



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Tarihi Vaniköy Cami Minaresinin Deprem Performansının Doğrusal Olmayan Analiz
Yöntemleriyle Belirlenmesi ve İyileştirilmesi**

Furkan KILINÇARSLAN

**DANIŞMAN
Doç. Dr. Barış GÜNEŞ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

Haziran, 2024

TEZ KABUL VE ONAYI

Furkan KILINÇARSLAN tarafından, **Doç. Dr. Barış GÜNEŞ** danışmanlığında hazırlanan "**Tarihi Vaniköy Cami Minaresinin Deprem Performansının Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi ve İyileştirilmesi**" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **12/06/2024** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

	İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Doç. Dr. Barış GÜNEŞ	☒ Kabul
	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Turgay ÇOŞGUN	☒ Kabul
	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Atakan MANGIR	☒ Kabul
	İstanbul Medipol Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	☐ Ret

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Furkan KILINÇARSLAN

(İmza)



Sevgili Annem Hüsne KILINÇARSLAN'A ithaf ediyorum...

BÜTÇE DESTEKLERİ

**Tarihi Vaniköy Cami Minaresinin Deprem Performansının Doğrusal Olmayan Analiz
Yöntemleriyle Belirlenmesi ve İyileştirilmesi**

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca bana her konuda destek olan değerli hocam Sayın Doçent Doktor Barış GÜNEŞ'e;

Kendi hayatından çok benim hayatıma önem veren, beni her zaman düşünen sevgili annem Hüsne KILINÇARSLAN'a;

Hayatım boyunca hiçbir zaman maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen sevgili babam Salih KILINÇARSLAN'a;

Her zaman bana yol gösteren, her koşul da yanımda olan sevgili ablam Seda KILINÇARSLAN'a çok teşekkür ederim.

Haziran 2024

Furkan KILINÇARSLAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
TEZ KABUL VE ONAYI	ii
BEYAN	iii
BÜTÇE DESTEKLERİ.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
TABLO LİSTESİ.....	xiii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xiv
ÖZET	xvi
ABSTRACT.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. AMAÇ VE KAPSAM.....	2
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE.....	3
2.1. TARİHİ YAPILARIN GÜÇLENDİRİLMESİNE GENEL BAKIŞ	3
2.1.1. Tarihi Yapıların Güçlendirilmesinin Önemi.....	3
2.1.2. Tarihi Yapıların Güçlendirilmesi Hakkında Literatür Çalışması	4
2.2. YÖNETMELİKLERİN KULLANIMI	6
2.3. TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİ, TBDY-2018.....	6
2.3.1. Deprem Yer Hareketi.....	6
2.3.2. Deprem Etkisi Altında Binaların Değerlendirilmesi İçin Genel Esaslar	9
2.4. TARİHİ YAPILARDA DEPREM RİSKLERİNİN YÖNETİMİ KILAVUZU,	

TYDRYK-2017	11
2.4.1. Malzeme Özellikleri	11
2.4.2. Deprem Etkisi	13
2.4.3. Hasar Görebilirlik ve Performans Düzeyi Kavramı	14
2.4.4. Dayanıma Göre Değerlendirme	16
2.4.5. Şekildeğiştirmeye Göre Değerlendirme	18
3. YÖNTEM	19
3.1. YAPININ TANITIMI	19
3.1.1. Dış Cephe Görüntüsü.....	19
3.1.2. Geometrik Özellikleri	20
3.1.3. Hasarlar.....	22
3.1.4. Laboratuvar Çalışmaları	25
3.1.5. Güçlendirme Önerileri.....	27
3.1.6. Zemin Özellikleri.....	29
3.2. TASARIM/DEĞERLENDİRME YÖNTEMİ	30
3.3. MODELLEME.....	31
3.4. MALZEME ÖZELLİKLERİ	33
3.4.1. Mekanik Özellikler	33
3.4.2. Malzeme Modeli.....	35
3.5. STATİK ETKİLER.....	35
3.6. DEPREM ETKİLERİ.....	35
3.6.1. Depremsellik.....	35
3.6.2. Deprem Yüğü Uygulama Yöntemi.....	36
3.7. ANALİZİ YÖNTEMİ	37
3.8. KİNEMATİK ANALİZ	37
4. BULGULAR.....	40
4.1. MEVCUT DURUM.....	40
4.1.1. Dinamik Özellikler	40
4.1.2. Statik Etkiler Altında Tahkik.....	40
4.1.3. Deprem Etkileri Altında Tahkik, Performans Analizi.....	41
4.2. GÜÇLENDİRİLMİŞ DURUM.....	45
4.2.1. Statik Etkiler Altında Tahkik.....	45
4.2.2. Deprem Etkileri Altında Tahkik, Performans Analizi.....	46
4.4. KİNEMATİK ANALİZ	50

5. TARTIŞMA.....	51
5.1. MEVCUT VE GÜÇLENDİRİLMİŞ DURUMUN KARŞILAŞTIRMASI	51
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	53
KAYNAKLAR	58
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI.....	61
ETİK KURUL İZİN YAZISI	62
KURUM İZNİ YAZILARI	63
PATENT HAKKI İZNİ.....	64
ÖZGEÇMİŞ	65



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1 : Spektral ivme katsayıları ve yatay elastik ivme spektrumu	8
Şekil 2.2 : Kesit hasar bölgeleri (TBDY 2018).	11
Şekil 2.3 : Statik itme eğrisi ve sınır durumları.....	15
Şekil 2.4 : Göreceli sünek ve gevrek taşıyıcı sistemde (yapı) performans düzeyleri	17
Şekil 3.1 : Yapının dış cephe görünüşleri.....	19
Şekil 3.2 : Rölöve planı	20
Şekil 3.3 : Minare rölöve planları.....	21
Şekil 3.4 : Minare kesit ve görünüşleri.....	21
Şekil 3.5 : Gövde altındaki silme taş bilezikteki hasarlar.....	23
Şekil 3.6 : Gövde altındaki yangın hasarları	23
Şekil 3.7 : Gövdesindeki tuğla duvar hasarları.....	23
Şekil 3.8 : Gövde üst kısmındaki demir çember	24
Şekil 3.9 : Şerefe altı taşlardaki hasarlar	24
Şekil 3.10 : Taş korkuluktan görünüşler	24
Şekil 3.11 : Petek içindeki ahşap seren direği	25
Şekil 3.12 : Petek kısmından görünüşler	25
Şekil 3.13 : Yerinde kayma ve Flat-jack deneylerinden görünüşler	26
Şekil 3.14 : Flat-jack deneyinden elde edilen düşey gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	27
Şekil 3.15 : TRM güçlendirme uygulaması önerilen kısımlar.....	28
Şekil 3.16 : Minare çekirdeği ve bazı taş kısımlar için onarım detayı.....	28
Şekil 3.17 : Minare taş bilezik ve hasarlı demir lamanın onarım detayı	29
Şekil 3.18 : Söz konusu alandaki zemin profili	30

Şekil 3.19	: Minarenin 3D Autocad Modeli	33
Şekil 3.20	: Yapının mesh yapılmış sonlu eleman modeli.....	34
Şekil 3.21	: Damage TC3D plastik malzeme modeli	36
Şekil 3.22	: Yapının Aktif Faya Uzaklığı	37
Şekil 4.1	: Yapının ilk 4 modu (sırasıyla 1.039, 1.010, 0.177, 0.171)	41
Şekil 4.2	: Yapının zati yükler altındaki yerdeğiştirmesi (m)	42
Şekil 4.3	: Yapının zati yükler altındaki asal çekme şekildeğiştirmeleri ve hasarlar	42
Şekil 4.4	: Yapının artımsal itme analizi grafiği.....	44
Şekil 4.5	: Push-xp ve push-xn yüklemede maksimum dayanımdaki yerdeğiştirme (m).....	45
Şekil 4.6	: Sırası ile push-yp ve push-yn yüklemede maksimum dayanımdaki yerdeğiştirmesi (m).....	45
Şekil 4.7	: Yapının push-xp yüklemede maksimum dayanımdaki şekildeğiştirme ve hasar durumu	45
Şekil 4.8	: Yapının push-xn yüklemede maksimum dayanımdaki şekildeğiştirme ve hasar durumu	46
Şekil 4.9	: Yapının push-yp yüklemede maksimum dayanımdaki şekildeğiştirme ve hasar durumu	46
Şekil 4.10	: Yapının push-yn yüklemede maksimum dayanımdaki şekildeğiştirme ve hasar durumu	47
Şekil 4.11	: Güçlendirilmiş durum artımsal itme analizi grafiği	49
Şekil 4.12	: Sırası ile push-xp ve push-xn yüklemede maksimum dayanımdaki yerdeğiştirme (m)	49
Şekil 4.13	: Sırası ile push-yp ve push-yn yüklemede maksimum dayanımdaki yerdeğiştirmesi (m).....	50
Şekil 4.14	: Yapının push-xp yüklemede maksimum dayanımdaki şekildeğiştirme ve hasar durumu	50
Şekil 4.15	: Yapının push-xn yüklemede maksimum dayanımdaki şekildeğiştirme ve hasar durumu	50
Şekil 4.16	: Yapının push-yp yüklemede maksimum dayanımdaki şekildeğiştirme ve hasar durumu	51

Şekil 4.17 : Yapının push-yn yüklemede maksimum dayanımdaki şekildeğiştirme ve hasar durumu	51
Şekil 4.18 : Minarenin mekanizma durumu	52



TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1 : Yerel zemin etki katsayıları (TBDY, 2018).....	8
Tablo 2.2 : Deprem tasarım sınıfları (DTS) (TBDY, 2018).....	9
Tablo 2.3 : Bina kullanım sınıfları ve bina önem katsayıları (TBDY, 2018).....	9
Tablo 2.4 : Yükseklik ve deprem tasarım sınıflarına göre tanımlanan bina yükseklik aralıkları.....	10
Tablo 2.5 : Yığma duvar malzemesinin mekanik özellikleri (TYDRYK-2017)	12
Tablo 2.6 : Yığma duvar malzemesinin mekanik özelliklerinde harç, duvar işçiliği ve duvarın enine bağlantılarının özelliklerine bağlı kullanılabilecek düzeltme katsayıları (TYDRYK-2017).	12
Tablo 2.7 : Önerilen hedef performans düzeyleri (TYDRYK-2017).....	16
Tablo 2.8 : Performans düzeyleri ile ilgili hesap yöntemleri ve sınır durumları (TYDRYK-2017).....	16
Tablo 3.1 : Yerinde kayma deneyi sonuçları	26
Tablo 3.2 : Tuğla numunelerinin basınç dayanım değerleri	26
Tablo 3.3 : Tuğla numunelerinin basınç dayanım değerleri	27
Tablo 3.4 : Minare kısmı için zemin çalışması özet bilgileri.....	29
Tablo 3.5 : Performans esaslı analiz ve tasarım yöntemi.....	31
Tablo 3.6 : Yığma duvarların mevcut mekanik özellikleri	34
Tablo 3.7 : Güçlendirilmiş yığma duvarların mekanik özellikleri.....	34
Tablo 3.8 : Zemin ve deprem parametreleri.....	36
Tablo 4.1 : Minarenin güçlendirilmiş durum lineer mekanizma kontrolleri.....	50
Tablo 5.1 : Yığma kısmın nonlinear analiz karşılaştırmaları	52

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler

Açıklama

F_S	: Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı
F_1	: 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı
H_N	: Bina Toplam Yüksekliği [m]
I	: Bina Önem Katsayısı
S_{DS}	: Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı
$S_{ac}(T)$	: Yatay elastik tasarım spektral ivmesi [g]
$S_{acD}(T)$	: Düşey elastik tasarım spektral ivmesi [g]
$S_{dc}(T)$	: Yatay elastik tasarım spektral yerdeğiştirme [m]
S_{D1}	: 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]
S_s	: Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı
S_1	: 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı
T	: Doğal titreşim periyodu [s]
T_A	: Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu [s]
T_B	: Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu [s]
T_L	: Yatay elastik tasarım spektrumunda sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu [s]

Kısaltmalar**Açıklama**

BKS	: Bina Kullanım Sınıfı
BYS	: Bina Yükseklik Sınıfı
DD-1	: 50 yılda aşılma olasılığı %2 (tekrarlanma periyodu 2475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
DD-2	: 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
DD-3	: 50 yılda aşılma olasılığı %50 (tekrarlanma periyodu 72 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
DD-4	: 50 yılda aşılma olasılığı %68 (tekrarlanma periyodu 43 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
DTS	: Deprem Tasarım Sınıfı
GÖ	: Göçmenin Önlenmesi Performans Düzeyi
KH	: Kontrollü Hasar Performans Düzeyi
KK	: Kesintisiz Kullanım Performans Düzeyi
SH	: Bina Kullanım Sınıfı

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tarihi Vaniköy Cami Minaresinin Deprem Performansının Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi ve İyileştirilmesi

Furkan KILINÇARSLAN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman: Doç. Dr. Barış GÜNEŞ

Tarihi minarelerin yapısal bütünlüğü bozulmadan kültürel miras olarak gelecek nesillere aktarılması oldukça önemlidir. Yığma minareler genellikle yığma tuğla, kerpiç ya da taş kullanılarak imal edilmiş olup narin yapısal sisteme sahip olmalarından dolayı deprem etkilerine karşı oldukça hassastır. Bu nedenle deprem bölgelerindeki minarelerin sismik performansının belirlenmesi ve onarım/güçlendirme dahil önlemlerin alınması çok önemlidir. Bu çalışmada söz konusu yapı türüne örnek teşkil eden Vaniköy Camii Minaresi incelenmiştir. Bu kapsamda öncelikle saha incelemeleri gerçekleştirilerek minarenin yapısal sistemi, taşıyıcı elemanları ve hasar durumu tespit edilmiştir. Ardından minarenin mevcut ve güçlendirilmiş durumunun sismik performansı belirlenmiş olup restorasyon çalışmaları kapsamında önerilen iyileştirme/güçlendirme yöntemlerinin yapının sismik performansına etkisi ortaya konmuştur. Çalışmadan elde edilen sonuçların, tarihsel niteliğe sahip minarelerin sismik performansının gerçeğe en yakın şekilde belirlenmesi, kullanılacak analiz yönteminin ortaya konması ve

deprem performansının iyileştirilmesi açısından önemli olduğu düşünülmektedir.

Minarenin statik ve deprem etkileri altındaki performansını belirlemek amacı ile mevcut ve güçlendirilmiş durumun sonlu eleman modeli hazırlanmış olup “OpenSees” programı ile nonlineer (doğrusal olmayan) artımsal itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Minarenin mevcut ve güçlendirilmiş durumunun, TYDRYK-2017 esas alınarak belirlenen, DD-3 depremi için “Sınırlı Hasar”, DD-2 depremi için “Kontrollü Hasar”, performans hedeflerini sağlayamadığı sonucuna ulaşılmıştır. Koruma ilkeleri çerçevesinde, yapılan müdahalelerin (enjeksiyon, çatlak onarımı, kesit tamamlamaları, korozyon onarımı, tekstil donatılı harç ile güçlendirme vb.) sınırlı oluşu sebebiyle hedeflenen performans seviyelerine ulaşılmamıştır. Ancak önerilen güçlendirme yöntemi mevcut yapının nihai dayanımını farklı yönlerde %14~%51 arasında artırmıştır. Onarım/güçlendirme uygulaması yapıyı hedef performans düzeyine ulaştıramamış ancak en kritik yön için deprem dayanımının %42 oranında artmasını sağlamıştır. Güçlendirme uygulaması yapının nihai dayanımını arttırmış olmakla birlikte sünekliğini bir miktar azaltmıştır. Minarenin kinematik göçme mekanizmaları kontrol edilmiş olup minarede DD-1 depreminde dönme mekanizma durumu olduğu görülmüştür.

Haziran 2024, 84 sayfa.

Anahtar kelimeler: Tarihi Minareler, Sismik Performans, Onarım/Güçlendirme

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

**Seismic Assessment and Rehabilitation of The Historical Vaniköy Mosque Minaret with
Non-linear Analysis Methods**

Furkan KILINÇARSLAN

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Barış GÜNEŞ

Ensuring the structural integrity of historical minarets while preserving them as cultural heritage for future generations is of paramount importance. Masonry minarets are typically constructed using adobe bricks, mud bricks, or stone, making them quite susceptible to seismic effects due to their delicate structural system. Therefore, it is crucial to assess the seismic performance of minarets in earthquake-prone areas and take measures including repair/strengthening. This study investigates the Vaniköy Mosque Minaret as a representative example of such structures. Firstly, field inspections were conducted to determine the structural system, load-bearing elements, and damage status of the minaret. Subsequently, the seismic performance of the existing and strengthened states of the minaret was determined, and the effect of the proposed improvement/strengthening methods on the seismic performance of the

structure was elucidated within the scope of restoration works. The results obtained from the study are deemed significant for determining the seismic performance of historically significant minarets, establishing the analysis method to be employed, and enhancing earthquake performance.

Finite element models of the existing and strengthened states were prepared to assess the performance of the minaret under static and seismic effects, and nonlinear incremental pushover analyses were conducted using the "Opensees" program. It was concluded that the existing and strengthened states of the minaret failed to meet the performance objectives defined for the DD-3 earthquake as "Limited Damage" and DD-2 earthquake as "Controlled Damage," based on the TYDRYK-2017 criteria. Due to the limited nature of the interventions (injection, crack repair, section completions, corrosion repair, strengthening with textile-reinforced mortar, etc.) within the framework of conservation principles, the targeted performance levels were not achieved. However, the proposed strengthening method increased the ultimate strength of the existing structure by 14% to 51% in different directions. Although the repair/strengthening application did not reach the target performance level of the structure, it increased the earthquake resistance by 42% for the most critical direction. While the strengthening application increased the ultimate strength of the structure, it slightly reduced its ductility. Kinematic collapse mechanisms of the minaret were evaluated, revealing an overturning mechanism condition during the DD-1 earthquake. |

June 2024, 84 pages.

Keywords: | Historical Minarets, Seismic Performance, Repair/Strengthening |

1. GİRİŞ

Tarihi yapılar, inşa edildikleri dönemin kültürel, estetik ve sosyal değerlerini yansıtmaktadır. Bu yapılar, kültürel mirasımızın önemli bir parçasını oluştururken, aynı zamanda geçmiş nesillerin mirasını gelecek nesillere aktarmakla görevlidirler. Bu nedenle, bu yapıların korunması ve gerektiğinde ana dokusunu bozulmadan güçlendirilmesi, insanlık için son derece önemlidir. Kültürel mirasın korunması çabaları, özellikle minareler gibi tarihi yapılarla ilgili olarak, deprem dayanıklılığını artırmak ve halkın güvenliğini sağlamak için güçlendirme önlemlerinin aciliyetini vurgular (Gülbüz ve Kocaman, 2024). Günümüzde, tarihi yapıların korunması ve sürdürülebilirliği konusunda birçok yöntem ve strateji geliştirilmiştir. Tarihi yapıların güçlendirilmesinde kullanılan eski yöntemlerin sınırlılıklarını ve bu alandaki mevcut tartışmaları vurgulayan ifadeler, güncel güçlendirme stratejilerinin gerekliliğini ortaya koymaktadır (Frumento ve diğ., 2006).

Tarihi yapıların güçlendirilmesi sürecinde dikkate alınması gereken birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler, yapıların benzersiz mimari ve yapısal özellikleri, hasar ve risk değerlendirmesi, doğal afetlerin etkisi, malzeme teknolojisi ve yöntemler, bilgisayar destekli tasarım ve analiz gibi unsurları içermektedir. Bu unsurlar, tarihi yapıların güçlendirilmesi ve sürdürülebilirliği konusunda bilimsel temelli yaklaşımların benimsenmesini sağlar.

Ülkemizdeki tarihi yapılar incelendiğinde, genellikle yığma yapı türünde inşa edilmişlerdir. Yığma yapılar, tarihi mimarinin temel unsurlarından birini oluşturur ve kültürel mirasımızın önemli bir parçasını teşkil ederler. Yığma yapılar, küresel yapı stokunun önemli bir bölümünü oluşturmakta olup, özellikle deprem bölgelerinde lateral yüklerin etkisi altında kaldıklarında zorluklarla karşılaşır (Yavartanoo ve Kang, 2022). Bu yüzden, günümüzde tarihi ve yığma yapıların korunması ve sürdürülebilirliği konusunda birçok yöntem ve strateji geliştirilmiştir. Geleneksel malzeme modellerinin yerine son yıllarda geliştirilen alternatif bir modelleme yaklaşımı kullanılarak, yapıların analizi için uygun matematiksel modeller geliştirilmiştir (Nappi ve diğ.,2001). Bu yöntemler arasında yapıların güçlendirilmesi, hasar tespiti, restorasyon, onarım ve bakım gibi süreçler önemli bir yer tutmaktadır. İnşaat mühendisleri, tarihi yapıların güçlendirilmesi ve restorasyonu konusunda uzmanlaşarak, bu yapıların gelecek

nesillere aktarılmasını sağlamaktadırlar.

1.1. AMAÇ VE KAPSAM

Bu tez çalışması, tarihi Vaniköy Camii minaresinin deprem performansını doğrusal olmayan analiz yöntemleriyle belirleyerek, geleneksel analizlerin ötesine geçmeyi hedeflemektedir. Bu yaklaşım, tarihi yapıların güvenliğini artırmak için yeni stratejiler geliştirme potansiyeli taşımaktadır. Doğrusal olmayan analizlerin getirdiği avantajlar, yapıların gerçek dünya koşullarına daha yakın bir şekilde modellenmesini sağlar ve bu da deprem riskine karşı daha güçlü bir direnç oluşturabilir. Aynı zamanda, geleneksel analiz yöntemlerinin tarihi yapıların karmaşıklığını ve gerçek tepkilerini tam olarak yanıtlayamadığı gerçeğini vurgulayarak, doğrusal olmayan analizlerin bu eksikliği gidermedeki kritik rolünü vurgulamaktadır.

Bu çalışma, sonlu eleman modelleme ve doğrusal olmayan analiz tekniklerini birleştirerek tarihi minare tipi yapıların deprem performansını daha derinlemesine anlamamıza olanak tanıyacaktır. Tezin kapsamı, aşağıdaki adımları içermektedir:

- Tarihi Vaniköy Camii minaresinin sonlu eleman modeli detaylı bir şekilde oluşturulmuş ve yapıyı tam olarak temsil eden bir model oluşturulmuştur.
- Sonlu eleman modeli kullanılarak, tarihi Vaniköy Camii minaresinin mevcut durum performansı detaylı bir şekilde tespit edilmiştir.
- Tarihi Vaniköy Camii minaresi için hasar tespitleri ve mevcut durum performans analizi sonuçlarına dayanarak, onarım ve güçlendirme önerileri belirlenmiştir.
- Minare için önerilen onarım ve güçlendirme yöntemleri uygulanmış ve minarenin iyileştirilmiş durum performansı doğrusal olmayan analizlerle tekrar tespit edilmiştir.
- Son olarak, mevcut durum performansı ile güçlendirilmiş durum performansı detaylı bir şekilde karşılaştırılmıştır.

Bu tezin sonuçları, tarihi yapıların deprem dayanıklılığına dair daha kapsamlı bir anlayış sunarak, gelecek çalışmalara ışık tutması hedeflenmektedir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. TARİHİ YAPILARIN GÜÇLENDİRİLMESİNE GENEL BAKIŞ

2.1.1. Tarihi Yapıların Güçlendirilmesinin Önemi

Tarihi yapılar, kültürel mirasımızın önemli bir parçası olup, geçmişten günümüze uzanan değerli izler taşırlar. Ancak, zamanla doğal afetler, çevresel etkiler ve yapısal bozulmalar nedeniyle zarar görebilirler. İşte bu noktada, inşaat mühendisliği disiplini devreye girer ve tarihi yapıların güçlendirilmesi önem kazanır. Bir binayı yeniden rehabilite etmek, çevresel performansın daha yüksek seviyelere ulaşması ve işletimi için gereken enerji tüketimini ve CO2 emisyonlarını azaltma konusunda benzersiz bir fırsattır (Munarim ve Ghisi,2016). Bu bağlamda, tarihi yapıların güçlendirilmesi, sadece kültürel mirasın korunması değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da büyük önem taşır.

Yeni binaların yıkılması ve inşa edilmesi faaliyetlerine karşı, rehabilitasyon çevresel ve ekonomik avantajlar sağlar (Munarim ve Ghisi,2016). Bu nedenle, yapıların korunması ve güçlendirilmesi, sürdürülebilir kentleşme stratejilerinin önemli bir parçası haline gelmiştir. Depreme duyarlılık çalışmaları, yapısal zayıflıkları belirleme ve güçlendirme tekniklerinin seçimi açısından kritik bir rol oynamaktadır (Maheri ve diğ., 2023). Tarihi yapıların depreme karşı güçlendirilmesi, bu yapıların gelecek nesillere aktarılabilmesi ve toplumun güvenliğinin sağlanması açısından hayati bir öneme sahiptir.

Son yıllarda meydana gelen büyük depremler, yapıların güçlendirilmesi konusunda yeni yaklaşımların gelişmesine ve sismik tasarım yöntemlerinin revize edilmesine yol açmıştır (Korkmaz ve diğ., 2008). Bu nedenle, tarihi yapıların güçlendirilmesi sürecinde, sismik tasarım yöntemlerinin ve güçlendirme tekniklerinin sürekli olarak gözden geçirilmesi ve güncellenmesi gereklidir. Tarihi yapıların güçlendirilmesi, sadece mühendislik açısından değil, kültürel, çevresel ve ekonomik açıdan da büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, yapısal restorasyon ve koruma çalışmaları, bu değerli mirasın sürdürülebilirliği ve gelecek nesillere aktarılması sürecinde kritik bir role sahiptir.

2.1.2. Tarihi Yapıların Güçlendirilmesi Hakkında Literatür Çalışması

Tarihi camilerin karmaşık geometrik yapıları, çeşitli inşaat teknikleri ve kullanılan malzemelerin özellikleri nedeniyle yapısal davranışlarının doğru şekilde anlaşılması zordur. Bu tür yapıların olası hasarlarının tespiti ve gerekli tedbirlerin planlanması için öncelikle yapısal davranışlarının doğru bir şekilde hesaplanması gerekmektedir. Tarihi camilerde ortaya çıkan deformasyon türlerinin, yer değiştirme mekanizmalarının ve yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi, yapıların deprem performansının anlaşılması açısından büyük önem taşır. Ancak, bu yapıların analitik yöntemlerle değerlendirilmesi oldukça karmaşık olabilir. Bu sebeple, antik döneme ait camilerinin sonlu elemanlar metodu kullanılarak modellenmesi ayrıyeten bu modellerin bilgisayar programları vasıtasıyla elde edilen analizlerin incelenmesi sıkça başvurulan bir uygulama olmuştur. Yazılım teknolojisindeki ilerlemeler, antik döneme ait camilerin sismik performanslarının ve oluşan yapısal hasarların belirlenmesini hem ülkemizde hem de dünya genelinde kritik bir inceleme alanı haline getirmiştir. Günümüzde, yıkıma sebep olan depremler nedeniyle tarihi yapılar hakkında pek çok teorik araştırmalar gerçekleştirilmiştir.

Soyluk ve Tuna (2011) sismik izolasyon teknolojisi ile bir tarihi yığma camiye güçlendirmeyi amaçlamıştır. Şehzade Mehmet Camisi örneğinde, caminin sayısal eleman modeli oluşturulmuş ve sabit mesnet ile yüksek sönümlü kauçuk mesnet kullanılarak dinamik davranışlar karşılaştırılmıştır. Bulgular, sismik taban izolatörlerinin tarihi yığma camilerin dinamik davranışlarını büyük ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Kazaz ve Kocaman (2018) Erzurum'da bulunan Lala Paşa Camisi'nin sayısal eleman metodu kullanarak yapının statik ve dinamik yükler altındaki tepkilerini incelemişlerdir. Yapının yatay yük performansı, dinamik analizler yapılarak belirlenmiş ve literatürde ele alınan kuvvet kapasitesini tespit edilmesine yönelik içeriklerin geçerliliği değerlendirilmiştir.

Aslay ve Okuyucu (2020) Erzincan'daki Değirmenli köy kilisesi üzerinde deneysel titreşim analiz gerçekleştirmiştir. Kilisenin sayısal eleman modeli oluşturulmuş ve deneysel titreşim analiz verileri doğrultusunda malzeme özellikleri tanımlanmıştır. İncelemede, 1992 yılına ait Erzincan Deprem kaydı vasıtasıyla kilisenin deprem performansı değerlendirilmiştir. Çalık ve diğ. (2016) yığma taş duvar örgülü camilerin sismik davranışlarını belirlemeye yönelik araştırmalar yapmışlardır. Tarihi Dürbinar Camisi'nin iyileştirme öncesi ve iyileştirme sonrası doğal frekanslarını deneysel titreşim analiz teknikleriyle karşılaştırarak, iyileştirme sonrası caminin birinci modundaki keskin değişiklikleri vurgulamışlardır. Usta ve diğ. (2020) tarihi Afyon Sandıklı Ulu Camisi'nin sismik performansını tespit etmek için incelemeler

gerçekleştirmiştir. Bu incelemeler sonucunda yapının sismik etkisi altındaki performansı belirlenmiştir.

Çakır (2021) antik yapıların sismik performansını değerlendirmek için deplasmana bağlı basitleştirilmiş bir metot önermiştir. Kaya Çelebi Camisi ile detaylandırılan bu yöntem, tarihi yapıların deprem performans analizinde kullanılabilir. Maraş ve diğ. (2022) 2020’de gerçekleşen Elâzığ depreminde, bölgedeki tarihi Sütçü Camisi’nde oluşan hasarları sayısal eleman metoduyla belirlemiştir. Sayısal eleman metodu vasıtasıyla yapısal hasar ve bölgesel çatlak mekanik yapıları ile deprem anında yapıda gerçekleşen hasarların paralel olduğu tespit edilmiştir. Bayraktar ve diğ. (2019) Fatih Camisi’nin iyileştirmesi boyunca saptanan 12 pencere açıklığının yapıya olan etkisi tespit etmişlerdir. İyileştirme evvel ve sonrası caminin deneysel doğal frekansı belirlenmiş ve sayısal eleman modelleri oluşturularak pencere açıklıklarının yapı üzerindeki performansı analiz edilmiştir. Uray ve diğ. (2019) İznik Yeşil Camisi’nin malzeme özelliklerini hasarsız yöntemlerle belirlemiş ve zemin özelliklerini zemin inceleme çalışmaları ile incelemiştir. Yapının sonlu eleman modeli oluşturularak statik analizler altında yapısal gerilmeler incelenmiştir. Portioli ve diğ. (2011) Üsküp Mustafa Paşa Camisi’nin sismik tepkisini ve CFRP tabanlı bir güçlendirme yönteminin etkinliğini değerlendirmek amacıyla bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, caminin büyük ölçekli bir modeli sarsma tablası üzerinde test edilmiş ve sonlu eleman modeli ile kalibre edilmiştir. Kocaman ve diğ. (2020) Erzurum Lala Paşa Camisi’nin sonlu eleman modelini kullanarak deprem tepkisini dinamik analizlerle değerlendirdi. Tarihi camilerin kuvvet kapasitesini belirlemek için kinematik bir yaklaşım önerdiler ve bu yaklaşımın Erzurum Narmanlı Camisi üzerindeki etkinliğini test ettiler. Aşıkoğlu ve diğ. (2019) tarihi Kurşunlu Camisi’nin sonlu eleman modelini oluşturarak itme analizleri gerçekleştirdi ve yapının restorasyon öncesi ve sonrası kuvvet- deplasman eğrilerini karşılaştırdı. Altunışık ve diğ. (2021), deprem sırasında hasar alan Hüsrev Paşa ve Kaya Çelebi camilerini detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Camilerin yapısal simülasyon modelleri kullanılarak, yakın ve uzaktaki fay hatlarının yapılar üzerindeki etkileri incelendi. Köseoğlu ve Canbay (2015), Ankara Cenabi Ahmet Paşa Camisi’nde meydana gelen çatlak hasarlarının kökenlerini inceledi ve sonlu eleman modeli kullanarak çatlakların nasıl oluştuğunu analiz etti. Aşıkoğlu ve diğ. (2021), güçlendirme müdahalesi yapılan bir tarihi caminin dinamik analizlerini gerçekleştirerek, iyileştirmenin deprem davranışına etkisini detaylı bir şekilde inceledi. Yapılan çalışmaların sonuçları, güçlendirmenin caminin yer değiştirme kapasitesine olumlu katkı sağladığını göstermektedir. Dinani ve diğ. (2021) tarihi Esfahan Şah Cami’de bir

dizi tahribatsız analizler yaparak, caminin malzeme özelliklerini belirlemişlerdir. Yapılan analizler neticesinde caminin performans limitleri önerilmiştir. Karantoni ve Dimakopoulou (2021) Kos adasında meydana gelen deprem sonrası tarihi Gazi Hasan Paşa camisinde meydana gelen hasarları incelemişlerdir. Yapının sonlu eleman analizleri gerçekleştirilerek, meydana gelen hasarların sınırlı hasar düzeyinde olduğunu belirtmişlerdir. Valente (2022) doğrusal olmayan dinamik analizlerle köşelerinde kule olan tarihi yığma sarayların sismik davranışını incelemiştir. Analizler neticesinde duvarlar ile birleşen kulelerin oldukça hassas olduğu belirlenmiştir.

2.2. YÖNETMELİKLERİN KULLANIMI

Tarihi yapıların deprem performansının belirlenmesi için çeşitli hesaplama yöntemleri ve kriterler bulunmaktadır. Ülkemizde, bu amaçla genellikle "Tarihi Yapılarda Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu (TYDRYK, 2017)" ve "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018)" birlikte kullanılmaktadır. TBDY-2018, yeni inşa edilecek ve var olan binaların deprem güvenliğinin tespit edilebilmesi için belirli talimatlar içermektedir. Ancak bu ilgili talimatlar, TBDY-2018'deki performans düzeylerinin tarihi yapılar için direkt olarak uygulanması bazı sorunlara yol açabilmektedir. Bu sebeple, tarihi yapılar, TBDY-2018 kapsamının dışında tutulmuştur. TYDRYK-2017'de ise, deprem etkilerinin TBDY-2018 ile uyumlu bir şekilde alınması önerilmiş, ancak tarihi yapılar için performans düzeylerinin farklılaştırılması sağlanmıştır. Bu nedenle, tarihi yapıların deprem etkilerinin belirlenmesinde TBDY-2018, yapıların performans seviyelerinin belirlenmesinde ise TYDRYK-2017 kullanılmaktadır.

Önemli bir husus olarak, yığma elemanların basınç ve kesme dayanımları, betonarme elemanların şekildeğiştirme sınırları, gevreklik kontrolleri, kurtarmayan elemanlara etkileyen kesme kuvvetlerinin toplamının kat kesmesine oranı gibi TYDRYK-2017'de belirtilmeyen hususlar TBDY-2018 çerçevesinde uygulanmıştır.

2.3. TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİ, TBDY-2018

2.3.1. Deprem Yer Hareketi

2.3.1.1. Deprem Yer Hareketi Düzeyleri

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'de dört çeşit deprem yer hareketi düzeyi

tanımlanmış olup aşağıda verilmiştir.

Deprem Yer Hareketi Düzeyi-1 (DD-1): DD-1 Deprem Yer Hareketi, belirli spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %2 ve buna karşılık gelen tekrarlanma periyodunun 2475 yıl olduğu seyrek bir deprem yer hareketini tanımlar. Bu deprem yer hareketi, değerlendirilen en büyük deprem yer hareketi olarak anılır.

Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2): DD-2 Deprem Yer Hareketi, belirli spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %10 ve buna karşılık gelen tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu seyrek bir deprem yer hareketini ifade eder. Bu deprem yer hareketi, tipik tasarım deprem yer hareketi olarak bilinir.

Deprem Yer Hareketi Düzeyi-3 (DD-3): DD-3 Deprem Yer Hareketi, belirli spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %50 ve buna karşılık gelen tekrarlanma periyodunun 72 yıl olduğu sık bir deprem yer hareketini tanımlar.

Deprem Yer Hareketi Düzeyi-4 (DD-4): DD-4 Deprem Yer Hareketi, belirli spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %68 (30 yılda aşılma olasılığı %50) ve buna karşılık gelen tekrarlanma periyodunun 43 yıl olduğu çok sık bir deprem yer hareketini ifade eder. Bu deprem yer hareketi, servis deprem yer hareketi olarak da bilinir.

2.3.1.2. Yerel Zemin Etki Katsayıları

Yerel zemin etki katsayıları (F_s ve F_1); bölgesel zemin sınıfı ve spektral ivme katsayıları özellikleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalarda Tablo 2.1’de verilen değerler arasında enterpolasyon yapılmaktadır.

Tablo 2.1 – Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayıları

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 (Bkz.16.5).					

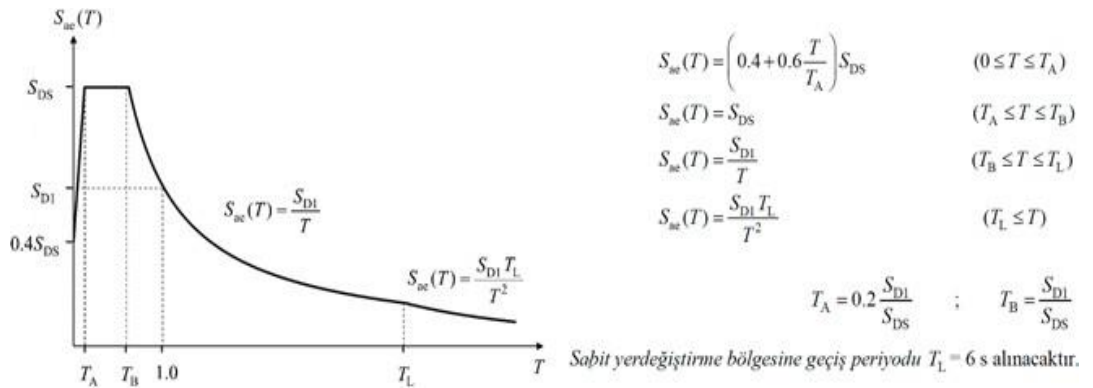
Tablo 2.2 – 1.0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayıları

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 (Bkz.16.5).					

Tablo 2.1: Yerel zemin etki katsayıları (TBDY, 2018)

2.3.1.3. Yatay Elastik Tasarım Spektrumu

Spektral ivme katsayıları, TBDY-2018 kılavuzunda tanımlandığı üzere, deprem tehlike haritasından elde edilen spektral ivme değerleri ile yerel zemin etki katsayılarının çarpımıyla hesaplanır. Yatay elastik spektral ivme değerleri $[S_{ae}(T)]$ ve yatay elastik ivme spektrumu köşe periyotları (T_A ve T_B), yukarıda elde edilen sonuçlar ve yönetmelikte belirtilen kriterler doğrultusunda Şekil 2.1'e göre hesaplanmakta ve ayrıca yatay elastik ivme spektrumu oluşturulmaktadır. İleriki bölümlerde yapılan performans analizlerinde bu yöntem ile elde edilen yatay ivme spektrumu kullanılmaktadır.



Şekil 2.1: Spektral ivme katsayıları ve yatay elastik ivme spektrumu (TBDY, 2018)

2.3.2. Deprem Etkisi Altında Binaların Değerlendirilmesi İçin Genel Esaslar

2.3.2.1. Deprem Tasarım Sınıfı

Tablo 2.2’de, TBDY-2018’e göre binaların hesaplanan kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (S_{DS}) ve kullanım sınıfları (BKS) dikkate alınarak belirlenen deprem tasarım sınıfları (DTS) gösterilmiştir.

DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyinde Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı (S_{DS})	Bina Kullanım Sınıfı	
	BKS = 1	BKS = 2, 3
$S_{DS} < 0.33$	DTS = 4a	DTS = 4
$0.33 \leq S_{DS} < 0.50$	DTS = 3a	DTS = 3
$0.50 \leq S_{DS} < 0.75$	DTS = 2a	DTS = 2
$0.75 \leq S_{DS}$	DTS = 1a	DTS = 1

Tablo 2.2: Deprem tasarım sınıfları (DTS) (TBDY, 2018)

2.3.2.2. Bina Kullanım Sınıfı ve Bina Önem Katsayıları

Tablo 2.3’de, TBDY-2018’de binanın istifade amacına paralel olarak belirlenen bina kullanım sınıfları (BKS) ve bina önem katsayıları (I) sunulmuştur. Bu parametreler performans hedefi ve analizi yönteminin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Bina Kullanım Sınıfı	Binanın Kullanım Amacı	Bina Önem Katsayısı (I)
BKS = 1	Deprem sonrası kullanımı gereken binalar, insanların uzun süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar, değerli eşyanın saklandığı binalar ve tehlikeli madde içeren binalar a) Deprem sonrasında hemen kullanılması gerekli binalar (Hastaneler, dispanserler, sağlık ocakları, itfaiye bina ve tesisleri, PTT ve diğer haberleşme tesisleri, ulaşım istasyonları ve terminaleri, enerji üretim ve dağıtım tesisleri, vilayet, kaymakamlık ve belediye yönetim binaları, ilk yardım ve afet planlama istasyonları) b) Okullar, diğer eğitim bina ve tesisleri, yurt ve yatakhaneler, askeri kışlalar, cezaevleri, vb. c) Müzeler d) Toksik, patlayıcı, parlayıcı, vb. özellikleri olan maddelerin bulunduğu veya depolandığı binalar	1.5
BKS = 2	İnsanların kısa süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar Alışveriş merkezleri, spor tesisleri, sinema, tiyatro, konser salonları, ibadethaneler, vb.	1.2
BKS = 3	Diğer binalar BKS=1 ve BKS=2 için verilen tanımlara girmeyen diğer binalar (Konutlar, işyerleri, oteller, bina türü endüstri yapıları, vb.)	1.0

Tablo 2.3: Bina kullanım sınıfları ve bina önem katsayıları (TBDY, 2018)

2.3.2.3. Bina Yükseklik Sınıfı

Tablo 2.4’de, TBDY-2018’e göre deprem tasarım sınıfı (DTS) ve bina yüksekliği (HN) göz önüne alınarak belirlenen “Bina Yükseklik Sınıfları (BYS)” sunulmuştur. Bina yükseklik sınıfları, yapının performans hedefi ve analizi yönteminin belirlenmesinde etkili olmaktadır.

Bina Yükseklik Sınıfı	Bina Yükseklik Sınıfları ve Deprem Tasarım Sınıflarına Göre Tanımlanan Bina Yükseklik Aralıkları [m]		
	DTS = 1, 1a, 2, 2a	DTS = 3, 3a	DTS = 4, 4a
BYS = 1	$H_N > 70$	$H_N > 91$	$H_N > 105$
BYS = 2	$56 < H_N \leq 70$	$70 < H_N \leq 91$	$91 < H_N \leq 105$
BYS = 3	$42 < H_N \leq 56$	$56 < H_N \leq 70$	$56 < H_N \leq 91$
BYS = 4	$28 < H_N \leq 42$	$42 < H_N \leq 56$	
BYS = 5	$17.5 < H_N \leq 28$	$28 < H_N \leq 42$	
BYS = 6	$10.5 < H_N \leq 17.5$	$17.5 < H_N \leq 28$	
BYS = 7	$7 < H_N \leq 10.5$	$10.5 < H_N \leq 17.5$	
BYS = 8	$H_N \leq 7$	$H_N \leq 10.5$	

Tablo 2.4: Yükseklik ve deprem tasarım sınıflarına göre tanımlanan bina yükseklik aralıkları (TBDY, 2018)

2.3.2.4. Bina Performans Düzeyleri

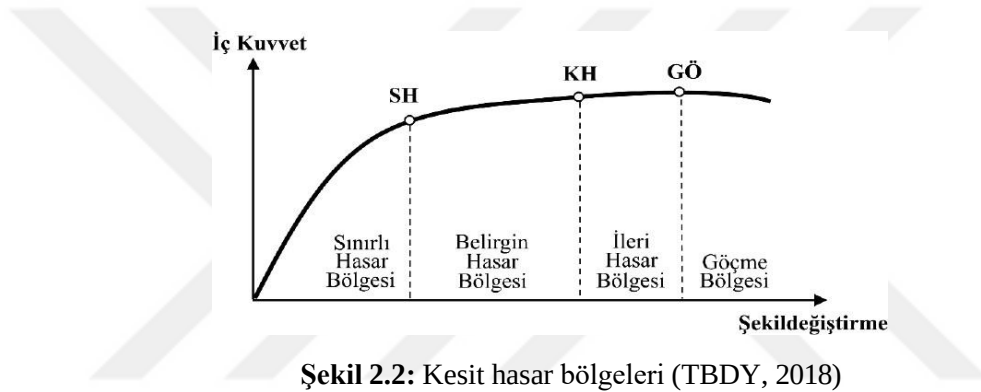
Deprem etkisi altında bina taşıyıcı sistemleri için “Bina Performans Düzeyleri” aşağıda tanımlanmıştır.

- Kesintisiz Kullanım (KK) Performans Düzeyi: Bu düzeyde, bina taşıyıcı sistem elemanlarında yapısal hasar oluşmamış veya oluşan hasar ihmal edilebilir seviyededir.
- Sınırlı Hasar (SH) Performans Düzeyi: Bu düzeyde, bina taşıyıcı sistem elemanlarında sınırlı düzeyde hasar meydana gelir, yani doğrusal olmayan davranışın sınırlı olduğu bir hasar seviyesine karşı gelinir.
- Kontrollü Hasar (KH) Performans Düzeyi: Bu düzeyde, can güvenliğini sağlamak amacıyla bina taşıyıcı sistem elemanlarında genellikle onarılabılır düzeyde ve çok ağır olmayan hasara karşı gelinir.
- Göçmenin Önlenmesi (GÖ) Performans Seviyesi: Bu aşamada, yapısal taşıyıcı sistem elemanlarında ciddi düzeyde ağır hasar oluşabilir ve binanın ağır hasar almamasına

veya tam olarak göçmesi engellenebilir.

2.3.2.5. Yapı Elemanlarında Hasar Sınırları ve Hasar Bölgeleri

Sünek yapı elemanları için kesit düzeyinde üç farklı hasar durumu ve bunların sınır değerleri belirlenmiştir: Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçme Öncesi Hasar (GÖ). Kritik kesitlerin hasarı, SH sınırına ulaşmayan elemanlar için "Sınırlı Hasar Bölgesi"nde, SH ile KH arasında kalanlar için "Belirgin Hasar Bölgesi"nde, KH ile GÖ arasında kalanlar için "İleri Hasar Bölgesi"nde, GÖ sınırını aşanlar için ise "Göçme Bölgesi"nde değerlendirilirler. Kesit hasar bölgeleri Şekil 2.2’de verilmiştir.



2.4. TARİHİ YAPILARDA DEPREM RİSKLERİNİN YÖNETİMİ KILAVUZU, TYDRYK-2017

Ülkemizde tarihi yapıların deprem performansının belirlenmesinde “Tarihi Yapılarda Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu (TYDRYK, 2017)” kullanılmakta olup bu yönetmelikte belirtilen bazı hususlar aşağıda verilmiştir.

2.4.1. Malzeme Özellikleri

Tablo 2.5’de farklı yığma duvar türleri için “Tarihi Yapılarda Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu (TYDRYK, 2017)” de belirtilen yığma duvar malzemesinin birim ağırlıkları ve mekanik özellikleri verilmiştir. Tablo 2.6’da ise bu mekanik özelliklerde harç, duvar işçiliği ve duvarın enine bağlantılarının özelliklerine bağlı kullanılabilecek düzeltme katsayıları sunulmuştur. TYDRYK-2017’ye göre yapılan performans analizlerinde bu tablolarda belirtilen mekanik özellikler ve düzeltme katsayıları kullanılmaktadır.

Duvar türü	Basınç dayanımı f_m (MPa)	Kayma dayanımı τ_o (kPa)	Elastisite modülü E (MPa)	Kayma modülü G (MPa)	Birim hacim ağırlığı w (kN/m ³)
Moloz taşlı yığma duvar	0.6~0.90	20~32	690~1050	115~175	19
Kaba yonu taşlı yığma duvar	1.1~1.6	35~51	1020~1440	170~240	20
Kesme taşlı iyi bağlantılı yığma duvar	1.5~2.0	56~74	1500~1980	250~330	21
Yumuşak taşlı (kalker, tüf) yığma duvar	0.8~1.2	28~42	900~1260	150~210	16
Düzgün kesme taşlı, sıvalı yığma duvar	3.0~4.0	78~98	2340~2820	390~470	22
Kireç harçlı tuğla yığma duvar	1.8~2.8	60~92	1800~2400	300~400	18
Çimento harçlı yarı boşluklu tuğla yığma duvar	3.8~5.0	240~320	2800~3600	560~720	15
Boşluk oranı %45'den küçük olan tuğla yığma duvar	4.6~6.0	300~400	3400~4400	680~880	12
Boşluk oranı %45'den küçük düşey derzleri harçsız tuğla yığma duvar	3.0~4.0	100~130	2580~3300	430~550	11
Boşluk oranı %45~65 arasında bulunan beton bloklu yığma duvar	1.5~2.0	95~125	2200~2800	440~560	12
Boşluğu doldurulmuş beton bloklu yığma duvar	3.0~4.4	180~240	2700~3500	540~700	14

Tablo 2.5: Yığma duvar malzemesinin mekanik özellikleri (TYDRYK-2017)

Duvar düzeni	İyi bağlayıcı harç	İyi düzenlenen derzli duvar	Enine bağlantılı duvar	Harç enjeksiyonlu duvar	Donatılı sıva ile güçlendirilmiş duvar
Moloz taşlı yığma duvar	1.5	1.3	1.5	2.0	2.0
Kaba yonu taşlı yığma duvar	1.4	1.2	1.5	1.7	2.0
Kesme taşlı iyi bağlantılı yığma duvar	1.3	1.1	1.3	1.5	1.5
Yumuşak taşlı (kalker, tüf) yığma	1.5	-	1.5	1.7	2.0
Düzgün kesme taşlı, sıvalı yığma duvar	1.2	-	1.2	1.2	1.2
Kireç harçlı tuğla yığma duvar	1.3	-	1.3	1.5	1.5
Çimento harçlı yarı boşluklu tuğla yığma duvar	1.3	-	-	-	1.3
Boşluk oranı %45'den küçük olan tuğla yığma duvar	1.3	-	-	-	1.3
Boşluk oranı %45'den küçük düşey derzleri harçsız tuğla yığma duvar	1.3	-	-	-	1.3
Boşluk oranı %45~65 arasında bulunan beton bloklu yığma duvar	1.3	-	-	-	1.3
Boşluğu doldurulmuş beton bloklu yığma duvar	1.3	-	-	-	1.3

Tablo 2.6: Yığma duvar malzemesinin mekanik özelliklerinde harç, duvar işçiliği ve duvarın enine bağlantılarının özelliklerine bağlı kullanılacak düzeltme katsayıları (TYDRYK-2017)

2.4.2. Deprem Etkisi

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018), yapılar üzerinde deprem etkisini dikkate alarak tasarım yapmayı zorunlu kılmaktadır ve bu bağlamda Türkiye Deprem Tehlikesi Haritaları önemli bir kaynak teşkil etmektedir. Bu bölümde, mevcut yönetmelik kapsamında yeni ve mevcut binalara ilişkin kuralların tarihi yapılara nasıl uygulanabileceği üzerinde durulmaktadır. Tarihi yapıların yapısal değerlendirmelerinde mevcut belirsizlikler ve güçlendirme çalışmalarının sınırlı kapsamı dikkate alınarak, yönetmelikteki kurallar basitleştirilmiş ve sınırlandırılmıştır. Tarihi yapıların deprem güvenliğini değerlendirmek için üç farklı deprem düzeyi tanımlanmıştır:

- Deprem Yer Hareketi Düzeyi-1 (DD-1): 50 yıl içinde aşılma olasılığı %2 olan ve tekrarlanma periyodu 2475 yıl olan bu yer hareketi, en büyük deprem olarak tanımlanır.
- Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2): 50 yıl içinde aşılma olasılığı %10 olan ve tekrarlanma periyodu 475 yıl olan bu yer hareketi, orta sıklıkta görülen bir deprem türüdür.
- Deprem Yer Hareketi Düzeyi-3 (DD-3): 50 yıl içinde %50 olasılıkla aşılma riski taşır ve tekrarlanma periyodu 72 yıldır. Bu durum, sık görülen depremler için tipik bir tanımlamadır.

Yönetmelikte, belirli bir deprem için referans zemin koşulları göz önünde bulundurularak yatay ve düşey elastik spektrumlar detaylı bir şekilde tanımlanmıştır. Tarihi yapıların analizlerinde genellikle yatay deprem bileşeni yeterli görülürken, özel durumlarda (örneğin geniş açıklıklar veya konsollu yapılar gibi) düşey deprem bileşeninin de dikkate alınması gerekebilir. Bu tür yapılar, yapısal bütünlüğün korunması ve güvenliğin sağlanması açısından önem taşımaktadır. Yapının önemi ve özel zemin koşulları göz önünde bulundurularak, sahaya özgü deprem tehlikesi analizleri ve sahaya özel deprem spektrumlarının tanımlanması gerekebilir. Bu spektrumların, TBDY- 2018'de belirtilen spektrum değerlerinden daha düşük olmaması gerekmektedir. Ayrıca, tarihi bir binanın strüktürel sistemi üzerinde zaman geçiş alanında 3 boyutlu sismik analizleri yapılırken, gerekli deprem hareketlerinin seçimi ve ölçeklendirilmesine ilişkin yönetmelikte belirtilen kurallar uygulanmalıdır.

2.4.3. Hasar Görebilirlik ve Performans Düzeyi Kavramı

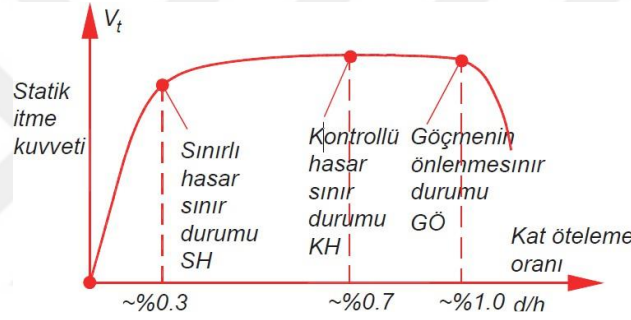
Bir antik yapının işlevi, kullanım sıklığı ve bunlara ilaveten ziyaretçi trafiği gibi faktörler göz önünde bulundurularak "Tolerans Seviyesi" belirlenebilir. Herkes tarafından bilinen ve sürekli insan akınına uğrayan bir yapıda, istenilen hasar seviyesi en düşük tutulurken, yalnızca dışarıdan görülebilen ve yerel öneme sahip olan tarihi bir yapıda daha fazla hasar kabul edilebilir.

- Deprem güvenliğinin belirlenmesi için geliştirilen performans kavramı, iki ana unsura dayanır. İlk olarak, deprem etkisi altında taşıyıcı sistemin elastik ve elastik ötesi davranışları, taşıyıcı sistem kapasitesi ve deprem taleplerinin gerçekçi bir şekilde değerlendirilmesini içerir. Diğer bir konu ise, gelişmiş yazılım programlarının sunduğu detaylı çözüm tekniklerinin kullanılmasıyla, kabul edilen hasarın (elastik olmayan kontrollü deformasyonların) sayısal olarak belirlenmesi ve bu durumun deprem güvenliği değerlendirmesine etkisinin değerlendirilmesidir. Bu süreç, yapıların dayanıklılığının ve deprem performansının anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Ancak, tüm matematiksel çözümlerin elde edilen sonuçlarının, taşıyıcı sistem davranışı ve deprem etkilerinin varsayımlarına dayandığı unutulmamalıdır. Tarihi yapıların belirsizlikleri nedeniyle, sismik incelemede ele alınan malzeme ve destek sistem parametrelerinin hassasiyeti kısıtlı olabilir. Bu sebeple, tarihi yapıların değerlendirilmesinde kullanılan kriterler ve matematiksel yöntemler mümkün olduğunca basitleştirilmelidir. Belirli deprem etkileri göz önüne alındığında, antik yapılar için aşağıdaki "Yapısal Performans Seviyeleri" tanımlanabilir:

- Sınırlı Hasar (SH) Performans Düzeyi: Yapının taşıyıcı sistem elemanlarında kısıtlı düzeyde zarar oluştuğunda, malzeme davranışında doğrusal olmayan karakteristikler ortaya çıkar. Bu performans düzeyinde, yapısal bütünlük genellikle korunmuş olsa da bazı yerel hasarlar olabilir.
- Kontrollü Hasar (KH) Performans Düzeyi: Yapının yük taşıyan elemanlarında hafif düzeyde hasar oluştuğunu ve doğrusal olmayan davranışın minimal olduğunu ifade eder. Yapısal bütünlük genellikle korunur, ancak bazı yerel hasarlar görülebilir.
- Göçmenin Önlenmesi (GÖ) Performans Düzeyi: Yapının yük taşıyan elemanlarında ileri düzeyde ağır hasar meydana geldiğini, yapının kısmen veya tamamen çökme tehlikesiyle karşı karşıya olduğunu ancak çökmenin engellendiğini ifade eder. Bu

performans düzeyinde, yapı ciddi hasar görmüş olsa da yapısal sistem çöküşü önlemek amacıyla tasarlanmıştır ve bu nedenle kullanılabilir durumda kalır.

TYDRYK-2017, taşıyıcı sistem sağlamlığının incelemesinde "Dayanıma Odaklı İnceleme" ve "Deformasyona Odaklı İnceleme" yaklaşımlarını benimser (Şekil 2.3). Yapıda hasar seviyesinin (elastik ötesi deformasyonların) düşük olduğu durumlarda, dayanıma göre değerlendirme uygun olurken, hasarın göçmeye neden olmayacak ve kontrollü biçimde büyük olduğu durumlarda, şekildeğiştirmeye göre değerlendirme tercih edilir. Bununla birlikte, stabil deprem yükü azaltma katsayısı kullanarak, kuvvete dayalı değerlendirmenin sınırlarını genişleterek ve deformasyona dayalı tasarım için uygun limit değerler belirleyerek, bu tür hasar durumlarında da uygulama yapılabilir.



Şekil 2.3: Statik itme eğrisi ve sınır durumları (TBDY, 2018)

Tablo 2.7'de sunulan tarihi yapıların performans durumları, yapının önemine bağlı olarak çeşitli performans seviyelerini önermektedir. Önemli yapılar için çeşitli performans seviyeleri sunulmuş olup, bu seviyeler genellikle birbirine yakındır. Tablonun üst kısmında daha yüksek performans seviyeleri yer almakta, bu yapıların küresel öneme sahip olduğu düşünülerek önerilmiştir. Ancak, yerel öneme sahip yapılar için daha düşük seviyeler de önerilmektedir. Yine de, bu tablolar (Tablo 2.7 ve Tablo 2.8) sadece rehber niteliğindedir ve örneğin lokal değere sahip bir inşaa için üstün yüksek bir verim seviyesi de düşünülebilir. Bir yapının beklenen performans seviyesinin yüksek olması, büyük bir depremde daha az hasar görmesini sağlar, ancak bu durum yapıya önemli müdahaleler gerektirebilir. Eğer bu müdahaleler yapı için uygun değilse, performans seviyesinin düşürülmesi gerekebilir. Bu nedenle, antik bir yapının sismik dayanıklılığı değerlendirmesinde minimum iki ayrı performans seviyesinin göz önünde bulundurulması önerilir. Her iki performans seviyesi için de uygun müdahale stratejileri ve yapının özellikleri dikkate alınarak bir değerlendirme yapılmalıdır. Tablo 2.7'de sunulan hedef

performans seviyeleri sadece yönlendirici niteliktedir ve yapının özelliklerine göre müdahale stratejisi ve performans seviyesi belirlenmelidir.

Tablo 2.8'de ise seçilen beklenen veya öngörülen performans seviyelerine göre kullanılacak hesap yöntemleri ve yapı elemanlarını oluşturan malzemelerin sınır gerilme ve şekil değiştirme değerleri verilmiştir. Tabloya göre, elastik sınırdaki davranış gösteren durumlar için doğrusal hesap yöntemi yeterli olabilirken, göçme riski olan durumlarda elastik ötesi şekil değiştirmelerin önemli olduğu anlaşıldığında doğrusal olmayan hesap yöntemlerine yönelmek daha uygundur.

TARİHİ YAPILARIN ÖNEMİNE GÖRE SEÇİLEBİLECEK PERFORMANS DÜZEYLERİ	Ulusal öneme sahip tarihi yapı Grup I	Evrensel öneme sahip tarihi yapı	
	DD-3 (50/%50, 72 yıl) Sınırlı hasar düzeyi (SH)	DD-2 (50/%10, 475 yıl) Sınırlı hasar düzeyi (SH)	DD-1 (50/%2, 2475 yıl) Sınırlı hasar düzeyi (SH)
Yerel öneme sahip tarihi yapı Grup II	DD-3 (50/%50, 72 yıl) Kontrollü hasar düzeyi (KH)	DD-2 (50/%10, 475 yıl) Kontrollü hasar düzeyi (KH)	DD-1 (50/%2, 2475 yıl) Kontrollü hasar düzeyi (KH)
	DD-3 (50/%50, 72 yıl) Göçmenin önlenmesi düzeyi (GÖ)	DD-2 (50/%10, 475 yıl) Göçmenin önlenmesi düzeyi (GÖ)	DD-1 (50/%2, 2475 yıl) Göçmenin önlenmesi düzeyi (GÖ)

Tablo 2.7: Önerilen hedef performans düzeyleri (TYDRYK-2017)

Performans düzeyi	Hesap yöntemi ve sınırlar
Sınırlı hasar sınır durumu (SH)	1. Doğrusal hesap yöntemi kullanılıyor; a) Düşey yük ve azaltılmamış öngörülen deprem etkisinde bulunan hesap dayanımları aşılmıyor. b) Azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranı % 0,3 sınırını aşıyor.
Kontrollü hasar sınır durumu (KH)	1. Doğrusal hesap yöntemi kullanılıyor; a) Düşey yük ve $R_a \leq 3$ ile azaltılmış öngörülen deprem etkisinde bulunan hesap dayanımları aşılmıyor. b) Azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranı % 0,7 sınırını aşıyor. 2. Doğrusal olmayan hesap yöntemi kullanılıyor; a) Öteleme oranı % 0,7 sınırının aşıyor. b) Malzemelerin şekildeğiştirme kapasiteleri aşılmıyor.
Göçme öncesi sınır durumu (GÖ)	1. Doğrusal hesap yöntemi kullanılıyor; a) Düşey yük ve $R_a \leq 3$ ile azaltılmış öngörülen deprem etkisinde bulunan hesap dayanımları belirli bir oranla (~ 1.5 katı) aşılabılır. b) Azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranı % 1 sınırını aşıyor. 2. Doğrusal olmayan hesap yöntemi kullanılıyor; a) Öteleme oranı % 1 sınırının aşıyor. b) Malzemelerin şekildeğiştirme kapasiteleri sınırlı oranda (~ 1.2 katı) aşılabılır.

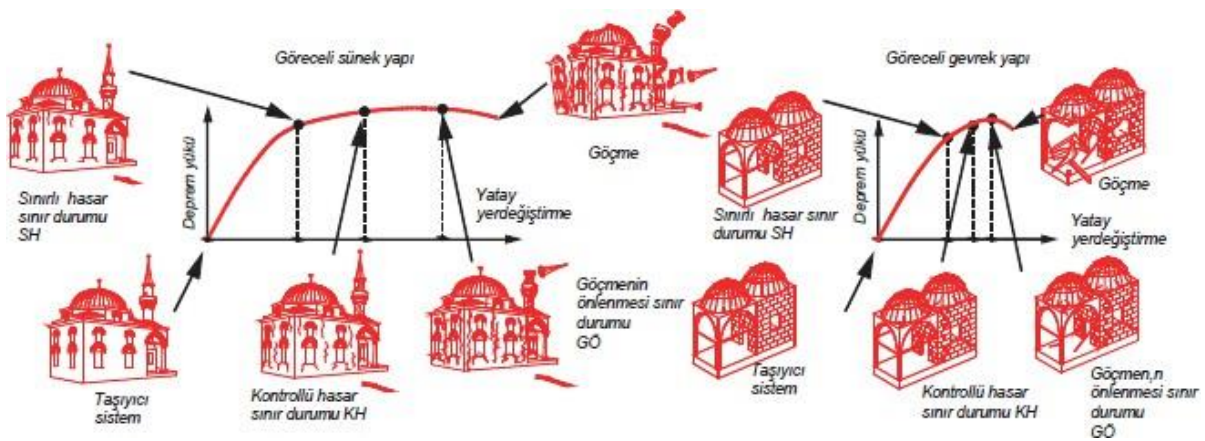
Tablo 2.8: Performans düzeyleri ile ilgili hesap yöntemleri ve sınır durumları (TYDRYK-2017)

2.4.4. Dayanıma Göre Değerlendirme

Yapının dayanımı değerlendirildiğinde, düşey yükler ve kabul edilen deprem yükü azaltma katsayısı ($R_a \leq 3$) ile azaltılmış sismik etkiler dikkate alınarak yapı elemanlarındaki gerilmeler hesaplanır. Bu gerilmeler, ilgili malzemenin kabul edilen sınır dayanım değerleriyle karşılaştırılarak incelenir. Eğer öngörülen sismik etkiler altında yapının sınırlı hasar görmesi bekleniyorsa, yani Sınırlı Hasar (SH) bölgesinde kalması öngörülüyorsa, azaltılmamış sismik

etkiler altında ($R_a=1$) sınır gerilmelerin aşılmaması beklenir. Yapının tamamen yıkılmasını önlemek amacıyla, düşey yüklerle birlikte azaltılmış sismik etkilerin strüktürel sistemde oluşturduğu gerilmelerin ilgili sınır gerilmeleri belirli bir oranda (%50) aşmasına izin verilir. İki hasar durumu arasında yer alan kontrollü hasar durumunda ise, azaltılmış sismik etkiler altında sınır gerilmelerin aşılmaması beklenir. Deprem yükü azaltma katsayısı, strüktürel sistemin sünekliğine bağlı olarak belirlenir ve özellikle yığma yapılar gibi tarihi yapılar için $R_a \leq 3$ olarak kabul edilir.

Bu tür bir değerlendirmede iki temel koşulun sağlanması gerekmektedir. İlk olarak, bu karşılaştırmanın geçerli olabilmesi için, yapının gerekli elastik ötesi şekil değiştirme ve yer değiştirme kapasitesine sahip olması gerekmektedir. Yani, tamamen kırılğan veya yeterli sünekliği olmayan yapılar için bu tür deprem yükü azaltma katsayısının kullanımı uygun değildir. Örneğin, düşük sünekliğe sahip bir yığma yapı için büyük deprem yükü azaltma katsayısı kullanımı doğru sonuçlar vermeyebilir. İkinci olarak, beklenen elastik ötesi şekil değiştirme veya yer değiştirme (kontrollü hasar) miktarının ilgili strüktürel sistemde kabul edilebilir olması gerekmektedir. Örneğin, yerel öneme sahip bir tarihi yapı için kabul edilebilir olan kontrollü hasar, ulusal öneme sahip bir tarihi yapı için kabul edilmeyebilir. Tüm hasar durumlarında, strüktürel sistemin bütünsel davranışının azaltılmamış sismik etkiler altında öteleme oranı sınırlandırılmalıdır. Tarihi yapılarda öteleme oranı, farklı seviyelerdeki noktaların yatay yer değiştirmelerinin farkının yükseklik farkına oranı olarak hesaplanır.



Şekil 2.4: Göreceli sünek ve gevrek taşıyıcı sistemde (yapı) performans düzeyleri

2.4.5. Şekildeğiştirmeye Göre Değerlendirme

Şekil 2.3'te gösterilen tarihi yapıdaki taşıyıcı sistemin deprem etkisi altındaki davranışı, zemindeki yer değiştirmeleri ile doğru orantılı olarak toplam deprem taban kesme kuvvetini belirler. Bu grafikte, yatay yük arttıkça elastik ötesi şekil değiştirmeleri meydana gelir. Başlangıçta, yapı elemanlarında elastik ötesi davranışın sınırlı hasarını gösterir, bu da Sınırlı Hasar (SH) performans düzeyi olarak adlandırılır. Yerdeğiştirmeler arttıkça, hem elastik hem de elastik ötesi şekil değiştirmeleri artar ve hasar miktarı artar. Yeterli sünekliğe sahip yapılar için eğrinin yatay kolu uzun ve belirgindir; ancak genellikle yığma yapılar gibi süneklik sınırlı olan yapılar için sınırlı hasar ile göçme durumu birbirine yakındır. Tamamen kırılğan davranışta ise, yapı elastik ötesi şekil değiştirme göstermeden hızlıca enerjisi tükenir. Bu kırılğan harekette, şekil değiştirme temelli inceleme verimli değildir; bunun yerine yapı, dayanım temelli olarak değerlendirilmelidir.

Bir yapıdaki elemanlarda elastik ötesi şekil değiştirmelerinin meydana gelmesi ve daha az zorlanan elemanların yük taşıma kapasitesine katkıda bulunabilmesi için, kesit ve eleman kapasitesinin ve/veya sünekliğinin artırılması önerilir. Şekil 2.3'teki eğri üzerinde elastik ötesi davranışın başlangıcı, Sınırlı Hasar (SH) performans düzeyi olarak adlandırılır çünkü bu noktada yapı çok sınırlı bir hasar görmektedir. Büyük yerdeğiştirmelerden sonra deprem yükünün azalmaya başlaması ise Göçmenin Önlenmesi (GÖ) performans seviyesi olarak bilinir. Kontrollü Hasar (KH) performans seviyesi, taşıyıcı sistemin sınırlı elastik ötesi deformasyonlarla yatay yük kapasitesini güvenli bir şekilde karşılayabileceği sınırları belirtir. Düşey yükler altında, deprem etkisi altında elastik ötesi şekil değiştirme ve yerdeğiştirmelere (kontrollü hasar oluşturmayacak şekilde) izin verilmesi muhtemeldir çünkü deprem etkisinin ortaya çıkma olasılığı düşüktür. Bu koşulda, yapı elemanlarında elastik ötesi davranışın doğrusal kabul edilmesi ile yapılacak değerlendirme yeterli olmayabilir. Bu durumda, şekil değiştirme ve yerdeğiştirme temelli değerlendirme için doğrusal olmayan bir analiz daha uygun olabilir. Bu tür bir analizde, strüktürel sistem elemanlarının yeterli elastik ötesi deformasyon ve yer değiştirme kapasitesine sahip olması gereklidir. Ayrıca beklenen şekil değişimi veya yer değiştirme (kontrollü hasar), strüktürel sistemin kabul edilebilir sınırlar içinde kalması gereklidir. Bundan dolayı, lokal şekil değiştirmeler denetim altındayken, yapının genel performansını yansıtan öteleme oranının denetimi daha belirleyici olur. Bu bağlamda, Tablo 2.8'de gösterilen işleyiş sınır değerleri %0.3, %0.7 ve %1.0 şeklinde kabul görülebilir. Ayrıca, malzemelerin şekil değiştirme kapasitelerinin aşılmadığının doğrulanması önemlidir.

3. YÖNTEM

3.1. YAPININ TANITIMI

3.1.1. Dış Cephe Görüntüsü

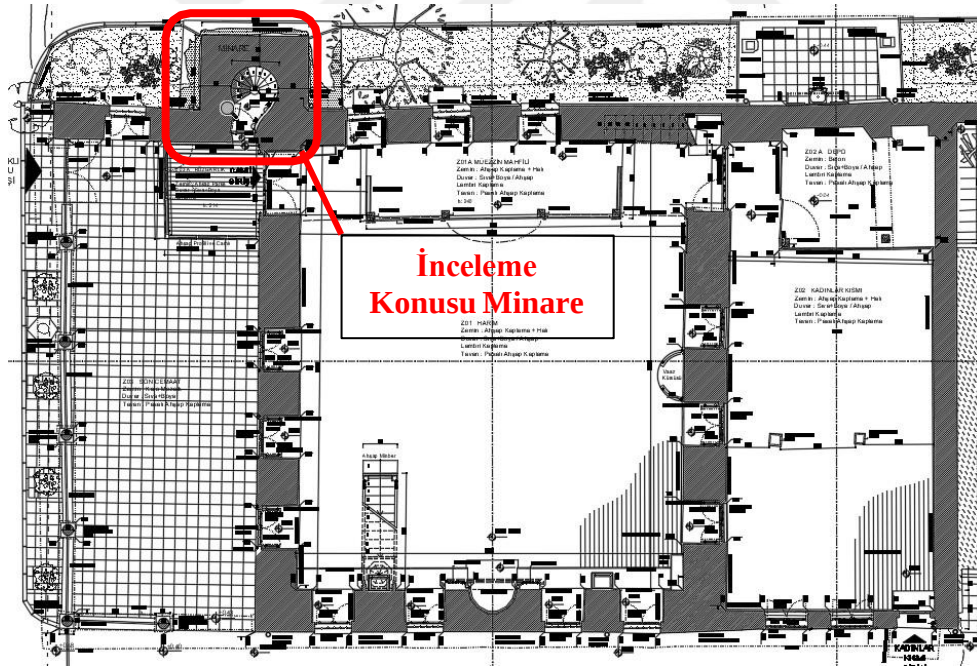
Şekil 3.1’de minarenin dış cephe görünüşlerinin bir kısmı sunulmuştur.



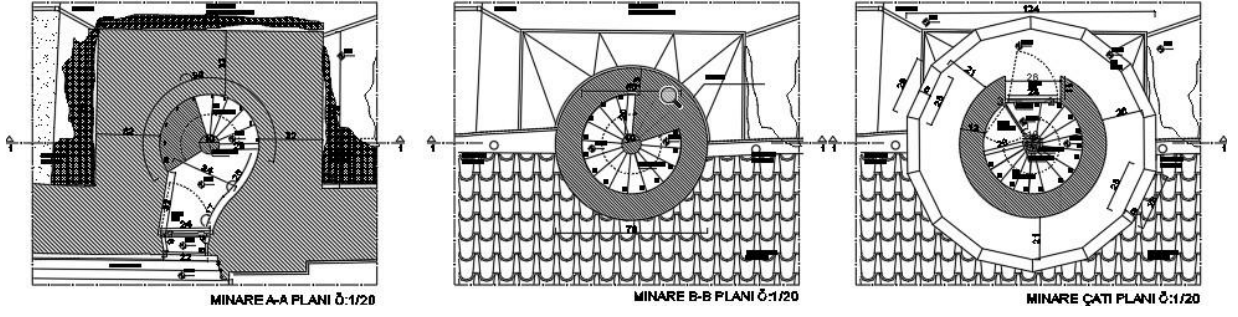
Şekil 3.1: Yapının dış cephe görünüşleri

3.1.2. Geometrik Özellikleri

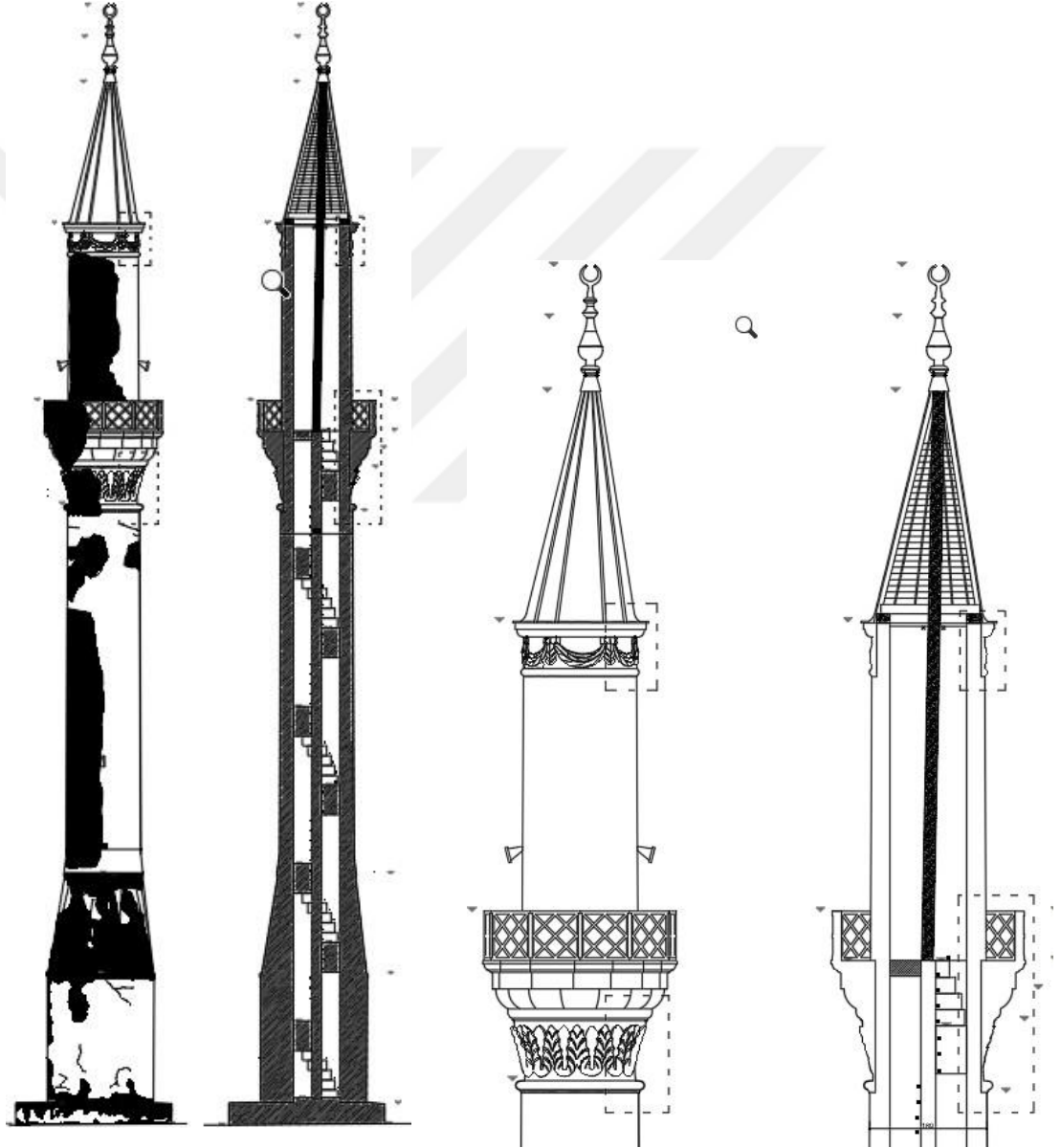
Bu bölümde yapının geometrik özellikleri mimari rölöve projesinden alıntı yapılarak sunulmuştur. Minare yapısı yaklaşık 28.87 m yüksekliğinde olduğu tespit edilmiştir. Minare aşağıdan yukarıya; kaide, pabuç, gövde, şerefe, petek ve külah kısımlarından oluşmaktadır. Kaide tabanı yaklaşık 2.82x2.82 m ebatlarındadır. Toplam yüksekliği 3.32 m'dir. Kaide kısmının tabanında yüksekliği yaklaşık 150 cm, genişliği 55 ve 60 cm arasında değişen giriş kapısı bulunmaktadır. Pabuç kısmının yüksekliği 2.58 metredir. Bu kısım 80 ve 60 cm kalınlığında duvar ile başlayıp gövde başlangıcında bu kalınlık 36 cm'e düşmektedir. Pabuç kısmından sonra gövde kısmı yer almaktadır. Gövdenin toplam yüksekliği 9.62 metredir. Bu kısım 35 ve 36 cm duvar kalınlığına sahiptir. Şerefe kısmı 2.12 m yüksekliğinde olup değişken geometrilidir. Şerefe kısmının en büyük çapı 3.10 m'dir. Şerefe kısmını petek kısmı izlemektedir. Bu kısım 5.45 m yüksekliğindedir. Bu kısmın dış çapı 1.84 m, duvar kalınlığı ise 30 santimetredir. Şekil 3.2 ve Şekil 3.4'de yapının mimari plan, kesit ve görünüşleri verilmiştir.



Şekil 3.2: Rölöve planı



Şekil 3.3: Minare rölöve planları



Şekil 3.4: Minare kesit ve görünüşleri.

3.1.3. Hasarlar

Minarenin dış yüzeyinde, kaideden şerefe kısmına kadar yapılan görsel incelemelerde, önemli seviyede hasarlar gözlemlenmiştir. Bu kısımda dış sıvanın bir kısmı hala mevcut durumdadır. Bu kısımda yapılan incelemelerde;

- Minarenin gövde altındaki silme taş bilezikte kesit kayıpları ve hasarlar görülmüştür. Bu kısımda taşları birbirine bağlayan kenetlerde ileri seviyede korozyon hasarları tespit edilmiştir (Şekil 3.5). Minare gövdesinde, yangından en çok etkilendiği düşünülen gövdenin alt kısmında yangına bağlı kararmalar mevcuttur. Bu kısımdaki sıva ve harçta yangın kaynaklı yüzeysel/yapısal bozulmalar olduğu tahmin edilmektedir (Şekil 3.6).
- Minare gövde alt kısmından başlayıp yaklaşık gövde ortasına kadar devam eden bir bölgede, yığma tuğla kesitte önemli derece kesit kayıpları, eksilmeler, kırılmalar ve derz boşalmaları görülmüştür. Bu kısımda orijinal harçtan farklı görünüşte harç tabakalarına rastlanılmıştır (Şekil 3.7).
- Minarede gövde üst kotundan yaklaşık 80 cm aşağıda duvar içerisine gömülü bir demir çember bulunmaktadır. Bu çemberde ileri derecede korozyon hasarları mevcuttur. Korozyondan kaynaklı olarak çemberin olduğu kesitteki tuğla elemanlarda da ayrışmalar, çatlaklar, dökülmeler görülmüştür (Şekil 3.8).
- Minare şerefe altı kısımda bulunan taşlarda ileri derecede kırıklar, açılmalar ve kesit kayıpları gözlemlenmiştir. Tuğla duvarın bittiği kottaki taş bilezikte, tuğladan başlayıp düşeyde boylu boyunca kesen çatlaklara rastlanılmıştır. Bu taşları birbirine bağlayan kenetlerde ileri derecede paslanma olmuştur (Şekil 3.9).
- Minare şerefe kısmındaki taş korkuluklarda da çatlak ve hasarlara rastlanılmıştır (Şekil 3.10)
- Minare petek kısmındaki ahşap seren direğinde çatlak ve deformasyonlar görülmüştür (Şekil 3.11).
- Minare petek kısmındaki tuğla elemanlarda da bazı kesit kayıpları ve hasarlara rastlanılmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3.5: Gövde altındaki silme taş bilezikteki hasarlar



Şekil 3.6: Gövde altındaki yangın hasarları



Şekil 3.7: Gövdesindeki tuğla duvar hasarları



Şekil 3.8: Gövde üst kısmındaki demir çember



Şekil 3.9: Şerefe altı taşlardaki hasarlar



Şekil 3.10: Taş korkuluktan görüşler



Şekil 3.11: Petek içindeki ahşap seren direği



Şekil 3.12: Petek kısmından görüşler

3.1.4. Laboratuvar Çalışmaları

Yığma duvarların mekanik özellikleri “Ticem İleri Yapı Teknolojileri San.Tic.Dan.Ltd.Şti” tarafından yapılan ve R.21.265.0048 numaralı raporla tarafımıza iletilen “2 adet yerinde kayma deneyi” ve “2 adet elastisite modülü tayini deneyi (flat-jack)” ile bu deneyler esas alınarak ilgili yönetmeliklere ve literatürdeki çalışmalara göre belirlenmiştir.

Taşıyıcı yığma duvarlar üzerinde yerinde, ASTM C 1531 (Standard Test Methods for In Situ Measurement of Masonry Joint Shear Strength Index) standardı Metod B’de gösterilen şekilde yerinde kayma deneyleri yapılarak yığma ünite-harç birleşimi kayma dayanımı indeksi değerleri elde edilmiştir. Yerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 3.1’de gösterilmiştir. İnceleme yapılan binaların yığma duvarlarında dolu tuğla bloklardan numuneler alınmıştır. Tuğla numuneler üzerinde laboratuvar da tek eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Taşıyıcı yığma duvarlar üzerinde yerinde, ASTM C 1197 (Standard Test Methods for In Situ

Measurement of Masonry Deformability Properties Using Flatjack Method) standardı esaslarına göre flat-jack elemanlar kullanılarak duvarların yük altındaki deformasyonları elde edilmiştir. İki flat-jack duvarda önceden açılmış olan 4 mm genişliğindeki iki paralel yuvaya yerleştirilmiş ve hidrolik ünite yardımıyla duvar üzerindeki yükler aşamalı olarak arttırılmıştır. Bu esnada duvar üzerindeki deformasyonlar 1/1000 mm. hassasiyetli LVDT'ler yardımıyla ölçülerek data logger vasıtasıyla kaydedilmiştir. Duvar üzerindeki yük-yer deformasyon grafikleri çizilerek duvarın elastisite modülü değerleri elde edilmiştir. Kullanılan flat-jackler yarım daire şeklindedir. Sonuçlar Tablo 3.3 ve Şekil 3.14'de gösterilmiştir.



Şekil 3.13: Yerinde kayma ve Flat-jack deneylerinden görüntüler

Yapıldığı yer	Deney No	Kayma Dayanımı İndeksi (MPa)
Minare Pabucu	K1	0,54
Minare Kaidesi	K2	0,68

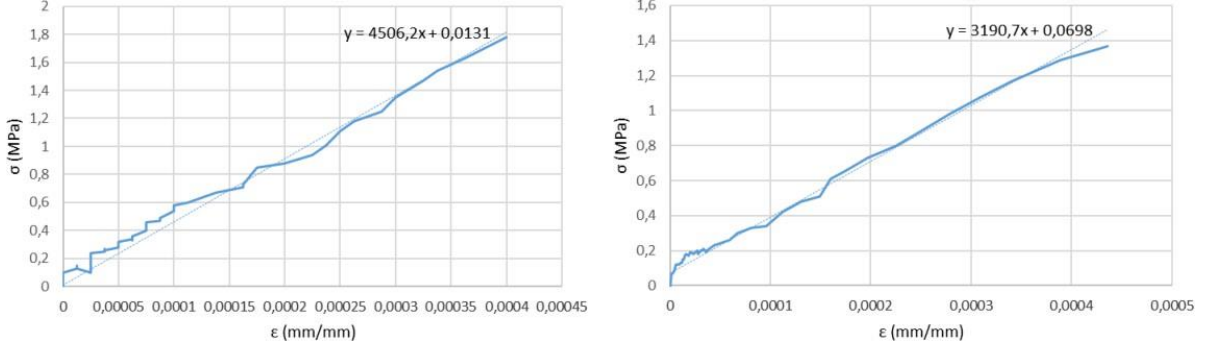
Tablo 3.1: Yerinde kayma deneyi sonuçları

Numune	Basınç Dayanımı (MPa)
T1	9,1
T2	10,2
T3	12,0

Tablo 3.2: Tuğla numunelerinin basınç dayanım değerleri

Yapıldığı yer	Deney No	Elastisite Modülü (MPa)
Minare Kaidesi	FJ-01	4506
Minare Kaidesi	FJ-02	3190

Tablo 3.3: Tuğla numunelerinin basınç dayanım değerleri



Şekil 3.14: Flat-jack deneyinden elde edilen düşey gerilme-şekil değiştirme eğrisi

3.1.5. Güçlendirme Önerileri

Bu bölümde söz konusu yapı için önerilen güçlendirme yöntemi özet olarak verilmiştir:

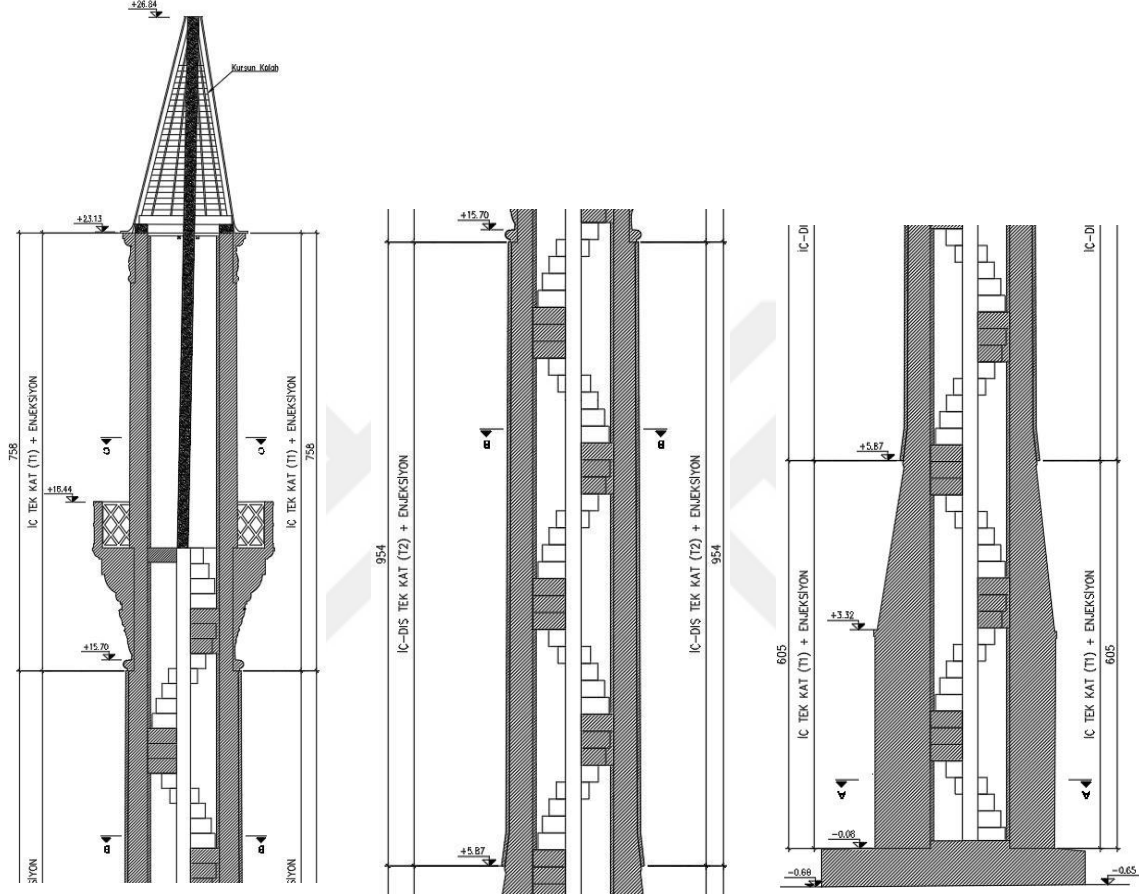
Raspa sonrasında, yapının yığma elemanlarında öncelikle düşük basınç altında minimum 10 MPa basınç dayanımına sahip, doğal hidrolik kireç esaslı harç enjeksiyonu yapılması önerilmektedir.

Raspa sonrasında tespit edilen yapısal çatlakların, çatlağın genişliği, uzunluğu ve türüne bağlı olarak onarılması gerekmektedir. Genişliği 10~40 mm arasında olan çatlaklar için paslanmaz burğu çelik rodlarla onarılması önerilmiştir. Bu uygulamada minimum 10 MPa basınç dayanımına sahip, doğal hidrolik kireç esaslı harç kullanılmalıdır.

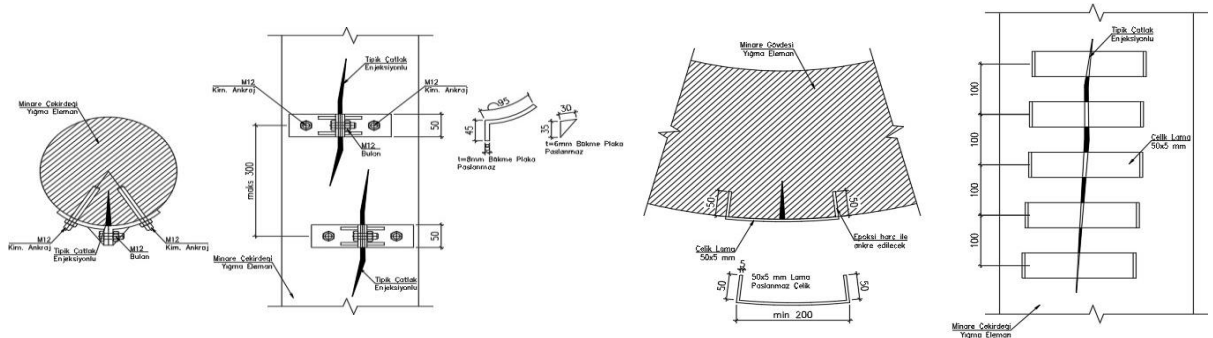
Minarede TRM güçlendirme uygulaması önerilmiştir. Şekil 3.15’de minarede TRM güçlendirme uygulaması önerilen kısımlar verilmiştir. TRM uygulaması sırasında birinci adım (yüzey hazırlığı) olarak duvar sıvası kaldırılıp duvar toz ve kirden arındırılacak, pürüzler giderilecek ve kırık kısımlar onarılacak enjeksiyon uygulaması yapılacaktır. İkinci adım olarak (birinci sıva katmanı) 5 mm kalınlığında TRM sıvası uygulanacaktır. Üçüncü adım olarak (tekstil serimi) ilk kat sıva üzerine elle tekstil serilir ve her iki yönde 20~25 cm bindirme yapılacaktır. Dördüncü adım olarak ankrajlar ve diğer detaylar uygulanacaktır. Son adım olarak TRM katman üzerine 5 mm kalınlığında ikinci TRM sıvası yapılacaktır.

Şekil 3.16’de minare çekirdeği ve bazı taş kısımlar için onarım detayı verilmiştir. Minarenin çekirdeği ve taş elemanlarında karşılaşılabilecek olası çatlak ve hasarlar için bu detay önerilmiştir.

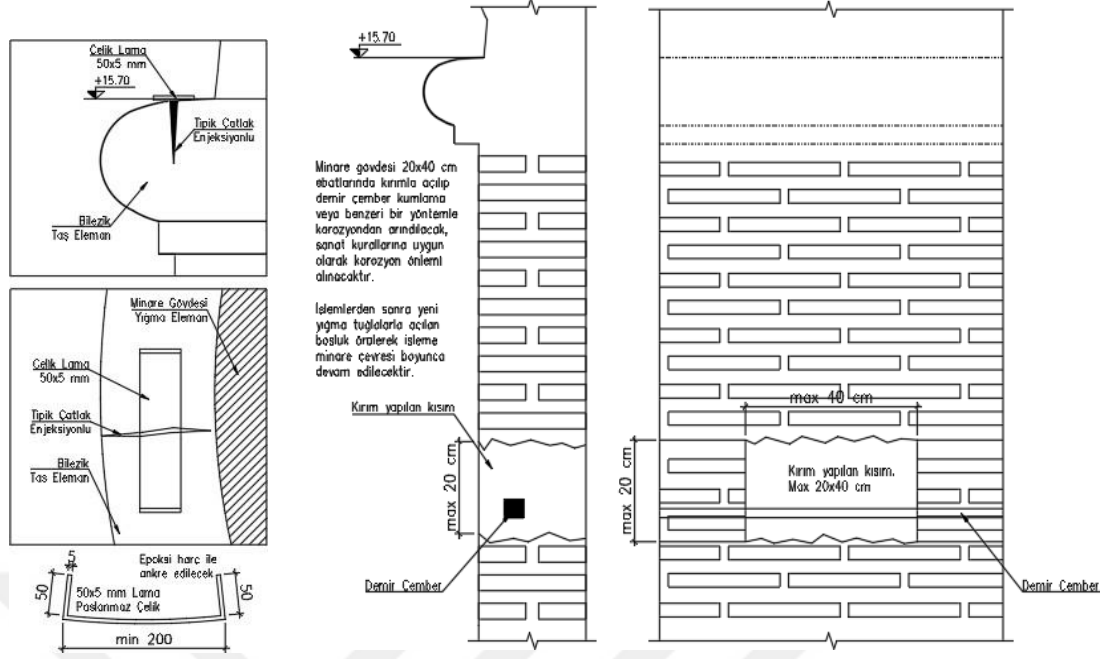
Şekil 3.17’de ise minare taş bilezik ve hasarlı demir lamanın onarım detayı sunulmuştur. Minarenin silme taş bilezik elemanındaki hasarlar için bu detay önerilmiştir. Ayrıca minarenin gövde üst kısmında mevcut olan demir lamada görülen korozyon hasarları ve etrafındaki yığma elemanlar için ise onarım detayı sunulmuştur.



Şekil 3.15: TRM güçlendirme uygulaması önerilen kısımlar



Şekil 3.16: Minare çekirdeği ve bazı taş kısımlar için onarım detayı



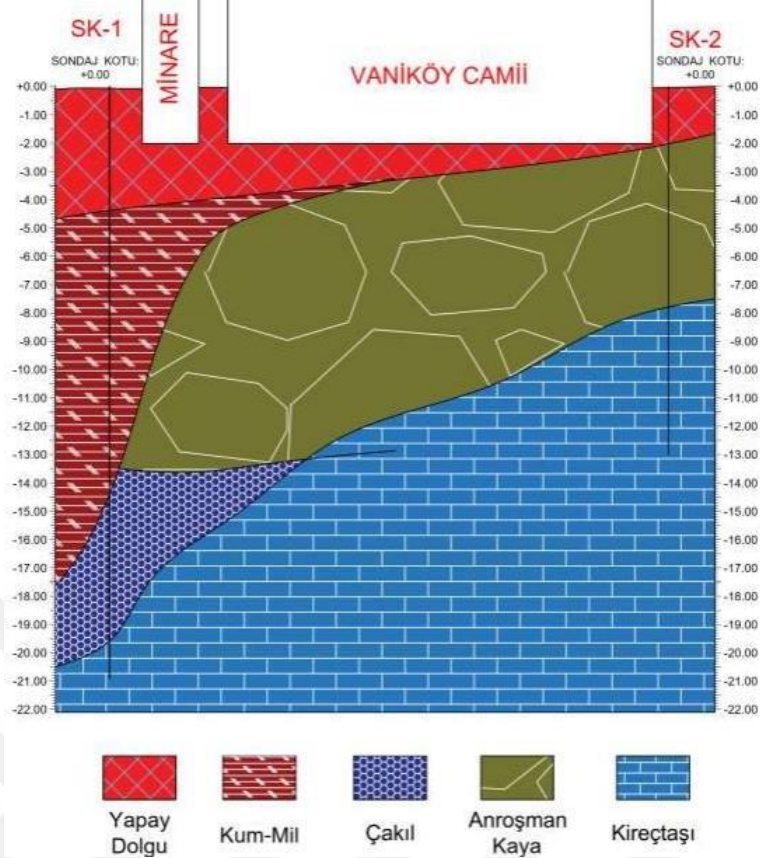
Şekil 3.17: Minare taş bilezik ve hasarlı demir lamanın onarım detayı

3.1.6. Zemin Özellikleri

Söz konusu yapı için NZS Mühendislik Sanayi ve Ticaret Limited Şirketince “Zemin Değerlendirme Raporu” hazırlanmıştır. Bu rapora göre söz konusu alanda 2 adet sondaj, 2 adet MASW ölçümü ve 1 adet microtrömör çalışması yapılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen bilgiler Tablo 3.4 ve Şekil 3.18’de sunulmuştur.

Yerel Zemin Sınıfı	ZD
Tasarım Depremi	DD – 2 (475 yıl)
En Büyük Yer İvmesi (PGA)	0.320
En Büyük Yer Hızı (PGV)	20.001
Kısa Periyot Harita Spektral İvme Katsayısı (S_s)	0.775
1.0 sn Periyot İçin Harita Spektral İvme Katsayısı (S_1)	0.220
Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı (S_{DS})	0.930
1.0 sn Periyot İçin Tasarım Spektral İvme Katsayısı (S_{D1})	0.330
Yatay Elastik Tasarım İvme Spektrumu Köşe Periyodu (T_A)	0.071
Yatay Elastik Tasarım İvme Spektrumu Köşe Periyodu (T_B)	0.355
Bölgesine Geçiş Periyodu (T_L)	6.000 sn
Düşey Elastik Tasarım İvme Spektrumu Köşe Periyodu (T_{AD})	0.024
Düşey Elastik Tasarım İvme Spektrumu Köşe Periyodu (T_{BD})	0.118
Düşey Elastik Tasarım Spektrumunda Sabit Yer Değiştirme Bölgesine Geçiş Periyodu (T_{1D})	3.000 sn

Tablo 3.4: Minare kısmı için zemin çalışması özet bilgileri



Şekil 3.18: Söz konusu alandaki zemin profili

3.2. TASARIM/DEĞERLENDİRME YÖNTEMİ

Söz konusu yapının statik ve deprem yükleri altında değerlendirmesinde “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, (TBDY, 2018)” ve “Tarihi Yapılarda Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu (TYDRYK, 2017)” esas alınmıştır. Bu doğrultuda belirlenen yapının sınıflandırması, performans hedefleri, gerekli analizler ve tasarım/değerlendirme yöntemleri aşağıda verilmiş olup Tablo 3.5’de özet olarak sunulmuştur.

- TBDY (2018) Bölüm 3.1 uyarınca bina kullanım sınıfı (BKS) ve bina önem katsayısı (I) kapsamında yapı “ $BKS=2$ ” ve “ $I=1.2$ ” olmaktadır. TBDY (2018) Bölüm 3.2 uyarınca deprem tasarım sınıfı “ $DTS=1$ ” olmaktadır.
- TBDY (2018) Bölüm 3.3 uyarınca bina yükseklik sınıfı “ $BYS=4$ ” olmaktadır. Binanın yükseklik sınıfı ve deprem tasarım sınıfı dikkate alındığında, izin verilen bina yüksekliği, $H_N \leq 7$ m olmalıdır. Ancak, mevcut yapılarda ve minarelerde bu şart aranmamaktadır.
- TYDRYK (2017) Bölüm 6.8 uyarınca, performans hedefleri ve uygulanacak

değerlendirme yaklaşımları kapsamında, yapıda DD-3 deprem yer hareketi düzeyi için “*Sınırlı Hasar*”, DD- 2 deprem yer hareketi düzeyi için “*Kontrollü Hasar*” performansları hedeflenmekte olup “Doğrusal Olmayan Hesap” yöntemiyle “*Şekildeğiştirmeye Göre Değerlendirme*” yaklaşımıyla değerlendirilmiştir.

- TYDRYK (2017) uyarınca deprem yükü azaltma katsayısı “ $R_a=1$ ” alınmıştır. Kat öteleme sınır değerleri kontrollü hasar için “%0.7”, sınırlı hasar için “%0.3” alınmıştır. Öteleme ve yerdeğiştirme tahkiklerinde deprem yükü azaltma katsayısı “ $R_a=1$ ” alınmıştır.
- TBDY (2018) Bölüm 15.2.12 uyarınca yapı bilgi düzeyi ve katsayısı “*Kapsamlı, 1.00*” olarak uygulanmıştır.
- Zemin etüt raporu kapsamında yapının zemin sınıfı “*ZD*” olarak verilmiştir.

Parametreler	Değer / Sınıf
Bina Kullanım Sınıfı, BKS	2
Bina Önem Katsayısı, I	1.2
Deprem Tasarım Sınıfı, DTS	1
Bina Yükseklik Sınıfı, BYS	4
Yapı Performans Hedefleri	DD-2 için “Kontrollü Hasar” DD-3 için “Sınırlı Hasar”
Tasarım/Değerlendirme Yöntemi	Doğrusal olmayan hesap yöntemi, Şekildeğiştirmeye göre değerlendirme
Yığma Tahkikleri için Deprem Yükü Azaltma Katsayısı	$R_a=1$
Yığma Elemanların Kat Öteleme Sınır Değerleri	Kontrollü Hasar için %0.7 Sınırlı Hasar için %0.3
Yapı Bilgi Düzeyi ve Katsayısı	Kapsamlı, 1.00
Yerel Zemin Sınıfı	ZD

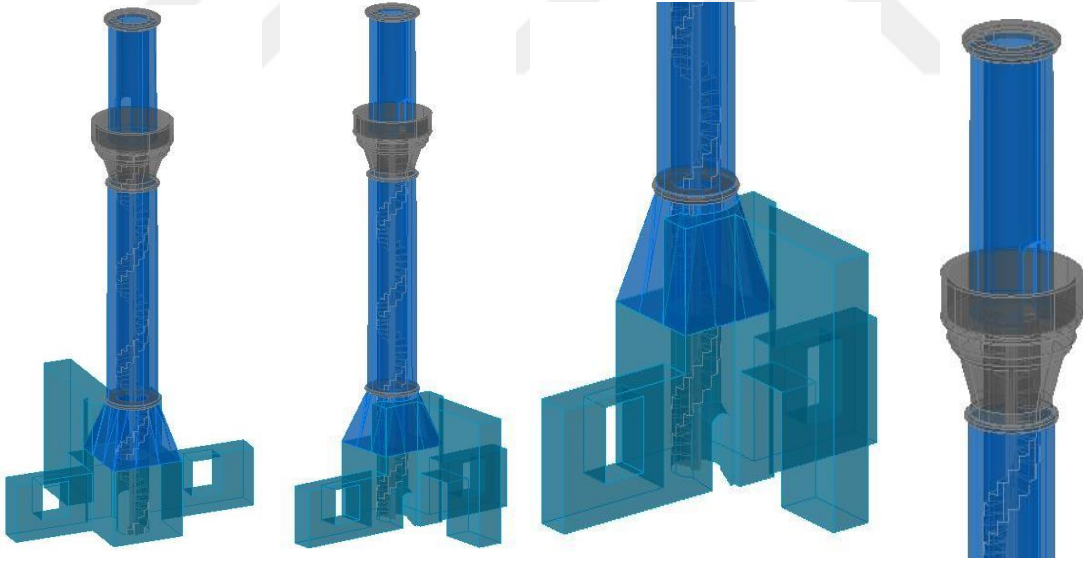
Tablo 3.5: Performans esaslı analiz ve tasarım yöntemi

3.3. MODELLEME

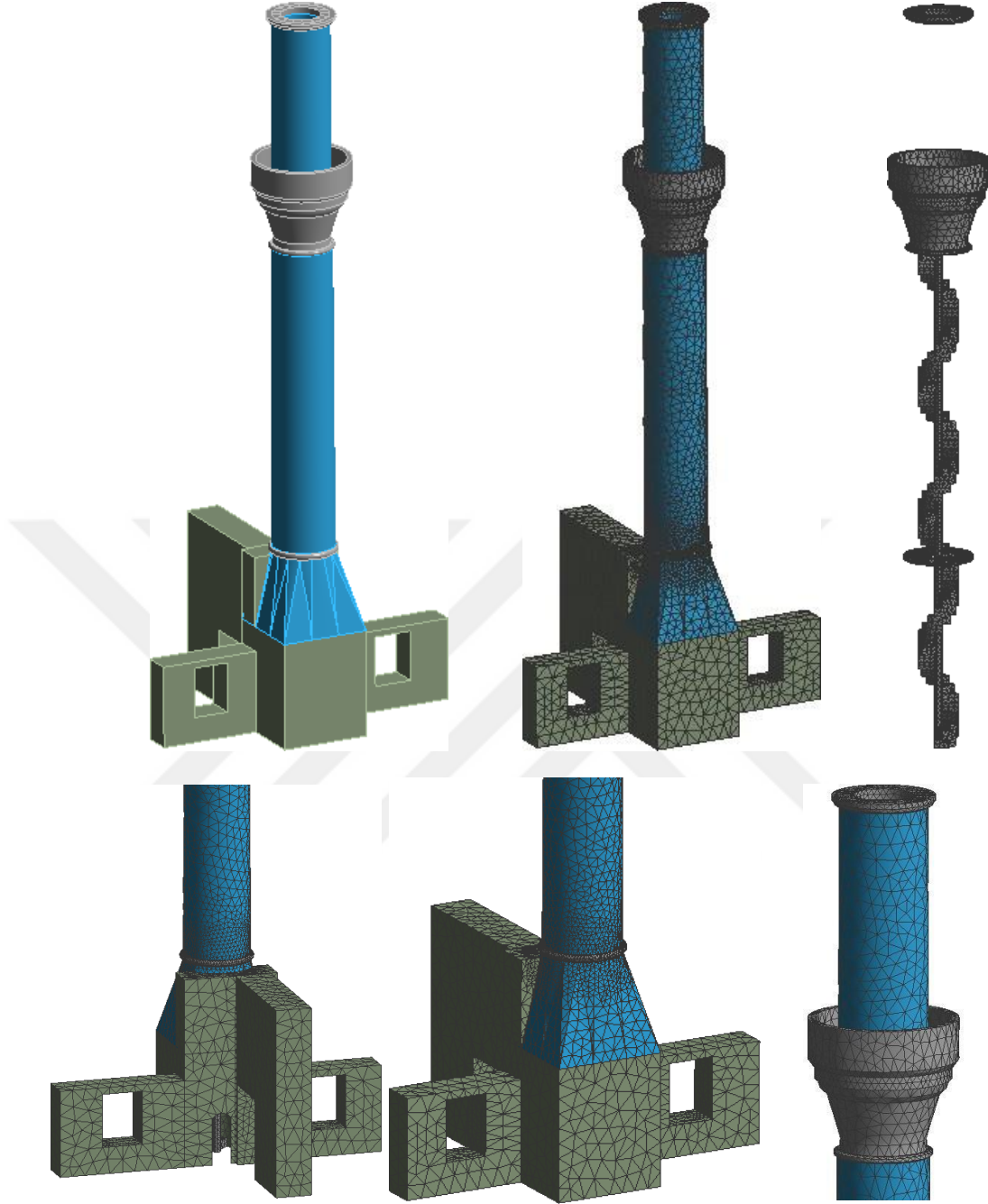
Günümüzde, gelişen teknolojiyle birlikte, yapılar için 2D ve 3D sonlu eleman modelleri oluşturulmakta ve statik analizler gerçekleştirilmektedir. Bu analizlerde yapısal elemanlar 1D, 2D ve 3D olarak modellenebilmektedir. 1D elemanlar, frame, line, beam/column gibi elemanlar olarak adlandırılır ve kolon, kiriş, çapraz, aşıklar gibi eleman türleri için kullanılır. 2D elemanlar,

plate, shell, membran gibi elemanlar olarak tanımlanır ve perde, duvar gibi eleman türleri için kullanılır. 3D elemanlar ise katı model (solid) elemanlar olarak adlandırılır ve tüm yapısal eleman türleri için kullanılabilir.

İnceleme konusu minare, mevcut ve güçlendirilmiş durumu modellenmiştir. Bu bağlamda, ilk olarak minare Şekil 3.19’da AutoCad programı ile 3D olarak modellenmiştir. Autocad modeli minarenin ana elemanları yanından merdiven, çekirdek, taş bilezik ve diğer elemanları içerecek şekilde hazırlanmıştır. Ardından Şekil 3.20’da gösterildiği gibi Autocad modeli “Ansys Workbench” programına aktarılarak mesh yapılmış ve sonlu eleman modeline dönüştürülmüştür. Yapının sonlu eleman modeli “Solid” elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Sonraki aşamada yapı “Midas Gen” programına aktarılmıştır. Tüm malzeme, kesit, yükleme, sınır koşulları vb. bilgiler Midas programında tanımlanmıştır. Midas programı ile analize hazır hale gelen sonlu eleman modeli “Opensees” programı ile analiz edilerek yapının nonlinear (doğrusal olmayan) artımsal itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Yüklemler “Response Spektrum Analizi” ile uyumlu olarak yapılmıştır.



Şekil 3.19: Minarenin 3D Autocad Modeli



Şekil 3.20: Yapının mesh yapılmış sonlu eleman modeli

3.4. MALZEME ÖZELLİKLERİ

3.4.1. Mekanik Özellikler

Tablo 3.6 ve Tablo 3.7’de mevcut ve güçlendirilmiş durumu için yapıdaki yığma duvarların, “Yerinde Yapılan Malzeme Deneyleri”, “Tarihi Yapılarda Deprem Risklerinin Yönetim Kılavuzu (TYDRYK, 2017)” ve/veya “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)” esas

alınarak belirlenen mekanik özellikleri verilmiştir. Analizlerde bu mekanik özellikler kullanılmıştır. TYDRYK (2017)'de enjeksiyon ve/veya TRM güçlendirme uygulaması yapılması durumunda duvarların mekanik özelliklerinin ne oranda artacağı sunulmuştur. Burada verilen artış oranları, yapının genel durumu ile ilişkilendirilerek güçlendirme sonrası mekanik özellikler belirlenmiştir. Çalışmada yapının nonlinear analizlerinde yığma elemanlar için “çekme ve basınç dayanımı üst sınırı ve dayanım azalmalarını” göz önüne alan “Damage TC3D” plastik malzeme modeli kullanılmıştır.

Tanım	Kısaltma	Mevcut kaide ve yan duvarlar	Mevcut pabuç, gövde ve petek	Mevcut taş, basamak ve çekirdek
Kargir birim cinsi	-	Ağırlıklı taş kısmı tuğla	Tuğla	Kesme Taş
Birim Hacim Ağırlığı, kN/m ³	-	20	18	21
Duvar karakteristik basınç dayanımı, MPa	f_k	3.00	3.60	5.00
Duvar başlangıç kesme dayanımı, MPa	f_{vk0}	0.10	0.15	0.33
Duvar çekme dayanımı, MPa	f_t	0.15	0.23	0.50
Duvar elastisite modülü, MPa	E_{duv}	2100	2400	3000
Duvar kayma modülü, MPa	G_{duv}	350	400	600

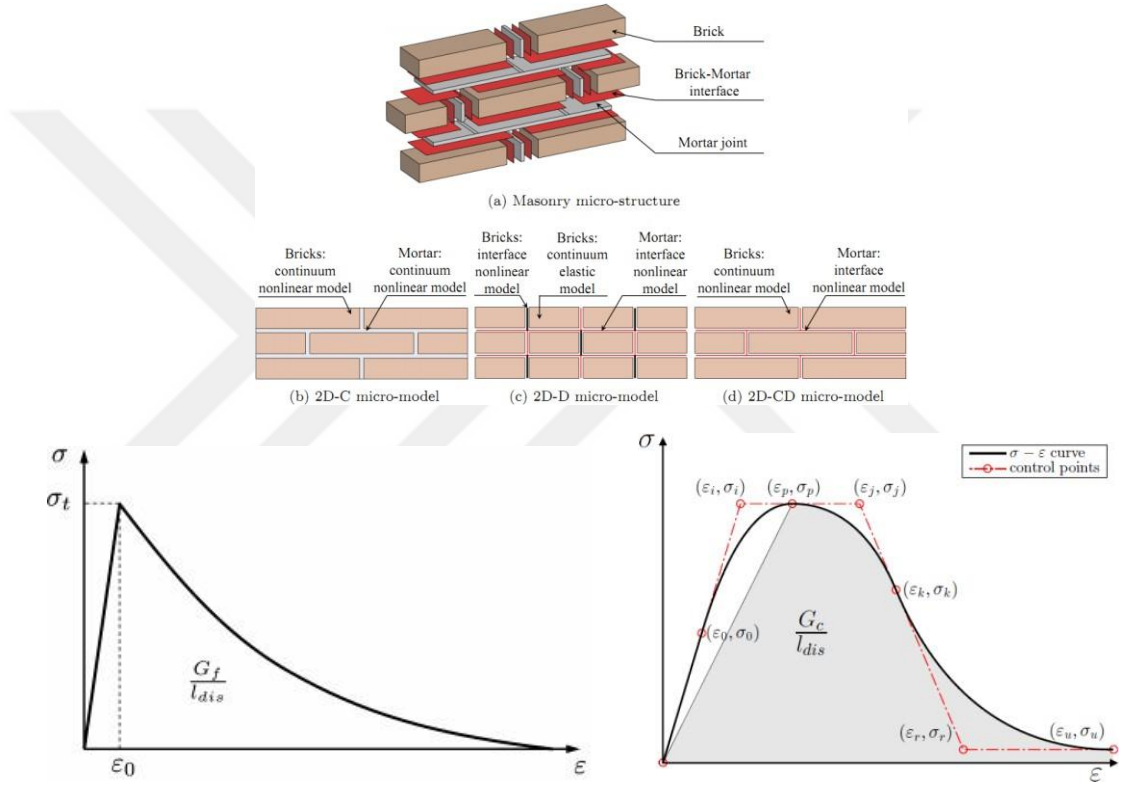
Tablo 3.6: Yığma duvarların mevcut mekanik özellikleri

Tanım	Kısaltma	Güçlendirilmiş kaide ve yan duvarlar	Güçlendirilmiş pabuç, gövde ve petek	Mevcut taş, basamak ve çekirdek
Kargir birim cinsi	-	“Ağırlıklı taş- kısmı tuğla” Enjeksiyon, (1.5)	“Tuğla”, Enjeksiyon (1.5) + TRM (1.4)	“Kesme Taş”
Birim Hacim Ağırlığı, kN/m ³	-	20	18	21
Duvar karakteristik basınç dayanımı, MPa	f_k	4.50	7.56	5.00
Duvar başlangıç kesme dayanımı, MPa	f_{vk0}	0.15	0.31	0.33
Duvar çekme dayanımı, MPa	f_t	0.225	0.47	0.50
Duvar elastisite modülü, MPa	E_{duv}	3150	5000	3000
Duvar kayma modülü, MPa	G_{duv}	350	400	600

Tablo 3.7: Güçlendirilmiş yığma duvarların mekanik özellikleri

3.4.2. Malzeme Modeli

Yapının doğrusal olmayan analizlerinde “DAMAGE TC3D” plastik malzeme modeli kullanılmış olup bu malzeme modeli yığma elemanların malzeme davranışının modellenmesinde kullanılan oldukça etkili ve güçlü bir malzeme modelidir. Malzeme modelinin teorik detayları Petracca M. Pela L., Rossi R., ZAgghi S., Camata G. Spanoce E. 2017, “Micro-scale continuous and discrete numerical models for nonlinear analysis of masonry shear walls” Volume 149, 15 September 2017, Pages 296-314 referansında bulunabilir.



Şekil 3.21: Damage TC3D plastik malzeme modeli

3.5. STATİK ETKİLER

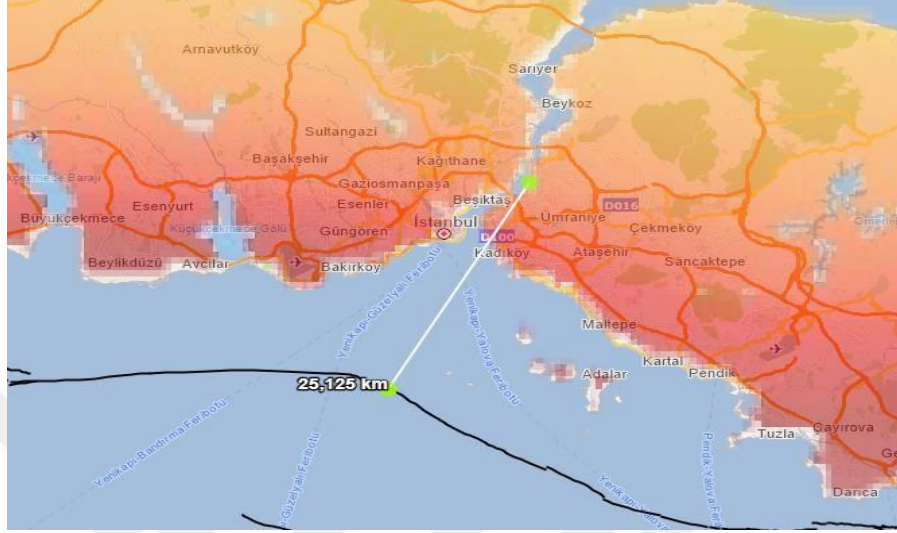
Statik etkiler yapının kendi ağırlığı kaynaklı etkiler olup mevcut ve güçlendirilmiş durumu temsil eden analiz modellerinde malzeme birim ağırlığı olarak modele dahil edilmiştir.

3.6. DEPREM ETKİLERİ

3.6.1. Depremsellik

Şekil 3.2’de AFAD uygulaması vasıtasıyla yapının aktif faya uzaklığı gösterilmiş olup bu

uzaklık yaklaşık 25 km'dir. Analizlerde kullanılacak spektral ivme katsayıları (S_s ve S_1); yapının zemin sınıfı ve konumu göz önüne alınarak AFAD'ın oluşturmuş olduğu uygulama ile belirlenmiş ve Tablo 3.8'de sunulmuştur.



Şekil 3.22: Yapının Aktif Faya Uzaklığı

Parametreler	Değer / Sınıf
Ortalama kayma dalgası hızı	-
Yerel zemin sınıfı	ZD
Deprem yer hareketi düzeyi	DD-1, DD-2, DD-3,
Deprem Haritası Spektral İvme Katsayıları (g)	DD-1, $S_s = 1.370$, $S_1 = 0.381$ DD-2, $S_s = 0.775$, $S_1 = 0.220$ DD-3, $S_s = 0.307$, $S_1 = 0.091$
Tepe yer ivmesi (g)	DD-1, $PGA = 0.557$ DD-2, $PGA = 0.320$ DD-3, $PGA = 0.133$
Yerel zemin etki katsayıları	DD-1, $F_s = 1.000$, $F_1 = 1.919$ DD-2, $F_s = 1.190$, $F_1 = 2.160$ DD-3, $F_s = 1.554$, $F_1 = 2.400$
Spektral ivme katsayıları	DD-1, $S_{DS} = 1.370$, $S_{D1} = 0.731$ DD-2, $S_{DS} = 0.922$, $S_{D1} = 0.475$ DD-3, $S_{DS} = 0.477$, $S_{D1} = 0.218$

Tablo 3.8: Zemin ve deprem parametreleri

3.6.2. Deprem Yüğü Uygulama Yöntemi

Yüklemeler "Response Spektrum Analizi" ile uyumlu olarak yapılmıştır. Yapıya x ve y yönündeki doğrusal olmayan statik itme analizleri için push-xp, push-xn, push-yp ve push-yn yüklemeleri uygulanmıştır. Bu yüklemeler, Midas Gen programının "Convert to nodal loads"

özelliğiyle nodal yüklere dönüştürülerek oluşturulmuştur. Deprem yükü azaltma katsayısı $R_a=1$ olarak kabul edilmiştir. İlk olarak, yapının düşey yükler altındaki analizi gerçekleştirilmiş ardından doğrusal olmayan yatay yük analizleri yapılmıştır.

3.7. ANALİZİ YÖNTEMİ

Günümüzde, yapıların geometrik ve malzeme özelliklerinin hem doğrusal hem de doğrusal olmayan davranışının dikkate alındığı çeşitli analiz yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında sonlu elemanlar analizi, yapıların statik ve dinamik davranışını incelemek ve performans seviyelerini belirlemek için sıklıkla tercih edilen etkili bir analiz yöntemidir. Bu çalışmada, incelenen yapının performans seviyelerini belirlemek için “Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Statik İtme Analizi (Pushover)” yapılmıştır.

3.8. KİNEMATİK ANALİZ

Kinematik limit analizi, yığma yapıların deprem güvenliğinin belirlenmesinde kullanılan önemli bir yöntemdir. Kinematik analiz, (i) olası göçme mekanizmalarının tanımlanması, (ii) her bir mekanizmanın tetikleyici yatay kuvvetinin ve bu kuvveti sağlamak için gereken yatay deprem ivmesinin belirlenmesi, (iii) depremde gereken yatay ivme talebinin ve bu talebin kapasite ile karşılaştırılmasının yapıldığı ve olası mekanizma durumlarının belirlendiği bir süreçtir (TYDRYK, 2017). Yığma yapıların genellikle, özellikle çekme etkileri altında yatay diyaframların olmaması ve yetersiz malzeme mukavemeti nedeniyle yatay etkilere karşı daha savunmasız durumdadır. Bunun bir sonucu olarak, sismik yükler altındaki göçme mekanizmalarının çoğu, yerel düzlem dışı davranışlardan meydana gelir (Giuffrè, 1991). Kinematik limit analizi ilk olarak Heyman (1966) (1969) tarafından yığma yapılara uygulanmıştır. Bu yöntemde ve analizde çekme dayanımının sıfır olduğu, sonsuz basınç dayanımı olduğu ve göçme durumunda kaymanın olmadığını varsaymaktadır (Heyman, 1966). Bir yığma yapının tamamının veya bir bölümünün düşey ve yatay yükler altındaki güvenliği için, çeşitli mekanizma durumlarının incelenmesi gerekebilir. Hesaplamalarda belirli bir deformasyon mekanizması varsayılarak, yapının dikey ve yatay yükler altındaki güvenliği belirlenir. Bu süreçte, olası mekanizma durumları göz önünde bulundurulur ve sistemdeki virtüel yerdeğiştirme mekanizma durumuyla uyumlu olarak hesaplanır. Virtüel iş ilkesi kullanılarak, karşı kuvvetler hesaplanır ve mekanizma durumlarındaki atalet kuvvetleri ile birleşim bölgelerindeki etkiler değerlendirilerek muhtemel göçme durumu belirlenir. Bu

yöntemde tipik olarak, duvar ve parçalarının sert blok gibi davrandığı ve yığma elemanların çekme dayanımının göz ardı edildiği kabul edilir. Duvara etki eden dikey yüklerin yanı sıra zemin kattan ve çatıdan duvara iletilen yükler de dikkate alınır. Her bir deformasyon durumu için belirlenen yatay kuvvet, hareket eden kütle ile orantılanarak yatay etki faktörü (yatay kuvvet/kütle) hesaplanır ve deformasyon mekanizmaları için değerlendirme yapılır (TYDRYK, 2017). Bu yöntem, yapıların deprem etkisi altındaki davranışını anlamak ve potansiyel göçme durumlarını değerlendirmek için kullanılır.

Kinematik limit analizdeki virtüel iş yöntemi prensibi aşağıdaki birinci denklemde verilmiştir. Burada α_0 normalize edilmiş sismik ivmenin çarpanını, F genel noktasal yükü, W göçme mekanizmasını oluşturan her bir parçanın ağırlığını temsil eder. δ_x ve δ_y ; F ve W 'nin yatay ve düşey virtüel yer değiştirme bileşenlerine karşılık gelmektedir. L_f iç kuvvetlerin yaptığı iştir.

$$\alpha_0 \sum_{i=1}^n W_i \cdot \delta_{x,i} + \alpha_0 \sum_{j=1}^m F_j \cdot \delta_{x,j} - \sum_{i=1}^n W_i \cdot \delta_{y,i} - \sum_{j=1}^m F_j \cdot \delta_{y,j} = L_f$$

Son olarak a_0^* mekanizmasının aktivasyonu için gerekli spektral ivme Denklem 2'deki gibi hesaplanır. Bu denklemde M^* etkin katılan kütle ve g yerçekimi ivmesini temsil eder.

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 \sum_{i=1}^n W_i + \alpha_0 \sum_{j=1}^m F_j}{M^*}, \quad M^* = \frac{\left[\sum_{i=1}^n W_i \delta_{x,i} + \sum_{j=1}^m F_j \delta_{x,j} \right]^2}{g \sum_{i=1}^n W_i \delta_{x,i}^2 + g \sum_{j=1}^m F_j \delta_{x,j}^2} \quad (1)$$

Denklem 3'te sunulan koşul geçerliyse, tasarım depremi altında analiz edilen mekanizmanın aktivasyonu mümkün olmayacaktır.

$$\begin{aligned} \text{Göçme modu zemin seviyesinde ise : } a_0^* &\geq a_c^* = \frac{0.4 \cdot S_{DS}}{R_a} \\ \text{Göçme modu zemin üzerinde ise : } a_0^* &\geq a_c^* = \frac{S_{ae}(T_1) \cdot \Phi(z/H) \times \Gamma}{R_a} \end{aligned} \quad (2)$$

Bu denklemde, $0.4 \cdot S_{DS}$, $T=0$ 'daki tasarım ivme spektrumu; S_{DS} kısa periyod tasarım spektral ivme katsayısı (TBDY, 2018), $S_{ae}(T_1)$ yapının ilgili doğrultusunda ilk mod yatay tasarım elastik

spektral ivmesi, R_d davranış katsayısı, $\Phi(z/H)$ kinematik mekanizmanın tepe noktasına göre normalize edilmiş birinci mod şekli olması, daha ayrıntılı hesaplama yapılmadığı vaziyette z/H olarak alınabilir.

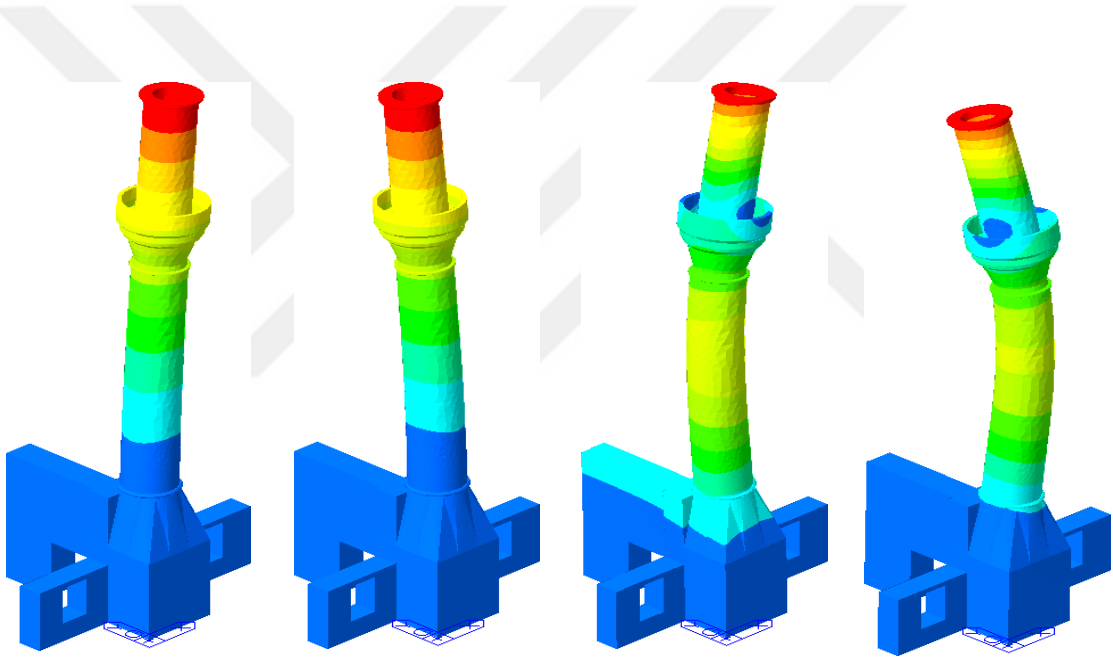


4. BULGULAR

4.1. MEVCUT DURUM

4.1.1. Dinamik Özellikler

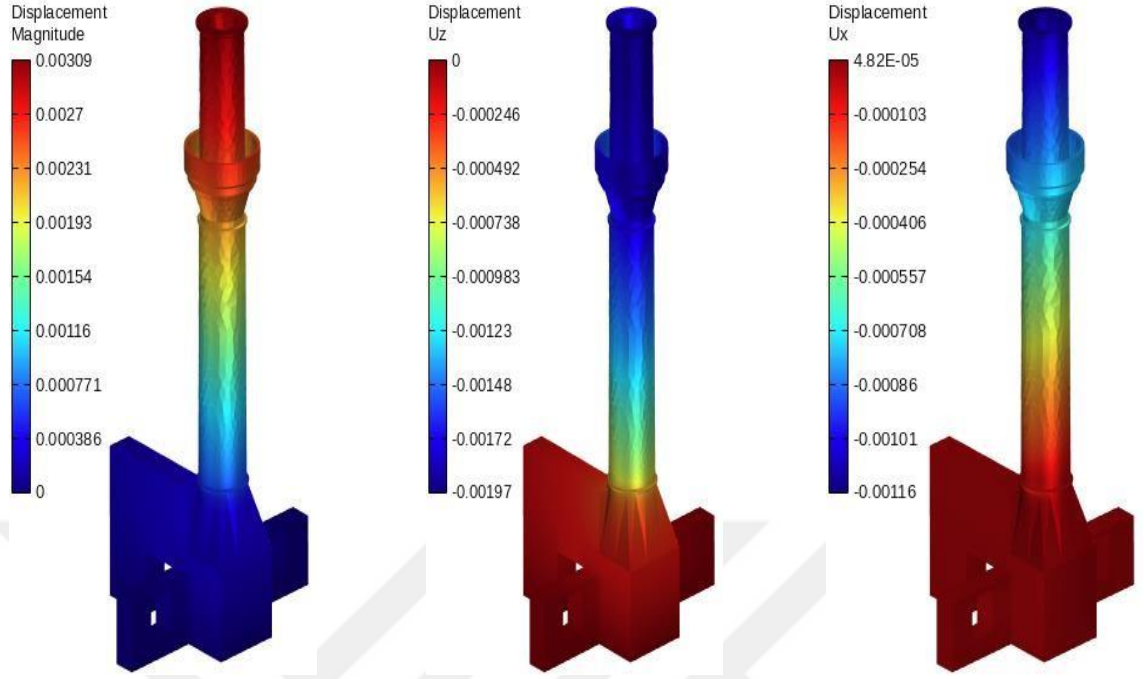
Yapının doğrusal olmayan performans analizini yapabilmek için öncelikle modal karakteristiğinin ortaya konması gerekmektedir. Bu amaçla modal analiz yapılmıştır. Şekil 4.1’de yapının mevcut durumunun ilk 4 mod şekli verilmiştir.



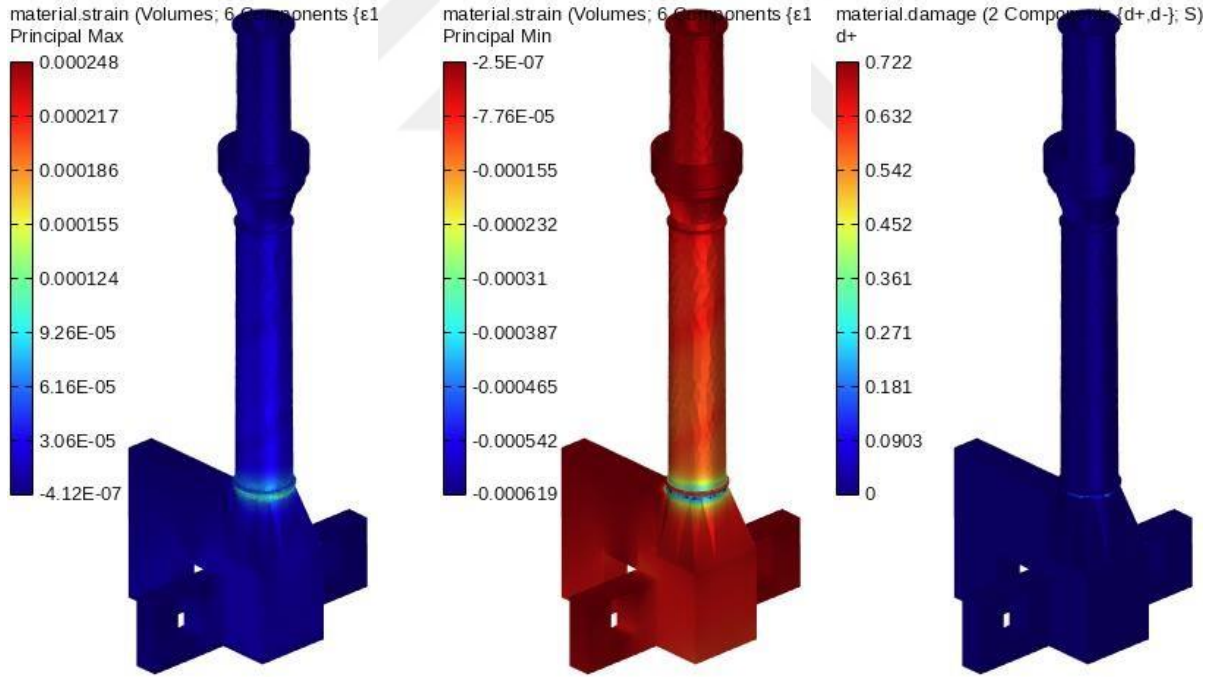
Şekil 4.1: Yapının ilk 4 modu (sırasıyla 1.039, 1.010, 0.177, 0.171)

4.1.2. Statik Etkiler Altında Tahkik

Şekil 4.2’de yapının mevcut durumunun düşey yükler (zati yükler) altındaki yerdeğiştirmeleri ve asal şekildeğiştirmeleri gösterilmiştir. Bu çekme ve basınç şekildeğiştirmeleri yığma duvar cinsine göre izin verilen şekildeğiştirmelerle karşılaştırılarak sınır değerlerin aşılp aşmadığı kontrol edilmiştir. Beklenildiği üzere şekildeğiştirmeler ve hasar düşük seviyededir. Yapı düşey yükler altında çekme ve basınç şekildeğiştirmeleri açısından yeterli dayanıma sahiptir.



Şekil 4.2: Yapının zati yükler altındaki yerdeğişirmesi (m)

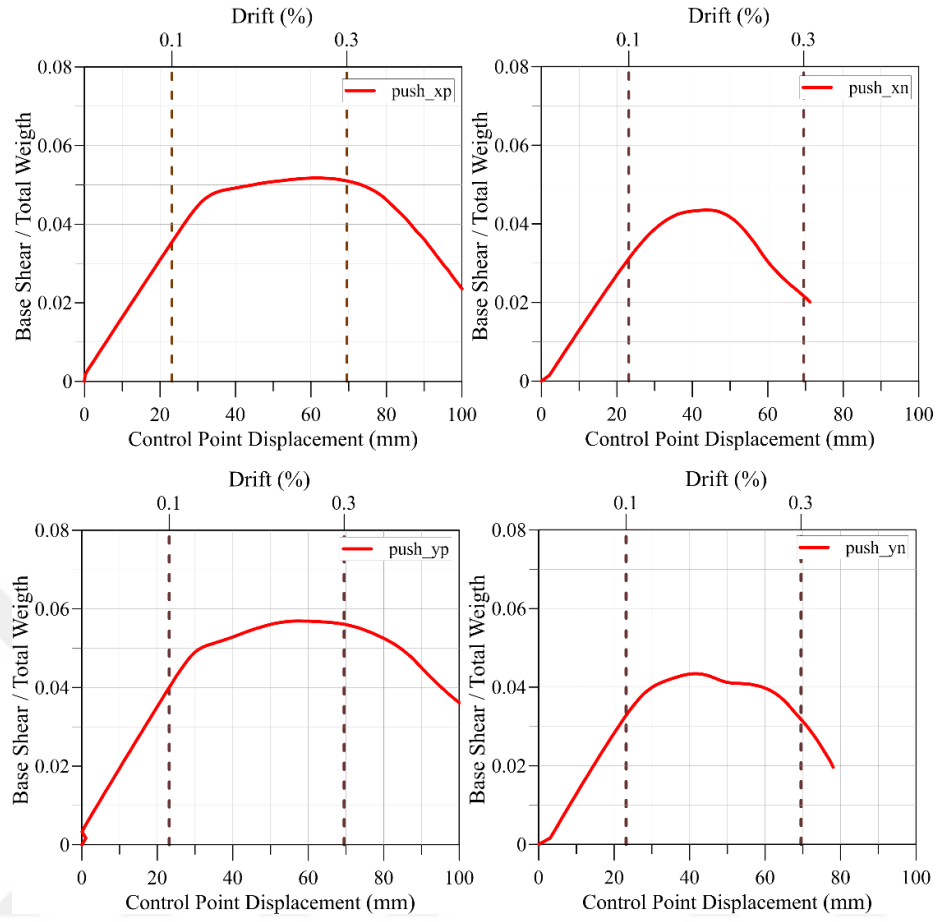


Şekil 4.3: Yapının zati yükler altındaki asal çekme şekildeğişirmeleri ve hasarlar

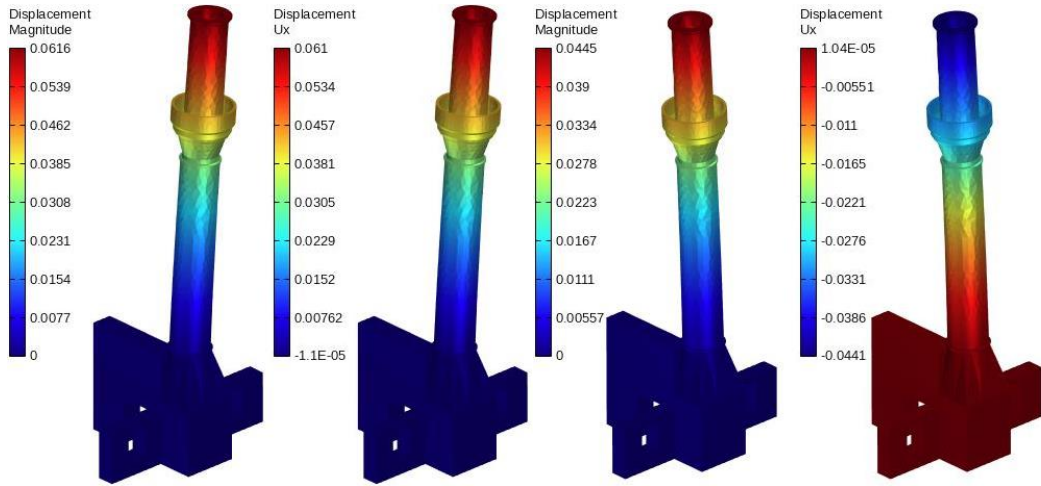
4.1.3. Deprem Etkileri Altında Tahkik, Performans Analizi

Şekil 4.4’de pushover yüklemeleri boyunca oluşan taban kesme kuvveti-deplasman grafikleri verilmiştir. Taban kesme kuvveti, yapının deprem yükü tanımlanan kısmının ağırlığına

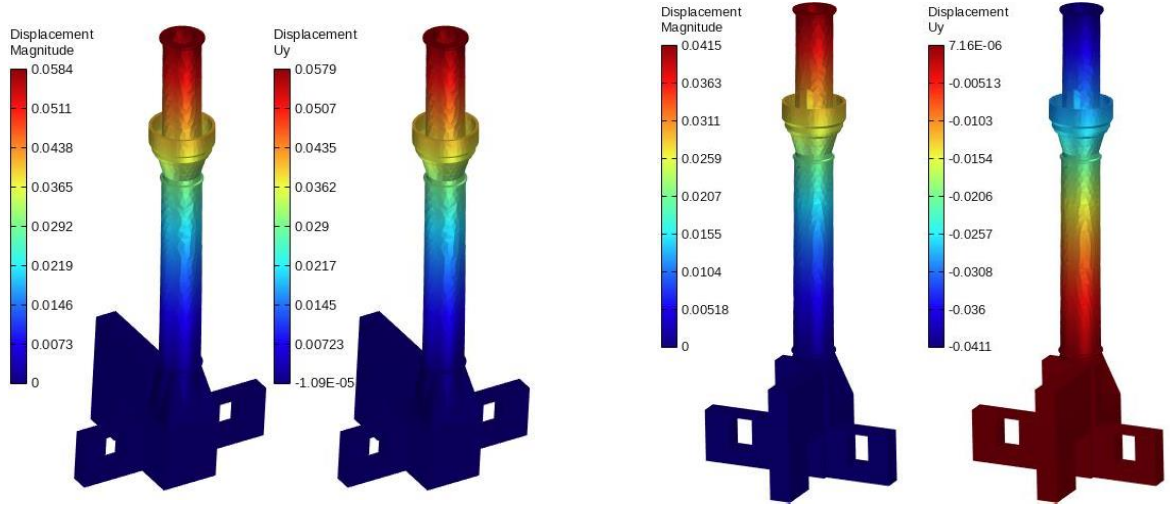
oranlanarak sunulmuştur. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da ise pushover yüklemesi boyunca yapıda oluşan yerdeğiştirmeler ve yükleme kontrol noktaları gösterilmiştir. Burada görüleceği üzere push-xp, push-xn, push-yp ve push-yn yüklemeleri altında yapının nihai dayanımı (taban kesme kuvveti / deprem yükü uygulanan kısmın ağırlığı) sırasıyla 0.052g, 0.044g, 0.057g ve 0.043g olmuştur. Yapıda bu maksimum dayanım değerlerine ulaştıktan bir süre sonra dayanım azalması gerçekleşmiştir. Şekil 4.7~Şekil 4.10’da sırasıyla push-xp, push-xn, push-yp ve push-yn yüklemeleri altında nihai dayanımdaki şekildeğiştirme ve hasar durumu gösterilmiştir. Buradaki hasar dağılımları incelendiğinde nihai dayanıma ulaşıldığında pabuç üst kısmında gövdenin altında malzeme hasar sınırlarına ulaşıldığı ve kısmen aşıldığı görülmektedir. Bu noktadan sonra beklenildiği üzere yapının yük kapasitesi azalmaya başlamış ve dayanım kaybı şeklinde devam etmiştir. Yapıya hedef performans depremlerinden biri olan DD-3 depreminde $R_a=1$ için 0.21g taban kesme kuvveti etkimektedir. Yapının deprem dayanımının en düşük olduğu yön “yn” olup yapı bu yönde 0.043g deprem dayanımına sahiptir. Bu değer 0.21g değerinin oldukça altındadır. Minare mevcut halinde bu deprem dayanımına ulaşmadan göçme durumuna geçmektedir. Minare DD-3 deprem yer hareketi düzeyi için hedef performansla “Sınırlı Hasar” ulaşamamıştır.



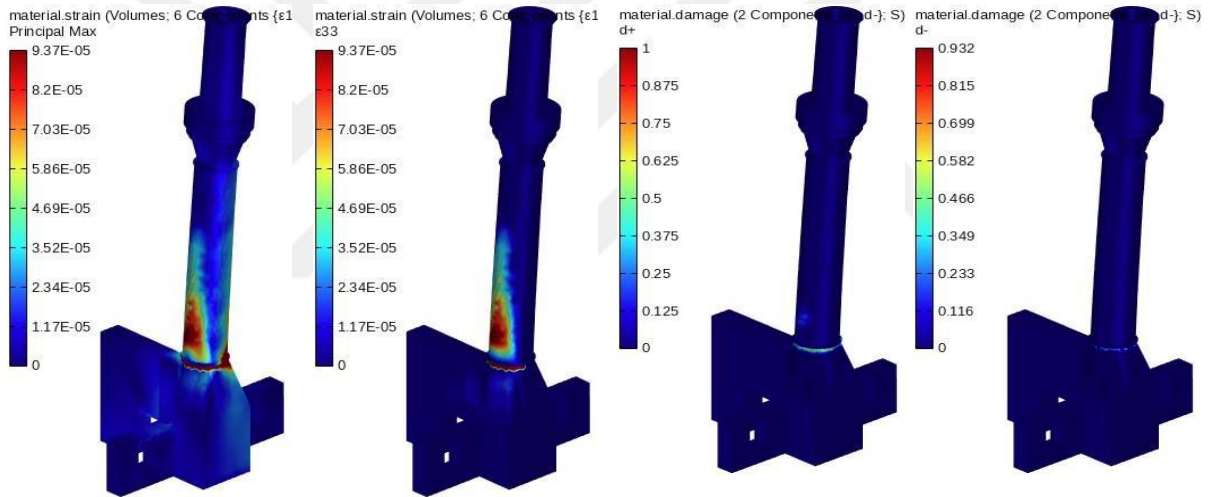
Şekil 4.4: Yapının artımsal itme analizi grafiği



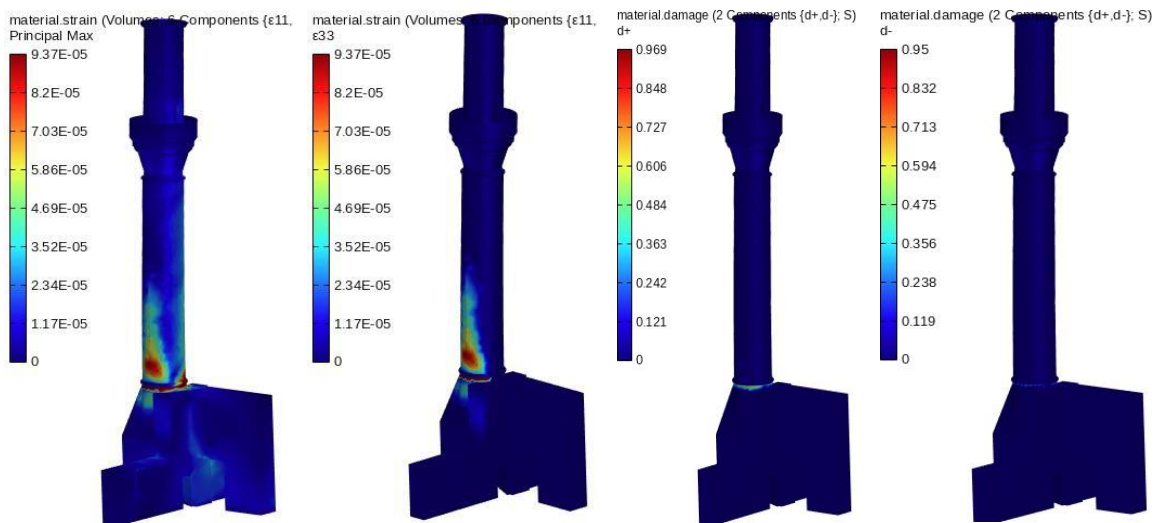
Şekil 4.5: Push-xp ve push-xn yüklemede maksimum dayanımdaki yerdeğiştirme (m)



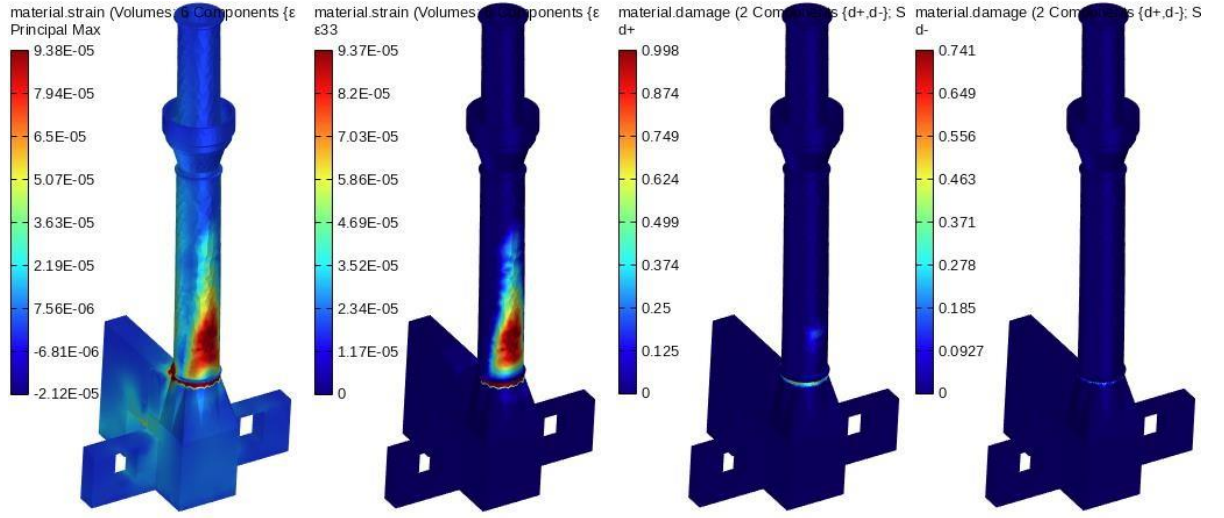
Şekil 4.6: Sırası ile push-yp ve push-yn yüklemesinde maksimum dayanımdaki yerdeğiştirmesi (m)



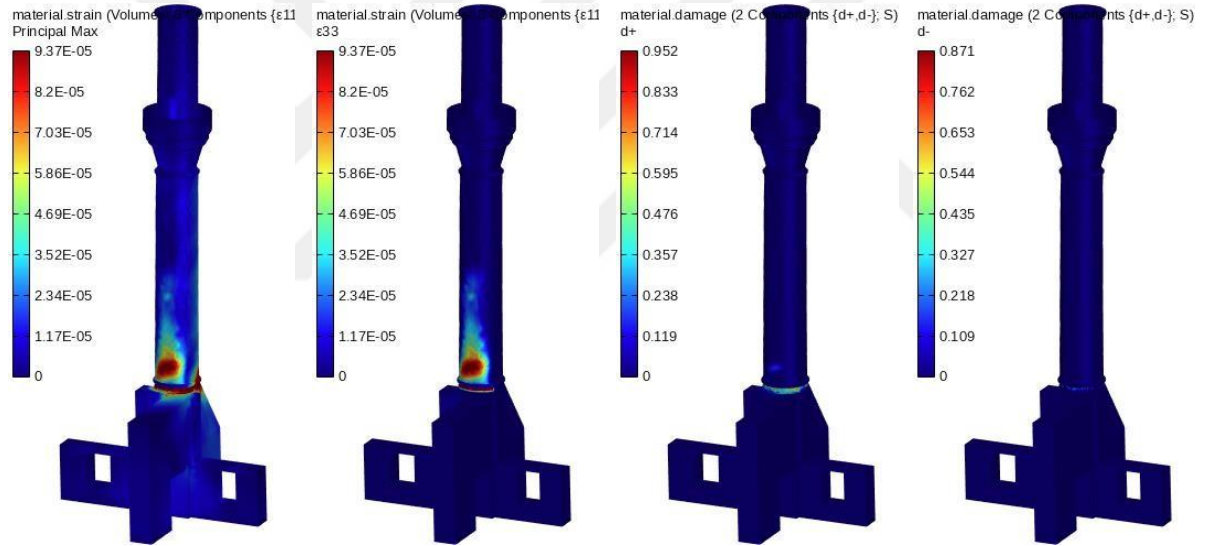
Şekil 4.7: Yapının push-xp yüklemesinde maks. dayanımdaki şekildeğiştirme ve hasar durumu



Şekil 4.8: Push-xn yüklemesinde maksimum dayanımdaki şekildeğiştirme ve hasar durumu



Şekil 4.9: Yapının push-yp yüklemesinde maksimum dayanımdaki şekildeğiştirme ve hasar durumu



Şekil 4.10: Yapının push-yn yüklemesinde maksimum dayanımdaki şekildeğiştirme ve hasar durumu

4.2. GÜÇLENDİRİLMİŞ DURUM

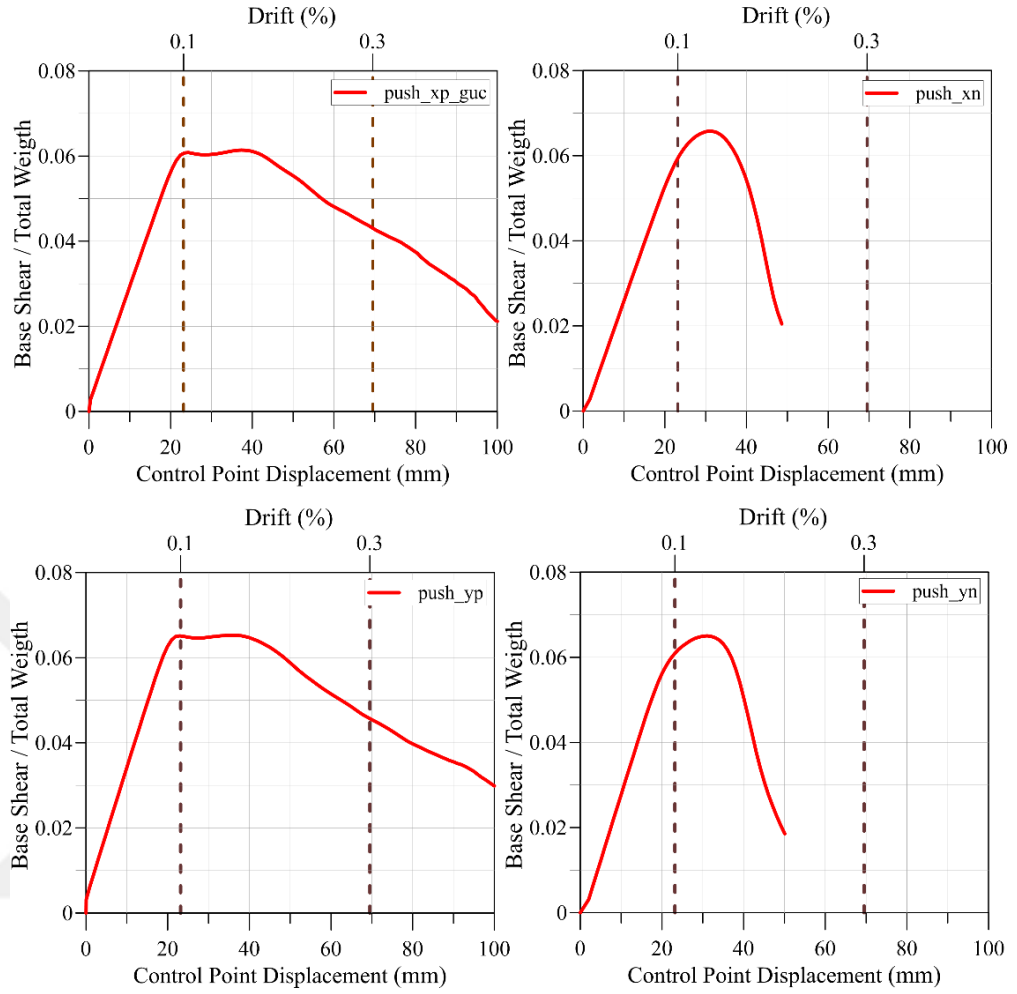
4.2.1. Statik Etkiler Altında Tahkik

Yapının mevcut durumu, düşey yükler altında yeterli dayanıma sahip olduğu için, güçlendirilmiş durumda tekrar tahkik edilmemiştir.

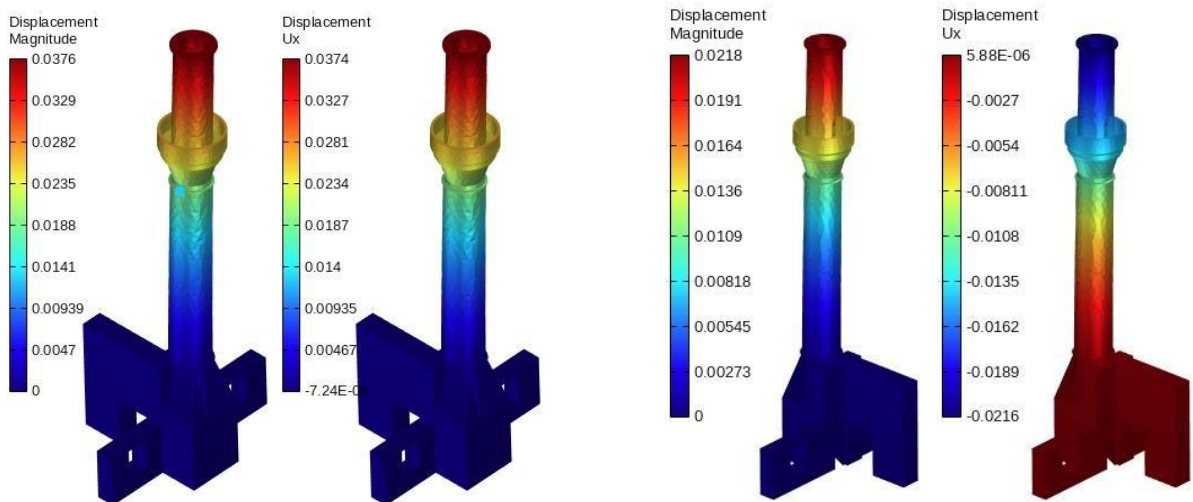
4.2.2. Deprem Etkileri Altında Tahkik, Performans Analizi

Bu bölümde, minarenin güçlendirilmiş durumunun performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.11’de minarede pushover yüklemeleri boyunca oluşan taban kesme kuvveti-deplasman grafikleri verilmiştir. Taban kesme kuvveti, yapının deprem yükü tanımlanan kısmının ağırlığına oranlanarak sunulmuştur. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de ise pushover yüklemesi boyunca yapıda oluşan yerdeğiştirmeler ve yükleme kontrol noktaları gösterilmiştir. Burada görüleceği üzere push-xp, push-xn, push-yp ve push-yn yüklemeleri altında yapının nihai dayanımı (taban kesme kuvveti / deprem yükü uygulanan kısmın ağırlığı) sırasıyla 0.061g, 0.066g, 0.065g ve 0.065g olmuştur. Yapıda bu maksimum dayanım değerlerine ulaştıktan bir süre sonra dayanım azalması gerçekleşmiştir.

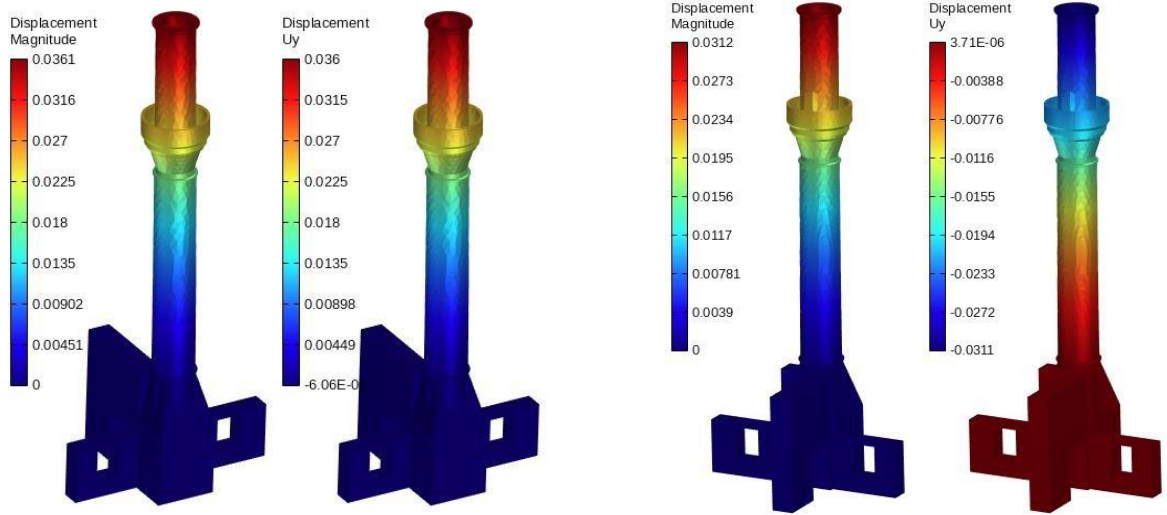
Şekil 4.14 ve Şekil 4.17’de sırasıyla push-xp, push-xn, push-yp ve push-yn yüklemeleri altında nihai dayanımdaki şekildeğiştirme ve hasar durumu gösterilmiştir. Buradaki hasar dağılımları incelendiğinde nihai dayanıma ulaşıldığında pabuç üst kısmında gövdenin altında malzeme hasar sınırlarına ulaşıldığı ve kısmen aşıldığı görülmektedir. Bu noktadan sonra beklenildiği üzere yapının yük kapasitesi azalmaya başlamış ve dayanım kaybı şeklinde devam etmiştir. Yapıya hedef performans depremlerinden biri olan DD-3 depreminde güçlendirilmiş durumda $R_a=1$ için 0.29g taban kesme kuvveti etkimektedir. Yapının deprem dayanımının en düşük olduğu yön xp olup yapı bu yönde 0.061g deprem dayanımına sahiptir. Bu değer 0.29g değerinin oldukça altındadır. Minare mevcut halinde bu deprem dayanımına ulaşmadan göçme durumuna geçmektedir. Minare DD-3 deprem yer hareketi düzeyi için hedef performansa “Sınırlı Hasar” ulaşamamıştır.



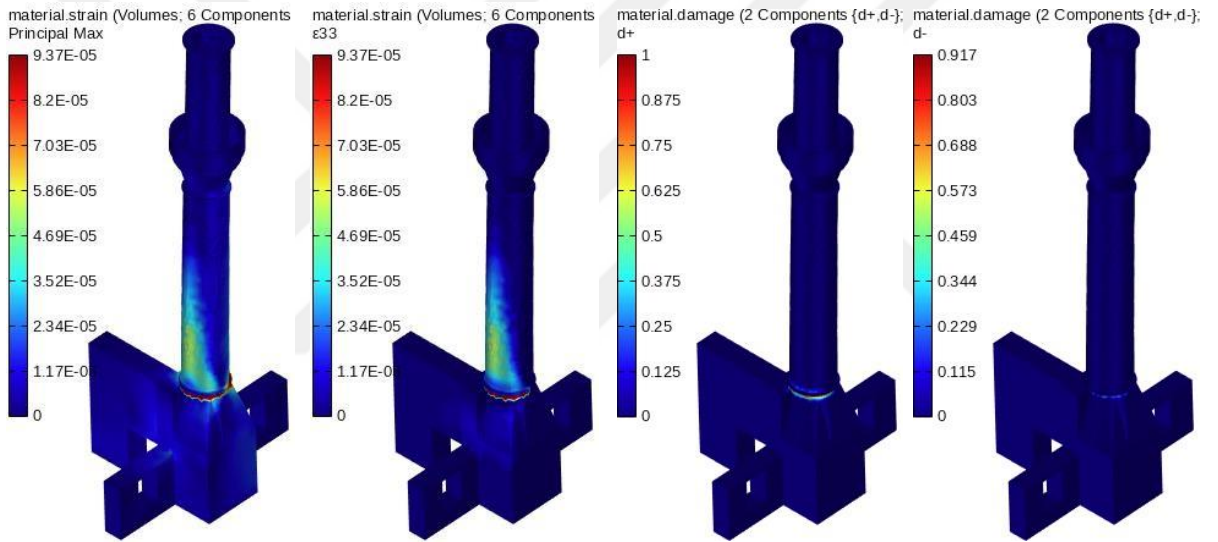
Şekil 4.11: Güçlendirilmiş durum artımsal itme analizi grafiği



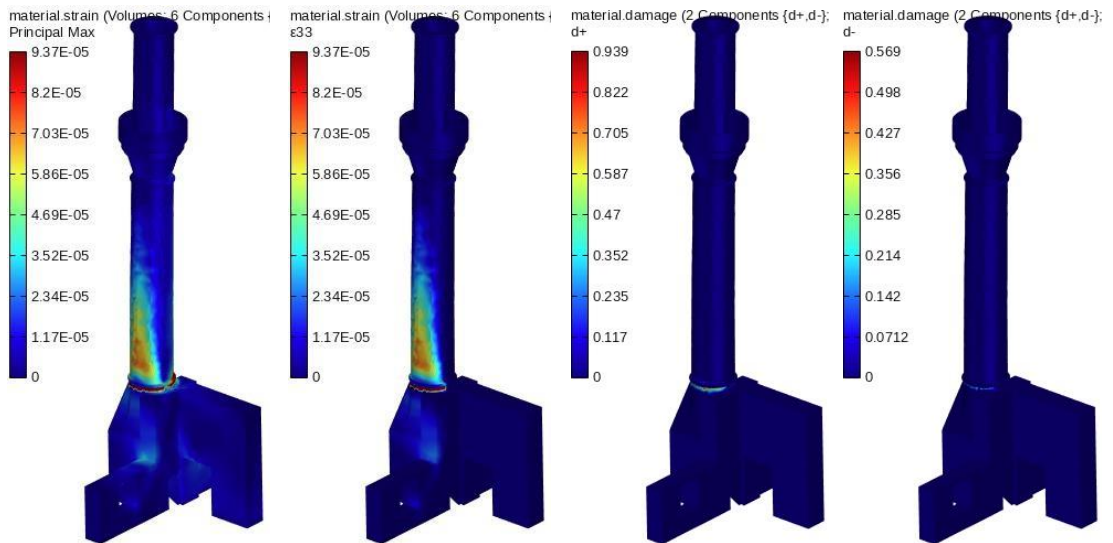
Şekil 4.12: Sırası ile push-xp ve push-xn yüklemede maksimum dayanımdaki yerdeğiştirme (m)



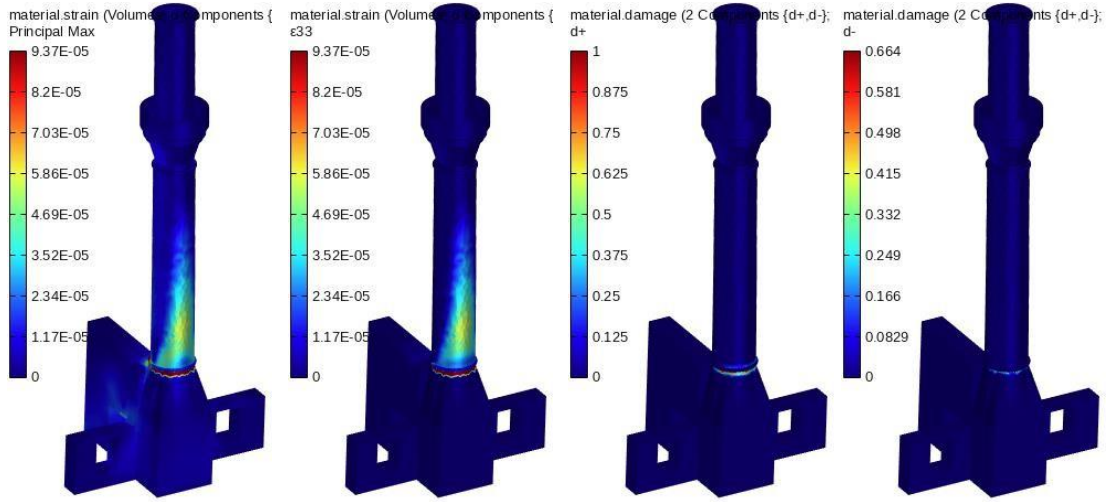
Şekil 4.13: Sırası ile push-yp ve push-yn yüklemesinde maksimum dayanımdaki yerdeğiştirmesi (m)



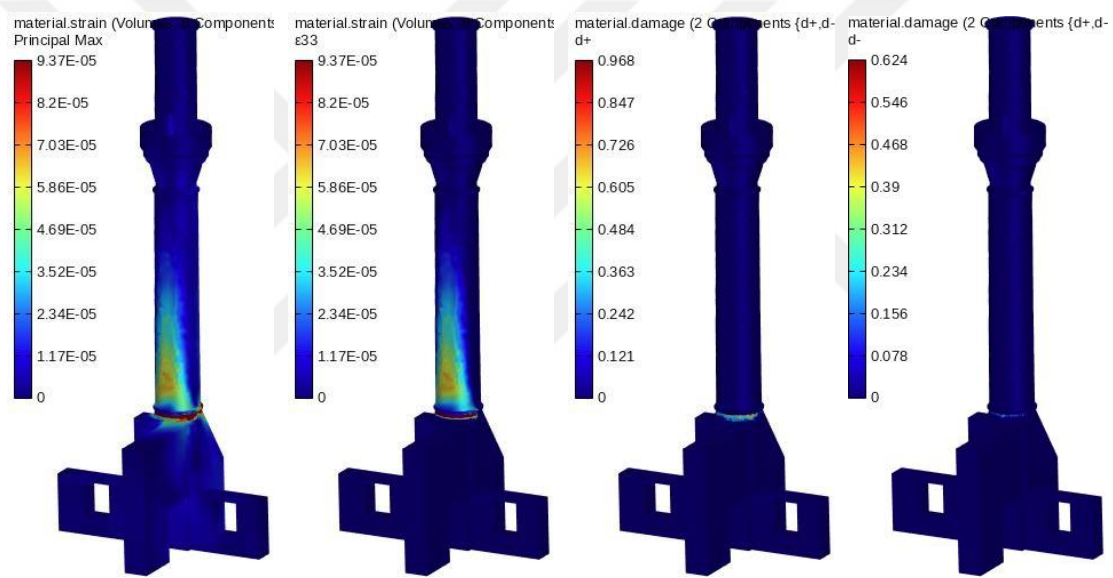
Şekil 4.14: Yapının push-xp yüklemesinde maksimum dayanımdaki şekildeğiştirme ve hasar durumu



Şekil 4.15: Yapının push-xn yüklemesinde maksimum dayanımdaki şekildeğiştirme ve hasar durumu



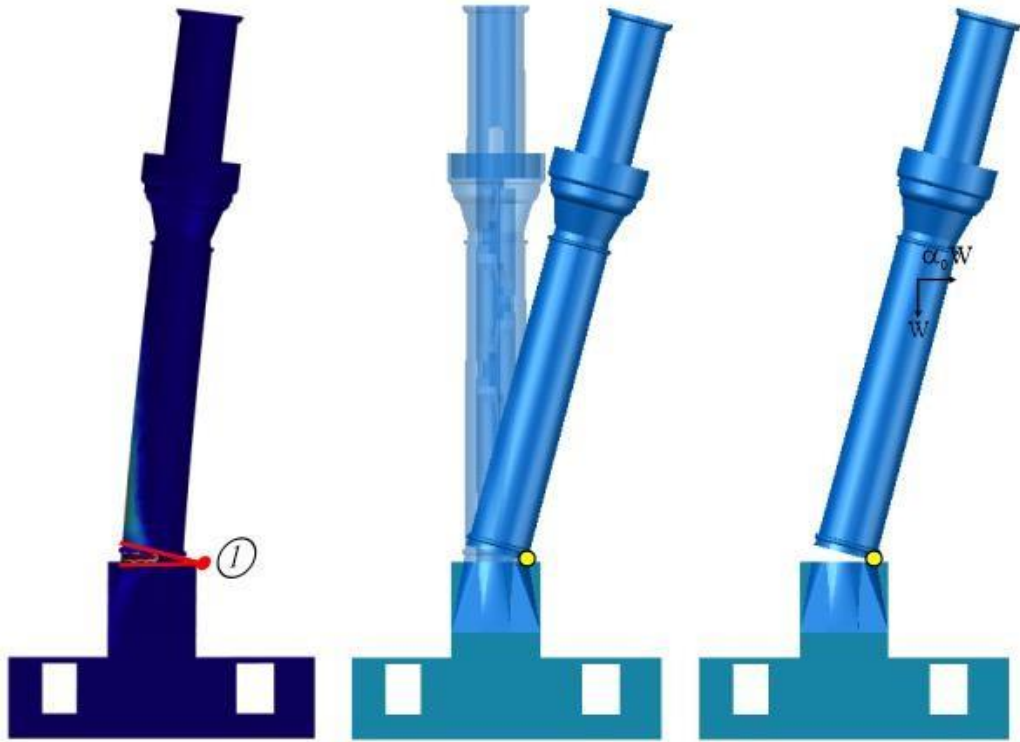
Şekil 4.16: Yapının push-yp yüklemesinde maksimum dayanımdaki şekildeğiştirme ve hasar durumu



Şekil 4.17: Yapının push-yn yüklemesinde maksimum dayanımdaki şekildeğiştirme ve hasar durumu

4.4. KİNEMATİK ANALİZ

Minarenin kinematik göçme mekanizması pushover analizi sonucundaki gerilme dağılımı göz önüne alınarak belirlenmiştir. Gerilme dağılımı değerlendirildiğinde, dönme noktasının gövdenin hemen altındaki pabuç üst kısmı olacağı sonucuna ulaşılmıştır. Minarede oluşan gerilme dağılımı ve buna göre belirlenen göçme mekanizması Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Minarede sadece dönme mekanizma durumu kontrol edilmiştir. DD-3, DD-2 ve DD-1 depremleri için behaviour factor sırası ile $R_a=1$, $R_a=2$ ve $R_a=2$ alınmıştır. Tablo 4.1’de incelenen mekanizmanın hangi ivmede oluşacağı ve farklı deprem düzeylerinde minarenin dönen rijit bloğuna etkiyen ivmeler gösterilmiştir. Bu tabloda görüleceği üzere minarede sadece DD-1 depreminde dönme mekanizma durumu oluşmaktadır.



Şekil 4.18: Minarenin mekanizma durumu

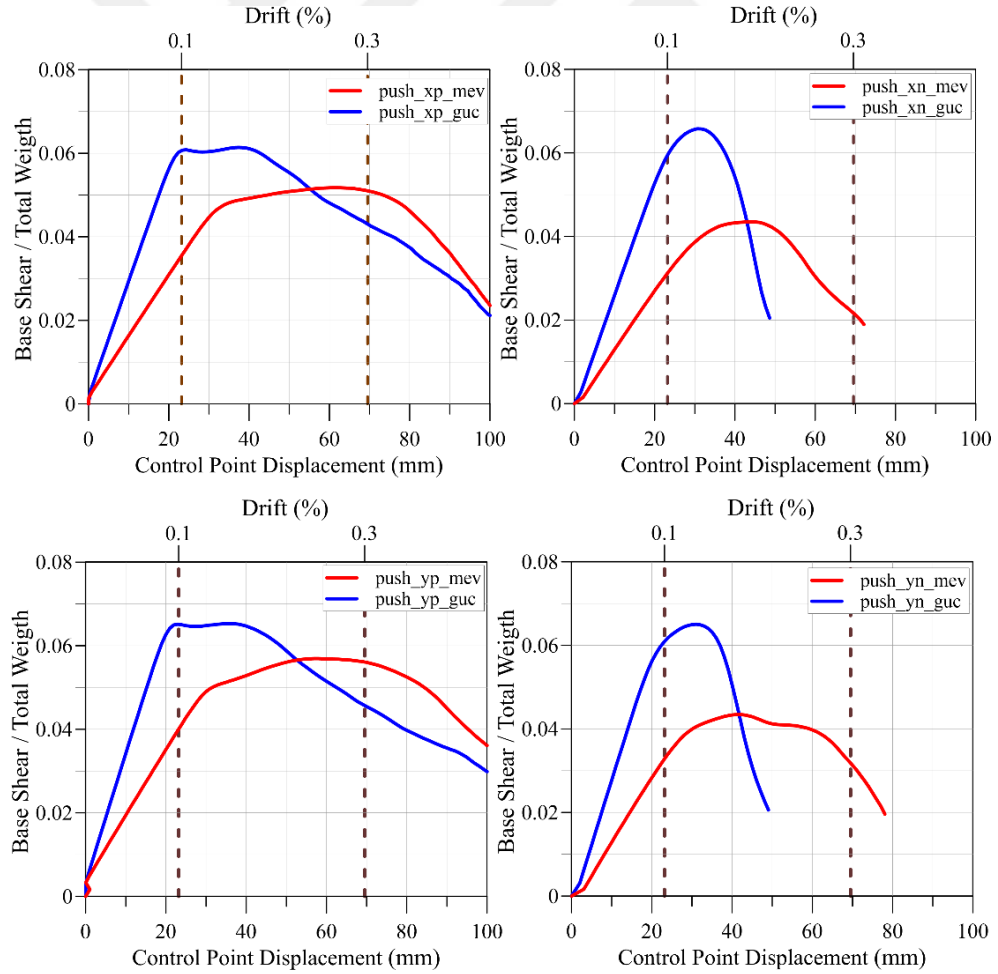
Mekanizma	Deprem Düzeyi	α_0	a_0 (g)	a_c (g)	a_c/a_0	Check (a_c/a_0)
Overturning	DD-3	0,120	0,120	0,105	0,88	OK
	DD-2	0,120	0,120	0,114	0,96	OK
	DD-1	0,120	0,120	0,176	1,47	Not OK

Tablo 4.1: Minarenin güçlendirilmiş durum lineer mekanizma kontrolleri

5. TARTIŞMA

5.1. MEVCUT VE GÜÇLENDİRİLMİŞ DURUMUN KARŞILAŞTIRMASI

Şekil 5.1 ve Tablo 5.1’de inceleme konusu yapının, mevcut ve güçlendirilmiş durum artımsal itme analizi sonuçları bir arada gösterilmiştir. Burada görüleceği üzere önerilen güçlendirme yöntemi mevcut yapının nihai dayanımını farklı yönlerde %14~%51 arasında artırmıştır. Mevcut durumda yapının minimum dayanımı 0.043g iken güçlendirilmiş durumda 0.061g’ye çıkarak %42 oranında artmıştır. Güçlendirme uygulaması yapının nihai dayanımını arttırmış olmakla birlikte sünekliğini bir miktar azaltmıştır.



Şekil 5.1: Yapının mevcut ve güçlendirilmiş durumu için artımsal itme analizi grafiği

Yapı	Nihai Dayanım (Base Shear/Total Weigth)				
	Push-xp	Push-xn	Push-yp	Push-yn	Min
Mevcut	0.052	0.044	0.057	0.043	0.043
Güçlendirme	0.061	0.066	0.065	0.065	0.061
Artış %	17	50	14	51	42

Tablo 5.1: Yığma kısmın nonlineer analiz karşılaştırmaları

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tarihi yapılar, bulunduğu coğrafyada hüküm sürmüş medeniyetlerin kültürünü ve inancını yansıtan bir yapı türü olup bu yapıların, yapısal bütünlüğü bozulmadan kültürel miras olarak gelecek nesillere aktarılması oldukça önemlidir. Tarihsel niteliğe sahip olan cami yapıları da bu kapsamda değerlendirilebilir. Camilerin önemli bir parçası olan minareler tarihsel süreç içerisinde farklı formlarda inşa edilse de genellikle yapı malzemesi olarak yığma tuğla, kerpiç ya da taş elemanlar kullanılmıştır. Minareler, geometrisi gereği narin yapısal sisteme sahip olmalarının yanı sıra kullanılan yapı malzemelerinin çekme etkilerine karşı zayıf kalması nedeniyle deprem etkilerine karşı oldukça hassas yapılardır. Deprem bölgelerindeki minarelerin sismik performansının belirlenmesi ve gerekli olması durumunda onarım/güçlendirme dahil önlemlerin alınması oldukça önemlidir. Özellikle tarihi niteliğe sahip yığma yapısal sistem ile teşkil edilen minarelerde bu durum daha da kritik bir hal almaktadır. Tarihi minare yapılarının deprem davranışının ve sismik performansın belirlenmesinde doğrusal olmayan davranış (çekme kapasitesinin dahil edildiği) ve rijit blok davranışının göz önüne alındığı ileri analiz yöntemlerinin kullanılması oldukça önemlidir. Zira bu etkiler göz önüne alınmadan yapılacak hesaplar gerçek davranıştan uzak olup ve buna göre yapılan güçlendirme uygulamaları da yetersiz olacaktır.

Bu tez çalışmasında söz konusu yapı türüne örnek teşkil eden Vaniköy Camii Minaresi incelenmiştir. Bu kapsamda öncelikle saha incelemeleri gerçekleştirilerek minarenin yapısal sistemi, taşıyıcı elemanları ve olası hasar durumu tespit edilmiştir. Ardından minarenin mevcut durumunun sismik performansı doğrusal olmayan yöntemler kullanılarak belirlenmiş olup restorasyon çalışmaları kapsamında önerilen iyileştirme yöntemlerinin yapının sismik performansına etkisi statik analizler ile ortaya konmuştur. Çalışmadan elde edilen sonuçların, tarihsel niteliğe sahip minarelerin sismik performansının gerçeğe en yakın şekilde belirlenmesi, bu amaç doğrultusunda kullanılacak analiz yönteminin ortaya konması ve performansın iyileştirilmesi açısından önemli olduğu düşünülmektedir. Sunulan yaklaşımın, tarihi minarelerin sismik performansının belirlenmesinde önemli bir kılavuz niteliğinde olacağı öngörülmektedir. Aşağıda saha tespitleri ve gerçekleştirilen analizlerin sonuçları özet olarak sunulmuştur.

- Minare yaklaşık 28.87 m yüksekliğindedir. Aşağıdan yukarıya; kaide, pabuç, gövde, şerefe, petek ve külah kısımlarından oluşmaktadır. Kaide tabanı yaklaşık 2.82x2.82 m ebatlarında olup toplam yüksekliği 3.32 m'dir. Pabuç kısmının yüksekliği 2.58 metredir. Bu kısım 80 ve 60 cm kalınlığında duvar ile başlayıp gövde başlangıcında bu kalınlık 36 cm'e düşmektedir. Pabuç kısmından sonra yer alan gövdenin toplam yüksekliği 9.62 metredir. Bu kısım 35 ve 36 cm duvar kalınlığına sahiptir. Şerefe kısmı 2.12 m yüksekliğinde olup değişken geometrilidir. Şerefe kısmının en büyük çapı 3.10 m'dir. Şerefe kısmını petek kısmı izlemektedir. Bu kısım 5.45 m yüksekliğindedir. Bu kısmın dış çapı 1.84 m, duvar kalınlığı ise 30 santimetredir.
- Minarenin dış yüzeyinde yapılan görsel incelemelerde, önemli seviyede hasarlar gözlemlenmiştir. Gövde altındaki silme taş bileziğinde kesit kayıpları ve hasarlar görülmüştür. Taşları birbirine bağlayan kenetlerde ileri seviyede korozyon hasarları tespit edilmiştir. Yangından en çok etkilendiği düşünülen gövdenin alt kısmında yangına bağlı kararmalar mevcuttur. Gövde alt kısmından başlayıp yaklaşık gövde ortasına kadar devam eden bir bölgede, yığma tuğla kesitte önemli derece kesit kayıpları, eksilmeler, kırılmalar ve derz boşalmaları görülmüştür. Bu kısımda orijinal harçtan farklı görünüşte harç tabakalarına rastlanılmıştır. Gövdede duvar içerisine gömülü bir demir çember bulunmakta olup bu çemberde ileri derecede korozyon hasarları mevcuttur. Korozyondan kaynaklı olarak çemberin olduğu kesitteki tuğla elemanlarda ayrışmalar, çatlaklar, dökülmeler görülmüştür. Şerefe altı kısımda bulunan taşlarda ileri derecede kırıklar, açılmalar ve kesit kayıpları gözlemlenmiştir. Şerefe altında, tuğla duvarın bittiği kottaki taş bilezikte, tuğladan başlayıp düşeyde boylu boyunca kesen çatlaklara rastlanılmıştır. Bu taşları birbirine bağlayan kenetlerde ileri derecede korozyon mevcuttur. Petek kısmındaki ahşap seren direğinde çatlak ve deformasyonlar görülmüştür. Petek kısmındaki tuğla elemanlarda da bazı kesit kayıpları ve hasarlara rastlanılmıştır.
- Minarenin statik ve deprem etkileri altındaki performansını belirlemek amacı ile yapının mevcut ve güçlendirilmiş durumu yaklaşık olarak modellenmiştir. İlk aşamada yapının autocad programında 3d modeli hazırlanmıştır. Ardından Autocad modeli "Ansys Workbench" programına aktarılarak mesh yapılmış ve sonlu eleman modeline dönüştürülmüştür. Yapının sonlu eleman modeli "solid" elemanlar

kullanılarak oluşturulmuştur. Sonraki aşamada yapı “Midas Gen” programına aktarılmıştır. Tüm malzeme, kesit, yükleme, sınır koşulları vb. bilgiler Midas programında tanımlanmıştır. Midas programı ile analize hazır hale gelen sonlu eleman modeli “Opensees” programı ile analiz edilerek yapının nonlinear (doğrusal olmayan) artımsal itme analizleri gerçekleştirilmiştir.

- Mevcut durum analizleri sonucunda yapının nihai dayanımı (taban kesme kuvveti / deprem yükü uygulanan kısmın ağırlığı) push-xp, push-xn, push-yp ve push-yn yüklemeleri sırasıyla 0.052g, 0.044g, 0.057g ve 0.043g olmuştur. Yapıda bu maksimum dayanım değerlerine ulaştıktan bir süre sonra dayanım azalması gerçekleşmiştir. Hasar dağılımları incelendiğinde nihai dayanıma ulaşıldığında pabuç üst kısmında gövdenin altında malzeme hasar sınırlarına ulaşıldığı ve kısmen aşıldığı görülmektedir. Bu noktadan sonra beklenildiği üzere yapının yük kapasitesi azalmaya başlamış ve dayanım kaybı şeklinde devam etmiştir. Yapıya hedef performans depremlerinden biri olan DD-3 depreminde $R_a=1$ için 0.21g taban kesme kuvveti etkimektedir. Yapının deprem dayanımının en düşük olduğu yön “yn” olup yapı bu yönde 0.043g deprem dayanımına sahiptir. Bu değer 0.21g değerinin oldukça altındadır. Minare mevcut halinde bu deprem dayanımına ulaşmadan göçme durumuna geçmektedir. Nonlinear analizler sonucunda minarenin mevcut durumunun, TYDRYK-2017 esas alınarak belirlenen, DD-3 depremi için “Sınırlı Hasar”, DD-2 depremi için “Kontrollü Hasar”, performans hedeflerini sağlayamadığı sonucuna ulaşılmıştır.
- Mevcut durumun deprem performansının yetersiz olmasından dolayı yapı için onarım/güçlendirme önerileri hazırlanmıştır. Bu kapsamda raspa sonrasında, yapının yığma elemanlarında doğal hidrolik kireç esaslı harç enjeksiyonu yapılması önerilmiştir. Raspa sonrasında tespit edilen yapısal çatlakların, çatlağın genişliği, uzunluğu ve türüne bağlı olarak onarılması önerilmiştir. Genişliği 10~40 mm arasında olan çatlaklar için paslanmaz burgu çelik rodlarla onarılması önerilmiştir. Minarede TRM güçlendirme uygulaması önerilmiş olup uygulama detayları sunulmuştur. Minare çekirdeği ve bazı taş kısımlar için onarım detayı verilmiştir. Minarenin gövde üst kısmında mevcut olan demir lamada görülen korozyon hasarları ve etrafındaki yığma elemanlar için de onarım detayı sunulmuştur.

- Minarenin onarılmış/güçlendirilmiş durumu için nonlinear analizler tekrarlanmıştır. Analizler sonucunda yapının nihai dayanımı (taban kesme kuvveti / deprem yükü uygulanan kısmın ağırlığı) push-xp, push-xn, push-yp ve push-yn yüklemeleri sırasıyla 0.061g, 0.066g, 0.065g ve 0.065g olmuştur. Mevcut durum ile benzer şekilde, nihai dayanıma ulaşıldığında pabuç üst kısmında gövdenin altında malzeme hasar sınırlarına ulaşılmış ve kısmen aşılmıştır. Bu noktadan sonra beklenildiği üzere yapının yük kapasitesi azalmaya başlamış ve dayanım kaybı şeklinde devam etmiştir. Yapının onarılmış/güçlendirilmiş durumunda hedef performans depremlerinden biri olan DD-3 depreminde $R_a=1$ için 0.29g taban kesme kuvveti etkimektedir. Yapının deprem dayanımının en düşük olduğu yön “xp” olup yapı bu yönde 0.061g deprem dayanımına sahiptir. Bu değer 0.29g değerinin oldukça altındadır.
- Nonlinear analizler sonucunda minarenin güçlendirilmiş durumunun, TYDRYK-2017 esas alınarak belirlenen, DD-3 depremi için “Sınırlı Hasar”, DD-2 depremi için “Kontrollü Hasar”, performans hedeflerini sağlayamadığı sonucuna ulaşılmıştır. Koruma ilkeleri çerçevesinde, yapılan müdahalelerin sınırlı oluşu sebebiyle hedeflenen performans seviyelerine ulaşılmamıştır. Ancak önerilen güçlendirme yöntemi mevcut yapının nihai dayanımını farklı yönlerde %14~%51 arasında artırmıştır. Mevcut durumda yapının minimum dayanımı 0.043g iken güçlendirilmiş durumda 0.061g’ye çıkarak %42 oranında artmıştır. Onarım/güçlendirme uygulaması yapıyı hedef performans düzeyine ulaştıramamış ancak deprem dayanımının %42 oranında artmasını sağlamıştır.
- Minarenin kinematik göçme mekanizması pushover analizi sonucundaki gerilme dağılımı göz önüne alınarak belirlenmiş olup dönme noktasının gövdenin hemen altındaki pabuç üst kısmı olacağı sonucuna ulaşılmıştır. Minarede dönme mekanizma durumu kontrol edilmiştir. DD-3, DD-2 ve DD-1 depremleri için sırasıyla $R_a=1$, $R_a=2$ ve $R_a=2$ alınmıştır. Minarede DD-1 depreminde dönme mekanizma durumu oluşmaktadır.
- Minarenin görünen kısımlarında zemin oturmasından kaynaklandığı düşünülen bir çatlağa rastlanmamıştır. Ancak yapının bulunduğu alandaki zemin profili dikkate alındığında, öncelikle minarenin orijinal geometrisinden sapma olup olmadığının belirlenmesi ardından yapı sağlığı izleme yöntemleri ile izlenmesi ve olası deformasyonlar ve yatay yer değiştirmelerin uzun süreli takip edilmesi

önerilmektedir. Bu uzun süreli ölçümlerde, minarede kabul edilebilir sınırların üzerinde ve devam eden yatay değiştirmeler oluşması durumunda, zemin ortamı ve yapının 3D olarak modellendiği ileri düzey nonlinear zemin simülasyonları yapılması ve bu analiz sonuçlarına göre gerekli önlemlerin alınması önerilmektedir.



KAYNAKLAR

- Altunışık, A., Sunca, F., Genç, A., & Tavşan, C. (2021). Post-Earthquake Damage Assessments of Historic Mosques and Effects of Near-Fault and Far-Fault Ground Motions on Seismic Responses. *International Journal of Architectural Heritage*, 1-36.
- Aslay, S., & Okuyucu, D. (2020). Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University. *Technical evaluation of abscissa damage of Erzincan Değirmenliköy church*, 35(1), 387-402.
- Assessment of the Seismic Retrofitting of a Historical Masonry Mosque by means of Nonlinear Dynamic Analysis. (2021). *12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC)*. Barcelona.
- Aşıkoğlu, A., Avşar, Ö., Lourenco, P., & Silva, L. (2019). Effectiveness of seismic retrofitting of a historical masonry structure: Kütahya Kurşunlu Mosque, Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(6), 3365-3395.
- Bayraktar, A., Hökelekli, E., Türker, T., Çalık, İ., Ashours, A., & Mosallam, A. (2019). Window opening effects on structural behavior of historical masonry Fatih Mosque. *Int. J. Archit. Heritage*, 13(4), 585-599.
- 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.
- Çalık, İ., Bayraktar, A., & Türker, T. (2016). Determination of the effect on the dynamic behavior of historical masonry mosques reinforced concrete domes by ambient vibration testing. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(3), 621-630.
- Dinani A. T., Destro Bisol G., Ortega J., Lourenço P. B., (2021). Structural Performance of the Esfahan Shah Mosque, *J. Struct. Eng.*, 147 (10).
- Frumento, S., Giovinazzi, S., Lagomarsino, S., & Podestà, S. (2006). Seismic Retrofitting of Unreinforced Masonry Buildings in Italy. *New Zealand Society for Earthquake Engineering* (s. 48-55). Christchurch: NZSEE.
- Giuffrè, A. (1991). *Lecture sulla meccanica delle murature storiche*. Kappa, Roma.
- Gürbüz, M., & Kocaman, İ. (2024). Enhancing seismic resilience: A proposed reinforcement technique for historical minarets. *Engineering Failure Analysis*.
- Heyman, J. (1966). The stone skeleton. *International Journal of Solids Structures*, 2, 249-279.
- Heyman, J. (1969). The safety of masonry arches. *International Journal of Mechanical Science*, 11, 363-385.

- Karantoni F. V., Dimakopoulou D., (2021). Displacement-based assessment of the Gazi Hasan Pasha mosque in Kos island (GR) under the 2017 M6. 6 earthquake and Eurocode 8, with proposals for upgrading, *Bull. Earthquake Eng.*, 19 (2), 1213-1230.
- Kazaz, İ., & Kocaman, İ. (2018). Seismic load capacity evaluation of stone masonry mosques. *Journal of the Faculty of Engineering and*, 33(2), 557-573.
- Kocaman, İ., & Kazaz, İ. (2020). Seismic Load Capacity of Historical Masonry Mosques by Rigid Body Kinetics. *International Journal of Architectural Heritage*, 14(6), 849-869.
- Korkmaz, A., Ay, Z., & Uysal, Ö. (2008). Çelik Yapıların Güçlendirilmesinin Doğrusal Olmayan Analizlerle Değerlendirilmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24(1-2), 216 - 226.
- Koseoglu, G., & Canbay, E. (2015). Assessment and rehabilitation of the damaged historic Cenabı Ahmet Pasha Mosque. *Engineering Failure Analysis*, 57, 389-398.
- Lagomarsino, S., & Podestâ, S. (2004a). Seismic Vulnerability of Ancient Churches: Part 1. Damages Assessment and Emergency Planning. *Earthquake Spectra*, 20(2), 377-394.
- Lagomarsino, S., & Podestâ, S. (2004b). "Seismic Vulnerability of Ancient Churches: Part 2. Statistical Analysis of Surveyed Data and Methods for Risk Analysis. *Earthquake Spectra*, 20(2).
- Maheri , M., Najafgholipour, M., & Zarandi, S. (2023). Seismic rehabilitation of URM heritage-listed Namazi school building using multiple retrofitting techniques. *Journal of Building Engineering*, 79.
- Maras, M., Özmen, A., Sayın, E., & Ayaz, Y. (2022). Seismic Assessment of the Historical Sötlü Minaret Mosque. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 66(2), 445–459.
- Munarim, U., & Ghisi, E. (2016). Environmental feasibility of heritage buildings rehabilitation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 235-249.
- Nappi, A., Anthoine, A., & Sofronie, R. (2001). Innovative Reinforcement Techniques Applicable to Historical Buildings: Experimental and Numerical Validation. S. V. Khalili (Dü.) içinde, *Computational Mechanics - New Frontiers for New Millennium* (s. 247-256). Oxford: Elsevier.
- Portioli, F., Mammana, O., Landolfo, R., & Mazzolani, F. (2011). Seismic Retrofitting of Mustafa Pasha Mosque in Skopje: Finite Element Analysis. *Journal of Earthquake Engineering*, 15(4), 620-639.
- Soyluk, A., & Tuna, M. (2011). Dynamic Analysis of Historical Sehzade Mehmet Mosque for Base Isolation Application. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26(3), 667-675.
- TBDY. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*. AFAD, Ankara.
- TYDRYK. (2017). *Tarihi Yapılarda Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu*. Vakıflar Genel Müdürlüğü.

Uray, A., Şengel, H., & Çarbaş, S. (2019). Analysis of historical structures by using finite element method in Iznik Yeşil Mosque. *Challenge Journal Of Structural Mechanics*, 5(4), 121-129.

Usta, P., Bozdağ, Ö., & Çarhoğlu, A. (2020). Appraisal of Structural Behavior of Afyon Sandıklı Ulu Mosque. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 7(2), 871-881.

Valente M., (2022). Seismic behavior and damage assessment of two historical fortified masonry palaces with corner towers, Eng. Fail. Anal., 134.

Yavartanoo, F., & Kang, T. (2022). Retrofitting of unreinforced masonry structures and considerations for heritage-sensitive constructions. *Journal of Building Engineering* , 49.



İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

4801220003-Furkan KILINÇARSLAN

ORJİNALLİK RAPORU

%19

BENZERLİK ENDEKSİ

%17

İNTERNET KAYNAKLARI

%11

YAYINLAR

%9

ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1

www.vgm.gov.tr

İnternet Kaynağı

%3

2

acikbilim.yok.gov.tr

İnternet Kaynağı

%3

3

Submitted to The Scientific & Technological
Research Council of Turkey (TUBITAK)

Öğrenci Ödevi

%2

4

acikerisim.sakarya.edu.tr

İnternet Kaynağı

%1

5

dergipark.org.tr

İnternet Kaynağı

%1

6

www.msgsu.edu.tr

İnternet Kaynağı

%1

7

Baris Gunes. "Seismic Assessment of the
Archangeloi (Başmelekler) Church in
Kumyaka, Türkiye", Buildings, 2023

Yayın

%1

8

www.statikproje.gen.tr

İnternet Kaynağı

%1

ETİK KURUL İZİN YAZISI

Uyarı: Canlı denekler üzerinde yapılan tüm araştırmalar için Etik Kurul Belgesi alınması zorunludur.

- ☐ Etik Kurul izni gerekmektedir.
- ☒ Etik Kurul izni gerekmemektedir.

Furkan KILINÇARSLAN
(İmza)



KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

- ☐ Kurum izni gerekmektedir.
- ☒ Kurum izni gerekmemektedir.

Furkan KILINÇARSLAN
(İmza)

PATENT HAKKI İZNİ

Çalışma Patent hakkı izni gerektirmemektedir.

