



T.C.  
EGE ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü



# İSKELE İLE DESTEKLENEN TARİHİ BİR MİNARENİN YAPISAL DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Yüksek Lisans Tezi

Ercan TUNA

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir  
2019



T.C.  
EGE ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü

**İSKELE İLE DESTEKLENEN TARİHİ BİR  
MİNARENİN YAPISAL DAVRANIŞININ  
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Ercan TUNA

Danışman: Doç. Dr. Bengi ARISOY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir  
2019



## KABUL ONAY SAYFASI

Ercan TUNA tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “İSKELE İLE DESTEKLENEN TARİHİ BİR MİNARENİN YAPISAL DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 19.09.2019 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

### Jüri Üyeleri:

#### Jüri Başkanı

: Doç. Dr. Serkan MISIR

#### Raportör Üye

: Doç. Dr. Bengi ARISOY

#### Üye

: Doç. Dr. Alper SEZER

İmza

  
.....  
  
.....  
  
.....



## EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

### ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “İSKELE İLE DESTEKLENEN TARİHİ BİR MİNARENİN YAPISAL DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

19 / 09 / 2019



Ercan TUNA



## ÖZET

# İSKELE İLE DESTEKLENEN TARİHİ BİR MİNARENİN YAPISAL DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

TUNA, Ercan

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Bengi ARISOY

Eylül 2019, 101 sayfa

Bu çalışmanın amacı İzmir ili, Selçuk ilçesinde bulunan 16.yyda inşa edilmiş İsabey Camii minaresinin deprem performansının geçici takviye sonrası deneysel veriler ile irdelenmesidir.

Sunulan çalışmada tarihi yapılar sınıfında yer alan taş/tuğla yığma minarenin deprem ve dış etkilere karşı dayanımının tarihi yapının mevcut durumunu (yapısal dokusunu ve görünüşünü) değiştirmeden en az kalıcı müdahaleler ile artırılması ve bu koruma yönteminin minare üzerine olan etkisinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Bu çerçevede, geçici destek iskelesinin tarihi bir minarenin deprem performansına etkileri bilgisayar ortamında değerlendirilmiştir. Sunulan çalışmada tarihi bir minarenin geçici takviye olarak sınıflandırılan ahşap iskele sistemi ile desteklenmesi halinde deprem etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Geçici ahşap iskele sistemi minarenin yatay yer değiştirmelerini sınırlamıştır. Ancak minare ve ahşap iskele iki ayrı yapısal sistem olduğundan dolayı yatay yükler (deprem yükleri) etkisinde yatay yer değiştirmelerin kısıtlanması minare üzerinde iskele sisteminin temas noktalarında yatay kuvvetlerin oluşmasına neden olduğundan oluşan bu yatay kuvvetler minarenin deprem yükleri etkisindeki davranışını etkilemiştir. Çalışmada minare-iskele etkileşiminin numerik olarak analizleri yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yığma yapılar, deneysel modal analiz, deprem performansı.



**ABSTRACT****ASSESSMENT OF STRUCTURAL BEHAVIOUR OF A HISTORIC  
MINARET SUPPORTED BY SCAFFOLDING**

TUNA, Ercan

M.Sc. in Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Bengi ARISOY

September 2019, 101 pages

The aim of this study is to investigate the earthquake performance of Isabey Mosque minaret, built in 16th century in Selçuk district of İzmir with experimental data after a temporary reinforcement.

In the proposed study, it is aimed to increase the resistance of the stone / brick masonry minarets classified as in historical buildings to earthquake and external effects by increasing the current state of historical structure (structural texture and appearance) with the least permanent interventions and to determine the structural effects of this protection method on the minaret.

In this perspective, effects of temporary support scaffolding were evaluated for the earthquake performance of a historical minaret in the computer environment. In the present study, if a historical minaret is supported with wooden scaffolding system classified as temporary reinforcement, its behavior under earthquake will be examined. The temporary wooden scaffold system will limit the horizontal displacement of the minaret. However, since the minaret and the wooden pier are two separate structural systems, the horizontal displacements under the influence of horizontal loads (earthquake loads) will cause the horizontal forces to be formed at the contact points of the scaffold system on the minaret. These horizontal forces will affect the behavior of the minaret under the effect of earthquake loads. Numerical analysis of minaret-quay interaction will be performed in this study.

**Keywords:** Masonry structures, experimental modal analysis, earthquake seismic performance.



## ÖNSÖZ

Bu çalışma, tarihi kültür varlığı olarak zengin sayılabilecek olan ülkemizdeki eserler ile ilgili çalışmalara katkı vermesi amacıyla hazırlanmıştır.

Bilindiği üzere kültürel zenginliklerimizin korunması, yaşatılması ve gelecek nesillere aktarılması en önemli konulardan birisidir.

Bu çerçevede İzmir ili, Selçuk ilçesinde bulunan İsbey Cami minaresi detaylı olarak incelenerek, restorasyon uygulaması öncesi hazırlanan destek iskelesinin depreme karşı etkisi araştırılmıştır. Öncelikle ahşap destek iskelesi yapılmadan önceki analizler yapılarak, ahşap destek iskelesi sonrası da ölçümler alınarak yerinde inceleme imkânı olmuştur. Bu vesileyle, tarihi kültür varlıklarının korunması, yaşatılması ve gelecek nesillere aktarılması açısından küçük de olsa bir katkı olmasından büyük mutluluk duymaktayım.

İZMİR

19/09/2019

Ercan TUNA



**İÇİNDEKİLER**Sayfa

KABUL ONAY SAYFASI .....	iii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	v
ÖZET .....	vii
ABSTRACT .....	ix
ÖNSÖZ.....	xi
İÇİNDEKİLER.....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xix
TABLolar DİZİNİ.....	xxiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xxv
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	3
3. TEORİK ÇALIŞMALAR.....	6
3.1 Yığma Yapılar .....	6
3.2 Yığma Yapıların Malzeme Özellikleri .....	7
3.3. Yığma Yapıların Mekanik Özellikleri .....	9
3.3.1 Yığma Yapılarda Basınç Dayanımı .....	9
3.3.2 Yığma Yapılarda Çekme Dayanımı.....	10

**İÇİNDEKİLER DİZİNİ (devam)**

	<u>Sayfa</u>
3.3.3 Yığma Yapılarda Kayma Dayanımı.....	10
3.4 Durum Değerlendirmesi.....	11
3.4.1 Tahribatlı Test Metotları .....	11
3.4.2 Tahribatsız Test Metotları .....	11
3.4.3 Sahada Yapılan Test Metotları.....	12
3.5 Yığma Yapılarda Sonlu Elemanlar Metodu.....	13
3.5.1 Mikro Modelleme .....	14
3.5.2 Makro Modelleme.....	17
3.5.3 Mezo (Basitleştirilmiş Mikro) Modelleme .....	17
3.6 Yığma Yapıların Analizi.....	18
3.6.1 Yüklerin Belirlenmesi .....	18
3.6.2 Analiz Yöntemleri.....	19
3.6.3 Analiz Sonucu Değerlendirme .....	24
4. TARİHİ YAPILAR İÇİN DEPREM RİSKLERİNİN YÖNETİMİ KILAVUZU ÜZERİNE KISA BİR DEĞERLENDİRME.....	25
4.1 Giriş.....	25
4.2 Temel Tanım ve Kavramlar .....	25
4.2.1 Kültür Varlığı.....	25

**İÇİNDEKİLER DİZİNİ (devam)**

	<u>Sayfa</u>
4.2.2 Basit Onarım.....	26
4.2.3 Esaslı Onarım.....	26
4.3 Araştırma ve Bilgi Toplanması.....	26
4.3.1 Tarihsel Araştırma Yapılması.....	26
4.3.2 Saha Çalışmaları ve Hasar Tespitlerinin Yapılması .....	27
4.3.3 Zemin ve Deprem Açısından İrdeleme.....	27
4.3.4 Saha ve Laboratuvar Deneyleri .....	28
4.4 Tarihi Yapılardaki Malzemeler ve Oluşan Hasarlar.....	28
4.4.1 Taş.....	29
4.4.2 Kerpiç .....	29
4.4.3 Seramikler.....	29
4.4.4 Tuğla .....	30
4.4.5 Harçlar .....	30
4.4.6 Ahşap .....	30
4.4.7 Metal Malzemeler .....	31
4.4.8 Beton.....	31
4.4.9 Betonarme.....	31

**İÇİNDEKİLER DİZİNİ (devam)**

	<u>Sayfa</u>
4.5 Tarihi Yapılarda Yapım Sistemleri .....	32
4.5.1 Kaya Oyma Yapılar .....	32
4.5.2 Taş, Tuğla, Kerpiç ve Beton Yığma Yapılar .....	32
4.5.3 Ahşap Yapılar .....	32
4.5.4 Demir ve Çelik Yapılar .....	33
4.5.5 Erken Betonarme Yapılar.....	33
4.6 Tarihi Yapılarda Yapısal Modelleme ve Değerlendirme .....	33
4.6.1 Yapıyı Etkileyen Yükler .....	33
4.6.2 Yapı Taşıyıcı Sistemi ve Zemine Aktarımı.....	35
4.6.3 Basit Güvenlik Analizleri.....	35
4.6.4 Modelleme Metotları.....	36
4.6.5 Deprem Etkisi .....	37
4.6.6 Yapısal Güvenliğin Deprem Altında İncelenmesi .....	37
4.7 Müdahale Yöntemleri .....	39
4.7.1 Müdahale Stratejileri.....	39
4.7.2 Basit Onarım .....	40
4.7.3 Esaslı Onarım.....	40

**İÇİNDEKİLER DİZİNİ (devam)**

	<u>Sayfa</u>
4.7.4 Söküm ve Taşıma .....	47
4.7.5 Yeniden Yapım.....	47
4.7.6 Projelendirme.....	48
4.8 Deprem Odaklı Afet ve Acil Durum Yönetimi .....	48
4.8.1 Tarihi Yapılarda Acil Durum Yönetimi .....	48
4.8.2 Acil Müdahale Yöntemleri .....	49
5. ÖRNEK ÇALIŞMA: SELÇUK-İSABEY CAMİİ MİNARESİ.....	51
5.1 Ön Çalışmalar .....	51
5.1.1 İsabey Camii'nin Tarihi.....	51
5.1.2 Mimari ve Geometrik Özellikleri .....	52
5.1.3 Uygulama Yapılan Minarenin (Batı) Taşıyıcı Sistemi ve Malzeme Özellikleri .....	57
5.1.4 Yığma Yapı Genel Malzeme Parametreleri.....	58
5.2 Yapısal Analizler .....	60
5.2.1 Minarenin Sonlu Elemanlar Modeli (SEM) .....	61
5.2.2 Minare Öz Ağırlığı (Zati Yük) Altındaki Analizi.....	62
5.2.3 Minare Ölü Yük + Rüzgâr Yüğü Altındaki Analizi .....	63
5.2.4 Minarenin Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analizi.....	65

**İÇİNDEKİLER DİZİNİ (devam)**

	<u>Sayfa</u>
5.2.5 Minarede Kullanılan Bilgisayar Programı (ARTEMIS 4.0).....	67
5.2.6 İskele İle Desteklenme Öncesi Minarenin Deneysel Model Analizi .....	68
5.2.7 İskele İle Desteklenme Sonrası Minarenin Deneysel Model Analizi .....	74
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	90
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	93
TEŞEKKÜR.....	99
ÖZGEÇMİŞ .....	101

**ŞEKİLLER DİZİNİ**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Silindirik tuğlanın çevrimli basınç deneyi ve tipik gerilme-şekil değişirme diyagramı (Lourenço, 2004). ....	7
3.2 Tek plak ve çift plak ile ölçüm (Aköz, 2005).....	13
3.3 Farklı boyutlarda sonlu elemanlarla tanımlanmış sistem (Hutton, 2004).....	14
3.4 Yığma yapıların modellenmesi, a) Yığma yapı, b) Detaylı mikro modelleme, c) Basitleştirilmiş mikro modelleme, d) Makro modelleme (Lourenço, 1996).....	14
3.5 Mikro modelleme (Lourenço, 1996).....	15
3.6 Kırılma mekanizması a) Bağlantı çekme çatlak, b) Bağlantı kayması, c) Birim direk çekme çatlama, d) Birim diyagonal çekme çatlak, e) Yığma ezilmesi (Lourenço, 1996).....	16
3.7 Malzemenin homojenize edilmesi (Doğan, 2016).....	17
3.8 Basitleştirilmiş mikro modelleme (Lourenço, 1996).....	18
3.9 Deprem analizi.....	20
3.10 Zemin sınıflarına göre İsabey Cami alanı ivme spektrumları. ....	22
3.11 Tasarım ivme spektrumu (TBDY, 2018).....	23
4.1 Onarım- sol yan ve tamamlama - sağ yan örneği (Alaşehir Kurşunlu Han). ..	41
4.2 Zemin iyileştirme örneği (Konak Hisar Camii).....	42
4.3 Kireç enjeksiyon uygulaması (Konak Yapıcıoğlu Camii).....	43

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.4 Kemer ve tonoz onarımları (Sırasıyla Manisa İlyasbey ve Gölarmara Şahuban Camileri).....	44
4.5 Çatıda ahşap makas ve karkas onarımları (Menemen Mahkeme Cami).....	45
4.6 Minare temeline ve kaidesine Takviye (Tire Rahmanlar Minaresi). ....	46
4.7 Minare korkuluğu onarımı ve gövdeye takviye yapılması (Konak Şadırvanaltı Cami ve Tire Rahmanlar Minaresi).....	46
4.8 Kültür mirasına yönelik afet riski döngüsü.....	48
5.1 Selçuk İsabey Camii (Aslanapa, 1997). ....	52
5.2 Caminin çatı planı. ....	53
5.3 Cami dış avlusu-batı cephe. ....	54
5.4 Cami iç avlusu (Doğu cepheden). ....	54
5.5 Cami iç avlusu (Batı cepheden). ....	55
5.6 Cami harimi.....	56
5.7 Batı cephesi minaresi iç avlu ve dıştan genel görünüm. ....	57
5.8 Batı cephesi minaresinde merdiven basamakları. ....	57
5.9 Batı cephesi minaresinde gövde ve basamaklardaki hasarlar. ....	58
5.10 Batı cephesi minaresi üç boyutlu bilgisayar modeli. ....	62
5.11 Minarenin kendi öz ağırlığı altında oluşan yer değiştirmeler (a, b, c - m) ve asal gerilmeler ( d, e - MPa).....	63

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.12 Minarenin zati ağırlığı ile birlikte şiddetli rüzgâr tesirinde oluşabilecek yer değiştirmeler (a, b, c - m) ve en küçük ve en büyük gerilmeler (d, e -MPa)..	64
5.13 Zaman tanım alanında kullanılan deprem kaydının x ve y yönündeki ivme bileşenleri.....	65
5.14 Deprem altında minarede oluşan en büyük ve en küçük yer değiştirmeler (m). .....	66
5.15 Minarede oluşabilecek çekme ve basınç gerilmelerinin zamana göre değişimi. ....	66
5.16 Minarede oluşabilecek çekme ve basınç gerilmelerinin dağılımı (Pa).....	67
5.17 Kaide-zemin ve minare içi ivme ölçerler.....	68
5.18 Minare en üst nokta ivme ölçerler ve veri toplama cihazı.....	69
5.19 Kalibrasyon öncesi mod şekilleri (a= mod1 x, b=mod2 y, c=burkulma, d=mod4 x, e= mod5 y). ....	70
5.20 Kalibrasyon sonrası mod şekilleri (a= mod1 x, b=mod2 y, c=burkulma, d=mod4 x, e = mod5 y). ....	72
5.21 Analiz sonrası minare tepe noktasında meydana gelen yer değiştirme (m). .	74
5.22 Minare destek iskele yapıma çalışmaları.....	75
5.23 Minare destek iskelesi tamamlanmış hali. ....	76
5.24 Minare gövdesine ek çelik bilezik uygulaması ve ahşap destek iskelesinin kauçuk ile yapıya bağlanması.....	76
5.25 Cami ve uygulama yapılan minare vaziyet planı.....	77

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.26 Minare kot planları.....	78
5.27 Minare batı cephe destek iskelesi görünüm. ....	79
5.28 Minare destek iskelesi doğu cephesi görünüm. ....	80
5.29 Minare destek iskelesi kuzey cephesi görünüm.....	81
5.30 Minare destek iskelesi güney cephesi görünüm.....	82
5.31 Kaide-zemin ve minare giriş ivme ölçerler-iskele sonrası.....	83
5.32 Ahşap destek iskelesi malzeme özellikleri (SAP2000).....	84
5.33 Tuğla minare görünümleri (SAP2000). ....	85
5.34 Ahşap destek iskele genel görünüm (SAP2000).....	85
5.35 Ek çelik bağlantı noktalarının gösterimi (SAP2000).....	86
5.36 Ek çelik bağlantı noktasında etkitilen yatay yüklerin gösterimi (SAP2000). 86	
5.37 Ek çelik bağlantı noktasındaki yatay deplasman gösterimi (SAP2000). ....	87
5.38 Destek iskele sisteminin deforme olmuş hali-detay +16.32 kotu (SAP2000).....	87
5.39 Destek iskele sisteminin deforme olmuş hali-genel (SAP2000).....	88

## TABLOLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
3.1 TS 771-1'e göre dolu harman tuğlası basınç dayanımı.....	8
3.2 Tuğlanın ortalama mekanik özellikleri (Yılmaz, 2006). ....	8
3.3 Doğal taşların ortalama mekanik özellikleri (Yılmaz, 2006). ....	8
3.4 Duvardaki gerilme düzeyine bağlı olarak kullanılacak malzemenin minimum basınç dayanımı (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, 2018). ....	10
3.5 Mikro ve makro modelin kıyaslanması (Ercan, 2010). ....	17
4.1 Yığma duvar malzemesinin mekanik özellikleri (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, 2018).....	34
4.2 Performans düzeyleri ile ilgili hesap yöntemleri ve gerilme, şekil değiştirme sınırları (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, 2018).38	38
5.1 Homojenleştirilmiş yığma model için malzeme parametreleri.....	60
5.2 Minare yapısını oluşturan malzemelerin teorik mekanik özellikleri. ....	61
5.3 Minarenin ilk beş moduna ait modal frekans değerleri. ....	65
5.4 Kalibrasyon öncesi minarenin ilk beş moduna ait deneysel frekans değerleri. ....	71
5.5 Kalibrasyon sonrası minarenin ilk beş moduna ait deneysel frekans değerleri (destek iskelesi öncesi).....	72
5.6 Kalibrasyon sonrası minarenin ilk beş moduna ait deneysel frekans değerleri (destek iskelesi sonrası). ....	83



**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**SimgelerAçıklamalar

cm

Santimetre.

daN

Dekanevton.

GPa

Gigapascal.

kN

Kilonevton.

kPa

Kilopascal.

m

Metre.

mm

Milimetre.

MPa

Megapascal.

N

Newton.

Ra

Deprem yükü azaltma katsayısı.

 $\epsilon$ 

Şekil değiştirme.

 $\sigma$ 

Gerilme.

Kısaltmalar

AFAD

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı

ICOMOS

Uluslararası Anıtlar ve Sitler Konseyi

KILAVUZ

Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi  
Kılavuzu

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**

KUDEB	Koruma Uygulama Denetim Müdürlüğü
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
SRSS	Karelerin toplamının karekökü kuralı
UDAP	Ulusal Deprem Araştırma Programı
UNESCO	Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Örgütü
UV	Ultraviyole ışını.

## 1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze kadar insanoğlu öncelikle temel ihtiyaçları için yapılar inşa etmeye başlamıştır. Yaşadığı döneme ve teknik imkanlara göre yapı malzemeleri kullanımı çamurdan başlayarak günümüzde nano teknoloji ürünlere kadar ilerlemiştir. Yapıyı oluşturan malzemelerin dayanımına göre binaların günümüze ulaşma derecesi değişmiş ve en çok da taş ve tuğladan imal edilen yapılar ayakta kalmayı başarmıştır.

Günümüze ulaşmayı başarmış yapılar ise, hem o dönemin özelliklerini ve izlerini taşıması ve o dönemi anlamamız açısından hem de insanlık tarihinin bir mirası olması bakımından önem arz etmektedir. Ortak kültürel mirasımız olan bu yapılar ele alındığında her birisi yapılış tarzı ve malzemesine göre özgün olsa da genelde yığma yapı olarak karşımıza çıkmaktadır. Yığma yapı tekniğinin kolay, ucuz ve yapı bölgesinde malzeme cinsine göre ulaşılabilir olma avantajları insanoğlunun bu yöntemi tercih etmesinin en önemli parametreleri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yığma yapı gelişimi hammaddesi çamur olan kerpiç ile başlamış, sonraları harçlı harçsız taş örgü, yerine göre ahşap malzeme kullanılmıştır. Teknolojinin ilerlemesi ve toprağın pişirilmesi ile tuğla malzeme kullanılmaya başlanmış, daha estetik ve sağlam mermerin işlenmesi ile devam etmiştir. Yığma yapıların temel dayanımını etkileyen harç malzemesi ise neredeyse her yapıda farklı özellik ve tarzlarda kullanıldığından tarihi yapıların her birinin ayrı ayrı ele alınması hem zorunluluktan olarak ortaya çıkmış hem de daha doğru verilerin elde edilmesi adına gereklilik haline gelmiştir.

Ortak değerimiz olan tarihi yapılar yapıldığı günden günümüze kadar çeşitli doğal etkilere (deprem, sel, rüzgâr gibi) maruz kaldığı gibi insanoğlunun hem zorunluktan kaynaklanan malzeme ihtiyacı hem de savaş vb. gibi insan eliyle oluşturulmuş dış faktörler nedeniyle tahribata uğramış, halen de çeşitli etmenlerle bu bozulmalar devam etmektedir. Oluşan ve oluşmakta olan bu bozulmaların engellenmesi, etkilerin azaltılması ve mümkünse sıfıra indirilmesi her yapının ayrı ayrı değerlendirilmesi ile mümkün olabilmektedir. Ancak, her ülkenin ekonomik şartları, gelişimi ve teknik imkanları göz önüne alındığında böyle bir imkana her tarihi yapının şansı olduğunu söylemek güçtür. Fakat, günümüzde UNESCO gibi uluslararası kuruluşlarla bu ihtiyaç giderilmeye çalışılmaktadır.

İlk çağlardan günümüze kadar birçok medeniyete ev sahipliği yapmış ülkemiz tarihi yapılar konusunda zengin sayılabilecek bir envantere sahiptir. Bu yapıların korunması, yaşatılması ve gelecek nesillere aktarılması açısından bilimsel yöntemlerle bu eserlerin incelenmesinin daha verimli olacağı aşikardır.

Bu çalışmada, İzmir ili, Selçuk ilçesinde bulunan Aydınoğulları Beyliği hükümdarı İsa Bey tarafından 1375 tarihinde Şamlı mimar Dımışklıoğlu Ali'ye yaptırılan İsa Bey Camii minaresinin deprem performansının esaslı onarım-restorasyon müdahaleleri belirleninceye kadar geçici takviye sonrası deneysel veriler ile incelenmesi öngörülmektedir.

Bu kapsamda, tarihi yapılar sınıfında yer alan taş/tuğla yığma minarelerin deprem ve dış etkilere karşı dayanımının tarihi yapının mevcut durumunu (yapısal dokusunu ve görünüşünü) değiştirmeden en az kalıcı müdahaleler ile artırılması ve bu koruma yönteminin minare üzerine olan etkisinin belirlenmesi amaçlanmakta ve çalışmada minare-iskele etkileşiminin numerik olarak analiz sonuçları değerlendirilecektir.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu tez kapsamında değerlendirilen konulara ilişkin bazı çalışmalar aşağıda kısaca özetlenmektedir.

Teomete (2004), mülkiyeti Vakıflar Genel Müdürlüğü'ne ait olan tarihi yapı Kamanlı Camisini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak incelemiştir. LUSAS yazılımı ile lineer ve lineer olmayan yöntemler ve uzun süreli gözlemler sonucu analizleri gerçekleştirerek yapıda oluşan çatlakları araştırmış ve sebeplerini irdelemiştir.

Kuruşcu (2005), 'Yığma Yapıların Analizi' adlı tez çalışmasında yığma yapılar nümerik analizlerle incelenmiştir. Bunun yanında, parametrik çalışmalar izotropik hasar yöntemi ile geliştirilerek nümerik analiz yöntemi ile karşılaştırılmıştır.

Şen (2006), 'Modelling and Analysis of The Historical Masonry Structures' adlı tez çalışmasında üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ve lineer elastik analizler SAP2000 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, yapının deprem riski altında olmadığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, yapı kubbesinin çatlak oluşumları sebebiyle kritik seviyede olduğu tespit edilmiştir.

Betti ve Vignoli (Betti and Vignoli, 2007), 'Modeling and Analysis of a Ronesque Church under Earthquake Loading: Assesment of Seismis Resistance'' adlı çalışmada 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli, lineer ve lineer olmayan ve dinamik analizlerle kilisenin davranışları ANSYS programı ile incelenmiştir. Sonuç olarak, yapı gerilmeleri ve yükleri karşılaştırılmış ve kilise duvarlarında meydana gelen çatlaklar dolayısıyla risk altında olduğu belirlenmiştir. Buna ek olarak, onarım ve güçlendirme önerileri sunulmuştur.

Bağbancı (2009), Bursa Ördekli Hamamı'nı Key Creator Yazılımı kullanarak 3 boyutlu olarak modellemiştir. Analizlerin yapılabilmesi için ALGOR sonlu elemanlar yazılım programı kullanılarak sonlu elamanlar 10-50 cm aralığında alınmıştır. Yapılan analizler sonucu yapıda 1 MPa civarında gerilmeler tespit edildiğinden deprem altında yıkılma riski bulunduğu kanaatine varılmıştır.

Roca vd. (Roca et al., 2010), 'Structurel Analysis of Masonry Historical Constructions, Classical and Advanced Approaches' adlı çalışmada plastik analiz, limit analizi, elastik lineer analiz, basitleştirilmiş modelleme, makro model sonlu elemanlar yöntemi, mikro modelleme, lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemi farklı yaklaşımlar elde edilmesi amacıyla araştırılmıştır.

Eyüpgiller vd. (2014), Şah Sultan Camii Restorasyon Uygulaması Öncesi Çalışmalar adlı Vakıflar Genel Müdürlüğü yayını olan Vakıf Restorasyon Yıllığı dergisindeki çalışmada yapının kendi ağırlığı ve deprem yükleri altındaki davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile SAP2000 programı altında irdelenerek cami minaresinin Deprem Yönetmeliği (2007) tarafından istenen can güvenliği performansını sağlamadığı görülmüştür.

Sesigür ve Çılı (2014), Edirnekapı Mihrimah Sultan Camisinde Yapılan Onarım ve Güçlendirme Çalışmaları adlı çalışmada yapı üç boyutlu sonlu eleman modeli ile ANSYS programı altında analiz edilmiştir. Yapıda gergili ve gergisiz sistemler karşılaştırılarak yapılan analizler sonucunda bulunan en elverişsiz gerilme büyüklüklerinin aynı civarlarda olduğu görülmesine rağmen gerilme dağılımında iyileştirmeler meydana getirdiği tespit edilmiştir.

Nohutçu vd. (2014), Manisa ili, Yunusemre ilçesinde bulunan eski eser kültür varlığı olan Hafsa Sultan Camii'ni üç boyutlu katı ve sonlu elemanlar modeli ile inceleyerek ABAQUS programında analizler yapmıştır. Operasyonel Modal Analiz yöntemi ile Artemis programında model iyileştirilerek 1999 Kocaeli deprem ivme kayıtları kullanılarak zaman tanım alanında analizler tamamlanmıştır. Bu analizlere göre tarihi yapının kültürel değerinin korunmasında baz alınan 0.001'lik yer değiştirmeleri aştığı tespit edilmiştir.

Tetik (2015), İstanbul Tarihi Yarımada'da yer alan Şeyh Süleyman Mescidi SAP2000 programında sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Meydana getirilen model ile yapının kendi ağırlığı ve deprem altındaki performansı araştırılarak özellikle kubbe kasnağının yapıya birleştiği bölgede gerilmelerin fazla olduğu tespit edildiğinden bu bölgelerde çelik çubuklar ile kubbenin sarılması önerilmektedir.

Meraki ve Meraki (2016), Kosova'da Muslihuddin/Müezzın Hoca Camisi isimli çalışmada hem camiyi hem de cami minaresini sonlu elemanlar yöntemi ile ABAQUS programıyla modelleyerek incelemiştir. Özellikle cami minaresi için

yatay doğrultuda 59 mm gibi yer değiştirme miktarının minarede hasara yol açabileceği vurgulanmıştır. Yine, aynı araştırmacılar Vakıflar Genel M¼d¼rl¼đ¼ yayını olan Vakıf Restorasyon Yıllığı'nın aynı sayısında Kosova/Sefa Camisi'nin Projelendirme S¼reci isimli çalışmada aynı y¼ntemlerle cami minaresini incelenmiş ve yaklaşık 47 mm yer değiştirmeye ulaştıklarından bu değerin yapıda hasara yol açabileceği vurgulanmıştır.

Mısır vd. (2017), 'Tarihi Yığma Binaları Oluşturan Üç Tabakalı Taş Yığma Duvarların D¼zlemdeři Etkilere G¼re Model Kalibrasyonu: İsabey Örneği' isimli AFAD-UDAP projesinde İzmir-Selçuk'ta bulunan İsabey Cami avlu duvarlarının titreşim testlerini ivmeölçerler yardımıyla tamamlayarak Operasyonel Model Analiz y¼ntemi ile yapının titreşim frekansları, mod şekilleri ve s¼n¼m oranları bulunarak Abaqus programında sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Ayrıca, kalibre edilen model Modal G¼venilirlik Kriteri (MAC ile doğrulanarak daha tutarlı bir doğrusal model tasarlamışlardır.

Özdemir (2018), 'Tarihi Yapıların Bilgisayar Destekli Analizi: Patara Antik Kent Tiyatrosu Sahne Yapısı Örneği' adlı tez çalışmasında yapı SAP2000 programı ile makro model y¼ntemi ile modellenerek yapının zayıf y¼nleri belirlenerek bazı önlemler önerilmiştir. Ayrıca, yapının deprem davranışı hakkında bazı açıklamalar yapılmıştır.

### 3. TEORİK ÇALIŞMALAR

Yığma yapılar, inşa edildikleri malzemelere göre tuğla, taş-mermer veya bunların bileşimlerinden elde edilen yapılardır. Yığma yapı en eski inşa tekniklerinden biri olarak bilinmektedir. Bu bölümde, yığma yapı tanımı, malzemelerinin karakteristik özellikleri, mekanik davranışları ve durum değerlendirmesi için kullanılan teknikler incelenmiştir.

#### 3.1 Yığma Yapılar

Yığma yapı tekniği bugün bile halen kullanılan en eski yapı tekniğidir. Daha çok tarihi camiler, kervansaraylar, kiliseler, sinagoglar, türbeler olarak karşımıza çıkmakta ve Anadolu'da yaygın şekilde kullanılmıştır.

Yığma yapının en önemli özelliklerinden birisi onun yapım tekniği açısından basit olmasıdır. Diğer özellikler olarak, sağlamlık, dayanıklılık, çok yönlülük, ses emmesi ve estetiğidir (Lourenço, 1996).

Yığma yapıların avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Yığma yapıların avantajları aşağıda listelenmektedir:

- Yığma malzemenin kullanımı bir binanın termal kütleini arttırabilmektedir.
- Yığma binalar ısıya karşı dirençli olduğundan, yangınlara karşı koruma sağlamaktadır.
- Yığma yapının beş yüzyıldan fazla olan bina ömrü yüz otuz yıl olan çelik yapı veya güçlendirilmiş betonarmeye göre avantaj sağlamaktadır.

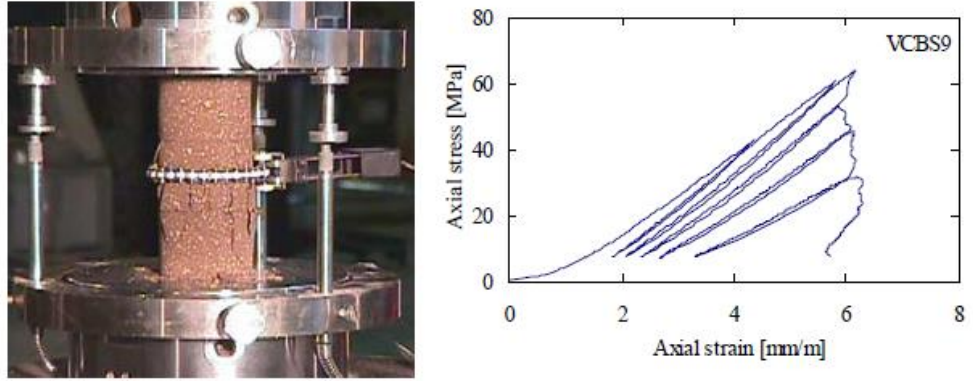
Yığma yapıların dezavantajları aşağıda listelenmektedir:

- Olumsuz hava koşullarında (özellikle don olaylarında) duvar yüzeyleri zarar görmektedir.
- Yığma yapılar çökme ve çatlamalara karşı güçlü temeller üzerine inşa edilmelidir (Hendry et al., 2004).

### 3.2 Yığma Yapıların Malzeme Özellikleri

Yığma yapılar harçlı olup tuğla, taş, kerpiç ve düzensiz taşlar gibi birimleri bulunmaktadır (Lourenço, 2002). Harçlar yığma yapılarda boşlukları doldurarak, taş ve tuğla gibi yapı malzemelerini bir arada davranmasını sağlar. Yığma yapılarda kullanılan harcın temel işlevi yapıyı oluşturan malzemeleri birbirine bağlanmasını sağlamaktır. Ayrıca, harçlar yapı elemanları üzerindeki yükleri dağıtmaya yardımcı olur ve dış etkilere karşı yapıyı korur (Satongar, 1994). Harç yapı malzemesi olarak tuğla ve kerpiç kullanımı ile ortaya çıkmıştır. Romalılar döneminde kireç harcı ilk defa kullanılmaya başlanmıştır. Selçuklu ve Osmanlılarda ise horasan harcı kullanılmıştır (Saraç, 2003).

Tuğla, kilin yüksek sıcaklık altında pişirilmesi ile elde edilen yapı malzemesidir. Romalılar döneminden beri kullanıldığı bilinmektedir (Yılmaz, 2006). Tuğlaların çekme gerilmesi ve elastisite modülleri düşüktür. Ayrıca, ucuz olması ve kolay üretilmeleri nedeniyle kullanımı yaygındır. Aşağıda tuğlaya ait silindirik basınç deneyi ve gerilme-şekil değiştirme diyagramı verilmektedir. (Şekil 3.1)



Şekil 3.1 Silindirik tuğlanın çevrimli basınç deneyi ve tipik gerilme-şekil değiştirme diyagramı (Lourenço, 2004).

Yığma yapılarda kullanılan malzemelerin özellikleri kapsamında dolu harman tuğlasının basınç dayanımı Tablo 3.1'de, tuğlanın ortalama mekanik özellikleri Tablo 3.2'de ve taşın ortalama mekanik özellikleri Tablo 3.3'te gösterilmektedir.

Tablo 3.1 TS 771-1'e göre dolu harman tuğlası basınç dayanımı.

Dolu Harman Tuğlası	Ortalama Basınç Dayanımı (en az) N/mm <sup>2</sup>	Basınç Dayanımı (en az) N/mm <sup>2</sup>
Orta Dayanımlı	5	4
Az Dayanımlı	3	2,5

Tablo 3.2 Tuğlanın ortalama mekanik özellikleri (Yılmaz, 2006).

Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
10 – 30	2,7 – 5	10 – 20	150 – 300

Yığma yapılarda taş kullanımı eski çağlardan beri yaygındır. Taşları moloz, kaba, ince ve kesme taş olarak kabaca sınıflamak mümkündür. Taşın basınç dayanımı yüksek olmasına rağmen çekme dayanımı düşüktür. Bu nedenle kemer, tonoz, kubbe ve sütunlarda çekme gerilmesi almaksızın kullanılır. Taşın dayanıklı olmasını sağlayan en önemli özelliklerden biri yapısının sızdırmaz ve boşluksuz olma özelliğidir (Dabanlı, 2008).

Tablo 3.3 Doğal taşların ortalama mekanik özellikleri (Yılmaz, 2006).

Taşın Cinsi	Basınç Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Granit	30 - 70	14 - 33	4 – 7	$30 \times 10^3 - 55 \times 10^3$
Mermer	25 - 65	9 - 45	1 - 15	$25 \times 10^3 - 70 \times 10^3$
Kireç Taşı	18 - 35	6 - 20	2 – 6	$10 \times 10^3 - 55 \times 10^3$
Kumtaşı	5 - 30	2 - 10	2 – 4	$13 \times 10^3 - 50 \times 10^3$
Kuvars	10 - 30	3 - 10	3 – 4	$15 \times 10^3 - 55 \times 10^3$
Serpantin	7 - 30	2 - 10	6 - 11	$23 \times 10^3 - 45 \times 10^3$

Ahşap, doğada yaygın olarak bulunan bir malzeme olmasına rağmen kısa ömürlü bir malzemedir (Gedik, 2008). Ahşabın basınç ve çekme dayanımı yüksektir. Buna göre, tarihi yığma yapılarında, konut yapılarında ve mimari detaylarda döşeme ve bağlama elemanları olarak kullanılmıştır (Yılmaz, 2006).

Yığma yapılarda yük taşıma kapasitesine etkisi olan özellikler basınç dayanımı, kayma dayanımı, dayanıklılık, ısıl genişleme, su emme katsayısı ve harçtır (Ünay, 2002).

Yığma yapılar anizotropik, gevrek ve homojen olmadığından beklenenden daha fazla karmaşıklığa sahiptir. Bunun dışında, yığma yapılar basınç açısından

çok güçlü, gerilmeler yönünden zayıftır (Gedik, 2008). Yığma yapıların, çekme dayanımı, basınç dayanımı ve kayma dayanımı olarak üç farklı kırılma modu bulunmaktadır.

### 3.3. Yığma Yapıların Mekanik Özellikleri

Yapı elemanlarının temel gereksinimlerinden biri onların dayanımı ve sertlikleridir. Malzeme özellikleri, malzemenin dayanabileceği gerilme sınırını ve deformasyondan önce uygulanabilecek gerilme miktarını belirler. Malzemelerin yükleme durumlarına göre dayanım ve sertlikleri değişir. Yığma yapılarda gerilmeler basınç, çekme ve kayma gerilmelerinden oluşur. Genellikle deformasyonlar sabit oranda artmaz. Bu nedenle, yığma yapı elemanlarında gerilme ve sertlik deformasyon oranına göre değişmektedir.

#### 3.3.1 Yığma Yapılarda Basınç Dayanımı

Yığma yapı elemanları kompozit malzemeden oluşan malzemelerdir. Yığma yapının basınç dayanımını elemanın geometrisi, çeşidi, şekli, dayanımı, su emme kapasitesi, harç karışım oranı, nem içeriği ve bozulma davranışı etkiler.

Yığma yapılar geleneksel yapı formlarından dolayı basınç altında çalışmaktadır. Basınç dayanımı yapıyı oluşturan birim elemanı test edilerek belirlenir (Saygılı, 2014). Harç, tuğla ve taşa göre daha yumuşak-sünek malzeme olduğu için yanal olarak daha fazla genişler, çünkü bu malzemeler farklı elastik karakterlere sahiptir (Gedik, 2008). Bununla birlikte, tuğla gibi malzemelerin basınç dayanımı birim elemanın basınç dayanımına çok yakındır. Daha sert ve daha düzensiz malzeme olan taş, genellikle birim elemanı olarak kullanılır. Yığma yapılarda basınç dayanımı, yapıyı birbirine bağlayan harcın türü ve kalınlığına bağlı olduğundan, bu durum yapının genel basınç dayanımını azaltmaktadır (Ünay, 2002).

Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzuna göre yığma yapılarda yeniden inşa halinde yapı malzemelerin asgari basınç dayanımları Çizelge 3.4’de sunulmaktadır. Bu tablodaki basınç dayanımları karakteristik basınç dayanımları olarak esas alınmıştır. “ $f_k = f_{ort} - 1,28 \times \sigma$ ” formülü ile hesaplanmaktadır.  $f_k$  karakteristik basınç dayanımı,  $f_{ort}$  ortalama basınç dayanımı ve  $\sigma$  standart sapmayı ifade etmektedir.

Tablo 3.4 Duvardaki gerilme düzeyine bağlı olarak kullanılacak malzemenin minimum basınç dayanımı (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, 2018).

Malzeme	Düşey Yük Altındaki Gerilme Düzeyi $\leq 0,5$ MPa	Düşey Yük Altındaki Gerilme Düzeyi $> 0,5$ MPa
Tuğla Basınç Dayanımı	$>5$ MPa	7,5 MPa
Taş Basınç Dayanımı	$>10$ MPa	20 MPa
Harç Basınç Dayanımı	2 MPa	3 MPa

### 3.3.2 Yığma Yapılarda Çekme Dayanımı

Yığma yapı elemanı oldukça kırılğan bir malzemedir ve genellikle yüksek ani çekme kırılma riskini taşır. Özellikle, tarihi duvar yapılarında kubbe, kemer ve tonoz gibi yapıyı taşıyan elemanlarında çekme gerilmelerinin ortaya çıkması daha olasıdır (Gedik, 2008). Duvar ve kolon elemanlardaki kayma gerilmeleri nedeniyle diagonal çekme gerilmeleri meydana gelir. Nem ve sıcaklık değişimlerinden dolayı, uzama ve kısalma gibi deformasyonlar da önemli çekme gerilmelerine neden olur.

Yığma yapı elemanlarının daha pratik kullanımı göz önüne alındığında, eğilmede çekme deneyi bağlı çekme gerilmeleri, aksel gerilmelerden daha önemlidir. Çünkü tarihi binalarda, aksel çekme gerilmelerinden doğrudan etkilenen elemanlara nadiren rastlanmaktadır. Araştırmalar, duvar binasının elemanlarında eğilme nedeniyle meydana gelen çekme kuvvetinin, birim elemanın nem içeriği, harcın yoğunluğu ve birim eleman yüzey dokusuyla doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Harcın kalınlığının fazla olması daha fazla sağlamlık sağladığından, malzemenin çekme gerilme dayanımı artırır (Ünay, 2002).

### 3.3.3 Yığma Yapılarda Kayma Dayanımı

Yığma yapı elemanlarının kayma gerilimi, harç ve yapı birim elemanı arasındaki bağlantıya bağlıdır (Gedik, 2008). Birim eleman ile harç arasındaki mekanizma tam olarak anlaşılmamasına rağmen, her ikisi de yapıyı oluşturan elemanların fiziksel ve kimyasal özelliklerinden etkilenir. Basınç ve çekme gerilme kırılmalarına ek olarak, yapısal elemanlar genellikle kaymadan dolayı çökme tehlikesi altındadır (Ünay, 2002).

### 3.4 Durum Değerlendirmesi

Tarihi yığma yapıların, yapı elemanları ile birleşim yerlerinin heterojen malzemeler olduğu bilinmektedir. Yapıların analizi malzeme özelliklerine bağlı olarak geręekleştirilmelidir. Bununla birlikte, kültürel varlığımız olan tarihi yapıların yenilenemez kaynaklar olduğu dikkate alındığında, onların üzerinde geręekleştirilen testlerde çok dikkatli olunmalıdır. Yapıların durum değerlendirmesi için üç temel yaklaşım bulunmaktadır:

- Tahribatlı Test Metotları
- Tahribatsız Test Metotları
- Sahada Uygulanan Test Metotları

#### 3.4.1 Tahribatlı Test Metotları

Tahribatlı test metotları laboratuvar ortamında yapının bir örneği oluşturularak geręekleştirilir. Numuneler olası en düşük hasarları almalıdır. Ek olarak, numunelerin sayısı mümkün olduğunca az olmalıdır (Gedik, 2008). Testin amacı, tarihi yığma yapıların kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek, bozulma sınırı ve dayanıklılığını bulmaktır (Şen, 2006).

#### 3.4.2 Tahribatsız Test Metotları

Tahribatsız test yöntemleri yapıların direkt olarak dayanım ve rijitliğini elde edemezler. Bu nedenle, tahribatsız muayene yöntemleri ile yığma yapıların fiziksel özellikleri arasında nadiren bir ilişki vardır (Şen, 2006). Kızılötesi termografi, tomografik görüntüleme, ultrasonik hız testi, yüzey radarı, sertlik çekici, metal konumu, gerilme dalgası iletimi ve darbe eco yığma yapılarda uygulanan tahribatsız test yöntemlerinden bazılarıdır (Şen, 2006).

**Kızılötesi Termografi Testi:** Kızılötesi termografi testi, yapıların boşluk, çatlak ve ıslak alanlarını bulmak için uygulanır. Bu test geniş alanlarda, araştırılması zor yerlerde veya temas ettiğimizde zarar verebilen alanlarda kullanılır (Usamentiaga et al., 2014).

**Tomografik Görüntüleme:** Ultrasonik gerilme dalgası hızı ölçümleriyle boşluklar, çatlaklar ve bozulmalar gibi iç özellikleri belirlemek için kullanılır (Saygılı, 2014).

Ultrasonik Hız ve Sonik Hız Testi: Bu test boşlukları ve zarar görmüş alanları bulmak için kullanılır (Şen, 2006).

Yüzeysel Radar Testi: Bu test duvarlardaki bozulmaları, yüksek tuz içeren boşlukları ve nem alan yerleri enerji dalgaları kullanarak tespit eder (Şen, 2006).

Sertlik Çekici: Bu teknik, duvar yapılarındaki farklılıkları ve duvarın basınç dayanımını belirler (Saygılı, 2014).

Metal Konumu: Yığma yapılara yerleştirilen masif taş yapı ve boşluklar gerilme dalgası iletimi ile belirlenir (Şen, 2006).

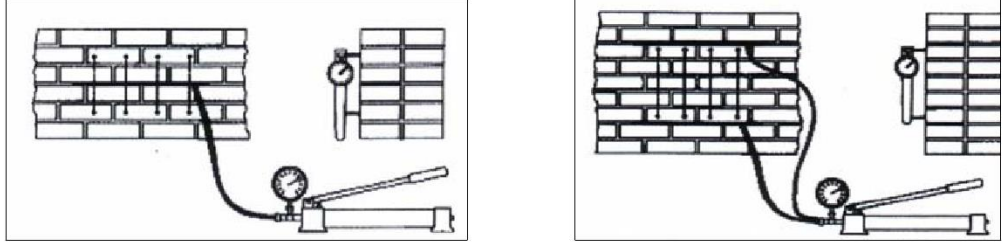
Gerilme Dalgası İletimi: Yığma yapı ve boşluklardaki tehlikeler gerilme dalgası iletimi ile belirlenir (Şen, 2006).

Darbe Eko: Duvar yapılarındaki dalgalanmaları dalga yankıları ile tanımlamak için kullanılan bu teknik, farklı çatlakların derinliğini bulmak ve moloz taş üzerindeki morfolojiyi karakterize etmek için uygulanmaktadır (Saygılı, 2014).

### **3.4.3 Sahada Yapılan Test Metotları**

Yerinde test yöntemleri olarak bilinen bu test yöntemleri, tahribatlı test yöntemleri yerine kullanılmaktadır. Doğrudan tahribatsız test yöntemlerinin kullanılmadığı yerlerde mühendislik özellikleri hakkında bilgi verir. Bu test, durum değerlendirmesi için makul sonuçlar verebilir. Flat-jack metodu, dinamik görüntüleme, pull-out (darbe) testi, termografi testi ve ses (sonic) testleri bu test metodu içinde yer almaktadır (Teomete, 2004).

Flat-jack Metodu: Bu test yöntemi, dikey sıkıştırma gerilmesinin büyüklüğünün, sıkıştırmaya maruz kalan duvar gerilmesinin ve yerinde sıkıştırma tepkisinin ölçülmesini içerir (Şen, 2006). Bu test ile yapının gerilme seviyesi ile elastisite modülü tespit edilir (Crocì, 1998).



Şekil 3.2 Tek plak ve çift plak ile ölçüm (Aköz, 2005).

**Dinamik Görüntüleme:** Bu test yöntemi, yapılarıdaki doğal titreşimleri, binanın şekil modlarını ve modsal frekanslarını ve duvar duvarlarının mekanik davranışını tespit eder (Binda et al., 2000).

**Pull-out (darbe) testi:** Bu test yöntemi yapı elemanlarının gerilme ve kayma dayanımlarını elde etmek için yapılır (Crocì, 1998).

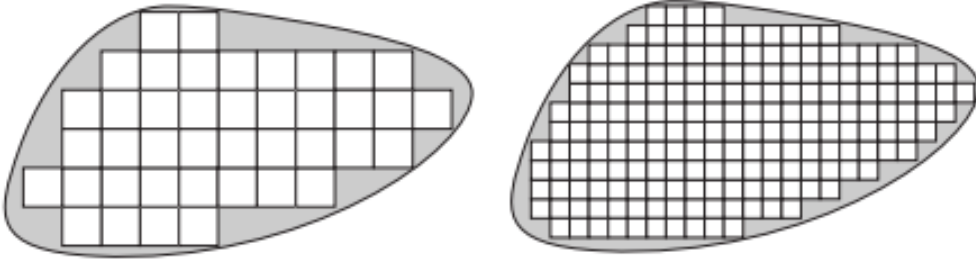
**Termografi Testi:** Termografi test yöntemi kullanılarak farklı malzemelerin varlığı, boşluklar, nem, su varlığı ve ısıtma sistemi araştırılır (Binda et al., 2000).

**Sonik (ses) testi:** Boşluklar ve yapı elemanlarında çatlaklar, duvar ve morfolojisine enjeksiyon tekniği ses testleri kullanmak suretiyle elde edilebilir (Binda et al., 2000).

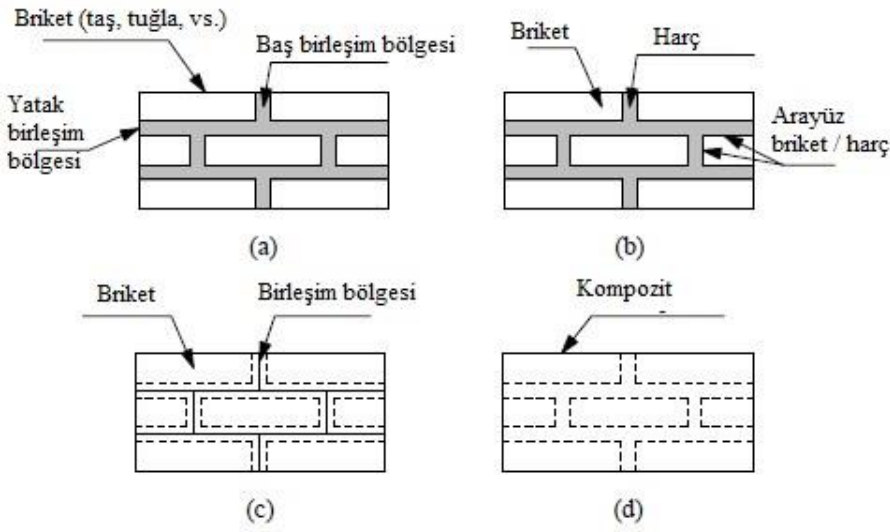
### 3.5 Yığma Yapılarda Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar yöntemi mühendislik problemleri için geliştirilmiş sayısal bir tekniktir. Bu teknik problemler havacılık, otomotiv, inşaat ve köprü yapılarındaki gibi deformasyon ve gerilme analizlerini içermektedir. Bu işlemlerin çoğu kısmi diferansiyel denklemler kullanılarak ifade edilir. Sonlu elemanlar yöntemi bir yapıyı çeşitli elemanlara böler. Daha sonra düğümler, elemanları bir arada tutan tutkallar gibi birbirine bağlanır. Bu işlem bir dizi eşzamanlı cebirsel denklemlerle sonuçlanır. Şekil 3.4'te gösterildiği gibi konu ile ilgili farklı uygulamalar bulunmaktadır.

Şekil 3.3'te bir sistemin farklı boyutlarda sonlu elemanlara bölünmüş hali görülmektedir.



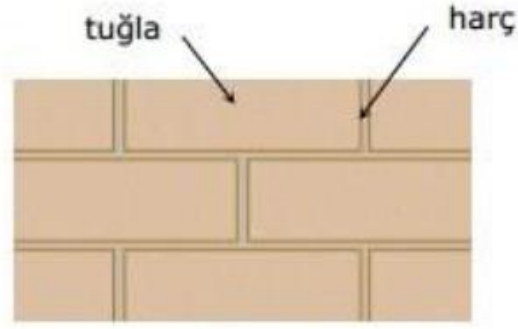
Şekil 3.3 Farklı boyutlarda sonlu elemanlarla tanımlanmış sistem (Hutton, 2004).



Şekil 3.4 Yığma yapıların modellenmesi, a) Yığma yapı, b) Detaylı mikro modelleme, c) Basitleştirilmiş mikro modelleme, d) Makro modelleme (Lourenço, 1996).

### 3.5.1 Mikro Modelleme

Heterojen modelleme olarak bilinen mikro modelleme, yığma yapıyı oluşturan malzemeleri ayrı ayrı dahil ederek modelleyen bir yöntemdir. Bu modelleme tekniğinde, tuğla, taş ve harç gibi birimler ayrı modellenmiştir. Buna ek olarak, bu elemanların ara yüz alanları modele dahil edilmiştir. Bu modelleme malzemelerinin ayrı ayrı değerlendirilmesini sağlar. Aşağıda şekil 3.5'te model gösterilmektedir.



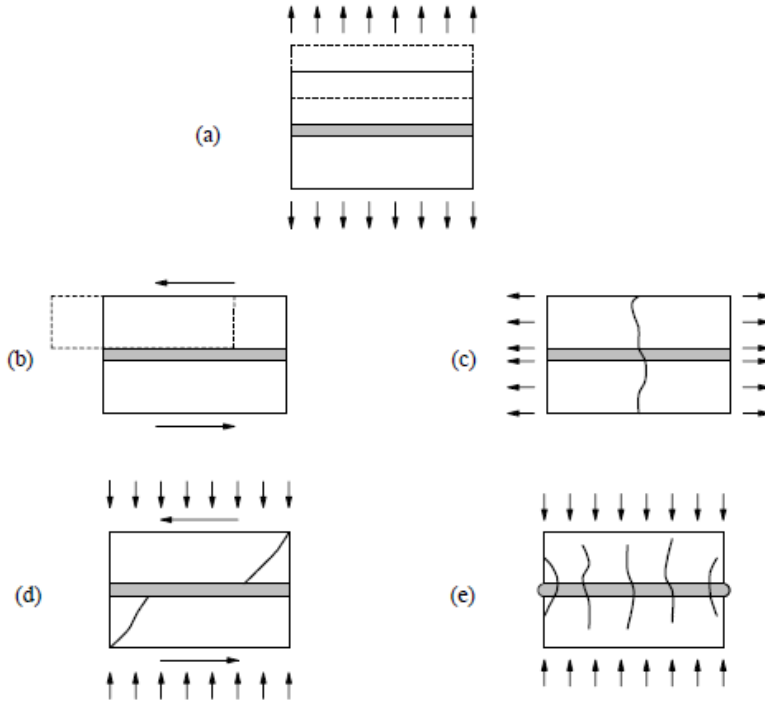
Şekil 3.5 Mikro modelleme (Lourenço, 1996).

Lourenço'un mikro model yönteminde yığma yapının modellenmesinde göçme mekanizmasının tayini en önemli faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

Laourenço göçme mekanizmasını:

- Bağlantıların çatlaması,
- Düşük normal gerilme değerlerinde bağlantılarda kayma,
- Direk çekme gerilmesinde birim ünitelerde çatlama,
- Bağlantılarda sürtünme yaratacak seviyedeki normal gerilme altında, birim ünitelerde diyagonal çekme çatlakları,
- Yüksek normal gerilme altında harç dilatasyonu yüzünden çekme etkisindeki birimlerin ayrılması (Aktaş ve Teomete, 2004).

Yukarıda verilen bu beş madde ile ilgili görseller Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.6 Kırılma mekanizması a) Bağlantı çekme çatlaklığı, b) Bağlantı kayması, c) Birim direk çekme çatlama, d) Birim diyagonal çekme çatlaklığı, e) Yığılma ezilmesi (Lourenço, 1996).

Ek olarak tüm hasar, zayıf bağlantı noktalarında ve potansiyel olarak her birimin ortasına dikey olarak yerleştirilmiş birimlerdeki gerilme çatlaklarında yoğunlaşmıştır (Lourenço, 1996). Ara yüz elemanları, yapı birimlerindeki potansiyel çatlakları modellemek için kullanılır (Teomete, 2004).

Mikro modelleme ile çok sayıda uygulama yapılmıştır. Buluna test sonuçları birbirine çok yakındır. Testler hakkında detaylı bilgi, mikro modelleme ile alınabilir (Lourenço, 1996).

Berto vd. (2005), yığılma yapı prizmalarının davranışlarını aksenal basınç altında mikro modelleme yöntemi ile incelemiştir. Böylece, harç, güçlü tuğla ve güçlü harcın özellikleri ortaya konmuştur.

Mandilora vd. (2012), mikro modelleme yaklaşım ile yatay derz harcını kafes giriş elemanları ile geliştirmiştir.

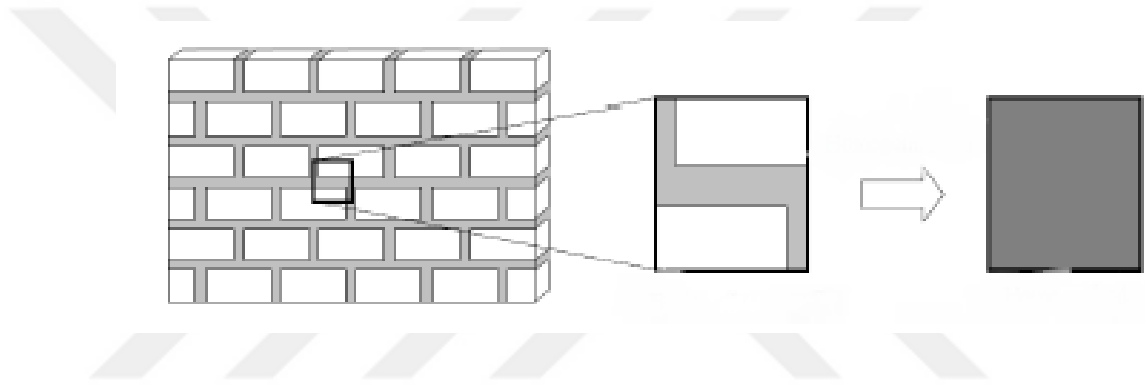
Sattar (2013), duvar elemanlarını yatay elemanlarda yatay derzleri ve dikey elemanlarda harçlı düşey derzlerini mikro modelleme yöntemi ile gözlemlemiştir.

### 3.5.2 Makro Modelleme

Makro modelleme büyük yapılar için tasarlanmış bir yöntem olup mikro veya mezo modellemenin oldukça zor olduğu bu tarz yapılar için gerçeğe yakın değerler veren bir modelleme biçimidir. Büyük yapılarda bilgisayar ortamında kullanılan eleman ve düşünüm noktası göz önüne alındığında bu yöntem hem pratik hem de daha kolay bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu yöntemde yapı homojenize edilerek harç ve yapı elemanları (taş, tuğla vb.) belli bir idealleştirme ile malzeme değerleri kullanılır (Ercan, 2010).

Şekil 3.7’de malzemenin homojenize edilmesi görülmektedir.



Şekil 3.7 Malzemenin homojenize edilmesi (Doğan, 2016).

Tablo 3.5’te makro ve mikro modellerin karşılaştırması yapılmıştır (Ercan, 2010).

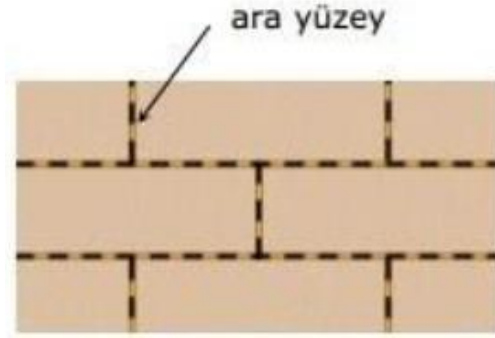
Tablo 3.5 Mikro ve makro modelin kıyaslanması (Ercan, 2010).

Kriter	Mikro Model	Makro Model
Süre- maliyet	Yüksek	Düşük
Kullanım yeri	Laboratuvar boyutlu	Büyük boyutlu
Hassasiyet	Çok	Az
Modelin oluşturulması	Zor	Kolay
Sonuçların detayları	Detaylı	Az detaylı
Kırılma mekanizması	Detaylı	Az detaylı
Yükleme	Statik	Dinamik

### 3.5.3 Mezo (Basitleştirilmiş Mikro) Modelleme

Bu modelleme biçiminde yapıyı oluşturan elemanlara ara yüzeyde bulunan harç kalınlığının yarısı eşit olarak eklenerek, harç tabakası ayrıca hesaplanmaz. Harcın olduğu alan ile yapıyı oluşturan elemanlar arasında bir ara yüz

oluşturulmuş olur. Yapının alacağı hasarların oluşan bu ara yüzde olacağı öngörüsüne göre hesaplamalar yapılır. (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Basitleştirilmiş mikro modelleme (Lourenço, 1996).

### 3.6 Yığma Yapıların Analizi

Yığma yapılar yapı tekniği gereği kullanılan malzemeler (taş, mermer vb.) dikkate alındığında basınca karşı çok iyi derecede mukavemet gösterirken yapı bağlantı yerleri olan harç malzemesinin karakteristik özelliği gereği çekme altında zayıf davranış gösterirler. Yığma yapı analizleri yapılırken taşıyıcıların gerilme değerleri, kırılma mekanizması ve deplasmanları hesaplanır.

Yığma yapı analizleri hesaplanırken binanın inşa edilmiş olduğu bölgenin zemin cinsi, deprem sınıfı, yığmayı oluşturan malzemelerin mekanik ve dinamik özelliklerinin tespit edilmesi önemlidir.

#### 3.6.1 Yüklerin Belirlenmesi

Yığma yapıların hesabında kullanılan yük tipleri klasik betonarme yapı değerlendirilirken göz önüne alınan yükler ile uyumlu olup aşağıda sıralı şekilde verilmektedir.

- Ölü yükler (Yapının kendi ağırlığından kaynaklanan yükler),
- Hareketli yükler (İnsan yükü, çalışan bir makine yükü vb),
- Deprem yükü
- Kar yükü (Çatılarda dikkate alınır),

- Rüzgâr yükü (Narin yapılarda),
- Sıcaklık farkı (Gece-gündüz arasında sıcaklık farkının fazla olduğu bölgelerde),
- Oturma (Zemin ve temel özelliklerine bağlı yükler).

### 3.6.2 Analiz Yöntemleri

Yığma yapı analizi yapılırken 3 çeşit analiz hesabından faydalanılmaktadır. Sırasıyla, doğrusal (lineer analiz), doğrusal olmayan (non-lineer analiz) ve plastik analiz yöntemleri bulunmaktadır (Çatal, 2014).

**Doğrusal Analiz (Lineer Analiz):** Binada meydana gelen şekil değiştirmenin elastik bölge sınırı içinde olduğu varsayımı yapılır. Bu analizde bina hasarının kalıcı olmadığı kabulünde bulunulur. Limit koşullar incelenerek binayı oluşturan malzemenin lineer-elastik alandaki mekanik özellikler ile sınır gerilme değerleri dikkate alınarak gerilme-şekil değiştirme diyagramları bulunur.

**Doğrusal Olmayan Analiz (non-lineer analiz):** Binada meydana gelen tüm hasar ve gerilmelerin başlangıç durumundan göçme haline kadar incelendiği durumdur. Yapıda elastik bölge sınırı sonrası meydana gelen geri döndürülemez hasarlar da dikkate alınır. Binayı oluşturan elementin elastik ve elastik olmayan değerleri veri olarak ve gerilme-şekil değiştirme diyagramı ile göçme hali bulunur.

**Plastik Analiz:** Bu analizde yapının plastik tarzda davrandığı öngörüsü yapılır. Plastik davranış biçiminde yapıda oluşan hasar kalıcıdır. Kırılma sünek değildir. Plastik mafsal hipotezi esas alınmıştır. Binayı oluşturan elementin dayanım değerlerine göre yalnızca göçme hali ile ilgili veri alınır. Binanın yük altında herhangi bir şekil değiştirmeye uğramadığı tezine göre analiz tamamlanır.

#### **3.6.2.1 Düşey Yükler Altında Yapıya Etkiyen Kuvvetlerin Bulunması**

Binaların analizleri iki yükün etkisi dikkate alınarak yapılır. Yapının kendi ağırlığını da içeren kar yükü gibi ivmesi değişiklik arz etmeyen yüklerin dikkate alınması sonucunda, yapıda muhtemel oluşacak yer değiştirme ve gerilme durumlarının hesaplandığı analiz statik (durağan) analiz olarak adlandırılmaktadır.

Statik analizlerde yapının dikkate alınacak kadar hasar almaması, daha önceden yapıda deformasyon yoksa yapının kendi ağırlığını taşımasından kaynaklanır. Fakat, yapıların kendi ağırlığının taşıdığı kabul edilse bile bu analizin yapılması gerekliliktir.

### **3.6.2.2 Dinamik Yük Etkisi Altında Yapıya Etkiyen Kuvvetlerin Bulunması**

Dinamik analiz hesabında yapıya ait tüm düğüm noktalarının yer değiştirmesi (deplasman) ile her bir elemanın kuvvetleri bulunmaktadır. Deprem analizi yapılırken iki farklı yöntemden faydalanılır. (Şekil 4.2) İlki olan zaman tanım alanı analizinde daha önce gerçekleşmiş gerçek deprem kayıtları uygulanırken, diğeri olan davranış spektrum analizinde tasarıma esas değerler kullanılarak yapıya etkiyen kuvvetler hesaplanır.



Şekil 3.9 Deprem analizi.

Zaman tanım alanı doğrusal elastik rijitlik matrisi ile viskoz sönüm matrisi yöntemi ile binanın çok serbestlik dereceli sistem olarak doğrusal dinamik analizi yapılır. Meydana gelmiş olan depremin, deprem ivmesinin zamana bağlı değişimi tasarlanan yapı verisine aktarılır. Doğrusal elastik yöntem kullanılarak sisteme ait diferansiyel hareket denklemi aşama aşama analiz edilerek depreme maruz kalan yapının sistemin iç kuvvetleri ve yer değişimleri hesaplanır. Bu yöntemde, yapıda oluşmuş yüksek mod etkileri dikkate alınmış olur.

Zaman tanım alanı yönteminde depremin tersinir etkisi hesaplanan dinamik analizlerde göz önüne alınır. Bu yöntem yapının doğrusal ve doğrusal gibi

davranış gösterdiği varsayımını esas alarak hesapladığı için, zaman tanım alanında sistem verileri doğrusal özellik varsayımları için geçerlidir. Mevcut yönetmelikler ve ekonomik koşullar da dikkate alındığında binaların orta şiddetteki depremlerde belirli seviyede hasar alması makul karşılandığından, doğrusal dinamik analiz yöntemi yapılarıdaki deprem analizlerinde kısmi yer işgal etmektedir. Bundan dolayı, zaman tanım alanında hesap yapılırken doğrusal olmayan dinamik yöntemlerin de dikkate alınması gerekmektedir.

Binanın doğrusal olmayan özellikleri, doğrusal olmayan dinamik analiz yapılırken zaman tanım alanının bir verişi olarak değerlendirilir. Bu analizin en önemli özelliği, diğer yöntemlere göre hata oranının çok düşük seviyelerde olmasıdır. Bunun en önemli sebebi yer hareket kayıtları ve yapının detaylı modelinin kullanılmasıdır (Fahjan vd., 2011).

Zaman tanım alanında analiz yapılırken uygun sismik verilerin dikkate alınması ve ölçeklenmesi, doğrusal elastik veya doğrusal olmayan elastik analizlerin değerlendirilmesindeki en önemli koşullardan biridir. Deprem kayıtlarının elde edilmesinde gerçek depremler, yapay depremler ve benzeştirilmiş (simüle edilmiş) olmak üzere üç farklı kaynak kullanılabilir. Ölçeklenme işlemi yapılırken, deprem kayıtlarının geçerli yönetmeliklerdeki şartlara uyması ve yapının oturacağı zemin özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Meydana gelen depremlerin veri kayıtlarının ivme spektrumuna paralel olarak ölçeklenmesi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler, frekans tanım alanı yöntemleri ile zaman tanım alanı yöntemleridir. Zaman tanım alanında ölçeklendirme yapılırken alınmış kaydın sadece genliği revize edilirken kaydın frekans değerlerinde herhangi bir değişiklik yapılmaz. Zemin türlerine göre kayıtların davranış spektrumları ayrı ayrı kategorize edilir ve yapının bağlı olduğu zemin cinsinin tasarım spektrum değerleri göz önüne alınarak aşağıda verilen Denklem 4.1'e göre kayda ait  $\alpha$  ölçeklenme katsayısı elde edilir. (Demir vd., 2011).

$$\alpha = \frac{\sum_{T=T_A}^{T_B} (S_a^{gerçek}(T) S_a^{hedef}(T))}{\sum_{T=T_A}^{T_B} (S_a^{gerçek}(T))^2}$$

Denklem 4.1

$S_a^{\text{hedef}}$ : Hedef ivme davranış spektrumu,

$S_a^{\text{gerçek}}$ : Kullanılacak gerçek deprem kaydının ivme spektrumu,

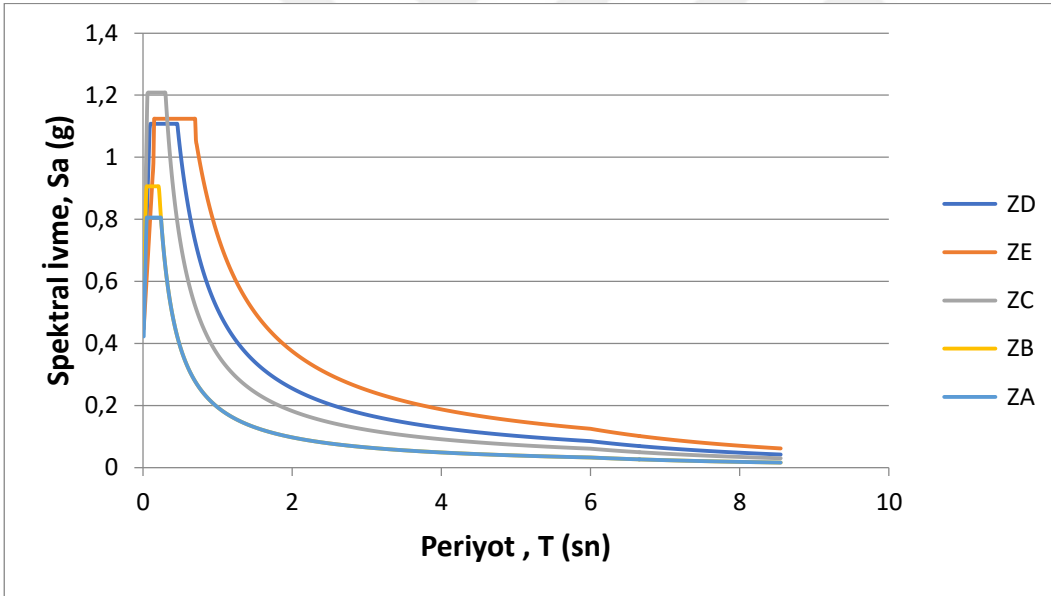
$\alpha$ : Doğrusal ölçekleme katsayısı,

T: Salınım periyodu,

$T_A$ : Ölçeklemenin yapılacağı periyod aralığının alt sınırı,

$T_B$ : Ölçeklemenin yapılacağı periyod aralığının üst sınırı,

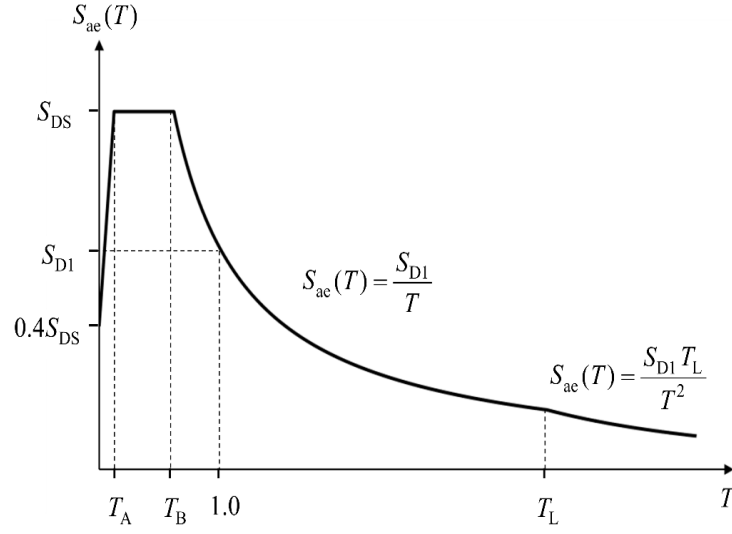
Zaman tanım alanında, bina önem katsayısı ve yerel zemin grubu cinslerinin her biri için ayrı ayrı ölçeklendirilmemiş davranış spektrum deprem bölgesinin ölçeklendirmesi yapılır.



Şekil 3.10 Zemin sınıflarına göre İsabey Cami alanı ivme spektrumları.

Davranış spektrumu analizi yöntemi ise bina sisteminin eleman kuvvetleri ve deplasmanının deprem analizi hesabında avantajları bulunmaktadır. Bu analiz metodunda ortalama deprem hareketlerinin ortalaması olarak düzgün tasarım spektrumları her bir mod için ayrı ayrı kullanılmasıdır. Bu modlar, deplasman ve eleman kuvvetlerinin en büyük değerlerini ihtiva etmektedir.

Tasarım spektrumları, çeşitli depremler için kullanılmak üzere meydana getirilmişlerdir.



Şekil 3.11 Tasarım ivme spektrumu (TBDY, 2018).

Modlara ait azami davranış değeri, ilgili davranış spektrumu eğrisinde modal periyotlara denk gelen ordinat değeri olarak baz alınabilir.

Modal davranış büyüklerinin mutlak değerlerinin toplamı olan (ABS) bir binada meydana gelebilecek azami kuvvet veya deplasman büyüklüklerini bulabilmek için tercih edilen en verimli en doğru yöntemlerden birisidir. Bu metot, bütün modlarda maximum mod değerlerinin aynı anda meydana geldiği varsayımı üzerine kurulmuştur.

Başka bir yöntem olan, maksimum mod değerlerinin karelerinin toplamının karekökünü kullanılarak da deplasman veya kuvvetlerin değerleri hesap edilmeye çalışılır. SRSS yönteminde meydana gelen tüm mod değerlerinin statik olarak bağımsız oldukları varsayımı yapılır. Bu yöntemin henüz üç boyutlu yapılarda verimli olduğu ispat edilmemiş olsa da, özellikle kule tipi gibi iki periyodu arasında bariz farklar bulunmayan yapıların dinamik analizinde SRSS yöntemi verimli sonuçlar vermektedir.

Serbest titreşim frekansları yakın olan yapılarda tam kare birleştirme metodu (CQC) da tercih edilmektedir.

### 3.6.3 Analiz Sonucu Değerlendirme

Yapılara ait analitik değerlendirme ve hesap yöntemlerinde malzeme özellikleri ve sınırlar şartları belli başlı kabullere dayanmaktadır. Haliyle, bu kabullerin sonucunda gerçek yapı davranışı ile analitik değerlendirmeler arasında bazı önemli farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Dinamik verileri deneysel sonuçlarla ile değerlendirmek gerçek yapı davranışını ortaya çıkarmada daha güvenli sonuçlar vermektedir. Operasyonel model analiz ile deneysel analizler sonucu elde edilen analitik üzümlerin birlikte değerlendirilmesi yapı davranışını doğru belirleyebilmek için büyük önem taşımaktadır.



## 4. TARİHİ YAPILAR İÇİN DEPREM RİSKLERİNİN YÖNETİMİ KILAVUZU ÜZERİNE KISA BİR DEĞERLENDİRME

### 4.1 Giriş

Kültür Bakanlığı'na bağlı Vakıflar Genel Müdürlüğü'nün önderliğinde hazırlanan bu kılavuz, kültürel miras açısından oldukça zengin bir konumda olan ülkemizde bilimsel çalışmalara katkı vermesi, daha çok bir el kitabı mahiyetinde hazırlanmış olup tarihi yapılar ve kültür varlıklarımızla ilgilenen bilim insanlarına yardımcı olmak amacıyla ilk kez ortaya konan bir “temel başucu kitabı” şeklinde tasarlanmıştır.

Kılavuzun nihai hedeflerinden biri deprem riski tehlikesinin afet öncesi değerlendirme, riskleri düşürme, ön hazırlık, afet esnasında müdahale ve afet sonrası iyileştirmeler için bilimsel ve teknik yönden rehber olabilmektir. Kılavuz tamamen iyi niyet ve mevcut veriler doğrultusunda hazırlanmış, bundan sonraki süreçte varsa eksikliklerini gidererek, sürekli gelişim felsefesini ortaya koymaktadır. Toplamda iki yüz sayfayı aşan bu kılavuzun tamamının burada değerlendirilmesi mümkün olmamakla beraber daha çok temel kavramlar ve tez içeriğine yönelik konularla ilgili değerlendirme yapılacaktır.

Yöntem olarak temel belge kabul edilen 1964 tarihli Venedik Tüzüğü, 1965'te kurulan ICOMOS (Uluslararası Anıtlar ve Sitler Konseyi) ve 2003 tarihinde kabul edilen “Mimari Mirasın Analizi, Korunması ve Strüktürel Restorasyon İlkeleri” Tüzüğü esas alınmıştır. Tezin dördüncü bölümü tamamen kılavuz içeriği ile ilgili bilgiler içerdiğinden, bu bölümün ve alt bölümlerinde yer alan tüm bilgiler kılavuz içeriğinde yer alan bilgilerin özetlenmiş halidir.

### 4.2 Temel Tanım ve Kavramlar

#### 4.2.1 Kültür Varlığı

2863 sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Yasası 3. Madde 'de kültür varlığı;

“Tarih öncesi ve tarihi devirlere ait bilim, kültür, din ve güzel sanatlarla ilgili bulunan veya tarih öncesi ya da tarihi devirlerde sosyal yaşama konu olmuş bilimsel ve kültürel açıdan özgün değer taşıyan yer üstünde, yer altında veya su altındaki bütün taşınır ve taşınmaz varlıklardır.”

olarak tanımlanmıştır. Kanun maddesinde de görüleceği üzere buradaki temel atıf özgünlük kavramıdır.

#### **4.2.2 Basit Onarım**

Kılavuza göre basit onarım, yapıda deformasyona uğrayan mimari öğelerin (kapı, pencere vb.) özgününe sadık kalarak aynı malzeme ile yenilenmesi, iç ve dış sıvalar ile kaplamaların renk ve malzeme bütünlüğünün korunarak elden geçirilmesidir. Dikkat edilirse bu kavramın içinde taşıyıcı sistemi etkileyen herhangi bir öğeye değinilmemiştir.

#### **4.2.3 Esaslı Onarım**

Yapıda oluşan hasarlar basit onarım kapsamında giderilemiyorsa yine olabilecek minimum müdahale ile özgün dokuya bağlı kalarak yapı strüktüründe tamir, zorunlu hallerde yenileme, zemin iyileştirme, yapının tamamen yıkılmış bölümlerinin yeniden ayağa kaldırılması gibi kalıcı müdahaleler gerektiren bir kavramdır. Kültür varlıklarında zorunlu hallerde tercih edilmesi gereken bir yöntemdir.

### **4.3 Araştırma ve Bilgi Toplanması**

#### **4.3.1 Tarihsel Araştırma Yapılması**

Yapıların inşa edildikleri tarihten müdahale yapılacağı zaman kadar tüm aşamaların bilinmesi, kültürel varlıklarımızın korunması ve doğru müdahalelerin yapılmasında büyük önem taşımaktadır.

Kılavuza göre yapılara ait onarım tarihleri varsa belgelerin temin edilmesi, yapılış ve onarım kitabelerinin incelenmesi, arkeolog, haritacılık uzmanları, sanat ve mimarlık tarihçileri gibi tüm bilim dallarıyla ortak çalışmalar yapılması yapının tanımlanması ve doğru tespitlerin yapılmasında önemli yer tutmaktadır. Özellikle, deprem ve yangın sonrası gibi geçmişte yapılan onarımlar hakkında bilgi sahibi olunması restorasyon uygulamalarında büyük kolaylıklar sağlayacaktır.

### 4.3.2 Saha Çalışmaları ve Hasar Tespitlerinin Yapılması

Kılavuza göre tarihi yapıların restorasyonlarına başlanılmadan önce ilgili onay mercii olan Koruma Bölge Kurullarından içinde rölöve, restitüsyon ve restorasyon projeleri ve raporlarının bulunduğu ayrıntılı teknik çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmalar yapılırken yeterli fotoğraf albümü, detaylar için daha küçük ölçekli (1/10,1/20 gibi) çizimlerden faydalanılması ve yapıya ait tüm malzeme tanımlarının yapılması gerekmektedir. Dönem analizi, hasar analizi ve restorasyon müdahale paftası gibi ek çalışmalar yapıda gerçekleştirilecek restorasyon müdahaleleri konusunda daha doğru kararlar alınmasında faydalı olacaktır.

### 4.3.3 Zemin ve Deprem Açısından İrdeleme

Kılavuza göre deprensellik tektonik hareketlerin neden olduğu depremlerin bölgesel ve tarihsel olarak dağılımı ve tekrar oluşma ihtimali olarak tanımlanmıştır. Deprem riski ise, yapının bulunduğu bölgede daha önceden hesaplanmış deprem parametrelerin aşılma ihtimali olarak değerlendirilir. Deprem tehlikesinin tespiti amacıyla deterministik ve olasılıksal olmak üzere iki farklı analiz yaklaşımı bulunmaktadır:

Deterministik yaklaşımda, tarihi veriler dikkate alınmayıp sadece oluşabilecek en büyük deprem felaketine göre analizler yapılır.

Olasılıksal yaklaşımda, geçmişte meydana gelmiş depremlerin hem bölgesel ve hem de tarihsel seyri dikkate alınarak deprem risk analizleri yapılır.

Deprem riski analizleri, yapıda oluşması muhtemel deprem etkisinin basit parametreler yoluyla açıklanması sağlar. Böylelikle, her iki analiz sonucu deprem tehlikesi haritası oluşturulmuş olur. Ülkemizde her iki analize göre oluşturulan Deprem Bölgeleri Haritası her 50 yılda %10 aşılma riski bulunan maksimum yer ivmeleri göz önüne alınırken, yeni Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde bu yaklaşımdan vazgeçilerek herhangi bir bölgede oluşması muhtemel deprem tehlikesi hesap yöntemine göre 0,2 saniye ile 1,0 saniye periyotlarında % 5 sönüm oranına sahip elastik spektral ivme değerleri dikkate alınmaya başlamıştır.

Tarihi yapıların bulunduğu alanın zemin parametrelerinin bilinmesi, eserin maruz kalacağı deprem kuvvetlerinin belirlenmesinde önemli yer tutmaktadır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde yer alan zemin sınıflarına (ZA, ZB gibi) göre analizlerin yapılması gerekmektedir. Yine eserin bulunduğu zemin sınıfına göre sıvılaşma riski kontrol edilmelidir. Eğimli bölgelerde şev duraylılık analizlerinin yapılması ve zemin cinsinin doğru tespit edilmesi yerinde olacaktır.

#### **4.3.4 Saha ve Laboratuvar Deneyleri**

Tarihi eserlerin restorasyonunda, esere ait özgün malzeme biçimi ve niteliklerinin tespit edilmesinde laboratuvar ortamında yapılan çalışmalar büyük önem arz etmektedir. Esere ait özgün malzemeler ile kullanılacak yeni malzemelerin laboratuvar ortamında benzer özellikler göstermesi tarihi eserlerde hem özgünlüğü muhafaza etmekte yarar sağlamakta hem de eserde geri döndürülemez müdahalelerin engellenmesine yardımcı olmaktadır.

Saha deneyleri, tahribatsız (ultrases deneyi, nem ölçümü, sertlik ölçümü vb.) ve az tahribatlı (Flat-Jack, yerinde kayma deneyi vb.) deneyler olmak üzere ikiye ayrılmakta olup tez konusu içerisinde daha önce bahsedildiğinden burada ayrıca detaylandırılmayacaktır.

Laboratuvar deneyleri, restorasyon esnasında kullanılacak yapı elemanlarının fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin mevcut yapı ile benzer özellikler göstermesi için yapılması gereken deneylerdir. Mekanik deneyler olarak, doğal taş ve tuğlada basınç deneyi gibi deneyler yapılırken fiziksel deneyler kapsamında SEM (Scanning Electron Microscopy) incelemesi, petrografik analizler yapılmaktadır. Kimyasal deneyler olarak asit kaybı deneyi, puzolanik aktivite deneyleri, kızdırma kaybı deneyleri gibi yöntemler tarihi yapının malzeme özellikleri tespitinde büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

#### **4.4 Tarihi Yapılardaki Malzemeler ve Oluşan Hasarlar**

Tarihi eserlerde önceleri doğal taş, kerpiç, tuğla, harç ve demir gibi malzemeler kullanılırken son dönem yapılarında beton veya betonarme eserlere de rastlanmaktadır. Yapılarda kullanılan bu malzeme özellikleri ve uğradığı hasarlar kısaca özetlenmektedir.

#### 4.4.1 Taş

Doğal taşlar insanlık tarihinin kuruluşundan beri insanlar tarafından en sık ve yoğun şekilde kullanılan bir yapı malzemesidir. Bu tez çalışmasında önceki bölümlerde daha detaylı verildiğinden bu bölümde kılavuz içeriği olarak ele alınmıştır.

Taşları etkileyen özellikler arasında, boşluklu birim hacim ağırlık; yoğunluk ( $\beta$ ), Boşluksuz (dolu kısmın birim ağırlığı) birim hacim ağırlık; özgül ağırlık ( $\gamma$ ), doluluk oranı; kompozite ( $k$ ) gibi faktörler bulunmaktadır.

Doğal taş hasarları, çevreye ve doğal afetlere bağlı gelişen deformasyonlardır. Taşlarda en sık rastlanan hasarlar, yüzey kaybı, parça kopması, oyuklanma, çatlak, kavlama, yüzey kirliliği, kabuk oluşumu, çiçeklenme, şekerlenme, renk değişimi, aşınma, bakteri ve mantarlaşmaya bağlı deformasyonlardır.

#### 4.4.2 Kerpiç

Toprağın çamur hali olarak kullanılan kil zamanla içerisine başka malzemeler eklenmesi ile kerpiç halini almıştır. Saman ve yağlı toprak ile harmanlanmış hali en sık görülen şeklidir. Malzeme dayanım özelliği 1 Mpa civarlarında olmasına rağmen, ekonomik ve kolay üretilebilir olması nedeniyle tercih edilmektedir.

Kerpicin belli başlı hasarı kolay çatlaması, sulu ve nemli ortamlarda verimsiz oluşudur.

#### 4.4.3 Seramikler

Seramiklerin temel malzemesi kil olup, içeriğindeki kil miktarı ve pişirilme sıcaklığına göre seramik çeşitleri meydana gelir. Pişirme sıcaklığı arttıkça dayanımı artar.

#### 4.4.4 Tuğla

Kilin pişirilmesi ile oluşan yapı malzemesidir. Yine bu tez kapsamında daha önceki bölümlerde değinilmiştir. Boşluk oranı arttıkça dayanımı azalan tuğla, tarihi yapılarda duvar, kubbe, kemer, dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Doğal taş malzemesinde görülen benzer hasarlar bu yapı malzemesinde de gözlemlenmektedir.

#### 4.4.5 Harçlar

Harçlar, agrega malzemesinin bağlayıcı olan kireç, puzolan ve çimento gibi malzemelerin bir araya gelmesi sonucu oluşan kompozit malzemelerdir. Harçlar, taş ve tuğlaları bağlamasının yanı sıra sıva işlerinde ve son dönemde restorasyon uygulamalarında enjeksiyon malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Bağlayıcı olarak, asfalt bitüm ve zift gibi organik malzemelerin yanı sıra alçı, kireç, çimento ve son dönemlerde hidrolik kireç gibi inorganik kökenli malzemeler kullanılmaktadır. Harç malzemelerinin özelliklerini arttırmak için yumurta akı, kan, kesik süt, gübre ve kemik tutkalı gibi maddeler de kullanılmaktadır.

Harçlarda meydana gelen hasarlar genelde bağlayıcıları etkileyen faktörler olarak karşımıza çıkar. Örnek olarak, sertliği düşük sular, asitli sular, sülfatlı sular, klorürlü sular harç içindeki kirece zarar verirler.

Son yıllarda, enjeksiyon harcı malzemesinin kullanımı, hidrolik kirecin yaygınlaşması ile yapıda meydana gelen boşluk ve çatlakların giderilmesi ve yapı dayanımının artırılması için sıkça görülmektedir.

#### 4.4.6 Ahşap

Ahşap, kaynağı ağaç olan organik, lifli, heterojen ve anizotrop özellikler gösteren bir malzemedir. Yapılarda taşıyıcı sistem malzemesi olarak kullanılmasının yansısı kapı, pencere, tavan gibi mimari öğeler için de sıkça kullanılır. Ağacın cinsi, ahşabın mekanik ve fiziksel özelliklerini belirleyen temel faktördür.

Ağacın lif yönüne göre çekme ve basınç dayanımları farklılıklar göstermektedir. I. sınıf çam-meşe ve kayın için liflere paralel çekme 10,5-11,0 MPa, liflere paralel basınç 11,0-12,0 MPa, liflere dik basınç 2,0-3,0 MPa mertebelerinde olmaktadır. Ahşapta meydana gelen hasarlar, fiziksel (yağış, sıcaklık vb.), kimyasal (asit vb.) ve insan kaynaklı olabilmektedir. Ahşap, genel olarak kimyasal etkilere diğer yapı malzemelerine göre daha sağlamdır. En büyük dezavantajlarından birisi yangın karşısında olan dirençsizliğidir.

#### **4.4.7 Metal Malzemeler**

Tarihi yapılarda demir ve paslanmaz çelik gibi metal malzeme kullanımı yaygındır. Mekanik özelliklerinin diğer malzemelere göre çok daha yüksek oluşu en büyük avantajlarıdır. Bağlama ara elemanı gibi kullanılabilceği gibi zaman zaman taşıyıcı sistemi destek amaçlı olarak da kullanılmaktadır. Metal malzemenin en büyük dezavantajları ise yangına karşı ısıl genleşmesi ve korozyona karşı direncinin zayıf olmasına rağmen, paslanmaz çelik gibi ürünlerin kullanımı ile bu problem azaltılmaya çalışılmaktadır.

#### **4.4.8 Beton**

Kireç, puzolonik toprak, pişmiş kil, kum ve çakıl malzemedan meydana gelen karışımlar beton olarak adlandırılmaktadır. Çimento bileşimi hariç beton kullanımı Roma dönemine kadar uzanmaktadır.

Gevrek bir malzeme olan beton, basınç dayanımı ile orantılı olarak kalitesi artmaktadır. 20. yüzyıldan itibaren çimento kullanımı ile daha çok kum ve çakıl bileşimi olarak kendini gösterir. Kolay işlenebilir olması, basınç dayanımının yüksek sayılabilecek değerde olması ve çevre koşullarına dayanıklı olması en belirgin avantajlarıdır.

Beton hasarları genel olarak su veya suyun içinde betona zarar veren maddelerin etkisi ile kendini gösterir. Sert sular, klorür gibi tuzlar, asitli sular ve sülfatlı sular betona zarar veren maddeler arasında ilk sıradadır.

#### **4.4.9 Betonarme**

Betonarme, 19. yüzyıldan itibaren beton çeliğinin yapı teknolojisine girmesi ile günümüzde en yaygın olarak kullanılan yapı malzemesidir. Teknolojinin

ilerlemesine bağlı olarak erken dönemlerde yuvarlak demir kullanılır iken günümüzde nervürlü demire geçilmiştir. Beton içinde yer alan beton çeliğinin çekme gerilmesinin yüksek olması ve betonun da basınç dayanımının yüksek olmasının getirdiği avantaj ile beton-çelik birlikteliği pozitif sonuçlar vermiştir.

Keşfediliş tarihi gereği, çok fazla sayıda tarihi eser niteliğinde yapı bulunmamaktadır.

## **4.5 Tarihi Yapılarda Yapım Sistemleri**

### **4.5.1 Kaya Oyma Yapılar**

Kaya kütlelerinin ister yer altı ister yer üstü olsun insan vasıtası ile oyularak elde edilen yapılardır. Doğal yolla oluşan mağara ve oyuklar bu kapsamda ele alınmaz. Bulunduğu bölgedeki kaya kütlelerinin kolay şekillenebilir olması bu yapıların tercih edilme sebebidir.

### **4.5.2 Taş, Tuğla, Kerpiç ve Beton Yığma Yapılar**

Bu yapılar, taş, tuğla, kerpiç ve beton blokların tek başlarına ya da bir arada kullanılarak bağlayıcı harçlar yardımıyla birbirine kenetlenmesi sonucu meydana gelir. Yığma yapıların taşıyıcı sistemi temel, sütun, ayak, duvar, döşeme, tonoz ve kubbeden oluşur.

Yığma yapılarda hasarlar, çatlak, ezilme, parça kopması, ayrılma, düzlem içi ve düzlem dışı deformasyonlar ve malzeme bozulması şeklinde görülür. Bu hasarlar bize yapının en zayıf noktalarını işaret ederler. Depremler, rüzgarlar, temeldeki hareketler ve insan etkileriyle de yapı hasarları oluşmaktadır.

### **4.5.3 Ahşap Yapılar**

Yapıyı oluşturan ahşap elemanların üst üste ve bir çerçeve meydana getirecek şekilde dizayn edilmesi ile meydana gelirler. Ahşap elemanlar birbirine zıvanalı, çapraz geçme, boğaz geçme, kurt boğazı gibi yöntemlerle birleştirilerek yapı sisteminin ayakta kalması sağlanır.

Ahşap yapılarda yangın, deprem ve bakımsızlık yapıda meydana gelen hasarın başlıca sebeplerindedir.

#### 4.5.4 Demir ve Çelik Yapılar

Hammaddesi demir olan bu yapılar, ham demirin işlenmesi sonucu inşa edilen yapılardır. Yapı sistemi perçin ve bulonlar ile birbirine bağlanır. En büyük avantajlarından birisi bu yapılarda deprem sonrası hasarlara pek rastlanılmamasıdır.

#### 4.5.5 Erken Betonarme Yapılar

Betonarme sistemler, beton ve demirin aynı anda kullanıldığı yapılar olarak karşımıza çıkar. Teknolojiye bağlı olarak ilk dönem yapılarında yuvarlak demir ve donatılar kullanılırken günümüzde nervürlü demirler kullanılmaktadır.

Erken dönem yapılarında bugüne kadar kayda değer bir hasar oluşmadığı görülse de her betonarme yapıda olduğu gibi kolon ve kiriş birleşim bölgelerinin kontrol edilmesi uygun olacaktır.

### 4.6 Tarihi Yapılarda Yapısal Modelleme ve Değerlendirme

#### 4.6.1 Yapıyı Etkileyen Yükler

##### 4.6.1.1 Sabit Yükler

Tarihi kültür varlıklarında yapıyı oluşturan elemanlar ile bu elemanlara yardımcı olması bakımından kullanılan destekleyici elemanların yükleri yapısal değerlendirmede önemli bir yer tutmaktadır. Yığma yapılar strüktürleri gereği geniş ve büyük kesitli inşa edilmelerinden dolayı sabit yükler yapıyı daha çok etkilemektedir. Fakat, her zaman büyük kesit ve destek elemanının fazla olması demek yapı güvenliği açısından tek koşul değildir. Hatta bu aşırı yükler zaman zaman temelde oturma veya yapıda hasar şeklinde bazı olumsuz durumlar yaratabilirler. Yığma duvar malzemesine ait mekanik özellikler Çizelge 4.1'de verilmektedir.

##### 4.6.1.2 Hareketli Yükler

Modern çağımız binalarına göre karşılaştırıldığında tarihi yapılarımızdaki hareketli yükler daha az etkin durumdadır. Tarihi yığma yapıların oldukça rijit ve ağır olmalarında bu durumun etkisi oldukça fazladır. Tamamen ahşap gibi tarihi

yapılarda hareketli yüklerin (kar ve rüzgâr gibi) daha etkin olabileceği dikkate alınmalıdır. Özellikle minare gibi yapılarda rüzgâr yükünün ayrıca değerlendirilmesinde fayda bulunmaktadır.

Tablo 4.1 Yığma duvar malzemesinin mekanik özellikleri (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, 2018)

Duvar Türü	Basınç dayanımı fm (MPa)	Kayma dayanımı $\tau_0$ (kPa)	Elastisite modülü E (MPa)	Kayma modülü G (MPa)	Birim hacim ağırlığı w (kN/m <sup>3</sup> )
Moloz taşlı yığma duvar	0,6-0,9	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 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 bloklı yığma duvar	1,5-2,0	95-125	2200-2800	440-560	12
Boşluğu doldurulmuş beton bloklı yığma duvar	3,0-4,4	180-240	2700-3500	540-700	14

#### **4.6.1.3 Deprem Yükü**

Deprem yükünün en önemli parametrelerinden birisi olay anında düşey kuvvetlerin yanı sıra yatay kuvvetlerin de meydana gelmesidir. Yapıların düşey yükler altında yeterli dayanım göstermesi özellikle yığma yapı gibi yapı ağırlığının fazla olduğu binalarda güvenli tarafta kalındığı anlamına gelmemektedir. Hatta tarihi yığma yapılarda deprem anındaki yatay etki fazla olduğundan ve çekmeye karşı bu yapılar zayıf olduğundan büyük hasarlar meydana gelmektedir.

Tarihi yapılarda mevcut yönetmeliklerdeki deprem etkisinin bire bir alınması uygun olabilirken, her bir yapının özelliği ve bölgesine göre performans seviyelerinin ayrı ayrı değerlendirilmesi daha uygun olacaktır.

#### **4.6.2 Yapı Taşıyıcı Sistemi ve Zemine Aktarımı**

Yapılardaki taşıyıcı sistemin temel görevi düşey ve yatay yüklerin herhangi bir hasara yol açmadan zemine iletmesidir. Tarihi yapı taşıyıcı sistemleri çok farklı malzemelerden oluştuğundan bu elemanlar arasındaki yük transferinin özellikle deprem anında yatay yüklerin düşey elemanlara aktarılması önem arz etmektedir. Ayrıca, yüklerin zemine aktarılmadan önceki som durağı olan temel sistemi hakkında yeterli bilgi sahibi olunması gerekmektedir.

Yapı sistemi incelenirken hiperstatiklik derecesi, yapısal elemanların bağlantıları, döşemelerin yatay yük aktarımı ve zemin ve temel sistemi ayrı ayrı ele alınmalıdır. Özellikle, tarihi kültürel varlıkların temelleri incelenirken mevcut yönetmeliklere bağlı kalınması mümkün olmamakla birlikte imkanların elverdiği ölçüde tahribatsız yöntemlerle yeraltı suyu incelemesi, zeminin yapısının doğru tespiti gibi geoteknik çalışmaların yapılması gerekmektedir.

#### **4.6.3 Basit Güvenlik Analizleri**

Tarihi yapıların taşıyıcı sistemleri çok karmaşık olduğu için güvenliklerinin tespiti oldukça zor ve zaman alıcıdır. Bunun yerine genel ve basit incelemeler ile bazı güvenlik değerlendirilmelerinin yapılması mümkündür.

Yığma yapılarda çatlakların irdelenmesi taşıyıcı sistem hakkında önemli ipuçları verir. Her çatlak risk oluşturmasa da derin çatlak ve ayrılmalar yapı güvenliği için incelenmesi gereken hasarlardır.

Ahşap yapılarda zamana ve çevreye bağlı bozulma ve çürüme ile ahşap elemanların temel bağlantısı incelenmesi gereken detaylardır. Betonarme yapıların yığma duvarları ile çerçeve sistem olarak ele alınması daha verimli olacaktır. Çelik yapılarda ise temel hasar korozyon olduğundan öncelikle bu detaya bakılmalı ardından kaynak, bulon gibi birleşim elemanları kontrol edilmelidir.

#### **4.6.4 Modelleme Metotları**

Tarihi kültürel varlıklarımızın yapı özelliklerinin tespit edilmesi yapıda deformasyonların doğru algılanması ve onarım müdahalesi için önem taşımaktadır. Yığma yapının inşa şeklinin ve malzemelerinin çok çeşitli olması bu yapılara ait modelleme tekniklerinin de çok sayıda olması sonucunu doğurmuştur. Her bir modellemede bazı kabuller ve homojenleştirme işlemi yapılması nedeniyle yapı türüne göre modelleme yapılması daha uygun olacaktır.

Yapı taşıyıcı sistem malzeme cinsi bağlantı biçimi model seçiminde etkindir. Mümkün olduğunca basit kabuller yapılmalı ve sonra ayrıntılı (sonlu eleman) yönteminin kullanılarak basitten ayrıntılı analizlere geçilmelidir.

Tarihi yapıların özelliği gereği yapı modellemesine yönelik özel bir yönetmelik bulunmamaktadır. Her yapı kendine özgün özellikler taşıdığından modelde seçilen malzeme parametrelerin kalibrasyonu ile deneysel ölçülen veriler karşılaştırılarak daha doğru tespitler yapılması mümkündür.

##### **4.6.4.1 Basit Duvar Modeli**

Modelin adından anlaşılacağı üzere, her katta hesaplanan düşey yüklerin düzlem içi normal gerilmesi ile taşındığı varsayımı yapılır. Duvarların düzenli veya düzensiz olmasına göre yapının zorlanma biçimi değişir. Deprem kuvvetlerine duvarlarda oluşan düzlem içi kuvveti direnç gösterir. Daha çok az katlı ve yüksek olmayan binalarda kullanılır.

##### **4.6.4.2 Çapraz Çubuk Modeli**

Yığma yapılarda en sık kullanılan yığma duvarın eşdeğer çapraz çubuk olarak ele alındığı kabuldür. Bu yöntem ile doğrusal ve doğrusal olmayan analizler için uygundur.

##### **4.6.4.3 Eşdeğer Çerçeve Modeli**

Yığma yapıların bir çerçeve gibi analiz edildiği yöntemdir. Çubuk elemanlara kesme kuvveti, eğilme momenti ve burulma momenti tanımlanabildiği için tüm sistem birbirini bağlayacak şekilde modellemeye uygun hale gelir.

#### 4.6.5 Deprem Etkisi

Kılavuza göre Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde yer alan hükümler tarihi yapılara göre uyarlanarak, kuralların daha basitleştirilmesi ve belli sınırlara çekilerek üç temel deprem seviyesi oluşturulmuştur. Bunlar:

Deprem Yer Hareketi Düzeyi-1 (DD-1): 50 yılda bir oluşma ihtimali %2 ve 2475 yılda bir tekrarlanan büyük depremler,

Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2): 50 yılda bir oluşma ihtimali %10 ve 475 yılda bir tekrarlanan seyrek ve standart depremler,

Deprem Yer Hareketi Düzeyi-3 (DD-3): 50 yılda bir oluşma ihtimali %50 ve 72 yılda bir tekrarlanan sık depremlerdir.

Analizler yapılırken tarihi yapılar için çoğunlukla depremin yatay kuvveti dikkate alınır. Binanın niteliğine göre özel koşulların sağlanması da istenebilir. Ancak özel analizlerde kullanılan deprem spektrumları Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ndeki (TBDY 2018) değerlerden küçük olmamalıdır.

#### 4.6.6 Yapısal Güvenliğin Deprem Altında İncelenmesi

##### 4.6.6.1 Hasar Oranı ve Performans Düzeyi

Kabul Edilebilir Hasar Seviyesi tarihi yapının yeri, özgünlüğü ve önemine göre en az seviyeden en ileri hasar seviyesine göre seçilebilir. Yapısal Performans Düzeyleri ise,

a. Sınırlı Hasar (SH) Performans Düzeyi: Yapı taşıyıcı sisteminde doğrusal olmayan davranışın sınırlı olduğu düzeydir.

b. Kontrollü Hasar (KH) Performans Düzeyi: Yapı elemanlarında onarılabılır hasarların olduğu düzeydir.

c. Göçmenin Önlenmesi (GÖ) Performans Düzeyi: Göçme öncesine kadar kısmen yıkılmalara izin verilen düzeydir.

Yapıların güvenlik analizlerinde dayanıma göre değerlendirme veya şekil değiştirmeye bağlı metotlar kullanılmaktadır. Yukarıda değinilen performans düzeylerine göre tarihi yapı performans düzeyi seçilir. Performans düzeyleri ile ilgili hesap yöntemleri ve gerilmeler ile şekil değiştirme sınırları aşağıdaki tabloda gösterilmektedir.

Tablo 4.2 Performans düzeyleri ile ilgili hesap yöntemleri ve gerilme, şekil değiştirme sınırları (Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, 2018).

<b>Performans düzeyi</b>	<b>Hesap yöntemi ve sınırlar</b>
Sınırlı hasar sınır durum (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 aşmıyor.
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 aşmıyor. 2. Doğrusal olmayan hesap yöntemi kullanılıyor; a) Öteleme oranı %0,7 sınırının aşmıyor. b) Malzemelerin şekil değiştirme 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 aşmıyor. 1. Doğrusal olmayan hesap yöntemi kullanılıyor; a) Öteleme oranı %1 sınırının aşmıyor. b) Malzemelerin Şekil değiştirme kapasiteleri sınırlı oranda (~1,2 katı) aşılabılır.

#### **4.6.6.2 Dayanıma Göre Analiz**

Yapılarda deprem yükü azaltma katsayısına göre ( $R_a \leq 3$ ) düşey yüklerin ve deprem yüklerinin etkisi değerlendirilir. Malzemelerin sınır dayanımları ile kıyaslanarak analiz yapılır. Tarihi yapılarda süneklik az olduğu için deprem yükü azaltma katsayısı değiştirilmez.

Bu analizde iki şartın sağlanması aranır. Bunlardan ilki elastik ötesi şekil değiştirme ve ye değiştirme kapasitesinin varlığı, ikincisi ise elastik ötesi şekil

değiştirme ve kontrollü hasarın ilgili yapı için kabul edilebilir yani, tarihi yapının önemine göre performans seviyesini yakalaması beklenir.

#### **4.6.6.3 Şekil Değiştirmeye Göre Analiz**

Deprem altındaki yapının seçilen bir noktasının yer değiştirmeye bağlı analizidir. Yapı sistemi analiz edilirken taşıyıcı sistem malzemesinde yeterli elastik ötesi şekil değiştirme ve yer değiştirme kapasitesinin varlığı ve bu şekil değiştirme ve yer değiştirmenin taşıyıcı sistem için kabul edilebilir değerlerde olmalıdır. Yapının performans sınır değerine göre yapı elemanlarının şekil değiştirme sınırlarını aşmaması gerekir.

#### **4.6.6.4 Hedef Performans Düzeyi**

Tarihi yapılarda her yapının kendine özgü bir davranışı olduğundan her yapı için aynı performans düzeyinin kullanılması mümkün değildir. Hatta yapılacak analizlerde en az iki farklı performans düzeyi seçilerek ortaya çıkan onarım-güçlendirme müdahalelerinin yapı için uygun olup olmadığı kontrol edilmeli ve hangi müdahale biçimi tarihi yapı için uygun ise o yöntem seçilmelidir.

Tarihi yapılarda yapı davranışının elastik değerlere yakın olması durumunda doğrusal hesap yönteminin seçilmesi uygun olacaktır. Davranış açısından doğrusal olmayan durumlarda dahi deprem yükü azaltma katsayısı ile bu yöntemin seçilmesi tarihi yapılardaki belirsizlikler dikkate alındığında daha uygun olacağı değerlendirilmektedir.

### **4.7 Müdahale Yöntemleri**

#### **4.7.1 Müdahale Stratejileri**

Tarihi eserlerde güçlendirme yapılırken her zaman koruma ilkelerine sadık kalarak yapı güvenliğinin sağlanması büyük önem taşımaktadır. Mevcut deprem yönetmeliklerinin özü itibari ile yeni binaları esas aldığı hatta, tescilli tarihi yapıların deprem yönetmeliklerinden muaf olduğu dikkate alındığında tarihi yapıyı korumayı esas alan çözümlerin üretilmesi restorasyon stratejisinin temel amacıdır.

Uygulama projeleri hazırlanırken, depremsellik, yapı hasarları, yapı kullanım amacı, deprem güvenliği ve performans düzeyi ile teknolojik imkanlar dikkate alınmalıdır.

Tarihi yapıların depreme karşı direnci artırılırken ya sistemin tamamen güçlendirilmesi ya da deprem davranışının kabul edilebilir kalıp kalmayacağına karar verilir. Tarihi yapılarımız özgün eserler olduğundan minimum müdahale prensibi gereği az müdahale ve geleneksel yöntemlere bağlı kalınarak güçlendirme yapılması tercih sebebi olmalıdır.

#### **4.7.2 Basit Onarım**

Konunun giriş bölümünde değinildiği üzere yapısal sistemi etkilemeyen onarımlardır. Daha çok yapının bakımı açısından ele alınır.

Vakıflar Genel Müdürlüğü mülkiyetindeki veya denetimindeki vakıflara ait yapıların basit onarımları Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından yürütülür. Diğer kurumlara ait veya özel mülkiyette olan yapılar Koruma Kurulu veya eğer teşkil edilmiş ise belediyenin ilgili bölümü olan KUDEB (Koruma Uygulama Denetim Müdürlüğü) eliyle yapılmaktadır.

#### **4.7.3 Esaslı Onarım**

Tarihi yapıların Koruma Bölge Kurulunca onaylanan ayrıntılı projeler ve raporlar doğrultusunda yapı sistemini etkileyen büyük müdahaleler olarak tanımlanmaktadır. Sağlamaştırma, uygun olmayan eklerin kaldırılması, bütünleme, yapısal iyileştirme, yenileme, yeniden yapma ve taşıma esaslı onarım kapsamında ele alınmalıdır.



Şekil 4.1 Onarım- sol yan ve tamamlama - sağ yan örneği (Alaşehir Kurşunlu Han).

#### **4.7.3.1 Zemin ve Temel Müdahaleleri**

Tarihi yapılarda zemin ve temelde oluşan hasarların başlıca sebepleri arasında, zeminin taşıma gücünün zayıf olması, zeminde süreç içinde meydana gelen değişimler, insan faktörleri (trafik vb.), yeraltı ve yüzey suları, deprem sırasında meydana gelen sıvılaşma yer almaktadır.

Temel ve zeminde meydana gelen hasarlar, temelin genişletilmesi, kazık uygulamaları, zemin iyileştirmesi, zemindeki suyun tahliyesi gibi yöntemlerle iyileştirilmektedir. Bu müdahaleler yapılırken düzgün bir temel yüzeyi elde edilmesi, varsa arkeolojik yapıya zarar verilmemesi, zemininin önceden gözlemlenmesine yarayacak muayene çukurları gibi işlemlerin yapılması doğru müdahale yönteminin seçilmesinde önemli yer tutmaktadır.



Şekil 4.2 Zemin iyileştirme örneği (Konak Hisar Camii).

#### **4.7.3.2 Duvarlara Yönelik Müdahaleler**

Tarihi yapılarda temelde meydana gelen değişiklikler, çevresel faktörler nedeniyle duvar ana melememelerinin deformasyona uğraması sonucu duvarlarda hasarlar oluşabilmektedir. Müdahale edilmeden önce hasar durumlarını detaylı incelemek ve hasara neyin sebep olduğunu doğru teşhis etmek esere yönelik uygulamada doğru sonuçlar getirecektir.

Tarihi eserlerde duvarların kısmi örülmesi, harç enjeksiyonun yapılması, donatılı sıva uygulaması, donatı eklenmesi ve yeniden duvarın inşa edilmesi yapılacak müdahalelerin yöntemlerini oluşturmaktadır.

Duvarlarda kısmi onarımlar ile harç enjeksiyonu günümüzde en çok karşılaşılan yöntemler olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.3 Kireç enjeksiyon uygulaması (Konak Yapıcıoğlu Camii).

#### **4.7.3.3 Sütun ve Ayaklara Yönelik Müdahaleler**

Tarihi yığma yapılarda basınç dayanımını sağlayan sütun ve ayaklara ait deformasyonlar giderilirken çemberleme ve kesitin artırılması tercih edilmektedir. Çemberleme, sünekliği artırması ve çatlak oluşumunu engellemesi yönünden avantajlı bir yöntemdir.

#### **4.7.3.4 Bağlantılara Yönelik Müdahaleler**

Yapının bağlantı elemanları iç kuvvet dağılımı ve yüklerin aktarılmasını sağlayan en önemli öğelerdir. Duvarlar arası, duvar döşeme arası ve duvar tonoz bağlantı noktaları gibi yerler detaylı incelenmesi gereken yerlerdir. Bazı yapılarda karşılaştığımız tüm binayı saran ahşap hatıllar da önemli bağlantı noktalarını oluşturmaktadır.

Bağlantı elemanlarının onarımında geleneksel yöntemlere bağlı kalınması yapının özgün biçiminin korunması açısından önemlidir.

#### **4.7.3.5 Döşemelere Yönelik Müdahaleler**

Döşemeler yapının yatay yüklerini karşılayan elemanlardır. Düşey yüklerin etkisi döşemelere dik şekilde yansıtılmaktadır. Deprem kuvvetleri atalet kuvveti şeklinde döşemede oluşur ve taşıyıcı elemanlara aktarılır.

Ahşap döşeme, volta döşeme ve tonoz veya kubbelerinin yüzeyinin doldurulması ile teşkil edilen döşeme çeşitleri bulunmaktadır. Yapı malzemesine göre bakımlarının yapılması (ahşap gibi), döşemeyi oluşturan öğelerin çatlak ve sehimlerinin takip edilmesi döşeme ömrünü uzatan faktörler arasında yer almaktadır.

#### **4.7.3.6 Kemer, Tonoz ve Kubbelere Yönelik Müdahaleler**

Tarihi yığma yapılarda kemer, tonoz ve kubbe elemanları eğilme momenti etkisini azaltmak ve kesitlerde basınç normal kuvvet etkisi oluşturmak için inşa edilirler.

Kemer ve tonozlarda ortaya çıkan çekme gerilmesi gergi elemanı ile karşılanırken, kubbelerde kubbe eteğine konan halka elemanlarla karşılanır.

Kubbelerde meydana gelen kubbe eteğinin açılması/çatlaması hasarına yönelik en verimli yöntem kubbe eteğine halka koymaktır. Kemer, kubbe ve tonozlarda çatlak seviyesinde oluşan hasarlar çatlak boyunca kısmi yenileme ve derz tamiri ile mümkün olabilirken, yapının şeklinin bozulmasına neden olan hasarlarda elemanların sökülerek yeniden inşa edilmesi daha uygun olacaktır.



Şekil 4.4 Kemer ve tonoz onarımları (Sırasıyla Manisa İlyasbey ve Gölarmara Şahuban Camileri).

#### **4.7.3.7 Ahşap Çatı Müdahaleleri**

Tarihi eserlerde ahşap çatı strüktürü ahşap makaslar ile teşkil edilerek, bu makasların birbirine yine ahşap ara bağlantılar ile kenetlenmesi sonucu karkası, üzerinin kaplanması sonucunda da çatı örtüsü oluşmuş olur.

Tarihi yapılarda oluşan ahşap çatı hasarları genelde zamana bağlı doğal etkiler ve çürümedir. Çatılara müdahale edilirken kendi malzemesi ile onarım ve kısmi yenileme çalışmalarının yapılması çatı sistemi için daha sağlıklı olacaktır. Ancak, sistemin daha iyi çalışması ve yüklerin daha iyi aktarılması için yapılan tahkikler sonucu metal bağlantı elemanlarının kullanılması da faydalı olacaktır. Ahşap çatı elamanlarının duvarla olan bağlantı noktalarına özellikle dikkat edilmelidir.



Şekil 4.5 Çatıda ahşap makas ve karkas onarımları (Menemen Mahkeme Cami).

#### **4.7.3.8 Minarelere Yönelik Müdahaleler**

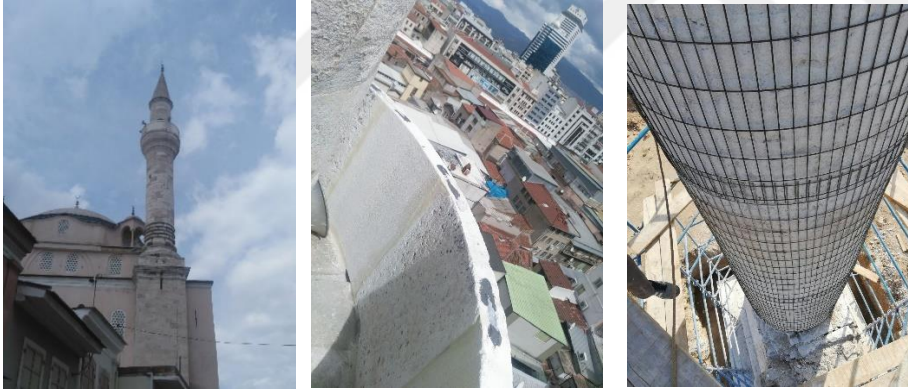
Minarelerin mimarisi gereği uygulanabilecek müdahaleler sınırlı olmaktadır. Bazı minareler kaidesi ile teşkil edilmesine rağmen bazen de cami duvarları üstüne petek ve şerefe bölümleri yapılarak camiye bitişik minare yapıları şeklinde de inşa edilebilmektedir.

Yapılan gözlemlerde depreme sırasında en çok şerefe-petek birleşim yerlerinde hasar olduğu görüldüğünden özellikle seren direğinin minare çekirdeğine tam olarak sabitlenmesi önem arz etmektedir.

Minarelerde yapılacak müdahalelerde öncelikle varsa derz hasarları giderilmeli, çatlak oluşan yerlerde mümkünse kısmi yenileme değilse çatlakları önlemek amacıyla metal kenetlerden faydalanılabilir. Minare peteklerinde görülen çelik kuşaklama depreme karşı alınan en bariz önlemlerden biridir. Eğer minare kısmi veya tümüyle yenilenmek zorunda kalırsa sökülen taşlara numara verilerek sağlam olanların yine aynı geometri ve sırada yapılması ve sadece hasarlı taşların yenilenmesi eski eserleri koruma ilkesi açısından önem arz etmektedir.



Şekil 4.6 Minare temeline ve kaidesine Takviye (Tire Rahmanlar Minaresi).



Şekil 4.7 Minare korkuluğu onarımı ve gövdeye takviye yapılması (Konak Şadırvanlı Cami ve Tire Rahmanlar Minaresi).

#### **4.7.3.9 Yapısal Olmayan Elemanlara Yönelik Müdahaleler**

Taşıyıcı özelliği olmayan parapet, saçak ve baca gibi yapı elemanları bu gruba giren öğelerdir. Bu bölümlerde değişim veya onarım yapılırken mevcuttan fazla büyütmeye, küçültmeye veya komple kaldırılması gibi durumlarda yapının depreme karşı nasıl bir davranış sergileyeceği dikkate alınmalıdır.

### **4.7.3.10 Kerpiç Yapılara Yönelik Müdahaleler**

Kerpiç yapılardaki bağlayıcı malzeme olan kerpicing dayanımının düşük olması nedeniyle bozulan ve hasarlı olan bölümlerin onarılma imkânı olmadığından yenilenmesi gerekmektedir. Kerpiç yapıyı oluşturan ahşap yapı elemanlarında hasar olması durumunda bu ahşapların yenilenmesi yerinde olacaktır. Bu yapılara enjeksiyon uygulaması, mantolama gibi müdahaleler kerpicing yapısı gereği mümkün olamamaktadır.

### **4.7.4 Söküm ve Taşıma**

Tarihi eserlerin koruma ilkeleri gereği yerinde korunması esastır. Ancak, heyelan riski gibi doğal afetler ve baraj, yol vb. zaruri ihtiyaçlardan dolayı bazen mümkünse taşınması ve sökülerek kullanılacak malzemeleri ile yeniden yapılması gibi durumlar ortaya çıkabilmektedir.

Çeşme ve sebil gibi küçük yapıların komple taşınması mümkün olabiliyor iken büyük türbe ve camilerin kütesinde dolayı böyle bir imkân bulunmamaktadır. Bu durumlarda tarihi yapının kullanılabilir olan kesme taş, vaaz kürsüsü, söve vb. gibi taşınabilir ve sağlam olan öğeler ayrılarak, taşınacak yerde aynı geometri ve sırada yeniden yapılmaları daha uygun olacaktır. Komple taşıma yapılacaksa taşınmadan önce yapının yerinde sağlamlaştırılarak taşınması yolu izlenmelidir.

### **4.7.5 Yeniden Yapım**

Yangın ve deprem gibi doğal afetler veya savaş gibi insanoğlu tarafından yapılan müdahaleler sonucu tarihi eserlerin bazen tümü bazen de büyük bir bölümü yok olmaktadır. Rekonstrüksiyon yapının varsa daha önceki projeleri, fotoğrafları ve yapıya ait tüm belgeler üzerinden yeniden yapılması işlemine verilen addır.

Bu işlem yapılırken yapının özgün malzemesine ve yapım tekniğine bağlı kalınmalıdır. Eğer yapıda günümüz koşullarına bağlı olarak kullanım ve işlev değişikliğine gidiliyorsa yapılacak taşıyıcı elemanlar genel mimari dokuyu etkilemeyecek şekilde tasarlanmalıdır. Kullanılacak malzemelerde minimum koşullara uyulması önem taşımaktadır.

#### 4.7.6 Projelendirme

Tarihi eserlerde ihtiyaç duyulan müdahaleler yapıdaki hasarları onarmak için yapılmaktadır. Ancak, müdahale yapılmadan önce tüm hasarlı ve hasarsız yapı elemanları incelenmelidir. Hatta, hasarsız bölümlerde dahi deprem analizlerinin yapılması risklerin bilinmesi açısından önemlidir.

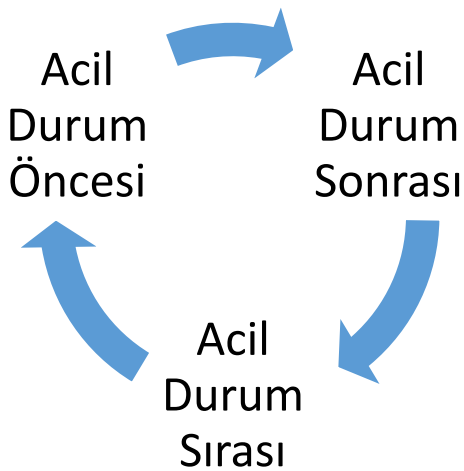
Müdahaleler yapılırken yeni bir hasara yol açabilecek uygulamalar ve yapı taşıyıcı sistemini büyük ölçüde değiştiren uygulamalardan kaçınılmalıdır. Müdahale öncesi, gözlenen tüm hasarların sebepleri iyi tespit edilmeli gerekiyorsa laboratuvar ortamında da çalışmalar yapılmalıdır. Gereğinden fazla statik eklerden kaçınılmalıdır.

#### 4.8 Deprem Odaklı Afet ve Acil Durum Yönetimi

##### 4.8.1 Tarihi Yapılarda Acil Durum Yönetimi

Her risk yönetimi uygulamalarında olduğu gibi tarihi eserler için risk oluşturan deprem risklerinin yönetilmesi acil durumla başlayan, bir sonraki acil duruma kadar zaman içerisinde yapılması gerekenleri özetleyen bir çevrimsel döngüdür.

Bu evreler acil durum öncesi, sırası ve sonrası olarak değerlendirilmekte olup her bir adımda yapılması gerekenler Kültür Mirasına Yönelik Afet Riski Döngüsü'ne özetle şöyle sıralanmaktadır.



Şekil 4.8 Kültür mirasına yönelik afet riski döngüsü.

- Afet/Acil Durum Öncesi: Risk Değerlendirmesi, Zarar Azaltma, Hazırlık
- Acil Durum Sırası: Tarihi Yapı Triağı, Tarihi Yapıda İnsani Kurtarma Amaçlı Destekleme, Tarihi Yapıda Yapısal Olmayan Güvenlik Tedbirleri
- Afet/Acil Durum Sonrası: İhtiyaç Analizi, Hasar Analizi, Ara Müdahale, İyileştirme bölümlerinden oluşmaktadır.

Afet riski yönetimi çalışmalarında afet halinde meydana gelebilecek tüm zararların değerlendirildiği risk analizi oluşturulur. Yapılan analizler sonrası afet öncesi yapılması gerekenler ve tedbirler, tüm bunlara rağmen afet gerçekleşmişse afet sonrası yapılacak çalışmalar tespit edilir.

Acil Müdahale Evresi, afetin meydana geldiği anda başlayan, yetmişiki saatten iki haftaya kadar uzayabilen bir süreç olup, öncelikli hedef can kaybını minimize etmektir. Genel olarak bu evrede can kaybının önlenmesi amaçlandığı için sanki bir bekleme evresi gibi düşünülmesine rağmen son yıllarda döngünün içerisine tarihi yapı triağı kavramı eklenerek hasar gören yapıdaki öncelikler tespit edilerek yapının taşıyıcı sistemine acil müdahale gereken destekleme çalışmalarını da içermektedir.

Afet sonrası acil durum yönetiminin başarılı olma yüzdesi hazırlık evresinde afet esnasında uygulanacak çalışmaların tatbikatının yapılması ile mümkün olmaktadır. Ülkemizde afet yönetimi 5902 ve 6745 sayılı kanunlarla gerçekleştirilmektedir. Ancak, bu mevzuat daha çok afet sonrası iyileştirmeleri kapsamakta olup afetin hemen sonrasında uygulanması gereken acil müdahale evresinde de hasar gören tarihi yapılarımız için bir eylem planının hazırlanması bu kılavuz kapsamında önerilmektedir.

#### **4.8.2 Acil Müdahale Yöntemleri**

Ülkemizde ister tarihi yapılar olsun ister modern yapılar olsun bu yapılarımıza dair afet sonrası acil müdahale yöntemlerine yönelik bir teknik bir belge oluşturulmamıştır. Kılavuz bu açıdan ülkemizde afet sonrası acil müdahale yöntemlerine yönelik ilk kez açıklamalar getirmektedir.

Deprem sonrası artçı sarsıntıların devam etmesi nedeniyle acil durum müdahalesi yapılmazsa tarihi yapılardaki hasarların artacağı muhakkaktır.

Öncelikle yapılar uzman mühendis ve mimarlar tarafından incelenerek mevcut hasar durumu ortaya çıkarılmalıdır. Acil müdahale kapsamında yapıda her türlü sıva, taş vb. yapı elemanlarının parça düşmeleri engellenmelidir. Yapıda nitelikli bezeme elemanları varsa öncelikle yerinde korumaya alınmalı aksi takdirde yerinden alınarak başka bir alanda korumaya alınmalıdır.

Yapının taşıyıcı sisteminde meydana gelen hasarlar için, ahşap-çeliklerle payanda yapılması, yapının kuşaklanması, gergi demiri ile desteklenmesi, tonoz, kubbe ve kemerlerin askıya alınması, kapı ve pencere boşluklarına çapraz elemanlar eklenerek rijitliğin artırılması, minare, sütun ve ayak gibi düşey elemanlarda sargılama yapılması ve ağır hasar alan yerlerde kısmi sökümler yapılması mevcut hasarların artmaması açısından önem arz etmektedir.

Her yapıya uygun acil müdahale yönteminin seçilmesi ve zaman kısıtlılığı bakımından mümkün olan en basit ve kolay yöntemin seçilmesi bu evredeki başarı oranını arttıracaktır.

## 5. ÖRNEK ÇALIŞMA: SELÇUK-İSABEY CAMİİ MİNARESİ

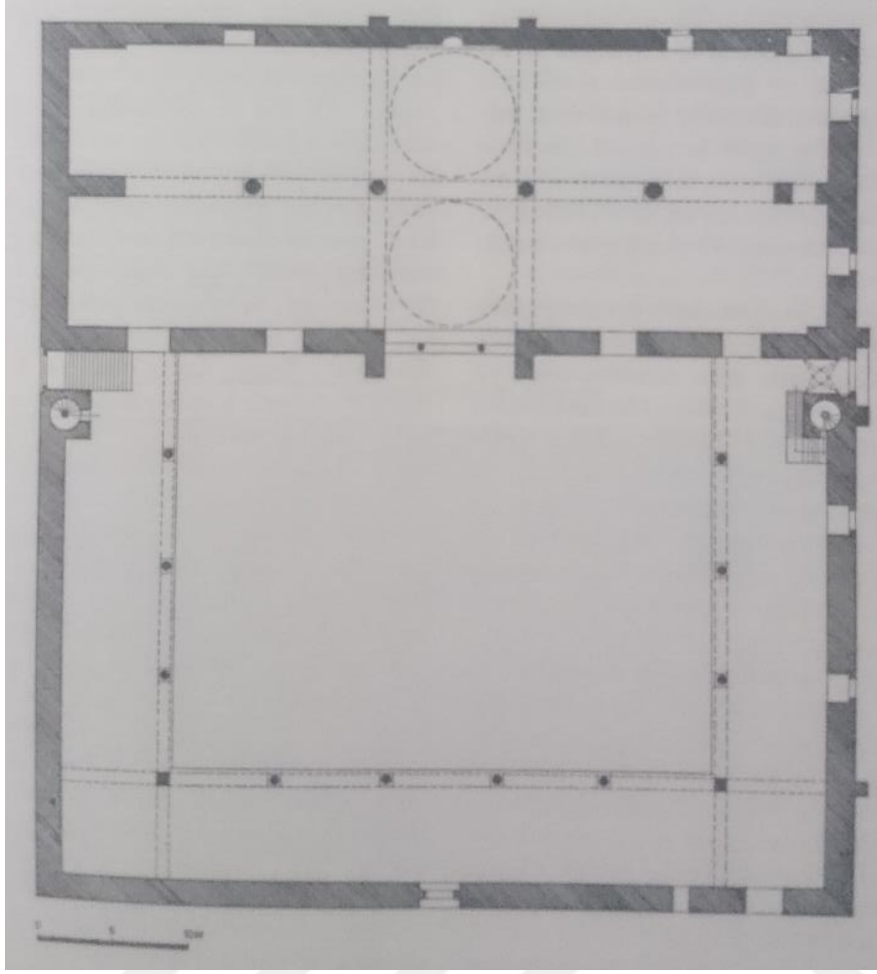
### 5.1 Ön Çalışmalar

Tarihi bir kültür varlığımız olan İzmir'in Selçuk ilçesinde bulunan İsabey Camiinde esaslı onarım yapılincaya kadar geçecek sürede deprem riskine karşı korunması amacıyla, minare üzerine geçici taşıyıcı ahşap iskele sistemi kurulmuştur. Bu çalışmada minareye uygulanan destek iskelesi öncesi ve sonrası deneysel modal analiz sonuçları karşılaştırılarak uygulanan sistem sonrası modal parametrelerindeki değişimler irdelenmeye çalışılmıştır.

Bu bölümde önceki bölümlerde bahsedilen hususlar doğrultusunda yapı değerlendirilmiştir. Analiz çalışmalarına başlanmadan önce yapının kısa tarihi, mimari özellikleri, malzeme özelliklerinin tespiti yapılarak eseri tanımlayan parametreler ortaya çıkarılmıştır. Operasyonel model analiz ile tarihi minarenin modal parametreleri tespit edilmiştir. Tarihi yapının bulunduğu bölgenin zemin sınıfı ve deprem kuşağına göre yapı modellenerek sonlu elamanlar metodu ile analiz tamamlanmıştır. Analizlerde tarihi minarenin iskele ile desteklenmeden önceki durumu ile desteklemeden sonra alınan veriler karşılaştırılmıştır.

#### 5.1.1 İsabey Camii'nin Tarihi

Beylikler döneminin görkemli tarihi yapılarından biri olan, İzmir ili, Selçuk İlçesi, İsa Bey Mahallesiinde 266 ada, 1 parselde bulunan İsabey Camisi, Aydınogulları Beyliği zamanında inşa edilmiştir.



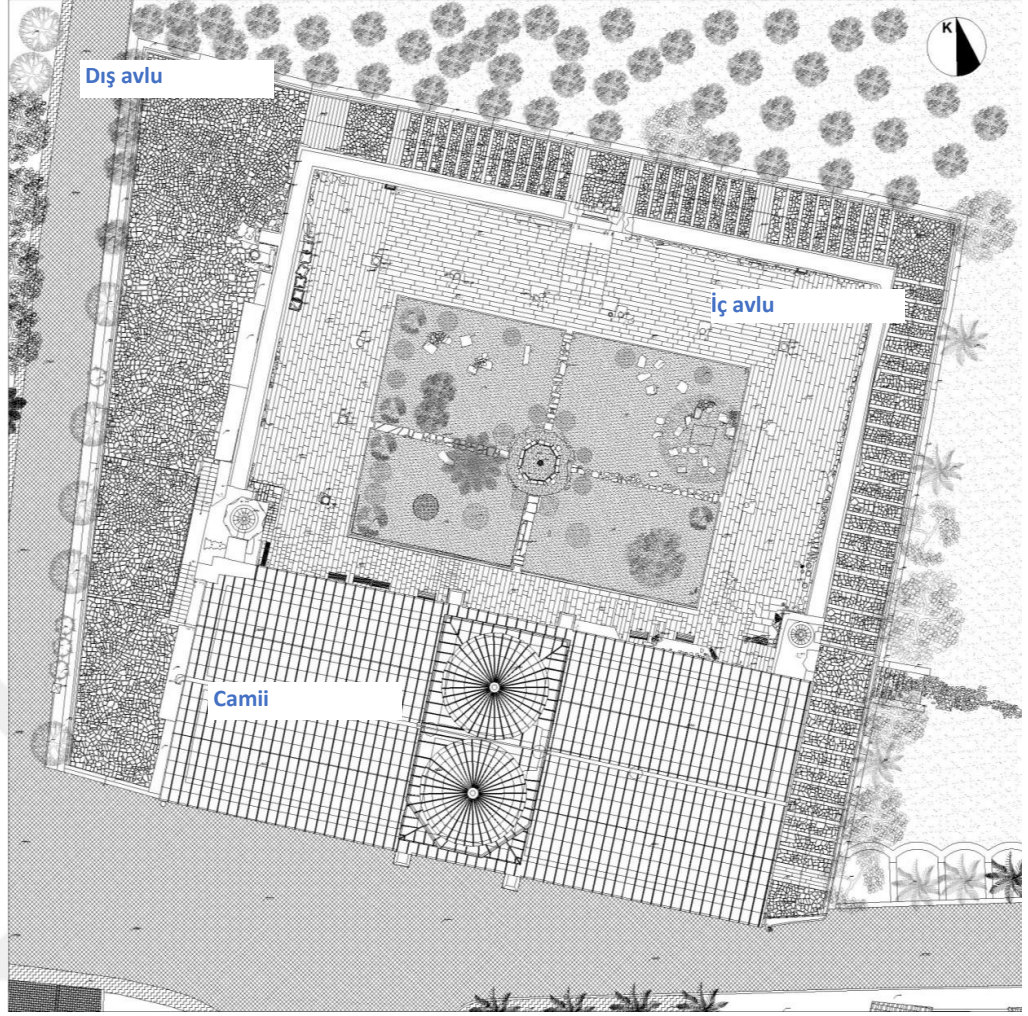
Şekil 5.1 Selçuk İsabey Camii (Aslanapa, 1997).

Caminin batı cephesindeki kapısı üzerinde bulunan ve beş bölümden meydana gelen kitabede Şamlı Ali ibnMüşeymeş el-Dımışki sanatçısının ismi yer almaktadır (Sönmez, 1995).

Aydınoğulları Beyliği hükümdarı İsabey tarafından 1375 tarihinde Şamlı mimar Dımışklıoğlu Ali tarafından yapılan İsa Bey Camii 4000 m<sup>2</sup> civarında bir arsaya konumlanmış durumdadır.

### 5.1.2 Mimari ve Geometrik Özellikleri

Caminin oturduğu alanın üç bölüm halinde değerlendirilmesi uygun olacaktır. Batı cephesinde (inceleme yapılan minare bölümü) dış avlu, cami kuzey cephesinde iç avlu ve güney cephede cami ana mekânı bulunmaktadır.



Şekil 5.2 Caminin çatı planı.

### **5.1.2.1 Dış Avlu**

Cami batısında bulunan dış avlu çeşme ve dükkanlardan oluşmaktadır. Zemin kayrak taşı ile kaplanmış durumdadır. Cami girişinde estetik değeri yüksek olan taç kapı da bu bölümde bulunmaktadır.

Dükkanlar zemin kotunda olup nişler halinde sıralanmaktadır. Giriş kapısının altında çeşme yer almaktadır. (Şekil 5.3)



Şekil 5.3 Cami dış avlusu-batı cephe.

### **5.1.2.2 İç Avlu**

Yapının kuzeyinde bulunan iç avluda çatısı yok olmuş revaklar, havuz ve iki adet minare bulunmaktadır.



Şekil 5.4 Cami iç avlusu (Doğu cepheden).

Doğu ve batı cephede iki ayrı minare bulunmakta olup doğu cephede yer alan minare kaide seviyesinden itibaren tahrip olmuştur. Üzerinde çalışma yapılan minare batı cephesinde yer almaktadır. (Şekil 5.4 ve 5.5)



Şekil 5.5 Cami iç avlusu (Batı cepheden).

Batı cephesi minaresi kaide kısmına kadar avlu duvarı ile bütünleşik şekilde taş örgü ile yapılmış, kaide üstü ise tuğla malzemeden imal edilmiştir.

### **5.1.2.3 Harim**

Yapı parselinin güneyinde bulunan harim iki sahnın biriminden oluşmaktadır. Orta bölüm kubbe üst örtülü iken, batı ve doğu bölümleri beşik ahşap çatı şeklindedir.

Yapının orta bölümleri dört ana taşıyıcı sütun üzerine oturtulmuştur. Sütunlar birbirine tuğla kemerler ile bağlanmaktadır. Harim duvarlarında bezeme kalıntıları bulunmakta olup mihrap ve minber de bezemeli diğer öğelerdir. (Şekil 5.6)



Şekil 5.6 Cami harimi.

#### **5.1.2.4 Batı Minaresi**

Cami kütleli ile avlunun camiyle kesiştiği batı girişinde batı minaresi bulunmaktadır. Minare bölümüne mermer merdivenlerin bulunduğu bölümden girilmektedir. Minare basamakları taş olup gövde bölümü tuğladan imal edilmiştir. Kaide bölümü sekizgen şeklinde yapılmış, her bir kenarda tuğla sivri kemerler bulunmaktadır.

Minare tuğla gövde bölümü hayli hasar almış olup şerefe ve üstü ile külah kısmı yıkık durumdadır. Tuğla gövde bölümü demir çemberler ile ayakta durmaya çalışılmaktadır. Son olarak can ve mal güvenliği açısından minare etrafına taşıyıcı destek iskelesi yapılarak hem normal koşullarda hem de depreme karşı minarenin dayanımı artırılmaya çalışılmıştır. (Şekil 5.7)



Şekil 5.7 Batı cephesi minaresi iç avlu ve dıştan genel görünüm.

### 5.1.3 Uygulama Yapılan Minarenin (Batı) Taşıyıcı Sistemi ve Malzeme Özellikleri

Minare yapısını oluşturan elemanlar taş-mermer ve tuğladır. Yapının kaide bölümüne kadar mermer-taş karışık şekilde imal edilmiştir. Bu bölüm hem avlu duvarı hem de camiye bitişik şekilde tasarlanmıştır.

Minare kaide-gövdeye giriş (7/8) bölümü tuğla örgüden yapılmış sekizgen sivri kemerler şeklindedir. Minare gövde dış bölümü tuğla örgü, minare merdiven basamakları taştan yapılmıştır. Minare hasarlı olduğundan hem minarenin taş basamaklarında çatlaklar hem de minarenin tuğla gövdesinde çatlak, parça kopması ve derin ayrılmalar oluşmuştur. Minare tek şerefeli olup şerefe üstü yıkılmıştır. Minare toplam yüksekliği 26,60 metre civarındadır. Kaide üstü gövde bölümü yaklaşık 13 metredir. Minare gövdesinin yerleştirildiği düzensiz geometrik yapıya sahip kaide bölümü ise 13,40 metreyi bulmaktadır.

Minare külah bölümü yıkılmış olduğu için minare çevresel etkilere karşı korunmasız haldedir. Minare gövdesinin dış çapı 220 cm ila 240 cm arasında değişmektedir. Minare gövdesini taş basamaklara bağlayan gövde kalınlığı 20 cm ila 35 cm arasında farklı kalınlıklara sahiptir. Minare örgüsünü oluşturan tuğla malzemenin temel harç bağlantısı kireçtir. Ancak, yapıdaki hasarlara bağlı olarak bazı bölgelerde çimento esaslı onarımlar yapıldığı görülmektedir. Minarede toplam 89 adet taş merdiven basamağı bulunmaktadır.



Şekil 5.8 Batı cephesi minaresinde merdiven basamakları.



Şekil 5.9 Batı cephesi minaresinde gövde ve basamaklardaki hasarlar.

Minare tuğla gövdesi zaman içinde meydana gelen ayrılmalar, aşınma ve malzeme bozulmalarından dolayı çıplak gözle yapılan incelemelerde dahi minare yapı güvenliği açısından risk altındadır. Ayrıca, minare gövdesinin düşeyde şakulünden sapsmış olması riskleri arttırmaktadır.

#### 5.1.4 Yığma Yapı Genel Malzeme Parametreleri

Uygulama yapılan yığma minare sistemi taş, tuğla ve harç elemanlarından oluşan heterojen bir yapıdadır. Yapı modellenirken makro model yöntemi esas alınarak yapı homojen bir yapısal sistem gibi düşünülmüştür. Minareyi oluşturan yapı elemanlarının (taş, tuğla ve harç) mekanik özellikleri ve elastik değerleri genel teorik yaklaşımlar esas alınarak modele yansıtılmıştır.

Yığma sistemlerin basınç dayanımı Eurocode 6 (2005)'da yer alan denkleme göre tespit edilmiştir.

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad 5.1$$

Bu denklemde  $K$ ,  $\alpha$  ve  $\beta$  birer sabit olup  $f_b$  (MPa) taş veya tuğlanın basınç mukavemetini,  $f_m$  (MPa) harcın basınç mukavemetini göstermektedir.  $K$  sabiti 0,4 ila 0,6 arasında değişmektedir.  $\alpha$  ve  $\beta$  sabitleri yığma yapılarda 0,7 ve 0,3 olarak verilmektedir.  $f_m$  için göz önüne alınan maksimum değer 20 MPa veya  $f_b$  değerinin iki katı olarak alınabilmektedir (Eurocode 6, 2005).

Koçak (1999), yığma yapılarda çekme mukavemeti olarak basınç mukavemetinin %10'una denk gelen değerin uygun olacağını belirtmektedir.

Elastisite modülü hesabı için Eurocode 6 (2005)'da aşağıdaki denklem önerilmektedir.

$$E=1000.f_k \quad 5.2$$

Koçak (1999), yığma yapılarda poisson oranı için 0,17 değerini baz almıştır.

Basınç mukavemeti harçlı taş yapılarda aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_k = 0.6 \cdot 200^{0.65} \cdot 7^{0.25} = 30.6 \text{ MPa} \quad 5.3$$

Koçak'ın geliştirdiği denkleme göre yığma yapının çekme mukavemeti basınç mukavemetinin % 10'u olarak kabul edilirse;

$$f_{ts} = 0.1 \cdot 30.6 = 3.06 \text{ MPa} \quad 5.4$$

değeri bulunur.

$$E=1000 \times 30.6 = 30600 \text{ MPa} \quad 5.5$$

Taşların yoğunluğu  $3000 \text{ kg/m}^3$  ve harç yoğunluğu  $1912 \text{ kg/m}^3$  olarak esas alınırsa yığma yapı için ortalama yoğunluk  $2500 \text{ kg/m}^3$  olarak bulunur.

Denklem 5.3'e göre tuğla harçlı duvarlarda basınç mukavemeti,

$$f_k = 0.6 \cdot 14^{0.65} \cdot 7^{0.25} = 5.42 \text{ MPa} \quad 5.6$$

değerine ulaşılır.

Yine Koçak'a göre çekme dayanımı için %10'luk basınç mukavemeti değeri esas alınırsa;

$$f_{ts} = 0.1 \cdot 5.42 = 0.542 \text{ MPa} \quad 5.7$$

değerine ulaşılır.

$$E=1000 \times 5.42 = 5420 \text{ MPa}$$

5.8

Minare sistemini oluşturan tuğla elemanınin yoğunluğu  $1730 \text{ kg/m}^3$  ve harcın yoğunluğu  $1912 \text{ kg/m}^3$  şeklinde esas alınır. Tuğla yığma bölümünün yoğunluğu  $1750 \text{ kg/m}^3$  şeklinde idealleştirilmiştir.

Tablo 5.1 Homojenleştirilmiş yığma model için malzeme parametreleri.

	Yığma Taş	Yığma Tuğla
Basınç Dayanımı (MPa)	30,60	5,42
Çekme Dayanımı (MPa)	3,06	0,54
Elastisite Modülü (MPa)	30600	5420
Görünür Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )	2500	1750
Poisson oranı	0,17	0,17

## 5.2 Yapısal Analizler

Bu bölümde birinci derece deprem bölgesinde bulunan ve yapısal olarak narin bir geometriye sahip olan minarenin hem kendi ağırlığı hem de deprem ve kuvvetli rüzgarlar altındaki yapısal davranışları teorik olarak değerlendirilecektir.

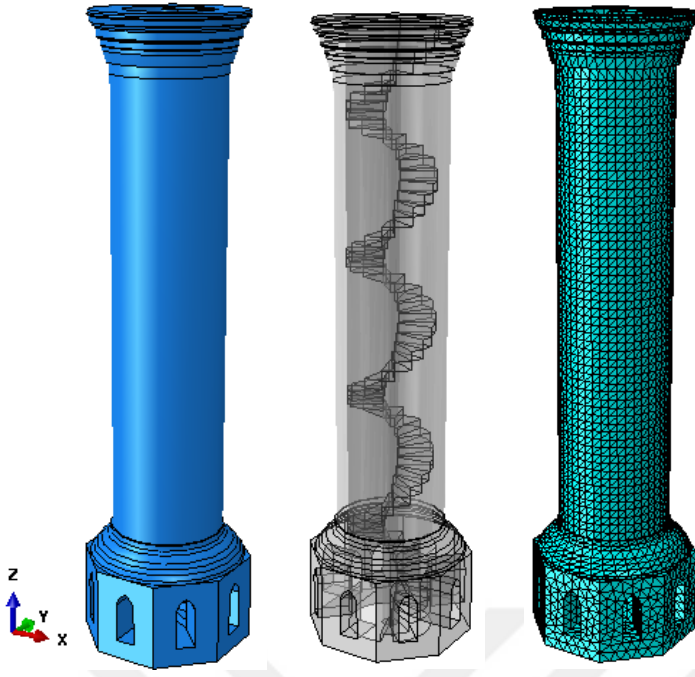
Taş-mermer, tuğla ve harç malzemeden heterojen olarak inşa edilmiş olan minare yapısı elemanları için teorik malzeme değerleri Tablo 5.1'e göre azaltılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Teorik analizde minarenin kaide ve gövde bölümü birlikte ele alınmıştır. Minare gövdesi için kireç harçlı tuğla örgü seçilmiştir. Seçilene malzeme mekanik özellikleri aşağıda Tablo 5.2'de sunulmuştur. Yapının modellendiği 2017 yılı itibari ile geçerli olan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (2007) belirtilen Emniyet Gerilmeleri seçilmiştir. Ancak, yapı çok hasarlı olduğu için mekanik özelliklerde Tablo 5.1'e göre azaltılma yoluna gidilmiştir.

Tablo 5.2 Minare yapısını oluşturan malzemelerin teorik mekanik özellikleri.

	Tuğla Örgü	Taş
$F_d$ : Basınç dayanımı (MPa)	4,00	20,00
$\sigma_{\text{emniyet-basınç}} = 0,25 * F_d$ (MPa)	1,00	5,00
$\sigma_{\text{emniyet-çekme}} = 0,025 * F_d$ (MPa)	0,10	0,50
$\tau_{\text{emniyet}}$ (Kayma emniyet gerilmesi) (MPa)	4,00	20,00
Elastisite Modülü (MPa)	180,00	15000,00
Görünür Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )	1850,00	2300,00
Poisson oranı	0,15	0,20

### 5.2.1 Minarenin Sonlu Elemanlar Modeli (SEM)

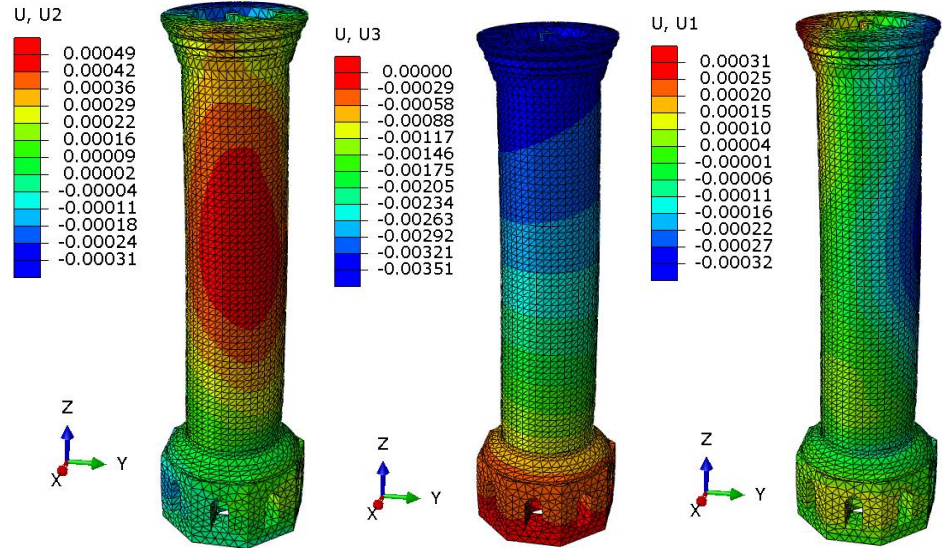
Bu bölümde tarihi minarenin deprem karşısındaki davranışı belirli ön kabullerle teorik olarak ele alınmaktadır. Minarenin röleve projelerine bağlı katı modeli oluşturularak 38854 adet tetrahedral katı eleman (C3D4) ve 10086 adet düğüm noktası ile analizler Abaqus V10 programında tamamlanmıştır (Şekil 5.10) Yapılan analizler sonucunda ölü (zati) yük, kuvvetli rüzgâr yükü ve muhtemel deprem kuvvetleri altında minare taşıyıcı sistemde meydana gelebilecek maksimum deplasmanlar, ekstrem gerilmeler ve modal parametreler bulunmuştur.



Şekil 5.10 Batı cephesi minaresi üç boyutlu bilgisayar modeli.

### 5.2.2 Minare Öz Ağırlığı (Zati Yük) Altındaki Analizi

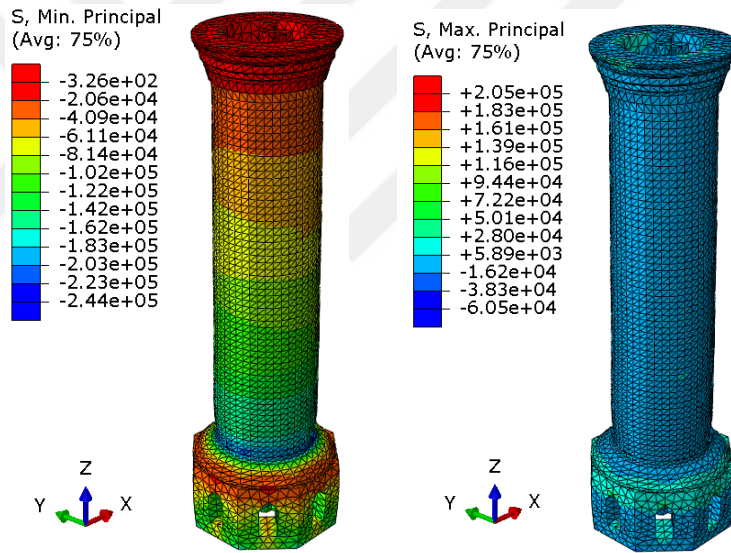
Tarihi minarenin kendi öz ağırlığı (zati yük) altındaki analiz sonucundaki öngörülen deplasman ve gerilme dağılımları Şekil 5.11’de gösterilmektedir. Bu analize göre minarenin kendi öz ağırlığı altındaki en büyük basınç gerilmeleri 0,244 MPa seviyelerindedir. Minare sisteminin emniyetli basınç gerilmesinin 1 Mpa seviyelerinde olduğu dikkate alınırsa minarenin kendi ağırlığı altında basınç dayanımının yeterli olacağı anlaşılmaktadır. Çekme gerilmelerinin basınç gerilmelerinin yaklaşık yüzde 10’u yani 0,24 MPa seviyelerinde olması teorik emniyet çekme gerilmesi olan 0,1 MPa seviyesinin üstünde olduğu görüldüğünden tarihi minare kendi öz ağırlığı altında yönetmeliklerde belirtilen emniyet koşullarını sağlamamaktadır.



(a)

(b)

(c)



(d)

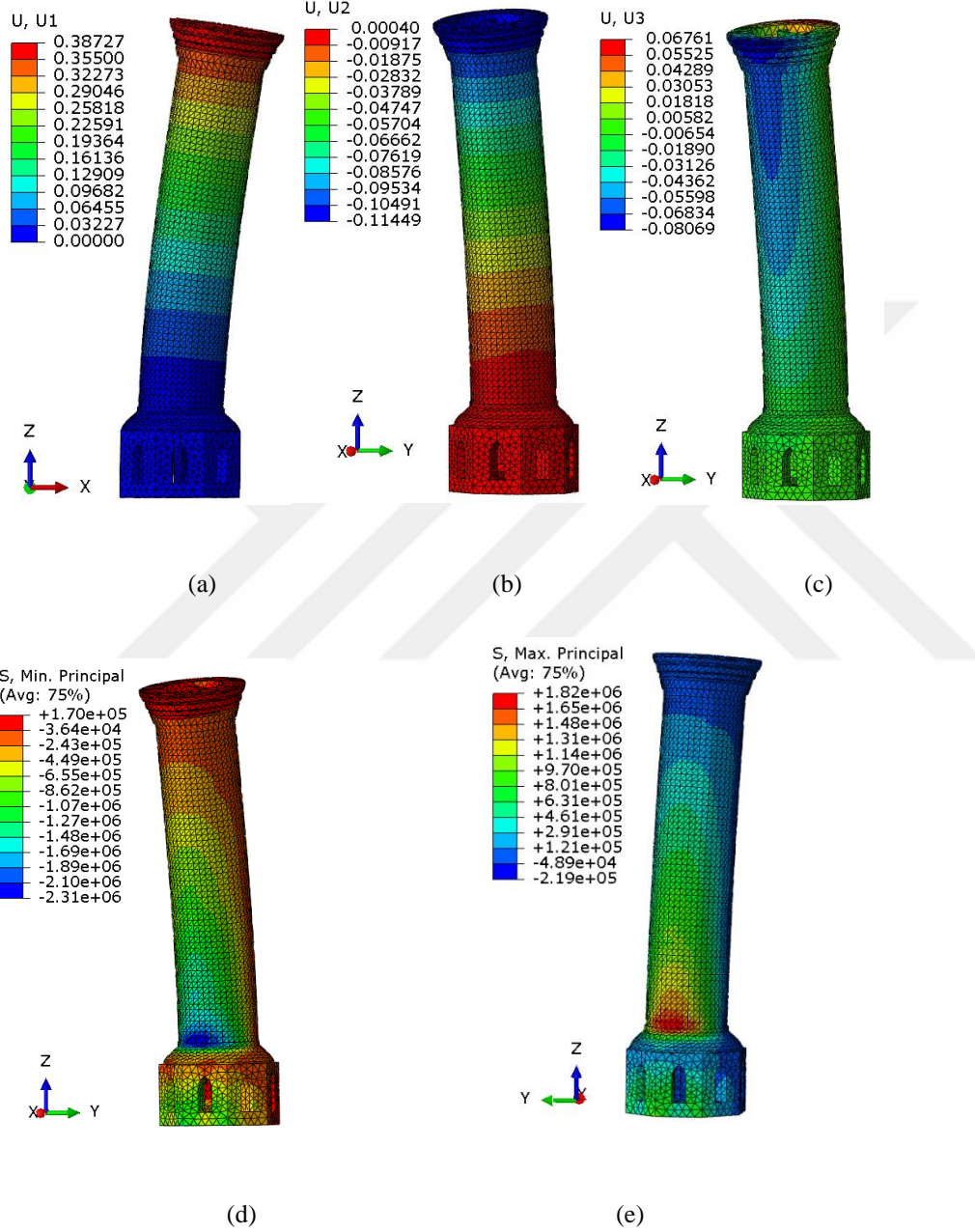
(e)

Şekil 5.11 Minarenin kendi öz ağırlığı altında oluşan yer değiştirmeler (a, b, c - m) ve asal gerilmeler (d, e - MPa).

### 5.2.3 Minare Ölü Yük + Rüzgâr Yükü Altındaki Analizi

Tarihi minarenin kendi öz ağırlığı ve kuvvetli rüzgâr etkisindeki analizlerinden elde edilen deplasman ve gerilmeler Şekil 5.12'de gösterilmektedir. Bu analize göre minare en uç noktasında kuvvetli rüzgâr altında yaklaşık 38 cm yatay deplasmanın meydana gelmesi beklenmektedir. Maksimum çekme basınç

gerilmesinin 2,31 MPa ve çekme gerilmesinin ise 1,82 MPa olarak gerçekleştiği dikkate alındığında, her iki değerde 1,00 MPa emniyetli basınç gerilmesi ve 0,1 MPa emniyetli çekme gerilmesi değerlerini aştığından minare kendi ağırlığı ile kuvvetli rüzgâr altında hem çekme hem de basınç gerilmeleri açısından emniyetli görünmemektedir.



Şekil 5.12 Minarenin zati ağırlığı ile birlikte şiddetli rüzgâr tesirinde oluşabilecek yer değiştirmeler (a, b, c - m) ve en küçük ve en büyük gerilmeler (d, e -MPa).

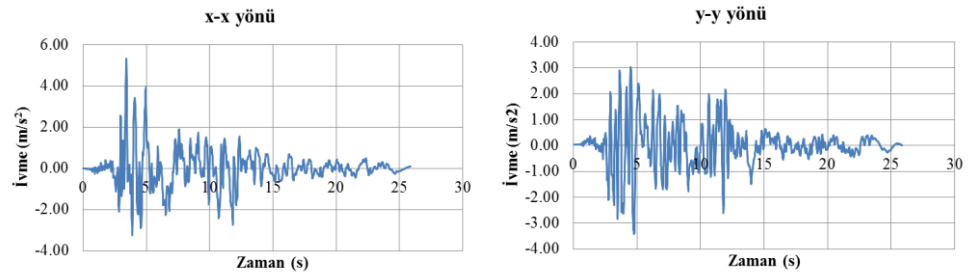
## 5.2.4 Minarenin Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analizi

Minarenin modal analizi sonrasında X ve Y yönünde 1. Eğilme frekans değerleri 0,77 ve 0,74 Hz olarak bulunmuştur. (Çizelge 5.3)

Tablo 5.3 Minarenin ilk beş moduna ait modal frekans değerleri.

Mod	1	2	3	4	5
Frekans (Hz)	0,77	0,74	3,77	3,97	3,98

Deprem Analizleri yapılırken 1999 Kocaeli Depremi İvme Kayıtları (AFAD resmi sitesinden alınan) kullanılarak zaman tanım alanında deprem analizi yapılmış ve analizde göz önüne alınan deprem ivme-zaman kayıtları Şekil 5.13'te gösterilmektedir.

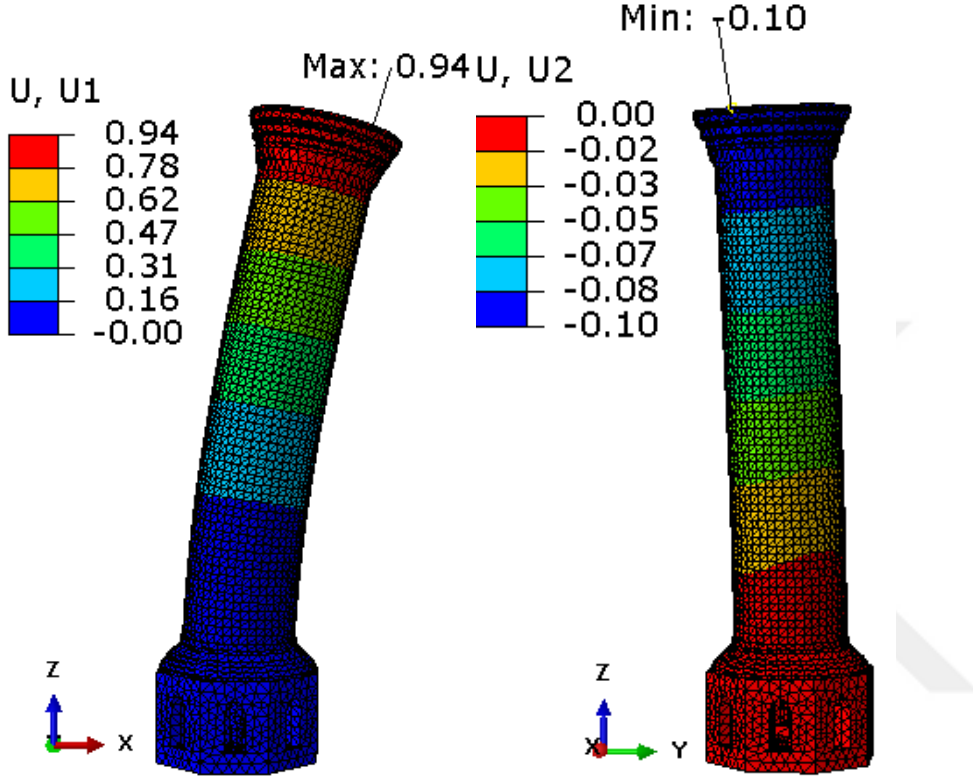


Şekil 5.13 Zaman tanım alanında kullanılan deprem kaydının x ve y yönündeki ivme bileşenleri.

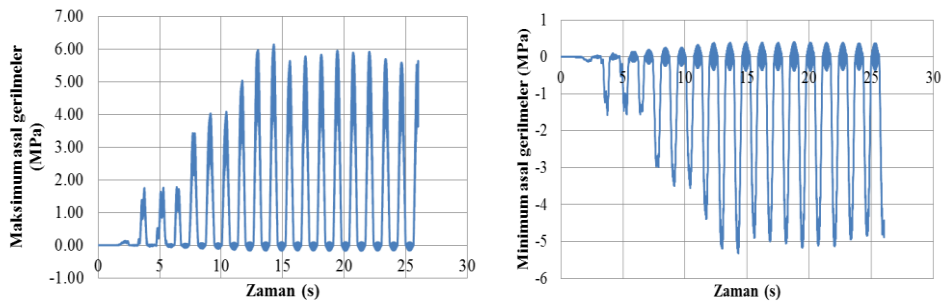
Tarihi minarenin kendi öz ağırlığı (G), hareketli (Q) yükler ve deprem (E) yükü (G+Q+E) altında yapılan doğrusal analiz sonucunda minarede X ve Y doğrultularındaki muhtemel en büyük şekil değiştirme değerleri Şekil 5.14'de verilmiştir. Buna göre minarede en üst noktasında 94 cm'e varan yer değiştirmeler beklendiğinden, böyle bir deplasman büyüklüğü altında bu yapının yıkılması kaçınılmaz görünmektedir.

Şekil 5.14'te zaman tanım alanındaki analize göre deprem anında oluşabilecek muhtemel maximum çekme gerilmesi-zaman grafiği ile minarede oluşacak en büyük çekme gerilmesi değerleri gösterilmektedir. Şekillerde yer alan verilere göre en büyük çekme gerilmesi 5,1 MPa seviyesinde en büyük basınç gerilmeleri 5,2 MPa seviyelerindedir. Özellikle, 5,1 MPa seviyesindeki çekme

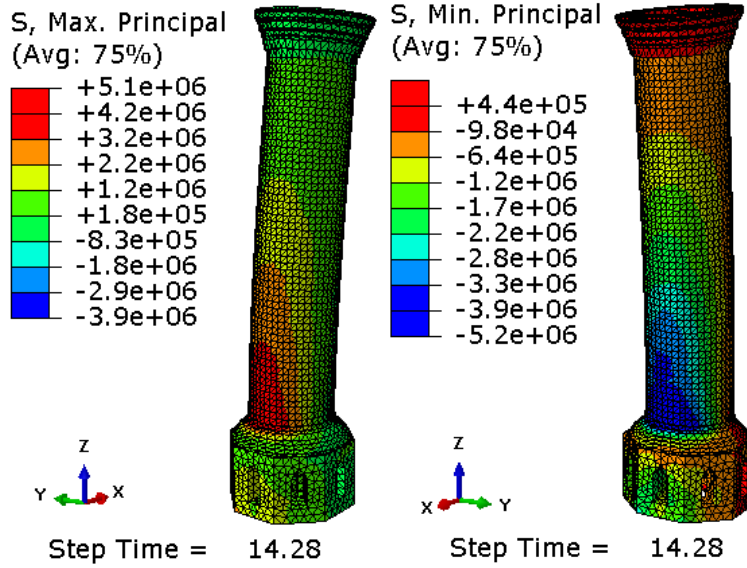
gerilmesi 0,1 MPa olarak tespit edilen çekme emniyet gerilmesinin kat kat üstündedir. 1 MPa basınç emniyet gerilmesi de aşılmış olduğundan yapıda deprem anında büyük hasarlar oluşması hatta ani şekilde göçme olması beklenmektedir.



Şekil 5.14 Deprem altında minarede oluşan en büyük ve en küçük yer değiştirmeler (m).



Şekil 5.15 Minarede oluşabilecek çekme ve basınç gerilmelerinin zamana göre değişimi.



Şekil 5.16 Minarede oluşabilecek çekme ve basınç gerilmelerinin dağılımı (Pa).

### 5.2.5 Minarede Kullanılan Bilgisayar Programı (ARTEMIS 4.0)

Artemis programı operasyonel modal analiz ve deneysel modal analizler yapabilmeyi sağlayan bir bilgisayar programıdır. Bu yazılım ile mod şekilleri, doğal frekans ve sönüm oranları modları çıkarılabilmektedir. Operasyonel Model Analiz (OMA) için kullanılan bu yazılım Deneysel Model Analiz (DMO) için de kullanılmaktadır. Artemis yazılımında Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD) ve Stochastic Subspace Identification (SSI) yöntemleri kullanılmaktadır.

EFDD metoduna göre ölçülen (çıktı) ivmeölçerlerin dataları ile frekans tanım alanında meydana getirilen spektral matrislere tekil değer ayrışımı uygulanarak modal parametreler tahmin edilmeye çalışılır. Sistemi etkileyen ortamsal titreşim etkisinin fonksiyonun geniş bantlı ve sistem düşük sönüm değerlerinde olursa, tekil değer oto-spektral yoğunluk fonksiyonuna tekabül etmektedir. Oto-spektral yoğunluk fonksiyonları tek serbestlik dereceli bir sistem olup frekans tanım alanında meydana gelir. Bu fonksiyonlar kesikli ters Fourier dönüşümüne tabi tutularak modal parametreler belirlenmeye çalışılmaktadır.

SSI metodunda ise, ivme ölçümler baz alınarak doğrusal faz uzayı formunda teşkil edilen matematiksel model yardımıyla analizler yapılmaktadır. Ölçülen ivme tepkilerinden Hankel matrisi meydana getirilir. Bu matris yatayda ikiye ayrılarak geçmiş ve gelecek olarak tanımlanır. Bu alt matrislerden hesaplanan

projeksiyon matrisi gözlemlenebilirlik ile Kalman faz matrisinin çarpılmasıyla meydana gelir. Projeksiyon matrisinin tekil değerler indirilmesi yapılır. Bulunan bu tekil değerlere isabet eden vektörlerden modal parametreler bulunmaktadır. Modal parametrelerin tahmin edilmesi sırasında alt uzay boyutu esas alınarak oluşturulan Blok Hankel matrisi sayısal ve fiziksel modları kendi içerisinde bölümlendirilmektedir. Sayısal ve fiziksel mod ayrıştırması artan alt-uzay boyutları için meydana getirilen stabilizasyon diyagramı ile yapılır. (Mısır vd., 2017)

Bu teknik ile modal parametreleri daha doğru tahmin edilmesi, gürültü ve diğer dengesiz modların ayrıştırılması ve yapının sağlıklı incelenmesi mümkün olmaktadır.

### 5.2.6 İskele İle Desteklenme Öncesi Minarenin Deneysel Model Analizi

Bilgisayarda modeli oluşturulan tarihi yapının doğal frekansı ve mod şekilleri sonlu elemanlar metodunda bazı kabullere dayalı olarak gerçekleştirilmiş idi. Bu bölümde yapılan çalışmada daha gerçekçi veriler elde edebilmek için deneysel operasyonel modal analiz yöntemi uygulanarak sonuçlar karşılaştırılacaktır.

Deneysel operasyonel modal analizi, yapıya ivme ölçerlerin yerleştirilerek bu cihazlardan alınan veriler doğrultusunda bilgisayar ortamında mod şekilleri, doğal frekans gibi dinamik parametrelerin bulunmasıdır. Ayrıca, minare alt dokuyu oluşturan kaide bölümü avlu duvarlarında flat jack deneyi yapılarak deneysel elastisite modülü bulunmaya çalışılmıştır. Yapının tuğla örgülü bölümü hasarlı olduğundan tuğla petekte böyle bir çalışma yapma imkânı olamamıştır.

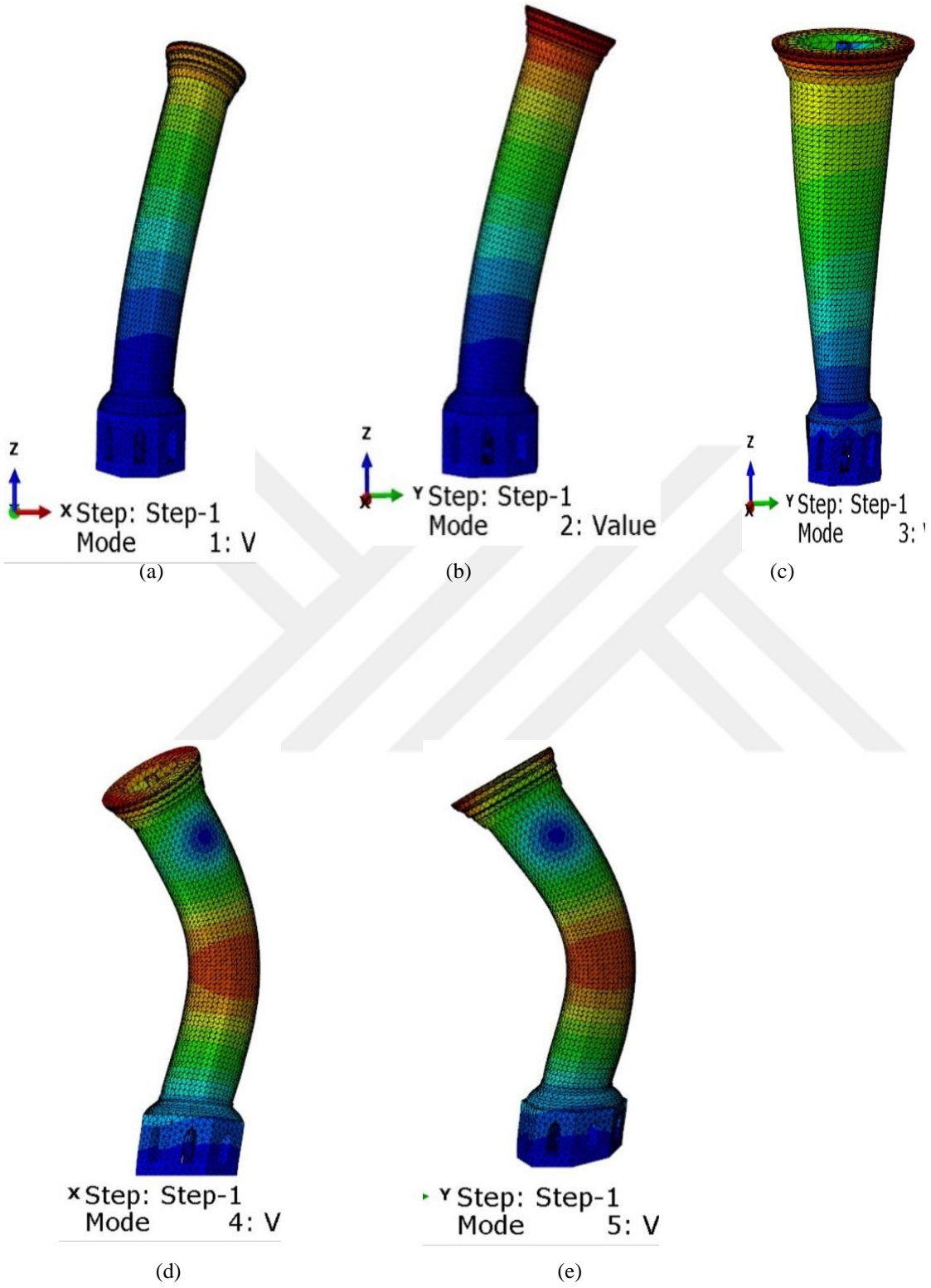


Şekil 5.17 Kaide-zemin ve minare içi ivme ölçerler.



Şekil 5.18 Minare en üst nokta ivme ölçerler ve veri toplama cihazı.

Bu çalışmada yapının dinamik karakteristikleri (frekans ve mod şekilleri) modal analiz yapılarak belirlenmiştir. Mevcut durumundaki hasar ve çatlaklar göz önüne alınarak yığma tuğla duvar elastisite modülü başlangıç değeri 180 MPa olarak alınmıştır. Modal analizden elde edilen ilk beş teorik mod şekilleri ve frekans değerleri aşağıda verilmiştir (Şekil 5.19).



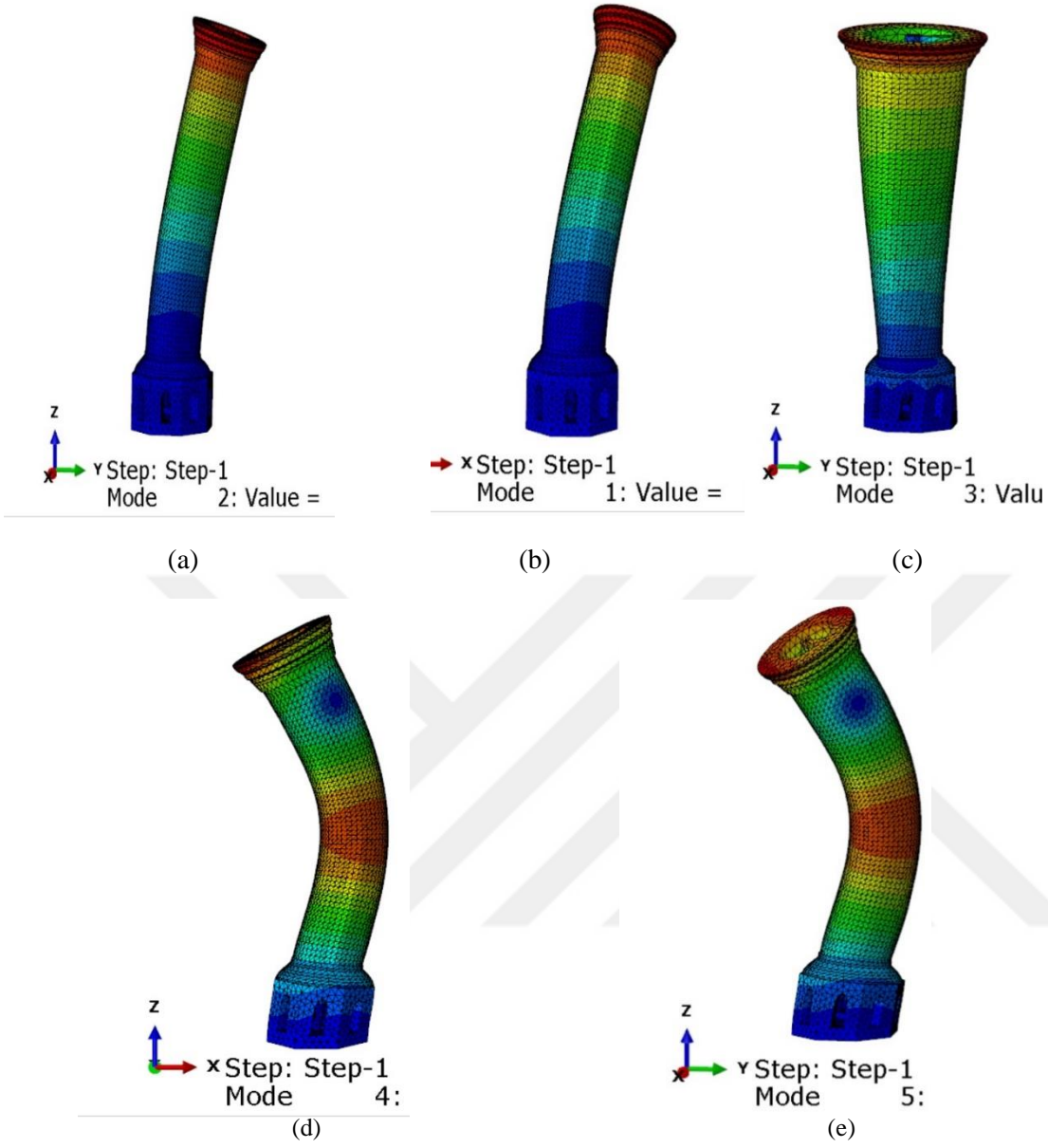
Şekil 5.19 Kalibrasyon öncesi mod şekilleri (a= mod1 x, b=mod2 y, c=burkulma, d=mod4 x, e= mod5 y).

OMA deneyi yapılarak minarenin deneysel frekansları ve sönüm oranları hesaplanmıştır. Elde edilen değerler aşağıda tablo olarak verilmiştir (Tablo 5.4).

Tablo 5.4 Kalibrasyon öncesi minarenin ilk beş moduna ait deneysel frekans değerleri.

Mod	1	2	3	4	5
Frekans (Hz)	0,77	0,77	3,78	3,98	3,98

Teorik ve deneysel frekanslar arasında farklar olduğu görülmüştür. Teorik frekans değerleri deneysel frekans değerlerine yaklaştırılarak minarenin sonlu eleman modeli kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibre edilmiş sonlu eleman modeli kullanılarak elde edilen teorik frekans ve mod şekilleri aşağıda sunulmuştur (Şekil 5.20 ve Tablo 5.5).



Şekil 5.20 Kalibrasyon sonrası mod şekilleri (a= mod1 x, b=mod2 y, c=burkulma, d=mod4 x, e = mod5 y).

Tablo 5.5 Kalibrasyon sonrası minarenin ilk beş moduna ait deneysel frekans değerleri (destek iskelesi öncesi).

Mod	1	2	3	4	5
Frekans (Hz)	1,489	1,490	7,314	7,700	7,709

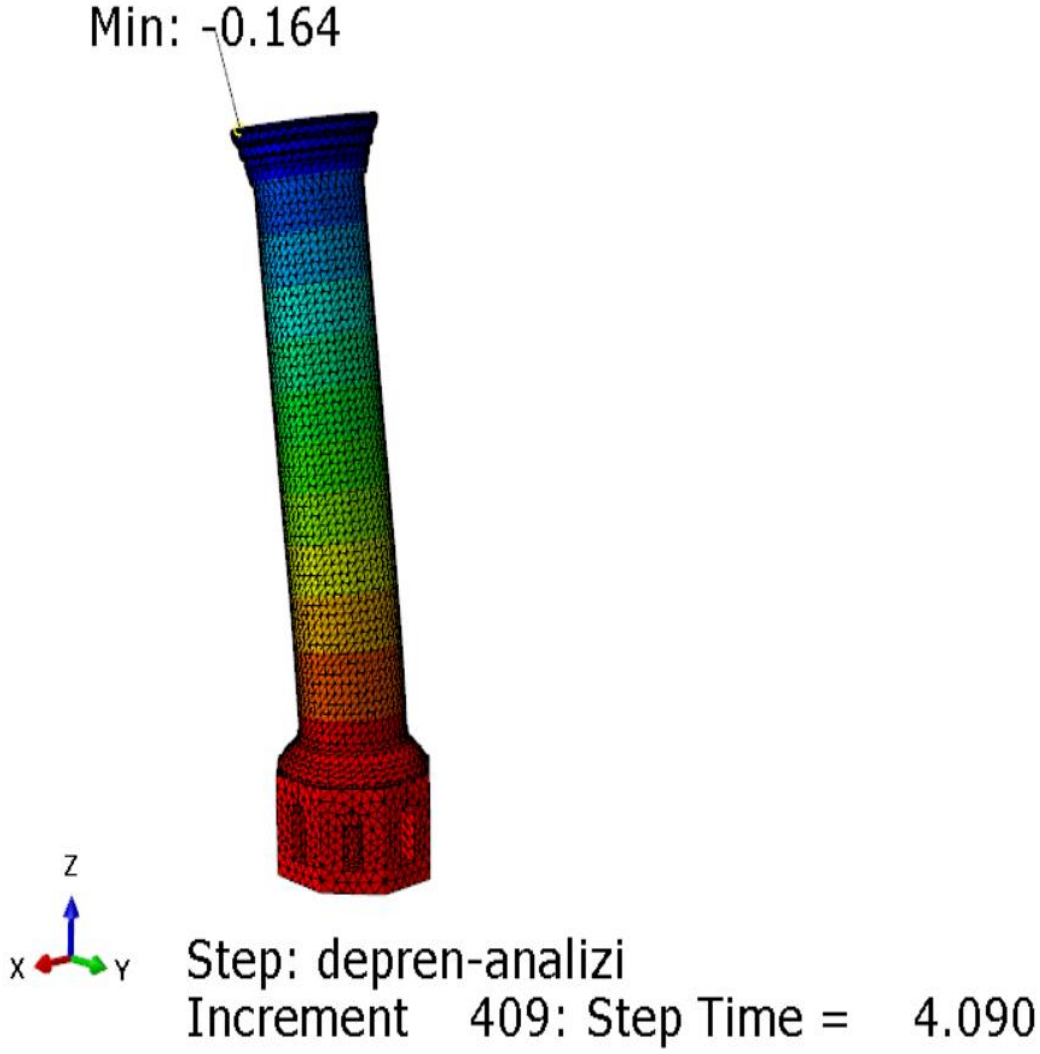
Kalibre edilen model kullanılarak elde edilen mod şekillerinin deneysel mod şekilleri ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Bu durum sonlu eleman

modelinin yapısal davranışı gerçeğe yakın olarak temsil edeceğini göstermektedir. Sonlu eleman model kalibrasyonunda malzeme parametrelerinden faydalanılmıştır. Başlangıçta 180 MPa olan elastisite modülü, kalibrasyon sonrası 675 MPa olarak belirlenmiştir.

Minarenin zaman tanım alanında sonlu elemanlar analizinde de değinildiği üzere 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi ivme kayıtlarında maksimum ivme değerine sahip olan doğu-batı bileşeni kullanılmıştır.

Minarenin karmaşık geometriye sahip olması ve eleman sayısının fazlalığından dolayı zaman tanım alanında deprem analizleri uzun sürmektedir. Bu nedenle analiz süresini kısaltmak amacı ile ivme kaydının Doğu-batı bileşeninin etkili 10 saniyelik kısmı deprem analizinde kullanılmıştır. Deprem verileri minareni tabanından y yönünde etkilmiştir.

Yapılan analiz sonrasında minarede meydana gelen maksimum yatay yer değiştirmenin minare tepe noktasında ve 16 cm olarak meydana geldiği görülmüştür (Şekil 5.21). Meydana gelmesi muhtemel yer değiştirme büyüklüğü dikkate alındığında söz konusu minarenin deprem performansının yeterli olmadığı görülmektedir.



Şekil 5.21 Analiz sonrası minare tepe noktasında meydana gelen yer değiştirme (m).

### 5.2.7 İskele İle Desteklenme Sonrası Minarenin Deneysel Model Analizi

Bu bölümde yine minarede uygulanan destek iskelesi sonrası deneysel operasyonel modal analizi yapılarak, yapıya ivme ölçerlerin yerleştirilmiş bu cihazlardan alınan veriler doğrultusunda bilgisayar ortamında mod şekilleri, doğal frekans gibi dinamik parametreler elde edilmeye çalışılmıştır.



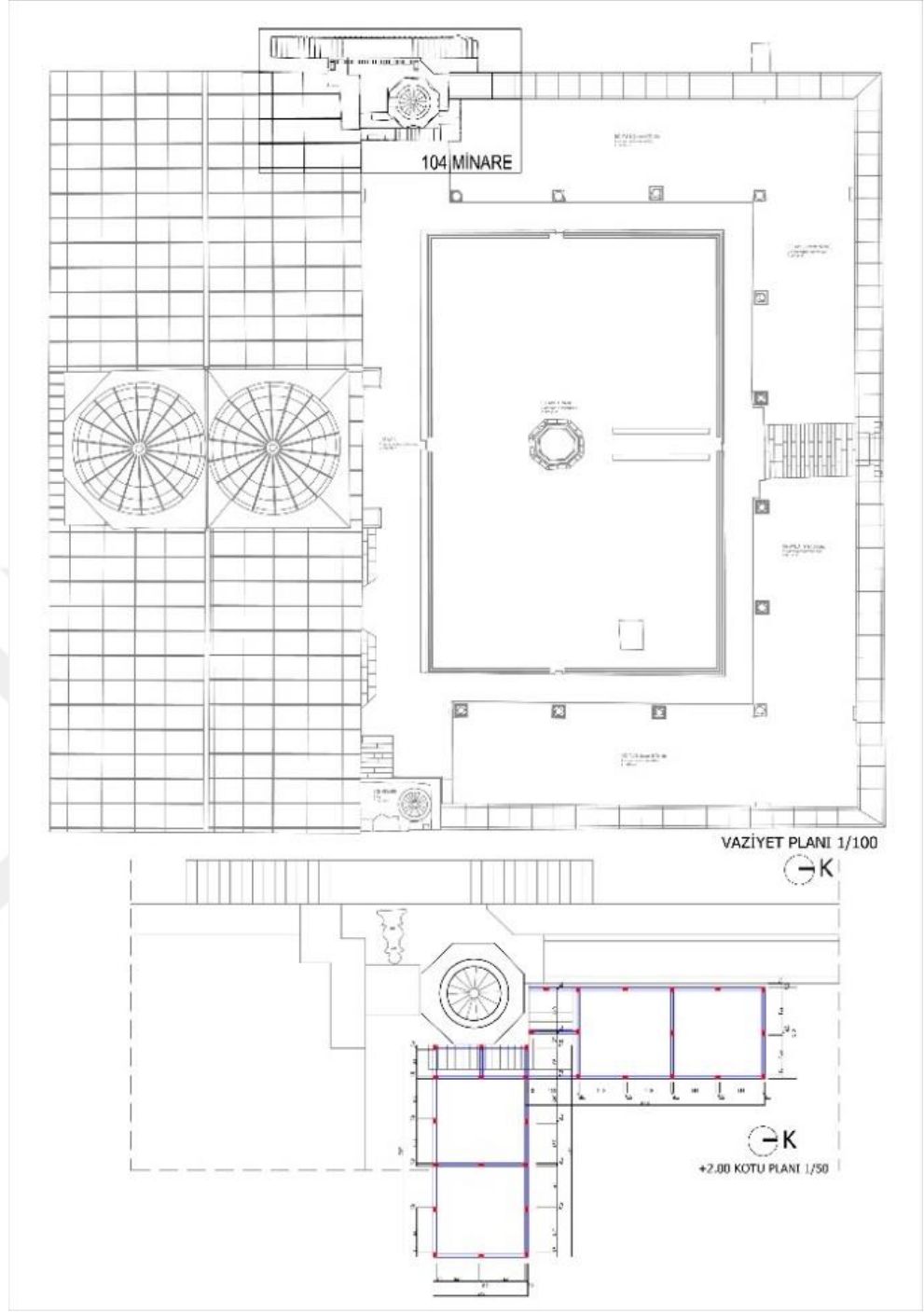
Şekil 5.22 Minare destek iskele yapılma çalışmaları.



Şekil 5.23 Minare destek iskelesi tamamlanmış hali.

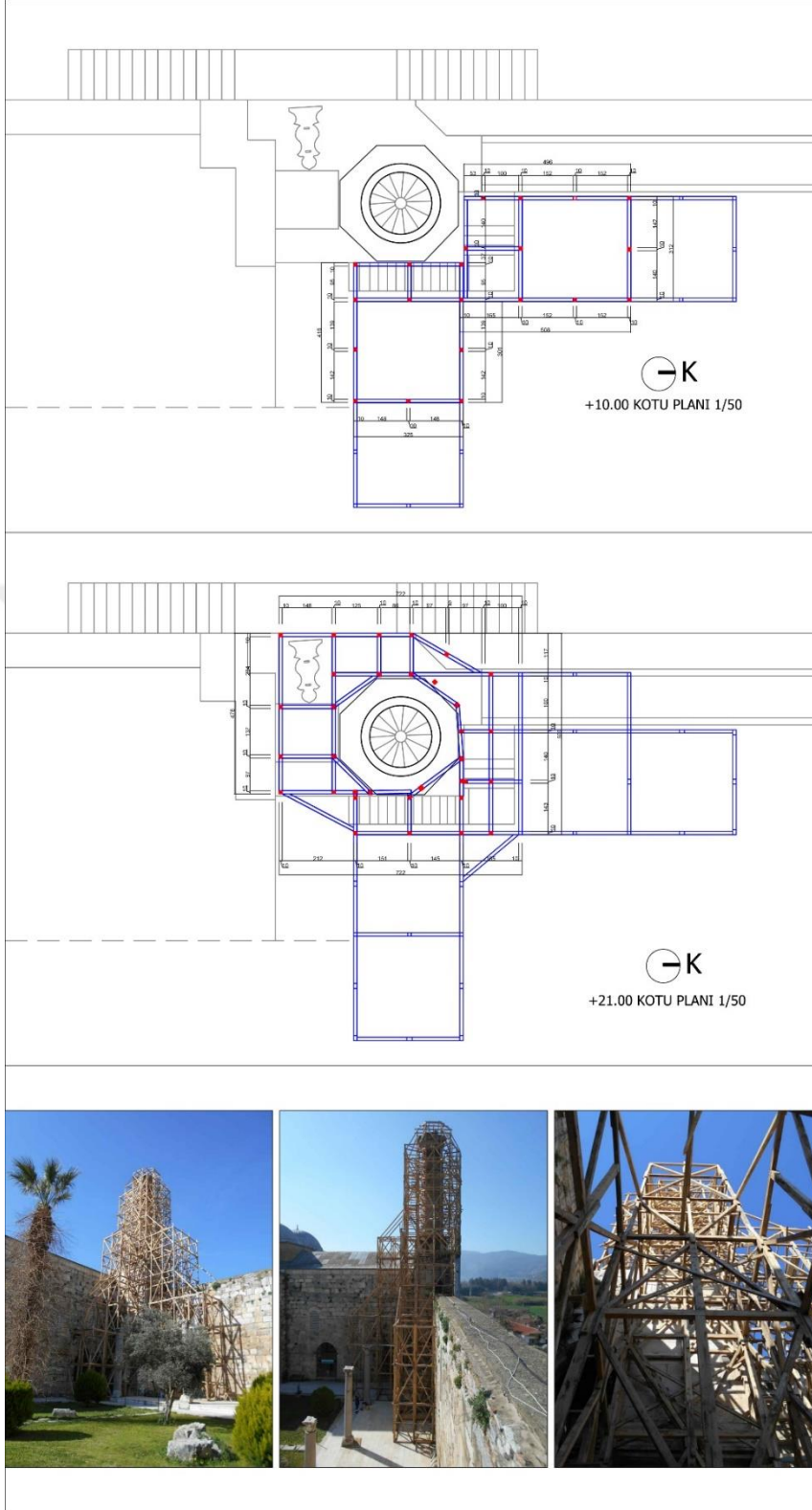


Şekil 5.24 Minare gövdesine ek çelik bilezik uygulaması ve ahşap destek iskelesinin kauçuk ile yapıya bağlanması.



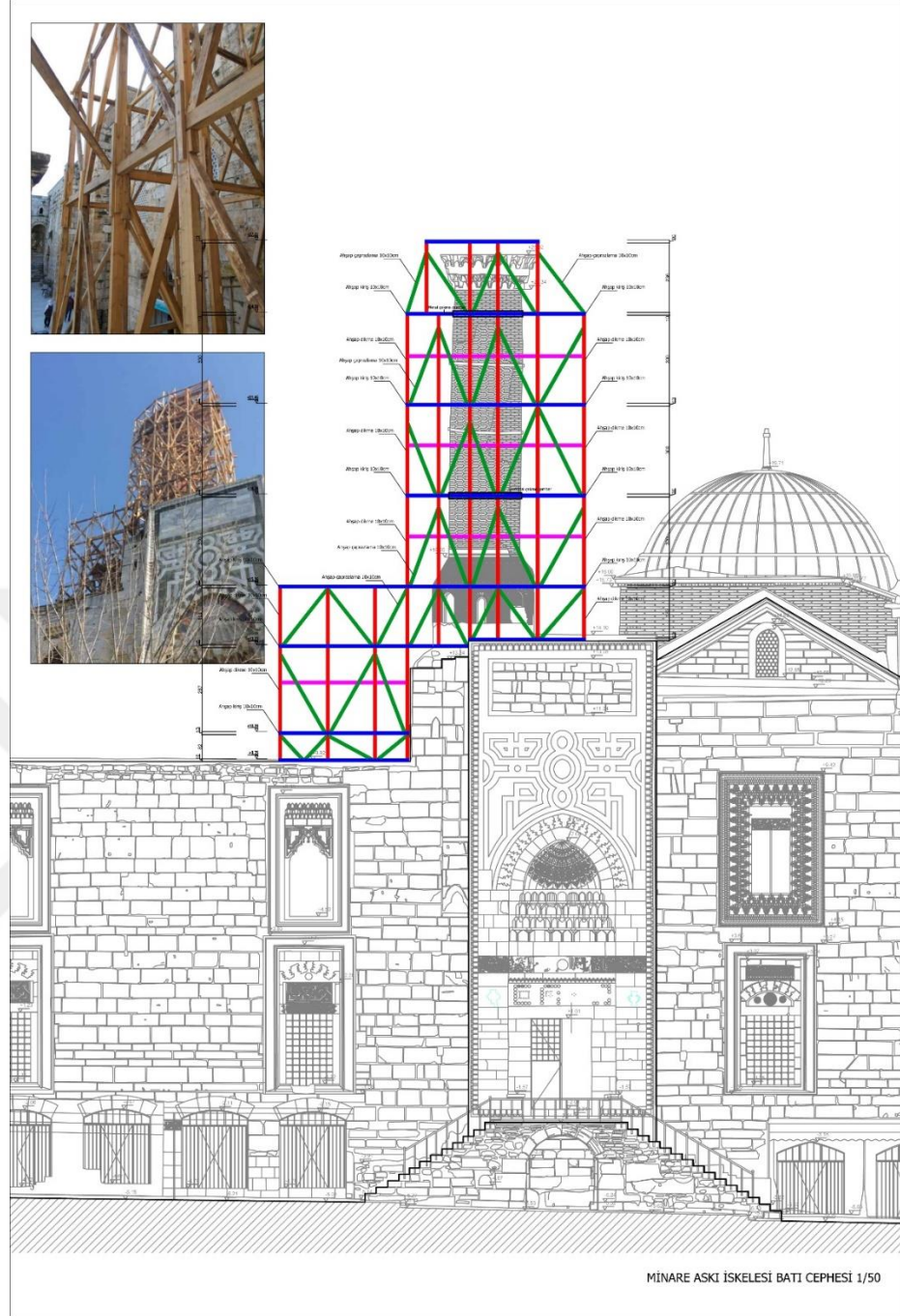
Şekil 5.25 Camii ve uygulama yapılan minare vaziyet planı.

Yukarıda camii minare gövdesine yönelik ek çelik bilezik uygulaması Şekil 5.24) ile minare vaziyet planı görülmektedir. (Şekil 5.25)



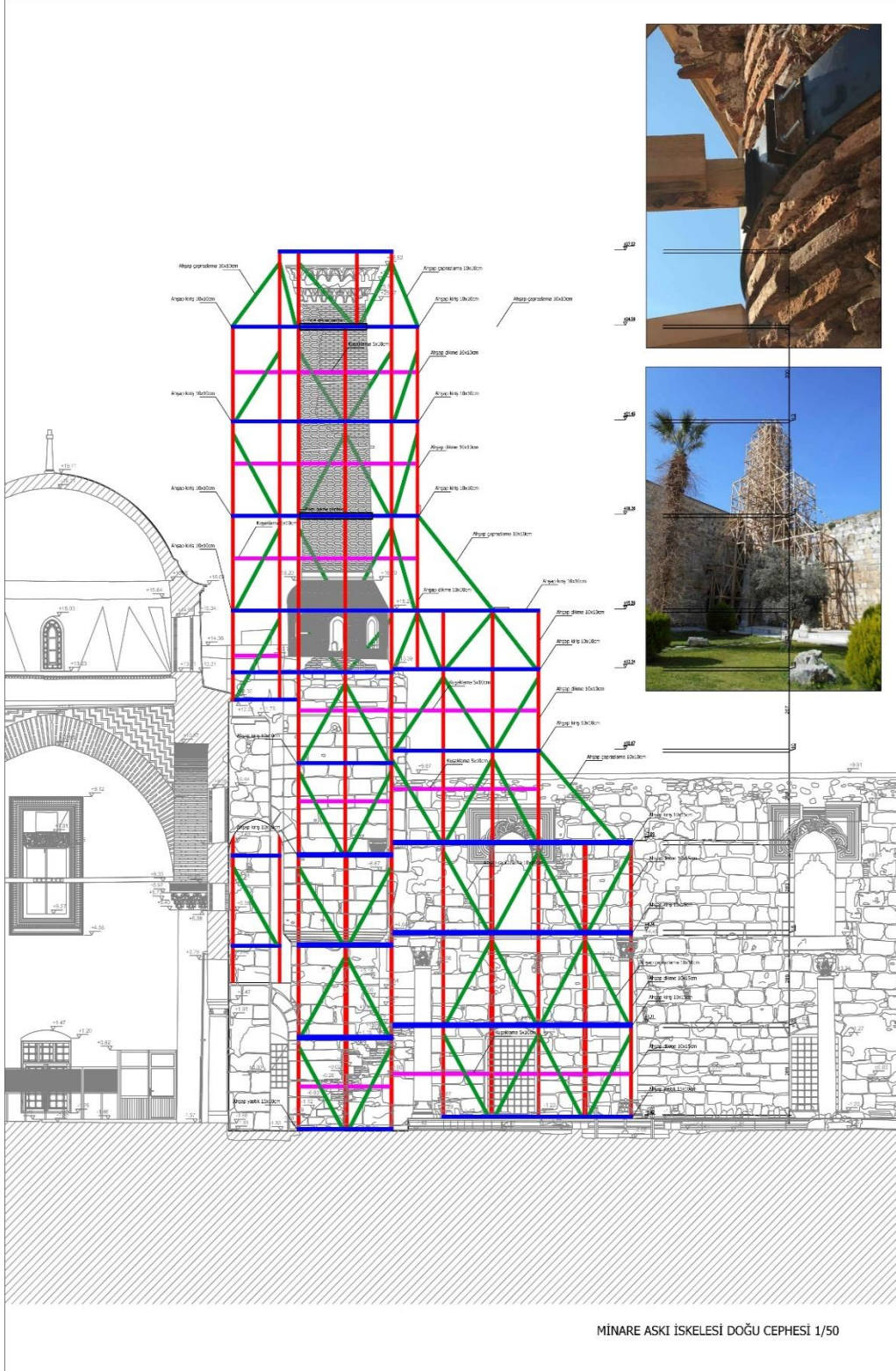
Şekil 5.26 Minare kot planları.

Minare kot planları fotoğraflarla birlikte verilmektedir. (Şekil 5.26)



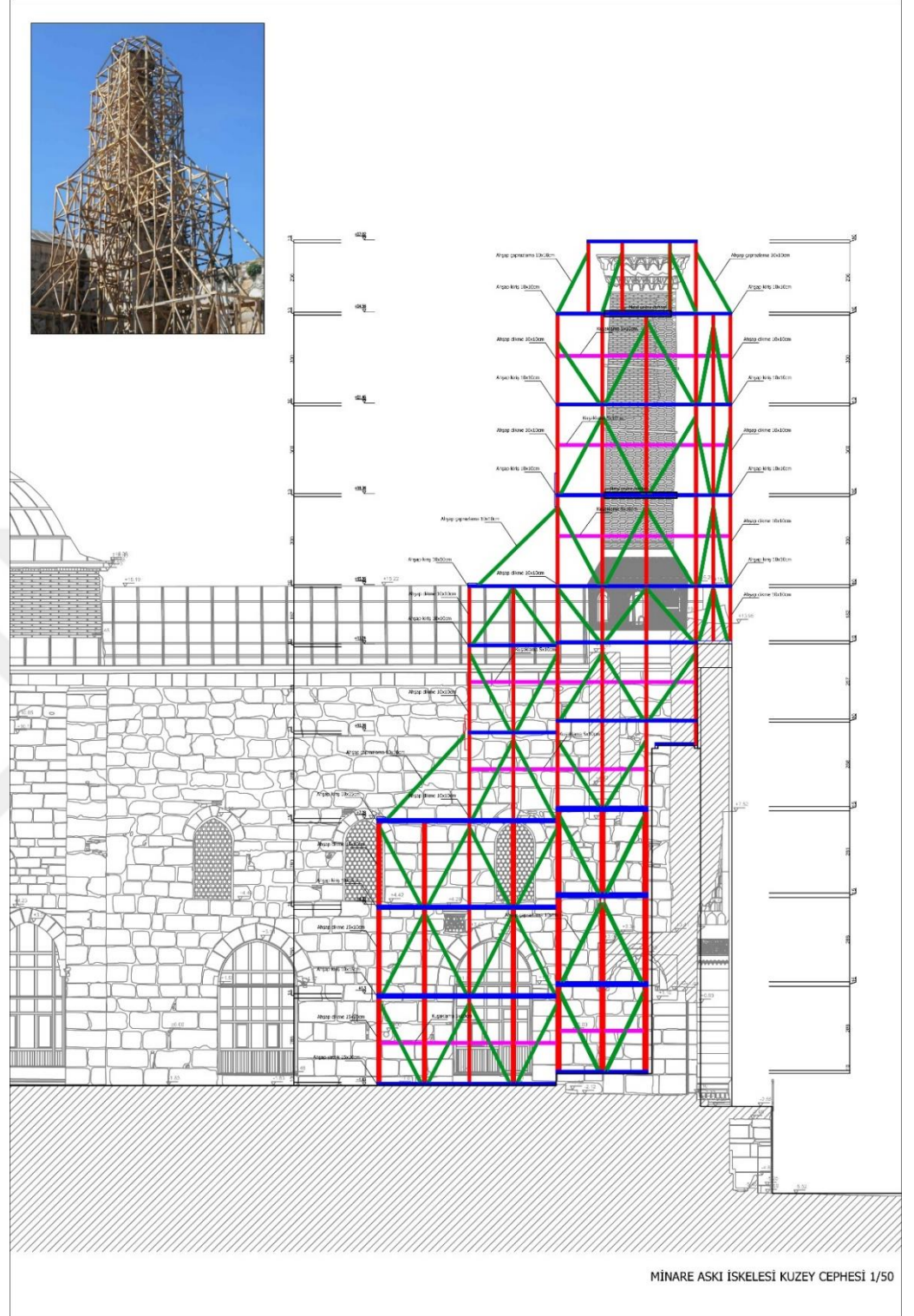
Şekil 5.27 Minare batı cephe destek iskelesi görünüm.

Yine, minare batı cephesi uygulama fotoğrafları ile verilmektedir. (Şekil 5.27) Ahşap kiriş, ahşap dikmeler ve ahşap çaprazlamalar 10x10 cm olarak imal edilmiştir.



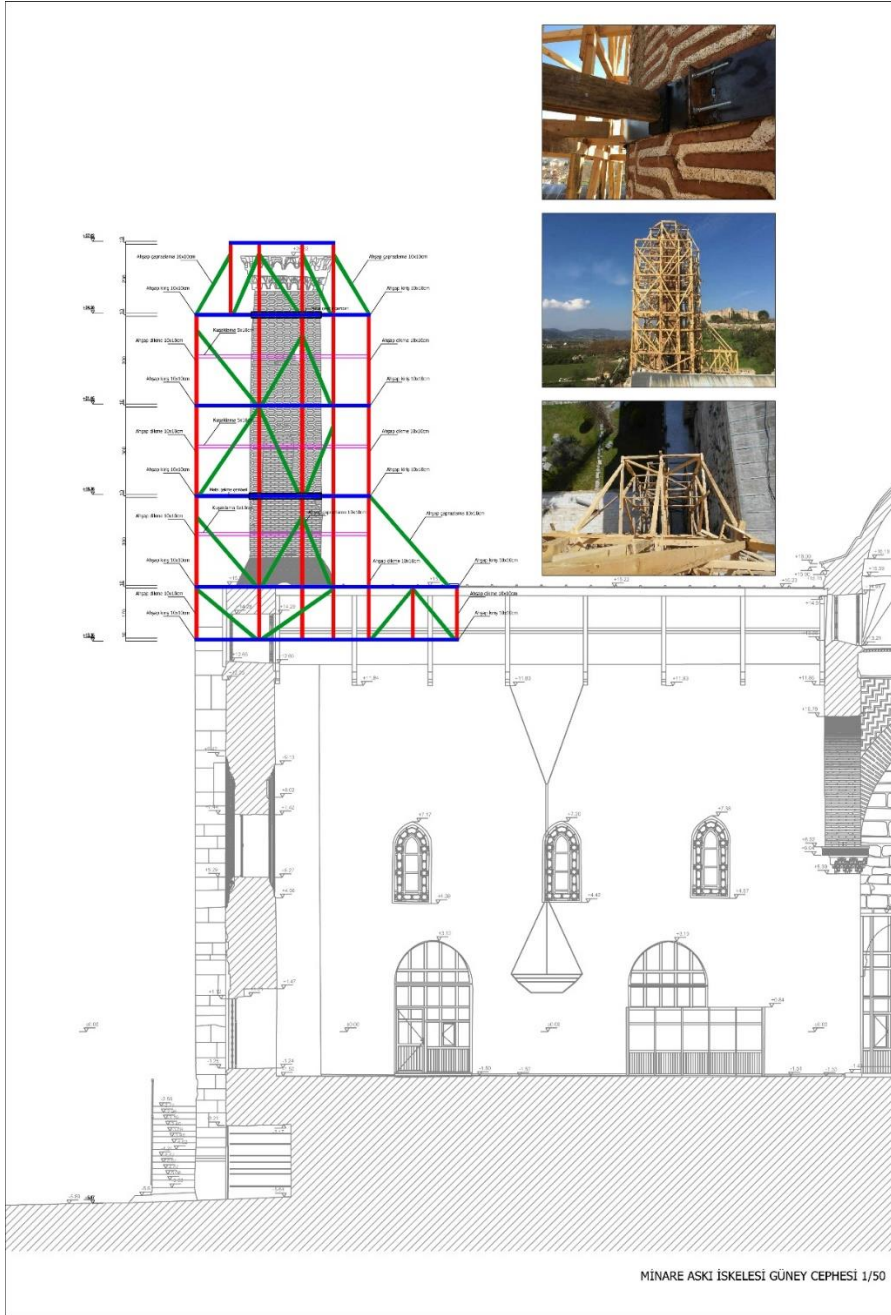
Şekil 5.28 Minare destek iskelesi doğu cephesi görünüm.

Burada da minare doğu cephesi uygulama fotoğrafları ile verilmektedir. (Şekil 5.28) Ahşap kiriş, ahşap dikmeler ve ahşap çaprazlamalar ilk dört sıra 10x15, diğer yerler 10x10 cm olarak imal edilmiştir.



Şekil 5.29 Minare destek iskelesi kuzey cephesi görünüm.

Burada da minare kuzey cephesi uygulama fotoğrafları ile verilmektedir. (Şekil 5.29) Ahşap kiriş, ahşap dikmeler ve ahşap çaprazlamalar ilk dört sıra 10x15, diğer yerler 10x10 cm olarak imal edilmiştir.



Şekil 5.30 Minare destek iskelesi güney cephesi görünüm.

Son olarak minare güney cephesi uygulama fotoğrafları ile verilmektedir (Şekil 5.30). Ahşap kiriş, ahşap dikmeler ve ahşap çaprazlamalar 10x10 cm olarak imal edilmiştir.

Tarihi minarenin etrafına destek iskelesi yapılmasının ardından, bu aşamada da ivme ölçerler yardımıyla son durum frekans değerleri elde edilmiştir. Aşağıda destek iskelesi sonrası yerleştirilen ivme ölçerlerin ilk iki noktası gösterilmektedir (Şekil 5.31)



Şekil 5.31 Kaide-zemin ve minare girişi ivme ölçerler-iskele sonrası.

Yine Operasyonel Model Analiz yöntemiyle elde edilen frekans değerleri Artemis 4.0 programında işlenerek ahşap destek iskele sonrası deneysel frekans değerleri bulunmuş aşağıda tablo halinde verilmektedir. (Tablo 5.5)

Tablo 5.6 Kalibrasyon sonrası minarenin ilk beş moduna ait deneysel frekans değerleri (destek iskelesi sonrası).

Mod	1	2	3	4	5
Frekans (Hz)	1,54	2,09	4,43	5,31	7,62

Minarenin ahşap iskele ile desteklenmesi sonrası elde edilen frekans değerlerinde destek öncesi değerlere göre çok anlamlı değişiklikler görünmemektedir. Bunun temel nedenlerinden biri olarak yukarıda şekil 5.24'te gösterildiği gibi ahşap destek iskelesinin minareye bağlandığı (ek yeni çelik kuşaklamaların bulunduğu 24,52 ve 16,32 kotları) noktalarda ahşap destek iskelesi ile ek çelik kuşak arasında konan 5,00 cm kalınlığında olan kauçuğun etki edebileceği kanaatine varılmıştır.

Ahşap destek iskelesi tasarlanırken sistemde minarenin rijitliğini değiştirmeden sınırlı deplasmana izin verilmesi uygun görülmüştür. Böylelikle hem yapıda deprem anında uygulanan ahşap destek sistemin minareye destek olarak oluşacak maksimum deplasmanların azaltılması hem de çevre güvenliğinin artırılması amaçlanmıştır. Sınırlı deplasmana izin verilmesiyle deprem anında minarenin yıkılmasının engellenerek meydana gelecek enerjinin ahşap destek iskelesi tarafından söndürülmesiyle yapının korunması açısından daha iyi alınabileceği öngörülmüştür. Minarenin ahşap iskele ile desteklenmesi sonrası frekans değerlerinde büyük değişiklikler meydana gelmediğinden Abaqus

programında yeni analizler oluşturulması yerine ahşap destek iskelesinin minareye bağlandığı ek çelik kuşak bağlantı noktalarında oluşan deplasmanlar bulunarak, SAP2000 programında bu deplasmanların oluşturulan ahşap destek iskelesi tarafından ne kadarının karşılanabileceği irdelenmiştir.

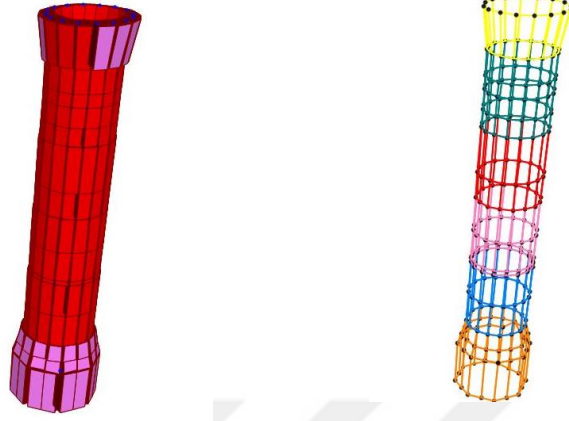
Yapılan analizler sonucu Abaqus programında minare en üst kotu olan 26,52 kotunda 16 cm, 2,00 mt aşağısı olan 24,52 ek çelik kuşak bağlantısı kotunda 14 cm ve yine en üst kottan 8,20 mt aşağısı olan 16,32 ek çelik bağlantı kotunda 9 cm yer değiştirme olduğu görülmüştür.

Tarihi minare SAP2000 programında modellenirken ahşap iskele elemanları çubuk eleman, minare ise kabuk eleman olarak tanımlanmıştır. Ahşap birim ağırlığı 500 kg/m<sup>3</sup> tuğla ise taş merdiven basamakları da düşünülerek 1.850\*2= 3700 kg/ m<sup>3</sup> alınmıştır. Kolonların zeminle temas ettiği mesnetler ankastre mesnet olarak, minarenin minare portaline temas ettiği noktalar basit mesnet olarak tanımlanmıştır.

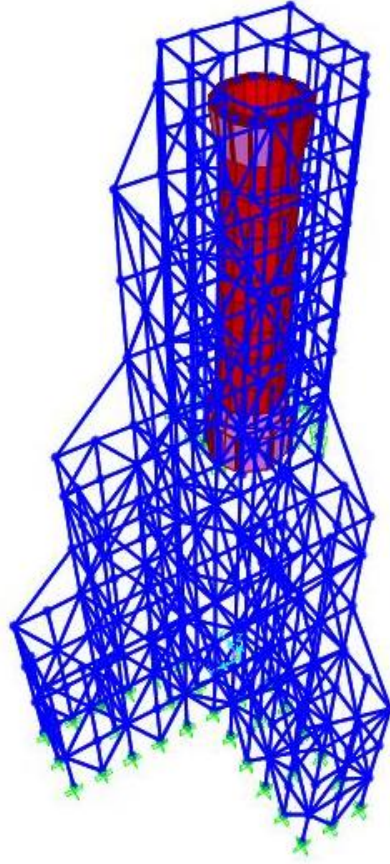
Material Property Data	
<b>General Data</b>	
Material Name and Display Color	AHSAP
Material Type	Other
Material Grade	
Material Notes	Modify/Show Notes...
<b>Weight and Mass</b>	
Weight per Unit Volume	4.903E-06
Mass per Unit Volume	5.000E-10
<b>Units</b>	
	N, mm, C
<b>Isotropic Property Data</b>	
Modulus Of Elasticity, E	10000.
Poisson, U	0.2
Coefficient Of Thermal Expansion, A	1.170E-05
Shear Modulus, G	4166.6667
<input type="checkbox"/> Switch To Advanced Property Display	
OK Cancel	

Şekil 5.32 Ahşap destek iskelesi malzeme özellikleri (SAP2000).

Programda hazırlanan tuğla minare görünümleri şekil 5.33'te, sistem genel gösterimi 5.34'te gösterilmektedir.

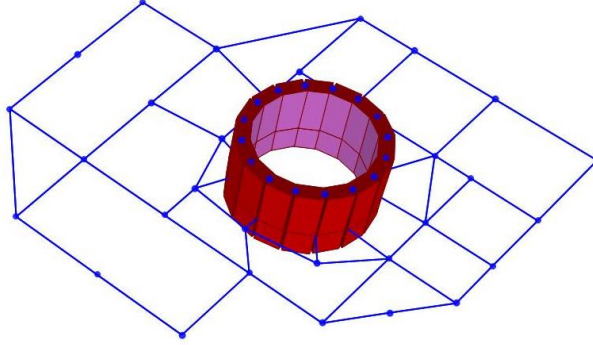


Şekil 5.33 Tuğla minare görünümleri (SAP2000).



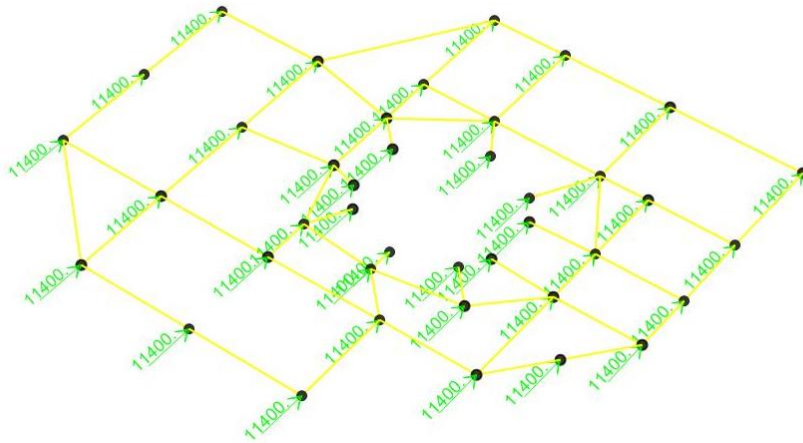
Şekil 5.34 Ahşap destek iskele genel görünüm (SAP2000).

Tarihi minarede daha önce de bahsedildiği gibi alt çelik kuşak bağlantı kotunda (16.32 mt.) teorik deprem anında 9 cm, üst çelik bağlantı noktasında (24.52 mt) ise 14 cm yer değiştirme olduğu tespit edilmiş bu kotlardaki sistem detayı aşağıda verilmektedir. (Şekil 5.35)



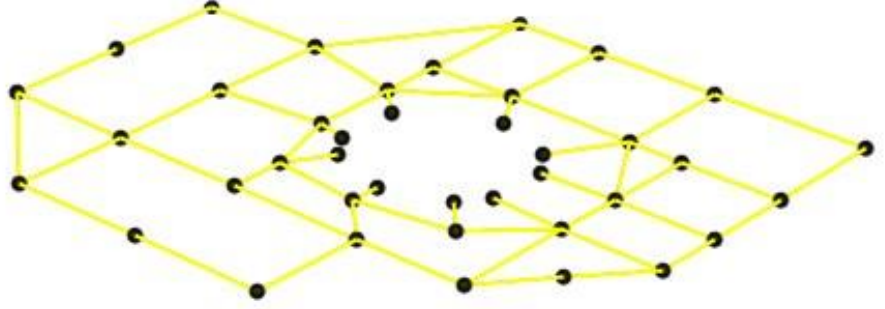
Şekil 5.35 Ek çelik bağlantı noktalarının gösterimi (SAP2000).

Sistemde ek çelik kuşak noktası olan 16.32 mt. kotunda meydana gelen 9 cm'lik yer değiştirmeye meydana gelmektedir. Minare ile destek iskelesi ile 5 cm kalınlığında kauçuk bulunduğundan yaklaşık olarak %50 oranında kauçuğun deplasmanı azalttığı kabulü ile  $9,00 - 2,50 = 6,50$  cm'e eşdeğer  $11.400 \text{ Newton} * 40 \text{ düğüm noktası} = 456.000,00 \text{ Newton}$  sisteme etkilmiştir. Kuvvetin orantılı olarak dağıtılabilmesi için x ve y yönünde çelik kuşak kotunda rijit diyagram tanımlanmıştır.

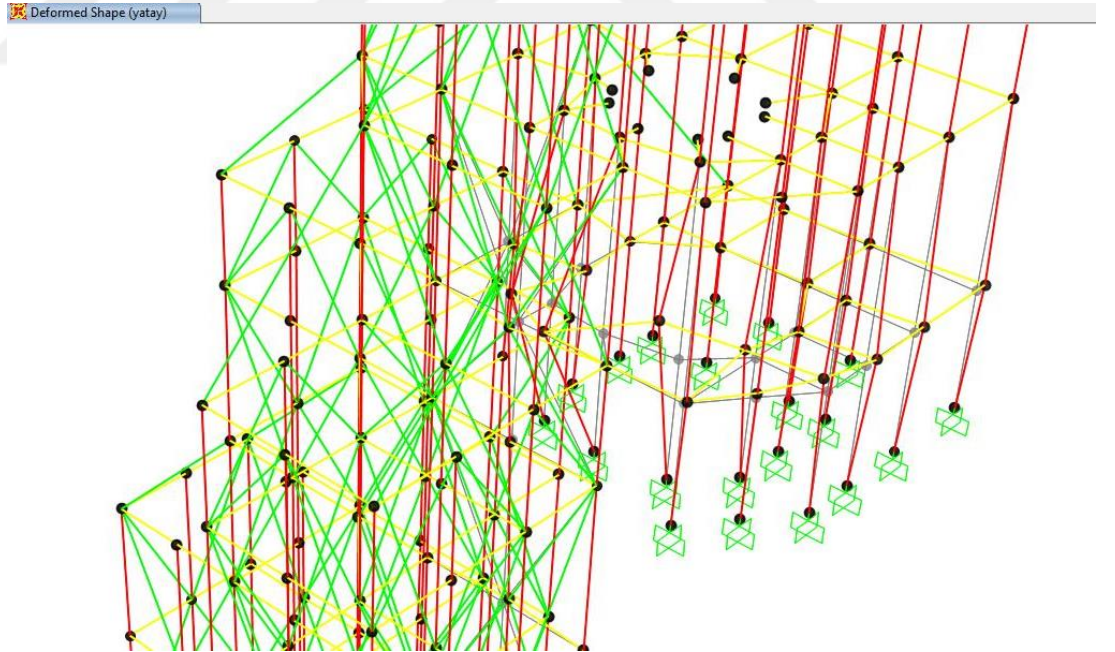


Şekil 5.36 Ek çelik bağlantı noktasında etkililen yatay yüklerin gösterimi (SAP2000).

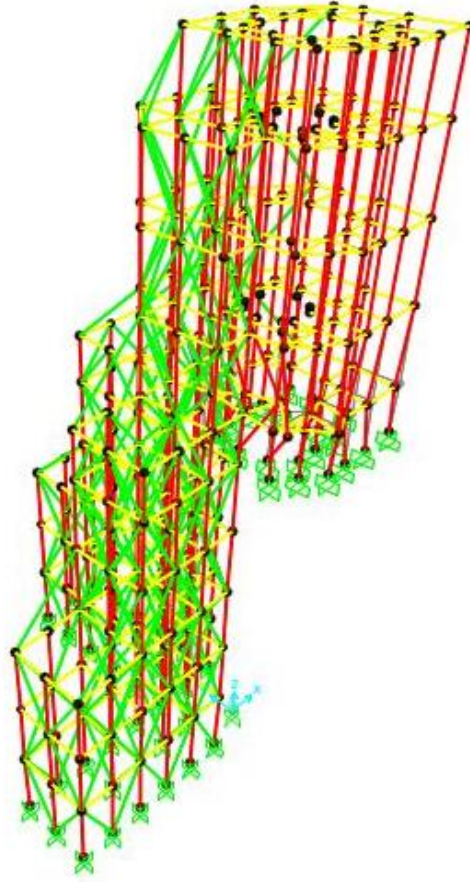
Joint Displacements			
Joint Object	2058	Joint Element	2058
	1	2	3
Trans	64.91459	-8.43118	-0.67892
Rotn	0.	0.	0.



Şekil 5.37 Ek çelik bağlantı noktasındaki yatay deplasman gösterimi (SAP2000).



Şekil 5.38 Destek iskele sisteminin deforme olmuş hali-detay +16.32 kotu (SAP2000).



Şekil 5.39 Destek iskele sisteminin deforme olmuş hali-genel (SAP2000).

Ahşap destek iskele sisteminin SAP2000 bilgisayar programında ek çelik bağlantı noktasında 6,50 cm deplasmana denk gelen kuvvetin etkilmesi sonrası çubuklarda meydana gelen kuvvetler incelenerek sistemin depreme karşı hangi noktalarda zayıf olabileceği tespit edilmiştir. Sistemde zayıf olarak değerlendirilen ahşap çubuklar 9 MPa üzerinde yük alan noktalar olarak belirlenmiştir. 9 MPa emniyet gerilmesi 2. Sınıf çam kerestenin literatürde yer alan ortalama çekme ve basınç emniyet gerilmesi değeri olarak esas alınmıştır (İnşaat Mühendisleri Odası, 2019).

SAP2000 bilgisayar programında modellenen ahşap destek iskele sistemi toplam 965 çubuk elemandan oluşmaktadır. Bu çubuk elemanlardan +16,32 kotunda 6,50 cm deplasman etkilmesi ile 9 MPa olarak alınan emniyet gerilmesini aşan 32 çubuk eleman tespit edilmiştir. Bu çubuk elemanların basınç ve çekme gerilmeleri -9,054 MPa ile +14,423 MPa arasında değişmektedir. Bunun da toplam çubukların %3,31'ine denk geldiği göz önüne alındığında emniyetli

tarafında kalınlaşarak yapılan hesaplarında depreme karşı büyük oranda dayanım sağladığı görülmektedir. Ahşap emniyet gerilmesi olan 9 MPa üzeri gerilme oluşan çubuklarda kesit büyütmesi ya da aynı kesitten ek ahşap destek ile sistemin daha güvenli olabileceği kanaatine varılmaktadır.



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında tarihi vakıf kültür varlığı olan Selçuk İsabey Caminin ayakta kalan tek minaresi olan batı cephesi minaresi detaylı olarak değerlendirilmiştir. Öncelikle yapının mevcut durumu bilgisayar ortamına aktarılarak sonlu elemanlar yöntemi ile teorik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar kapsamında yapı analitik ve operasyonel model analiz yöntemleri ile incelenmiştir. Yapının daha çok hasarlı bölümünü oluşturan tuğla gövde üzerinde çalışma yapılmıştır.

Tarihi minarenin taşıyıcı sistemi kaide bölümünde taş-mermer olup üst minare gövde bölümü ise tamamen tuğladan inşa edilmiştir. Yapıyı oluşturan malzemelerin malzeme parametreleri literatüre bağlı alınarak belirlenmiştir. Yapının alt kaide bölümü oldukça sağlam kuzey-güney yönünde cami ve avlu duvarına bitişik inşa edildiğinden bu bölümde çok fazla deformasyon beklenilmediğinden daha çok tarihi yapının tuğla üst gövdesi ile ilgili analizler yapılmıştır.

Tarihi minarenin modeli üç boyutlu ele alınarak bilgisayarda statik ve dinamik analizler yapılabilmesi için sonlu elemanlar yöntemi ile dinamik parametreler bulunmuştur.

Minareye yerleştirilen ivme ölçerler yardımıyla Operasyonel Model Analiz ile deneysel veriler elde edilmiştir. Bu veriler analitik veriler ile karşılaştırılıp kalibre edilmiştir. Böylelikle teorik ve deneysel frekanslar arasında farklar azaltılmıştır.

Zaman tanım alanında 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi ivme kayıtları ile analizler yapılarak deprem performansı tespit edilmeye çalışılmıştır.

Yukarıda kısaca açıklanan bu çalışmadan çıkarılan sonuçlar ise:

Çalışma yapılan minare gövde kısmını oluşturan tuğla malzemenin 180 MPa olan elastisite modülü 675 MPa olarak revize edilmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen teorik model analizinde deprem altında 94 cm'e varan yer değiştirme olabileceği, operasyonel model analiz sonucu ile hesaplanan deneysel verilerle 16 cm civarı yer değiştirme beklenilmektedir. Zaman tanım alanında 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi ivme kayıtları ile

yapılan analizlerde minare tepe noktasında 16 cm'ye varan yer değiştirmeler olabileceği tespit edildiğinden, bu değerin literatürde genel olarak kullanılan d/h (deplasman/ bina yüksekliği oranı) 0,001'in üzerinde olduğu görölmektedir. Kocaeli depremi için  $16/2660 = 0,006$  oranı elde edildiğinden yapının ahşap destek iskelesi olmadan kültürel değerin korunması performans seviyesi için yeterli olmadığı anlaşılmaktadır.

Minarenin ahşap iskele ile desteklenmesi sonrası elde edilen frekans değerlerinde destek öncesi değerlere göre çok anlamlı değişiklikler görünmemektedir. Bunun temel nedenlerinden biri olarak şekil 5.24'te gösterildiği gibi ahşap destek iskelesinin minareye bağlandığı (ek yeni elik kuşaklamaların bulunduğu 24.52 ve 16.32 kotları) noktalarda ahşap destek iskelesi ile ek elik kuşak arasına konan 5,00 cm kalınlığında olan kauçuğun etki edebileceği kanaatine varılmıştır.

Minarenin ahşap iskele ile desteklenmesi sonrası frekans değerlerinde minare iskele bağlantı noktasına konan kauçuk malzeme etkisiyle büyük değişiklikler meydana gelmediğinden Abaqus programında yeni analizler oluşturulması yerine ahşap destek iskelesinin minareye bağlandığı ek elik kuşak bağlantı noktalarında oluşan deplasmanların 24.52 ek elik kuşak bağlantısı kotunda (üst 2. elik kuşak) 14,00 cm ve yine en üst kottan 8,20 mt aşağısı olan 16.32 ek elik bağlantı kotunda (alt 1. elik kuşak) 9,00 cm yer değiştirmeleri hesaplanmıştır.

Ahşap destek iskele sisteminin SAP2000 bilgisayar programında alt 1. ek elik bağlantı noktasında kauçuk etkisi de dikkate alınarak 6,5 cm deplasmana denk gelen kuvvetin etkilmesi sonrası çubuklarda 9 MPa olarak alınan ortalama emniyet gerilmesini toplam 965 çubuktan 32 çubuk elemanın aştığı tespit edilmiştir. Bu ubuk elemanların basınç ve çekme gerilmeleri -9,054 MPa ile +14,423 MPa arasında değişmektedir. Bunun da toplam çubukların %3,31'ine denk geldiği göz önüne alındığında emniyetli tarafta kalınarak yapılan hesaplarda (İkinci sınıf ahşap cinsi seçilmesi gibi) ahşap destek iskele sisteminin depreme karşı büyük oranda dayanım sağlandığı görölmektedir. Ortalama ahşap emniyet gerilmesi olan 9,00 MPa üzeri gerilme oluşan çubuklarda kesit büyümesi ya da aynı kesitten ek ahşap destek ile sistemin daha güvenli olabileceği kanaatine varılmaktadır.



**KAYNAKLAR DİZİNİ**

- Aköz, F.**, 2005, Yığma Kagir Yapılarda Hasar Tespiti, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 8s.
- Aktaş, E. ve Teomete, E.**, 2004, Tarihi Yığma Yapıların Yapısal Davranışlarının İncelenmesinde İncelenecek Esasların Belirlenmesi; Örnek Çalışma: Urla Kamanlı Camii, TÜBİTAK, Proje No:102I065, 162s.
- Aslanapa, O.**, 1997, Türk Sanatı, Remzi Kitabevi, İstanbul, 454s.
- Bağbancı, M.B.**, 2009, Tarihi Yapıların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizinin Bursa Ördekli Hamamı Örneğinde İncelenmesi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 207s.
- Berto, L., Sietta, A., Scotta, R. and Vitaliani, R.**, 2005, Failure mechanism of masonry prism loaded in axial compression: computational aspects, *Materials and Structures* 38:249-256 pp.
- Betti, M., and Vignoli, A.**, 2007, Modelling and analysis of a Romanesque church under earthquake loading: Assessment of seismic resistance, *Engineering Structures*, 30:352-367 pp.
- Binda, L., Saisi, A. and Tiraboschi, C.**, 2000, Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries, *Construction and Building Materials*, 14:199-233 pp.
- Croci, G.**, 1998, The Conservation and Structural Restoration of Architectural WIT Press, Southampton, 249p.
- Çatal, H.H.**, 2014, Yapı ve Deprem Mühendisliğinde Matris Yöntemler, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 425s.
- Dabanlı, Ö.**, 2008, Tarihi Yığma Yapılarının Deprem Performansının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 170s.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Demir, A., Bağcı, M. ve Demir, D.D.,** 2011, Mevcut betonarme binasının farklı zemin sınıflarında burulma davranışı, *CBÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 7.1:17-26 s.
- Doğan, H.N.A.,** 2016, Yığma Duvarların Mikro ve Makro Modelleme Teknikleri ile Lineer Olmayan Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 71s.
- Ercan, E.,** 2010, Tarihi Yapıların Güvenliklerinin Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi, 253s.
- Eurocode 6,** 2005, European Committee for Standardization, Brussels, 123p.
- Eyüpgiller, K., Memnun, H., Güleç, A. ve İlki, A.,** 2014, Şah Sultan Camii restorasyon uygulaması öncesi çalışmalar, *Vakıf Restorasyon Yıllığı*, 9:127-131 s.
- Fahjan, Y.M., Vatansever, S. ve Özdemir, Z.,** 2011, Ölçeklenmiş Gerçek Deprem Kayıtları ile Yapıların Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analizleri, ODTÜ, Ankara, 9s.
- Gedik, Y.H.,** 2008, Analysis, Repair and Strengthening of Historical Masonry Structures; Case Study: Mehmet Aga Mosque, MSc. Thesis, Istanbul Technical University, Istanbul, 88p.
- Hendry A., Sinha B. and Davies R.,** 2004, Design of Masonry Structures, Third Edition of Load Bearing Brickwork Design, E&FN SPON An Imprint of Chapman & Hall, London, 278p.
- Hutton, D.V.,** 2004, Fundamentals of Finite Element Analysis, The McGraw-Hill Companies, New York, 494p.
- İnşaat Mühendisleri Odası,** “Ahşap İçin Emniyet Gerilmeleri”, [http://www.imo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/047e0f8f2d6d745\\_ek.pdf?tipi=84&turu=X&sube=0](http://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/047e0f8f2d6d745_ek.pdf?tipi=84&turu=X&sube=0), (Erişim tarihi: 3 Ağustos 2019)

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Laurenço, P.B.**, 1996, Computational Strategies for Masonry Structures PhD Thesis Delft University Press, Netherlands, 209p.
- Laurenço, P.B.**, 2002, Computations on historic masonry structures, *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3): 301-319 pp.
- Lourenço, P.B.**, 2004, Current Experimental and Numerical Issues in Masonry Research, SISMICA 2004–6<sup>0</sup> Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sismica, Guimaraes, 18p.
- Koçak, A.**, 1999, Tarihi Yığma Yapıların Statik ve Dinamik Yükler Altında Lineer ve Non-lineer Analizi: Küçük Ayasofya Camii Örneği, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 328s.
- Kuruşcu, A.O.**, 2005, Yığma Yapıların Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 88s.
- Mandirola M., Penna, A., Rota, M. and Manages, G.**, 2012 Experimental Assessment of The Shear Response of Autoclaved Aerated Concrete Masonry with Flat Truss Bed-Joint Reinforcement, 15th International Brick and Block Masonry Conference, Florianapolis, 10p.
- Meraki, Ş. ve Meraki, F.**, 2016, Kosova’da Muslihiddin/Müezzın Hoca Camisi, *Vakıf Restorasyon Yıllığı*, 13:78-79 s.
- Meraki, Ş. ve Meraki, F.**, 2016, Kosova’da/Yakova Sefa Camisi’nin projelendirme süreci, *Vakıf Restorasyon Yıllığı*, 13:160-161 s.
- Mısır, İ.S., Özçelik, Ö., Durmazgezer, E., Yücel, U., Ameddeo, C., Kuran, F., Tuna, E., Yücel, G. ve Youssouf, İ.B.**, 2017, Tarihi Yığma Binaları Oluşturan Üç Tabakalı Taş Yığma Duvarların Düzlem Dışı Etkilere Göre Model Kalibrasyonu: İsabey Camii Örneği, Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu, Trabzon, 10s.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Nohutçu, H., Demir, A., Ercan, E., Altındaş, G. ve Hökelekli, E.,** 2014, Tarihi Manisa Hafsa Sultan Camii'nin Deprem Davranışının Operasyonel Modal Analiz ile İncelenmesi, 112M093, TÜBİTAK, 90s.
- Özdemir, H.,** 2018, Tarihi Yapıların Bilgisayar Destekli Analizi: Patara Antik Kent Tiyatrosu Sahne Yapısı Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 105s.
- Roca, P., Cervera, M., Gariup, G. and Pela L.,** 2010, Structurel analysis of masonry historical constructions. Classical and advanced approaches, *Arch Comput Methods Eng*, 17:299-325 pp.
- Saraç, M.M.,** 2003, Tarihi Yığma Kargir Yapıların Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 155s.
- Satongar, Ş.,** 1994, İstanbul Şehir Surları Horasan Harçları Üzerine Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 123s.
- Sattar, S.,** 2013, Influence of Masonry Infill Walls and Other Building Characteristics on Seismic Collapse of Concrete Frame Buildings, PhD Thesis, University of Colorado, Boulder, 202p.
- Saygılı, Ö.,** 2014, Use of Distinct Element Method in The Assessment of Earthquake Behavior of Masonry Structures, Graduate Program in Earthquake Engineering, Boğaziçi University, Istanbul, 257p.
- Sesigür, H. ve Çılı, F.,** 2014, Edirnekapı Mihrimah Sultan Camisinde yapılan onarım ve güçlendirme çalışmaları, *Vakıf Restorasyon Yıllığı*, 9:77-79 s.
- Sönmez, Z.,** 1995, Başlangıcından 16. Yüzyıla Kadar Anadolu Türk-İslam Mimarisinde Sanatçılar, Türk Tarih Kurumu, Ankara, 498s.
- Şen, B.,** 2006, Modelling and Analysis of the Historical Masonry Structures, MSc. Thesis, Boğaziçi University, 85p.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**


- TBDY**, 2018, Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar, İç İşleri Bakanlığı, Ankara, 416s.
- Teomete, E.**, 2004, Finite Element Modelling of Historical Masonry Structures, Case Study: Urla Kamanlı Mosque, MSc. Thesis, Izmir Institute of Technology, 144p.
- Tetik, T.**, 2015, Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansı ve Güçlendirme Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü, 139s.
- Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerrediga, J., Molleda, J. and Bulnes, F.G.** 2014, Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing, *Sensors*, 14:12305-12348 pp.
- Ünay, A.İ.**, 2002, Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı, ODTÜ Mimarlık Fakültesi, Ankara, 172s.
- Vakıflar Genel Müdürlüğü**, 2018, “Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu”, <https://www.vgm.gov.tr/organizasyonlar/Documents/Sablon+.pdf> (Erişim Tarihi: 01.08.2019)
- Yılmaz, P.**, 2006, Tarihi Yapıların Modellenmesi ve Deprem Güvenliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 74s.



**TEŐEKKÖR**

Bu çalışmanın oluőmasında bŸyŸk desteği olan danışman hocam Doç. Dr. Bengi ARISOY'a ve tezin her anında yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Emre ERCAN, Doç. Dr. Ayhan NUHOğLU, YŸk. İnő. MŸh. Yunus GŸNER, YŸk. İnő. MŸh. Çaędaő GŸRBŸZ ve Metin ŐEREFOęLU'na çok teőekkŸr ederim.

Bu alıőma sırasında maddi ve manevi tŸm desteğini sunan aileme ayrıca teőekkŸr ederim.



19 / 09 / 2019

Ercan TUNA



## ÖZGEÇMİŞ

Ercan TUNA, 1979 yılında İzmir’de doğdu.

1999 yılında kazandığı İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü 2004 yılında tamamladı. 2015 yılında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2004-2009 yılları arasında Vakıflar Genel Müdürlüğü Kastamonu Bölge Müdürlüğünde inşaat mühendisi olarak çalıştı. 2009 yılında aynı kurumun İzmir Bölge Müdürlüğünde işe başlayarak halen aynı görevine devam etmektedir.

