma Dayanımı	18.1 cm ² /cm ²
Ağırlıkça Su Emme Oranı	%6,54
Görülür Porozite	%9,51
Atmosfer Basıncı Altında Su Emme (Ağırlıkça)	%4,28
Don Dayanımı (Ortalama Ağırlık Azalması)	%0,04

Yapının tarihi, mimari stili, bölgesel jeolojik yapısı ve literatürde yapılan çalışmaları dikkate alındığında Melik Sunullah Camii Minaresi’nde kullanılan taşın basınç dayanımı 70 MPa olarak belirlenmiştir.

2.8.3. Harcın Özelliklerinin Belirlenmesi

Melik Sunullah Camii Minaresi’nde, dönemin yapı geleneğine uygun olarak kireç esaslı harç kullanıldığı değerlendirilmektedir. Bu değerlendirmeye Malatya Ulu Camii’nin harç özellikleri incelenerek varılmıştır. İki tarihi yapıda aynı bölgede bulunup aynı dönemlerde

yapılmış ve malzeme olarak birbirlerine çok yakın malzemeler kullanılmıştır. Malatya Ulu Camii'nde özgün harç ve sıvaların bağlayıcı içeriğinde kireç-kil ve kireç-alçı-kil karışımı, onarımda kullanılan harç ve sıvaların bağlayıcı içeriğinde ise çimento-kireç, çimento-kil ve kil-kireç-çimento karışımı bağlayıcıların kullanıldığı belirlenmiştir (Akyol vd., 2022). Selçuklu ve Memlük dönemi yapılarında yaygın olarak kullanılan bu tür harçlar, kireç, kum ve su karışımıyla elde edilir. Çoğu zaman katkı maddesi olarak tuz, kül veya öğütülmüş tuğla parçaları da kullanılmıştır (Böke vd., 2006).

Tarihi kireç harçlarının mekanik özellikleri, kullanılan malzemenin oranlarına ve sertleşme sürecine göre değişiklik gösterebilir (Ersen vd, 2013). Ancak çeşitli akademik çalışmalarda bu tür harçların ortalama dayanım değerleri Tablo 10'daki gibi tespit edilmiştir.

Tablo 10: Harçların Ortalama Dayanım Değerleri

Özellik	Ortalama Değer	Açıklama / Not	Kaynak
Basınç Dayanımı	1.2 – 10.5 MPa	Harcın olgunlaşma süresiyle artar.	Kılıç ve Gökçen, 2022
Çekme Dayanımı	0.1 – 0.7 MPa	Düşük ama yapının bütünlüğünü sağlamak için yeterlidir.	Böke vd., 2006
Elastisite Modülü	1,000 – 3,000 MPa	Taşa uyumlu esnekliğe sahiptir.	Marques vd., 2020
Yoğunluk	1,600 – 1,800 kg/m ³	Katkı maddelerine bağlı değişir.	Ersen vd., 2013
Su Oranı	%15 – %24	Gözenekli yapıdan kaynaklıdır.	Kurugöl ve Güleç, 2010

Bu değerler, farklı Selçuklu dönemi yapılarında yapılan laboratuvar ve tahribatsız testlere dayanmakta olup, Melik Sunullah Camii'nde kullanılan harç için de benzerlik göstermesi beklenmektedir. Tüm bu bilgiler ışığında yapımızda kullanılan harcın basınç dayanımı 5 MPa olarak belirlenmiştir.

2.8.4. Kompozit Malzemenin Özelliklerinin Belirlenmesi

Melik Sunullah Camii Minaresi'nin yapısal analizinde, kompozit malzeme sisteminin davranışını temsil edebilmek amacıyla homojen malzeme varsayımına dayalı yöntemler kullanılacaktır. Minarede kullanılan taş-harç ve tuğla-harç birleşimleri için gerekli elastik parametrelerin (elastisite modülü, Poisson oranı ve birim hacim ağırlığı) belirlenmesi, sonlu elemanlar modelinin güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, kompozit yapıların mekanik özelliklerini hesaplamaya yönelik teorik bağıntılar ile idealize edilmiş yaklaşımlar birlikte değerlendirilecektir. Ayrıca, yapının maruz kalabileceği gerilme durumlarının analizi için basınç ve çekme dayanımı değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışma kapsamında taş-harç

karışımı izotropik özellikte bir malzeme olarak kabul edilmiştir. Kompozit malzemenin fiziksel ve mekanik değerleri hesaplanırken literatürde araştırılıp bulunan değerler esas alınmıştır.

2.8.4.1. Kompozit malzeme basınç ve çekme dayanımı hesaplama

Yığma birimi oluşturan taş, tuğla ve harç biriminin basınç dayanımı bulmak için (1-3) denklemleri kullanılmıştır. İlk olarak basınç mukavemetinin bulunması için “Eurocode 6: Kagir Yapıların Tasarımı Bölüm 1-1: Donatılı ve Donatısız Kagir Yapılar İçin Genel Kurallar” standardından yararlanılmıştır. Buna göre kompozitin basınç mukavemeti denklem (1) kullanılarak elde edilmiştir.

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (1)$$

$$f_k = K \cdot f_b^{0,7} \cdot f_m^{0,3}$$

Burada;

- f_k : Yığma birimin karakteristik basınç dayanımı (MPa)
- f_b : Taş veya tuğla birimlerin basınç dayanımı (MPa)
- f_m : Harç malzemesinin basınç dayanımı (MPa)

Yığma yapıların taşıyıcı özelliklerini belirlemede kullanılan ampirik bağıntılar, yapı malzemesinin morfolojik özelliklerine göre bazı sabit katsayılar içermektedir. Bu katsayılar genellikle deneysel çalışmalarla elde edilmiştir ve belirli yapı tipleri için sabit kabul edilmektedir. Bu çalışmada Eurocode 6’da önerilen bağıntı esas alınmış olup, K, α ve β katsayıları sırasıyla Tablo 11’den alınmıştır (Eurocode 6):

Tablo 11: K, α ve β Katsayıları Değerleri ve Anlamları (Eurocode 6)

Sabit	Değer	Açıklama
K	0,5	Ampirik katsayı
α	0,7	Taş/Tuğla dayanım katsayısı (f_b için)
β	0,3	Harç dayanım katsayısı (f_m için)

Denklem (1)’e göre hesaplamalar:

Taş-harç kompozit malzeme basınç dayanımı (Eurocode6)

$f_b(\text{taş})=70$ MPa, f_b (tuğla)=17.49 MPa, f_m (harç)=5 MPa olarak alınmıştır.

$$f_k = 0,5 \cdot 70^{0,7} \cdot 5^{0,3} = 15,857 \text{ MPa}$$

Taş-harç kompozit malzeme çekme dayanımı (Eurocode6)

Yığma yapılarda çekme dayanımı genellikle doğrudan belirlenemediğinden, literatürde yaygın olarak basınç dayanımının %10'u oranında kabul edilmektedir. Bağbancı (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda da bu yaklaşım benimsenmiştir. Bu çalışma kapsamında da benzer şekilde, çekme dayanımı değeri basınç dayanımının %10'u olarak varsayılmıştır ve hesaplamalarda denklem (2) kullanılmıştır.

$$f_t = \text{Çekme dayanımı}$$

$$f_t = 0,1.f_k = 0,1.15,857 \quad (2)$$

$$f_t = 1,585 \text{ MPa}$$

Tuğla-harç kompozit malzeme basınç dayanımı (Eurocode 6)

$$f_k = 0,5.17,49^{0,7}.5^{0,3} = 6 \text{ MPa}$$

Tuğla-harç kompozit malzeme çekme dayanımı (Eurocode 6)

$$f_t = 0,1.6 = 0,6 \text{ MPa}$$

İkinci olarak taş, tuğla ve harcın dayanımı bilinen duvarların basınç dayanımının belirlenmesi için Tomazevic (3) denklemini önermektedir. Tablo 12'de değer tablosu verilmiştir (Tomazevic, 1999).

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta$$

Tablo 12: Değer Tablosu (Tomazevic, 1999)

Sabit	Değer	Açıklama
K	0,5	Ampirik katsayı
α	0,65	Taş/Tuğla dayanım katsayısı (f_b için)
β	0,25	Harç dayanım katsayısı (f_m için)

$$f_k = K \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25} \quad (3)$$

Taş-harç kompozit malzeme basınç dayanımı (Tomazevic, 1999)

$$f_k = 0,5.70^{0,65}.5^{0,25} = 11,83 \text{ MPa}$$

Taş-harç kompozit malzeme çekme dayanımı (Tomazevic, 1999)

$$f_t = 0,1.11,83 = 1,183 \text{ MPa}$$

Tuğla-harç kompozit malzeme basınç dayanımı (Tomazevic, 1999)

$$f_k = 0,5.17,49^{0,65}.5^{0,25}=4,8 \text{ MPa}$$

Tuğla-harç kompozit malzeme çekme dayanımı (Tomazevic, 1999)

$$f_t = 0,1.4,8=0,48 \text{ MPa}$$

2.8.4.2. Kompozit malzemenin elastisite modülü, poisson oranı ve birim hacim ağırlığının belirlenmesi

Melik Sunullah Camii Minaresi ile ilgili kompozit malzemenin elastisite modülü, poisson oranı ve birim hacim ağırlığının belirlenmesine dair herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada kompozit malzemenin elastisite modülünü, poisson oranı ve birim hacim ağırlığının değerlerini belirlemek amacıyla literatür araştırması yapılmıştır. Literatürde yapılan araştırmalar sonucunda çeşitli yazarların yapımıza benzer tarihi yapılarda kullanmış oldukları kompozit malzeme değerleri (taş-harç ve tuğla-harç) incelenmiş Tablo 13, taş-harç, Tablo 14, tuğla-harç olarak tablo haline getirilmiştir.

Tablo 13: Literatürdeki Çalışmaların Taş-Harç Kompozit Malzeme İncelemesi

Taş-Harç	Tarihi Yapılar	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Birim Hacim Ağırlığı(kg/m ³)
Yanık vd. (2022)	Trabzon Ayasofya Çan Kulesi	3075	0,2	1850
Milani ve Clementi (2021)	Ferrara Catedral Tower	3258,4225	-	-
Aymelek vd. (2023)	İskender Paşa Camii Minaresi	2010	0,2	1800
Şeker vd. (2014)	Kara Mustafa Paşa Camii	10180	0,17	2358
Kumar ve Pallav (2024)	Senate Hall Building Tower	1451,2579,2844	0,2	1900,2800
Erkek ve Yetkin (2023)	Envarül Hamit Camii	3700	0,15	2200
Nohutcu vd. (2017)	Hafsa Sultan Camii Minaresi	7700	0,17	2200
Başaran vd. (2016)	Hacı Mahmut Camii Minaresi	2591	0,17	2100
Şeker vd. (2022)	Tarihi Yozgat Saat Kulesi	3000	0,2	1600

Tablo 14: Literatürdeki Çalışmaların Tuğla-Harç Kompozit Malzeme İncelemesi

Tuğla-Harç	Tarihi Yapılar	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Birim Ağırlığı(kg/m3)	Hacim
Milani ve Clementi (2021)	San Benedetto Tower	1176,1282,1483,1528,1885,2492	-	-	-
Milani ve Clementi (2021)	Matilde's Tower	1375	-	-	-
Milani ve Clementi (2021)	Belfry of Pomposa Abbey Tower	800,1300,1500,2200	-	-	-
Aymelek vd. (2023)	İskender Paşa Camii Minaresi	2010	0,2	1800	
Türker vd. (2022)	Aksaray ve Sivas Camii Minareleri	2000	0,2	1600	
Şeker vd. (2014)	Kara Mustafa Paşa Camii	3490	0,15	2037	
Başaran vd. (2016)	Hacı Mahmut Camii Minaresi	-	0,17	1750,1780	

Yapılan literatür araştırmaları ve ulaşılan veriler doğrultusunda, tarihi yapılarda kullanılan kompozit malzemelere ilişkin mekanik özellikler belirlenmiştir. Tablo 15’de literatür de incelenen çalışmalar ile bu çalışmalardan elde edilen bilgiler ışığında yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen kompozit malzeme özelliklerine yer verilmektedir. Bu veriler, yapının analitik modellemesinde kullanılacak malzeme parametrelerinin belirlenmesinde temel teşkil etmektedir.

Tablo 15: Melik Sunullah Camii Minaresinde Kullanılan Kompozit Malzemenin Mekanik Özellikleri

Minare Bölümleri	Malzeme	Elastisite Modülü(E) (MPa)	Birim Hacim Ağırlık (kg/m3)	Poisson Oranı	Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
					15,857 (Eurocod6)	1,585 (Eurocod6)
Kaide(Taban)	Taş+Harç	3000	2200	0,2	11,83 (Tomazevic 1999)	1,183 (Tomazevic 1999)
					6 (Eurocod6)	0,6 (Eurocod6)
Gövde	Tuğla+Harç	1500	1800	0,17	4,8 (Tomazevic 1999)	0,48 (Tomazevic 1999)

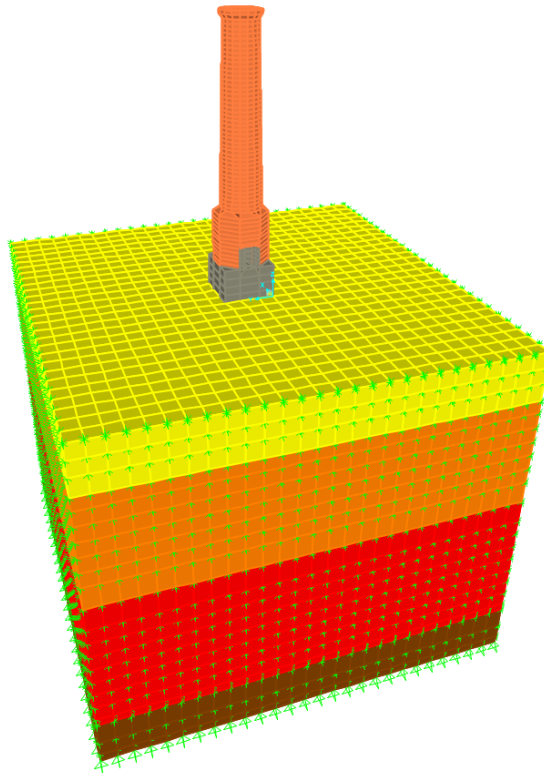
2.9. MELİK SUNULLAH CAMİİ MİNARESİ ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Melik Sunullah Camii minaresinin yapısal analizi kapsamında, taşıyıcı sistemin güvenilir bir şekilde modellenebilmesi için temel zemine ait jeoteknik özelliklerin doğru şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, SAP2000 analiz yazılımında yapılan modellemede, minarenin oturduğu zeminin mühendislik parametreleri dikkate alınarak yapı-zemin etkileşimi göz önünde bulundurulmuştur. Zemin özellikleri, Malatya Battalgazi Belediyesi'nden alınan zemin etüt raporlarından (2024) ve literatürde yapılan araştırmalar doğrultusunda belirlenmiştir (Jasim vd., 2024; Hacıfendioğlu, 2010; Jaf, 2016; Karabörk, 2009; Şakalak vd., 2024). Minarenin yer aldığı bölgenin zemin sınıfı, Malatya Battalgazi Belediyesi'nden alınan zemin etüt raporlarından (2024) ve AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritasından Melik Sunullah Camii Minaresi'nin koordinatları yardımıyla zemin sınıfının araştırmaların sonrasında ZC olarak belirlenmiştir. Minarenin yer aldığı bölgenin zemin sınıfı Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) kriterlerine göre değerlendirilmiş ve uygun zemin parametreleri modele tanımlanmıştır.

Tablo 16: AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulamasından Alınan Zemin Sınıf Raporu (AFAD, 2024)

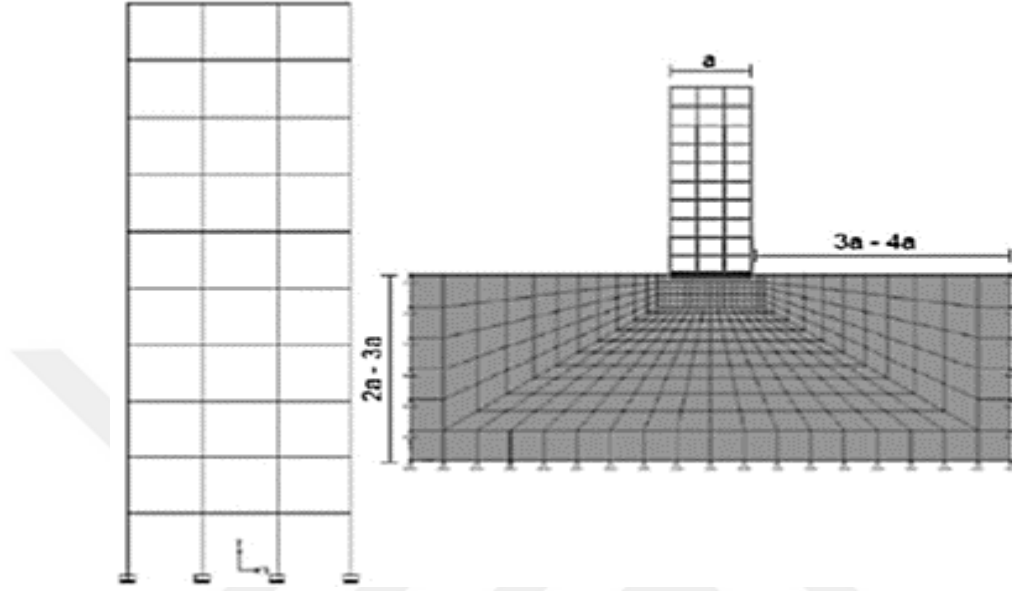
Kriter	Değer	Açıklama
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	DD-2	50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
Yerel Zemin Sınıfı	ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrıışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar
Enlem	38.42031°	
Boylam	38.36315°	

Melik Sunullah Camii minaresinin sayısal analizinde, yapı-zemin etkileşimini gerçeğe uygun şekilde temsil edebilmek amacıyla, zemin dört katmanlı bir yapı şeklinde modellenmiştir. SAP2000 yazılımında zemin, her katmanı farklı geoteknik özelliklere sahip olacak şekilde tanımlanmış hacimsel (solid) elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Bu yaklaşım sayesinde, hem zemin malzemesinin heterojenliği hem de düşey gerilme dağılımı daha doğru biçimde simüle edilebilmiştir. Yan yüzeylerde x ve y yönlerinde yer değiştirmeye izin verilmemiş, ancak z yönündeki düşey hareket serbest bırakılmıştır. Alt tabanda ise tüm yönlerde (x, y, z) yer değiştirme engellenerek, zemin modelinin dış sınırlarında yapay deplasman oluşumu engellenmiştir. Yapı zemin etkileşimli model Şekil 27’de verilmiştir.



Şekil 27: Zemin Modeli ve Sınır Koşullarının SAP2000 Üzerindeki Gösterimi

Yapı modelinde zemini oluşturan 17204 adet solid eleman kullanılmıştır. Yapı zeminin sınırları literatürde yapılan araştırmalar sonucunda belirlenmiştir (Tabatabaiefar & Massumi, 2010). Tabatabaiefar ve Massumi'nin kullandıkları şema Şekil 28'de verilmiştir. Yapı zemin sınırları X yönünde toplam 27 m, Y yönünde 27 m ve Z yönünde 22,5 m olacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 28: Tabatabaiefar ve Massumi'nin çalışmalarında kullandıkları sonlu eleman modelleri

Melik Sunullah Camii Minaresi'nin zemin özelliklerine ait herhangi bir çalışma bulunmamasından dolayı yapımızın bulunduğu bölgede yapılan bazı zemin etüt raporları incelenmiş ve bu incelemeler sonucunda zemin özelliklerinin belirlenmesi için gerekli sayısal veriler alınmıştır. Bu sayısal veriler ışığında literatürde araştırmalar yapıp zeminimizin özellikleri belirlenmiştir. Yapılan literatür araştırmaları ve yapımızın bulunduğu bölgeden alınan zemin etüt raporları doğrultusunda yapımızın zemin özellikleri Tablo 17'de belirlenmiştir.

Tablo 17: Melik Sunullah Camii Minaresi Zemin Özellikleri

Katman	Derinlik(m)	Poisson Oranı	Kayma Modülü (kN/m ²)	Elastisite Modülü (kN/m ²)	Birim		
					Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Kohezyon	Sürtünme Açısı
1	3,2	0,37	35000	95900	16	20	30
2	10,5	0,34	125000	335000	18	20	30
3	19,5	0,32	175000	455000	20	20	30
4	22,5	0,3	250000	650000	24	20	30

2.10. MELİK SUNULLAH CAMİİ MİNARESİ KONUMUNUN DEPREMSELLİĞİ

Melik Sunullah Camii Minaresi'nin bulunduğu konuma ait deprem tehlikesi verileri, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından sağlanan Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması aracılığıyla elde edilmiştir (AFAD, 2024). Bu uygulama sayesinde, belirli bir deprem yer hareketi düzeyine göre ilgili konum ve yerel zemin sınıfı girilerek; yatay ve düşey elastik ivme spektrumları, ayrıca sismik tehlike haritası özet veya detaylı olarak raporlanabilmektedir.

Hazırlanan bu raporlarda; kısa periyot ve 1.0 saniye periyot için spektral ivme katsayıları, yerel zemin etki katsayıları, en büyük yer ivmesi (PGA) ve maksimum yer hızı (PGV) gibi parametreler sunulmaktadır. İvme ile ilgili tüm değerler, yerçekimi ivmesinin (g) katsayısı şeklinde boyutsuz olarak raporlanmaktadır. Bu veriler doğrultusunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. İlgili haritalar Şekil 29'da, Tablolar ise 18-20'de sunulmuştur (AFAD, 2024).

$S_s = 0.781$

$S_1 = 0.217$

$PGA = 0.328$

$PGV = 20.177$

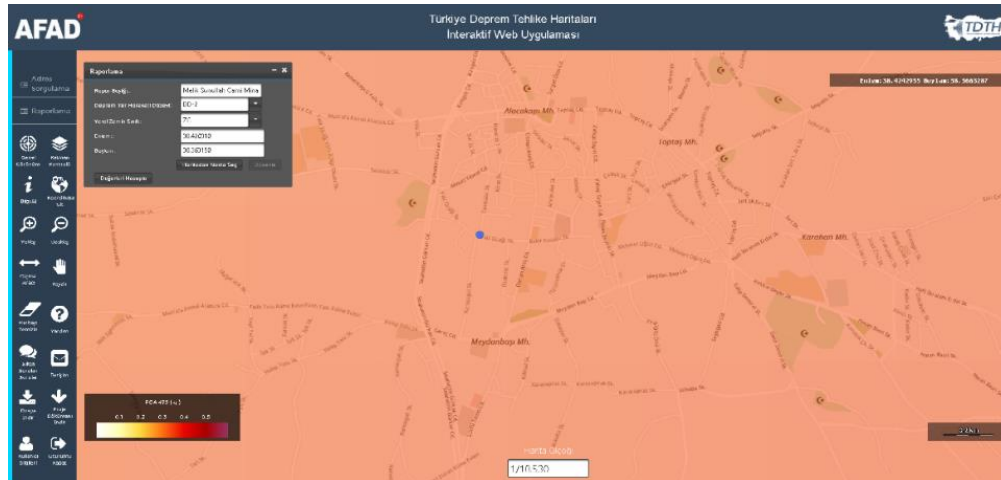
Burada;

SS: Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

S1: 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

PGA: En büyük yer ivmesi [g]

PGV: En büyük yer hızı [cm/sn]



Şekil 29: Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması

2.10.1. Yerel Zemin Sınıfları

AFAD Türkiye deprem tehlike haritaları interaktif web uygulamasından alınan yerel zemin sınıfları tablosu aşağıda verilmiştir. Tablo 18’de yerel zemin sınıflandırılması verilmiştir (AFAD, 2024).

Tablo 18: Yerel Zemin Sınıfları (AFAD, 2024)

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		(V _S) 30	(N ₆₀) ₃₀ [darbe/30 cm]	(C _u) ₃₀ [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500	-	-
ZB	Az ayrılmış, orta sağlam kayalar	760 - 150 0	-	-
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 - 760	> 50	> 250
ZD	Orta sıkı - sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 - 360	15 - 50	70 - 250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak - katı kil tabakaları veya PI > 20 ve w > % 40 koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası (C _u < 25 kPa) içeren profiller	< 180	< 15	< 70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler : 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaştırılabilir zeminler, yüksek derecede hassas killi, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.),			

2.10.2. Yerel Zemin Etki Katsayıları

AFAD Türkiye deprem tehlike haritaları interaktif web uygulamasından alınan yerel zemin etki katsayıları aşağıda verilmiştir. Tablo 19-20’de yerel zemin etki katsayıları verilmiştir (AFAD, 2024).

Tablo 19: Yerel Zemin Etki Katsayıları (Kısa periyot) (AFAD, 2024)

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_S					
	$S_S \leq 0.25$	$S_S = 0.50$	$S_S = 0.75$	$S_S = 1.00$	$S_S = 1.25$	$S_S \geq 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

Yerel Zemin Sınıfı ZC ve $S_S = 0.781$ için $F_S = 1.200$

Tablo 20: Yerel Zemin Etki Katsayıları (1.0 saniye periyot) (AFAD, 2024)

Yerel Zemin Sınıfı	1.0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_1					
	$S_1 \leq 0.10$	$S_1 = 0.20$	$S_1 = 0.30$	$S_1 = 0.40$	$S_1 = 0.50$	$S_1 \geq 0.60$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
ZD	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
ZE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

Yerel Zemin Sınıfı ZC ve $S_S = 0.217$ için $F_S = 1.500$

2.10.3. Tasarım Spektral İvme Katsayıları

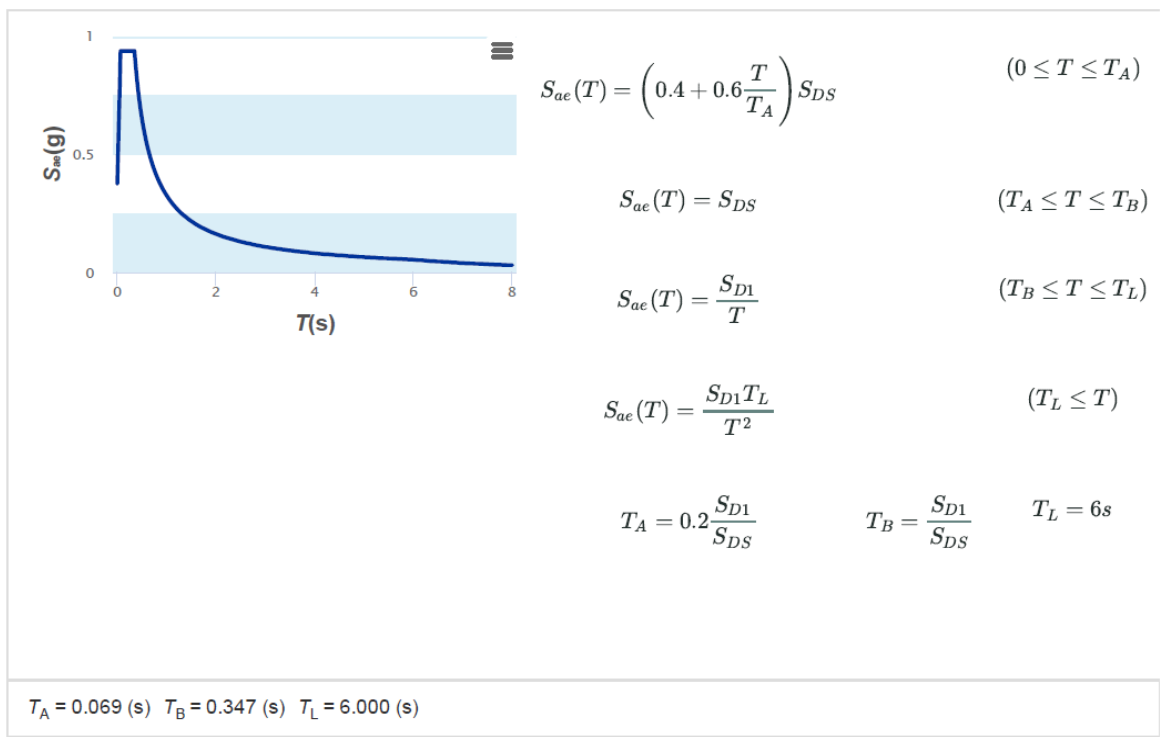
$$SDS = S_S F_S = 0.781 \times 1.200 = 0.937$$

$$SD1 = S1 F1 = 0.217 \times 1.500 = 0.325$$

SDS: Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

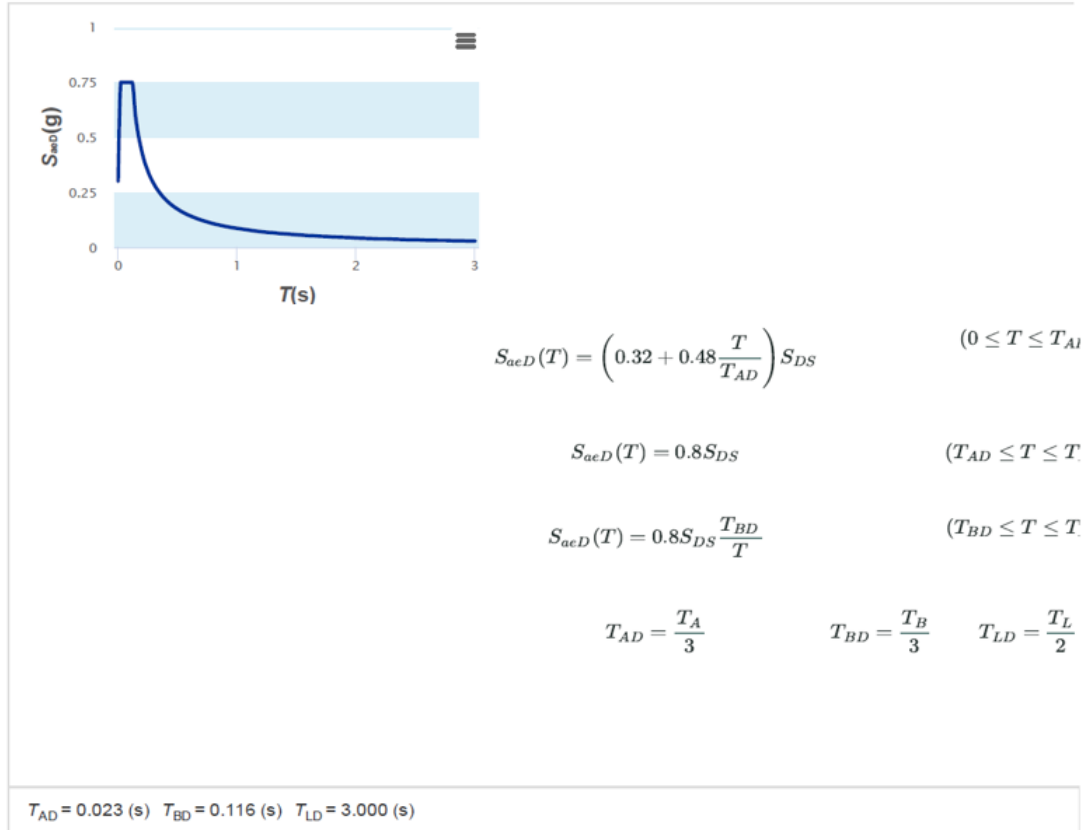
SD1: 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

2.10.4. Yatay Elastik Tasarım Spektrumu



Şekil 30: Yatay Elastik Tasarım Spektrumu Grafiği (AFAD, 2024)

2.10.5. Düşey Elastik Tasarım Spektrumu



Şekil 31: Düşey Elastik Tasarım Spektrumu Grafiği (AFAD, 2024)

2.11. MELİK SUNULLAH CAMİ MİNARESİ İÇİN DEPREM YÜKÜ AZALTMA KATSAYISI

Deprem mühendisliğinde, özellikle mevcut yapıların performans dayalı analizlerinde, deprem yüklerinin yapıya doğrudan tam elastik etkisiyle değil, belirli oranlarda azaltılarak uygulanması esas alınmaktadır. Bu yaklaşımın temelinde, yapıların deprem sırasında plastik davranışa geçerek enerji tüketebilme kabiliyetleri yatmaktadır. Yapıların bu şekilde sönümleyici etki göstermesi sayesinde, maruz kaldıkları etkili deprem kuvvetleri azaltılmış olur. Bu amaçla kullanılan ve tasarım aşamasında deprem kuvvetlerinin küçültülmesini sağlayan katsayıya ‘‘deprem yükü azaltma katsayısı’’ (Ra katsayısı) adı verilir.

Ra katsayısı, yapının taşıyıcı sistem türüne, süneklik seviyesine, taşıyıcı sistem düzenine ve genel deprem dayanımına bağlı olarak tanımlanır. Yeni yapıların tasarımında bu katsayılar, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) gibi teknik standartlarda detaylı olarak yer almaktadır. Ancak, tarihi yapılar ve özellikle minare gibi özel ve geleneksel yapı türleri için R katsayısı yönetmelikte doğrudan tanımlanmamıştır. Bu tür yapılarda, taşıyıcı sistemin davranış özellikleri, yapı malzemeleri, geometrik oranları ve benzer yapıların deprem altındaki davranışları dikkate alınarak mühendislik deneyimine dayalı bir katsayı belirlenmelidir.

Ra katsayısının değeri, yapının doğal titreşim periyodu (T), yapının taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R), bina önem katsayısı (I) ve dayanım fazlalığı katsayısı (D) gibi parametrelere bağlı olarak belirlenmektedir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018)’de bu katsayının hesaplanmasına ilişkin denklemler (4-5) aşağıdaki ifadelerde yer almaktadır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018):

$$Ra(T) = R / I \quad , \quad T > TB \quad (4)$$

$$Ra(T) = D + ((R / I) - D) * (T / TB) \quad , \quad T \leq TB \quad (5)$$

Burada;

- R, yapı sisteminin süneklik düzeyine bağlı olarak tanımlanan davranış katsayısıdır.
- I, binanın kullanım amacı ve önem derecesine göre belirlenen önem katsayısıdır.
- D, sistemin dayanım fazlalığını temsil eden katsayıdır.
- T, yapının birinci doğal titreşim periyodudur.
- TB, tasarım spektrumunun ilk köşe periyodunu ifade eder.

2.11.1. R ve D Değerlerinin Belirlenmesi

R ve D değerlerinin belirlenebilmesi için, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) tarafından aşağıdaki tabloda bu katsayıların hesaplanmasına yönelik temel bilgiler ve kaynaklar Tablo 21’de sunulmuştur (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018).

Tablo 21: R ve D Değerleri (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018)

Bina Taşıyıcı Sistemi	Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı (R)	Dayanım Fazlalığı Katsayısı (D)	İzin Verilen Bina Yükseklik Sınıfları (BYS)
D. HAFİF ÇELİK BİNA TAŞIYICI SİSTEMLERİ			
D1. Süneklik Düzeyi Yüksek Taşıyıcı Sistemler			
Vida, bulonlu sac, OSB veya kontrplak (plywood) duvar panelleri ile karşılanan süneklik düzeyi yüksek hafif çelik binalar	4	2	BYS = 8
D2. Süneklik Düzeyi Sınırlı Taşıyıcı Sistemler (Bkz.4.3.4.1)			
Alçı levhalar içeren kaplamalı veya çaprazlı panellerle karşılanan süneklik düzeyi sınırlı hafif çelik binalar	3	2	BYS = 8
E. YIĞMA BİNA TAŞIYICI SİSTEMLERİ			
E1. Süneklik Düzeyi Yüksek Taşıyıcı Sistemler			
E11. Donatılı yığma binalar	4	2	BYS ≥ 7
E12. Donatılı gazbeton panel binalar	4	2	BYS ≥ 7
E2. Süneklik Düzeyi Sınırlı Taşıyıcı Sistemler (Bkz.4.3.4.1)			
E21. Kuşatılmış yığma binalar	3	2	BYS = 8
E22. Donatısız yığma binalar	2.5	1.5	BYS = 8
F. AHŞAP BİNA TAŞIYICI SİSTEMLERİ			
F1. Süneklik Düzeyi Yüksek Taşıyıcı Sistemler			
Çivili veya vidalı OSB veya kontrplak (plywood) duvar panelleri ile karşılanan süneklik düzeyi yüksek ahşap binalar	4	2	BYS ≥ 7
F2. Süneklik Düzeyi Sınırlı Taşıyıcı Sistemler (Bkz.4.3.4.1)			
Çivi, vida ve bulon ile birleştirilen tutkallı duvar panelleri veya ahşap çaprazlarla karşılanan süneklik düzeyi sınırlı ahşap binalar	3	2	BYS = 8

Melik Sunullah Camii minaresinin yığma bina taşıyıcı sistem özelliği nedeniyle, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) ve benzer yapı tiplerine ilişkin literatür dikkate alınarak deprem yükü azaltma katsayısı $R = 2,5$ olarak belirlenmiştir. Bu değer, doğrusal analiz yöntemi kapsamında elastik deprem kuvvetlerinin yapının sınırlı enerji sönmleme kapasitesiyle uyumlu biçimde düşürülmesi amacıyla kullanılmıştır.

Melik Sunullah Camii minaresinin mevcut durumu ve yapısal özellikleri göz önüne alınarak, dayanım fazlalığı katsayısı (D) belirsizliği nedeniyle TBDY 2018 yönetmeliği doğrultusunda 1,5 olarak kabul edilmiştir. Bu, minarenin rijit ve sünek olmayan davranışını yansıtmakta olup, deprem tasarımında güvenliği ön planda tutan muhafazakâr bir yaklaşımdır.

2.11.2. Bina Kullanım Sınıfı ve Bina Önem Katsayısının Belirlenmesi

Melik Sunullah Camii Minaresi'nin Bina Önem Katsayısının belirlenebilmesi için, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) tarafından aşağıdaki tabloda bu katsayıların hesaplanmasına yönelik temel bilgiler ve kaynaklar Tablo 22'de sunulmuştur (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018).

Tablo 22: Bina Kullanım Sınıfı ve Bina Önem Katsayısı (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018)

Bina Kullanım Sınıfı	Binanın Kullanım Amacı	Bina Önem Katsayısı (I)
BKS = 1	Deprem sonrası kullanımı gereken binalar, uzun süreli yoğun kullanılan binalar, tehlikeli madde içeren binalar vb.	1.5
BKS = 2	İnsanların kısa süreli yoğun olarak bulunduğu binalar (alışveriş, spor, konser, ibadethane vb.)	1.2
BKS = 3	Diğer binalar (konut, işyeri, otel, endüstri yapıları vb.)	1.0

Bu formülasyon sayesinde, yapının dinamik özellikleri ve sistem tipine göre deprem kuvvetlerinin daha doğru ve güvenilir şekilde modellenmesi mümkün olmaktadır. Özellikle sünekliği düşük olan yığma yapı sistemlerinde, R_a katsayısı küçük değerler almakta ve böylece yapı üzerine etki eden kuvvetler daha gerçekçi biçimde yansıtılmaktadır.

Melik Sunullah Camii minaresi, kültürel miras niteliğinde bir ibadethane yapı olması sebebiyle, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) sınıflandırmasına göre insanların kısa süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar kapsamında değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, deprem yüklerinin hesaplanmasında kullanılan bina önem katsayısı (I) olarak yönetmelikte önerilen maksimum değer olan 1.2 alınmıştır. Bu yaklaşım, yapının korunması ve güvenliğinin öncelikli tutulması amacıyla benimsenmiştir.

2.11.3. Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı Hesaplanması

Melik Sunullah Camii Minaresi'nin deprem yüğü azaltma katsayısı için belirlenen değler aşağıdaki gibidir;

- R (Deprem yüğü azaltma katsayısı): 2,5
- D (Dayanım fazlalığı katsayısı): 1,5
- I (Bina önem katsayısı): 1,2

Bu değler ışığında hesaplama yaparsak;

Yapımızın T değeri Sap2000 programında yapılan modal analiz sonucunda 0,669 olarak bulunmuştur. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından sağlanan Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması aracılığıyla elde edilen TB değrimiz ise 0,347'dir. $T > TB$ olduğundan dolayı denklem (4) aşağıdaki gibi kullanılmıştır. Uygulanan denklem sonrasında deprem yüğü azaltma katsayısı;

$$Ra(T) = R / I \quad , \quad T > TB$$

$$Ra(T) = \frac{2,5}{1,2} = 2,083 \quad , \quad 0,669 > 0,347$$

olarak bulunmuştur.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

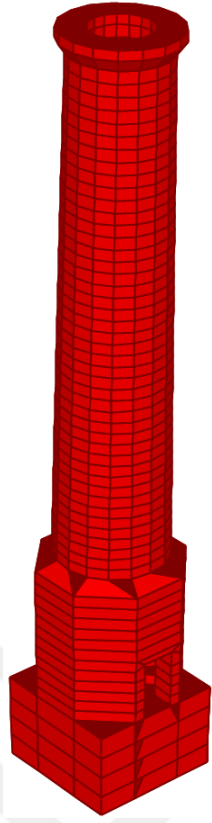
3. MELİK SUNULLAH CAMİİ MİNARESİNİN FARKLI DEPREM KARAKTERİSTİKLERİ ALTINDAKİ YAPISAL DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

3.1. YAPININ MODAL ANALİZİ

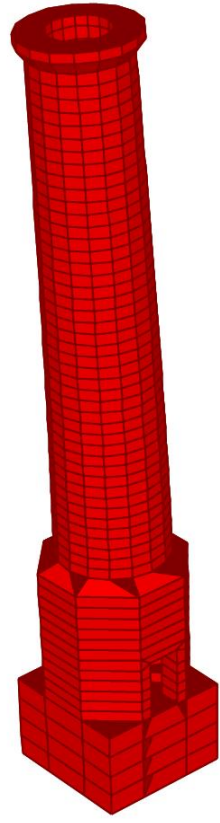
Tarihi Melik Sunullah Camii Minaresi'nin dinamik özelliklerinin anlaşılması amacıyla modal analiz yöntemi uygulanmış ve yapı davranışını etkileyen doğal titreşim modları detaylı şekilde incelenmiştir.

Yapının dinamik davranışını yeterli düzeyde temsil edebilmek ve yürürlükteki yönetmelik gereklerini karşılamak amacıyla gerçekleştirilen modal analizde, 20 adet titreşim modu dikkate alınmıştır. Analiz sonuçları incelendiğinde, ilk 20 mod sonucunda elde edilen toplam kütle katılım oranının %95'in üzerine çıktığı tespit edilmiştir. Bu oran, deprem etkisi altında yapılan modal analizlerde dikkate alınması gereken mod sayısının belirlenmesinde temel alınmakta olup, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY, 2018) tanımlanan minimum %95 aralığındaki kütle katılım oranı şartını karşılamaktadır. Bu doğrultuda yapılan değerlendirmeler sonucunda, yapıdaki doğal titreşim modları ve bunlara karşılık gelen periyotlar 20 mod dikkate alınarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan 20 moda ait periyot değerleri ile kütle katılım oranları Ekler Tablo 23'te sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 32-43 arasında ise ilk 12 modun mod şekilleri ayrı ayrı görselleştirilmiştir.

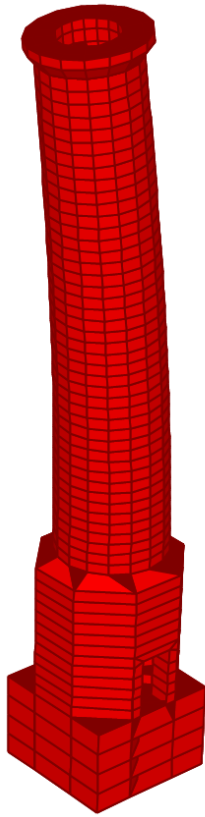
Aşağıda Şekil 32 görüldüğü üzere yapı- zemin etkileşimindeki yapının 1. Moduna ait doğal titreşim periyot değeri 0.669 sn olarak belirlenmiştir. Zeminin yapının analizine etkisini değerlendirebilmek amacıyla, yapının altına zemin modellemesi eklenmeden, minare tabanındaki düğüm noktaları ankastre mesnet olarak kabul edilmiş ve bu durumda birinci doğal titreşim periyodu 0.474 saniye olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuç, zemin-yapı etkileşiminin yapısal analizler açısından önemli bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.



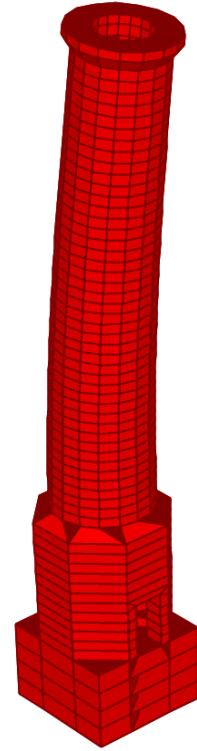
Şekil 32: 1. Mod ($T = 0,669$ sn)



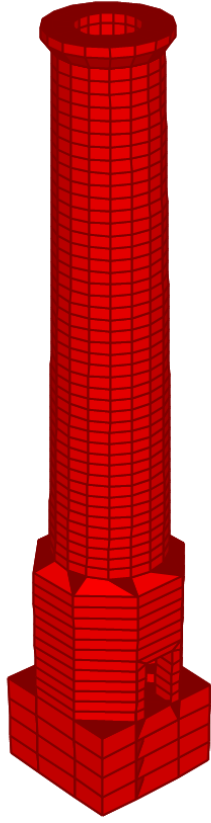
Şekil 33: 2. Mod ($T = 0,662$ sn)



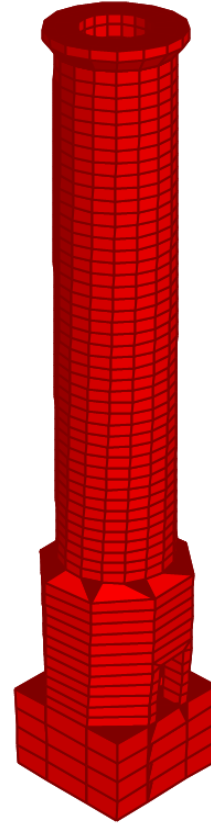
Şekil 34: 3. Mod ($T = 0,164$ sn)



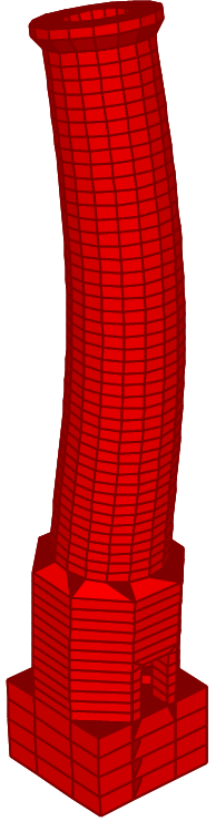
Şekil 35: 4. Mod ($T = 0,164$ sn)



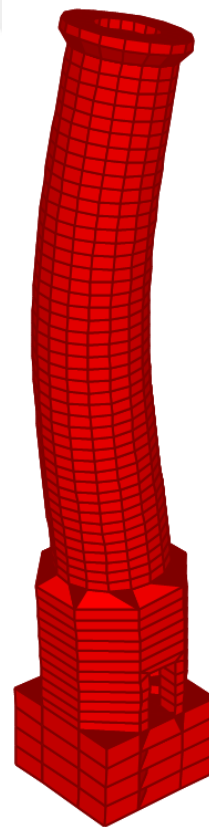
Şekil 36: 5. Mod ($T = 0,096$ sn)



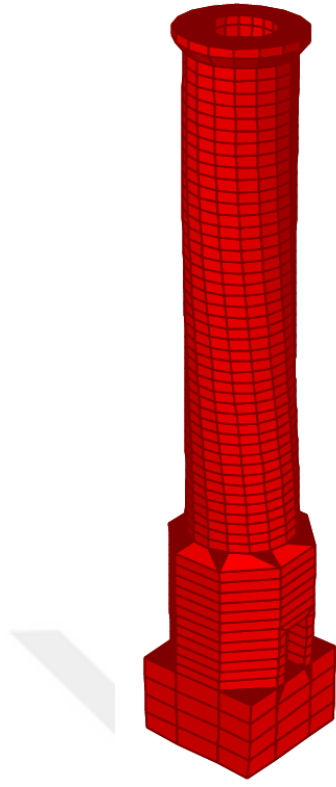
Şekil 37: 6.Mod ($T = 0,094$ sn)



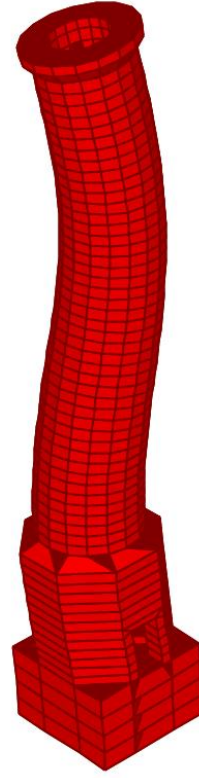
Şekil 38: 7. Mod ($T = 0,073$ sn)



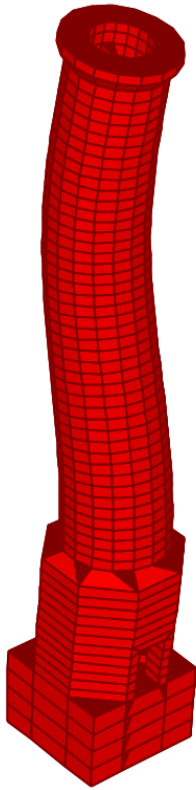
Şekil 39: 8. Mod ($T = 0,072$ sn)



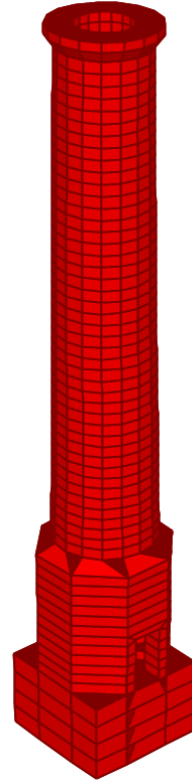
Şekil 40: 9. Mod ($T = 0,053$ sn)



Şekil 41: 10. Mod ($T = 0,048$ sn)



Şekil 42: 11. Mod ($T = 0,047$ sn)



Şekil 43: 12. Mod ($T = 0,039$ sn)

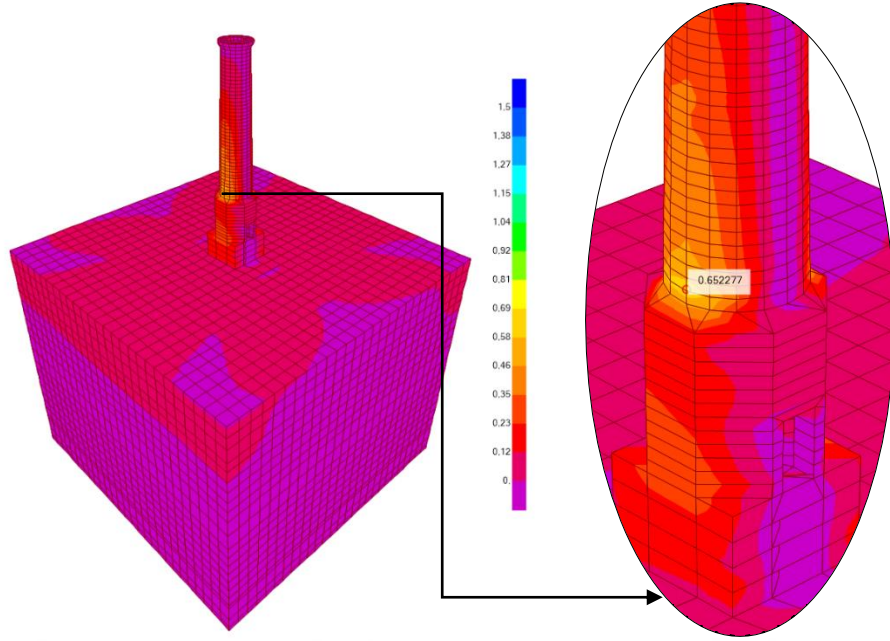
3.2. YAPININ DEPREM ANALİZLERİ

Melik Sunullah Camii Minaresi'nin deprem analizleri yapılırken S₁₁, S₂₂ ve S₃₃ maksimum çekme gerilmeleri incelenmiştir. Yapılan mod birleştirme yöntemiyle deprem analizi ve 11 adet farklı deprem analizine ait sonuçlar incelendiğinde, özellikle Z doğrultusundaki S₃₃ maksimum çekme gerilmelerinin, X (S₁₁) ve Y (S₂₂) yönlerindeki kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, değerlendirme kriteri olarak S₃₃ maksimum çekme gerilmeleri esas alınmıştır. Bunun başlıca sebebi; S₁₁ ve S₂₂ yönlerinde elde edilen maksimum çekme gerilmelerinin oldukça düşük seviyelerde kalmasıdır. S₁₁ ve S₂₂ değerleri, yapı üzerindeki yatay (X ve Y yönlü) deprem yükleri sonucu oluşan gerilmeleri ifade etmektedir. Buna karşılık, S₃₃ gerilmesi hem yapının kendi ağırlığı hem de yatay deprem yüklerinden kaynaklanan şekil değiştirmelerin etkisiyle oluşmaktadır.

Melik Sunullah Camii Minaresi gibi yüksek ve ağır bir yapıda, düşey doğrultudaki (Z eksen) iç kuvvetlerin etkisi daha belirgin olmaktadır. Özellikle yatay deprem etkileri altında meydana gelen eğilme ve burulma gibi davranışlar, Z yönündeki çekme gerilmelerini artırmaktadır. Bu nedenle, analiz sonuçlarında S₃₃ çekme gerilmeleri, yapının sismik performansının değerlendirilmesinde daha belirleyici bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Bu gerekçeyle, tez kapsamında S₃₃ maksimum çekme gerilmelerine odaklanılmış, S₁₁ ve S₂₂ gerilmeleri ise oldukça düşük düzeyde kalmaları nedeniyle değerlendirme dışında bırakılmıştır.

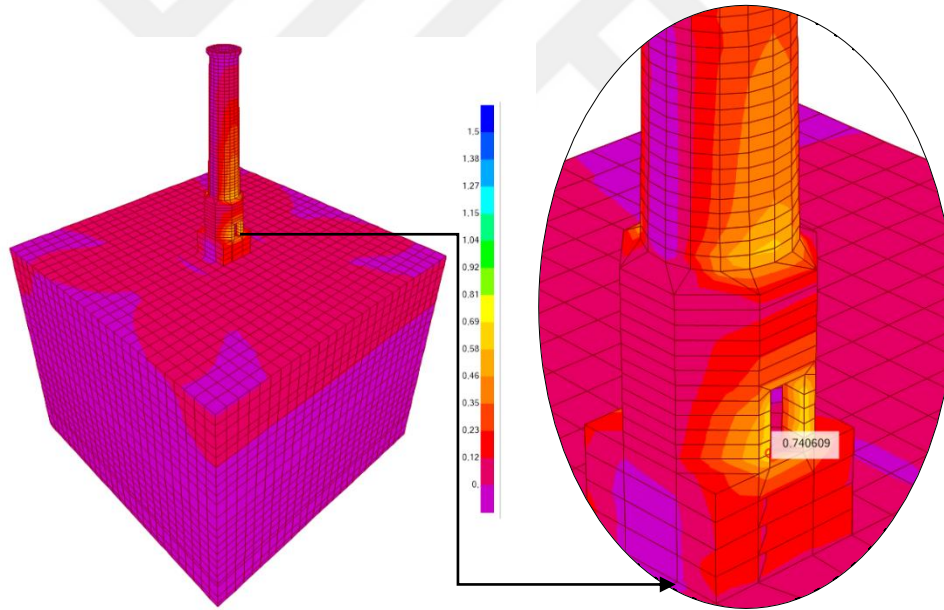
3.2.1. Mod Birleştirme Yöntemiyle Deprem Analizi

Türkiye sismik kod verilerine göre AFAD'dan alınan bilgiler ışığında yapımıza Sap2000 programında X(U₁) ve Y(U₂) yönünde S₃₃ çekme gerilmesi(N/mm²) TSC 2018 mod birleştirme yöntemiyle deprem analizi olarak uygulanmıştır. Uygulamalar sonucunda oluşan maksimum çekme gerilmeleri Şekil 44-45'te gösterilmiştir.



Şekil 44: Y(U2) Yönünde Uygulanan S33 Maksimum Çekme Gerilmesi

Mod birleştirme yöntemiyle deprem analizi sonucunda S33 maksimum çekme gerilme değerleri Y(U₂) yönünde; 0.652277 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 45: X(U1) Yönünde Uygulanan S33 Maksimum Çekme Gerilmesi

Mod birleştirme yöntemiyle deprem analizi sonucunda S33 maksimum çekme gerilme değerleri X(U₁) yönünde; 0.740609 MPa olarak hesaplanmıştır.

3.2.2. Yapıya Uygulanan 11 Adet Deprem Analizleri

Malatya ili ve ilçeleri, Türkiye Deprem Tehlike Haritasına (AFAD, 2019) göre yüksek deprem riski altında yer almaktadır. Bu doğrultuda, Melik Sunullah Camii'ne ait minarenin dinamik yükler altındaki davranışını incelemek amacıyla, yapı üzerinde SAP2000 yazılımı kullanılarak dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, Türkiye Bina Deprem

Yönetmeliği (TBDY 2018) Madde 2.5.1.3 uyarınca, zaman tanım alanında analiz yapılabilmesi için gerekli olan “bir veya iki boyutlu analizlerde kullanılacak deprem kayıtlarının ve üç boyutlu analizlerde kullanılacak deprem kayıt takımlarının sayısının en az on bir olması” koşulu dikkate alınmıştır. Bu kapsamda seçilen 11 farklı deprem kaydı ile yapı üzerinde zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizler yapılmış; analiz sonucunda minarede oluşan maksimum çekme gerilme değerleri elde edilmiştir. Seçilen 11 adet deprem kaydının belirlenmesinde, AFAD tarafından sağlanan Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması kullanılarak (AFAD, 2024), Melik Sunullah Camii minaresinin bulunduğu konumun (enlem-boylam) zemin sınıfı ve yerel deprem tehlikesi parametreleri dikkate alınmıştır. Ayrıca, yapıdan elde edilen modal analiz sonuçlarına göre, birinci doğal titreşim periyodu da göz önünde bulundurularak, bu periyot aralığına uygun karakteristikte yer hareketi kayıtları tercih edilmiştir. Böylece, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) yönetmeliğinin zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizlerde kullanılacak deprem kayıtlarının gerçekçi ve temsil edici olması gerekliliği sağlanmış, yapının bulunduğu bölgeye özgü ve yapının dinamik özellikleriyle uyumlu 11 adet deprem ivme kaydıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 46-78 aralığında bu değerlerin görselleri verilmiştir.

3.2.2.1. Imperial Valley depremi (1940)

Imperial Valley Depremi, 21 Mayıs 1940 tarihinde Kaliforniya, ABD’de meydana gelmiş ve bölgenin tarihindeki en yıkıcı sismik olaylardan biri olarak kabul edilmiştir. Bu deprem, özellikle altyapı ve yapısal sistemlerde önemli hasarlar yaratmıştır (Hough, 2009).

Depremi Özellikleri

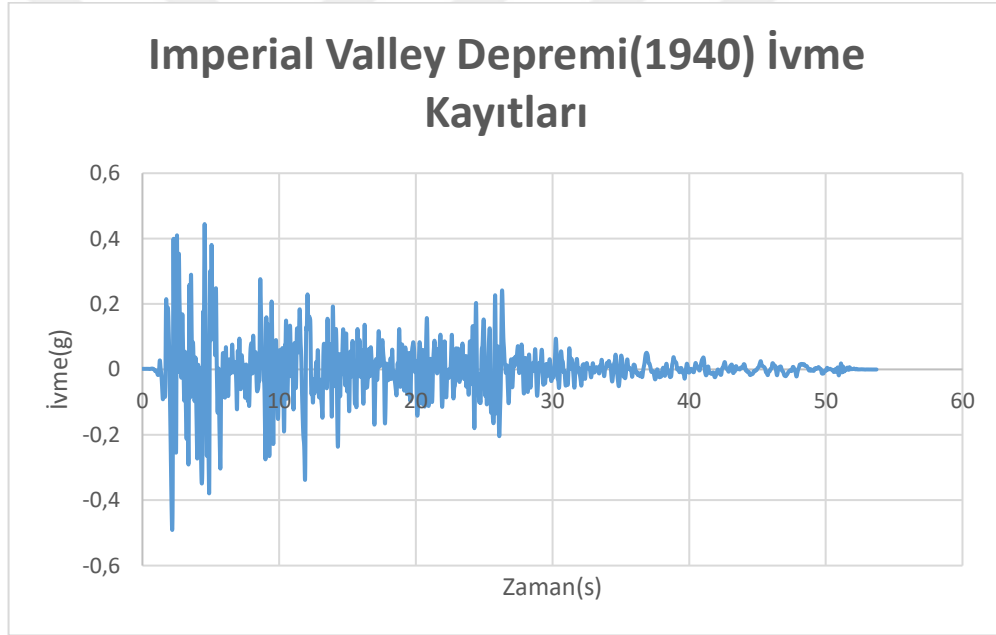
- Tarih ve Saat: 21 Mayıs 1940, 17:35 (yerel saat)
- Büyüklük: 6.9 (moment büyüklüğü)
- Derinlik: Yaklaşık 11 km
- Fay Tipi: Sol yanal doğrultu atımlı (left-lateral strike-slip)
- Etkilenen Alan: Imperial Valley ve çevresi
- Maksimum Şiddet: VIII (Yıkıcı)

Zarar ve Etkiler

- Ölü Sayısı: Yaklaşık 6 kişi
- Yaralı Sayısı: 40 kişi civarında
- Evlerini Kaybedenler: Birçok aile evsiz kalmıştır.

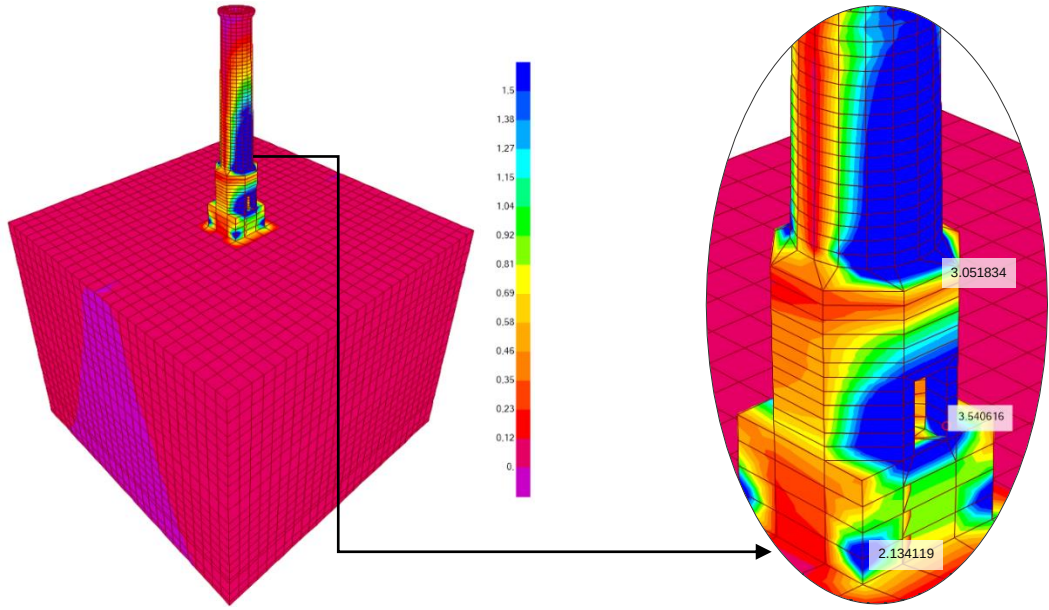
- Yapısal Zarar: Taş ve tuğla yapılar ağır hasar görmüştür.
- Altyapı Hasarı: Su ve elektrik hatlarında kesintiler yaşanmıştır.
- Ticaret ve Sanayi: Tarım ve ticarete aksaklıklar görülmüştür.

Çalışmanın bu kısmında, Melik Sunullah Camii Minaresi ‘ne Imperial Valley Depremi’nin ivme kayıtları uygulanmış ve bu kayıtlar değerlendirilirken, depremin sismik enerji içeriğinin yoğun olarak aktarıldığı 0–10 saniye aralığı esas alınmıştır. Bu aralık, aynı zamanda yer hareketinin yapıya en fazla enerji aktardığı zaman dilimi olup, Arias Şiddeti (Arias Intensity) parametresiyle de desteklenmiştir. Arias Şiddeti, ivme kayıtlarının karelerinin zamanla integrasyonu alınarak hesaplanmış ve seçilen ivme aralığının enerji yoğunluğunu temsil ettiği doğrulanmıştır. Uygulanan bu ivme aralığı kapsamında, yapıya doğrusal olmayan zaman tanım alanında deprem performans analizi yapılmış ve analiz sonucunda minarede oluşan maksimum çekme gerilme değerleri belirlenmiştir.



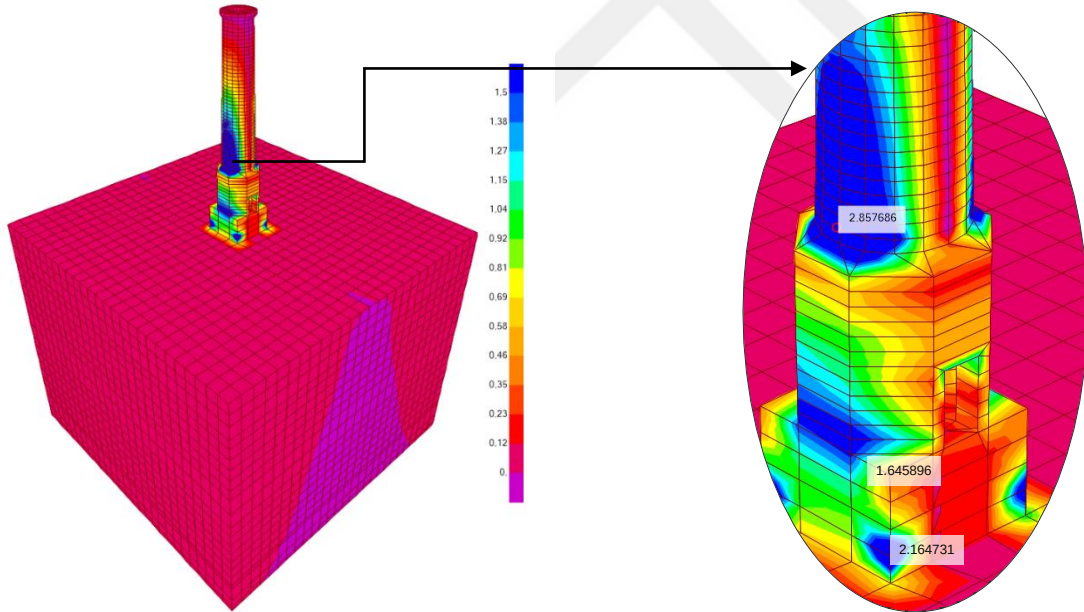
Şekil 46: Imperial Valley Depremi İvme Kayıtları

Imperial Valley depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri $X(U_1)$ yönünde; kaide(taban) kısmında 2.134119 MPa, orta gövdede 3.540616 MPa ve üst gövdede 3.051834 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 47: Imperial Valley (1940) Depremi Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U₁ Yönünde, MPa)

Imperial Valley depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri Y (U₂) yönünde; kaide(taban) kısmında 2.164731 MPa, orta gövdede 1.645896 MPa ve üst gövdede 2.857686 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 48: Imperial Valley (1940) Depremi Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U₂ Yönünde, MPa)

3.2.2.2. Parkfield depremi (1966)

1966 Parkfield Depremi, Kaliforniya'daki San Andreas Fay Hattı üzerinde gerçekleşmiş orta büyüklükte bir depremdir. Bölgede deprem öncesi ve sonrası yapılan gözlemler, fay hareketlerinin anlaşılmasına önemli katkılar sağlamıştır (Field vd., 2013).

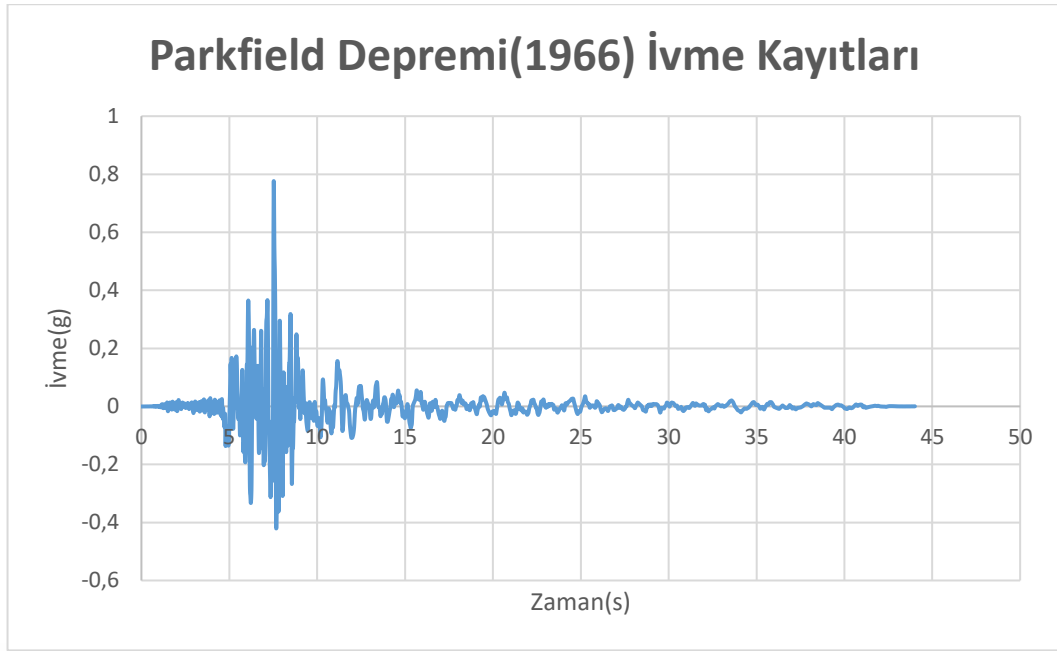
Depremi Özellikleri

- Tarih ve Saat: 22 Haziran 1966, 18:30 (yerel saat)
- Büyüklük: 6.0 (moment büyüklüğü)
- Derinlik: Yaklaşık 8 km
- Fay Tipi: Doğrultu atımlı (strike-slip)
- Etkilenen Alan: Parkfield ve çevresi
- Maksimum Şiddet: VII (Hasar verici)

Zarar ve Etkiler

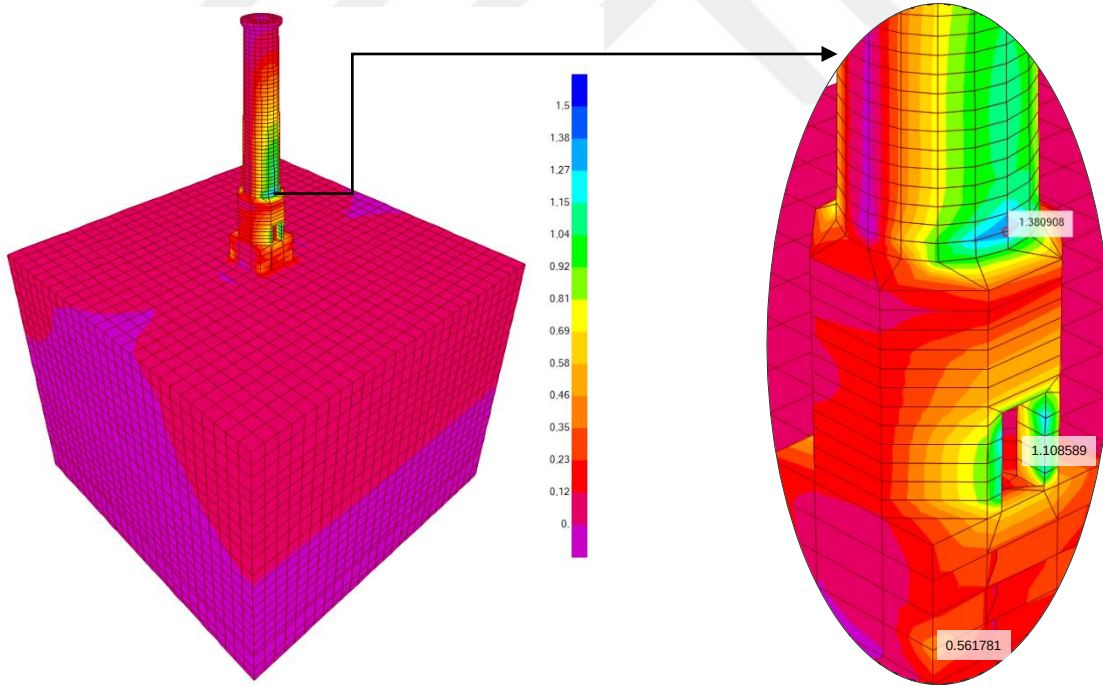
- Ölü Sayısı: Çok az veya yok
- Yaralı Sayısı: Az sayıda rapor edilmiştir
- Evlerini Kaybedenler: Sınırlı sayıda
- Yapısal Zarar: Eski binalarda çatlak ve küçük yıkımlar
- Altyapı Hasarı: Kısa süreli elektrik ve su kesintileri
- Ticaret ve Sanayi: Hafif aksama olmuştur.

Çalışmanın bu kısmında, Melik Sunullah Camii Minaresi 'ne Parkfield Depremi'nin ivme kayıtları uygulanmış ve bu kayıtlar değerlendirilirken, depremin sismik enerji içeriğinin yoğun olarak aktarıldığı 5–10 saniye aralığı esas alınmıştır. Bu aralık, aynı zamanda yer hareketinin yapıya en fazla enerji aktardığı zaman dilimi olup, Arias Şiddeti (Arias Intensity) parametresiyle de desteklenmiştir. Arias Şiddeti, ivme kayıtlarının karelerinin zamanla integrasyonu alınarak hesaplanmış ve seçilen ivme aralığının enerji yoğunluğunu temsil ettiği doğrulanmıştır. Uygulanan bu ivme aralığı kapsamında, yapıya doğrusal olmayan zaman tanım alanında deprem performans analizi yapılmış ve analiz sonucunda minarede oluşan maksimum çekme gerilme değerleri belirlenmiştir.



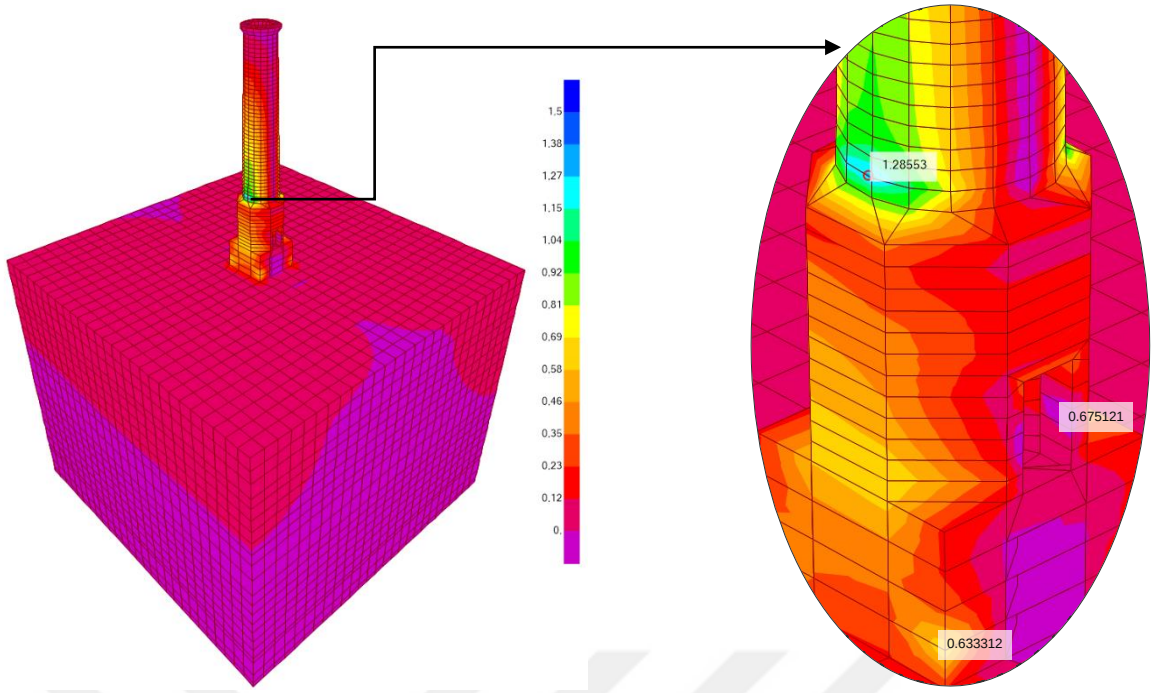
Şekil 49: Parkfield Depremi İvme Kayıtları

Parkfield depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri $X(U_1)$ yönünde; kaide(taban) kısmında 0.561781 MPa, orta gövdede 1.108589 MPa ve üst gövdede 1.380908 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 50: Parkfield Depremi (1966) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U_1 Yönünde, MPa)

Parkfield depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri $Y (U_2)$ yönünde; kaide(taban) kısmında 0.633312 MPa, orta gövdede 0.675121 MPa ve üst gövdede 1.28553 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 51: Parkfield Depremi (1966) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U2 Yönünde, MPa)

3.2.2.3. Managua depremi (1972)

Nikaragua'nın başkenti Managua'da 23 Aralık 1972 tarihinde meydana gelen deprem, ülkenin tarihindeki en yıkıcı doğal afetlerden biridir. Deprem, şehir merkezinde geniş çaplı tahribata yol açmış ve çok sayıda insanın hayatını kaybetmesine neden olmuştur (USGS, 2020).

Depremi Özellikleri

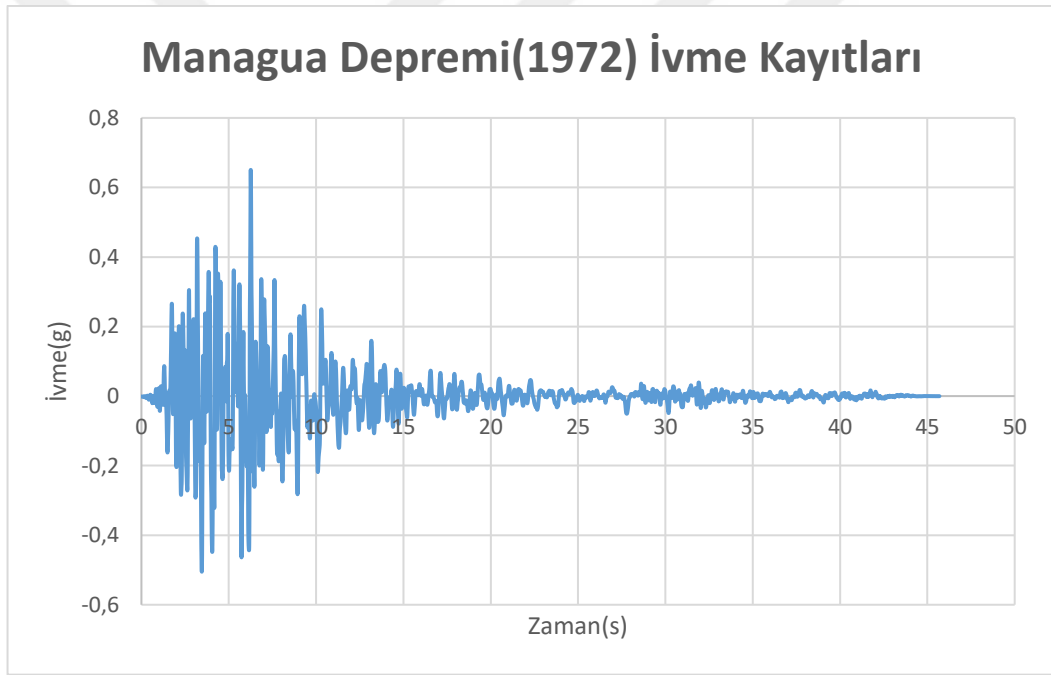
- Tarih ve Saat: 23 Aralık 1972, 00:29 (yerel saat)
- Büyüklük: 6.3 (moment büyüklüğü)
- Derinlik: Yaklaşık 10 km
- Fay Tipi: Sol yanal doğrultu atımlı (left-lateral strike-slip)
- Etkilenen Alan: Managua şehir merkezi, yaklaşık 27 km²
- Maksimum Şiddet: MSK IX (Yıkıcı)

Zarar ve Etkiler

- Ölü Sayısı: 4.000 ila 11.000 arası
- Yaralı Sayısı: Yaklaşık 20.000
- Evlerini Kaybedenler: 300.000'den fazla kişi evsiz
- Yapısal Zarar: 80.000 binanın yaklaşık %75'i yıkılmış veya kullanılamaz.

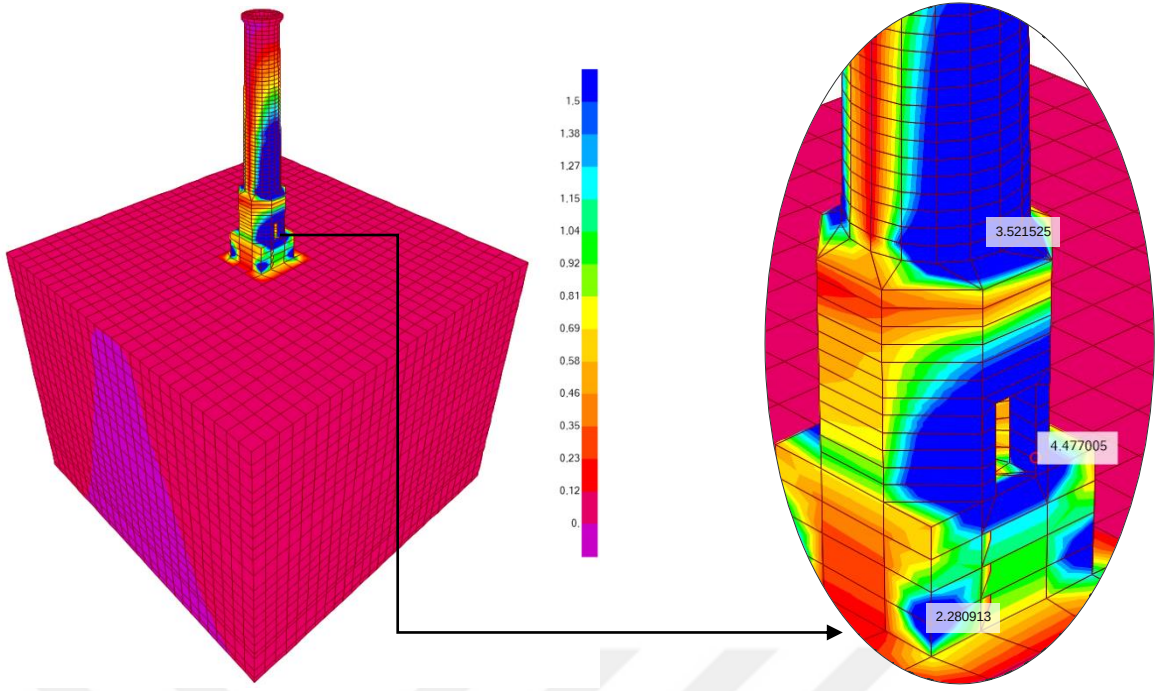
- Altyapı Hasarı: Su ve elektrik şebekeleri büyük zarar görmüş.
- Ticaret ve Sanayi: 300'den fazla mağaza yıkılmış, 100'den fazlası ağır hasar almıştır.

Çalışmanın bu kısmında, Melik Sunullah Camii Minaresi 'ne Managua Depremi'nin ivme kayıtları uygulanmış ve bu kayıtlar değerlendirilirken, depremin sismik enerji içeriğinin yoğun olarak aktarıldığı 0–10 saniye aralığı esas alınmıştır. Bu aralık, aynı zamanda yer hareketinin yapıya en fazla enerji aktardığı zaman dilimi olup, Arias Şiddeti (Arias Intensity) parametresiyle de desteklenmiştir. Arias Şiddeti, ivme kayıtlarının karelerinin zamanla integrasyonu alınarak hesaplanmış ve seçilen ivme aralığının enerji yoğunluğunu temsil ettiği doğrulanmıştır. Uygulanan bu ivme aralığı kapsamında, yapıya doğrusal olmayan zaman tanım alanında deprem performans analizi yapılmış ve analiz sonucunda minarede oluşan maksimum çekme gerilme değerleri belirlenmiştir.



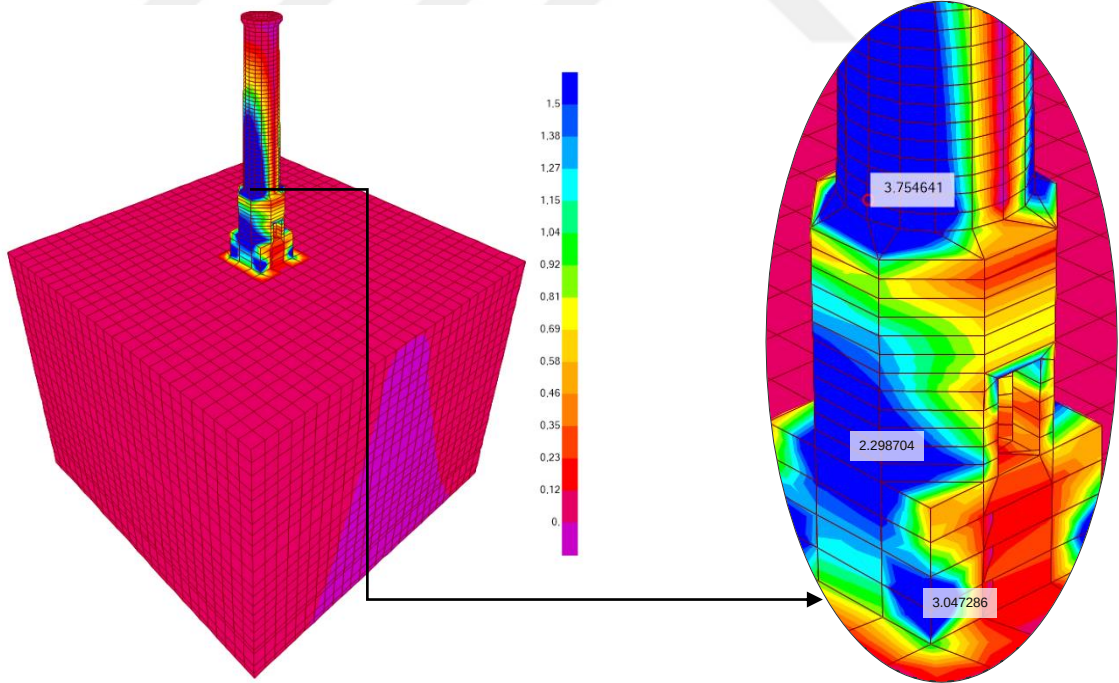
Şekil 52: Managua Depremi İvme Kayıtları

Managua depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri $X(U_1)$ yönünde; kaide(taban) kısmında 2.280913 Mpa, orta gövdede 4.477005 Mpa ve üst gövdede 3.521525 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 53: Managua Depremi (1972) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U_1 Yönünde, MPa)

Managua depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri $Y(U_2)$ yönünde; kaide(taban) kısmında 3.047286 MPa, orta gövdede 2.298704 MPa ve üst gövdede 3.754641 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 54: Managua Depremi (1972) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U_2 Yönünde, MPa)

3.2.2.4. Friuli depremi (1976)

İtalya'nın kuzeydoğusunda, Friuli-Venezia Giulia bölgesinde 6 Mayıs 1976'da meydana gelen deprem, bölgenin tarihindeki en önemli sismik olaylardan biri olarak kabul edilir. Yıkıcı etkileri, özellikle tarihi yapılar ve altyapıda ağır zararlar yaratmıştır (Gasparetto vd., 1978).

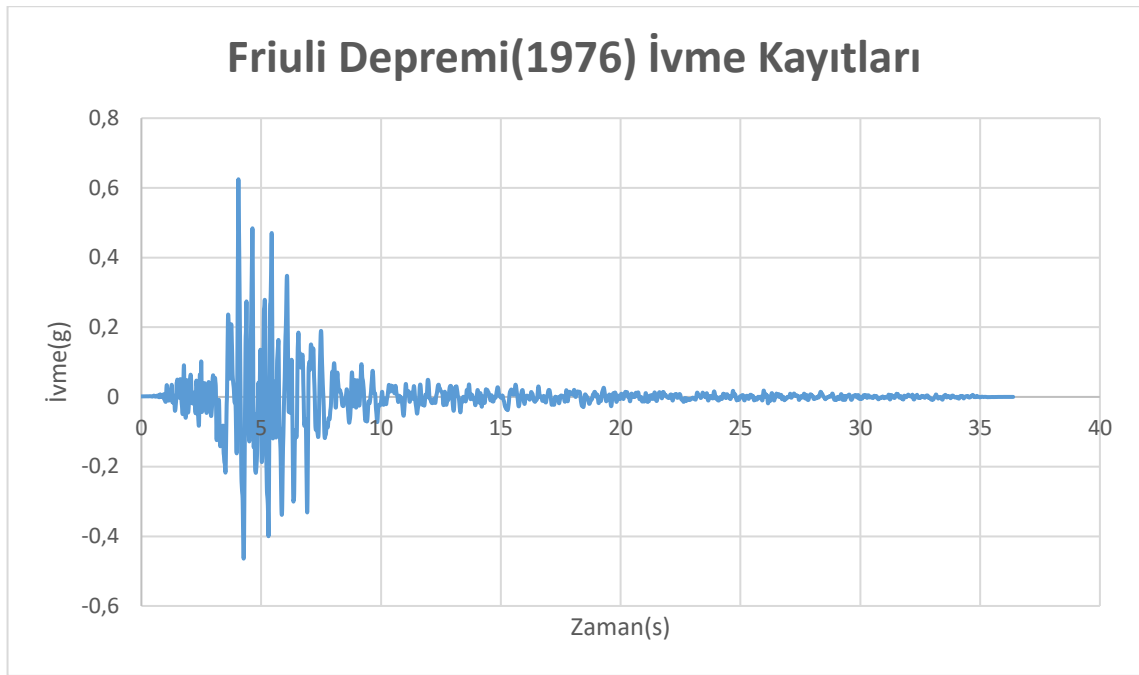
Depremi Özellikleri

- Tarih ve Saat: 6 Mayıs 1976, 21:00 (yerel saat)
- Büyüklük: 6.5 (moment büyüklüğü)
- Derinlik: Yaklaşık 10 km
- Fay Tipi: Normal fay (normal fault)
- Etkilenen Alan: Friuli bölgesi
- Maksimum Şiddet: IX (Yıkıcı)

Zarar ve Etkiler

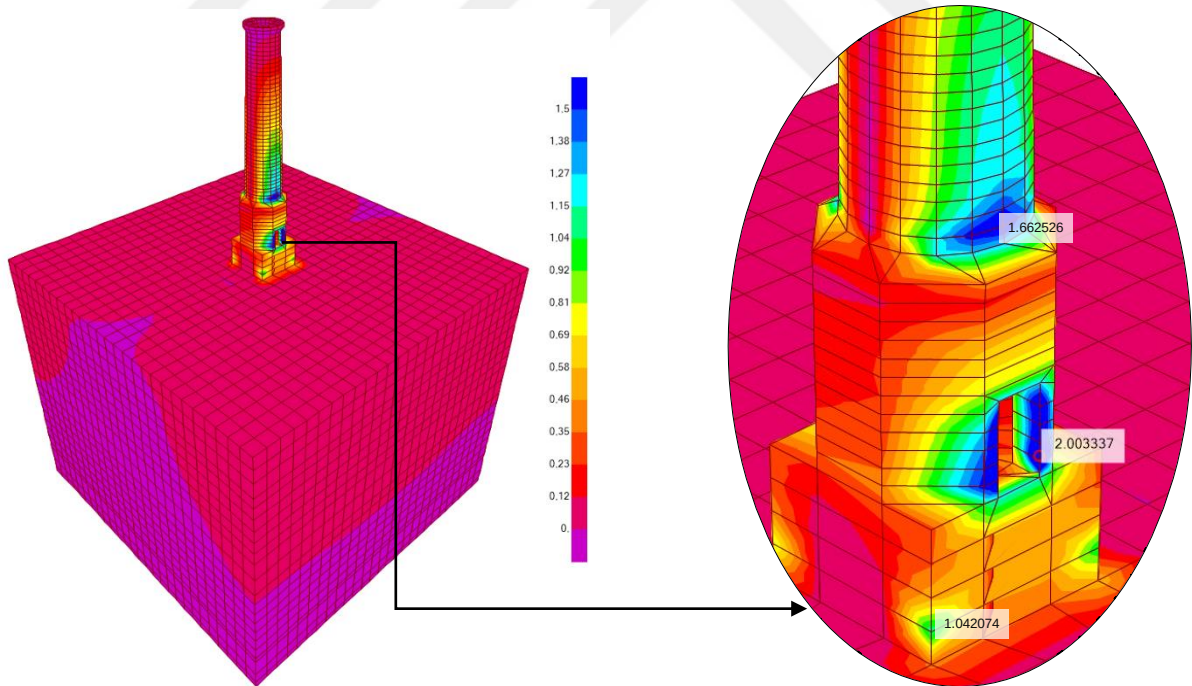
- Ölü Sayısı: 978
- Yaralı Sayısı: 3.000'den fazla
- Evlerini Kaybedenler: On binlerce kişi evsiz kaldı.
- Yapısal Zarar: Çok sayıda bina yıkıldı, tarihi yapılar ağır zarar gördü.
- Altyapı Hasarı: Yol, elektrik ve su altyapısı ciddi zarar gördü.
- Ticaret ve Sanayi: Ekonomik faaliyetler olumsuz etkilendi.

Çalışmanın bu kısmında, Melik Sunullah Camii Minaresi'ne Friuli Depremi'nin ivme kayıtları uygulanmış ve bu kayıtlar değerlendirilirken, depremin sismik enerji içeriğinin yoğun olarak aktarıldığı 1–10 saniye aralığı esas alınmıştır. Bu aralık, aynı zamanda yer hareketinin yapıya en fazla enerji aktardığı zaman dilimi olup, Arias Şiddeti (Arias Intensity) parametresiyle de desteklenmiştir. Arias Şiddeti, ivme kayıtlarının karelerinin zamanla integrasyonu alınarak hesaplanmış ve seçilen ivme aralığının enerji yoğunluğunu temsil ettiği doğrulanmıştır. Uygulanan bu ivme aralığı kapsamında, yapıya doğrusal olmayan zaman tanım alanında deprem performans analizi yapılmış ve analiz sonucunda minarede oluşan maksimum çekme gerilme değerleri belirlenmiştir.



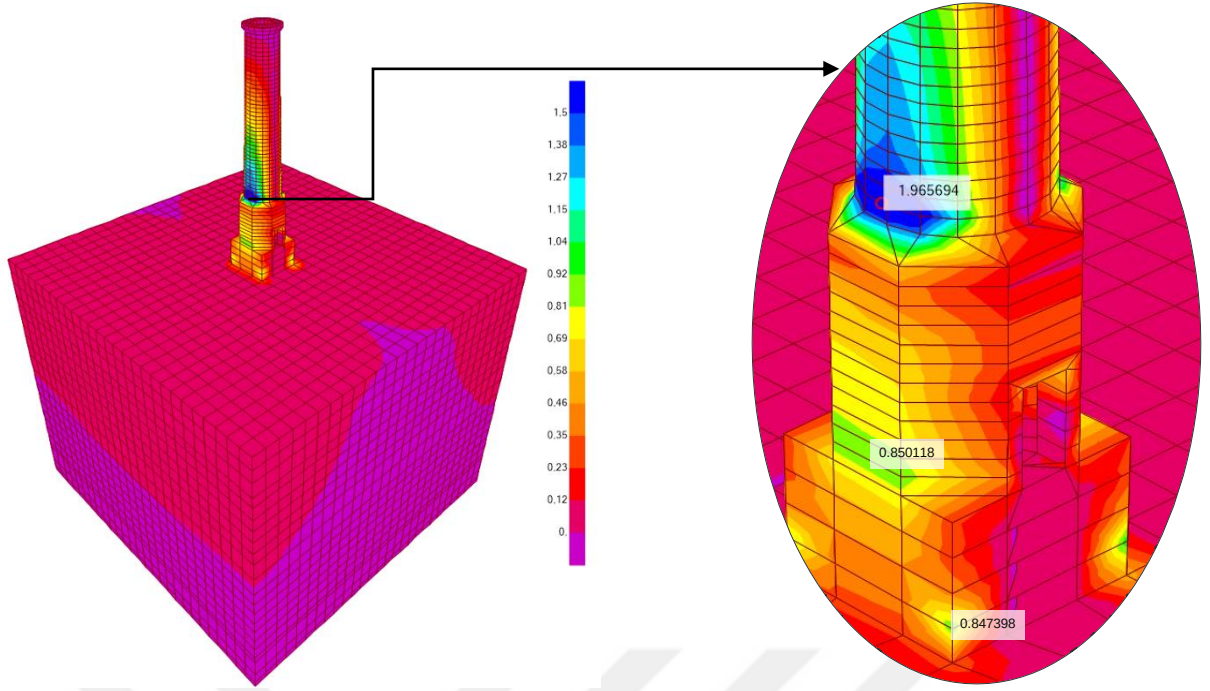
Şekil 55: Friuli Depremi İvme Kayıtları

Friuli depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri X (U_1) yönünde; kaide(taban) kısmında 1.042074 MPa, orta gövdede 2.003337 MPa ve üst gövdede 1.662526 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 56: Friuli Depremi (1976) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U_1 Yönünde, MPa)

Friuli depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri Y (U_2) yönünde; kaide(taban) kısmında 0.847398 MPa, orta gövdede 0.850118 MPa ve üst gövdede 1.965694 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 57: Friuli Depremi (1976) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U2 Yönünde, MPa)

3.2.2.5. Coyote Lake depremi (1979)

6 Ağustos 1979’da San Jose, Kaliforniya bölgesinde meydana gelen Coyote Lake Depremi, orta büyüklükte ve bölgesel etkileri olan bir sarsıntıdır (USGS, 2021).

Depremin Özellikleri

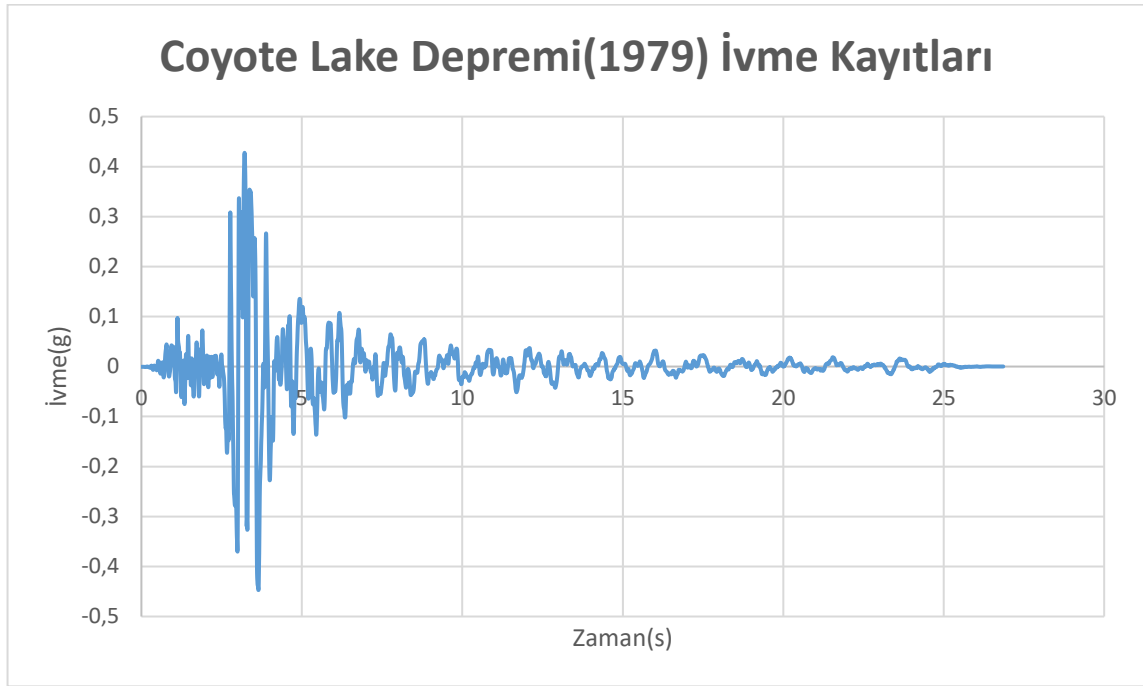
- Tarih ve Saat: 6 Ağustos 1979, 01:05 (yerel saat)
- Büyüklük: 5.7 (moment büyüklüğü)
- Derinlik: Yaklaşık 14 km
- Fay Tipi: Doğrultu atımlı (strike-slip)
- Etkilenen Alan: San Jose çevresi
- Maksimum Şiddet: VI-VII (Orta-Hasar verici)

Zarar ve Etkiler

- Ölü Sayısı: Yok
- Yaralı Sayısı: Az sayıda
- Evlerini Kaybedenler: Çok az
- Yapısal Zarar: Yüzey çatlakları ve hafif hasar
- Altyapı Hasarı: Kısa süreli kesintiler

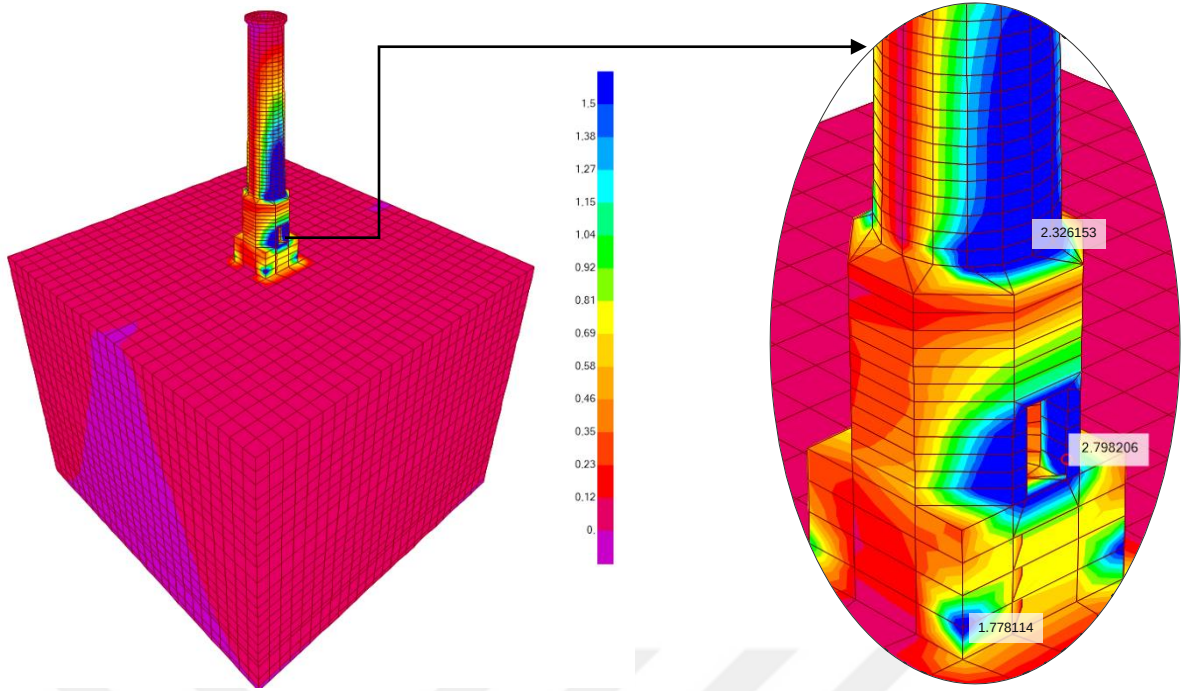
- Ticaret ve Sanayi: Etkilenmedi

Çalışmanın bu kısmında, Melik Sunullah Camii Minaresi ‘ne Coyote Lake Depremi’nin ivme kayıtları uygulanmış ve bu kayıtlar değerlendirilirken, depremin sismik enerji içeriğinin yoğun olarak aktarıldığı 0–7 saniye aralığı esas alınmıştır. Bu aralık, aynı zamanda yer hareketinin yapıya en fazla enerji aktardığı zaman dilimi olup, Arias Şiddeti (Arias Intensity) parametresiyle de desteklenmiştir. Arias Şiddeti, ivme kayıtlarının karelerinin zamanla integrasyonu alınarak hesaplanmış ve seçilen ivme aralığının enerji yoğunluğunu temsil ettiği doğrulanmıştır. Uygulanan bu ivme aralığı kapsamında, yapıya doğrusal olmayan zaman tanım alanında deprem performans analizi yapılmış ve analiz sonucunda minarede oluşan maksimum çekme gerilme değerleri belirlenmiştir.



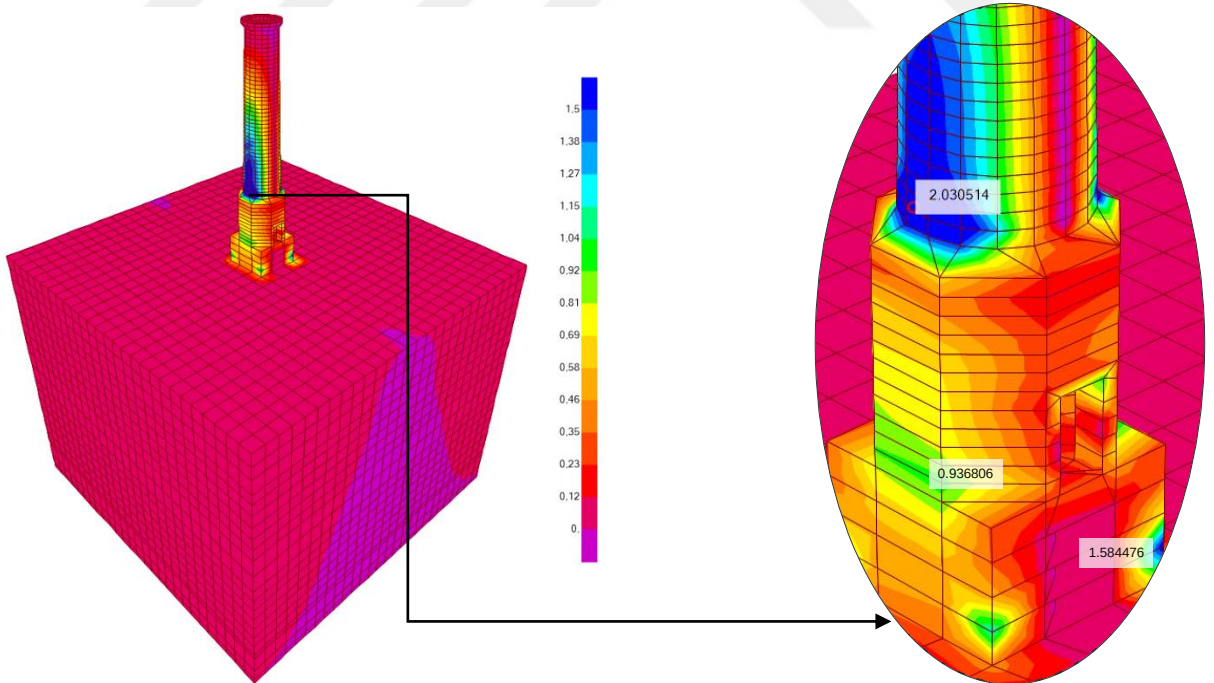
Şekil 58: Coyote Lake Depremi İvme Kayıtları

Coyote Lake depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri $X(U_1)$ yönünde; kaide(taban) kısmında 1.778114 MPa, orta gövdede 2.798206 MPa ve üst gövdede 2.326153 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 59: Coyote Lake Depremi (1979) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U1 Yönünde, MPa)

Coyote Lake depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri Y(U₂) yönünde; kaide(taban) kısmında 1.584476 MPa, orta gövdede 0.936806 MPa ve üst gövdede 2.030514 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 60: Coyote Lake Depremi (1979) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U₂ Yönünde, MPa)

3.2.2.6. Imperial Valley depremi (1979)

15 Ekim 1979'da tekrar aynı bölgede yaşanan Imperial Valley Depremi, ilk depremden farklı olarak bölgedeki sismik riskleri artırmıştır (Hough, 2009).

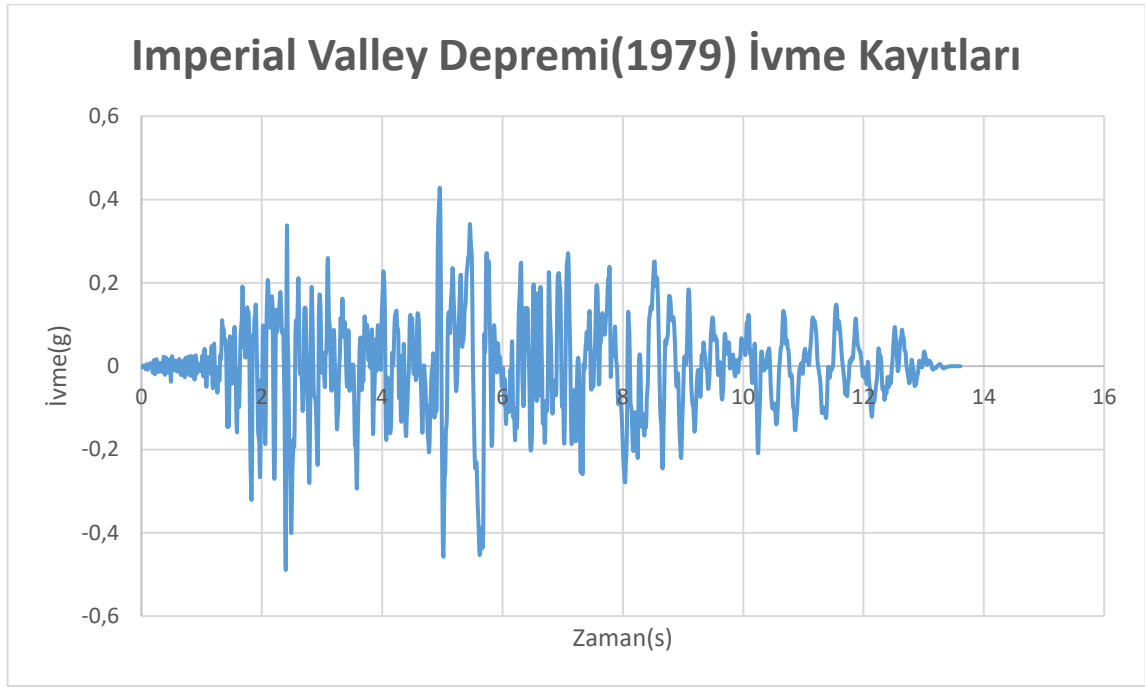
Depremi Özellikleri

- Tarih ve Saat: 15 Ekim 1979, 08:15 (yerel saat)
- Büyüklük: 6.4 (moment büyüklüğü)
- Derinlik: Yaklaşık 10 km
- Fay Tipi: Sol yanal doğrultu atımlı (left-lateral strike-slip)
- Etkilenen Alan: Imperial Valley
- Maksimum Şiddet: VIII (Yıkıcı)

Zarar ve Etkiler

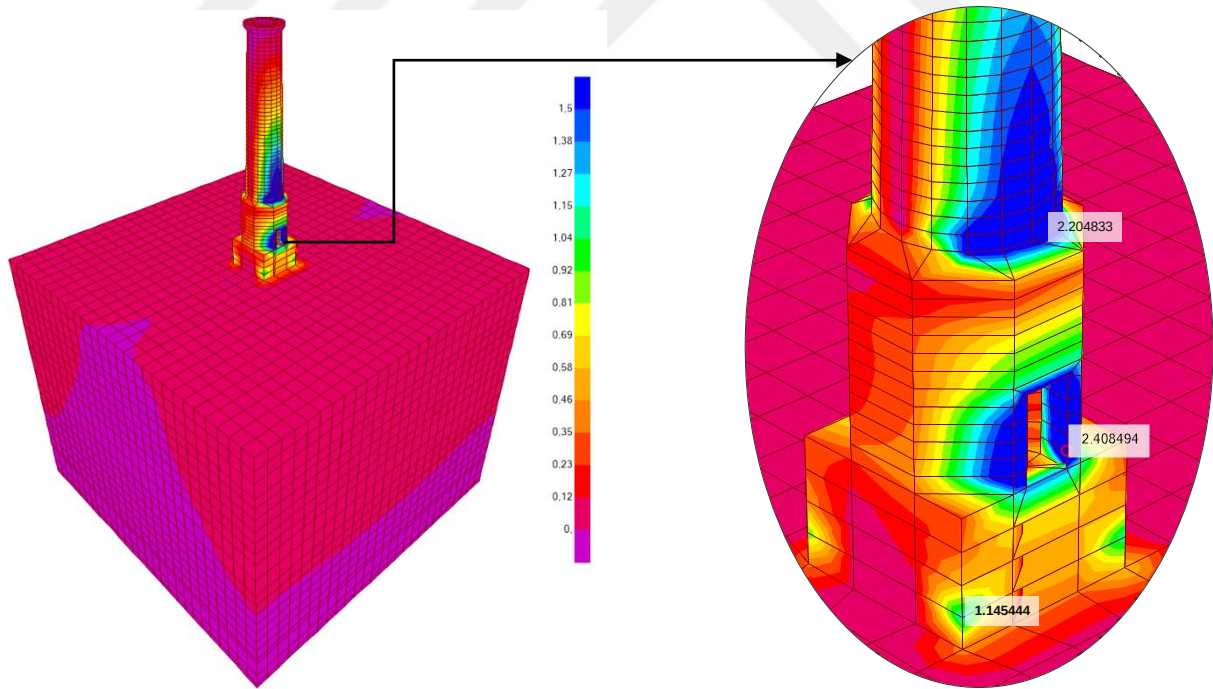
- Ölü Sayısı: 1
- Yaralı Sayısı: 91
- Evlerini Kaybedenler: Çok sayıda kişi evsiz kaldı.
- Yapısal Zarar: Kamu ve özel yapılar hasar gördü.
- Altyapı Hasarı: Enerji ve su hatlarında kesintiler
- Ticaret ve Sanayi: Faaliyetler aksadı.

Çalışmanın bu kısmında, Melik Sunullah Camii Minaresi'ne 1979 Imperial Valley Depremi'nin ivme kayıtları uygulanmış ve bu kayıtlar değerlendirilirken, depremin sismik enerji içeriğinin yoğun olarak aktarıldığı 2–8 saniye aralığı esas alınmıştır. Bu aralık, aynı zamanda yer hareketinin yapıya en fazla enerji aktardığı zaman dilimi olup, Arias Şiddeti (Arias Intensity) parametresiyle de desteklenmiştir. Arias Şiddeti, ivme kayıtlarının karelerinin zamanla integrasyonu alınarak hesaplanmış ve seçilen ivme aralığının enerji yoğunluğunu temsil ettiği doğrulanmıştır. Uygulanan bu ivme aralığı kapsamında, yapıya doğrusal olmayan zaman tanım alanında deprem performans analizi yapılmış ve analiz sonucunda minarede oluşan maksimum çekme gerilme değerleri belirlenmiştir.



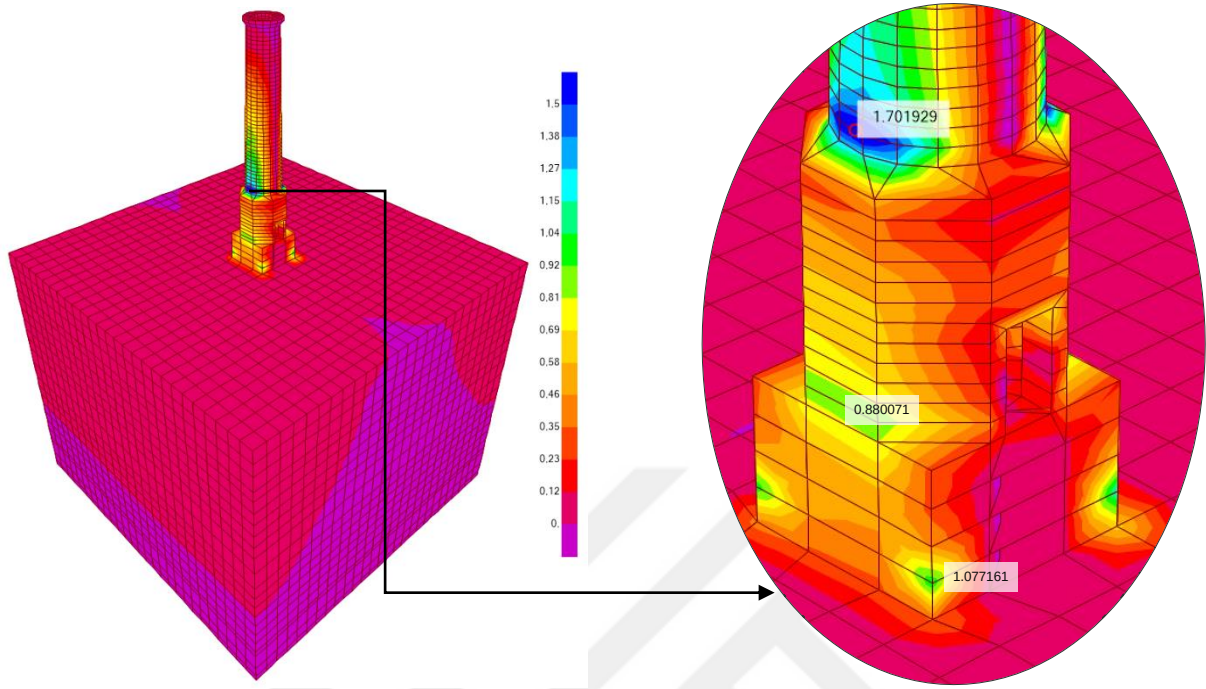
Şekil 61: Imperial Valley Depremi İvme Kayıtları

Imperial Valley depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri $X(U_1)$ yönünde; kaide(taban) kısmında 1.145444 MPa, orta gövdede 2.408494 MPa ve üst gövdede 2.204833 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 62: Imperial Valley Depremi (1979) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U_1 Yönünde, MPa)

Imperial Valley depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri Y (U_2) yönünde; kaide(taban) kısmında 1.077161 MPa, orta gövdede 0.880071 MPa ve üst gövdede 1.701929 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 63: Imperial Valley Depremi (1979) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U_2 Yönünde, MPa)

3.2.2.7. Mammoth Lakes depremi (1980)

1980’de Kaliforniya’nın volkanik bölgesi Mammoth Lakes’te gerçekleşen deprem, bölge sismik aktivitesine işaret etmiştir (Hauksson, 1990).

Depremi Özellikleri

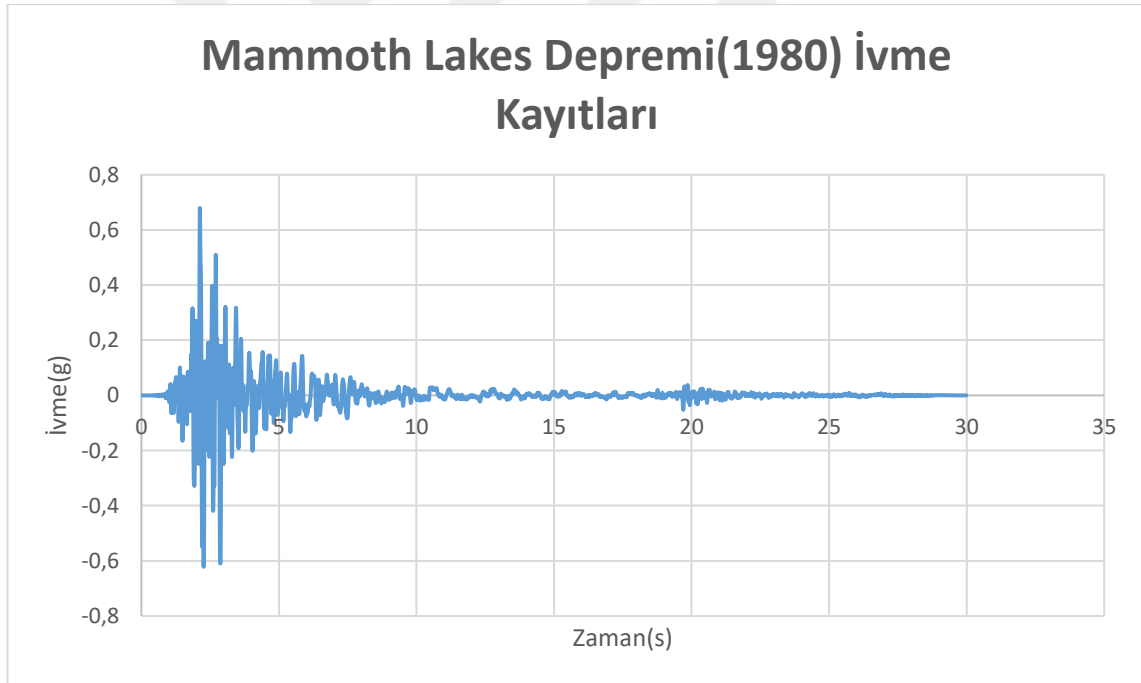
- Tarih ve Saat: 25 Mayıs 1980, 12:30 (yerel saat)
- Büyüklük: 6.0 (moment büyüklüğü)
- Derinlik: Yaklaşık 10 km
- Fay Tipi: Volkanik kökenli fay
- Etkilenen Alan: Mammoth Lakes bölgesi
- Maksimum Şiddet: VII (Hasar verici)

Zarar ve Etkiler

- Ölü Sayısı: Yok
- Yaralı Sayısı: Yok

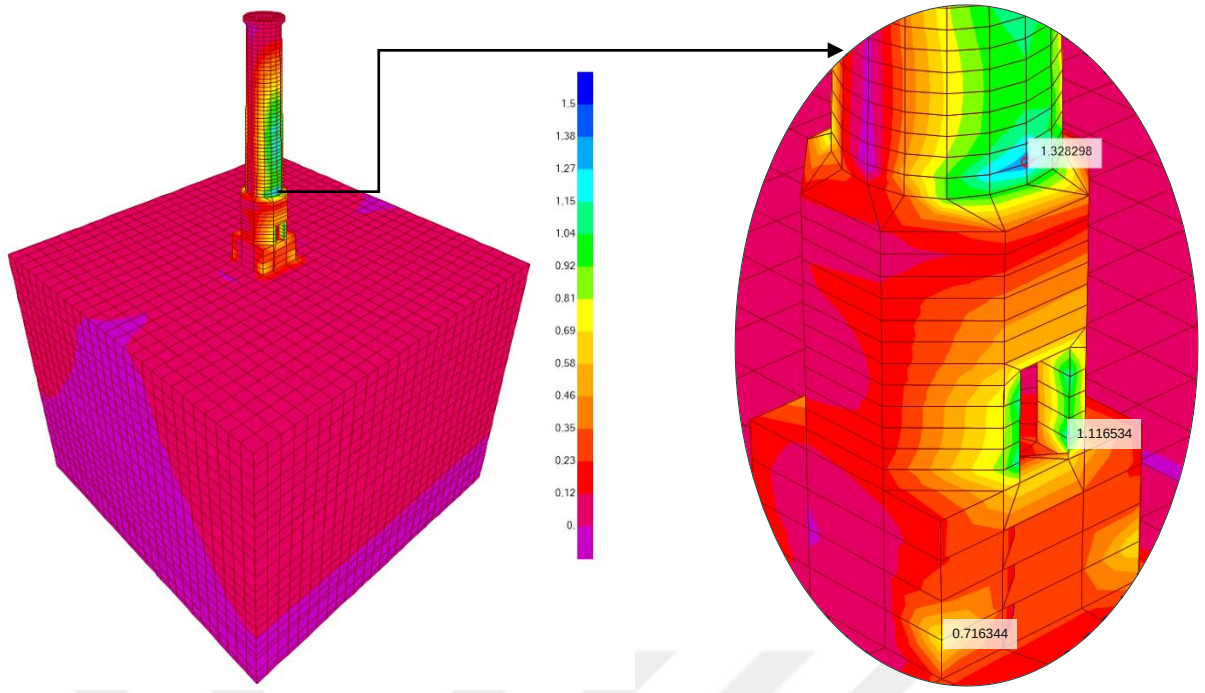
- Evlerini Kaybedenler: Yok
- Yapısal Zarar: Hafif ve orta hasar
- Altyapı Hasarı: Minör kesintiler
- Ticaret ve Sanayi: Etkilenmedi

Çalışmanın bu kısmında, Melik Sunullah Camii Minaresi'ne Mammoth Lakes Depremi'nin ivme kayıtları uygulanmış ve bu kayıtlar değerlendirilirken, depremin sismik enerji içeriğinin yoğun olarak aktarıldığı 1–5 saniye aralığı esas alınmıştır. Bu aralık, aynı zamanda yer hareketinin yapıya en fazla enerji aktardığı zaman dilimi olup, Arias Şiddeti (Arias Intensity) parametresiyle de desteklenmiştir. Arias Şiddeti, ivme kayıtlarının karelerinin zamanla integrasyonu alınarak hesaplanmış ve seçilen ivme aralığının enerji yoğunluğunu temsil ettiği doğrulanmıştır. Uygulanan bu ivme aralığı kapsamında, yapıya doğrusal olmayan zaman tanım alanında deprem performans analizi yapılmış ve analiz sonucunda minarede oluşan maksimum çekme gerilme değerleri belirlenmiştir.



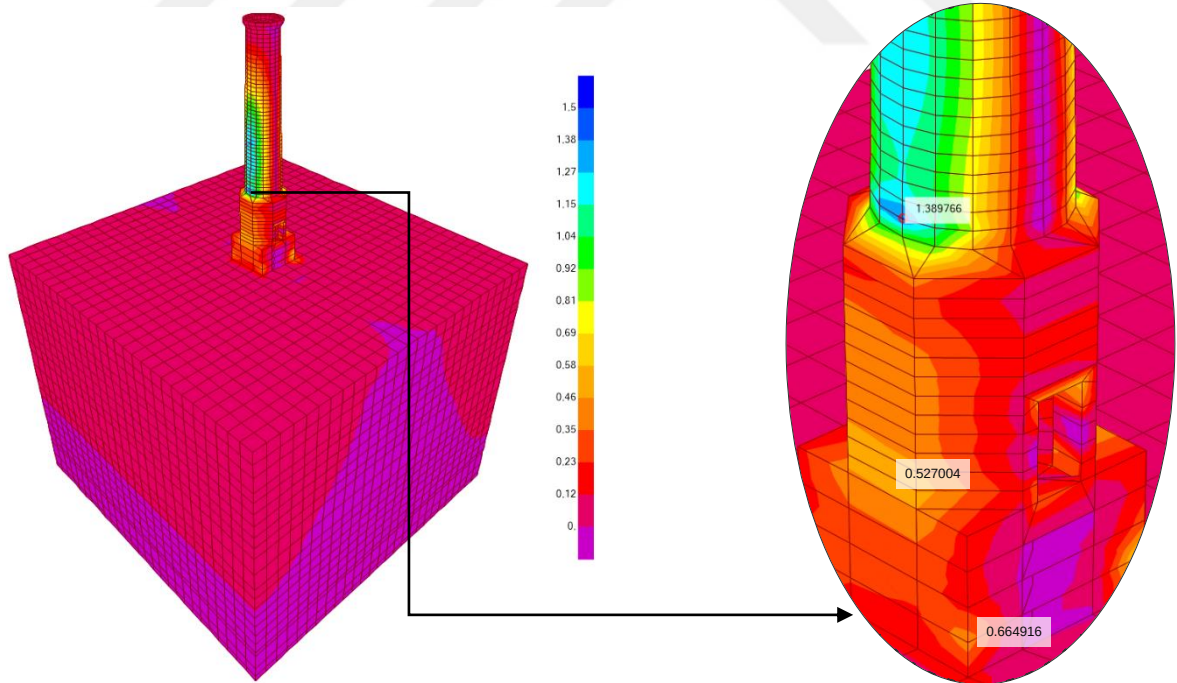
Şekil 64: Mammoth Depremi İvme Kayıtları

Mammoth Lakes depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri X(U1) yönünde; kaide (taban) kısmında 0.716344 MPa, orta gövdede 1.116534 MPa ve üst gövdede 1.328298 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 65: Mammoth Lakes Depremi (1980) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U_1 Yönünde, MPa)

Mammoth Lakes depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri Y (U_2) yönünde; kaide(taban) kısmında 0.664916 MPa, orta gövdede 0.527004 MPa ve üst gövdede 1.389766 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 66: Mammoth Lakes Depremi (1980) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U_2 Yönünde, MPa)

3.2.2.8. Superstition Hills depremi (1987)

1987’de Kaliforniya Imperial Valley çevresinde yaşanan Superstition Hills Depremi, bölgesel riskleri artırmıştır (Hough, 2009).

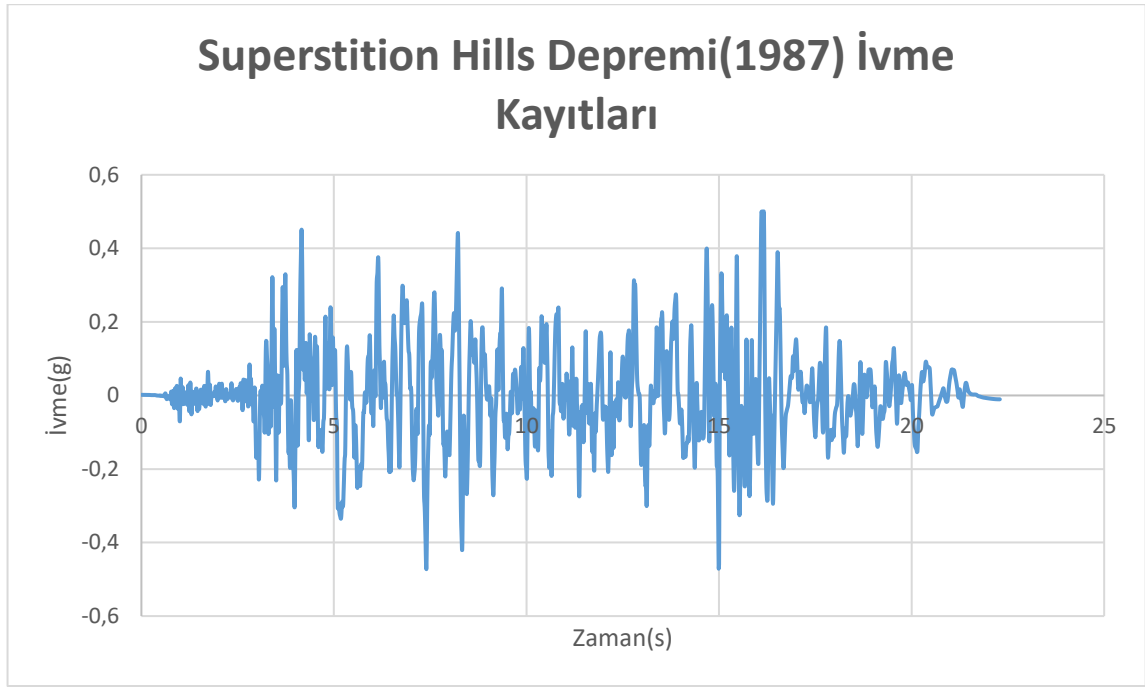
Depremi Özellikleri

- Tarih ve Saat: 24 Kasım 1987, 07:50 (yerel saat)
- Büyüklük: 6.6 (moment büyüklüğü)
- Derinlik: Yaklaşık 12 km
- Fay Tipi: Doğrultu atımlı
- Etkilenen Alan: Imperial Valley
- Maksimum Şiddet: VIII (Yıkıcı)

Zarar ve Etkiler

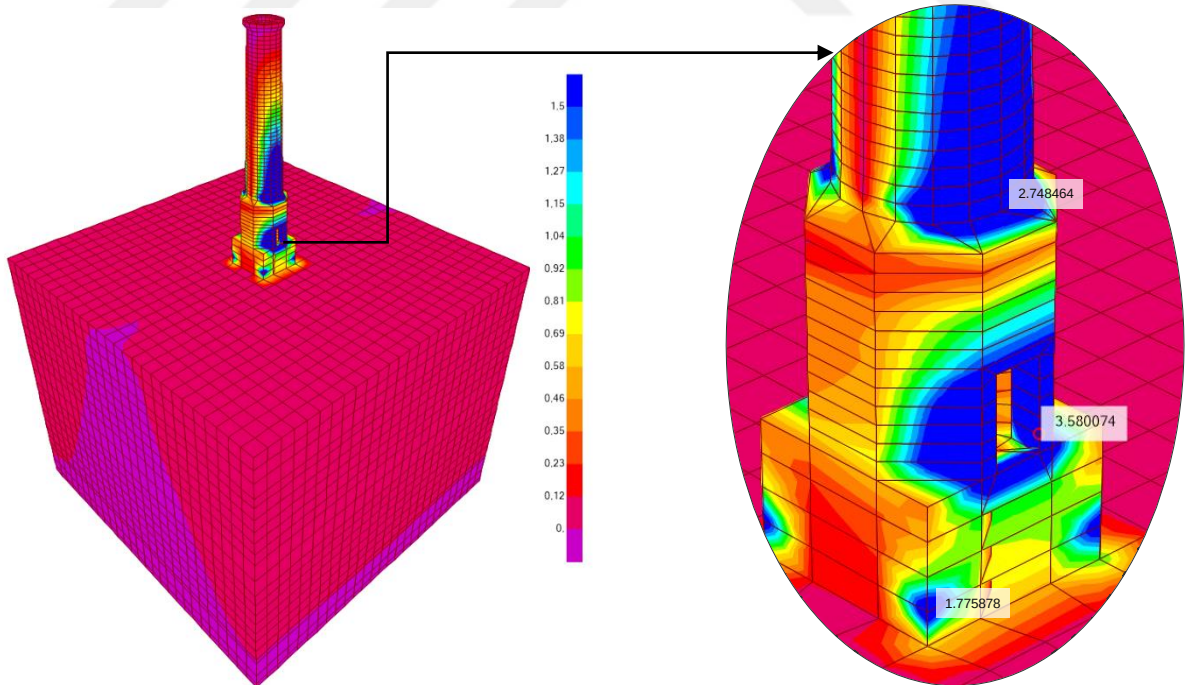
- Ölü Sayısı: 2
- Yaralı Sayısı: 50+
- Evlerini Kaybedenler: Çok sayıda kişi evsiz kaldı.
- Yapısal Zarar: Binalar ve yollar ciddi zarar gördü.
- Altyapı Hasarı: Elektrik ve su kesintileri
- Ticaret ve Sanayi: Ekonomik faaliyetlerde aksama

Çalışmanın bu kısmında, Melik Sunullah Camii Minaresi’ne Superstition Hills Depremi’nin ivme kayıtları uygulanmış ve bu kayıtlar değerlendirilirken, depremin sismik enerji içeriğinin yoğun olarak aktarıldığı 3–17 saniye aralığı esas alınmıştır. Bu aralık, aynı zamanda yer hareketinin yapıya en fazla enerji aktardığı zaman dilimi olup, Arias Şiddeti (Arias Intensity) parametresiyle de desteklenmiştir. Arias Şiddeti, ivme kayıtlarının karelerinin zamanla integrasyonu alınarak hesaplanmış ve seçilen ivme aralığının enerji yoğunluğunu temsil ettiği doğrulanmıştır. Uygulanan bu ivme aralığı kapsamında, yapıya doğrusal olmayan zaman tanım alanında deprem performans analizi yapılmış ve analiz sonucunda minarede oluşan maksimum çekme gerilme değerleri belirlenmiştir.



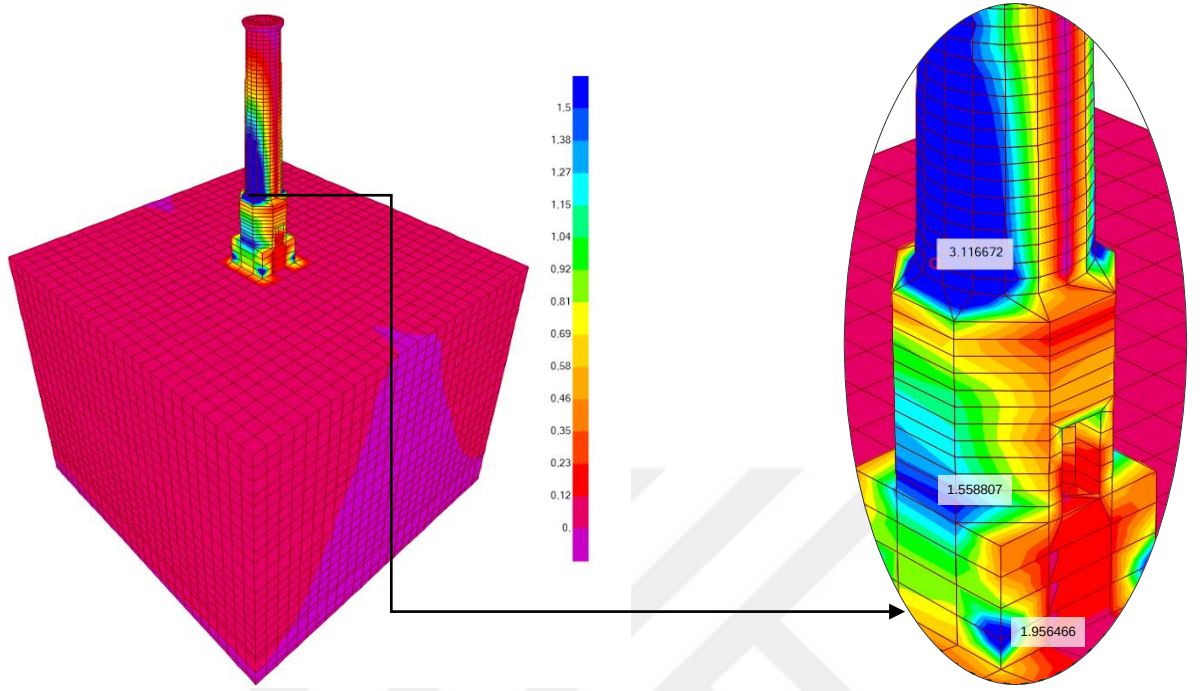
Şekil 67: Supersition Hills Depremi İvme Kayıtları

Superstition Hills depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri $X(U_1)$ yönünde; kaide(taban) kısmında 1.775878 MPa, orta gövdede 3.580074 MPa ve üst gövdede 2.748464 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 68: Superstition Hills Depremi (1987) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U_1 Yönünde, MPa)

Superstition Hills depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri $Y(U_2)$ yönünde; kaide(taban) kısmında 1.956466 MPa, orta gövdede 1.558807 MPa ve üst gövdede 3.116672 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 69: Superstition Hills Depremi (1987) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U_2 Yönünde, MPa)

3.2.2.9. Sierra depremi (1991)

Sierra Nevada bölgesinde 1991’de yaşanan deprem, orta büyüklükte olup, yerel ölçekte etkili olmuştur (USGS, 2022).

Depremi Özellikleri

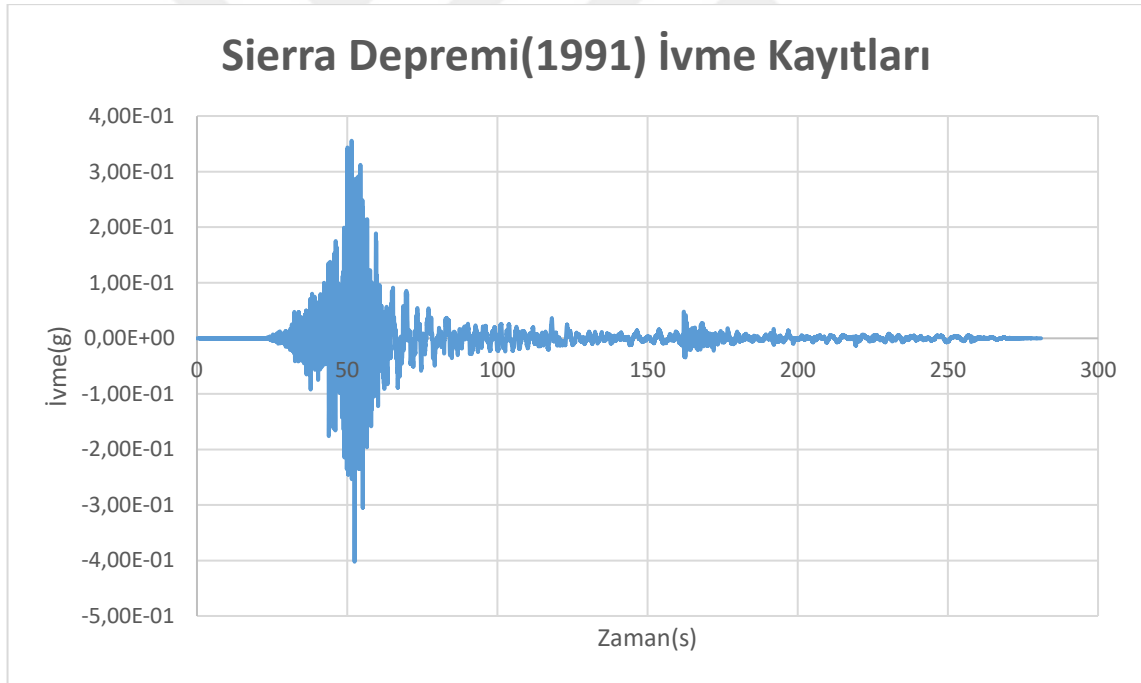
- Tarih ve Saat: 17 Temmuz 1991, 23:15 (yerel saat)
- Büyüklük: 6.2 (moment büyüklüğü)
- Derinlik: Yaklaşık 13 km
- Fay Tipi: Doğrultu atımlı
- Etkilenen Alan: Sierra Nevada
- Maksimum Şiddet: VII-VIII (Hasar verici)

Zarar ve Etkiler

- Ölü Sayısı: Yok
- Yaralı Sayısı: Az sayıda

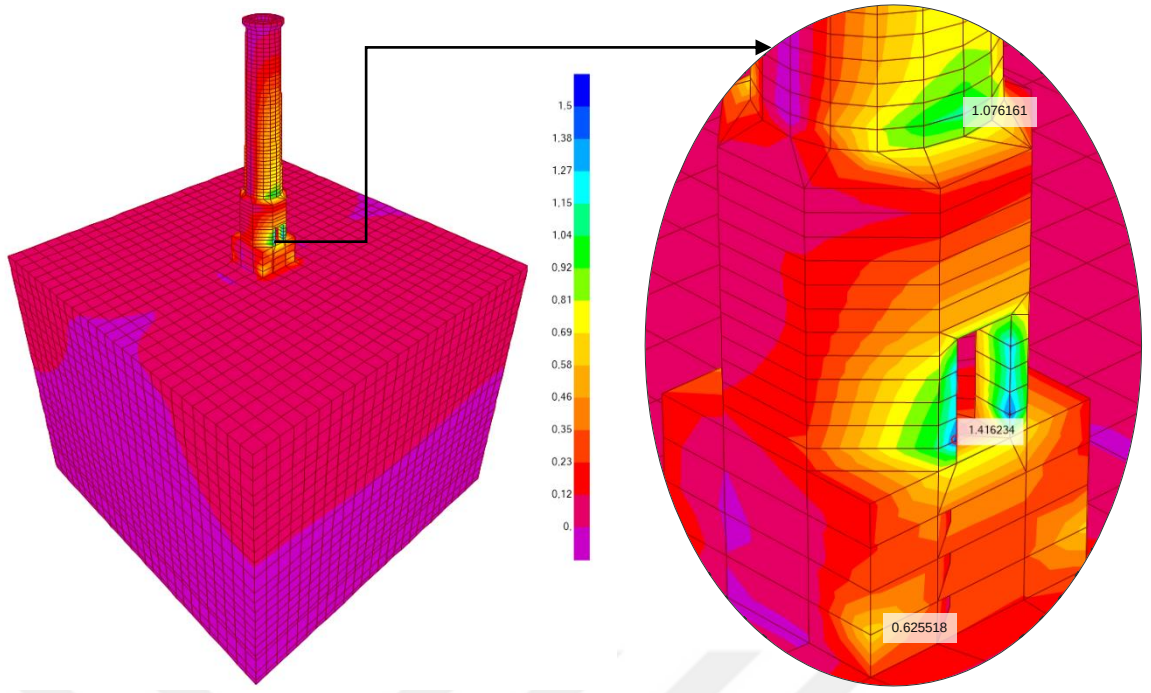
- Evlerini Kaybedenler: Az sayıda
- Yapısal Zarar: Özellikle eski binalarda hasar
- Altyapı Hasarı: Sınırlı tahribat
- Ticaret ve Sanayi: Normal seyrinde

Çalışmanın bu kısmında, Melik Sunullah Camii Minaresi'ne Sierra Depremi'nin ivme kayıtları uygulanmış ve bu kayıtlar değerlendirilirken, depremin sismik enerji içeriğinin yoğun olarak aktarıldığı 30–70 saniye aralığı esas alınmıştır. Bu aralık, aynı zamanda yer hareketinin yapıya en fazla enerji aktardığı zaman dilimi olup, Arias Şiddeti (Arias Intensity) parametresiyle de desteklenmiştir. Arias Şiddeti, ivme kayıtlarının karelerinin zamanla integrasyonu alınarak hesaplanmış ve seçilen ivme aralığının enerji yoğunluğunu temsil ettiği doğrulanmıştır. Uygulanan bu ivme aralığı kapsamında, yapıya doğrusal olmayan zaman tanım alanında deprem performans analizi yapılmış ve analiz sonucunda minarede oluşan maksimum çekme gerilme değerleri belirlenmiştir.



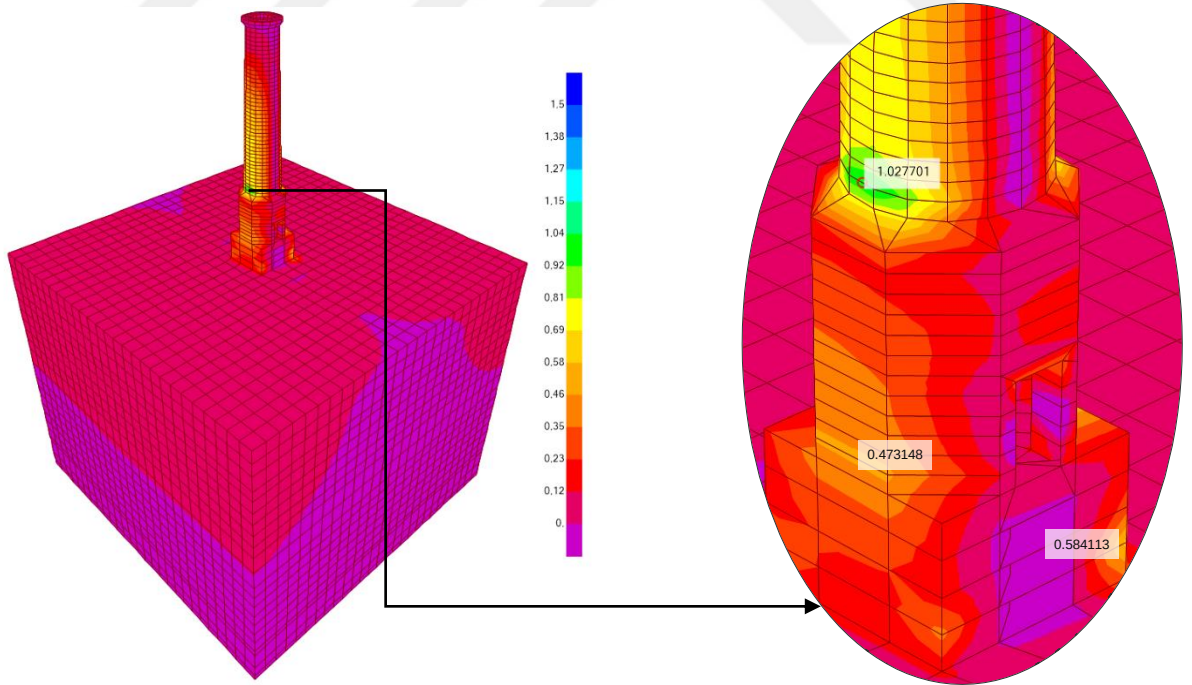
Şekil 70: Sierra Depremi İvme Kayıtları

Sierra depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri $X(U_1)$ yönünde; kaide(taban) kısmında 0.625518 MPa, orta gövdede 1.416234 MPa ve üst gövdede 1.076161 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 71: Sierra Depremi (1991) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U_1 Yönünde, MPa)

Sierra depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri Y (U_2) yönünde; kaide(taban) kısmında 0.584113 MPa, orta gövdede 0.473148 MPa ve üst gövdede 1.027701 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 72: Sierra Depremi (1991) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U_2 Yönünde, MPa)

3.2.2.10. Joshua depremi (1992)

1992 Joshua Tree bölgesinde gerçekleşen deprem, Kaliforniya sismik aktivitesine dikkat çekmiştir (USGS, 2022).

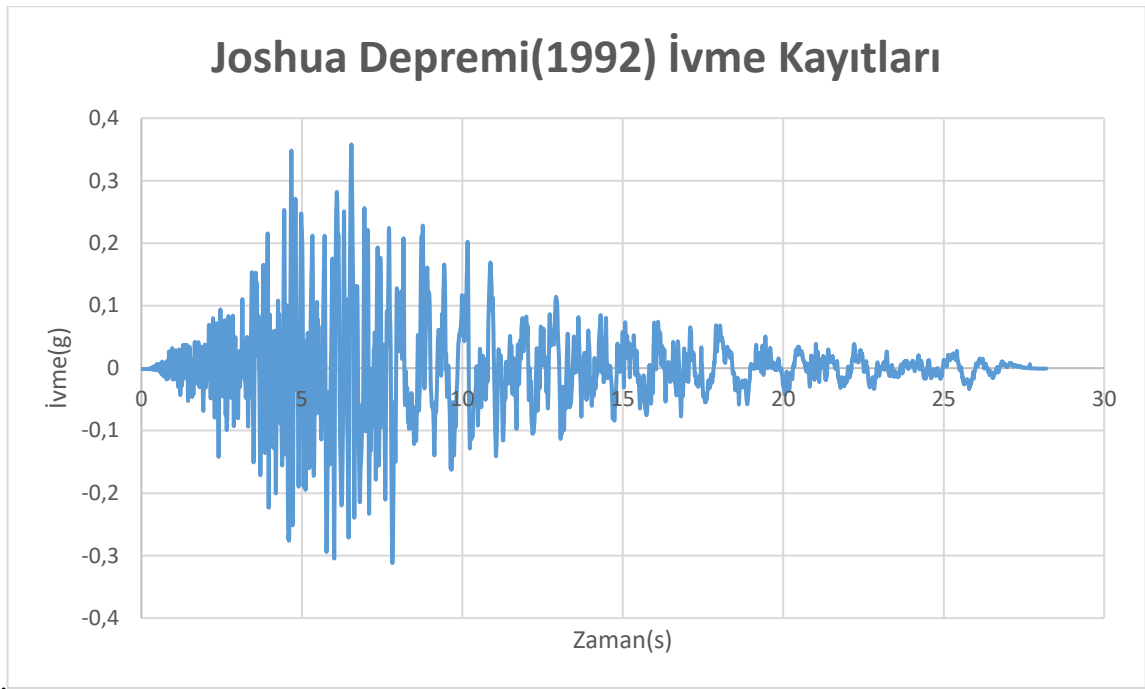
Depremi Özellikleri

- Tarih ve Saat: 28 Nisan 1992, 04:50 (yerel saat)
- Büyüklük: 6.1 (moment büyüklüğü)
- Derinlik: Yaklaşık 8 km
- Fay Tipi: Doğrultu atımlı
- Etkilenen Alan: Joshua Tree bölgesi
- Maksimum Şiddet: VII (Hasar verici)

Zarar ve Etkiler

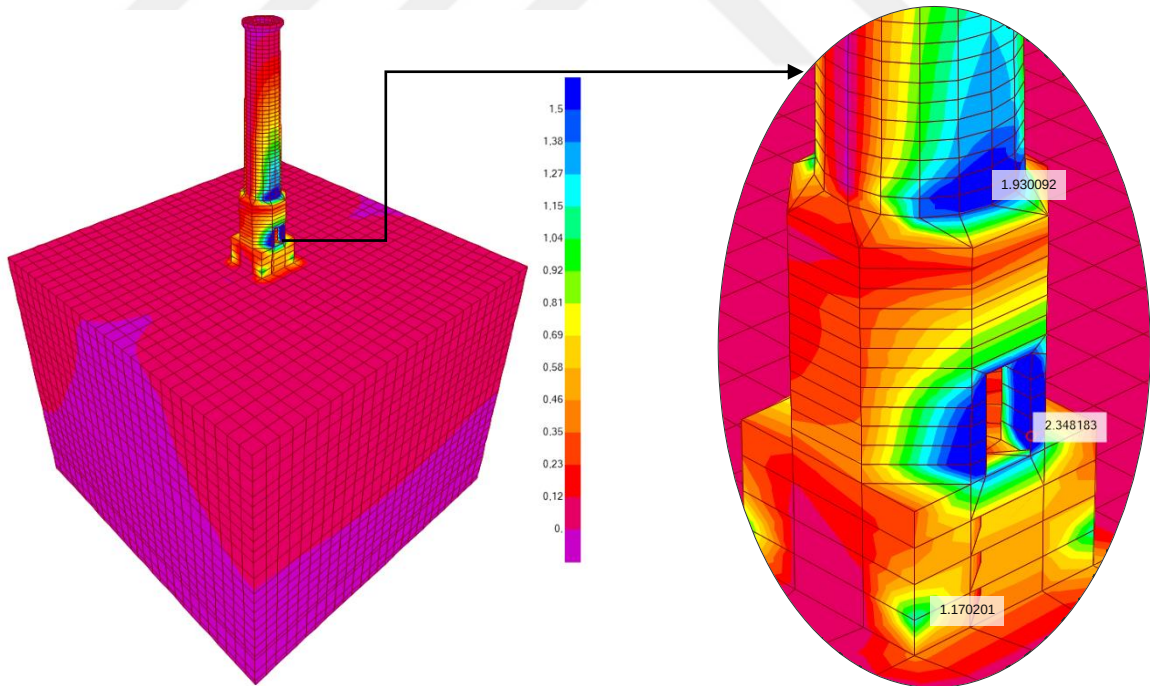
- Ölü Sayısı: Yok
- Yaralı Sayısı: Yok
- Evlerini Kaybedenler: Yok
- Yapısal Zarar: Hafif ve orta hasar
- Altyapı Hasarı: Minör kesintiler
- Ticaret ve Sanayi: Etkilenmedi

Çalışmanın bu kısmında, Melik Sunullah Camii Minaresi'ne Joshua Depremi'nin ivme kayıtları uygulanmış ve bu kayıtlar değerlendirilirken, depremin sismik enerji içeriğinin yoğun olarak aktarıldığı 2–10 saniye aralığı esas alınmıştır. Bu aralık, aynı zamanda yer hareketinin yapıya en fazla enerji aktardığı zaman dilimi olup, Arias Şiddeti (Arias Intensity) parametresiyle de desteklenmiştir. Arias Şiddeti, ivme kayıtlarının karelerinin zamanla integrasyonu alınarak hesaplanmış ve seçilen ivme aralığının enerji yoğunluğunu temsil ettiği doğrulanmıştır. Uygulanan bu ivme aralığı kapsamında, yapıya doğrusal olmayan zaman tanım alanında deprem performans analizi yapılmış ve analiz sonucunda minarede oluşan maksimum çekme gerilme değerleri belirlenmiştir.



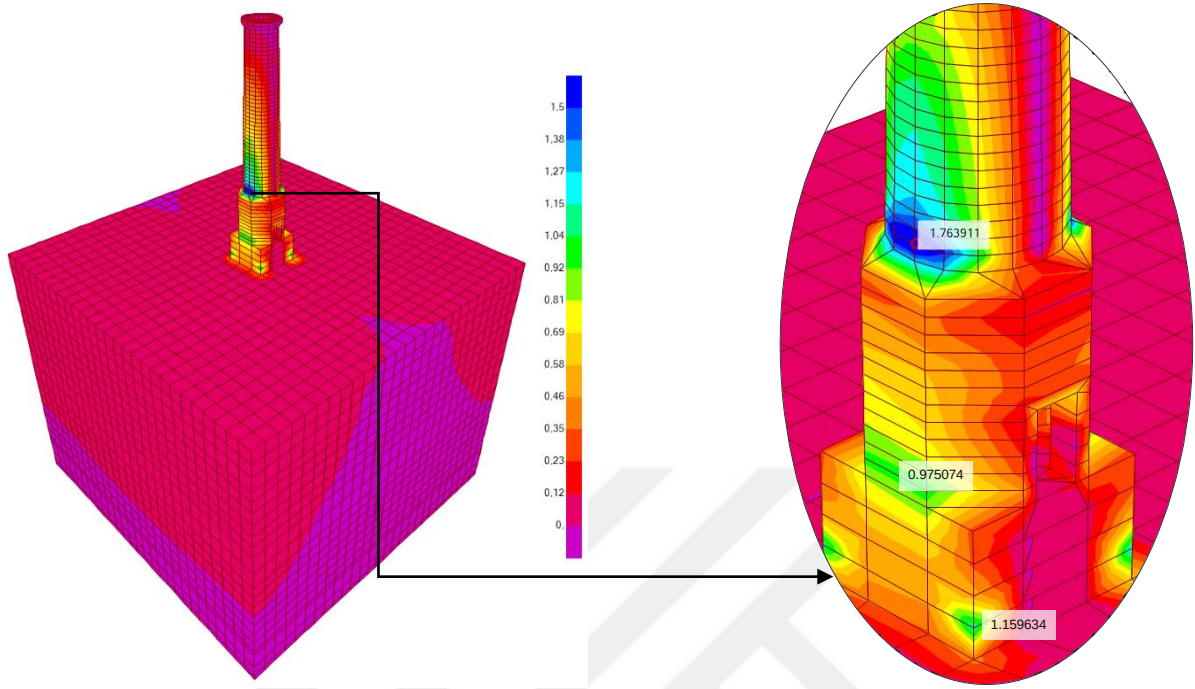
Şekil 73: Joshua Depremi İvme Kayıtları

Joshua depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri $X(U_1)$ yönünde; kaide(taban) kısmında 1.170201 MPa, orta gövdede 2.348183 MPa ve üst gövdede 1.930092 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 74: Joshua Depremi (1992) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U_1 Yönünde, MPa)

Joshua depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri Y (U_2) yönünde; kaide(taban) kısmında 1.159634 MPa, orta gövdede 0.975074 MPa ve üst gövdede 1.763911 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 75: Joshua Depremi (1992) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U_2 Yönünde, MPa)

3.2.2.11. Kahramanmaraş depremi (2023)

Türkiye'nin güneydoğusunda 6 Şubat 2023'te meydana gelen Kahramanmaraş Depremi, ülke tarihinin en yıkıcı sismik olaylarından biri olmuş ve geniş çaplı tahribata neden olmuştur (AFAD, 2023).

Depremi Özellikleri

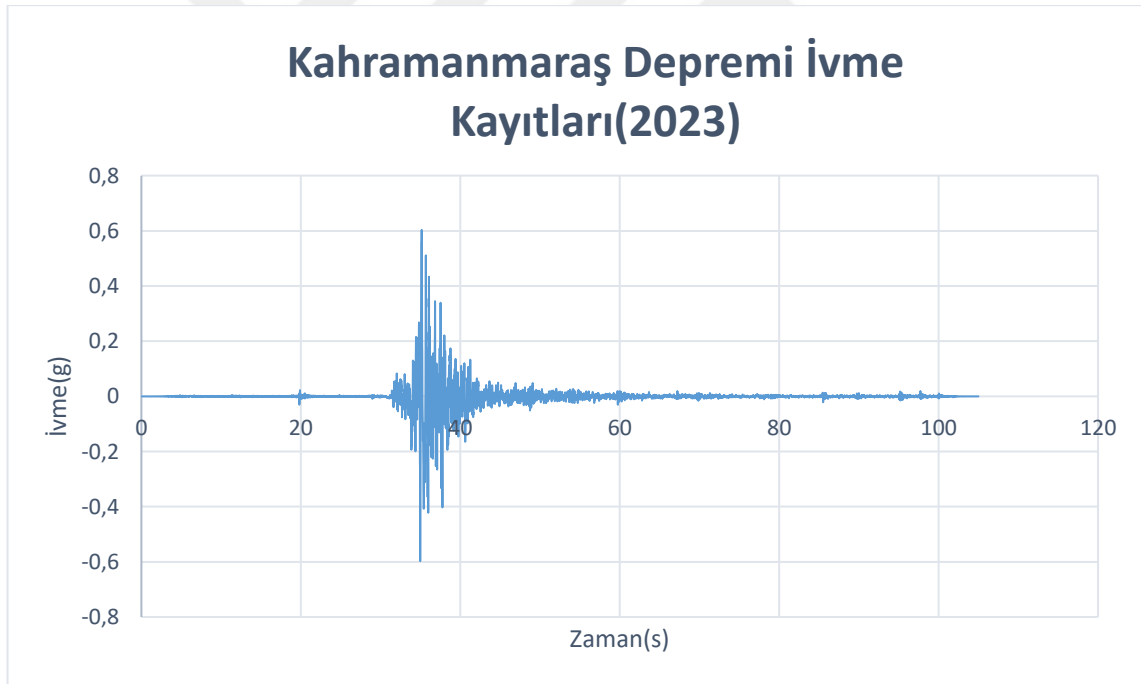
- Tarih ve Saat: 6 Şubat 2023, 04:17 (yerel saat)
- Büyüklük: 7.8 (moment büyüklüğü)
- Derinlik: Yaklaşık 17 km
- Fay Tipi: Doğrultu atımlı
- Etkilenen Alan: Kahramanmaraş ve çevresi
- Maksimum Şiddet: X (Aşırı Yıkıcı)

Zarar ve Etkiler

- Ölü Sayısı: 50.000+
- Yaralı Sayısı: 100.000+

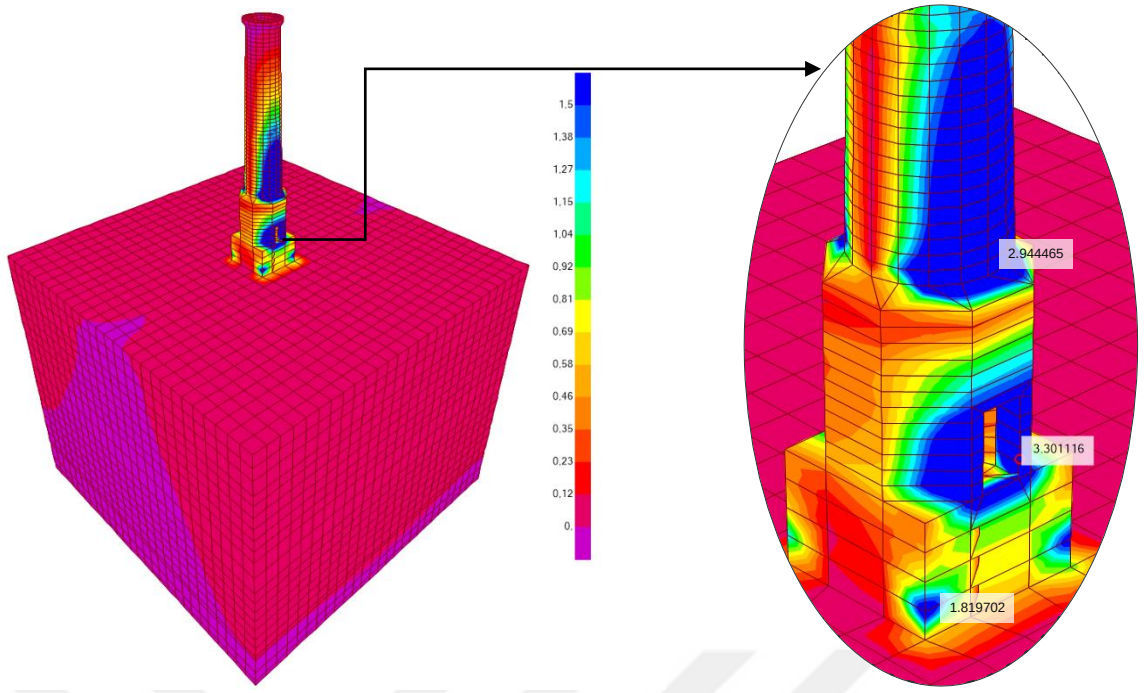
- Evlerini Kaybedenler: On binlerce kişi evsiz kalmıştır.
- Yapısal Zarar: Binlerce bina yıkılmış veya kullanılamaz hale gelmiştir.
- Altyapı Hasarı: Enerji, su ve yol altyapısı ağır zarar görmüştür.
- Ticaret ve Sanayi: Bölge ekonomisi derinden etkilenmiştir.

Çalışmanın bu kısmında, Melik Sunullah Camii Minaresi'ne Kahramanmaraş Depremi'nin ivme kayıtları uygulanmış ve bu kayıtlar değerlendirilirken, depremin sismik enerji içeriğinin yoğun olarak aktarıldığı 33–43 saniye aralığı esas alınmıştır. Bu aralık, aynı zamanda yer hareketinin yapıya en fazla enerji aktardığı zaman dilimi olup, Arias Şiddeti (Arias Intensity) parametresiyle de desteklenmiştir. Arias Şiddeti, ivme kayıtlarının karelerinin zamanla integrasyonu alınarak hesaplanmış ve seçilen ivme aralığının enerji yoğunluğunu temsil ettiği doğrulanmıştır. Uygulanan bu ivme aralığı kapsamında, yapıya doğrusal olmayan zaman tanım alanında deprem performans analizi yapılmış ve analiz sonucunda minarede oluşan maksimum çekme gerilme değerleri belirlenmiştir.



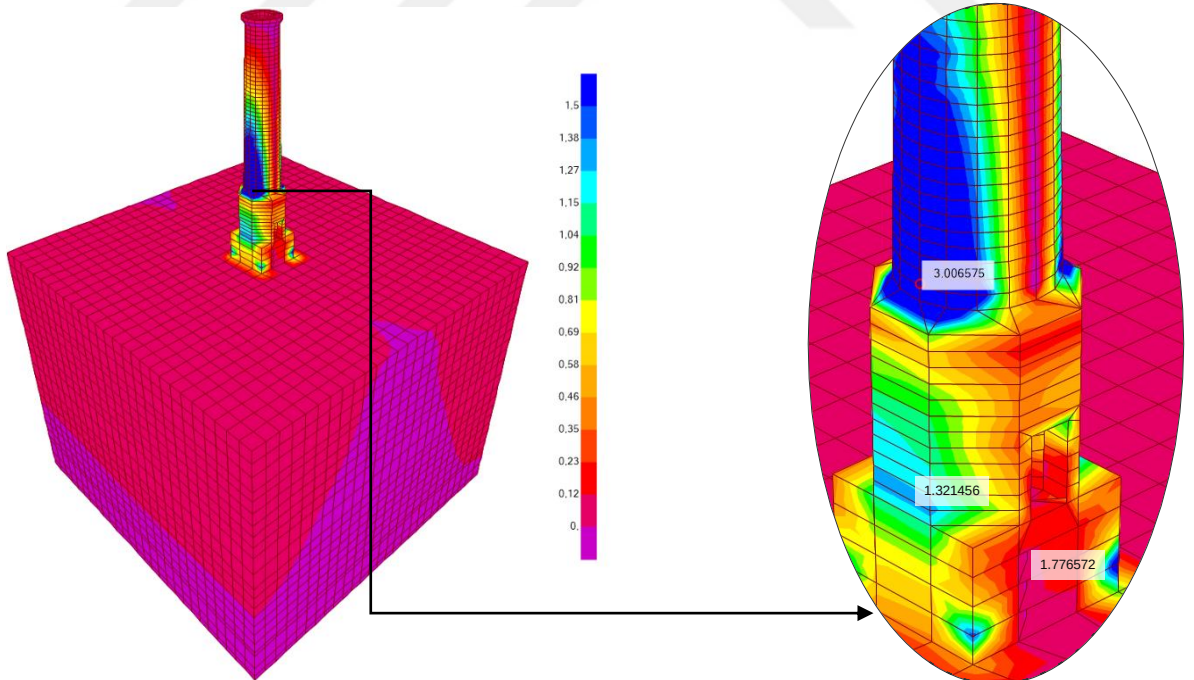
Şekil 76: Kahramanmaraş Depremi İvme Kayıtları

Kahramanmaraş depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri $X(U_1)$ yönünde; kaide(taban) kısmında 1.819702 MPa, orta gövdede 3.301116 MPa ve üst gövdede 2.944465 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 77: Kahramanmaraş Depremi (2023) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U1 Yönünde, MPa)

Kahramanmaraş depremi etkisi altında S33 maksimum çekme gerilme değerleri Y (U₂) yönünde; kaide(taban) kısmında 1.776572 MPa, orta gövdede 1.321456 MPa ve üst gövdede 3.006575 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 78: Kahramanmaraş Depremi (2023) Etkisinde S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri (U2 Yönünde, MPa)

Melik Sunullah Camii Minaresi'ne uygulanan depremlerin analizleri sonucunda oluşan S33 maksimum çekme gerilmeleri aşağıdaki Tablo 23'de gösterilmiştir.

Tablo 23: Uygulanan Depremlerin Analizleri Sonucunda Oluşan S33 Maksimum Çekme Gerilmeleri

Uygulanan Depremler	X(U1) Yönünde Maksimum Çekme Gerilmesi, MPa (Taban)	X(U1) Yönünde Maksimum Çekme Gerilmesi, MPa (Orta Gövde)	X(U1) Yönünde Maksimum Çekme Gerilmesi, MPa (Üst Gövde)	Y(U2) Yönünde Maksimum Çekme Gerilmesi, MPa (Taban)	Y(U2) Yönünde Maksimum Çekme Gerilmesi, MPa (Orta Gövde)	Y(U2) Yönünde Maksimum Çekme Gerilmesi, MPa (Üst Gövde)
Mod Birleştirme						
Yöntemiyle						
Deprem Analizi (TSC 2018)	-	0.740609	-	-	-	0.662277
Imperial Valley (1940)	2.134119	3.540616	3.051834	2.164731	1.645896	2.857686
Parkfield (1966)	0.561781	1.108589	1.380908	0.633312	0.675121	1.285533
Managua (1972)	2.280913	4.477005	3.521525	3.047286	2.298704	3.754641
Friuli (1976)	1.042074	2.003337	1.662526	0.847398	0.850118	1.965694
Coyote Lake (1979)	1.778114	2.798206	2.326153	1.584476	0.936806	2.030514
Imperial Valley (1979)	1.145444	2.408494	2.204833	1.077161	0.880071	1.701929
Mammoth Lakes (1980)	0.716344	1.116534	1.328298	0.664916	0.527004	1.389766
Supersition Hills (1987)	1.775878	3.580074	2.748464	1.956466	1.558807	3.116672
Sierra (1991)	0.625518	1.416234	1.076161	0.584113	0.473148	1.027701
Joshua (1992)	1.170201	2.348183	1.930092	1.159634	0.975074	1.763911
Kahramanmaraş (2023)	1.819702	3.301116	2.944465	1.776572	1.321456	3.005675

SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Sonuç

Bu çalışmada, Malatya ili Battalgazi ilçesinde yer alan ve 14. yüzyıl sonlarında, Memlük Sultanı Melikü'z-Zahir Berkuk döneminde (h. 796 / m. 1394) inşa edilen, önemli bir kültürel miras olan Tarihi Melik Sunullah Camii Minaresi'nin deprem performans analizi değerlendirilmiştir. Yapının mevcut durumu, 2017 yılında geçirdiği restorasyon süreci, yapı malzemelerinin ve zemin özelliklerinin belirlenmesi, yapının depremselliğinin incelenmesi ve gerekli değerlerin belirlenmesi ile birlikte ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Minarenin Malatya Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden alınan röleve çizimleri doğrultusunda SAP2000 yazılımı kullanılarak makro modelleme tekniğine göre üç boyutlu yapısal modeli oluşturulmuş ve dinamik özellikleri incelenmiştir.

Yapının modal analizinden elde edilen birinci doğal titreşim periyodu 0.669 saniye olarak hesaplanmıştır. Bu değer, minare tipi yapılar için literatürde beklenen periyot aralığına yakın bir sonuçtur. Bu çalışmada minare yapısı altına modellenen zemin etkileşimi ile bu doğal titreşim periyodu değeri belirlenmiştir. Örneğin, Işık ve Antep (2018) Bitlis Ahlat Minaresi üzerinde yapılan sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizde birinci periyot değerini 0.639 saniye olarak bulmuşlardır. Ayrıca, Yurda Kul ve ark. (2021) tarafından yapılan bir diğer çalışmada Bayburt'taki 12. yüzyıla ait bir minarede yapılan analizde, 0.70 saniyelik bir birinci periyot değeri elde edilmiştir. Bu değerlerin tümü, yapının rijitliğe yakın bir dinamik karakter sergilediğini ve geleneksel malzemelerle inşa edilmiş tarihi minarelerde modern yapılara göre genellikle daha kısa titreşim periyotlarının gözlemlendiğini destekler niteliktedir.

Çalışmada, zeminin yapının analizine etkisini değerlendirebilmek amacıyla, yapının altına zemin modellemesi eklenmeden, minare tabanındaki düğüm noktalarının ankastre mesnet olarak kabul edilmesi halinde birinci doğal titreşim periyodu 0.474 saniye olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, zemin-yapı etkileşiminin yapısal analizler açısından dikkate alınması gereken önemli bir etken olduğunu ortaya koymaktadır.

Geleneksel, basınca çalışan taş, tuğla ve harç gibi malzemelerin kullanımı, yapıların genellikle daha sert ve rijit olmalarına yol açmaktadır. Bu durum, yapının doğal frekansını artırarak, periyotların daha kısa olmasına neden olur. Ayrıca, minarelerin yüksekliği ve ince yapısal özellikleri de dinamik davranışı etkileyen önemli faktörlerdir. Dolayısıyla, elde edilen periyot değeri, minarenin dinamik karakteristiğini yansıtan uygun bir sonuç olarak değerlendirilebilir.

Modal analiz kapsamında toplamda 20 adet mod şekli dikkate alınmıştır. Kütle katılım oranları incelendiğinde, özellikle sekizinci moddan itibaren x ve y yönünde toplam kütle katılım oranının %95'in üzerine çıktığı belirlenmiştir. Bu oran, deprem etkisi altında yapılan modal analizlerde dikkate alınması gereken mod sayısının belirlenmesinde temel alınmakta olup, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY, 2018) tanımlanan minimum %95 aralığındaki kütle katılım oranı şartını karşılamaktadır. Bu durum, yapı modelinin dinamik davranışını yeterli sayıda modla temsil ettiğini ve yapılan modal analiz sonuçlarının güvenilir olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu bulgu, yapıdaki titreşim enerjisinin büyük ölçüde ilk birkaç modda toplandığını ve yapının yüksek modlara göre daha az etkilenebilir bir davranış sergilediğini ortaya koymaktadır.

Daha sonra SAP2000 ortamında, biri Türkiye'de (2023 Kahramanmaraş Depremi) ve geri kalanı farklı ülkelerde meydana gelmiş toplam 11 adet depremin ivme kayıtları kullanılarak depremler yapı modeline uygulanmış ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Seçilen 11 adet deprem kaydının belirlenmesinde, AFAD (2024) tarafından sağlanan Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması kullanılmış; Melik Sunullah Camii minaresinin bulunduğu konumun (enlem-boylam) zemin sınıfı ve yerel deprem tehlikesi parametreleri göz önünde bulundurulmuştur.

Yapılan doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri sonucunda, minarenin gövde kısmında yer alan tuğla malzeme bölgelerinde yüksek düzeyde çekme gerilmeleri olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun temel nedeni, analiz modelinin hazırlanması sırasında restorasyon sonrası iyileştirilmiş malzeme özelliklerinin değil, yapının tarihi haline ait özgün ve düşük dayanımlı tuğla-harç karakteristiklerinin esas alınmasıdır. Buna karşılık, taban kısmında kullanılan taş malzemede çekme gerilmeleri daha düşük seviyelerde kalmıştır. Ancak saha gözlemlerinde, 2023 Kahramanmaraş Depremi sonrasında yapının özellikle taban kısmında çatlaklar olduğu, gövde kısmında ise belirgin bir hasar meydana gelmediği tespit edilmiştir. Çatlaklara ait görseller Şekil 79-81'de eklerde verilmiştir. Bu farklılık, restorasyonun yapısal performans üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. 2017 yılında gerçekleştirilen restorasyon sırasında, gövde kısmındaki tuğlaların büyük bölümü günümüz malzemeleriyle yenilenmiş; daha yüksek dayanım sağlayan bağlayıcı harçlar ve modern teknikler kullanılmıştır. Buna karşın, taban kısmında yalnızca derz dolgusu gibi sınırlı yüzeysel müdahaleler yapılmış, taşıyıcı taş bloklar ise değiştirilmemiştir. Dolayısıyla analiz sonuçları ile saha gözlemleri arasındaki bu fark, restorasyonun taşıyıcı sistem üzerindeki olumlu etkisini ve müdahale derinliğinin önemini göstermektedir. Bu bölgelerde 2023 Kahramanmaraş Depremi sonrası meydana gelen çatlamlar da saha gözlemleriyle doğrulanmıştır. Yapının büyük ölçüde

ayakta kalması ve ciddi hasar almaması, 2017 yılındaki restorasyon sürecinde kullanılan modern, yüksek dayanımlı harç ve bağlayıcı malzemelere bağlanmaktadır. Ancak çatlakların sadece taban kısmında görülmesi, bu bölgede yapılan müdahalelerin sınırlı kalmasından, yalnızca derz dolgusu yapılmış olmasından kaynaklanmaktadır.

Yapılan deprem analizlerinde minare üzerindeki S_{11} (X yönü), S_{22} (Y yönü) ve S_{33} (Z yönü) maksimum çekme gerilmeleri ayrı ayrı incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, özellikle Z doğrultusundaki S_{33} çekme gerilmelerinin, X ve Y yönlerine kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, Melik Sunullah Camii Minaresi'nin düşeyde yüksek ve ağır bir yapı olması nedeniyle hem kendi ağırlığı hem de yatay deprem etkileri altında oluşan eğilme ve burulma davranışları sonucu Z eksen boyunca daha büyük çekme gerilmeleri oluşmasından kaynaklanmaktadır. S_{11} ve S_{22} gerilmeleri ise yatay deprem yüklerinden kaynaklanmakta olup, bu analizde oldukça düşük seviyelerde kalmıştır. Bu nedenle, tez kapsamında yapının sismik performansının değerlendirilmesinde S_{33} maksimum çekme gerilmeleri esas alınmış, diğer yönlerdeki düşük gerilme değerleri ise değerlendirme dışında tutulmuştur.

Tartışma

Melik Sunullah Camii Minaresi özelinde gerçekleştirilen bu analiz, tarihi yapıların sismik performansının mühendislik temelli yöntemlerle değerlendirilmesinin ne kadar kritik olduğunu bir kez daha ortaya koymuştur. Yapıya 2017 yılında uygulanan restorasyon çalışmalarında özellikle üst bölgelere yönelik müdahalelerin, taşıyıcı sistemin dinamik performansını olumlu yönde etkilediği, 2023 Kahramanmaraş Depremi gibi yüksek şiddetli bir yer hareketi karşısında yapının görece düşük hasarla ayakta kalmasından anlaşılmaktadır. Ancak, temel seviyesine yakın bölgelerde yeterli müdahalenin yapılmamış olması, davranışta düzensizlik oluşturmuş ve özellikle gövde-küp birleşim bölgesinde çatlak oluşumlarına neden olmuştur. Bu durum, restorasyonların sadece estetik ya da lokal değil, yapısal bütünlüğü esas alan bütüncül bir anlayışla ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Elde edilen bu bulgular, literatürde benzer şekilde ortaya konmuş birçok çalışma ile örtüşmektedir. Örneğin, Işık ve Antep (2018) Bitlis Ahlat Minaresi üzerinde yaptıkları çalışmada, farklı deprem senaryoları altında yapılan analizlerde gövde-küp birleşiminde çekme gerilmesi riskine dikkat çekmiştir. Benzer şekilde Yurdakul ve diğerleri (2021) tarafından yapılan modelleme çalışmasında, minarenin gövde kısmında çekme gerilmesinin kritik seviyelere ulaştığı ve hasar riskinin özellikle bu bölgelerde yoğunlaştığı rapor edilmiştir. Bu doğrultuda, Melik Sunullah Camii minaresinde gözlemlenen çatlakların benzer dinamik etkilerle oluşmuş olması, elde edilen verilerin literatürle tutarlı olduğunu göstermektedir.

Ayrıca, Yetkin ve diğerleri (2021) tarafından Elazığ'daki minareler üzerinde yapılan gözlem çalışmasında da özellikle şerefe altı ve gövde-küp birleşiminde çatlak ve lokal göçmelerin sıkça gözlemlendiği belirtilmiş, bu durumun yönetmeliksel düzeyde yeniden ele alınması gerektiği vurgulanmıştır. Bu da restorasyon sürecinde taşıyıcı davranışın detaylı analizlerle desteklenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Soyluk ve Demircan (2023) tarafından 2023 Kahramanmaraş Depremleri sonrasında yapılan analizlerde de benzer biçimde en yoğun hasarın petek, şerefe ve küp bölgelerinde olduğu belirlenmiş, bu alanlarda çekme çatlaklarının yaygın olduğu ve güçlendirme çalışmalarının bu noktalarda yoğunlaştırılması gerektiği ifade edilmiştir. Melik Sunullah Camii minaresinde de benzer çatlak örüntülerinin gözlemlenmesi, çalışmanın saha ile uyumlu sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Çalışmada kullanılan 11 farklı deprem kaydının, sadece Türkiye'ye özgü değil, uluslararası büyük depremleri de kapsayacak şekilde seçilmiş olması, minarenin farklı periyot içeriklerine sahip yer hareketlerine karşı nasıl tepki verdiğini anlamak açısından önemlidir. Yayla (2024) tarafından Aksaray'daki bir minarede yürütülen çalışmada da farklı deprem yönlerine göre gerilme birikimlerinin değiştiği, özellikle kapı ekseninde kritik davranış olduğu belirlenmiştir. Benzer bir metodoloji bu çalışmada da uygulanarak, deprem yönünün ve yapının geometrik özelliklerinin sismik performansa etkisi değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, elde edilen veriler hem teorik hem de pratik açıdan literatürdeki güncel çalışmalarla yüksek düzeyde tutarlılık göstermektedir. Kullanılan sonlu elemanlar yöntemi, geleneksel yapı malzemelerinin gerilme ve deformasyon davranışlarını detaylı şekilde gözlemlemeye olanak sağlamış; seçilen 11 adet deprem kaydı ise farklı dinamik özelliklerin yapıya etkilerini incelemek açısından çeşitlilik sunmuştur. Bu yöntemler, hem yapı özelinde doğru tanımlamalara ulaşmak hem de restorasyon öncesi ve sonrası müdahalelerin etkinliğini değerlendirmek açısından tercih edilmiştir.

Öneriler

- **Yapısal Restorasyon Uygulamalarının Genişletilmesi:** Tarihi yapıların sadece üst bölümlerine değil, temelden çatıya kadar tüm taşıyıcı elemanlarına yapısal müdahaleler yapılmalıdır. Özellikle temel ve zemin seviyesindeki güçlendirmeler ihmal edilmemelidir.
- **Deprem Kayıtlarının Çeşitliliği Artırılmalı:** Yalnızca yerel değil, farklı bölgelerde meydana gelmiş uluslararası deprem kayıtlarının da analizlerde kullanılmasına önem

verilmelidir. Bu yaklaşım, tarihi yapıların çeşitli sismik senaryolar karşısındaki davranışını daha kapsamlı ortaya koyacaktır.

- **Malzeme Seçimi Bilimsel Testlere Dayanmalıdır:** Restorasyonda kullanılan modern malzemelerin taşıyıcı özellikleri, yerinde ve laboratuvar ortamında test edilerek belirlenmeli; tarihi yapının mevcut malzeme karakteristikleriyle uyumlu ürünler tercih edilmelidir.
- **Zemin-Yapı Etkileşimi Dikkate Alınmalıdır:** Zayıf zemin koşullarında bulunan tarihi yapılarda, özellikle yüksek ve rijit yapı elemanlarında (örneğin minarelerde) zemin-yapı etkileşimi detaylı şekilde analiz edilmelidir.
- **Performans İzleme Sistemleri Kurulmalıdır:** Restorasyon sonrasında yapıya ilişkin uzun vadeli yapısal sağlık izleme sistemleri kurulmalı; çatlak genişliği, eğilme, yer değiştirme gibi veriler düzenli olarak toplanmalıdır. Bu veriler gelecekteki güçlendirme stratejileri için önemli bir referans olacaktır.

KAYNAKÇA

- AFAD Genel Müdürlüğü. (2023). *06 Şubat 2023 Pazarcık–Elbistan (Kahramanmaraş) Depremleri saha çalışmaları ön değerlendirme raporu* [Preliminary assessment report of field studies]. AFAD. https://deprem.afad.gov.tr/assets/pdf/Kahramanmaras%20Depremleri_%20On%20Değerlendirme%20Raporu.pdf adresinden edinilmiştir.
- AFAD. (2024). *Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması*. <https://tdth.afad.gov.tr> adresinden edinilmiştir.
- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). (2019). *Türkiye Deprem Tehlike Haritası*. T.C. İçişleri Bakanlığı. <https://tdth.afad.gov.tr> adresinden edinilmiştir.
- Aköz, A. H. (2008). *Deprem etkisi altındaki tarihi yağma yapıların onarım ve güçlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 251615)
- Akyol, A. A., Aksoy, E., & Kadioğlu, Y. K. (2022). Malatya Ulu Camii mimari, dekoratif ve yapısal malzemelerinin arkeometrik karakterizasyonu. *Amisos*, 7(13), 274-298. <https://doi.org/10.48122/amisos.1175555>
- Armağan, K. (2012). *Tarihi yapılarında kullanılan fonksiyonelliğin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 320777)
- Aslan, E., & Satıcı, B. (2022). Tarihi yapılarda bozulmalar ve depremden korunma yöntemlerinin incelenmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 4(2), 47-56. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/icujtas/issue/64668/890405>
- Aşık, F. M. (2018). *Tarihi yapılarda taşıyıcı sistem özellikleri, hasarlar için onarım ve güçlendirme teknikleri, zemburi mescidi'nin model analizi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 929913).
- Aşıkoğlu, A. (2018). *Numerical investigation on the effectiveness of seismic retrofitting of a historical masonry mosque* (MSc thesis). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 511838)
- Aydoğmuş, F. (2019). *Klasik yöntem ve vksel yöntemi ile tarihi yapıların modellenmesi ve analizi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 600257).
- Aymelek, A., Yanık, Y., Demirtaş, B., Yıldırım, Ö., Çalık, İ., & Türker, T. (2023). Full-scale structural evaluations of İskenderpaşa minaret. *Structures*, 55, 1028-1044. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.06.055>
- Bağbancı, M. B. (2009). *Tarihi yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle analizinin Bursa Ördekli hamamı örneğinde incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 246418)
- Başaran, H., Demir, A., Ercan, E., Nohutcu, H., Hökelekli, E., & Kozanoğlu, C. (2016). Investigation of seismic safety of a masonry minaret using its dynamic characteristics. *Earthquakes and Structures*, 10(3), 523-538. DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/eas.2016.10.3.523>
- Baştürk, M. H. (2013). *Bursa tarihi yağma minarelerinin dinamik davranışlarının modal analiz yöntemi ile incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 343179)

- Bayraktar, A., Altunişik, A. C., Sevim, B., & Türker, T. (2011). Seismic response of a historical masonry minaret using a finite element model updated with operational modal testing. *Journal of Vibration and Control*, 17(1), 129-149. doi: 10.1177/1077546309353288
- Bayramı, S. (2018). *Taban izolasyonlu çelik çerçevelerin yapı zemin etkileşimi dikkate alınarak sismik davranışlarının incelenmesi* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 521097)
- Bell, F. G. (2007). *Engineering Geology*. (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Böke, H., Akkurt, S., İpekoğlu, B., & Uğurlu, E. (2006). Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters. *Cement and Concrete Research*, 36(6), 1115–1122. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.011>
- Brown, R. D., Ward, P. L., & Plafker, G. (1974). Geologic and seismologic aspects of the Managua, Nicaragua, earthquakes of December 23, 1972 (U.S. Geological Survey Professional Paper 838). U.S. Government Printing Office. <https://doi.org/10.3133/pp838>
- Carulli, G. B., & Slejko, D. (2005). The 6 May 1976 Friuli earthquake: Re-evaluating and consolidating transnational macroseismic data. *Giornale di Geologia Applicata*, 1, 147-156.
- CEN. (2005). *Eurocode 6 - Design of Masonry Structures - Part 1-1: General Rules for Reinforced and Unreinforced Masonry Structures* (EN 1996-1-1:2005). European Committee for Standardization.
- Computers and Structures Inc. (CSI). (2023). *SAP2000 Entegre Yapı Analizi ve Tasarımı Yazılımı (Sürüm 24.1.0)*. Berkeley, CA.
- Coşkun, C., Türk A.M. (2012). Sesimic behaviour and retrofit of historical masonry minaret. *Gradevinar*, 64, 39-45.
- Çakır, F. (2021). A simplified method for determining the seismic performance of historical structures: a case of Kaya Çelebi Mosque. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(3), 1643-1656. DOI: 10.17341/gazimmfd.754183
- Çakır, F., Uçkan, E., Shen, J., Şeker, B. S., & Akbaş, B. (2015). Seismic damage evaluation of historical structures during Van earthquake, October 23, 2011. *Engineering Failure Analysis*, 58, 249–266. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.08.030>
- Çaktı, E., Saygılı, Ö., Görk, S., Zengin, E., Oliveira, C. S., & Lemos, J. V. (2013). *Edirnekapı Mihrimah Sultan Camii minaresinin deprem davranışı*. *Vakıf Restorasyon Yıllığı*, 6, 33-40.
- D'Altri, A. M., Sarhosis, V., Milani, G., Rots, J., Cattari, S., Lagomarsino, S., Sacco, E., Tralli, A., Castellazzi, G., & de Miranda, S. (2019). B. Ghiassi & G. Milani (Eds.), Numerical modeling of masonry and historical structures: From theory to application in (1st ed., pp. 3–53). Woodhead Publishing.
- Diğer, I., Acar, A., Çobanoğlu, I., & Uras, Y. (2004). Correlation between Schmidt hardness, uniaxial compressive strength and Young's modulus for andesites, basalts and tuffs. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 63(2), 141-148.
- Doğangün, A., Acar, R., Sezen, H., & Livaoğlu, R. (2008). Investigation of dynamic response of masonry minaret structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(3), 505-517.
- Doğangün, A., Tuluk, Ö. İ., Livaoğlu, R., & Acar, R. (2006, April). Traditional Turkish minarets on the basis of architectural and engineering concepts. In *Proceedings of the*

1st International Conference on Restoration of Heritage Masonry Structures, Egypt, April (pp. 24-27).

- Döndüren, M., Şişik, Ö., & Demiröz, A. (2017). Tarihi yapılarda görülen hasar türleri. *Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi*, (13), 45-58.
- Ekşi Akbulut, D. (2006). *Tarihi yapıların onarımında kullanılan harçların seçimine yönelik bir öneri* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 201415)
- Erkek, H., & Yetkin, M. (2023, December). Assessment of the performance of a historic minaret during the Kahramanmaraş earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6). *Structures*, 58, 1-19, 105620.
- Erkek, H., Calayır, Y., Sayın, E., & Karaton, M., (2013). Tarihi Malatya Ulu Camisinin Sismik Davranışı, 2. *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Hatay*, 25-27 Eylül.
- Ersen, A., Gürdal, E., Güleç, A., & Alkan, N., (2013), Geleneksel harçlar ve koruma harçları, bağlayıcı olarak kullanılacak kireç ve hidrolik kireçli, puzzolanlı, tuğla tozlu ve tuğla kırıklı harçlardaki malzeme oranlarının belirlenmesi çalışması raporu. *KUDEB Restorasyon Konservasyon Çalışmaları Dergisi*, 16, 36-50.
- Eskici, B. (1993). *Eski Malatya'daki Türk-İslam eserleri* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 25882)
- Fırat, S., Işık, N., & Selçuk, E. (2020). Tarihi yapıların temel sistemlerinin güçlendirilmesi. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 9(Özel Sayı), 182-189. <https://doi.org/10.46810/tdfd.755813>
- Gedik, Y. H., & Celep, Z. (2008, September). *Structural Modeling and Seismic Performance Analysis of Mehmet Aga Mosque in Istanbul*. 8th International Congress on Advances in Civil Engineering, Eastern Mediterranean University, Famagusta, North Cyprus.
- Gölbaş1 Andezit. (2012, 23 Mart). *Andezit Merkez Satış Ofisi*. <https://www.golbasiandezit.com/andezit-merkez.htm> adresinden edinilmiştir.
- Hacıfendioğlu, K. (2010). Seasonally frozen soil's effect on stochastic response of masonry minaret-soil interaction systems to random seismic excitation. *Cold Regions Science and Technology*, 60(1), 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.08.007>
- Hough, S. E. (2009). *Finding fault in California: An earthquake tourist's guide*. Mountain Press Publishing.
- Hökelekli, E. (2020). Yapı-zemin etkileşiminin tarihi yığma minarelerin deprem davranışına etkisi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(2), 825-838.
- Işık, E., & Antep, B. (2018). Ahlat ilçesinde yer alan tarihi yığma minarenin yapısal analizi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 46-56.
- İpek, Ö. Ş. (2017). *Tarihi yapıların onarım teknikleri ve depremsellik yönünden incelenmesi*. (Yüksek lisans tezi) Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 468992)
- İzgi, R. (2020). *Tarihi yapıların yapısal analizi: Diyarbakır surları örneği*. (Yüksek lisans tezi) Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 624046)
- Jaf, H. S. M. A. (2016). *Full 3D nonlinear time history analysis of soil-structure interaction for a masonry arch bridge* (MSc thesis). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 23899)

- Jasim, F. A., Jasim, N. A., & Al-Hussein, A. A. (2024). Assessment of soil–structure interaction effects on seismic behavior of isolator and mass damper equipped buildings. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 11(2), 325-339. <https://doi.org/10.18280/mmep.110205>
- Kalın, A. (2023). *Endüstriyel bacaların yapı zemin etkileşimi dikkate alınarak dinamik analizleri* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 800577)
- Karabörk, T. (2009). Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak betonarme yapıların doğrusal olmayan 3 boyutlu dinamik analizi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(1), 25-36.
- Kazaz, İ., & Kocaman, İ. (2018). Taş yığma camilerin sismik yük kapasitelerinin değerlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(2), 557–574. doi: 10.17341/gazimmfd.416365
- Kılıç, İ., & Gökçen, G. (2021). Horasan harcında farklı karışım oranlarının taze ve sertleşmiş harç özelliklerine etkileri. *El-Cezeri*, 9(1), 203-219. DOI :10.31202/ecjse.957224
- Kır, H. (2020). *Tarihi yapıların temel sistemleri ve takviye metotları* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 621945)
- Kocaman, İ., Kazaz, İ., & Okuyucu, D. (2018). Tarihi Erzurum Yakutiye Medresesi'nin yapısal davranışının incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(58), 36-51.
- Kumar, A., & Pallav, K. (2024). Old masonry tower analysis visual inspection, NDT, and macro-modeling. *Asian Journal of Civil Engineering*, 25(1), 167-181. <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00766-3>
- Kurugöl, S., & Güleç, A. (2010). Anadolu Hisarı Harçlarının Fiziko-Kimyasal ve Petrografik Özelliklerinin İncelenmesi. *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi*, (5), 59-69.
- Kültür ve Turizm Bakanlığı. (1977, 11 Haziran). 11.06.1977 tarih ve A-610 sayılı kurul kararı.
- Kültür ve Turizm Bakanlığı. (2006, 15 Aralık). 15.12.2006 tarih ve 307 sayılı kurul kararı.
- Kültür ve Turizm Bakanlığı. (2007, 22 Ağustos). 22.08.2007 tarih ve 548 sayılı kurul kararı.
- Kültür ve Turizm Bakanlığı. (2017a, 15 Eylül). 15.09.2017 tarih ve 3869 sayılı kurul kararı.
- Lee, W. H. K., Herd, D. G., Cagnetti, V., Bakun, W. H., & Rapport, A. (1979). *A preliminary study of the Coyote Lake earthquake of August 6, 1979, and its major aftershocks* (No. 79-1621). US Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr791621>
- Livaoğlu, R., & Doğançün, A. (2007b). Effect of foundation embedment on seismic behavior of elevated tanks considering fluid–structure–soil interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(9), 855-863. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.01.008>
- Livaoğlu, R., & Doğançün, A. (2007a). Seismic behaviour of cylindrical elevated tanks with a frame supporting system on various subsoil. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 14(2), 133-45.
- Lourenco, P. B. (1996). *Computational strategies for masonry structures*. (Doctoral dissertation). Retrieved from ResearchGate. (https://www.researchgate.net/publication/27344834_Computational_Strategy_for_Masonry_Structures).

- Mahrabel, H. A. (2006). *Tarihi yapılarda taşıyıcı sistem özellikleri, hasarlar, onarım ve güçlendirme teknikleri* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 223367)
- Malatya Battalgazi Belediyesi, (2023). Melik Sunullah Camii Restorasyon Sonrası Fotoğrafı. Erişim Tarihi: 21.02. 2025. <https://www.battalgazi.bel.tr/2023/12/12/vaiz-ocagi-camii-ve-turbesi/> adresinden edinilmiştir.
- Malatya Battalgazi Belediyesi. (2024, Ekim 24). Malatya İli Battalgazi İlçesi Hatunsuyu Mahallesi 304 Ada 8 Nolu Parsel Sahası Parsel Bazında Zemin ve Temel Etüdü Veri Raporu (Arşiv No 2024-0144).
- Malatya Battalgazi Belediyesi. (2024, Temmuz 08). Malatya İli Battalgazi İlçesi İzzetiye Mahallesi 51 Ada, 96 Parsel İçin Zemin ve Temel Etüt Veri Raporu (Arşiv No 2024-0356).
- Marques, A. I., Morais, J., Morais, P., do Rosário Veiga, M., Santos, C., Candeias, P., & Ferreira, J. G. (2020). Modulus of elasticity of mortars: Static and dynamic analyses. *Construction and Building Materials*, 232, 117216. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117216>
- Metin, D. (2020). *Aspendos'ta tarihi yapılarda kullanılan harçların ve tuğlaların özellikleri* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 624656)
- Milani, G., & Clementi, F. (2021). Advanced seismic assessment of four masonry bell towers in Italy after operational modal analysis (OMA) identification. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(1), 157-186. doi: 10.1080/15583058.2019.1697768
- Mumyalmaz, Y. A. (2015). *Tarihi yapıların deprem güvenliğinin belirlenmesi ve Gedik Ahmet Paşa Camii örneği* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.382357)
- Mutlu, Ö., & Şahin, A. (2016). Investigating the effect of modeling approaches on earthquake behavior of historical masonry minarets-Bursa Grand Mosque case study. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 7(2), 123-136.
- Nohutcu, H., Hökelekli, E., Ercan, E., Demir, A., & Altıntaş, G. (2017). Collapse mechanism estimation of a historical slender minaret. *Structural Engineering and Mechanics*, 64(5), 653-660. <https://doi.org/10.12989/sem.2017.64.5.653>
- Örmecioğlu, H. T. (2010). Tarihi yapıların yapısal güçlendirilmesinde ana ilkeler ve yaklaşımlar. *Politeknik Dergisi*, 13(3), 233-237.
- Özbey, Ü. (2024). *Tipik betonarme bir yapının farklı zemin profilleri ve deprem yükleri altında yapı-zemin etkileşiminin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 850819).
- Özdemir, H. (2018). *Tarihi yapıların bilgisayar destekli analizi: Patara antik kent tiyatrosu sahne yapısı örneği* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 518515).
- Özdoğan, M. (1973). Physical and mechanical properties of Cubuk Andesite-a case study. Retrieved from Researchgate. doi: [10.13140/RG.2.2.32427.54568](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32427.54568)
- Özmen, A. (2024). *Tarihi yağma yapıların zemin-yapı etkileşimi dikkate alınarak deprem davranışının değerlendirilmesi* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 850611).
- Pelà, L., Cervera, M., & Roca, P. (2013). An orthotropic damage model for the analysis of masonry structures. *Construction and Building Materials*, 41, 957-967.

- Roca, P., Cervera, M., Gariup, G., & Pela', L. (2010). Structural analysis of masonry historical constructions. Classical and advanced approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 17(3), 299-325. doi: 10.1007/s11831-010-9046-1
- Roca, P., Cervera, M., Pelà, L., Clemente, R., & Chiumenti, M. (2013). Continuum FE models for the analysis of Mallorca Cathedral. *Engineering structures*, 46, 653-670.
- Sarhosis, V. (2016). V. Sarhosis, K. Bagi, J. V. Lemos, G. Milani (Ed.), In *Computational modeling of masonry structures using the discrete element method* (1st ed., pp. 28-60). IGI Global Scientific Publishing. doi: 10.4018/978-1-5225-0231-9.ch002
- Saydamer, A. (2014). *Türkiye'deki geleneksel ahşap yapılarıda kullanılan taşıyıcı sistemlerin irdelenmesi ve Bursa örneği* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 373836).
- Selçuk, E. (2019). *Tarihi yapıların temel sistemlerinin güçlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 610468).
- Serhatoğlu, C. (2015). *Bursa tarihi minarelerinin dinamik davranışlarının ve performanslarının incelemesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 426014).
- Sesli, H. (2013). *Zemin sınır şartlarının yapı-zemin etkileşim sistemlerinin dinamik davranışına etkisi* (Doktora tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 332071).
- Solak, A., & Çüçen, A. (2023). Tarihi yapılarda kullanılan harç ve sıvaların karakteristik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi. *Yalvaç Akademi Dergisi*, 8(1), 105–116. doi : 10.5712/yalvac.1258522
- Soyluk, D., & Demircan, Ö. (2023). Soyluk, A., & Demircan, B. (2023). Tarihi yığma minarelerin deprem yükü altındaki davranışlarının 6 Şubat Kahramanmaraş depremlerinde hasar görmüş cami örnekleri üzerinden mimari açıdan incelenmesi. *Journal of Architectural Sciences and Applications*, 8(Special Issue), 329-354. doi: <https://doi.org/10.30785/mbud.1318660>
- Sylvester, A. G. (1980). *The Mammoth Lakes, California, earthquakes, 25-31 May 1980*. Department of Geological Sciences, University of California, Santa Barbara.
- Şakalak, E. (2021). *Tarihi yapıların uluslararası farklı yönetmeliklere göre analizlerinin yapılarak sonuçlarının karşılaştırılması* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 704861).
- Şakalak, E., Sever, A. E., & Usta, P. (2024). Yapı zemin etkileşiminin yığma bir minarenin sismik davranışına etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(3), 371-385. DOI: 10.19113/sdufenbed.1491192
- Şeker, B. S., Çakır, F., Doğangün, A., & Uysal, H. (2014). Investigation of the structural performance of a masonry domed mosque by experimental tests and numerical analysis. *Earthquakes and Structures*, 6(4), 335-350. DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/eas.2014.6.4.335>
- Şeker, B. Ş., Büyükgüner, G., & Özkaynak, M. (2022). Structural assessment of the historical Yozgat Clock Tower. *Journal of Materials and Engineering Structures «JMES»*, 9(1), 17-28.
- Şeker, B. Ş., Doğangün, A., & Çakır, F. (2013). Merzifonlu Kara Mustafa Paşa cami taşıyıcı sistemi üzerine irdeleme. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 5(1), 112-120.
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018)*. Resmî Gazete, Sayı 30364.

- Tabatabaiefar, H. R., & Massumi, A. (2010). A simplified method to determine seismic responses of reinforced concrete moment resisting building frames under influence of soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(11), 1259-1267. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.05.008>
- Tomazevic, M. (1999). *Earthquake-resistant design of masonry buildings (Series in Innovation in Structures and Construction, Vol. 1)*. Imperial College Press. <https://doi.org/10.1142/p055>
- Türker, T., Demirtaş, B., Ural, A., & Kömür, M. A. (2022). Seismic behavior of historical inclined minarets under near and far fault ground motions. *Journal of Earthquake Engineering*, 26(11), 5866-5880. doi: 10.1080/13632469.2021.1908459
- U.S. Geological Survey. (1987). *Significant Earthquakes - 1987*. Retrieved June 23, 2025, from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/browse/significant.php?year=1987>
earthquake.usgs.gov
- U.S. Geological Survey. (2020). *Significant earthquakes - 1972*. Retrieved June 23, 2025, from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/browse/significant.php?year=1972>
- U.S. Geological Survey. (n.d.). *1966 Parkfield Earthquake*. Retrieved June 23, 2025, from <https://earthquake.usgs.gov/learn/parkfield/1966.php>
- U.S. Geological Survey. (n.d.). *M 5.8 - The 1991 Sierra Madre, California Earthquake*. Retrieved June 23, 2025, from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/ci2021449/executive>
earthquake.usgs.gov
- U.S. Geological Survey. (n.d.). *M 6.1 - The 1992 Joshua Tree, California Earthquake*. Retrieved June 23, 2025, from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/ci3019681/executive>
earthquake.usgs.gov
- U.S. Geological Survey. (n.d.). *M 6.6 - The 1987 Superstition Hills, California Earthquake*. Retrieved June 23, 2025, from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/ci628016>
earthquake.usgs.gov
- Ural, A., & Çelik, T. (2018). Dynamic analyses and seismic behavior of masonry minarets with single balcony. *Aksaray University Journal of Science and Engineering*, 2(1), 13-27. doi: 10.29002/asujse.371344
- Usta, P. (2016). *İzmir kent merkezi tarihi yapılarının deprem davranışı ve sismik risk değerlendirmesi için yaklaşık bir yöntem önerisi (Doktora tezi)*. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 442785).
- Usta, P., & Bozdağ, Ö. (2021). Tarihi Başdurak camisinin deprem analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 244-250. doi: 10.5505/pajes.2020.31384
- Ünay, A.İ. (2002) *Tarihi yapıların depreme dayanımı*. Ankara: ODTÜ Mimarlık Fakültesi Basım İşliği.
- Van der Pluijm, R. (1999). Out-of-plane bending of masonry: Behaviour and strength. *Construction and Building Materials*, 13(8), 439-447. <https://doi.org/10.6100/IR528212>
- Yanık, Y., Aymelek, A., Çalık, İ., & Türker, T. (2022). Vibration testing and performance evaluation of Hagia Sophia bell tower after recent restoration. *Construction and Building Materials*, 347, 128617. [10.1016/j.conbuildmat.2022.128617](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128617)

- Yanık, Y., Aymelek, A., Yıldırım, Ö., Demirtaş, B., & Türker, T. (2024). Variations of natural frequencies of masonry minarets due to environmental effects. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 14(3), 635-661.
- Yanık, Y., Türker, T., Çalık, İ., & Yıldırım, Ö. (2022). Investigation of environmental and time depended effects on historical masonry minarets by vibration test. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(2), 799-813.
- Yayla, K. (2024). Yığma minarelerin deprem davranışına yükleme yönünün etkisi: Aksaray zafer camisi minaresi örneği (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 916935)
- Yetkin, M., Dedeoğlu, İ. Ö., & Calayır, Y. (2021). 24 Ocak 2020 Sivrice depremi sonrasında Elazığ ilinde bulunan minarelerde meydana gelen hasarların araştırılması ve değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(2), 379-389.
- Yıldız, M., Sezer, R., Ekinci O., & Yıldız, E. (2011). Mevlâna müzesinde oluşan hasar nedenlerinin araştırılması ve uygun temel güçlendirme sisteminin seçilmesi. *e-Journal of New World Sciences Academy*, 6(4), 1417-1439, 1A0249.
- Yılmaz, P. (2006). *Tarihi yapıların modellenmesi ve deprem güvenliklerinin belirlenmesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 181878)
- Yiğit, M. E. (2024). Sıvı sönümleyici ile tarihi minarelerin deprem tepkisinin iyileştirilmesinin lineer dinamik analizi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 15(3), 701-711.
- Yurdakul, M., Yılmaz, F., Artar, M., Can, Ö., Öner, E., & Daloğlu, A. T. (2021). Investigation of time-history response of a historical masonry minaret under seismic loads. *Structures*, 30, 265-276. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.008>
- Zemin Bilgileri. (2025). Zemin bilgi raporu - Melik Sunullah Camii Minaresi bölgesi (Arşiv No. 2025).
- Zhang, X., & Far, H. (2022). Effects of dynamic soil-structure interaction on seismic behaviour of high-rise buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(7), 3443-3467.

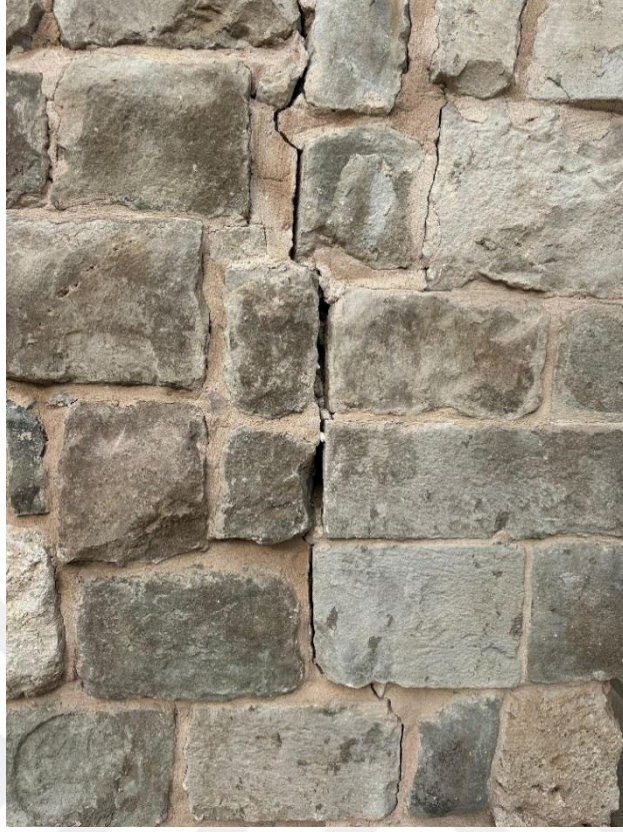
EKLER

Ek 1: Yirmi Moda Ait Periyot Değerleri İle Kütle Katılım Oranları

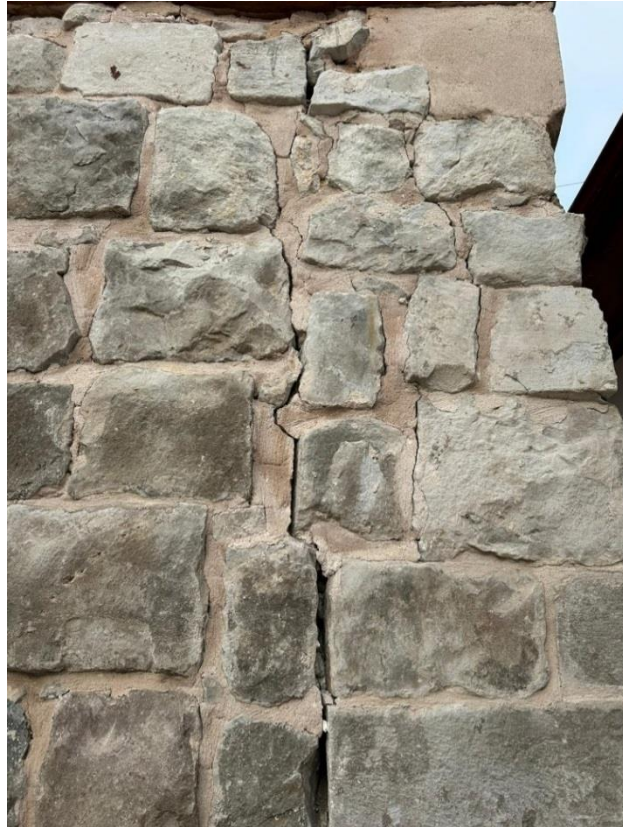
OutputCase	StepTypeText	StepNumUnitless	PeriodSec	UXUnitless	UYUnitless	UZUnitless	SumUXUnitless	SumUYUnitless	SumUZUnitless	RXUnitless	RYUnitless	RZUnitless	SumRXUnitless	SumRYUnitless	SumRZUnitless
MODAL	Mode	1	0.669853	0.458	0.007983	4.111E-06	0.458	0.007983	4.111E-06	0.000817	0.000858	8.974E-05	0.00817	0.000817	0.00008974
MODAL	Mode	2	0.662856	0.00789	0.46	3.285E-09	0.466	0.468	4.115E-06	0.506	0.000877	6.499E-05	0.515	0.517	0.00001547
MODAL	Mode	3	0.164543	0.004811	0.268	6.067E-06	0.471	0.736	1.018E-05	0.127	0.002253	2.102E-05	0.642	0.519	0.00001758
MODAL	Mode	4	0.164062	0.271	0.00485	0.0001132	0.742	0.741	0.0001234	0.002213	0.128	2.764E-05	0.644	0.647	0.00002034
MODAL	Mode	5	0.096093	1.102E-05	0.001395	0.936	0.742	0.741	0.936	0.001425	0.011	0.644	0.647	0.01	0.011
MODAL	Mode	6	0.094816	1.921E-05	0.0004864	0.015	0.742	0.741	0.952	0.000434	3.156E-05	0.697	0.645	0.647	0.709
MODAL	Mode	7	0.073277	0.179	2.418E-05	0.0001014	0.92	0.741	0.952	0.000303	0.219	3.736E-05	0.645	0.866	0.709
MODAL	Mode	8	0.072858	3.045E-05	0.178	4.566E-05	0.92	0.919	0.952	0.000383	0.221	1.266E-07	0.866	0.866	0.709
MODAL	Mode	9	0.053558	4.599E-05	0.0001442	1.514E-05	0.92	0.92	0.952	0.0000268	0.06	1.35E-05	0.865	0.866	0.974
MODAL	Mode	10	0.04801	4.266E-05	0.072	2.839E-06	0.92	0.992	0.952	0.000711	0.061	0.000365	0.982	0.866	0.978
MODAL	Mode	11	0.0478	0.071	6.124E-05	2.812E-05	0.991	0.992	0.952	0.009485	0.114	0.0029	0.981	0.982	0.978

MODAL	Mode	12	0.03953 5	2.076E- 05	1.309E- 05	0.047	0.991	0.992	0.998	0.00002 2	0.005	0.00000 99	0.982	0.981	0.978
MODAL	Mode	13	0.03115 2	7.274E- 05	0.00541 5	1.216E- 06	0.991	0.987	0.998	0.011	0.00000 14	0.00000 6	0.993	0.981	0.978
MODAL	Mode	14	0.03112 3	0.00659 6	5.491E- 05	2.979E- 05	0.998	0.997	0.998	0.00011 0	0.013	0.00001 8	0.993	0.994	0.978
MODAL	Mode	15	0.02915 5	3.996E- 06	0.00017 33	5.812E- 07	0.998	0.998	0.998	0.00004 6	0.00000 95	0.00001 6	0.994	0.994	0.994
MODAL	Mode	16	0.02263 3	2.83E-07	0.00012 58	1.199E- 06	0.998	0.999	0.998	0.00006 97	0.00154	0.00011 3	0.997	0.995	0.996
MODAL	Mode	17	0.02237 6	0.00012 77	0.00014 95	2.599E- 05	0.999	0.999	0.998	0.00016 8	0.00011	0.00001 2	0.998	0.998	0.996
MODAL	Mode	18	0.02155 5	7.42E-05	9.6E-05	1.495E- 07	0.999	0.999	0.998	0.00016 1	0.00018 6	0.00027 6	0.998	0.998	0.998
MODAL	Mode	19	0.02102 2	3.58E-05	5.29E-05	3.982E- 06	0.999	0.999	0.998	0.00001 3	0.00009 3	6.03E-06	0.998	0.998	0.998
MODAL	Mode	20	0.02099 8	9.009E- 06	5.7E-05	9.144E- 09	0.999	0.999	0.998	0.00013 8	0.00002 3	3.612E- 05	0.998	0.999	0.998

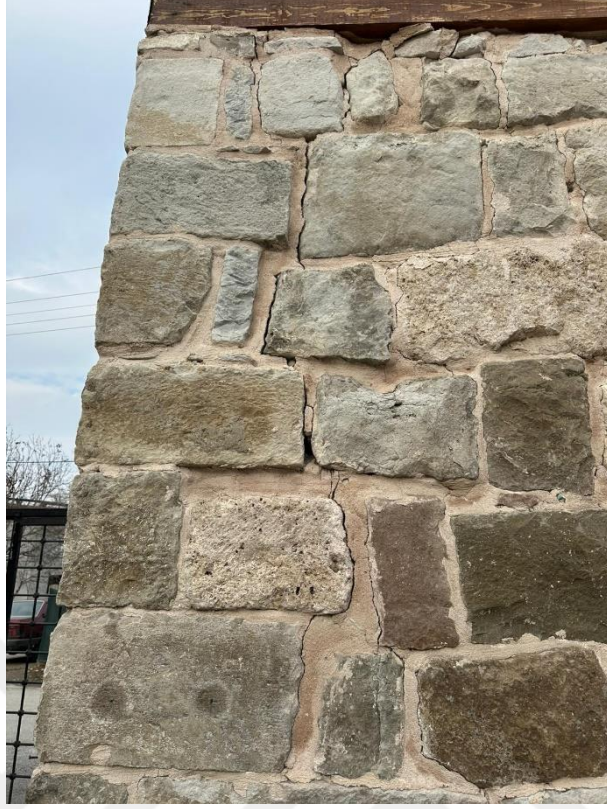
Ek 2: 2023 Kahramanmaraş Depremi Sonrası Tabanda Oluşan Çatlaklar



Ek 3: 2023 Kahramanmaraş Depremi Sonrası Tabanda Oluşan Çatlaklar



Ek 4: 2023 Kahramanmaraş Depremi Sonrası Tabanda Oluşan Çatlaklar



ÖZ GEÇMİŞ

Ferhat TÜM, ilköğrenimini Sümer İlkokulu'nda, ortaöğrenimini Sümer Ortaokulu'nda ve lise eğitimini Sümer Lisesi'nde tamamlamıştır. 2016 yılında Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazanmış, 2020 yılında bu bölümden mezun olmuştur. 2022 yılında Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'na kabul edilmiş ve halen yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir.

