

ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TARİHİ YIĞMA YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ HESABINDA
GEREKLİ MALZEME ÖZELLİKLERİNİN TAYİNİ**

İrfan KOCAMAN

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Dilek OKUYUCU

İkinci Danışmanı: Doç. Dr. İlker KAZAZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak, 2017

ERZURUM

Her Hakkı Saklıdır

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

TARİHİ YIĞMA YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ HESABINDA
GEREKLİ MALZEME ÖZELLİKLERİNİN TAYİNİ

Yrd. Doç. Dr. Dilek OKUYUCU danışmanlığında, İrfan KOCAMAN tarafından hazırlanan bu çalışma 20/01/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans tezi olarak **oy birliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Doç. Dr. Ahmet BUDAK *İmza*

Üye: Yrd. Doç. Dr. Dilek OKUYUCU *İmza*

Üye: Yrd. Doç. Dr. Süleyman Nazif ORHAN *İmza*

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Arzu GÖRMEZ
Enstitü Müdürü

**ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

ETÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “TARİHİ YIĞMA YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ HESABINDA GEREKLİ MALZEME ÖZELLİKLERİNİN TAYİNİ” 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.

20/01/2017

.....

İrfan KOCAMAN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TARİHİ YIĞMA YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ HESABINDA GEREKLİ MALZEME ÖZELLİKLERİNİN TAYİNİ

İrfan KOCAMAN

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Dilek OKUYUCU

Bu tez çalışmasında tarihi yapıların dinamik davranışlarının hesabında kullanılacak malzeme özelliklerini literatür ışığında oluşturulan yöntemle belirlemek amaçlanmaktadır.

Tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. İlk kısımda yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ve tarihi yapıların malzeme özelliklerinin tayini ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar hakkında bilgiler sunulmaktadır. İkinci bölümde, tarihi yığma yapılarda kullanılan taşıyıcı elemanlara ve malzemelere örnekler verilmektedir. Üçüncü bölümde ele alınan yapıların hem teknik hem de tarihi bilgileri verilmektedir. Ele alınan yapıların, önerilen yöntemle malzeme özellikleri belirlenmiştir. Dördüncü bölümde, bu malzeme özellikleri ışığında yapıların teorik analizleri gerçekleştirilmiş devamında yapıların deneysel olarak dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Teorik ve deneysel veriler ışığında malzeme özelliklerini belirlemek için önerilen yaklaşımın doğruluğu irdelenmiştir. Bölümün son kısmında ise gerçek davranışına oldukça yakın olduğu kabul edilen modellerin 1992 Erzincan depremi yer ivmeleri kullanılarak deprem davranışları belirlenmiştir. Son bölümde ise çalışma sonucunda elde edilen verilerin değerlendirilmesiyle ortaya çıkan sonuç ve öneriler sunulmaktadır.

Çalışma sonunda önerilen yöntemin cami, medrese türü tarihi yapıların dinamik davranışlarının belirlenmesinde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

2017, 108 sayfa

Anahtar Kelimeler: Yığma yapı, Yakutiye Medresesi, Lala Mustafa Paşa Cami, operasyonel modal analiz, malzeme özellikleri

ABSTRACT

MASTER THESIS

DETERMINATION OF THE NECESSARY MATERIAL PROPERTIES FOR THE CALCULATION OF DYNAMIC BEHAVIOUR OF HISTORIC MASONRY STRUCTURES

İrfan KOCAMAN

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Ass. Prof. Dr. Dilek OKUYUCU

The aim of herein thesis is to quantify material properties of historical structures that will be used for dynamic analysis by forming a new procedure considering the related studies in the literature. The material properties is being used in dynamic analysis of historical structures.

The thesis consists of five parts. First part focuses on literature review about determining the dynamic characteristics and materials of historical structures. Second part provides information about load bearing systems materials of existing historical structures. Third part concentrates on the structural and historical details of the considered buildings, as well as determinate their material properties. Within the consideration of the material properties, the theoretical modal analyses are conducted; afterwards the experimental dynamic characteristics were determined in part four. Then, theoretical and experimental data was studied to evaluate the accuracy of recommended method. The model was subjected to the ground acceleration of 1992 Erzincan earthquake and then earthquake behavior of the models were studied. Final part gives the results and recommendations based on the data obtained from study.

At the end of the study, it is concluded that the proposed method can be used to determine the dynamic behavior of the mosque, madrasah type historical structures.

2017, 108 pages

Key Words: Masonry structure, Yakutiye Madrasah, Lala Mustafa Pasha Mosque, operational modal analyses, materials properties

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması Erzurum Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yapılmıştır. Tez çalışması boyunca desteğini esirgemeyen danışman hocalarım Doç. Dr. İlker KAZAZ Beyefendiye ve Yrd. Doç. Dr. Dilek OKUYUCU Hanımefendiye teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince bana manevi desteğini esirgemeyen kıymetli arkadaşlarım Numan TEKELİOĞLU'na, Emrullah DEMİRASLAN'a, Özhan NEBİOĞLU'na, ve Muhammed GÜRBÜZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez kapsamında ele alınan tarihi yağma yapı alanına çalışmalarımı yönlendiren kıymetli hocam Doç. Dr. Temel TÜRKER'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalar boyunca kendilerine karşı sorumluluklarımı aksattığım annem Müşerref KOCAMAN'a ve aileme teşekkür ederim.

Bu tez kapsamında 114M280 kod nolu TÜBİTAK projesi imkânlarından yararlanılmış olması nedeniyle TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

İrfan KOCAMAN

2017

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	3
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
2.1. Tarihi Yığma Yapıların Davranışlarını Belirlemeye Yönelik Çalışmalar	5
2.2. Tarihi Yığma Yapıların Malzeme Özelliklerini Belirlemeye Yönelik Çalışmalar	7
3. MATERYAL ve YÖNTEM	10
3.1 Tarihi Yığma Yapıların Mühendislik Özellikleri	10
3.1.1. Tarihi Yapıların Taşıyıcı Elemanları.....	10
3.1.1.1. Sütunlar	10
3.1.1.2 Duvarlar ve Payandalar.....	11
3.1.1.3. Kemerler	12
3.1.1.4. Tonozlar	13
3.1.1.5. Kubbelere.....	14
3.1.1.6. Gergiler	14
3.1.2. Tarihi Yapılarda Kullanılan Malzemeler.....	15
3.1.2.1. Taş.....	15
3.1.2.2. Tuğla	16
3.1.2.3. Ahşap	17
3.1.2.4. Harçlar	18
3.1.3. Tarihi Yapılarda Hasar Çeşitleri.....	18
3.1.3.1. Oluştığı Yere Göre	19
3.1.3.1.1. Taşıyıcı Elemanlarda Oluşan Hasarlar.....	19
3.1.3.1.2. Taşıyıcı Olmayan Elemanlarda Oluşan Hasarlar	19

3.1.3.2. Büyüklüğüne Göre Hasarlar	19
3.1.3.2.1. Az Hasarlı Taşıyıcı Duvarlar	22
3.1.3.2.2. Orta Hasarlı Taşıyıcı Duvarlar	23
3.1.3.2.3. Ağır Hasarlı Taşıyıcı Duvarlar	23
3.1.4. Tarihi Yığma Yapılarda Hasarların Nedenleri	24
3.1.4.1. Deprem	25
3.1.4.2. Yorulma	27
3.1.4.3. Aşırı Yükleme	27
3.1.4.4. Yangın	27
3.1.4.5 Patlatma	28
3.1.4.6. Zemin (Temel Oturmaları) Hareketleri	28
3.1.4.7. İmalat Kusurları	29
3.2. Tarihi Yapıların Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması	30
3.2.1. Kullanılan Yöntemler	30
3.2.1.1 Makro Modelleme Yöntemi	30
3.2.1.2. Basitleştirilmiş Mikro Modelleme Yöntemi	32
3.2.1.3. Mikro Modelleme Yöntemi	32
3.2.2. Yapıların Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi	33
3.2.2.1. Teorik Modal Analiz Yöntemi	34
3.2.2.1.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler	35
3.2.2.1.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler	38
3.2.2.2. Deneysel Modal Analiz Yöntemi	42
3.2.2.2.1. Genel Kurallar	42
3.2.2.2.2. Ölçüm Ekipmanları	43
3.2.2.2.3. Dinamik Karakteristikleri Belirleme Yöntemleri	46
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	51
4.1. Çalışma Kapsamında Ele Alınan Yapılar	51
4.1.1. Erzurum Yakutiye Medresesi	51
4.1.2. Erzurum Lala Paşa Cami	54
4.2. Yapı Modellerinin Oluşturulması	57
4.3. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi	60
4.3.1. Taşın, Harcın ve Moloz Dolgunun Basınç Dayanımının Belirlenmesi	60
4.3.2. Duvarların Basınç Dayanımlarının ve Elastisite Modüllerinin Belirlenmesi	60
4.3.2.1. Dış ve İç Duvarların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	61

4.3.2.2. Üç Yapraklı Duvar Dayanımlarının Belirlenmesi	62
4.3.3. Fil Ayaklarının, Kubbelerin ve Kemerlerin Dayanımlarının Belirlenmesi	63
4.3.4. Erzurum Yakutiye Medresesi Malzeme Özellikleri	63
4.3.4.1.Erzurum Yakutiye Medresesi'nin Dış Duvar Dayanımının Belirlenmesi.....	64
4.3.4.2.Erzurum Yakutiye Medresesi'nin Üç Yapraklı Duvar Dayanımının Belirlenmesi.....	66
4.3.5. Erzurum Lala Paşa Cami Malzeme Özellikleri	66
4.3.5.1.Erzurum Lala Paşa Cami Dış Duvarın Basınç Dayanımının Belirlenmesi.....	67
4.3.5.2.Erzurum Lala Paşa Cami Üç Yapraklı Duvar Dayanımının Belirlenmesi.....	69
4.3.6. Analitik Modal Analiz Sonuçları.....	69
4.3.6.1.Yakutiye Medresesi Analitik Modal Analizi	69
4.3.6.2.Lala Paşa Cami Analitik Modal Analizi	72
4.3.7 Deneysel Modal Analiz Sonuçları.....	74
4.3.7.1.Yakutiye Medresesi Deneysel Modal Analizi	75
4.3.7.2.Lala Paşa Cami Deneysel Modal Analizi	77
4.4. Nihai Malzeme Özellikleri.....	80
4.5. Yapıların Statik Analizleri	81
4.5.1. Yakutiye Medresesi Statik Analizi	81
4.5.2. Lala Paşa Cami Statik Analizi	82
4.6. Yapıların Dinamik Analizi.....	83
4.6.1. Yakutiye Medresesi Dinamik Analizi	85
4.6.2. Lala Paşa Cami Dinamik Analizi	92
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	100
KAYNAKLAR.....	103
ÖZGEÇMİŞ	112

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Sütun Örneği	11
3.2. Payanda Örneği	12
3.3. Kemer örneği.....	13
3.4. Tonoz örneği	13
3.5. Kubbe örneği.....	14
3.6. Gergi örneği.....	15
3.7. 12. yüzyıl tuğla malzemeli tarihi kilise Ferecik, Yunanistan.....	17
3.8. Ahşap malzemeli tarihi yapılar.....	18
3.9. Az hasarlı duvar örnekleri	22
3.10. Orta hasarlı duvar örnekleri.....	23
3.11. Ağır hasarlı duvar örnekleri	24
3.12. Yığma yapı plan örnekleri.....	25
3.13. Deprem X çatlakları	26
3.14. Uzun doğrultuda mesnetlenmemiş duvarda oluşan hasar	36
3.15. Yangına maruz kalan Haydar Paşa Garı.....	27
3.16. Patlatma etkisi ile hasar gören yığma yapı	28
3.17. Yığma yapılarda temel oturmalarından kaynaklanmış hasarlar	29
3.18. Yığma köşe duvarı detayı.....	29
3.19. Homojenleştirme işlemi	31
3.20. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği	32
3.21. Mikro modelleme tekniği	33
3.22. TSDS teorik modeli.....	35
3.23. TSDS serbest cisim diyagramı	35
3.24. ÇSDS sönümsüz serbest teorik modeli	39
3.25. Ultra hassas kuvvetli yer hareketi kayıt cihazları, GPS alıcıları ve bataryalar	45
3.26. Tek Eksenli İvmeölçerler ve Taşınabilir Veri Toplama Sistemi.....	46
4.1. Erzurum Yakutiye Medresesi.....	51
4.2a: Yakutiye Medresesi Cephe görünüşlerine örnekler	53
4.2b: Yakutiye Medresesi Kesitlere Örnekler	53
4.3. Erzurum Lala Paşa Cami.....	54

4.4a: Lala Paşa Cami Cephe görünüşlerinde örnek.....	56
4.4b: Lala Paşa Cami Kesitlere örnekler	56
4.5. Yakutiye Medresesi'nin SolidWorks modeli	57
4.6. Lala Paşa Cami'nin SolidWorks modeli	57
4.7. Yakutiye Medresesi'nin sonlu eleman modeli	59
4.8. Lala Paşa Cami'nin sonlu eleman modeli	59
4.9. Üç yapraklı duvar tipi.....	61
4.10a. Yakutiye Medresesi duvarlarından bir görüntü	65
4.10b. Kabul edilen duvar ve taş boyutları.....	65
4.11a. Lala Paşa Cami duvarlarından bir görüntü	68
4.11b. Kabul edilen duvar ve taş boyutları.....	68
4.12 Yakutiye Medresesi'nin ilk 20 moda ait frekans değerleri	70
4.13. Yakutiye Medresesi'nin hakim ilk altı moduna ait deformasyon şekilleri	71
4.14. Lala Paşa Cami'nin ilk 20 moda ait frekans değerleri	73
4.15. Lala Paşa Cami'nin hakim ilk altı moda ait deformasyon şekilleri	74
4.16. Kablolü ve kablosuz ölçüm düzenekleri arasındaki bağlantıyı sağlayan referans ivmeölçer kurulumu	75
4.17. Yakutiye Medresesi titreşim ölçüm krokisi	76
4.18. Yakutiye Medresesi GFOAY ile elde edilen tekil değerler	77
4.19 Lala Paşa Cami titreşim ölçüm krokisi.....	78
4.20 Lala Paşa Cami GFOAY ile elde edilen tekil değerler	79
4.21. Yakutiye Medresesi statik analizde düşeyde oluşan yer değiştirmeler (mm)	81
4.22. Yakutiye Medresesi statik analiz sonucunda elde edilen a:basınç gerilmeleri; b:çekme gerilmeleri (MPa)	82
4.23. Lala Paşa Cami statik analizden elde edilen düşey yer değiştirmeler (mm)	82
4.24a: Statik analiz sonucunda elde edilen çekme gerilmeleri (MPa)	83
4.24b: Statik analiz sonucunda elde edilen basınç gerilmeleri (MPa)	83
4.25. Erzurum İli Türkiye Deprem Haritası (URL 1)	84
4.26a: Erzincan depremi D-B ve K-G bileşenleri	85
4.26b: Erzincan depremi D-B ve K-G ivme spektrumu.....	85
4.27. Yakutiye Medresesi dinamik analiz sonucu elde edilen 2.93sn'de yatay yer değiştirmeler (mm).....	86
4.28. Yakutiye Medresesi dinamik analiz sonucu elde edilen minare zarf eğrileri.....	87

4.29. Yakutiye Medresesi dinamik analiz sonucu elde edilen 2.89sn'de çekme gerilmeleri altında birim şekil değiştirme değerleri.....	88
4.30. Yakutiye Medresesi dinamik analiz sonucu duvarın kuzey doğu tepe noktasında elde edilen x ve z doğrultusu yer değiştirmeleri (mm)	89
4.31. Yakutiye Medresesi dinamik analiz sonucu elde edilen 2.86 sn'de a:çekme gerilmeleri b:basınç gerilmeleri (MPa).....	89
4.32. Yakutiye Medresesi dinamik analiz sonucu elde edilen çatlak ve ezilmeler	90
4.33. Yakutiye Medresesi dinamik analizden elde edilen tepe yer değiştirmesi - taban kesme kuvveti grafikleri	91
4.34. Lala Paşa Cami dinamik analiz sırasında meydana gelen yer değiştirme.....	93
4.35. Lala Paşa Cami dinamik analiz sırasında meydana gelen birim şekil değiştirmeler...95	
4.36. Lala Paşa Cami dinamik analizde yapının köşelerinde oluşan yer değiştirmeler (mm) (a):x doğrultusu; (b): z doğrultusu	97
4.37. Lala Paşa Cami dinamik analiz sonucu elde edilen taban kesme kuvveti – yer değiştirme eğrisi	98

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Doğal taşların ortalama dayanım değerleri	16
3.2. Yığıma bina duvarlarında çatlak düzeyleri.....	21
4.1. Modellerde kullanılan eleman ve düğüm noktası sayıları.....	58
4.2. Yakutiye Medresesi Schmidt Çekici sertlik ölçümü sonucu.....	64
4.3. Lala Paşa Cami Schmidt Çekici sertlik ölçümü sonucu.....	67
4.4. Yakutiye Medresesi'nin dikkate alınan hakim altı moduna ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri.....	70
4.5. Lala Paşa Cami'nin dikkate alınan hakim altı moduna ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri	72
4.6. Deneysel ve teorik frekans değerlerinin karşılaştırılması	79
4.7. Lala Paşa Cami ve Yakutiye Medresesi nihai malzeme özellikleri	80
4.8. 1900'dan günümüze Erzurum ve çevresinde meydana gelen depremler	84

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
E_m	eşdeğer elastisite modülü
$\gamma_t=t_h/t_t$	kalınlık oranı
t_h	harç kalınlığı
t_t	yapı malzemesi (taş, tuğla vb.) kalınlığı
$\gamma_m=E_h/E_t$	elastisite modülü oranı
E_h	harcın elastisite modülü
E_t	yapı malzemesinin (taş, tuğla vb.) elastisite modülüdür
F_I	atalet kuvveti
F_D	sönüm kuvveti
F_S	yaydaki elastik şekil değişiminden dolayı yayda oluşan kuvveti
m	yapının kütlesi
c	sönüm katsayısı
k	yay katsayısı
$\ddot{x}(t)$	kütlenin ivmesi
$\dot{x}(t)$	kütlenin hızı
$x(t)$	kütlenin yer değiştirmesi
$F(t)$	uygulanan dış kuvvet
ω	sönümsüz doğal açısal frekanstır
[M]	kütle matrisi
[C]	sönüm matrisi
[K]	rijitlik matrisi
$\{x(t)\}$	yer değiştirme vektörü
$\{\dot{x}(t)\}$	hız vektörü
$\{\ddot{x}(t)\}$	ivme vektörü
$\{F(t)\}$	kuvvet vektörüdür
$G_{xx}(\omega)$	etki sinyaline ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu
$G_{yy}(\omega)$	tepki sinyaline ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu
$H(\omega)$	frekans davranış fonksiyonu
f_k	duvarın basınç dayanımı
f_b	malzeme basınç dayanımı

l, h ve t	sırasıyla duvarın genişliği, yüksekliği ve kalınlığı
f	çatlak yoğunluk faktörüdür
f_c	kompozit kesitin basınç dayanımı
f_e	dış duvarların basınç dayanımı
f_i	iç duvarın basınç dayanımı
t_e	dış duvar kalınlığı
t_i	iç duvar kalınlığı
θ_e	dış duvar için doğruluk faktörü
θ_i	iç duvar için doğruluk faktörü
f_k	duvarın basınç dayanımı
E	duvarın elastik modülü



1. GİRİŞ

Anadolu coğrafyası, sayısız medeniyete ev sahipliği yapmış ve dünyanın en zengin kültür mirasını bünyesinde barındıran yerleşim alanlarından birisidir. Gerek folklorik ve gerekse mimari kültür mirasımızın korunarak güvenle gelecek nesillere devredilmesi hepimizin sorumluluğundadır.

Kültür mirasımızın her tarafına dağıldığı ve çeşitlendiği Anadolu yarımadası; sismik olarak dünyanın en aktif bölgelerinden birisidir. İnşaat mühendisliği bakış açısıyla mimari kültür mirasımızın geleceğe güvenle devredilmesi kapsamında; mevcut tarihi yapıların deprem esnasındaki yapısal performanslarının incelenmesi çalışmaları sıklıkla yapılmakta ve birbirinden değerli araştırmacıların kıymetli bulguları literatürde paylaşılmaktadır. Tarihi yapılar üzerindeki bu tür çalışmalar sadece yurdumuzda değil; dünyanın her yerinde yaygın olarak gerçekleştirilmektedir.

Tarihi yapıların deprem güvenliklerinin incelenmesi ve raporlanması oldukça önemli bir mühendislik hizmetidir. Tarihi yapının öncelikle dış etkiler altında güvenle ayakta kalması sağlanmalıdır. Yıllara meydan okuyan tarihi yapıların yapısal güvenliklerini tehdit eden rüzgâr, trafik, patlatma, deprem vb. birçok unsur vardır. Bu sebeple mevcut tarihi yapıların etki eden yükler altında güvenli şekilde ayakta kalabilmesi ve oluşabilecek muhtemel hasarların meydana gelmeden belirlenerek önlem alınması gerekmektedir.

Yapıda oluşabilecek hasarların belirlenmesi ancak yapının davranışının bilinmesiyle mümkündür. Yapı davranışının belirlenmesi hem teorik hem de deneysel açıdan incelenmeler ile mümkün olabilmektedir. Literatürde, yapıların davranışının belirlenmesinde, teorik olarak sonlu eleman modeli oluşturulması, deneysel olarak ise deneysel modal analiz yönteminin kullanılması önerilmektedir. Her iki yöntem birlikte kullanılarak yapının davranışı gerçeğe en yakın şekilde belirlenebilmektedir. Teorik incelemede, yapının sonlu eleman modelinin oluşturulmasında ya da yapı elemanlarının malzeme özelliklerinin tanımlanması aşamasında birçok kabul yapılmaktadır. Yapılan kabullerden dolayı, sadece teorik irdeleme yapının gerçek davranışının belirlenmesi için

yeterli değildir. Bu sebeple yapı üzerinde deneysel çalışmalar yaparak yapının davranışının belirlenmesi daha gerçekçi bir çözüm olmaktadır. Teorik yaklaşımın deneysel çalışmalar ışığında düzenlenmesi, yapının gerçek davranışının sonlu elemanlar ortamında doğru bir şekilde elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Fakat bu sürecin her bir yapıya ayrı ayrı uygulanması gerektiği için oldukça zor ve maliyetli bir iş olabilmektedir.

Yapılar kaynağı belli ve/veya belirsiz sürekli titreşimlere maruz kalmaktadırlar. Rüzgâr, deprem, taşıt yükü vb. birçok etken bu titreşimlere sebep olmaktadır. Titreşimler büyüklüklerine göre yapıya küçük, orta veya büyük çapta hasar verebilmektedir. Bu yüzden yapıların titreşimler altındaki davranışlarının belirlenmesi oldukça önemli husustur. Yapının, etki eden titreşimler altındaki davranışının tam olarak belirlenebilmesi deneysel yöntemlerle olabilmektedir. Deneysel olarak dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde Deneysel Modal Analiz yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemde yapının belirli bölgelerine konulan ivmeölçerler ile titreşim verileri toplanılmakta, veri işleme çalışmaları yapıldıktan sonra özel yazılımlarla yapının dinamik karakteristikleri belirlenebilmektedir.

Tarihi yapıların sonlu eleman modellerinin oluşturulmasında birçok farklı yaklaşımlar ve yazılımlar önerilmektedir. Hemen bütün yazılımların çalışma mantığı aynıdır. Ancak yapının malzeme özelliklerinin tanıtılması hususunda farklı yaklaşımlar önerilmektedir. Malzeme özelliklerinin sonlu eleman modeline tanıtılmasındaki farklılık, sonlu eleman modelinin oluşturulmasındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Yapı elemanlarının taş, tuğla, harç vb. birim yapı elemanı olarak değil; duvar, sütun, kemer gibi daha büyük ve bütün yapı elemanı olarak modellenmesi, malzemenin de duvar dayanımı, kemer dayanımı vb. olarak tanımlanmasına yol açmaktadır.

Tarihi yapıların davranışlarının belirlenmesinde, literatürde sıklıkla gidilen yol yukarıdaki gibidir. Ancak her bir yapının bu süreçten geçmesi, sonlu eleman modelinin doğruluğunun ancak deneysel yollar ile sağlanması oldukça meşakkatli bir yoldur. Bu sebeple tarihi yapıların davranışları belirlerken farklı yaklaşımların gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın yapılmasında dört ana amaç esas alınmıştır. Bu amaçlardan ilki, literatürdeki bağıntılar ışığında, tarihi yapıların malzeme özelliklerinin belirlenmesi için teorik bir yaklaşım geliştirmektir. İkicisi, Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak ele alınan tarihi Erzurum Lala Paşa Cami'nin ve Erzurum Yakutiye Medresesi'nin deneysel ve teorik dinamik karakteristiklerini belirlemektir. Üçüncüsü, malzeme özelliklerinin belirlenmesindeki yaklaşımın doğruluğunu deneysel olarak kanıtlamak ve takip edilen yaklaşımın tarihi cami, medrese türü yapıların dinamik karakteristiğinin belirlenmesinde kullanılabilecek bir yöntem olduğunu göstermektir. Son olarak, ele alınan yapıların deprem davranışlarının incelenmesidir.

Çalışmada ilk olarak tarihi yığma yapıların mühendislik özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Tarihi yapıların taşıyıcı elemanları, tarihi yapılarda sıklıkla kullanılan malzemelerin özellikleri, tarihi yapılarda meydana gelebilecek hasar çeşitleri ve sebepleri irdelenmiştir. Sonraki kısımda tarihi yapıların sonlu eleman modellerinin oluşturulması anlatılmıştır. Tarihi yapıların sonlu eleman modelleri oluşturulurken kullanılan yöntemler ve tarihi yapıların dinamik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan teorik ve deneysel yöntemlerden bahsedilmiştir. Bir sonraki bölümde ise çalışma kapsamında ele alınan yapıların tarihi ve fiziksel özellikleri hakkında bilgi verilmiştir.

Çalışmanın “Tez Kapsamında Yapılan Çalışmalar” başlığı altında, yapıların malzeme özelliklerinin belirlenmesi hususunda geliştirilen yaklaşım açıklanmış, SolidWorks ve ANSYS programları kullanılarak yapıların sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerin modal analizleri yapılarak yapılara ait teorik mod şekilleri ve doğal frekans değerleri belirlenmiştir. Daha sonra her iki yapı üzerinde Operasyonel Modal Analiz yöntemi gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçümde titreştirici olarak çevresel titreşimler kullanılmıştır. Elde edilen deneysel mod şekilleri ve doğal frekans değerleri ile teorik değerler karşılaştırılarak, yapıların gerçeğe en yakın sonlu eleman modeli belirlenmiştir.

Son kısımda ise yapıların statik ve deprem analizleri gerçekleştirilmiştir. Deprem analizlerinde 1992 Erzincan deprem ivme kayıtları kullanılmıştır. Deprem analiz sonuçları şekiller ve tablolar halinde gösterilmiştir. Elde edilen diğer sonuçlar ve öneriler çalışmanın “Sonuçlar ve Öneriler” başlığı altında sunulmuştur.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürde genel olarak yığma yapılar konusunda oldukça fazla çalışma olmasına rağmen, özellikle taş yapılar hakkında yapılmış çalışma kısıtlıdır. Aşağıda daha çok tezin ana konusu olan taş yapılar ve bunlara benzerlik gösteren yığma yapılarla ilgili yapılmış olan çalışmalar hakkında bilgiler sunulmaktadır.

2.1. Tarihi Yığma Yapıların Malzeme Özelliklerini Belirlemeye Yönelik Çalışmalar

Arıoğlu (1999), çalışmasında tarihi Şehzade caminden hasarlı deneyler ile alınan taş örneklerini irdelemiştir. Taşın cinsinin Küfeki olduğunu belirleyerek mekanik özelliklerini belirlemiştir.

Hendry vd. (2004), çalışmalarında yığma yapılarda oluşabilecek gerilme ve deformasyonları örneklerle açılanmışlar ve yığma yapıların yapım teknikleri hakkında temel bilgiler sunmuşlardır. Yığma yapılarda sıklıkla kullanılan malzemeleri tanıtarak yığma yapı tasarımını teorik olarak açıklamaya çalışmışlardır.

Kanıt ve Işık (2004), çalışmalarında Horasan Harcı'nın kemerler üzerindeki etkisini irdelemişlerdir. Laboratuvar ortamında oluşturulan yığma kemer modeli ve teorik olarak yapılan çalışmalar ile yığma kemer davranışını belirlemişlerdir.

Massart vd. (2005), yaptıkları çalışmada üç boyutlu etkiler üzerindeki yığma yapı malzemelerinin kapasite eğrilerini elde etmeye çalışmışlardır. Bu değerlere ve hangi kabullere göre göçme yüzeylelerinin daha doğru bir şekilde tahmin edilebileceği belirlenmek istenmiştir.

Kanıt ve Işık (2005), yaptıkları çalışmada yığma yapıların genel deprem davranışı hakkında bilgi vermiş, laboratuvar ortamında ürettiği örnek yığma duvar üzerinde deneyler yaparak yük deplasman eğrilerini elde etmiş, duvarın yönetmelikte verilen süneklik şartını sağladığını tespit etmişlerdir.

Aköz (2005), çalışmasında yığma yapıların dayanım ve hasar tespitlerinde kullanılacak yöntemleri irdelemiştir. Bu yöntemlerin sahada kullanılmasıyla ilgili detaylı bilgi vermiştir.

Vasconcelos ve Lourenço (2006), çalışmalarında taş yığma duvarların kesme ve çekme dayanımlarının belirlenmesi için analitik yaklaşımlar geliştirmişlerdir. Deneysel ve analitik çalışmaları irdelemiştir.

Romano (2006), çalışmasında farklı geometriye sahip taş yığma kemerleri deneysel ve teorik olarak inceleyerek, en stabil kemer geometrisi ile ilgili sonuca varmaya çalışmıştır.

Binda vd. (2006), yaptıkları çalışmada iki ve üç yapraklı kompozit duvarların ortak basınç dayanımlarını belirlenmesinde kullanılacak bir denklem geliştirmeye çalışmışlardır.

Aydın vd. (2007), çalışmalarında yığma tarihi yapıların güçlendirilmesi için polimer, plastik gibi farklı malzemeler ve onarım teknikleri önermişlerdir. Önerdikleri bu tekniklerin olumlu ve olumsuz yönlerini irdelemiştir.

Qaisar ve Akhtar (2007), çalışmalarında laboratuvarında ürettikleri yığma duvar modelleri dinamik bir yük olan patlatma etkisi altında irdelemiştir. Deneysel ve teorik sonuçları karşılaştırarak teorik yaklaşımlar geliştirmeye çalışmışlardır.

Demir ve İlki (2014), İstanbul çevresinde Osmanlı döneminde yapılmış tarihi camilerde yaygın olarak kullanılan Küfeki taşının mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmiştir. Bu taşla imal ettikleri tek yapraklı ve dolgulu üç yapraklı duvarların dayanımlarını deneysel olarak belirleyerek, tek yapraklı ve üç yapraklı duvarların dayanımlarını belirlemek için matematiksel denklemler önermişlerdir.

Karimi vd. (2016) iki tip yığma duvarın yük kapasitelerini deneysel olarak belirlemiştir. Duvarların sonlu eleman modellerini oluşturularak, teorik kapasiteleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

2.2. Tarihi Yiğma Yapıların Davranışlarını Belirlemeye Yönelik Çalışmalar

Çakmak vd. (1995), çalışmalarında İstanbul'un en önemli yapılarında biri olan Ayasofya üzerinde sismik çalışmalar gerçekleştirmiştir. Oluşturulan matematik modeller yardımıyla yapının güvenliğini belirleme çalışmışlardır.

Çamlıbel (1998), yaptığı çalışmada Mimar Sinan'ın mimar/mühendisi olduğu bilinen yapıları ele almıştır. Yapıların malzeme özelliklerinden, mimari projelerine, taşıyıcı elemanlarından, yük aktarım şemasına kadar birçok konuyu ayrıntılı şekilde ele almıştır. Yapıların gerilme değerlerini elde etmek amacıyla bağlantılar elde ederek her bir yapı için güvenlik katsayısı elde etmeye çalışmıştır. Bu katsayılardan yola çıkarak ele alınan her yapının güvenliğini belirlemiştir.

Artar (2002), yüksek lisans tez çalışmasında tarihi Şehzade Camisi'nin sonlu eleman modelini SAP2000 yazılımı yardımıyla oluşturmuştur. Model üzerinde statik e dinamik analizler gerçekleştirerek yapının davranışını elde etmeye çalışmıştır.

Lourenco (2001), yaptığı çalışmada tarihi yapıların sonlu eleman modelinin oluşturulmasında dikkate alınması gereken ayrıntılar ve idealleştirmeler önermiştir. Önerileri bazı yapıları üzerinde örneklendirmiştir.

Mele ve Giordiano (2003), çalışmalarında simetrik olan tarihi bir kilisenin sonlu eleman modelini oluşturarak statik analiz gerçekleştirmişlerdir. Gerilmelerin yoğunlaştığı bölgeleri belirleyerek bu bölgelerde deprem analizi gerçekleştirmişlerdir. Yapının restorasyonu için tavsiyelerde bulunmuşlardır.

Oliveira (2003), çalışmasında ele aldığı bazı tarihi yapılar üzerinde sismik araştırmalar gerçekleştirmiştir. Ele alınan yapıların güçlendirilmesi için önerilerde bulunmuştur.

Durukal vd. (2003), çalışmalarında İstanbul'un en önemli tarihi eserlerinden Ayasofya ve Süleymaniye Cami üzerinde çalışma yapmışlardır. Her iki yapının da belirli noktalarına ivmeölçerler yerleştirilerek yapıların davranışları anlık olarak takip edilmiştir. Meydana gelen depremler esnasında yapıların davranışı irdelenmiştir.

Lourenco (2005), çalışmasında Lizbon'da bulunan tarihi binaların bazılarında sismik davranışlarını belirlemek amacıyla analizler gerçekleştirmiştir. Binaların sonlu eleman modellerini oluşturarak gerilme ve deformasyon değerlerini elde etmiştir.

Akan ve Özen (2005), çalışmalarında tarihi Bursa Yeşil Türbesi'nin sonlu eleman modelini SAP2000 yazılımıyla gerçekleştirilerek, model üzerinde statik ve dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir. Yapıda oluşması öngörülen gerilmeleri ve deformasyonları belirlemişlerdir.

Bayraktar (2006), çalışmasında tarihi yapıların malzeme özelliklerini, taşıyıcı elemanlarını ve elemanlar arasında yük aktarımını araştırmıştır. Örnek bir tarihi cami üzerinde yapısal analizler gerçekleştirilerek çıkarımlarını desteklemiştir.

Chiara (2006), çalışmasında yığma olarak inşa edilmiş Vicoforte eliptik kubbesinin non-linear analizlerini gerçekleştirilerek kubbenin dinamik davranışını belirlemiştir.

Casarin ve Modena (2006), çalışmalarında İtalya'da bulunan tarihi Reggio Emilia kilisesinin sonlu eleman modelini oluşturarak statik ve dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir. Yapının dinamik davranışını ve yük kapasitesini irdemişlerdir.

Fahjan ve Keypour (2006), çalışmalarında tarihi Fatih Camisi ve Süleymaniye Camisi üzerinde yaptıkları irdelemeler sonucunda Osmanlı eserlerinin kubbe sistemleri ve yatay destek elemanlarının davranışlarını belirlemişlerdir.

Beyen (2007), 1999 İzmit depremi sonrasında tarihi Fatih Camisi'ni sismik olarak irdelemiştir. Yapının sonlu eleman modeli oluşturularak deprem analizleri gerçekleştirmiştir. Yapının olabilecek muhtemel depremlere karşı davranışını belirlemiştir.

Aras (2007), doktora tezi çalışmasında tarihi Beylerbeyi Sarayı'nın sonlu eleman modelini oluşturmuştur. Hasarlı deneyler yardımıyla elde ettiği malzeme özellikleri ışığında güvenli modele varmıştır. Sonlu eleman modeli ile statik ve dinamik analizler gerçekleştirerek, restorasyon öncesi önerilerde bulunmuştur.

Mustafaraj ve Yardım (2012), yaptıkları çalışmada 16. yüzyıl Osmanlı eseri olan ve günümüzde Ermenistan sınırları içinde kalan Naziresha Camisi'nin sonlu elemanlar modelinin oluşturularak deprem davranışını belirlemeye çalışmışlardır.

Şeker vd. (2013), yaptıkları çalışmada tarihi Kara Mustafa Camisi'ni ele almışlardır. Tarihi yapıyı sayısal ortamda modellenmiş ve hazırlanan modeli üzerinde statik ve dinamik analizler yaparak caminin yapısal performansını irdelemişlerdir.

Köseoğlu ve Canbay (2015), yaptıkları çalışmada 16. yüzyıl Osmanlı eseri olan tarihi Ahmet Paşa Camisi'nin yeraltı su seviyesi ve zemindeki oturmalarından kaynaklı, hasar gören kubbesini ve diğer yapı elemanlarında oluşan çatlakları irdelemişlerdir. Zemindeki iyileştirmelerle yapının çatlak sorununa çözüm aramışlardır.

Çakır vd. (2015), yaptıkları çalışmada tarihi Erzurum Lala Paşa camisini ele almışlardır. Caminin malzemesinin mekanik özelliklerini deneysel olarak belirlemişler ve caminin sonlu eleman modelinin üretmişlerdir. Yapının statik ve dinamik davranışı oluşturulan model yardımıyla belirlemeye çalışmışlardır.

Kavalı vd. (2015), yaptıkları çalışmada tarihi Erzurum Yakutiye Medresesini ele almışlardır. Yapının sonlu eleman modelini oluşturmuşlar ve model üzerinde statik ve dinamik analizler yaparak medresenin yapısal performansı ve deprem davranışını belirlemeye çalışmışlardır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Tarihi Yığıma Yapıların Mühendislik Özellikleri

Tarihi yapıların geçmişten günümüze kadar ulaşmasında başlıca etkenler, yapıda kullanılan taşıyıcı elemanlar ve malzemelerdir. Doğru taşıyıcı eleman ve malzeme bir tarihi yapının ömrüyle doğrudan ilişkilidir. Bazı durumlarda tarihi yapılar farklı sebeplerden dolayı hasara maruz kalmaktadır. Doğru taşıyıcı eleman ve doğru malzemeye rağmen tarihi yapılarda meydana gelen bu hasarların birçok sebebi vardır.

Bu başlık altında; tarihi yapılarda sıklıkla kullanılan malzemeler, tarihi yapıların birçoğunda kullanılmış taşıyıcı elemanlar, tarihi yapılarda meydana gelen hasar ve sebepleri açıklanmıştır.

3.1.1. Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Elemanlar

Tarihi yapılarda, yapım tekniklerinin gelişmesiyle bulunan farklı taşıyıcı elemanlar gözlemlenmektedir. Taşıyıcı eleman seçimi sadece teknolojik gelişmelere bağlı değildir; aynı zamanda yapının inşa edildiği bölgenin ve zamanın mimari özellikleri ve yapım tekniklerine de bağlıdır.

Bu bölümde tarih boyunca yapılarda sıklıkla kullanılmış taşıyıcı eleman çeşitleri anlatılmıştır. Ele alınan çeşitlerden sütunlar, duvarlar, payandalar, tonozlar kemerler ve gergiler vb. taşıyıcı elemanlar ülkemizde bulunan birçok tarihi eserde mevcuttur.

3.1.1.1. Sütunlar

Sütunlar en eski yapı elemanlarından (Şekil 3.1). Eski çağlarda, herhangi bir çaba sarf etmeden ağaç kütükleri kullanılarak sütunlar yapılmıştır. Çatı ve döşemelerden gelen yükler sütunlar yardımıyla temel zeminine aktarılır. Sütunların zemine gömülmemesi için yastık şeklinde

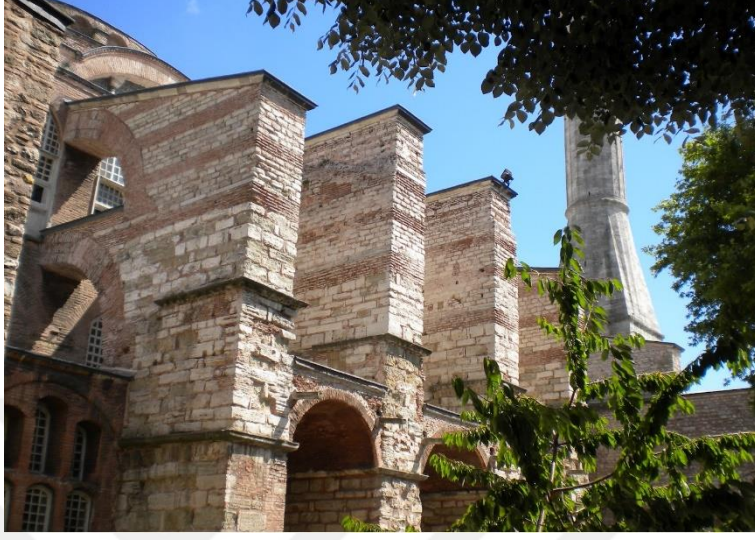
bir taş kullanılır. Bu taş sütün tabanı denir. Sütün tabanlarının üst kısmında oyuk bulunur ve sütün bu oyuğa oturtulur.



Şekil 3.1. Sütün örneği

3.1.1.2. Duvarlar ve Payandalar

Tarihi binalarda duvarlar, farklı yapı malzemeleriyle inşa edilen ana taşıyıcı elemanlardır. Duvarların boyutları, üzerine gelen aksenal yükler ve deprem yüklerinin miktarı ile belirlenir. Tarihi yapılarda duvarlar temel taşıyıcı olduğundan ve deprem yüklerinin önemli kısımlarını karşıladığından kesitleri kalın seçilmektedir. Duvarlar, yatay ve düşey yükleri herhangi bir hasar almadan karşılayabilmesi için bir bütün halinde çalışmalıdır. Gerilmelerin homojen olarak dağılması ve duvar elemanının herhangi bir yerinde gerilme birikimi olmaması gerekmektedir. Bu sebeple tarihi yığma yapıların duvarlarında bütünlüğün sağlanması için taş ve tuğlalar, harçlar, kenetler, ahşap hatıllar vb. birleşim elemanlarıyla bağlanmışlardır. Bazı durumlarda aksenal yüklerin taşınmasında yardımcı olmak sebebiyle duvarlar, payandalar ile desteklenmiştir (Sesigür vd., 2007).



Şekil 3.2. Payanda Örneği

3.1.1.3. Kemerler

Kemerler daha önceki tarihlerde kapı ve pencere açıklıklarını geçmek için kullanılmıştır. Yapı teknolojisinin gelişmesiyle, tarihi yapılarda geniş açıklıkları geçmek ya da büyük yarıçaplı kubbelerin yük aktarımlarının sağlanması için kullanılmıştır. Kemerin üstündeki yığma kısmın, kemer taşıyıcılığına herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Kemerlerin orta kısmında bulunan kilit taş, kemerin basınç gerilmesinin maksimum olduğu yerdir. Kemerler, yapıları gereği çekme dayanımlarını sönümler ve tamamen basınç gerilmelerine maruz kalırlar (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Kemer örneği

3.1.1.4. Tonzlar

Tonoz, bir kemerin dik düzleminde ötelenmesiyle meydana gelen, tarihi yapılarda dikdörtgen açıklıkların geçilmesi için kullanılan bir yapı elemanıdır (Şekil 3.4). Tonzlar; ilkel tonoz, beşik tonoz, çapraz tonoz ve manastır tonozu olmak üzere dört şekilde değerlendirilmektedir (Sesigür vd., 2007).



Şekil 3.4. Tonz örneği

3.1.1.5. Kubbeler

Kubbe, bir kemerin düşey yönde 360 derece döndürülmesiyle elde edilmektedir. Genellikle tuğla, ahşap ya da örneği az olsa da taş malzemedен inşa edilmiştir. Kubbeler, kemerlerin taşıyıcılık özelliklerine sahiptir. Kubbenin her köşe elemanı bir mesnete oturmak zorundadır. Bu sebeple kubbeler sadece dairesel boşluklar için kullanılan yapı elemanlarıdır. Kare planlı yapıların üstü kubbelerle kapatılmak istenirse bazı geçiş elemanlarının kullanılması gerekmektedir. Pandaltif, tromplar ve Türk üçgeni bu geçiş elemanlarına örnek verilebilir (Şekil 3.5). Geniş açıklıklı bazı ana kubbeler, yarım kubbeler kullanılarak desteklenebilmektedir (Sesigür vd., 2007).



Şekil 3.5. Kubbe örneği

3.1.1.6. Gergiler

Gergiler; kemerler, kubbeler gibi yapıların davranışları sebebiyle meydana gelen itkinin karşılanması için kullanılan yapı elemanlarıdır. Tarihi yapılarda malzeme olarak genellikle ahşap veya dövme demir kullanılmaktadır. Genellikle üzengi seviyesinde, tek düzeyde tek ya da çift gergi yanında kilit ile üzengi arasında ikinci bir sıra gergi düzeni oluşturulan yapılar da vardır.



Şekil 3.6. Gergi örneği

3.1.2. Tarihi Yapılarda Kullanılan Malzemeler

Tarihi yapıların inşasına başlanmadan önce, yapının her elemanında kullanılan malzemeler belirlenmektedir. Çünkü ulaşım ve tedarikteki zorluktan dolayı, her bölgenin kendine has yapı malzemeleri gereksinimi olmuştur. Bu bölümde ülkemizde sıklıkla karşılaşılan taş, tuğla, ahşap yapı malzemeleri ve harçlar ele alınmıştır.

3.1.2.1. Taş

Taş; yapı teknolojisinin en eski malzemelerinden biridir. Tarihi yapılarda temel malzemesi olarak alternatif olmaya, üst yapı malzemesinde ise tuğla ve/veya ahşapla beraber en çok kullanılan malzemedir. Yüksek dayanımı, atmosfer koşullarına uzun yıllar boyunca karşı koyabilme yeteneği, tarihi dönemlerde kolayca elde edilebilir olması taşın önemine birkaç örnektir. Taş bilindiği gibi basınç gerilmelerine yüksek dayanım, ancak çekme gerilmesine oldukça düşük dayanım göstermektedir. Çizelge 3.1.'de bazı taş cinslerinin mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Doğal taşların ortalama dayanım değerleri (Ünay, 2002)

Taşın Cinsi	Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa) x10³
Granit	30-70	4-7	14-33	30-50
Mermer	25-65	1-15	9-45	25-70
Kireç Taşı	18-35	2-6	6-20	10-55
Kum Taşı	5-30	2-4	2-10	13-50
Kuvars	10-30	3-4	3-10	15-55
Serpantin	7-30	6-11	2-10	23-45

Taşlar, kemer, tonoz ve kubbe gibi yapı elemanlarda, aksenal yük taşıyan duvarlar ve sütunlarda kullanılmıştır. Taşların çekme dayanımları basınç dayanımlarının %5-10, kayma dayanımları ise basınç dayanımlarının %25'i civarındadır.

3.1.2.2. Tuğla

Tuğlalar dere yataklarının yüzeylerinde biriken kum taşları kalıntılarının pişirilmesiyle elde edilir. Tarihi yapılarda kullanılan tuğlalar saf kaolin ve kil karışımının fırınlarda tüksek ateş altında pişirilmesiyle elde edilir. Fırının bulunmadığı yerlerde güneş ısıyla kurutulmuş tuğlaların kullanıldığı görülmektedir (Ünay, 2002). Birçok araştırma, tuğlaların Roma dönemi öncesinde de yığma yapı elemanı olarak kullanıldığını göstermektedir.

Tuğa genel olarak ahşabın ve taşın zor elde edildiği bölgelerde kullanılmıştır. İnsanların el ile rahatça şekil verebildiği yapı malzemesi olan tuğla, genellikle kemerlerde, tonozlarda ve kubbelere kullanılmıştır (Şekil 3.7). Tuğlaların ortalama basınç dayanımları 10-30 MPa, çekme dayanımları 2.7-5 MPa ve kayma dayanımları 10-20 MPa mertebelerindedir.



Şekil 3.7. 12. yüzyıl tuğla malzemeli tarihi kilise Ferecik, Yunanistan

3.1.2.3. Ahşap

Ahşap, tarihi yapılarda işlenme ve elde edilebilme kolaylığı sebebiyle en çok kullanılan yapı malzemelerindendir. Taş ve tuğlaya oranla malzeme ömrü oldukça kısadır. Ancak ahşabın çekme ve eğilme gerilmelerine karşı davranışı, malzemenin hafif olması sebebiyle taş ve tuğlaya göre daha avantajlıdır. Özellikle çekme davranışı nedeniyle taş ile geçilemeyen büyük açıklıklar ahşap ile geçilmiştir. Tarihi yapılarda; tavan, duvarlarda hatıl ve döşeme taşıyıcı sistemi olarak kullanılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Ahşap malzemeli tarihi yapılar

3.1.2.4. Harçlar

Tarihte kullanılan ilk harç çamurdur. Çamurun duvar yapısının güçlü olması için katabileceği bir özelliği yoktur. Topraktan elde edilen kerpiç ve tuğla yapı malzemesi olarak kullanılması, harcın meydana gelmesine sebep olmuştur. Kireç, kum ve su karışımından oluşan harçlar, Roma döneminde taş ve tuğladan yapılan duvarlarda bağlayıcı eleman olarak kullanılmaya başlanmıştır. Harç ile birlikte tuğla vb. kubbe yapımında kullanılan elemanlar günümüzde beton dökümü gibi bir kalıp içine dökülerek tonoz, kubbe ve kemerler yapılmıştır (Çamlıbel, 2000a).

Ayrıca tarihi yapılarda bağlayıcı olarak Horasan Harcı da görülmektedir. Horasan Harcı'nın muhtevası tam olarak bilinmemektedir. Ancak kil, kireç, taş tozu, taş kırıntıları, mermer tozu, su, keçi kılı ve hatta yumurta akı bulunduğu tarihi kayıtlarda belirtilmiştir. Horasan Harcı'nın içeriği yöresel uygulamalarda da değişiklik göstermektedir (Kant ve Işık, 2004).

3.1.3. Tarihi Yapılarda Hasar Çeşitleri

Tarihi yapılar yüzyıllar boyunca farklı statik ve dinamik yüklere maruz kalmıştır. Farklı yüklere maruz kalan bu yapılarda gerek ağır gerekse hafif çeşitli hasarlar meydana gelmiştir. Bu

bölümde tarihi yığma binalarda meydana gelen hasarlar ele alınmıştır. Hasarlar oluştuğu yere ve büyüklüğüne göre 2 grupta incelenmiştir.

3.1.3.1. Oluştugu Yere Göre Hasarlar

Yığma yapıların hemen hemen bütün elemanları taşıyıcı eleman rolünü üstlenmektedir. Bu sebeple yığma yapıda meydana gelebilecek hasar, çoğunlukla taşıyıcılığı etkilemektedir. Taşıyıcı olan duvarlarda oluşan çeşitli çatlaklar ya da deformasyonlar, hatıllarda veya döşemelerde meydana gelen her çeşit hasarın, binaların taşıyıcı elemanlarında oluştuğu söylenir.

3.1.3.1.1. Taşıyıcı Elemanlarda Oluşan Hasarlar

Yığma binalarda mimari unsuru belirleyen duvarlar, lentolar, hatıllar ve döşemelerle beraber taşıyıcı rolündedir. Yığma binalardaki en büyük hasar, taşıyıcı rolü olan bu duvarlardaki çatlaklardır. Çatlakların nedenleri ileriki bölümlerde detaylıca açıklanmıştır. Lento ve hatıllardaki hasarların aşırı yüke veya imalat kusurlarına bağlı olduğu söylenebilir.

3.1.3.1.2. Taşıyıcı Olmayan Elemanlarda Oluşan Hasarlar

Yapıların ikincil düzeydeki elemanlarında meydana gelen, yapının statik ve dinamik davranışını önemli değişimlere sebep olmayan hasarlardır. Yığma binalarda taşıyıcı elemanları göz önüne aldığımızda, ikincil düzeyde elemanlar tamamen iç mimariyi meydana getiren (yapı elemanı işlemleri, taşıyıcı olmayan duvarlar vb.) elemanlardır.

3.1.3.2. Büyüklüğüne Göre Hasarlar

Hasarları hafif, orta ve ağır olarak üç grupta inceleyebiliriz. Az hasarlı olarak nitelendirilen yapılar, herhangi bir onarım görmeden devamlılığını ve kaliteli hizmetini sürdürebilen yapılardır. Orta hasarlı olarak nitelendirilen yapılar, küçük ve/veya büyük ölçekli onarımlar sonrasında hizmet veremeye devam edebilen yapılardır. Ağır hasarlı olarak nitelendirilen yapılar ise onarım

görmesine rağmen hizmet vermesi oldukça zor olan yapılar olarak sınıflandırılır. Oluşan çatlağın biçimi, yeri ve boyutu yapıyı etkileyecek nitelikte ya da önemsiz olabilmektedir. Çatlak oluşumunda; oluşum şekli, yeri ve miktarına göre yapıya gerekli müdahale yöntemi belirlenmektedir. Yığma binaların taşıyıcı duvarlarında oluşan çatlak genişliğine göre hasar durumları Çizelge 3.2’de verilmiştir. Büyüklüğüne göre hasarlar başlığı altında taşıyıcı duvarlarda meydana gelebilecek hasarlar incelenmiştir. Az hasarlı, orta hasarlı ve ağır hasarlı olarak üç grupta ele alınmıştır.

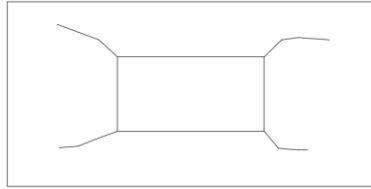


Çizelge 3.2. Yığma bina duvarlarında çatlak düzeyleri (Bayülke, 1999)

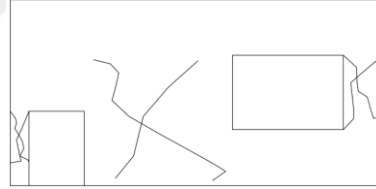
Çatlak Genişliği	Hasar Derecesi	Açıklamalar
0.1'ten az	Önemsiz	Yapıya ve kullanıma etkisi yoktur.
0.1-0.3 mm	Önemsiz, Az	Taşıyıcı sisteme ve yapının kullanımına bir etkisi yoktur
0.3-1.0 mm	Az	Taşıyıcı sisteme bir etkisi yoktur. Estetik açıdan sakıncalı olabilir. Dış cephe elemanlarının yıpranmasını hızlandırır.
Buraya kadar olan çatlaklar kılcal çatlaklardır. Çoğu zaman gözden kaçabilir. 1 mm yakın çatlarda duvar kâğıtlarında buruşukluklar gözlenebilir.		
Çatlak Genişliği	Hasar Derecesi	Açıklamalar
1.0-2.0 mm	Orta	Taşıyıcı sisteme bir etkisi yoktur. Estetik açıdan sakıncalı olabilir. Dış cephe elemanlarının yıpranmasını hızlandırır. Bu düzeydeki çatlaklar briketleri, pencere ve kapı lentolarını çatlatabilir. Birkaç metre uzaktan fark edilebilirler. Bu düzeyden daha ileri düzeydeki çatlaklar yapıda oturanları önlem alınması için harekete geçebilir.
2.0-5.0 mm	Orta	Taşıyıcı sistemi etkilemeye başlar. Dış duvarlardan içeriye hava akımları duyumsanmaya başlar, pencere ve kapılar sıkışır ve kapanmamaya başlar. Yapının kullanımı etkilenmeye başlar.
5.0-15.0 mm	Orta-Ağır	Kapı ve pencereler sıkışabilir. Su ve kanal bağlantıları kırılabilir. Binaya su ve soğuk hava girer. Pencere camları çatlar ve kırılabilir, sıvılar dökülmeye başlar. Tuğla duvarlar parçalanır. Yığma kemerler çökebilir. Bu boyutlardaki çatlaklar kabul edilemez çatlak sınırı oluşturur.
15.0-25.0 mm	Ağır	Ciddi onarım ve güçlendirme gerektirir. Yapının stabilitesi çok büyük bir tehlike altındadır.
25.0 mm'ten çok	Çok Ağır ve Çok Tehlikeli	Yapıda ağır hasar, ciddi onarım ya da yeniden yapım gerekir.

3.1.3.2.1. Az Hasarlı Taşıyıcı Duvarlar

Hasar durumunun az olması neticesinde duvarda öncelikle sıva çatlakları belirlemektedir. Eğer etki eden yük yönü (genellikle deprem yükü) duvara paralel ise duvarın hem yatay hem de düşey yönünde eğik çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar, duvarda bulunan pencere, kapı gibi boşlukların kenarlarından dışa doğru uzanır (Şekil 3.9a). Bu pencere, kapı vb. boşluklar arasındaki duvar gövdesi kısımlarında da ince çatlaklar görülebilir (Şekil 3.9b). Duvara etki eden yükün, duvara dik yönde etki etmesi durumunda ise duvar gövdesinde yatay ve/veya düşey çatlaklar görülebilir. Düşey çatlaklar duvarın diğer duvarlar ile mesnetlendiği bölgelerde görülür (Şekil 3.9c,d). Bu durum, kerpiç duvarlarda ise sıva dökülmesi veya hafif kayma şeklinde kendini gösterir (Şekil 3.9e,f) (Gülkan ve Sucuoğlu, 1988).



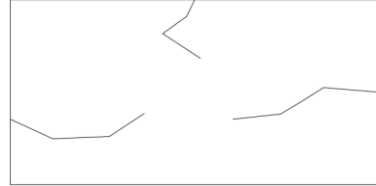
(a) Pencere Köşelerinde Çatlak



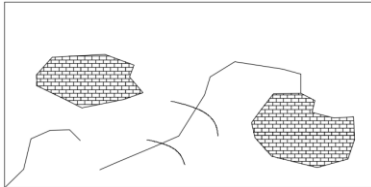
(b) Boşluk Ortalarında Eğik Sıva Çatlakları



(c) Kenar Çatlağı



(d) Ortada Çatlak



(e) Sıva Dökülmesi ve İnce Sıva Çatlakları

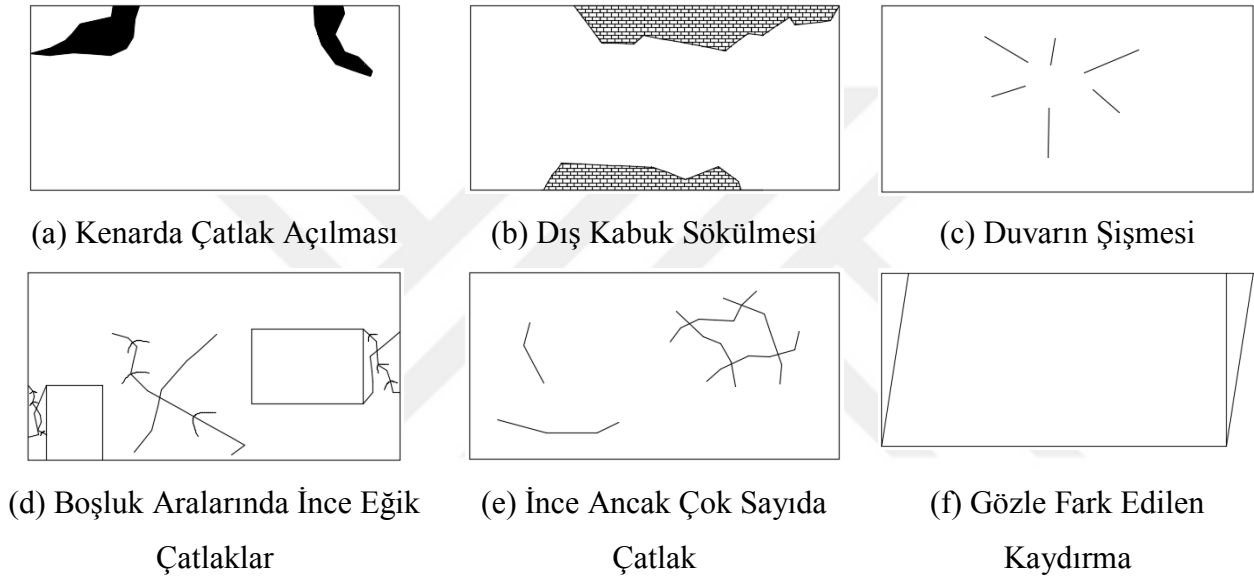


(f) Hafif Kaydırma (Gözle Zor Fark Edilen)

Şekil 3.9. Az hasarlı duvar örnekleri (Gülkan ve Sucuoğlu, 1988)

3.1.3.2.2. Orta Hasarlı Taşıyıcı Duvarlar

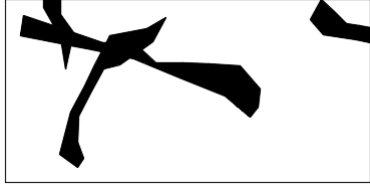
Yığma duvarlarda orta dereceli olarak nitelendirilen hasarlar, az hasarlı durumda bulunan duvarların ince (kılcal) çatlaklarının büyümesiyle meydana gelir (Şekil 3.10) (Gülkan ve Sucuoğlu, 1988).



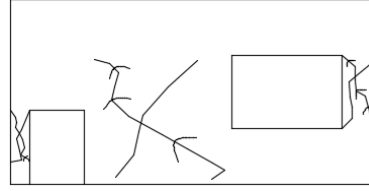
Şekil 3.10. Orta hasarlı duvar örnekleri (Gülkan ve Sucuoğlu, 1988)

3.1.3.2.3. Ağır Hasarlı Taşıyıcı Duvarlar

Ağır derecede olarak nitelendirilen hasarlı yığma duvarlarda çatlaklar, geniş ve derindir. Duvarın bazı kısımlarında kısmen dökülmeler ve yıkılmalar oluşur. Etki eden yükün yönü duvar düzlemine paralel ise duvar kütlelerinde geniş ve derin çatlaklar oluşur (Şekil 3.11a). Duvar kütlelerinde boşluklar var ise bu boşluklar arasındaki duvar kısımları yoğun şekilde hasara uğrarlar. Geniş eğik kesme çatlakları bu duvar kısımlarda yoğunlaşır, ayrıca boşluk köşelerinden dışarıya doğru geniş eğik çatlaklar meydana gelir (Şekil 3.11b).



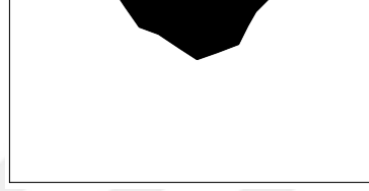
(a) Derin ve Yoğun Çatlaklar



(b) Boşluk Arası Duvar Kısımlarının Ağır Çatlaması



(c) Köşe ve Kenar Kırılması



(d) Ortada Kırılma ve Dökülme

Şekil 3.11. Ağır hasarlı duvar örnekleri (Gülkan ve Sucuoğlu, 1988)

Bazı durumlarda pencere boşluklarının dikdörtgenliğinin kaybolduğu gözlemlenir. Etki eden yük yönü, duvar kütesine dik ise duvar dışarı eğilmeye çalışır ancak duvar kenarlarına dik kesişen duvarlar buna engel olacağı için duvarların mesnet bölgelerinde aşırı gerilmeler oluşur ve duvarın bu bölgelerinde kırılmalar gözlemlenir (Şekil 3.11c). Duvar kütesinin ortası ise fazla eğileceğinden duvar bu eğilmeye ancak kırılarak uyum sağlayabilecektir (Şekil 3.11d).

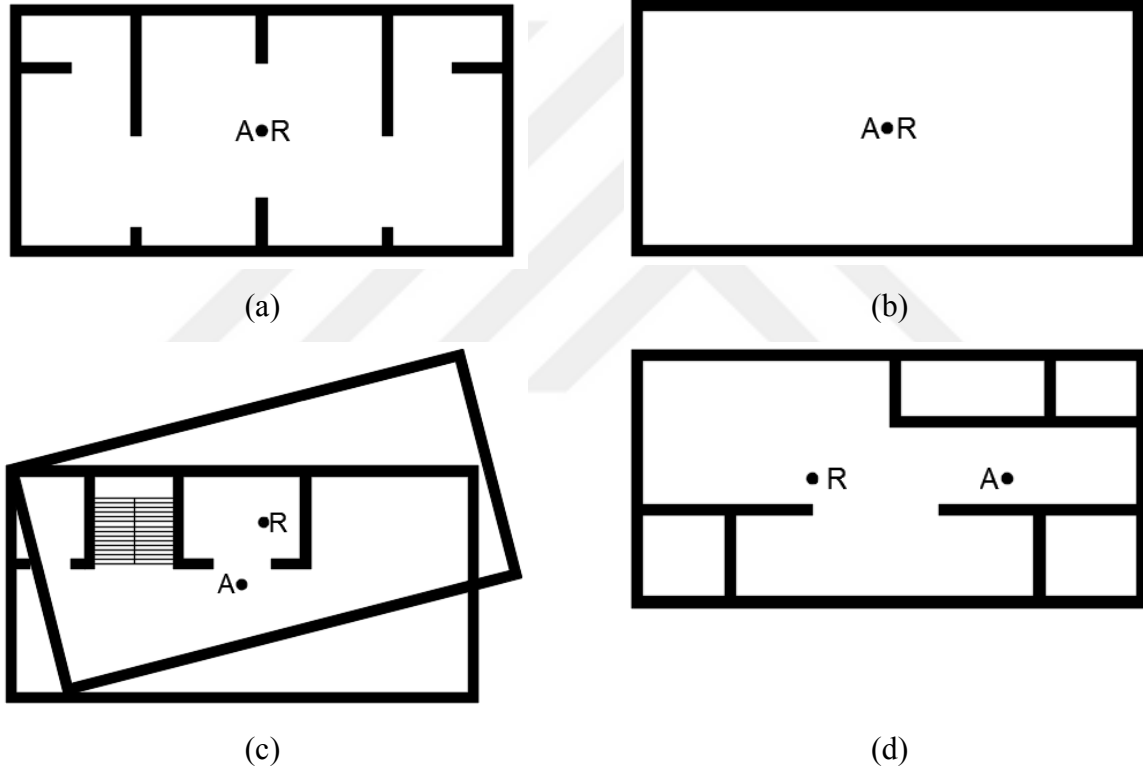
3.1.4. Tarihi Yığma Yapılarda Hasarların Nedenleri

Yığma binaların ana taşıyıcı elemanı duvarlardır. Bu sebeple duvarlarda oluşabilecek herhangi bir hasar doğrudan doğruya taşıyıcı sistemi etkiler. Yığma duvarlı taşıyıcı sistemler genelde; deformasyon kabiliyeti düşük, gevrek kırılmaya yatkın ve zayıf süneklikte olma gibi olumsuz özelliklere sahiptirler (Çamlıbel, 2000b).

Bu bölümde tarihi yığma yapılarda meydana gelen hasarların nedenleri irdelenmiştir. İmalat kusurları, yorulma, aşırı yükleme, deprem, patlatma, yangın, zemin hareketleri başlıklarında bu nedenler incelenmiştir.

3.1.4.1. Deprem

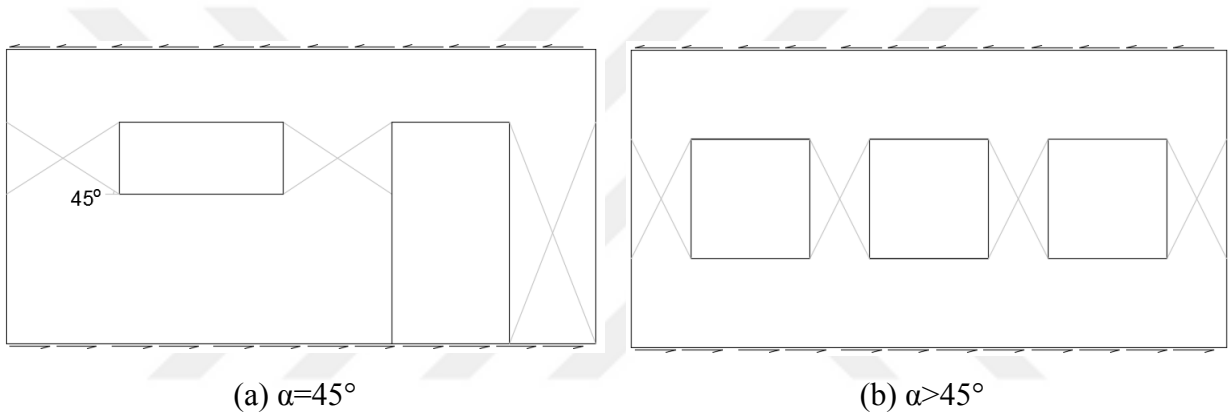
Tarihi yapılar, inşa edildikleri dönemde depreme dayanıklı yapı yapma ilkelerine (dar açıklık, süper simetri vb.) dikkat edilmemesi durumunda deprem sebebiyle hasarın meydana gelmesi kaçınılmazdır. Genellikle simetrik olmayan yığma yapılarda ağırlık merkeziyle simetrik merkezinin birbirlerine uzak olması çatlamların olmasına sebep olur (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Yığma yapı plan örnekleri

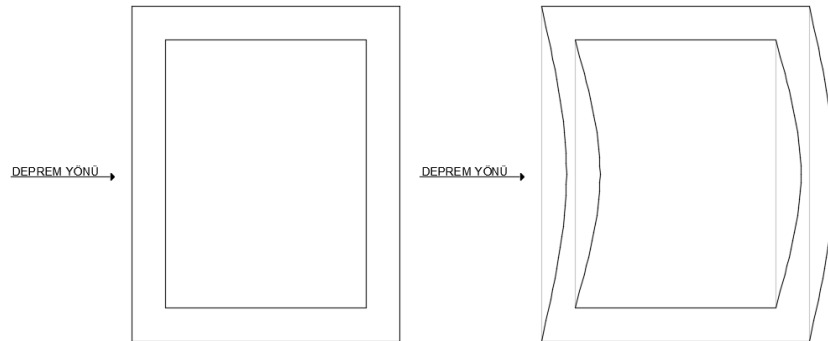
Şekil 3.12a ve Şekil 3.12b’de yapı planı, rijitlik merkezi ağırlık merkezi ile çakışacak şekilde tasarlanmıştır. Yapının deprem yükleri etkisi altında hasar görmemesi tasarım aşamasında sağlanmıştır. Şekil 3.12c’te ise rijitlik merkezi ile ağırlık merkezi birbirinden uzaklaşmış durumdadır. Deprem sebebiyle yapıya gelecek kuvvet, yapı planının ağırlık merkezine etkiler ve yapı rijitlik merkezi etrafında dönmeye zorlanır. Bu sebeple yapıda burulma sebebiyle çatlaklar meydana gelir. Şekil 3.12d’de ise deprem doğrultusuna dik doğrultudaki duvarın bir rijitliği

olmadığı için deprem kaynaklı kuvvetleri etkisi sebebiyle duvar kütlelerinde zorlanmalar meydana gelir ve çatlaklar oluşur. Yığma yapılarda duvarlar deprem anında çoğunlukla kesme kuvvetleri etkisiyle zorlanır. Duvarlarda bulunan pencere ve kapı boşlukları alanının, toplam duvar alanının %40'ından büyük veya eşit olması durumunda boşluklar arasındaki bölümlerde 45 derecelik eğimli çatlaklar oluştuğu gözlenmektedir (Şekil 3.13a). Cephe duvarlarında boşlu alanı duvar parçalarından büyük ise düşey gerilmelerin varlığı sonucu, kesme çatlaklarının doğrultusu 45°'ten fazla olur (Şekil 3.13b).



Şekil 3.13. Deprem X çatlakları (Çamlıbel, 2000b)

Yapı, süper simetrik ve iyi kalite işçilikle inşa edilmiş olsa da deprem doğrultusuna dik doğrultudaki uzun ve mesnetlenmemiş duvarlarda görülen büyük duvar hareketleri sonucu deprem yığma binalarda hasara sebep olur (Şekil 3.14) (Üstündağ, 2000).



Şekil 3.14. Uzun doğrultuda mesnetlenmemiş duvarda oluşan hasar (Üstündağ, 2000)

3.1.4.2. Yorulma

Yapı ya da yapı elemanları sürekli olarak tekrarlı yüklere (düşük genlikte tekrar eden trafik kaynaklı titreşimler gibi) maruz kalmasından dolayı oluşan hasar türüdür. Yığma binalarda yapı malzemesinde (taşlar, tuğla vb.) ezilmeler ve dağılmalar görülür.

3.1.4.3. Aşırı Yükleme

Yığma binalarda özellikle toprak damlı yapılarda kar yükü gibi yükler sebebiyle görülen hasar nedenidir. Damın yapıya aşırı ağırlık getirmesi ve buna bağlı olarak yapının aşırı düşey yüklere maruz kalması sonucu yapı malzemelerinde deformasyonlar oluşur.

3.1.4.4. Yangın

Yığma yapılarda yangın özellikle ahşap elemanlar üzerinde hemen etkili olmaktadır. Taş vb. yapı elemanlarının yangın dayanımının yüksek olması yığma yapıyı yangına daha dayanıklı hale getirmektedir. Şekil 3.15’de yangına maruz kalan bir yığma bina sunulmaktadır.



Şekil 3.15. Yangına maruz kalan Haydar Paşa Garı

3.1.4.5. Patlatma

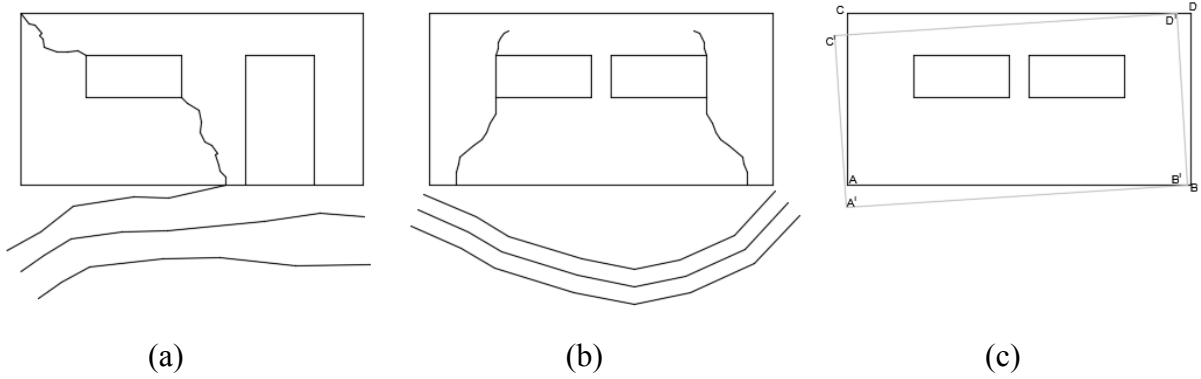
Yığma binaların belirli alanlarının ya da tamamının maruz kaldığı bu dinamik yükler yapının bütünlüğünü etkileyen ciddi zararlar verebilmektedir. Şekil 3.16’da yapının yakınlarında yapılan baraj projesinde, patlatmalardan etkilenen Osmanlı dönemine ait bir kilise gösterilmektedir.



Şekil 3.16. Patlatma etkisi ile hasar gören yığma yapı

3.1.4.6. Zemin (Temel Oturmaları) Hareketleri

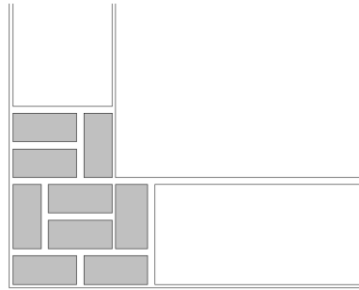
Yapı temellerinde bölgesel oturmalar nedeniyle yapı duvarlarında çatlaklar oluştuğu gibi, farklı oturmalar sonucunda da yapı duvarlarında çatlaklar meydana gelir. Çatlakların yeri, oluşma şekli ve ilerleme düzlemi temel oturmasının olduğu bölümü belirler. Temel zeminin oturması yeraltı sularının etkisi ile zemin parametrelerindeki azalma vb. sebeplerden kaynaklanır. Özellikle geçirimsiz kil sınıfı zeminlerde uzun bir zaman sonra temel oturması meydana gelir. Bu durumda oturmalar yavaş olur ve yapının yapımından belli bir süre sonra çatlaklar belirginleşir. Yeraltı suyunun azalması ile bu killerde büzülme (rötre) oluşur ve temel oturmaları bir süre daha devam eder. Bu nedenle kurak mevsimlerin sonuna artan rötre sebebiyle oturma çatlaklarının boyutu artar. Şekil 3.17a’da sunulan yapının sol köşesinde oluşan oturma sonucu yapı çatlamıştır. Bu durumda diğer köşede bir oturma oluşmaz. Şekil 3.17b’de yapının köşelerinde oturma olmayabilir, çünkü oturmalar yapının orta kısmındadır ve çatlamalar şekildeki gibi olur. Yapının A, B noktalarının farklı oturma yapması sonucu yapıda Şekil 3.17c’de görüldüğü gibi yer değiştirmeler oluşur.



Şekil 3.17. Yığma yapılarda temel oturmalarından kaynaklanmış hasarlar (Bayülke, 1995)

3.1.4.7. İmalat Kusurları

Taşıyıcı elemanların gevrek yapıda olması, taşıyıcı duvar elemanlarının birbirine bağlamakta kullanılan harcın yeterli çekme mukavemetine sahip olmaması, birleşim detaylarının iyi çözülmemesi, çatının ve döşemenin duvara mesnetlenmesinin iyi yapılamaması, duvar birleşimlerinin ve köşelerin iyi düzenlenmemesi, yapı elemanının (taş, tuğla vb.) yeterli mukavemete sahip olmaması, duvarlarda kullanılan harcın yapı elemanları arasındaki boşlukları tam olarak homojen bir şekilde doldurulmaması, yapım kalitesinin yetersiz olması, malzeme ve işçiliğin kötü olması, kontrolün olmayışı gibi sebepler imalat kusurları olarak sıralanabilir. Dik olarak kavuşan iki duvarın birleşiminde düzgün kesilmiş taşlarla geçme yapılması gerekir (Şekil 3.18), (Karaesmen, 1996).



Şekil 3.18. Yığma köşe duvarı detayı (Karaesmen 1996)

3.2. Tarihi Yığma Yapıların Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması

Bu başlık altında tarihi yığma yapıların sonlu eleman modelinin gerçeğe en yakın şekilde modellenebilmesi için literatürde önerilen yöntemlere değinilmiştir. Tarihi yapıların modellenmesi için kullanılan yöntemler ile teorik ve deneysel modal analiz ele alınmıştır.

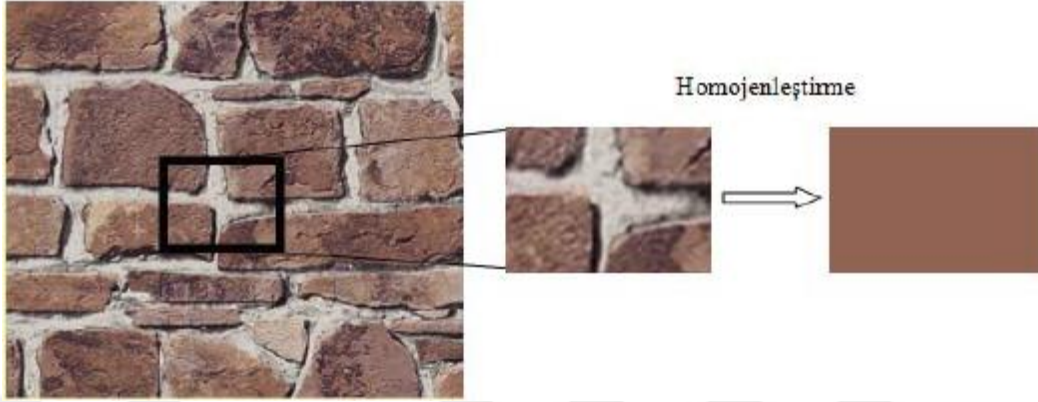
3.2.1. Kullanılan Yöntemler

Betonarme yapıların sonlu eleman modellemesi ile yığma yapıların sonlu eleman modellemesi oldukça farklıdır. Betonarme malzemesi heterojen bir yapıdadır. Bu sebeple herhangi bir yapısal eleman gerçeğe yakın şekilde yığma yapılara göre kolayca modellenebilir. Ancak yığma yapıların taşıyıcı elemanları göz önüne alındığında, elemanların oluştuğu malzemelerdeki çeşitlilik, yapı elemanları şekilleri gibi sebepler nedeniyle sonlu elemanlarının oluşturulması oldukça zordur. Malzemelerdeki ve yapı elemanlarındaki bu sorunlar nedeniyle yapı modelinin oluşturulması için kabullere dayanan modelleme teknikleri geliştirilmiştir. Bazı durumlarda modeller, yığma yapı elemanları kendisini oluşturan taş, tuğla, harç gibi yapı birimlerinin ayrı ayrı modellenmesiyle de oluşturulmaktadır. Ancak bu durum büyük yapılarda oldukça zaman alan bir işlemdir.

Literatüre bakıldığında yığma yapıların sonlu eleman modellerinin oluşturulmasında yaygın olarak üç modelleme tekniği kullanılmaktadır. Bunlar, makro modelleme, basitleştirilmiş makro modelleme ve mikro modelleme yöntemleridir (Lourenço, 1996).

3.2.1.1. Makro Modelleme Yöntemi

Makro modelleme tekniğinin ana kabulü, yığma yapı elemanını homojenleştirerek kompozit malzeme olarak düşünülmesidir (Anthoine, 1997). Sadece malzeme özellikleri değil, mekanik özellikler de homojenleştirme işlemi sonucunda elde edilir. Homojenleştirme işlemi sonucu taş, tuğla, harç vb. malzemedan meydana gelmiş yapı elemanı için tek bir malzeme özelliği elde edilmektedir (Zucchini ve Lourenço, 2002).



Şekil 3.19. HOMOJENLEŞTİRME İŞLEMİ

Şekil 3.19’da görüldüğü gibi yapı malzemesi duvar örgüsünden alınan basit bir görüntüde harç ve taşın katılım oranları dikkate alınarak tek bir malzeme olarak kabul edilebilmektedir. Zucchini ve Lourenço (2006) ve Atamtürktür vd. (2012) yapmış oldukları çalışmalarda, yapı malzemesi ve harç için malzeme parametrelerinin hesaplanmasında Denklem 3.1’de verilen bağıntıyı önermektedir.

$$E_m = \frac{1+\gamma_t}{1+\frac{\gamma_t}{\gamma_m}} E_t \quad (3.1)$$

Burada;

E_m , eşdeğer elastisite modülü,

$\gamma_t=t_h/t_t$, kalınlık oranı,

t_h , harç kalınlığı,

t_t , yapı malzemesi (taş, tuğla vb.) kalınlığı,

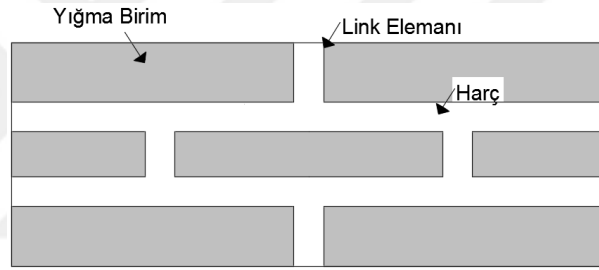
$\gamma_m=E_h/E_t$, elastisite modülü oranı,

E_h , harcın elastisite modülü,

E_t , yapı malzemesinin (taş, tuğla vb.) elastisite modülüdür.

3.2.1.2. Basitleştirilmiş Mikro Modelleme Yöntemi

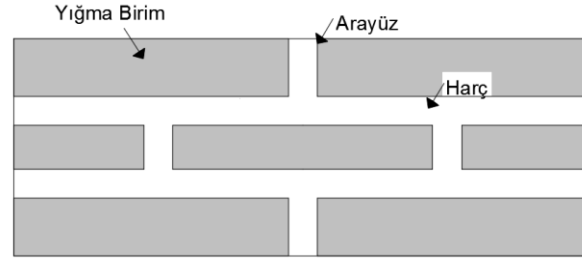
Bu teknikte; taş, tuğla gibi yapı elemanlarının boyutları, harcın yarısı kadar genişletilerek harç tabakası ihmal edilir. Yığma birimler ortalama ara yüzey ile birbirinden ayrılmaktadır (Şekil 3.20). Meydana gelebilecek çatlaklar ise bu ara yüzey çizgilerinde olacağı kabul edilmektedir (Romano, 2006). Bu modelleme tekniğinde yapılan kabule göre yapı elemanında meydana gelebilecek olan çekme, kayma çatlaklarının ve tüm hasarın ara yüzeylerde meydana geleceği kabul edilmektedir. Yapı malzemelerinde meydana gelecek hasarlar ise yapı malzemesinin orta kısmında düşey olarak gerçekleşeceği kabul edilmektedir.



Şekil 3.20. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği (Jafarov vd., 2012)

3.2.1.3. Mikro Modelleme Yöntemi

Çoğu araştırmacıya göre bu modelleme tekniği en gelişmiş modelleme tekniğidir. Yığma birim (yapı malzemesi) ve harç elemanlar birbirinden bağımsız olarak modellenir. Birleşim yerlerinde yüzey elemanları tanımlanır (Bayraktar vd., 2007). Mikro modelleme tekniğinde yığma yapı elemanını meydana getiren yapı malzemelerinin (taş, tuğla, harç vb.) ayrı ayrı her birinin mekanik özellikleri dikkate alınmaktadır. Bu yaklaşımda çatlakların yığma birim ve harcın arasındaki birleşim yüzeylerde meydana geleceği varsayılmaktadır (Oliviera, 2003). Şekil 3.21'de tuğla ve harç kullanılarak oluşturulan duvarın mikro modelleme tekniğinde nasıl değerlendirileceğine ilişkin bir örnek verilmektedir.



Şekil 3.21. Mikro modelleme tekniği (Jafarov vd., 2012)

3.2.2. Yapıların Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi

Tasarlanmış ve inşa edilmiş tüm yapılar kendilerine özgü doğal frekans ve mod şekillerine sahiptirler. Bu parametreler yapının karakteristiği olarak adlandırılır. Yapı karakteristikleri, yapının kütlesine ve rijitliğine bağlıdır. Bu parametrelerin bilinmesi, yapıya etki edebilecek herhangi bir yük karşısında yapının muhtemel davranışını belirlemek ve yapı güvenliğini sağlamak adına oldukça önemlidir.

Yapıların dinamik yükler etkisindeki davranışları birçok belirsizliği içermektedir. Dinamik yüklerdeki belirsizliklerin yanı sıra dinamik davranışı etkileyen parametrelerdeki belirsizlikler, yapı dinamik davranışının gerçekçi olarak belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Dinamik karakteristiklerin mevcut yapının özelliklerini yansıtacak şekilde deneysel yöntemler ile belirlenebilmesi, yapı dinamik davranışının gerçeğe yakın şekilde elde edilmesini sağlamaktadır. Dinamik karakteristikler yapıyı temsil ettiği düşünülen analitik modellerin güvenilirliği için de önemli bir parametredir. Aynı zamanda yapının modal davranışları, yapıda bulunan düzensizliklerin de belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Tüm bu veriler ışığında uzun yıllardır geliştirilen yöntemler yardımıyla dinamik karakteristiklerin belirlenmesi mümkündür. Burada yapı sisteminin niteliği, taşıyıcı sistem özellikleri, mesnetlenme şekilleri, malzeme özellikleri, süreksizlikler vb. birçok özelliğin iyi tespit edilmesi gerekliliği açıktır. Aynı zamanda kullanılan test yöntemlerinin kabiliyetlerinin de bilinmesi gerçekçi sonuçlara ulaşmayı kolaylaştıracaktır. Bu bağlamda takip eden başlıklarda yaygın olarak kullanılan yaklaşımlar ile ilgili genel bilgiler sunulmaktadır.

Mevcut yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi için literatürde kullanılması muhtemel iki yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan ilki ve en yaygın olarak kullanılanı, mevcut geometrik özellikler yanında, malzeme özellikleri ve mesnetlenme şekillerini de dikkate alarak gerçekleştirilecek sayısal yaklaşımlardır. Bu maksatla sonlu farklar, sonlu elemanlar ve sınır elemanlar gibi sayısal yaklaşımlar kullanılabileceği gibi, yapı sistemi özelliklerine bağlı olarak belirlenmiş yaklaşık analitik yaklaşımlarda kullanılabilmektedir. Benzer yaklaşımlar ile yapılacak modellemeler ile mevcut yapı sistemlerinin dinamik karakteristiklerinin tespiti yaklaşık olarak mümkün olmakla birlikte, yukarıda ifade edilen ve bunların bağlı olduğu birçok parametredeki belirsizliklere bağlı olarak önemli mertebede hata yapmak mümkündür.

Mevcut yapıların dinamik özelliklerini belirlemek için tercih edilen ve son yıllardaki gelişmelere bağlı oldukça yaygın şekilde kullanılmaya başlayan ikinci yaklaşım ise deneysel yöntemlerdir. Söz konusu deneysel yöntemler kendi içerisinde uygulanış şekline bağlı olarak zorlanmış titreşimler deneysel modal analiz ve çevresel titreşimlerle modal analiz olarak ikiye ayrılmaktadır.

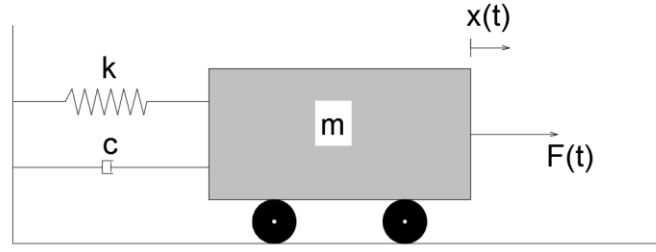
3.2.2.1. Teorik Modal Analiz Yöntemi

Modal analiz, doğal frekansları, sönüm oranlarını ve yapısal deformasyona bağlı mod şekillerini içeren yapıya ait dinamik karakteristikleri teorik ya da deneysel olarak belirleme çalışmalarıdır. Modal analiz çıktılarını doğru şekilde yorumlamak için titreşim teorisine hakim olmak gerekmektedir. Bir sistemin, uygulanan titreşime, sınır şartlarına vb. etkiler altında göstermiş olduğu tepkiye o yapının titreşimi denir. Yer değiştirme veya hız gibi başlangıç şartı ile başlayan ve daha sonra serbest şekilde salınmaya bırakılan sistemlerde oluşan titreşim serbest titreşimdir. Değişen dış etkiler sisteme uygulandığında sistemde meydana gelen titreşim ise zorlanmış titreşimdir.

Teorik modal analiz Tek Serbestlik Dereceli Sistemlerin (TSDS) serbest titreşimi, sonra da Çok Serbestlik Dereceli Sistemlerin (ÇSDS) serbest titreşim teorisi olarak ele alınmaktadır.

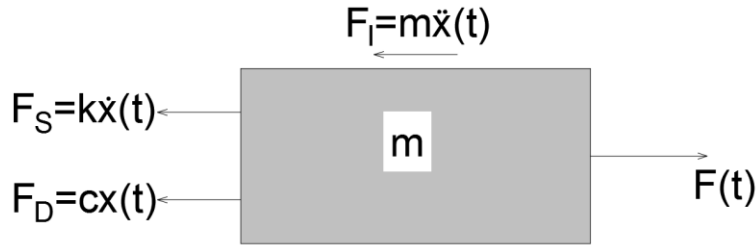
3.2.2.1.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

Mevcut yapıları çok serbestlik dereceli sistem olmasına karşın bu sistemler tek serbestlik dereceli sisteme dönüştürülerek çözümleri yapılır. Titreşim analizleri kütle-yay modeli oluşturularak incelenmektedir. TSDS için basit teorik model Şekil 3.22’de verilmektedir.



Şekil 3.22. TSDS teorik modeli

Şekil 3.22’deki modelin serbest cisim diyagramı Şekil 3.23’de verilmektedir.



Şekil 3.23. TSDS serbest cisim diyagramı

Şekil 3.23’deki serbest cisim diyagramı üzerinden denge denklemi yazılarak,

$$F_I + F_D + F_S = F(t) \quad (3.2)$$

elde edilir. (3.2) nolu denklemde gerekli ifadeler yerine yazılırsa TSDS için genel hareket denklemi,

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (3.3)$$

olarak elde edilir. (3.2) ve (3.3) nolu denklemlerdeki,

F_I , atalet kuvveti,

F_D , sönüm kuvveti,

F_S , yaydaki elastik şekil değişiminden dolayı yayda oluşan kuvveti,

m , yapının kütlesi,

c , sönüm katsayısı,

k , yay katsayısı,

$\ddot{x}(t)$, kütleinin ivmesi,

$\dot{x}(t)$, kütleinin hızı,

$x(t)$, kütleinin yer değiştirmesi,

$F(t)$, uygulanan dış kuvvet olarak adlandırılır.

Bu çalışmanın içeriğinde olan sönümsüz serbest titreşim hareket denklemi için ise genel hareket denklemi olan (3.3) nolu denklemdeki sönüm sabiti $c = 0$ ve titreşime başlangıç şartlarının neden olduğu düşünülerek de uygulanan dış kuvvet $F(t) = 0$ kabul edilmektedir. (3.3) nolu denklem bu şartlar altında düzenlenirse, TSDS için sönümsüz serbest titreşim hareket denklemi,

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (3.4)$$

olarak elde edilir. Denklem (3.4) düzenlenirse,

$$m\ddot{x}(t) + \omega^2 kx(t) = 0 \quad (3.5)$$

ve buradan da

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.6)$$

elde edilir. (3.6) nolu denklemdeki ω , sönümsüz doğal açısal frekanstır. (3.5) nolu denklem ikinci dereceden adi bir homojen diferansiyel denklem olduğu için çözüm (Chopra, 1995),

$$x(t) = C e^{st} \quad (3.7)$$

şeklinde aranır. Buradaki C ve s değerleri sabit değerlerdir. Bu ifade, (3.4) nolu denkleme göre türetilirse,

$$\ddot{x}(t) = C s^2 e^{st} \quad (3.8)$$

ifadesi bulunur. Denklem (3.7) ve (3.8), (3.5) nolu denklemde yerine yazılıp, denklem yeniden düzenlenirse aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$C e^{st} (ms^2 + k) = 0 \quad (3.9)$$

Burada $C \neq 0$ ve $e^{st} \neq 0$ olduğu için,

$$(ms^2 + k) = 0 \rightarrow s_{1,2} = \mp i \sqrt{\frac{k}{m}} = \mp i\omega \quad (3.10)$$

$$\left. \begin{aligned} x_1(t) &= C_1 e^{s_1 t} = C_1 e^{i\omega t} \\ x_2(t) &= C_2 e^{s_2 t} = C_2 e^{-i\omega t} \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemde görülen C_1 ve C_2 keyfi sabitlerdir. Sistem lineer olarak dikkate alındığında toplam davranış,

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) = C_1 e^{i\omega t} + C_2 e^{-i\omega t} \quad (3.12)$$

olarak elde edilir. Denklem (3.12)'ye aşağıdaki Euler formülü,

$$\left. \begin{aligned} e^{i\omega t} &= \cos(\omega t) + i\sin(\omega t) \\ e^{-i\omega t} &= \cos(\omega t) - i\sin(\omega t) \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

uygulanıp ve düzenlenirse sistemin yer değiştirmesi,

$$x(t) = A_s \cos(\omega t) + B_s \sin(\omega t) \quad (3.14)$$

olarak elde edilir. Bu ifadede görölen A_s ve B_s sabit değerler olup aşağıdaki denklemlerde göröldüğü gibi tanımlanır.

$$\left. \begin{aligned} A_s &= C_1 + C_2 \\ B_s &= i(C_1 - C_2) \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

$$\left. \begin{aligned} x(0) &= x_0 \\ \dot{x}(0) &= \dot{x}_0 \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

başlangıç şartları kullanılarak, (3.14) nolu denklem yeniden düzenlenirse sistem davranışı,

$$x(t) = A_s \cos(\omega t) + B_s \sin(\omega t) = x_0 \cos(\omega t) + \frac{\dot{x}_0}{\omega} \sin(\omega t) \quad (3.17)$$

olarak elde edilir (Chopra, 1995).

3.2.2.1.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

Gerçekte sistemlerin çoğu çok serbestlik dereceli sistemlerdir. Her serbestlik derecesi bir doğal frekans ve hareket denklemine karşılık gelir. Tek serbestlik dereceli sistemlerin titreşimindeki skaler değerlerin yerini, çok serbestlik dereceli sistemlerde vektörel ve matris büyüklükler alır. Çok serbestlik dereceli sistemlerde genel hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (3.18)$$

olduğu varsayılır (Chopra, 1995). Burada; $\{A\}$, zamana bağlı olmayan bir vektör olup genlik vektörü olarak adlandırılır. (3.20) nolu denklem türetilip, (3.19) nolu denklemde yerine yazılacak olursa,

$$-\omega^2[M]\{A\} \sin(\omega t + \varphi) + [K]\{A\} \sin(\omega t + \varphi) = \{0\} \quad (3.21)$$

elde edilir. Bu denklemdeki $\sin(\omega t + \varphi)$ terimi keyfi olduğundan denklemden çıkartılıp gerekli düzenlemeler yapılırsa,

$$[[K] - \omega^2[M]]\{A\} = \{0\} \quad (3.22)$$

bulunur ve denklem önden $[M]^{-1}$ ile çarpılırsa,

$$[[D] - \lambda[I]]\{A\} = \{0\} \quad (3.23)$$

standart öz değer problemi elde edilir (Chopra, 1995). Burada,

$$[D] = [M]^{-1}[K] \quad (3.24)$$

dır. $[I]$ birim diyagonal matris ve $\lambda = \omega^2$ öz değerdir. (3.22) nolu denklemin sıfırdan farklı çözümü için,

$$|[K] - \omega^2[M]| = 0 \quad (3.25)$$

karakteristik determinant denklemi elde edilir. Denklem çözümünden n serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal açısal frekans (öz vektör) $(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n)$ elde edilir. Doğal frekansların büyükten küçüğe sıralanması sonucunda elde edilen en küçük frekans temel frekans ve bu frekansa karşılık gelen mod şekli temel mod şekli olarak adlandırılır. Her λ_r öz değer vektörüne karşılık bir A_r öz vektör veya doğal mod şekli belirlenir.

$$\{A_r\} = \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_n \end{Bmatrix}_r \quad r = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.26)$$

Doğal titreşim modlarını elde etmek için (3.23) nolu eşitlik düzenlenirse,

$$[D]\{A\} = \lambda\{A\} \quad (3.27)$$

olur ve r . Mod için,

$$[D]\{A\}_r = \lambda_r\{A\}_r \quad (3.28)$$

elde edilir. (3.28) nolu eşitlik, C_r sabiti ile çarpılırsa ve

$$C_r\{A\}_r = \{\emptyset\}_r \quad (3.29)$$

yazılırsa,

$$[D]\{\emptyset\}_r = \lambda_r\{\emptyset\}_r \quad (3.30)$$

Eşitliği elde edilir (Chopra, 1995). Bu eşitlikte $\{\emptyset\}_r, \lambda_r$ 'ye karşılık gelen modal vektördür. $\{A\}_r$ vektörü küçük C_r sabiti ile normalize edilmektedir. $\{\emptyset\}_r$ modal vektörlerinin beraber yazılmasıyla $[\Phi]$ modal matrisi elde edilir ve (3.31) nolu eşitlik gösterilir.

$$[\Phi]_{n \times n} = [\{\emptyset\}_1 \quad \{\emptyset\}_2 \quad \dots \quad \{\emptyset\}_n] \quad (3.31)$$

3.2.2.2. Deneysel Modal Analiz Yöntemi

Bu yöntemde yapıda oluşan titreşimlerden yararlanılarak yapıya ait dinamik karakteristikler elde edilmektedir. Burada titreşimin bilinip bilinmemesi kullanılacak yöntem açısından önemlidir. Eğer bir yapıya uygulanan titreşimler biliniyorsa Geleneksel Modal Analiz Yöntemi (Forced Vibration Test), eğer bilinmiyor ve çevresel etkilerin (rüzgâr, araç ve yaya trafiği vs.) oluşturduğu titreşimlerden yararlanılıyorsa Operasyonel Modal Analiz (Ambient Vibration Test) adı altında inceleme yapılmaktadır. Yapılan çalışmalarda Operasyonel Modal Analiz uygulaması gerçekleştirildiği için sadece bu yöntemle değinilecektir.

Operasyonel Modal Analiz (OMA) yönteminde yukarıda da belirtildiği gibi yapıya etkiyen titreşimler bilinmemektedir. Bu titreşimler çevresel etkilerden oluşmakta; titreşimlere verilen tepkiler zaman ve frekans ortamında işlenerek yapılara ait dinamik karakteristikler deneysel olarak belirlenebilmektedir. Titreşimlerin çevresel kaynaklı olmasından dolayı yapıya etkiyen titreşimlerin genliği ve buna bağlı olan zamanla değişimi bilinmemektedir. Doğal titreşim kaynakları bazen trafik ya da yaya yükü olurken bazen yer sarsıntıları bazen ise rüzgâr kaynaklı olabilmektedirler. Gürültü ise yapılarda olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Bu durumda titreşimlerden oluşan tepkilerin işleme yönteminin doğru seçilmesi ve bu olumsuzluğun seçilen yöntemle giderilmesi önem arz etmektedir.

3.2.2.2.1. Genel Kurallar

Deneysel Modal Analiz yöntemi daha öncede bahsedildiği gibi Zorlanmış ve Çevresel Titreşim Testi yöntemi olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Hangi yöntemin kullanılacağı; ölçülecek yapının hacimsel büyüklüğü, çevresel koşulların durumu gibi sebeplere bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, yapının hacimsel olarak büyük (baraj, köprü vb.) olması durumunda yapıda titreştiriciler kullanılarak titreşim oluşturulması hem çok zordur hem de oldukça maliyetlidir. Ayrıca diğer önemli faktör, böylesi büyük yapıların belirli bölgelerine uygulanan darbe çekiçleri, sarsıcılar vs. ile titreştirilmesinin tüm yapıda aynı etkiyi yaratmayacağı ve elde edilen sonuçlarında tüm yapıyı temsil etmeyeceğidir. Bu durumda çevresel koşullardan

yararlanmak gerekmektedir. Çevresel etkiler yapının tümünü etkilenmekte ve yapı genelinde titreşim oluşmaktadır. Elde edilen sonuçların da yapı genelini temsil ettiği rahatlıkla söylenebilmektedir. Ancak bazen çevresel koşullar yapıda titreşim oluşturmak için elverişli olmamaktadır. Tüm bu durumlar göz önüne alınarak en uygun deneysel yöntem seçilerek gerçek yapıyı en iyi temsil edecek deneysel parametreler elde edilmektedir.

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen parametrelerin geçerli olabilmesi için ölçüm süresince bazı temel kabuller yapılmaktadır. Bu kabuller;

- Titreşimlerin genliğinin küçük olduğu bu yüzden de yapının lineer davranış sergilediği, aksi halde büyük titreşimlere maruz kalan yapılardan doğru sonuç elde edilemeyeceği,
- Yapısal davranışın zamanla değişmediği,
- Yapının bir bütün ve sürekli olduğu,
- Deneysel ölçümlerde malzeme özellikleri, sınır şartları gibi değerlerin sıcaklık, nem vb. gibi bir etki altında herhangi bir değişime uğramadığı şeklinde sıralanabilir.

3.2.2.2.2. Ölçüm Ekipmanları

• Titreştiriciler

Deneysel Modal Analiz yöntemi ile yapılarda iki farklı titreşim oluşturulabilmektedir. Bu titreşimler yapay ya da doğal kaynaklı olmaktadır. Eğer titreşim bir darbe çekici, sarma tablası ya da sarsıcılar tarafından yapay olarak oluşturuluyorsa yapıda zorlanmış titreşim oluşmakta ve titreşim oluşturan kuvvet ve genlik bilinmektedir. Trafik yükü, yaya yükü, rüzgâr, patlatma etkisi, dalga gibi birçok doğal ve çevresel etkilerle yapı üzerinde doğal kaynaklı titreştiriciler yardımıyla titreşim oluşturulması ise çevresel titreşim olarak ifade edilmektedir. Yapay ya da doğal titreştiricilerin hangisinin kullanılacağı yapının büyüklüğüne ve rijitliği göre belirlenmektedir. Yapının büyük ölçekli olması durumunda çok sayıda darbe çekici vb. titreştiricilerin kullanılması hem uygulanabilirlik hem de ölçüm maliyeti bakımından zorlayıcı olacağından genellikle doğal

kaynaklı titreştiricilerden yararlanılmaktadır. Bu çalışmada doğal titreştiricilerden yararlanmak için Operasyonel Modal Analiz yöntemi tercih edilmiştir. Doğal titreştiriciler kullanıldığı için ölçüm ekipmanlarından sarsma tablası, darbe çekici ve sarsıcılar ayrıca açıklanmayacaktır.

• İvmeölçerler

İvmeölçerler, yapılarda oluşan titreşimleri ölçmek için kullanılan tepki dönüştürücülerdir. İvmeölçerler yapıya farklı şekillerde yerleştirilebilmektedirler. Örneğin; yapışkan bir madde, mıknatıs, vida vb. malzemeler ivmeölçerin yapıya monte edilebilmesi için kullanılmaktadırlar. Yapıda oluşan titreşimlere karşı elektriksel voltajın üretilmesi ve bunun taşınabilir voltaj sinyali olarak veri toplama ünitesi aktarılması ivmeölçerlerin başlıca görevlerindedir. İvmeölçerler, uygulanacak yapının hacimsel büyüklüğüne ve yapılacak ölçümün amacına göre değişik şekillerde seçilebilmektedirler. Eğer bir ivmeölçerin hassasiyeti yüksek ise ivmeölçerin büyüklüğü ve ağırlığı da fazladır. Bu durumda bu tip ivmeölçerlerin hassas ve küçük ölçekli yapılarda kullanılması doğru olmayacaktır.

Kullanılacak ivmeölçerler,

- Hassasiyet,
- Ölçüm frekans aralığı,
- Maksimum ivme değeri,
- Ortam sıcaklığı,
- İvmeölçer ağırlığı

gibi durumlar dikkate alınarak seçilmelidir (Türker, 2011).

Çalışma kapsamında tek ve 3 eksenli kablolu bağlantıyla ölçüm kaydı yapma imkânı olan ivmeölçer cihazların yanı sıra, kablosuz ölçüm yapabilen 3 eksenli ultra hassas kuvvetli yer hareketi kayıt cihazları ölçümlerde kullanılmıştır (Şekil 3.25). Bu cihazlarla yapıların dış ortamdan kaynaklı titreşimlere olan tepkisi “g” cinsinden 0.01 sn aralıkla kaydedilmiştir.



Şekil 3.25. Ultra hassas kuvvetli yer hareketi kayıt cihazları, GPS alıcıları ve bataryalar

• Veri Toplama ve Sinyal İşleme

Veri toplama sistemi yapıdan alınan titreşimlerin ivmeölçerler aracılığıyla elektrik sinyallerine dönüştürülüp veri toplama ünitesine aktarılması ile işlevine başlamaktadır. Bu durumda veri toplama sistemi iki ana kısımdan oluşmakta; birincisi veri toplama ünitesi diğeri ise koşullanan sinyallerin aktarıldığı bilgisayar ortamıdır. Sinyallerin koşullanması işlemi istenmeyen durumların filtrelendiği ya da sinyallere istenilen bazı özelliklerin kazandırılması için yapılan çalışmalardır. Ancak sinyal işleme sisteminin asıl amacı ivmeölçerlerden gelen sinyaller içerisinde istenmeyen gürültünün varlığına müdahale edilerek gürültünün dinamik karakteristikler üzerindeki olumsuz etkisini azaltmak ya da kaldırmaktır. Sinyal filtreleme işleminin gerçekleşmesinden sonra sinyaller bilgisayar ortamına aktarılarak sinyal işleme aşaması gerçekleştirilmektedir. Bu aşama bilgisayar ortamında geliştirilen özel yazılımlar sayesinde gerçekleştirilmektedir.

Saha çalışmalarında 16 kanallı dinamik ölçüm alabilen taşınabilir veri toplama sistemi kullanılmıştır (Şekil 3.26). Ölçümler kullanımda olan yapılardan alındığı için çalışmalarda gerekli olan elektrik enerjisi kolayca temin edilmiştir. Dinamik veri toplama sistemi taşınabilir bir bilgisayara kurulu olan Testlab Network (Teknik Destek Grubu, 2010) isimli veri toplama yazılımı ile ilişkilendirilerek veri toplama ve kayıt işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.26. Tek eksenli ivmeölçerler ve taşınabilir veri toplama sistemi

3.2.2.2.3. Dinamik Karakteristikleri Belirleme Yöntemleri

Dinamik karakteristiklerini belirlenmesinde temelde iki değişkene göre sınıflandırılır. Bu değişkenler zaman (zaman ortamı) ve frekanstır (frekans ortamı). Frekans ortamındaki yöntemler, Piklerin Seçilmesi, Frekans Ortamında Ayrıştırma, Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma ve Polimaks yöntemleridir (Ramos, 2007). Zaman ortamındaki yöntemler ise Rastgele Azalım Yöntemi, Rekürsif Teknikler, En Büyük Olabilirlik Yöntemleri ve Stokastik Alt Alan Belirleme yöntemleridir (Ramos, 2007). Literatürde bu yöntemlerden frekans ortamında Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma ve zaman ortamında Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemleri yaygın şekilde kullanılmaktadır. Söz konusu yöntemler ana hatlarıyla sonraki başlıklar altında açıklanmaktadır.

• Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma Yöntemi

Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma Yöntemi frekans ortamına dayalı bir yöntem olup bu gruptaki yöntemler, basitlikleri, işlem hızları ve altyapı gibi nedenlerden dolayı daha çok tercih edilirler. Ancak bu yöntemler geçici bilginin ortalamasını içerdikleri için detaylar çoğunlukla ihmal edilmektedir. Bu yöntemin teorik olarak bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajlar;

- Piklerin seçilmesindeki subjektiflik,
- Mod şekillerinin değil, operasyonel yer değiştirme şekillerinin elde edilmesi,
- Sadece orantılı sönümlü yapıların gerçek modlarının elde edilmesi,
- Sönüm tahminlerinin güvenilir olmaması şeklinde sıralanabilir (Peeters, 2000; Bayraktar vd., 2008).

Bu dezavantajlara rağmen bu yöntem, çevresel titreşim testlerine dayalı inşaat mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma yönteminde bilinmeyen etki ve ölçülen tepki arasındaki bağıntı,

$$[G_{yy}(\omega)] = [H(\omega)]^* [G_{xx}(\omega)] [H(\omega)]^T \quad (3.32)$$

şeklinde yazılabilir (Bendat ve Piersol, 1986; Brincker vd., 2000). (3.32) nolu denklemde, $G_{xx}(\omega)$ etki sinyaline ait güç spektral yoğunluk fonksiyonunu, $G_{yy}(\omega)$ tepki sinyaline ait güç spektral yoğunluk fonksiyonunu ve $H(\omega)$ frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. Ayrıca denklemdeki * ve T sırasıyla fonksiyonun eşleniğini ve transpozisini göstermektedir. Bazı matematiksel işlemlerden sonra tepki sinyaline ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu, tek kutuplu artık değer fonksiyonu olarak,

$$[G_{yy}(\omega)] = \sum_{k=1}^m \left(\frac{[A_k]}{j\omega - \lambda_k} + \frac{[A_k]^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{[B_k]}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{[B_k]^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right) \quad (3.33)$$

gibi elde edilir (Bendat ve Piersol; 1986, Brincker vd., 2000). Burada, A_k güç spektral yoğunluk fonksiyonuna ait k. rezidü matrisidir. (3.33) nolu denklem yeniden düzenlenerek,

$$[G_{yy}(\omega)] = \sum_{k=Sub(\omega)}^m \left(\frac{d_k \psi_j \psi_k^T}{j\omega - \lambda_k} + \frac{d_k^* \psi_k^* \psi_k^H}{j\omega - \lambda_k^*} \right) \quad (3.34)$$

olarak belirlenir (Bendat ve Piersol, 1986; Brincker vd., 2000). Burada, d_k sabit bir değerini, ψ_k mod şekli vektörünü ve H kompleks eşleniğin transpozunu göstermektedir. Tepki sinyali güç spektral yoğunluk fonksiyonu, tekil değer ayrışımı gerçekleştirilerek ayırık değerler olarak,

$$G_{yy}(j\omega_i) = S_i u_{i1} u_{i1}^H \quad \omega_i = \omega_k \quad (3.35)$$

olarak belirlenir (Bendat ve Piersol, 1986, Brincker vd., 2000). Bu yöntemde, doğal frekanslar tekil değerlerin dağılımında pikler olarak, mod şekilleri ise tekil vektörler olarak elde edilmektedir. Modal sönüm oranları ise tekil pik değerlerin hızlı fourier dönüşümü ile zaman ortamına aktarılması ve logaritmik azalım yöntemi ile hesaplanmaktadır (Bayraktar vd., 2007).

• Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemi

Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemi zaman ortamına dayalı bir yöntemdir. Bu yöntem zaman verileri ile hiçbir korelasyon veya spektral dönüşümüne gerek kalmaksızın direkt olarak çalışır. Bu yöntemde dikkate alınan bağıntı ve formülasyonlar aşağıda verilen dinamik hareket denklemlerinden elde edilmektedirler (Overschee ve Moor, 1996; Peeters, 2000; Peeters vd., 2000).

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} = [B(t)]\{u(t)\} \quad (3.36)$$

(3.36) nolu denklemdeki $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini $\{\ddot{x}(t)\}$, $\{\dot{x}(t)\}$, $\{x(t)\}$ ve $\{F(t)\}$ ise sırasıyla zamana bağlı ivme, hız, yer değiştirme ve dış kuvvet vektörlerini ifade etmektedir.

Görüldüğü gibi $F(t)$ dış yük vektörü çarpanlarına ayrılarak etki matrisi olarak tanımlanan $B(t)$ ve bir $u(t)$ vektörünün çarpımı şeklinde yazılır. (3.36) nolu denklem ile titreşen bir yapının davranışı oldukça iyi belirlenebilmesine rağmen, Stokastik Alt Alan Belirleme Yönteminde bu denklem direkt olarak kullanılmaz. Bu nedenle (3.36) nolu denklem daha kullanışlı bir form olan

ayrık zamanlı stokastik durum uzay modeline aşağıdaki ifadeler kullanılarak dönüştürülebilir (Overschee ve Moor, 1996; Peeters, 2000; Peeters vd., 2000).

$$a(t) = \begin{pmatrix} \{x(t)\} \\ \{\dot{x}(t)\} \end{pmatrix} \quad (3.37)$$

$$A_c = \begin{pmatrix} 0 & I_{n2} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{pmatrix} \quad (3.38)$$

$$B_c = \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}B \end{pmatrix} \quad (3.39)$$

Yukarıdaki denklemler kullanılarak (3.36) nolu denklem, aşağıdaki gibi bir durum denklemine dönüştürülebilir (Overschee ve Moor, 1996; Peeters, 2000; Peeters vd., 2000).

$$\dot{a}(t) = A_c a(t) + B_c u(t) \quad (3.40)$$

(3.40) nolu denklemdeki A_c durum matrisi, B_c etki matrisi, $u(t)$ durum vektörü olarak tanımlanır.

Ölçümlerin yalnızca bir sensörden (ivmeölçer, hızölçer vb.) elde edildiği varsayılırsa ortaya çıkacak denklem,

$$y(t) = C_a \ddot{X}(t) + C_v \dot{X}(t) + C_d X(t) \quad (3.41)$$

şeklinde yazılabilir (Overschee ve Moor, 1996; Peeters, 2000). Burada, $y(t)$ tepki, C_a ivme olarak elde edilen tepki matrisi, C_v hız olarak elde edilen tepki matrisi, C_d yer değiştirme olarak elde edilen tepki matrisi olarak adlandırılır.

$$E = (C_d - C_a M^{-1}K \quad C_v - C_a M^{-1}C) \quad (3.42)$$

$$D = C_a M^{-1}B \quad (3.43)$$

denklemleri kullanılarak (3.41) nolu denklem yeniden düzenlenirse,

$$y(t) = Ea(t) + Du(t) \quad (3.44)$$

elde edilir (Peeters, 2000; Bayraktar vd., 2007). Burada, E tepki matrisi, D direk iletim matrisi olarak ifade edilir. (3.40) ve (3.44) nolu denklemler, sürekli zaman tanımlı durum uzay modelini meydana getirir. Durum uzay modeli (Overschee ve Moor, 1996; Peeters, 2000; Peeters vd., 2000),

$$a_{k+1} = Aa_k + Bu_k \quad (3.45)$$

$$y_k = Ea_k + Du_k \quad (3.46)$$

şeklinde ifade edilebilir (Overschee ve Moor, 1996; Peeters, 2000; Peeters vd., 2000). Burada, $a_k = a(k\Delta t)$ ayrık zaman durum vektörü, $A = \exp(A_c \Delta t)$ ayrık durum matrisi, $B = [AI]A_c^{-1}B_c$ ayrık etki matrisidir. Durum uzay modeli,

$$a_{k+1} = Aa_k + Bu_k + w_k \quad (3.47)$$

$$y_k = Ea_k + Du_k + v_k \quad (3.48)$$

ifade edilebilir (Overschee ve Moor, 1996; Peeters, 2000; Peeters vd., 2000). Burada, w_k arızalardan ve hatalardan dolayı meydana gelen gürültü sinyali, v_k sensör hatalarından meydana gelen gürültü sinyalidir. w_k ve v_k ölçülemeyen vektörler oldukları için sıfır kabul edilirler.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Çalışma Kapsamında Ele Alınan Yapılar

4.1.1. Erzurum Yakutiye Medresesi

Yakutiye Medresesi, 14. yüzyılda, Emir Cemaleddin Yakut tarafından, İlhanlı hükümdarı Olcayto zamanında inşa ettirilmiştir. Anadolu'da mevcudiyetini devam ettiren, kapalı avlulu, eyvanlı ve revaklı medrese tipinin örneklerinden biridir (Kuran, 1969) (Şekil 4.1). Medrese, simetrik yapısı, çeşitli figürler işlenmiş taş kabartmaları ve çini süslemeleriyle Orta Çağ Türk Sanatı adına oldukça önemlidir. Tarihi ve sanat değeri oldukça yüksek olan bu eser, özenle korunması gereken anıtlardan biridir.



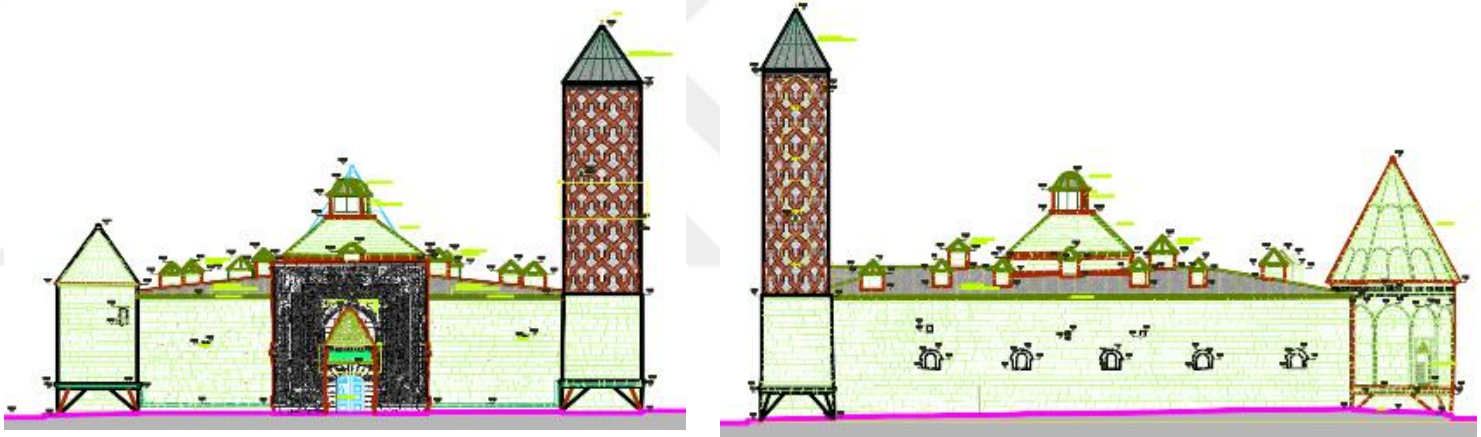
Şekil 4.1. Erzurum Yakutiye Medresesi

Yapı, Osmanlı döneminde uzun bir süre dökümhane olarak kullanılmıştır ancak 19. yüzyılın sonlarından Cumhuriyet dönemine kadar askeri depo olarak kullanıldığı bilinmektedir (Çam, 1988). Yapı, Cumhuriyet döneminde, Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından, 1964 ve 1973 yıllarında, Kültür Bakanlığı tarafından ise 1991 yılında olmak üzere üç onarım görmüştür.

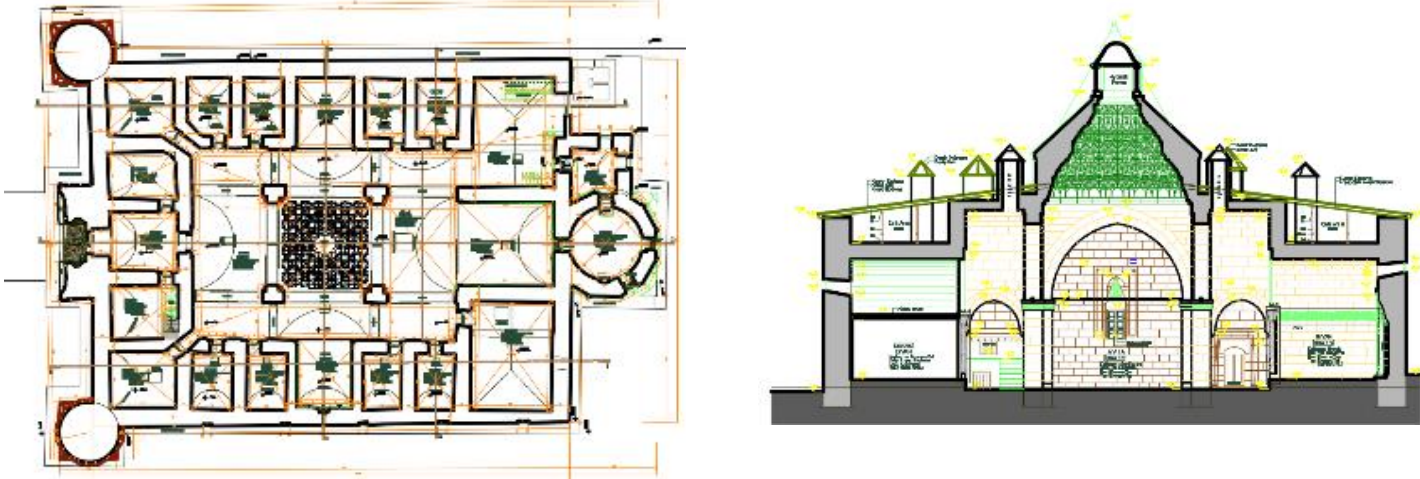
Onarımlar sırasında yapının asli mimarisinde önemli değişiklikler olmamıştır. Sadece küçük çaplı tadilatlar görölmektedir. Ancak yapının taşıyıcı elemanlarının malzemelerinde önemli yenilemeler yapılmıştır. Yapılan onarım çalışmalarında, malzemeler genel olarak yeniden kullanılmamış, yenileriyle değiştirilmiştir. Bu sebeple özellikle dış cephe kaplamalarında çok sayıda var olan kabartmalar sökülmüş ve yapının özgün özelliği bu alanda kaybolmuştur (Çam, 1988). Yakutiye Medresesi, günümüzde Erzurum Türk İslam Eserleri ve Etnografya Müzesi olarak hizmet vermektedir.

Yapı dikdörtgen planlı olup, orta avlusunun etrafında sınıflar ve karşılıklı eyvanlar bulunmaktadır. Medrese, ortasında bulunan dört çokgen taş kolona yerleştirilmiş, ortası boş olan ana kubbe ve dört bir yandan yarım kubbelere ek olarak doğu-batı doğrultusunda geniş açıklıklı kemer çatılarla inşa edilmiştir. Ana kubbe, 7.75 m boyutlarında karedir, 12.9 m yüksekliğindedir. Medresenin ana boyutları 33.4 m x 24.4 m'dir. Yapının doğusunda bulunan kümbet ise yaklaşık 12 m x 6 m boyutlarındadır. Yapının ana duvar kalınlığı yaklaşık olarak 130 cm'dir. Dört taraftaki duvarlar 7.6 m seviyesine kadar yükselmiştir. Medresenin kuzey batı köşesinde 21.2 m ve güney batı köşesinde 8.25 m uzunluğunda minareler bulunmaktadır. Şekil 4.2'de medresenin farklı cephelerden görünüşleri ve kesitleri gösterilmiştir.

(a)



(b)



Şekil 4.2. Yakutiye Medresesi a: Cephe görüntülerine örnekler, b: Kesitlere örnekler (Yakutiye Medresesi Rölöve Projesi, 2010)

4.1.2. Erzurum Lala Paşa Cami

Lala Paşa Cami Erzurum şehir merkezinde Cumhuriyet Caddesi'nde bulunmaktadır. Batısında Yakutiye Medresesi, doğu ve güneyinde şehrin önemli trafik yollarından ikisi bulunmaktadır (Şekil 4.3).

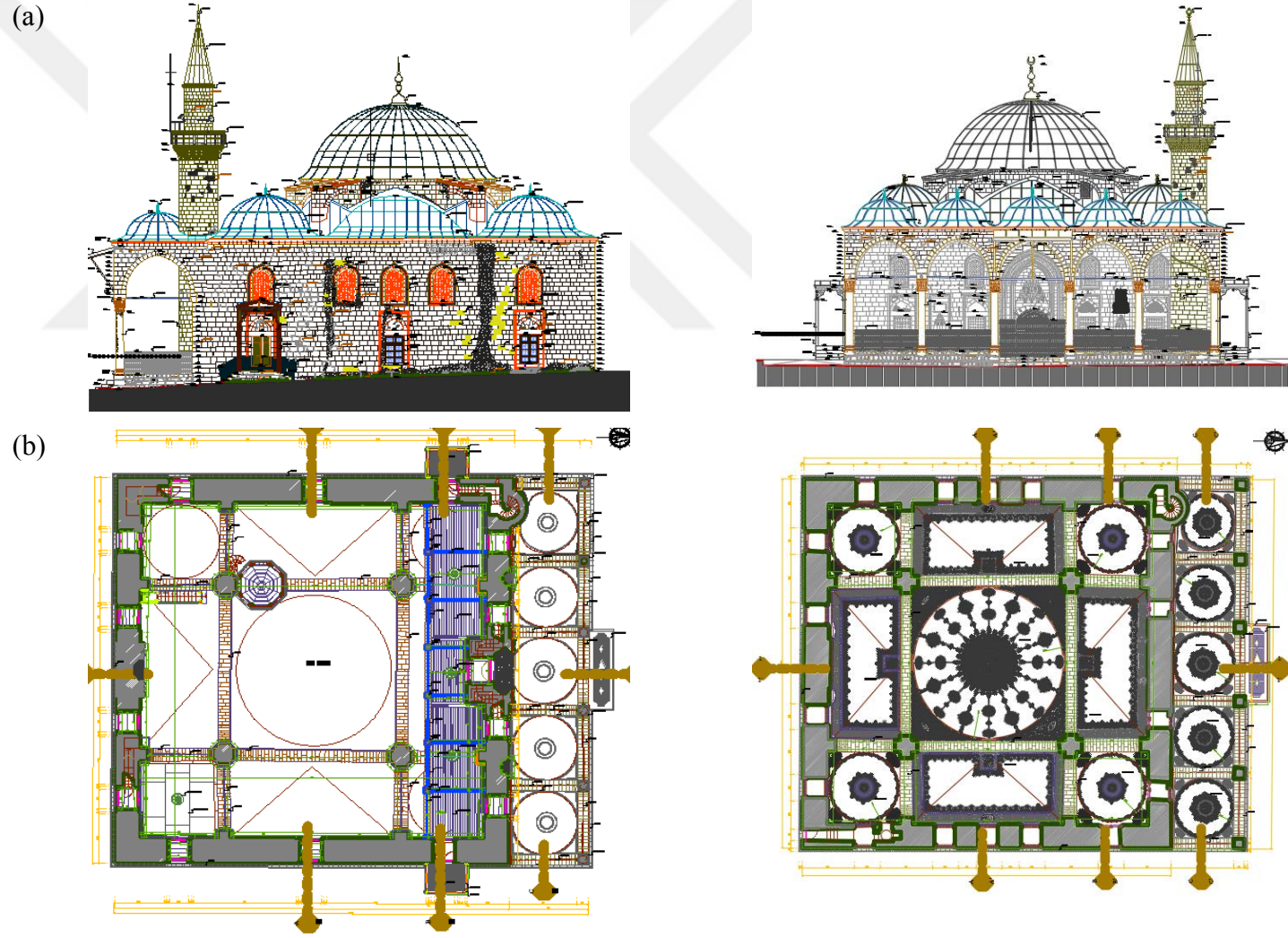


Şekil 4.3. Erzurum Lala Paşa Cami

Yapı Erzurum'da inşa edilmiş ilk Osmanlı eseridir ve günümüzde Vakıflar Erzurum Bölge Müdürlüğü'nün sorumluluğundadır. 16. yüzyılda Erzurum valisi Lala Mustafa Paşa tarafından, Gürcistan ve Kıbrıs fatihi olarak da bilinir, yaptırılmıştır. Mimar Sinan caminin mimarı/mühendisidir (Yenişehirlioğlu ve Madran, 1989). Cami başlangıçta külliye, saray, hamam, şadırvan ve mektep olarak inşa edilmiştir. Ancak zamanla saray, şadırvan ve mektep yok olmuş sadece Lala Paşa Camisi ve hamamı günümüze ulaşabilmiştir (Gündoğdu, 2011).

Lala Paşa Cami, Mimar Sinan eserlerinden olan İstanbul Şehzade Cami, Gebze Çoban Mustafa Paşa Cami, Payas Sokullu Sarı Selim Cami gibi kare planlı ve merkez kubbeli camiler grubuna girmektedir. Caminin orta kısmında yer alan dört adet sekizgen taş kolon üzerine yerleştirilmiş asıl kubbe dört yandan yarım kubbeler ve payandalarla desteklenmiş ve yanlarda yer

alan küçük kubbelerle simetrik bir halde inşa edilmiştir (Konyalı, 1960). Ana kubbe 13m çapında, 17.45m yüksekliğinde ve yaklaşık olarak 50 cm kalınlığındadır. Caminin ana boyutları 26m x 26m'dir. Son cemaat yeri ise 26m x 5m'dir. Son cemaat yeri 6 kolon ve 5 küçük kubbeyle meydana gelmektedir. Yapının ana duvar kalınlığı yaklaşık olarak 180cm'dir. Dört taraftaki duvarlar, çatı seviyesine kadar yükselmiştir. Caminin, doğu ve batı yüzeylerinde 4 aşağıda ve 5 yukarıda pencere boşluğu, güney yüzeyinde aşağıda ve yukarıda 4'er pencere boşluğu, kuzey yüzeyinde ise aşağıda ve yukarıda 4 pencere boşluğu ve aşağıda 1 kapı boşluğu bulunmaktadır. Bu duvarlar ana kubbeyi ve diğer tam ve yarım kubbeleri taşımaktadır. Caminin minaresi ise camiye birleşik şekilde güney-batı kısmına konumlandırılmıştır. Şekil 4.4'de caminin farklı cephelerden görünüşlerini ve kesitleri sunulmaktadır.

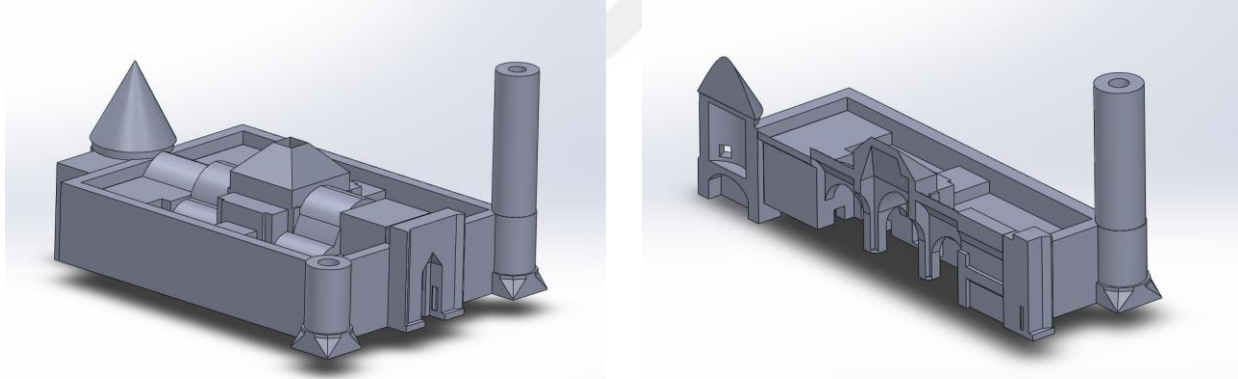


Şekil 4.4. Lala Paşa Cami a:Cephe görünüşlerinde örnekler, b:Kesitlere örnekler (Lala Paşa Cami Rölöve Projesi, 2015)

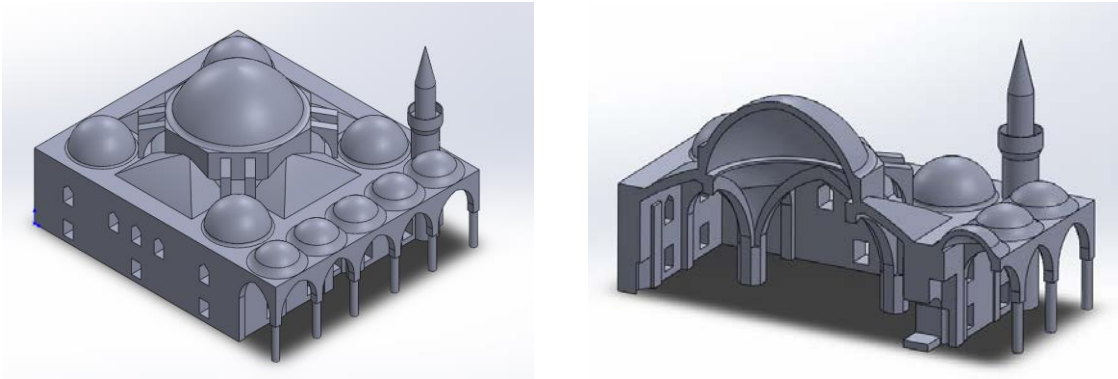
4.2. Yapı Modellerinin Oluşturulması

Mevcut rölöveler üzerinden, yapının taşıyıcı sisteminin daha iyi anlaşılması için öncelikle yapılar yerinde kapsamlı bir şekilde incelenmiştir ve sonrasında oldukça karmaşık geometriye sahip tarihi Lala Paşa Cami ve Yakutiye Medresesi üç boyutlu olarak modellenmiştirlerdir.

Tarihi yapılarda ana taşıyıcı elemanlar aynı zamanda süs unsuru olarak kullanıldığından, düzgün dörtgen, kare ya da dairesel kesit yerine çok fazla girintili çıkıntılı geometrik kesitlerinin olması yapıların bilgisayar ortamında üç boyutlu modellenmesinde oldukça zahmet çekilmesine sebep olmuştur. Literatürde kabul edildiği gibi yığma yapıların modellenmesinde mimari unsurlar (taş işlemleri, bezemeler vb.) göz ardı edilmiştir. Yapıların taşıyıcı elemanları göz önüne alınarak üç boyutlu modeller SolidWorks (SolidWorks, 2013) yazılımında hazırlanmıştır (Şekil 4.5, 4.6).



Şekil 4.5. Yakutiye Medresesi'nin SolidWorks modeli

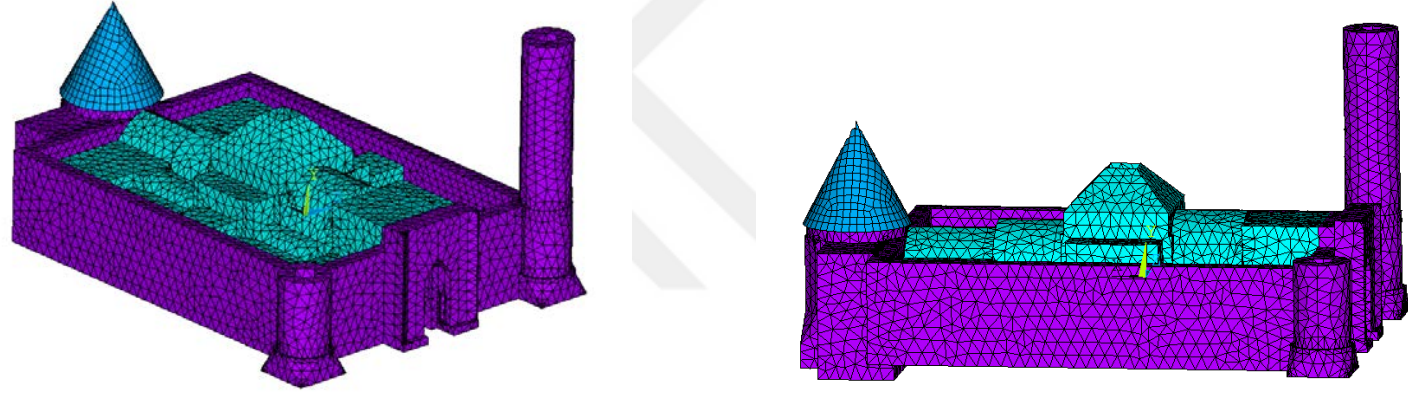


Şekil 4.6. Lala Paşa Cami'nin SolidWorks modeli

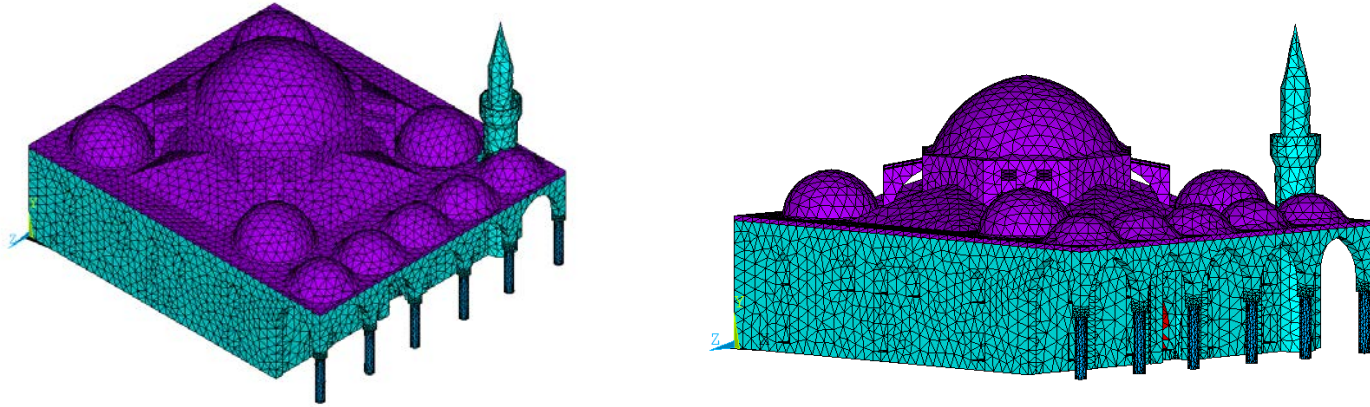
SolidWorks programında hazırlanan modeller uygun dosya formatına (*.STEP formatı) getirilerek ANSYS (ANSYS, 2015) yazılımına aktarılmıştır. Gerekli analizleri yapmak için modeller yapı elemanlarının boyutlarına bağlı olarak farklı boyutlarda elemanlara dönüştürülmüştür. Dinamik analiz yapılacağı için sonlu eleman boyutları ve düğüm noktası sayısı yapıların davranışını olumsuz yönde etkilemeyecek şekilde düzenlenmiş ve yapıların sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur (Şekil 4.7, 4.8). Modellerde kullanılan eleman ve düğüm noktası sayıları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Modellerde kullanılan eleman ve düğüm noktası sayıları

Yapı	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı
Yakutiye Medresesi	61820	17288
Lala Paşa Cami	66521	17860



Şekil 4.7. Yakutiye Medresesi'nin sonlu eleman modeli



Şekil 4.8. Lala Paşa Camii'nin sonlu eleman modeli

4.3. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

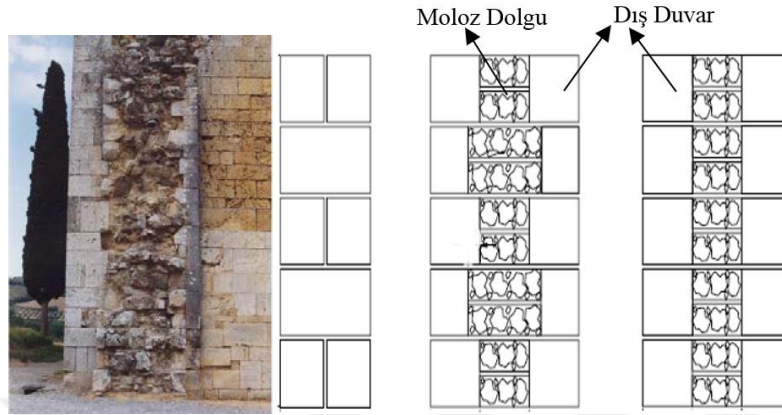
4.3.1. Taşın, Harcın ve Moloz Dolgunun Basınç Dayanımının Belirlenmesi

Tarihi eserlerin malzeme özelliklerinin belirlenmesi oldukça karmaşık olabilmektedir. Yapının yıllar boyunca farklı çevresel etkilere maruz kalması, malzemenin tabii özelliğinin farklı görünmesi, aynı ocaktan çıkmasına rağmen farklı numunelerin farklı dayanımlar göstermesi, rüzgar ya da güneşin hakim olduğu cephede mekanik yüklere maruz kalması, tarihi yapıların yapılarında malzeme özelliklerinin belirlenmesinin zorluğuna birkaç örnektir. Alınan numuneler, hasarsız dayanım belirleme yöntemleri her daim imkânlar içerisinde olmaması, malzeme özelliklerinin belirlenmesini daha da zorlaştırmaktadır.

Bu çalışmada üç yapraklı olarak inşa edilmiş duvarlara sahip tarihi eserlerin elastisite modüllerini bulmaya yönelik araştırma yapılmıştır. Duvarın yanı sıra, kemer ve fil ayakları taş, kubbeler ise moloz olarak kabul edilmiştir.

4.3.2. Duvarların Basınç Dayanımlarının ve Elastisite Modüllerinin Belirlenmesi

Osmanlı ve Selçuklu dönemi eserlere bakıldığında, eserler arasında birçok benzerlik görülebilmektedir. Bu benzerlik sadece mimari özellikler değil aynı zamanda yapı teknikleri ve malzeme açısından da görünür şekildedir. Eserlerin kubbelerin yükünü taşıyan dış duvarları, üç yapraklı olarak adlandırılan iki kesme taş duvarın arasında, harç, moloz ve vb. bağlayıcılar bulunan dolgu duvar ile tamamlanan bir sistemle inşa edilmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Üç yapraklı duvar tipi

Bu tip duvarların basınç dayanımı ve elastisite modüllerinin belirlenmesi için, önce ayrı ayrı kesme taş duvar dayanımı ve dolgu duvar dayanımının belirlenmesi gerekmektedir.

4.3.2.1. Dış ve İç Duvarın Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Malzeme dayanımı bilinen dış duvarların dayanımı için Tsoutrelis ve Exadaktylos (1993) Denklem 4.1'i önermektedir.

$$f_k = e^{-0.3117Lf} f_b \quad (4.1)$$

$$L = \sqrt[3]{l \cdot h \cdot t} \quad (4.2)$$

Burada,

f_k , duvarın basınç dayanımı,

f_b , malzeme basınç dayanımı,

l , h ve t sırasıyla duvarın genişliği, yüksekliği ve kalınlığı,

f , çatlak yoğunluk faktörüdür. Çatlak yoğunluğu, duvarı oluşturan taşların bütün boyutlarda sürekliliği bozan yüzeylerinin toplamının duvarın hacmine oranıdır (m^2/m^3).

Yukarıda belirtildiği gibi cami duvarlarının elastisite modülünü belirlemek için, kesme taş kısımlarının basınç dayanımının belirlenmesi gerekmektedir. Anadolu'daki Selçuklu ve Osmanlı

eserlerinin literatür göz önüne alındığında iç duvarların yani dolgu kısmının basınç dayanımı 3MPa kabul edilmiştir.

4.3.2.2. Üç Yapraklı Duvar Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Üç yapraklı yığma duvarların basınç dayanımlarının belirlenmesi çok değişkene bağlı olması sebebiyle ampirik önerileri kısıtlamaktadır. Ancak Binda vd. (2006) yaptıkları çalışmalarda iç ve dış duvarlarının basınç dayanımı bilinen üç yapraklı duvarların basınç dayanımı belirlemek için Denklem 4.5'i önermektedir.

$$f_c = \frac{2t_e}{2t_e+t_i} \cdot f_e \quad (4.3)$$

$$f_c = \frac{2t_e}{2t_e+t_i} \cdot f_e + \frac{t_i}{2t_e+t_i} \cdot f_i \quad (4.4)$$

$$f_c = \frac{2t_e}{2t_e+t_i} \cdot f_e \cdot \theta_e + \frac{t_i}{2t_e+t_i} \cdot f_i \cdot \theta_i \quad (4.5)$$

Burada;

f_c , kompozit kesitin basınç dayanımı,

f_e , dış duvarların basınç dayanımı,

f_i , iç duvarın basınç dayanımı,

t_e , dış duvar kalınlığı,

t_i , iç duvar kalınlığı,

θ_e , dış duvar için doğruluk faktörü,

θ_i , iç duvar için doğruluk faktürüdür. Doğruluk faktörü iç ve dış duvarın üç yapraklı duvar dayanımına katkı katsayısıdır. Bu değerleri Binda vd. (2006) $\theta_e=0.7$ ve $\theta_i=1.3$ olarak önermiştir.

Basınç dayanımları bilinen üç yapraklı duvarların elastisite modüllerinin belirlenmesi için Tomazeviç'in (1999) ve Eurocode 6'nın (1995) önerdiği bağıntı literatürde çokça kullanılmaktadır.

$$E = 1000f_k \quad (4.6)$$

Burada,
 f_k , duvarın basınç dayanımı,
 E , duvarın elastik modülüdür.

4.3.3. Fil Ayaklarının, Kubbelerin ve Kemerlerin Dayanımlarının Belirlenmesi

Eserlerde merkez kubbeyi taşıyan fil ayaklarını ve kemerleri oluşturan taşların basınç dayanımları, duvarları oluşturan taşlarla kabul edilmiştir. Fil ayaklarının ve kemerlerin dayanımları üç yapraklı duvarın sadece taştan oluşan dış duvar dayanımıyla aynı mekanik özelliklere sahip olduğu varsayılmıştır. Kubbe kısımlarının dayanımları ise literatüre bakıldığında elastisite modülleri ortalama yaklaşık 3000 MPa olarak önerilmektedir (Mustafaraj ve Yardım, 2012; Şeker vd., 2013). Bu sebeple hem literatür ışığında hem de Denklem 4.1 ve Denklem 4.6 yardımıyla fil ayakları, kemerler ve kubbelerin dayanımları Çizelge 4.7'de verildiği gibi kabul edilmiştir.

4.3.4. Erzurum Yakutiye Medresesi'nin Malzeme Özellikleri

Erzurum Yakutiye Medresesi, Erzurum Kültür ve Müze Müdürlüğü sorumluluğunda bir eserdir. Erzurum Kültür ve Müze Müdürlüğü'nden alınan bilgiye göre eser üzerinde herhangi bir malzeme özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışma yapılmamıştır. Bu sebeple taş ve harç dayanımı, literatür ve yapılabilecek hasarsız deneyler yardımıyla belirlenmiştir.

Eser üzerinde daha önce çalışma yapan araştırmacılar elastisite modülünü taş için 9000 MPa, tuğla için 3500 MPa, poisson oranını taş için 0.15, tuğla için 0.18, birim hacim ağırlığını ise taş için 2250 kg/m³, tuğla için 1750 kg/m³ olarak almışlardır (Kavalı vd., 2015).

Yakutiye Medresesi'nin taş dayanımını belirlemek için hasarsız bir deney yöntemi olan Schmidt sertlik çekicinin kullanarak ortalama bir değer elde edilmiştir. Sertlik ölçümü sonucunda kesme taş kısmında dayanım 44.7 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değerler Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Yakutiye Medresesi Schmidt Çekici sertlik ölçümü sonucu

Schmidt Sertlik Deneyi Sonuçları														
Rebound	37	29	29	34	28	36	36	49	49	41	36	43	47	35
f_{ck} (MPa)	35	24	24	29	24	35	35	61	61	43	35	45	53	35
Rebound	48	33	50	50	49	41	52	52	50	Ortalama				
f_{ck} (MPa)	58	28	62	62	61	43	65	65	62	44,7				

Verilen çalışmalar ve sonuçlardan yola çıkılarak, bu çalışmada, Erzurum Yakutiye Medresesi'nin;

- kesme taş basınç dayanımı 44.70 MPa,
- moloz dolgu basınç dayanımı 3.00 MPa,
- harç basınç dayanımı 5.50 MPa

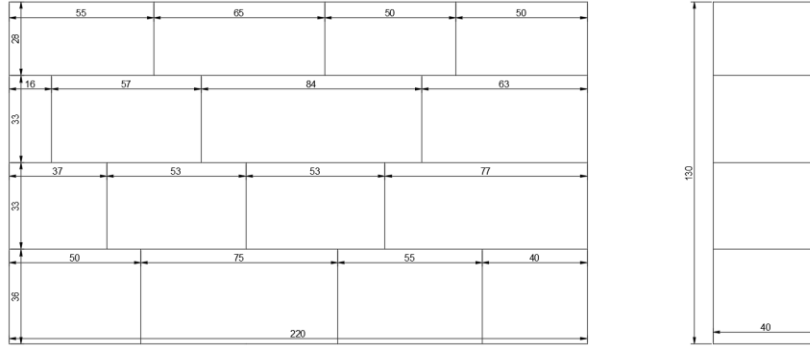
olarak kabul edilmiştir.

4.3.4.1. Erzurum Yakutiye Medresesi Dış Duvar Basınç Dayanımının Belirlenmesi

Eşitlik 4.1 ve 4.2'nin ışığında Erzurum Yakutiye Medresesi'nden alınan bir duvar görünüşü (Şekil 4.10) ile yola çıkılarak;



Şekil 4.10a. Yakutiye Medresesi duvarlarından bir görüntü



Şekil 4.10b. Kabul edilen duvar ve taş boyutları

çatlak yoğunluğu;

$$f = \frac{(0.40 \times 1.30 \times 3.00 + 0.40 \times 2.20 \times 3.00)}{(0.40 \times 2.20 \times 1.30)} = 3.67$$

$$L = \sqrt[3]{2.20 \times 1.30 \times 0.40} = 1.05 \text{ ise;}$$

$$f_k = e^{-0.3117 \times 1.05 \times 3.67} 44.70 = 13.45 \text{ MPa olarak elde edilmiştir.}$$

Yukarıda belirtildiği gibi cami duvarlarının elastisite modülünü belirlemek için, kesme taş kısımlarının basınç dayanımı 13.45 MPa olarak alınmıştır.

4.3.4.2. Erzurum Yakutiye Medresesi Üç Yapraklı Duvar Dayanımının Belirlenmesi

Eşitlik 4.5 ışığında üç yapraklı duvarın basınç dayanımı;

$$f_c = \frac{2 \times 0.40}{2 \times 0.40 + 0.50} \times 13.45 \times 0.70 + \frac{0.50}{2 \times 0.40 \times 0.50} \times 3.00 \times 1.30 = 7.29 \text{ MPa}$$

Duvarın elastisite modülünü elde etmek için Denklem 4.6'i kullanılarak;

$$E = 1000 \times 7.29 = 7290 \text{ MPa olarak elde edilmiştir.}$$

4.3.5. Erzurum Lala Paşa Camii Malzeme Özellikleri

Erzurum Lala Paşa Cami, Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nün yasal sorumluluğundadır. Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden alınan bilgiye göre eser üzerinde herhangi bir malzeme özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışma yapılmamıştır.

Sinan strüktüründe kullanılan taş genellikle traverten veya kumtaşından oluşur. Taş malzeme için minimum basınç emniyet gerilmesi 35 MPa, birim hacim ağırlığı 26500 N/m³'dür (Çamlıbel, 1998). Lala Paşa Cami'nin taş dayanımını belirlemek için hasarsız bir deney yöntemi olan Schmidt sertlik çekici kullanılarak ortalama bir yüzey sertlik değeri elde edilmiştir. Sertlik ölçümü sonucunda kesme taş kısmında dayanım 25.60 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değerler Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Lala Paşa Cami Schmidt Çekici sertlik ölçümü sonucu

Schmidt Sertlik Deneyi Sonuçları															
Rebound	34	34	27	31	28	27	30	34	30	29	29	33	34	26	24
f_{ck} (MPa)	29	29	18	26	24	18	26	29	26	24	24	28	29	18	-
Rebound	29	29	33	26	44	31	26	31	27	29	39	Ortalama			
f_{ck} (MPa)	24	24	28	18	51	26	18	26	18	24	42	25,6			

Horasan harçları üzerinde yapılan deneylerden basınç dayanımının 5.50 MPa, birim hacim ağırlığının 17600 N/m³ olduğu bulunmuştur. Çekme dayanımı ise basınç dayanımının yaklaşık %10 u mertebesinde (0.55 MPa) belirlenmiştir (Bayülke, 1992).

Caminin duvarlarında kullanılan dolgu malzemesinin basınç dayanımı ise literatür çalışmaları yardımıyla belirlenmiştir. Osmanlı eserlerinden olan İstanbul Fatih Cami dolgu malzemesinin basınç dayanımları 3.30, 3.10 ve 2.60 MPa olarak bulunmuştur (Demir ve İlki, 2014). Verilen çalışmalar ve sonuçlardan yola çıkılarak, bu çalışmada, Erzurum Lala Paşa Cami'nin;

- kesme taş dayanımı 25.60 MPa,
- moloz dolgu dayanımı 3.00 MPa,
- harç dayanımı 5.50 MPa

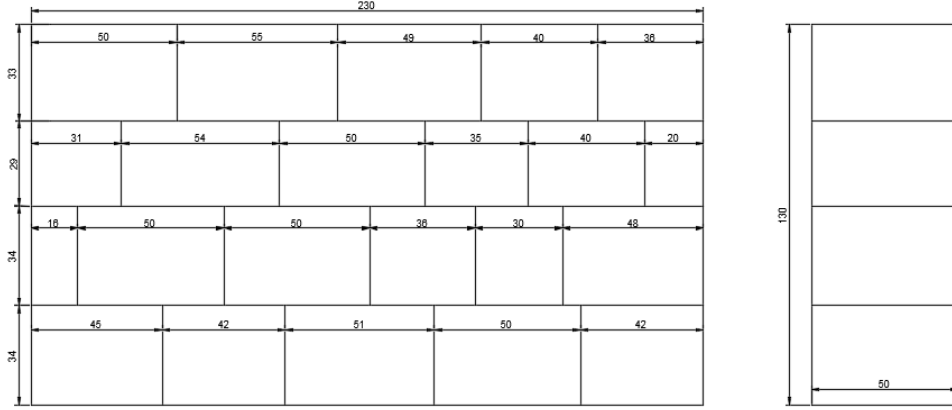
olarak kabul edilmiştir.

4.3.5.1. Erzurum Lala Paşa Cami Dış Duvarın Basınç Dayanımının Belirlenmesi

Eşitlik 4.1 ve 4.2'nin ışığında Erzurum Lala Paşa camiden alınan bir duvar görünüşü (Şekil 4.11) ile yola çıkılarak;



Şekil 4.11a. Lala Paşa Cami duvarlarından bir görüntü



Şekil 4.11b. Kabul edilen duvar ve taş boyutları

Çatlak yoğunluğu;

$$f = \frac{(0.50 \times 1.30 \times 4.50 + 0.50 \times 2.30 \times 3.00)}{(0.50 \times 2.30 \times 1.30)} = 4.26$$

$$L = \sqrt[3]{2.30 \times 1.30 \times 0.50} = 1.14 \text{ ise;}$$

$$f_k = e^{-0.3117 \times 1.14 \times 4.26} 25.60 = 5.63 \text{ MPa olarak elde edilir.}$$

Yukarıda belirtildiği gibi cami duvarlarının elastisite modülünü belirlemek için, kesme taş kısımlarının basınç dayanımı 5.63 MPa olarak alınmıştır.

4.3.5.2. Erzurum Lala Paşa Cami Üç Yapraklı Duvar Dayanımının Belirlenmesi

Eşitlik 4.5 ışığında üç yapraklı duvarın basınç dayanımı;

$$f_c = \frac{2 \times 0.50}{2 \times 0.50 + 0.80} \times 5.63 \times 0.70 + \frac{0.80}{2 \times 0.50 \times 0.80} \times 3.00 \times 1.30 = 3.92 \text{ MPa}$$

Duvarın elastisite modülünü elde etmek için Denklem 4.6'i kullanılarak;

$$E = 1000 \times 3.92 = 3920 \text{ MPa olarak elde edilir.}$$

4.3.6. Analitik Modal Analiz Sonuçları

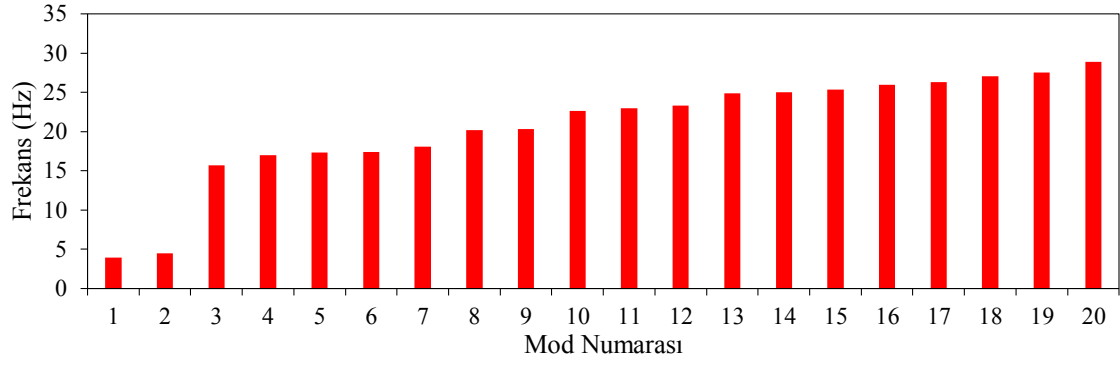
4.3.6.1. Yakutiye Medresesi Analitik Modal Analizi

Yakutiye Medresesi'nin modal analizi gerçekleştirilmiş ve mod şekilleri ile titreşim periyotları elde edilmiştir. Analiz, 20 modda yapılmış ve yapının hakim ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Yapının modları belirlenirken, ilk iki mod minarenin hakim modu çıkmıştır. Bu iki mod şekli, yapının bütünü temsil etmeyen lokal modlar olduğu için dikkate alınmamıştır. Çizelge 4.4'de yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen hakim ilk altı moda ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri, Şekil 4.12'de tüm modların frekans değerleri ve Şekil 4.13'de hakim altı modun, mod şekilleri verilmektedir.

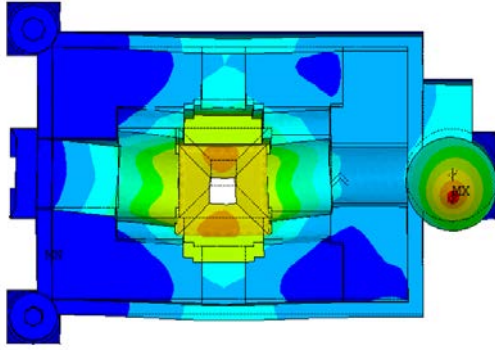
Modelin mod şekillerine bakıldığında 3. mod doğu-batı, 4. mod kuzey-güney doğrultusunda eninedir. 5., 6. ve 7. modlar düşey doğrultuda, 8. mod ise burulma modlarıdır. Mod şekillerindeki deformasyonlar gözlemlendiğinde, deprem sırasında ana kubbe ve minarenin zorlanacağı söylenebilir. Ayrıca doğu-batı doğrultusunda duvarlar ve özellikle kümbetin mesnetlendiği doğu cephesindeki duvarda, düzlem dışı hareketlilik sebebiyle deformasyon gözlemlenebilir. Yapının toplam kütlesi 8500 ton civarındadır.

Çizelge 4.4. Yakutiye Medresesi'nin dikkate alınan hakim altı moduna ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri

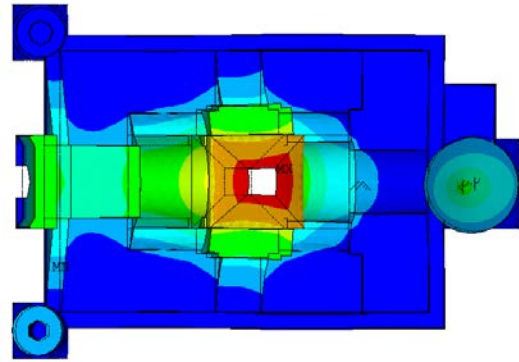
Mod	Frekans (Hz)	Küt. Kat. Oranı (yatay - x doğ.)	Küt. Kat. Oranı (düşey - y doğ.)	Küt. Kat. Oranı (yatay - z doğ.)
4	17.01	0.1856	0.46E-5	0.49E-4
7	18.08	0.1673	0.34E-4	0.93E-2
10	22.61	0.84E-2	0.55E-2	0.11E-3
11	22.98	0.67E-4	0.61E-5	0.52E-3
12	23.32	0.49E-4	0.87E-1	0.15E-2
13	24.87	0.27E-2	0.65E-4	0.76E-4



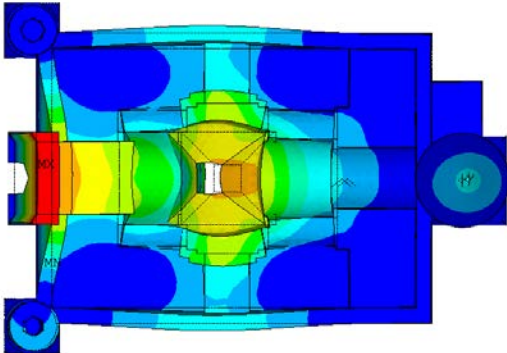
Şekil 4.12. Yakutiye Medresesi'nin ilk 20 moda ait frekans değerleri



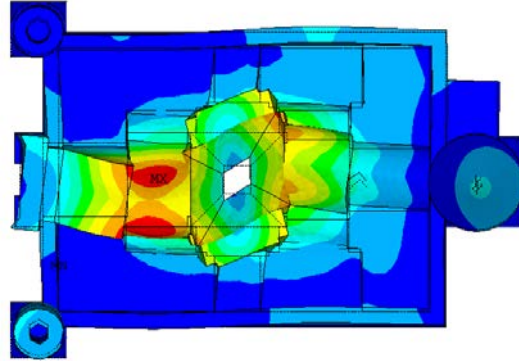
4. Mod



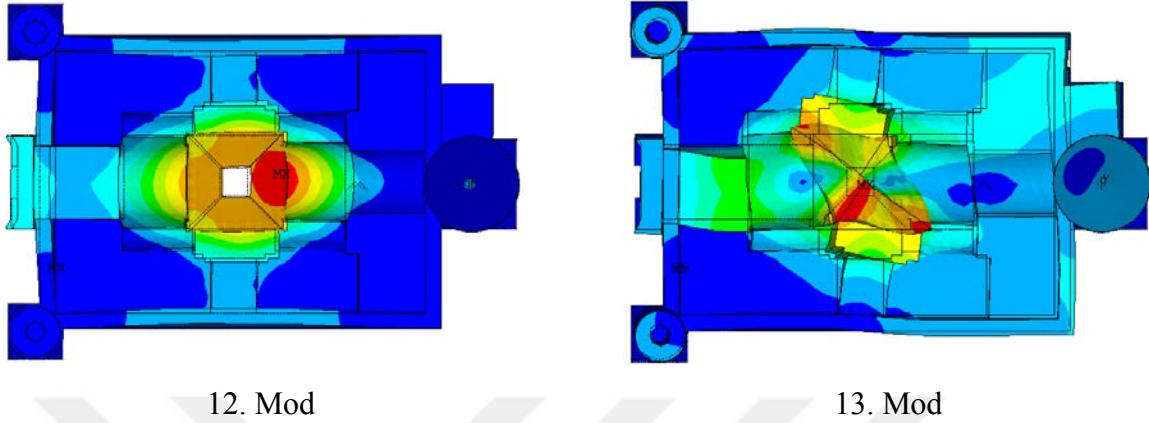
7. Mod



10. Mod



11. Mod



Şekil 4.13. Yakutiye Medresesi'nin hakim ilk altı moduna ait deformasyon şekilleri

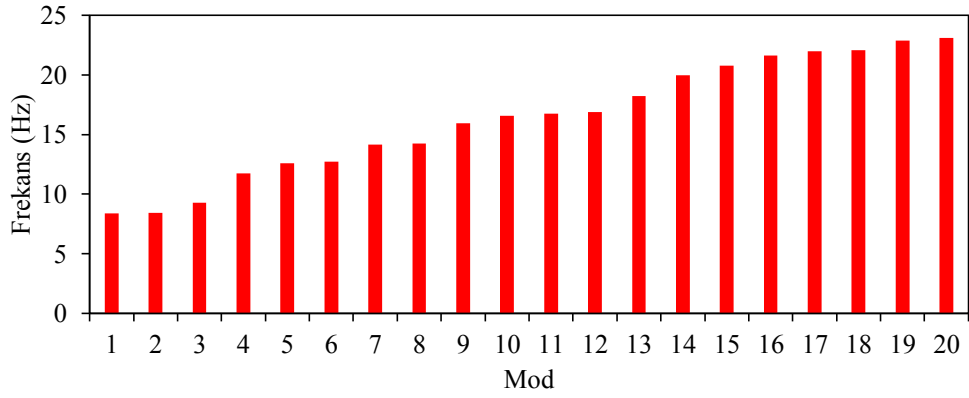
4.3.6.2. Lala Paşa Cami Analitik Modal Analizi

Lala Paşa Camisi'nin dinamik yapısal çözümlerinde öncelikle modal analiz sonucunda elde edilen mod şekilleri ve titreşim periyotları belirlenmiştir. Çözümler 20 modda yapılmış ve yapının hakim ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Yapının modları belirlenirken, ilk iki mod minarenin hakim modu çıkmıştır. Bu iki mod şekli, yapının bütünü temsil etmeyen lokal modlar olduğu için dikkate alınmamıştır. Aşağıda Çizelge 4.5'de yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen hakim ilk altı moda ait frekans ve kütle katılım oranları, Şekil 4.14'de tüm modlara ait frekans değerleri ve Şekil 4.15'de ilk altı moda ait şekil değiştirme hali gösterilmektedir. Yapının toplam kütlesi 5679 ton olarak hesaplanmıştır.

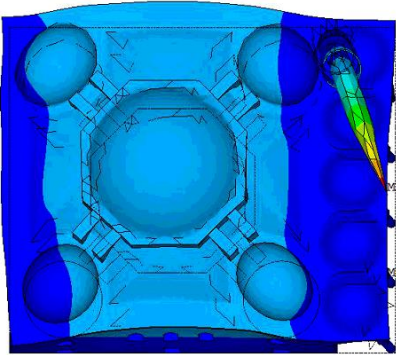
Modelin mod şekillerine bakıldığında yapının 3. modu doğu-batı doğrultusunda enine ve burulma, 4. Modu kuzey-güney doğrultusunda enine ve burulma, 5. Mod ve üstü modlar burulma ve 8. Mod düşey ve burulma modudur. Mod şekillerindeki deformasyonlar gözlemlendiğinde, deprem sırasında son cemaat yeri, ana kubbe ve minarenin zorlanacağı söylenebilir. Ayrıca doğu-batı doğrultusunda duvarlar ve özellikle son cemaat yerinin mesnetlendiği kuzey cephesindeki duvarda, düzlem dışı hareketlilik sebebiyle hasar gözlemlenebilir.

Çizelge 4.5. Lala Paşa Cami'nin dikkate alınan hakim altı moduna ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri

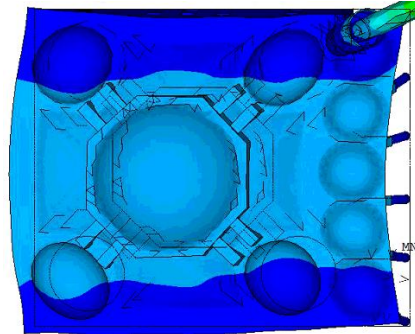
Mod	Frekans (Hz)	Küt. Kat. Oranı (x doğ.-yatay)	Küt. Kat. Oranı (y doğ.-düşey)	Küt. Kat. Oranı (z doğ.-yatay)	Küt. Kat. Oranı (y dönme)
3	8.44	0.06	0.48E-5	0.56	0.49
4	8.50	0.55	0.79E-4	0.06	0.57
5	9.30	0.57E-3	0.25E-4	0.36E-4	0.57
6	11.74	0.25E-4	0.30E-3	0.84E-3	0.58
7	12.55	0.13E-3	0.97E-4	0.14E-1	0.83
8	12.70	0.44E-4	0.16	0.41E-4	0.84



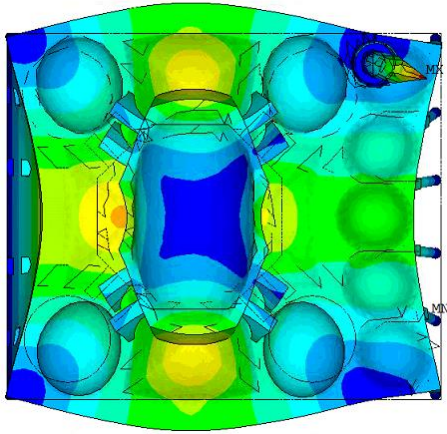
Şekil 4.14. Lala Paşa Cami'nin ilk 20 moda ait frekans değerleri



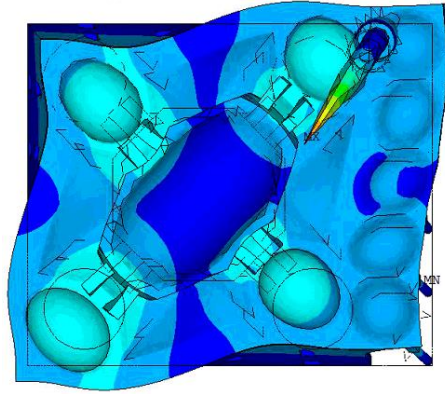
3. Mod



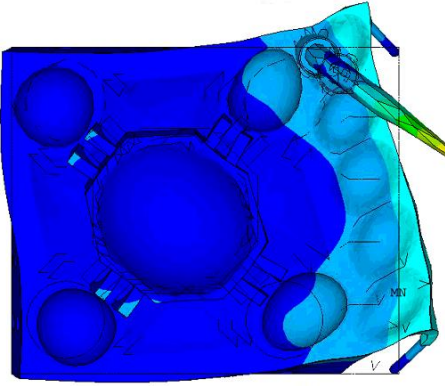
4. Mod



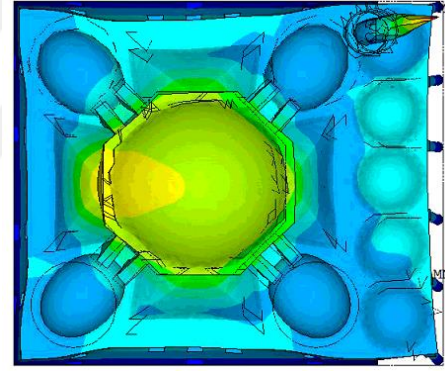
5. Mod



6. Mod



7. Mod



8. Mod

Şekil 4.15. Lala Paşa Camii'nin hakim ilk altı moda ait deformasyon şekilleri

4.3.7. Deneysel Modal Analiz Sonuçları

Yakutiye Medresesi ve Lala Paşa Camii yapılarında gerçekleştirilen ortam titreşimi ölçüm ve kayıtlarında kablolu ve kablosuz ölçüm cihazları birlikte kullanılarak tek cihaz kurulum düzeninde ölçümlerin alınması mümkün olmuştur. Kablosuz cihazların senkronize veri alabilmeleri için GPS antenlerinin atmosfere açık bir şekilde konumlandırılması gerekmektedir. Minare içinden alınan ölçümlerde bu mümkün olmadığından; minare ölçümlerinde kablolu cihazlar tercih edilmiştir. Kablosuz ölçüm alabilen cihazlar ise yapı gövdesi üzerinden ölçüm alma işleminde kullanılmıştır. Ölçümlerin senkronize bir şekilde alınması gerektiğinden kablolu ve

kablosuz ölçüm yapabilen cihazların ölçüm düzenleri arasında referans tek eksenli ivmeölçer kullanılarak bağlantı kurulmuştur (Şekil 4.16).

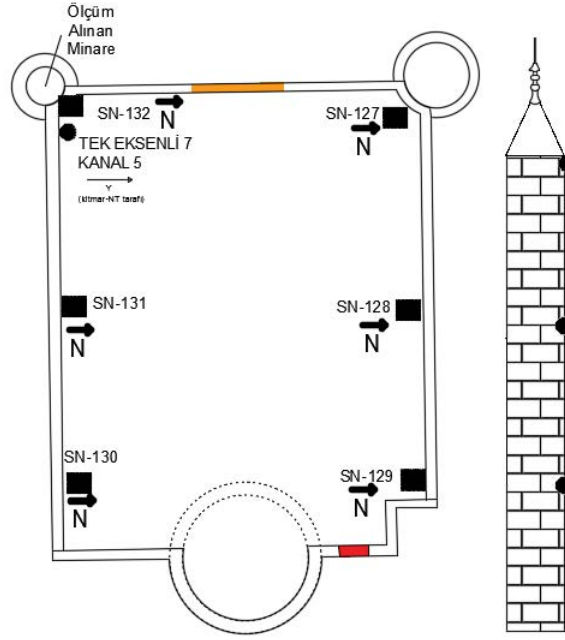


Şekil 4.16. Kablolu ve kablosuz ölçüm düzenleri arasındaki bağlantıyı sağlayan referans ivmeölçer kurulumu

Cihaz kalibrasyonları yapılarak tüm ölçümler g cinsinden 0.01 sn aralıkla alınmış ve kaydedilmiştir. Ölçümler muhtelif zamanlarda 300 sn ve 200 sn' lik ölçüm süreleri ile tekrarlanarak farklı veri setleri elde edilmiştir. Bununla birlikte 30 dakikalık uzun süreli ölçümler de ayrıca alınmıştır.

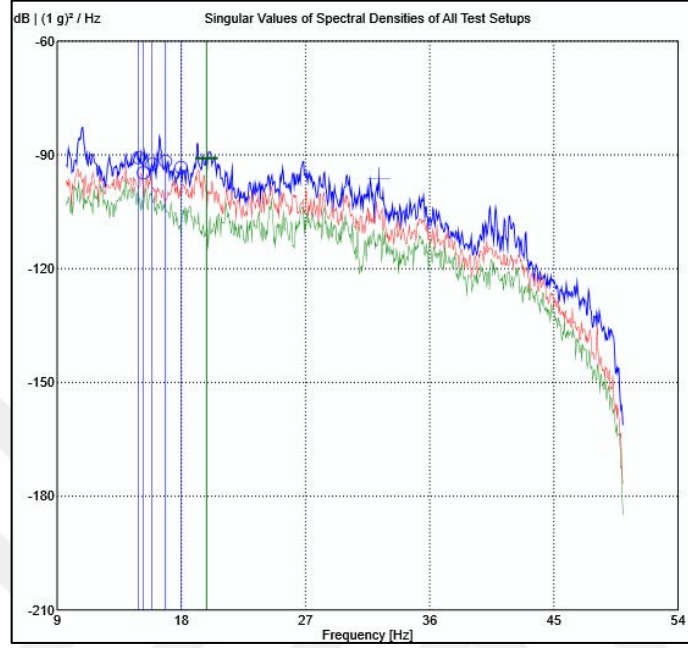
4.3.7.1. Yakutiye Medresesi'nin Deneysel Modal Analiz Sonuçları

Yakutiye Medresesi'nin deneysel dinamik karakteristiklerini belirlemek için Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılmıştır. Çevresel titreşim testleri yaya hareketleri ve rüzgâr yükleri gibi çevresel titreşimler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sırasında yapı gövdesi için 6 adet kablosuz ölçüm yapabilen üç eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Minare için ise 3 adet kablolu üç eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Yapı dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için yapının tepkileri yatay ve düşey yönlerde uygun yerlere yerleştirilen ivmeölçerler yardımıyla belirlenmiştir. Yapının minaresi ile yapının ana gövdesi arasında referans tek eksenli ivmeölçer yardımıyla senkronizasyon sağlanmıştır. İvmeölçerlerin yerleri Şekil 4.17'de gösterilmektedir.



Şekil 4.17. Yakutiye Medresesi titreşim ölçüm krokisi

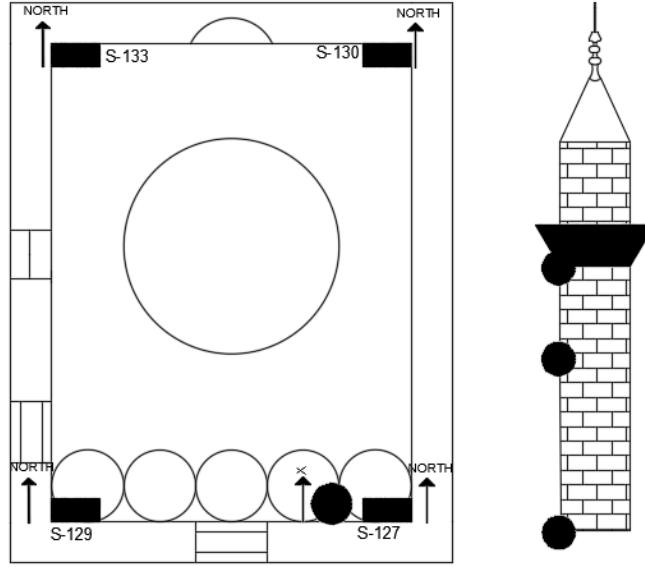
Dinamik karakteristikler Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrışma Yöntemi'nden (GFOA) her bir titreşim sinyalinden tekil değerler olarak elde edilmektedir. GFOA yöntemiyle bütün sinyallerden elde edilen tekil değerler Şekil 4.18'de doğal frekans değerleri ise Çizelge 4.6'da verilmiştir. Elde edilen veriler Artemis Modal Pro (Artemis Modal Pro, 2017) yazılımı yardımıyla işlenerek yapının deneysel modal karakteristikleri belirlenmiştir.



Şekil 4.18. Yakutiye Medresesi GFOAY ile elde edilen tekil değerler

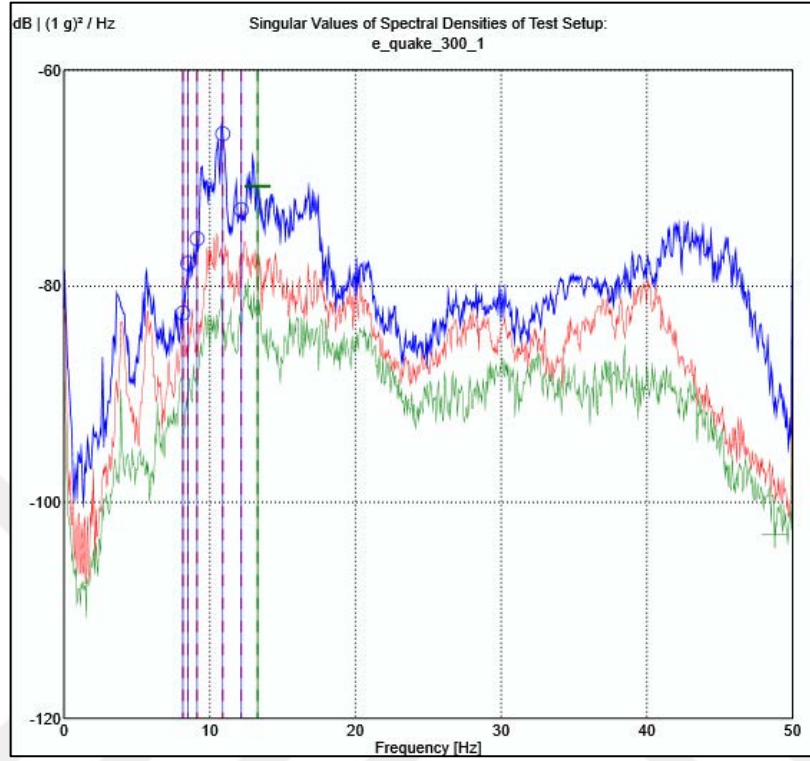
4.3.7.2. Lala Paşa Cami Deneysel Modal Analizi

Lala Paşa Camisi'nin deneysel dinamik karakteristiklerini belirlemek için Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılmıştır. Çevresel titreşim testleri yaya hareketleri ve rüzgar yükleri gibi çevresel titreşimler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sırasında 4 adet üç eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Yapı dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için yapının tepkileri yatay ve düşey yönlerde uygun yerlere yerleştirilen ivmeölçerler yardımıyla belirlenmiştir. Yapının minaresi ile yapının ana gövdesi arasında referans tek eksenli ivmeölçer yardımıyla senkronizasyon sağlanmıştır. İvmeölçerlerin yerleri Şekil 4.19'da gösterilmektedir.



Şekil 4.19. Lala Paşa Cami titreşim ölçüm krokisi

Dinamik karakteristikler Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrışma Yöntemi'nden (GFOA) her bir titreşim sinyalinden tekil değerler olarak elde edilir. GFOA yöntemiyle için bütün sinyallerden elde edilen tekil değerler Şekil 4.20'de doğal frekans değerleri ise Çizelge 4.6'da verilmiştir. Elde edilen veriler Artemis Modal Pro (Artemis Modal Pro, 2017) yazılımı yardımıyla işlenerek yapının deneysel modal karakteristikleri belirlenmiştir.



Şekil 4.20. Lala Paşa Cami GFOAY ile elde edilen tekil değerler

Çizelge 4.6. Deneysel ve teorik frekans değerlerinin karşılaştırılması

Mod	Yakutiye Medresesi			Lala Paşa Cami		
	Teorik Frekans (Hz)	Deneysel Frekans (Hz)	Fark (%)	Teorik Frekans (Hz)	Deneysel Frekans (Hz)	Fark (%)
3	15.33	14.89	2.87	8.44	8.15	3.44
4	16.60	15.23	8.25	8.50	8.49	0.12
5	16.89	15.87	6.04	9.30	9.13	1.83
6	17.16	16.85	1.81	11.74	10.89	7.24
7	17.94	17.97	0.17	12.55	12.16	3.11
8	19.49	19.82	1.67	12.70	13.28	4.37

Çizelge 4.6’da verildiği gibi yapının malzeme mekanik özelliği sunulan yöntemle belirtildiğinde deneysel sonuçlar ile teorik sonuçlar oldukça yakın çıkmaktadır. Bu sebeple yapıların deprem analizleri önerilen malzeme belirleme yöntemiyle elde edilen mekanik özelliklerle yapılacaktır.

4.4. Nihai Malzeme Özellikleri

Yukarıda belirtildiği gibi tarihi eserlerin malzeme özelliklerinin belirlenmesi, belirsizliklerin çokluğu nedeniyle oldukça zordur. Malzeme özellikleri farklı varsayımlar, kabuller ve analitik önerilerle belirlenmektedir. Deneysel ve teorik değerlerin oldukça yakın olması, tarihi yapıların malzeme özelliklerinin belirlenmesinde önceki bölümlerde önerilen teorik denklemlerin kullanılabileceği sonucunu çıkarmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda Erzurum Lala Paşa Cami ve Erzurum Yakutiye Medresesi malzeme özellikleri Çizelge 4.7’de verildiği gibi kabul edilmiş ve analizler bu değerlere göre yapılmıştır.

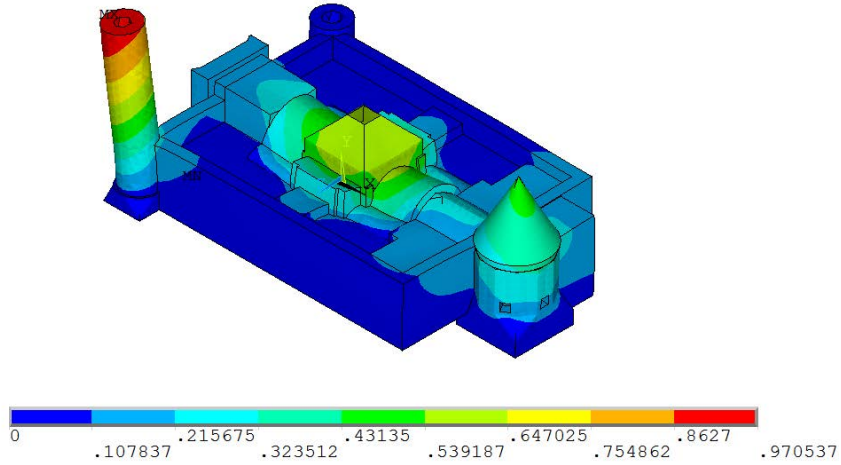
Çizelge 4.7. Lala Paşa Cami ve Yakutiye Medresesi nihai malzeme özellikleri

Yapının Bölümü	Lala Paşa Cami				Yakutiye Medresesi			
	Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Poisson Oranı	Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Poisson Oranı
Duvarlar ve Minareler	3.92	3920	0.30	0.18	7.29	7290	0.30	0.18
Fil Ayakları ve Kemerler	5.63	5630	0.30	0.18	13.45	13450	0.30	0.18
Kubbeler	3.00	3000	0.30	0.18	3.00	3000	0.30	0.18

4.5. Yapıların Statik Analizleri

4.5.1. Yakutiye Medresesi Statik Analizi

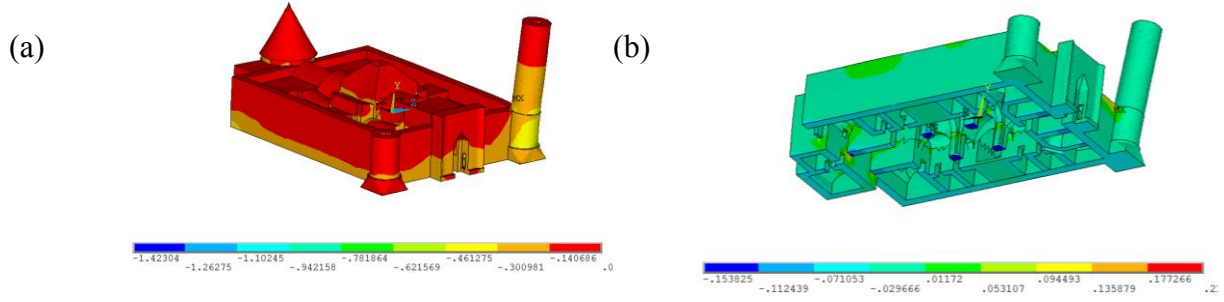
Erzurum Yakutiye Medresesi'nin zati ağırlığı altında statik analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz verilerine göre en büyük yer değiştirmelerin düşey yönde, ana kubbenin tepe noktasında, kümbetin tepe noktasında ve minarenin tepe noktasında meydana geldiği belirlenmiştir. Azami yer değiştirmenin, minare tepe noktasında 0.97 mm olduğu gösterilmektedir (Şekil 4.21).



Şekil 4.21. Yakutiye Medresesi statik analizde düşeyde oluşan yer değiştirmeler (mm)

Medresenin taşıyıcı elemanlarında oluşan basınç ve çekme gerilmeleri incelendiğinde, basınç gerilmelerinin ana kubbeyi taşıyan fil ayakları ile duvarların alt kısımlarında yoğunlaştığı ve basınç gerilmelerinin en çok 1.42 MPa değerinde olduğu görülmektedir (Şekil 4.22a).

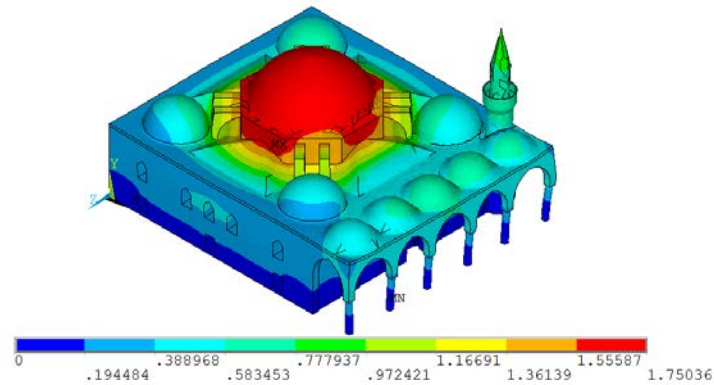
Çekme gerilmeleri ise fil ayakları ile duvarların birleşim bölgelerinde bulunan kemerlerde yoğunlaştığı ve en büyük çekme gerilmesinin 0.22 MPa olduğu görülmektedir (Şekil 4.22b). En büyük gerilme değerleri, malzeme özelliklerinde kabul edilmiş olan 7.29 MPa değerindeki basınç dayanımından ve kabul edilen 0.3 MPa değerindeki çekme dayanımından küçüktür. Bu da yapıda statik durumda meydana gelebilecek gerilmeler açısından öngörülen sınırların altındadır.



Şekil 4.22. Yakutiye Medresesi statik analiz sonucunda elde edilen a:basınç gerilmeleri;
b:çekme gerilmeleri (MPa)

4.5.2. Lala Paşa Cami Statik Analizi

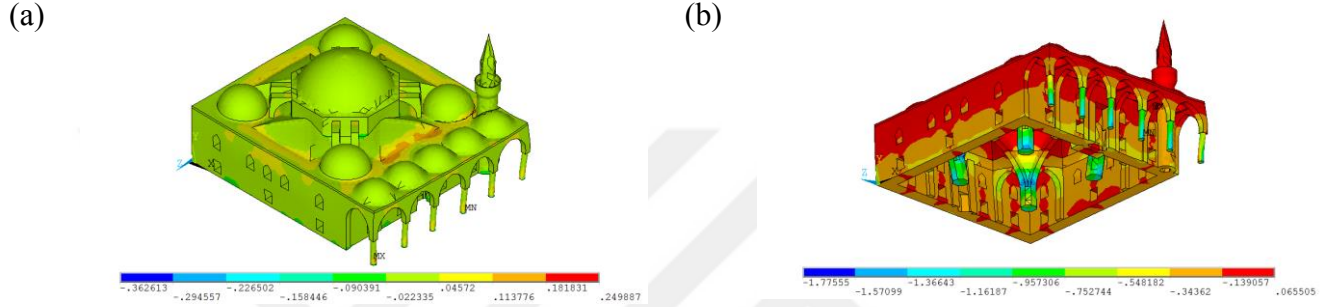
Erzurum Lala Paşa Camisi'nin kendi ağırlığı altında statik analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analize göre en büyük yer değiştirmenin düşey yönde ve ana kubbenin tepe noktasında meydana geldiği, maksimum yer değiştirmenin 1.75 mm'ye ulaştığı görülmektedir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23. Lala Paşa Cami statik analizden elde edilen düşey yer değiştirmeler (mm)

Cami taşıyıcı sisteminde meydana gelen basınç ve çekme gerilme değerleri incelendiğinde, basınç gerilmelerin ana kubbeyi taşıyan fil ayakları ile bu fil ayaklarının bağlantısını sağlayan kemerlerin birleşim yerlerinde yoğunlaştığı ve basınç gerilmesi olarak maksimum 1.78 MPa değerine ulaştığı görülmektedir (Şekil 4.24b). Çekme gerilmeleri ise yarım kubbeler ile duvarların birleşim bölgelerinde, pencere boşluklarının üst kısımlarında, son cemaat yerindeki kemerlerin

kilit taşı bölgelerinde yoğunlaştığı ve maksimum çekme gerilmesinin 0.25 MPa değerine ulaştığı görülmektedir (Şekil 4.24a). Elde edilen gerilme değerleri, çalışmada seçilmiş olan 5.63 MPa basınç mukavemeti ve kabul edilen çekme mukavemeti değeri olan 0.3 MPa'dan küçüktür. Bu nedenle statik durumda meydana gelen gerilmeler açısından yapı öngörülen sınırlar altındadır.



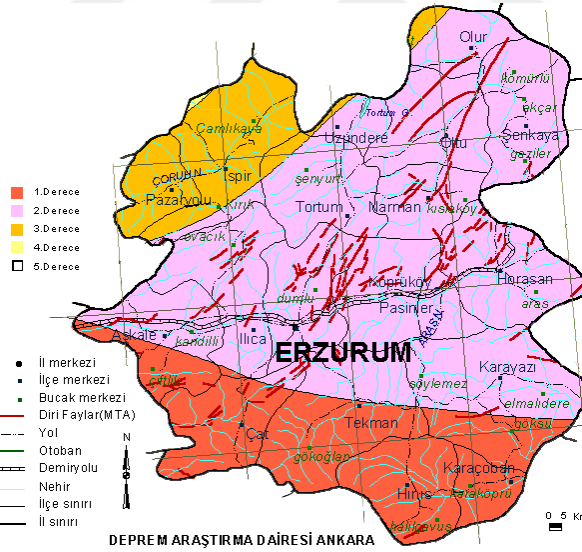
Şekil 4.24. Lala Paşa Cami statik analiz sonucunda elde edilen a: çekme gerilmeleri;
b: basınç gerilmeleri (MPa)

4.6. Yapıların Dinamik Analizleri

Doğu Anadolu Bölgesi bulunduğu konum sebebiyle tarih boyunca birçok büyük ve küçük depreme maruz kalmıştır. Erzurum Bölgesi, Erzurum şehir merkezi dahil Dumlupınar, Aşkale, Kandilli, Horasan, Aras, Aziziye, Karayazı, Elmalıdere, Söylemez, Köprüköy, Narman, Kışlaköy, Oltu, Olur, Pasinler, Şenkaya, Akşar, Gaziler, Kömürlü, Tortum, Şenyurt ve Uzundere ikinci derece deprem kuşağı, İspir, Kırık, Çamlıkaya, Pazaryolu, üçüncü derecede deprem kuşağı, Yeniköy, Çiftlik, Çat, Hınıs, Halilçavuş, Karaköprü, Göksu, Tekman, Gökoğlan, birinci derece deprem kuşağında bulunmaktadır (Şekil 4.25). Tarihi kaynaklara bakıldığında 1900 yılı sonrası meydana gelen depremler Çizelge 4.8. verilmiştir. Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden alınan bilgiye göre, yapı belirtilen bu depremler esnasında herhangi bir ciddi hasar almamıştır.

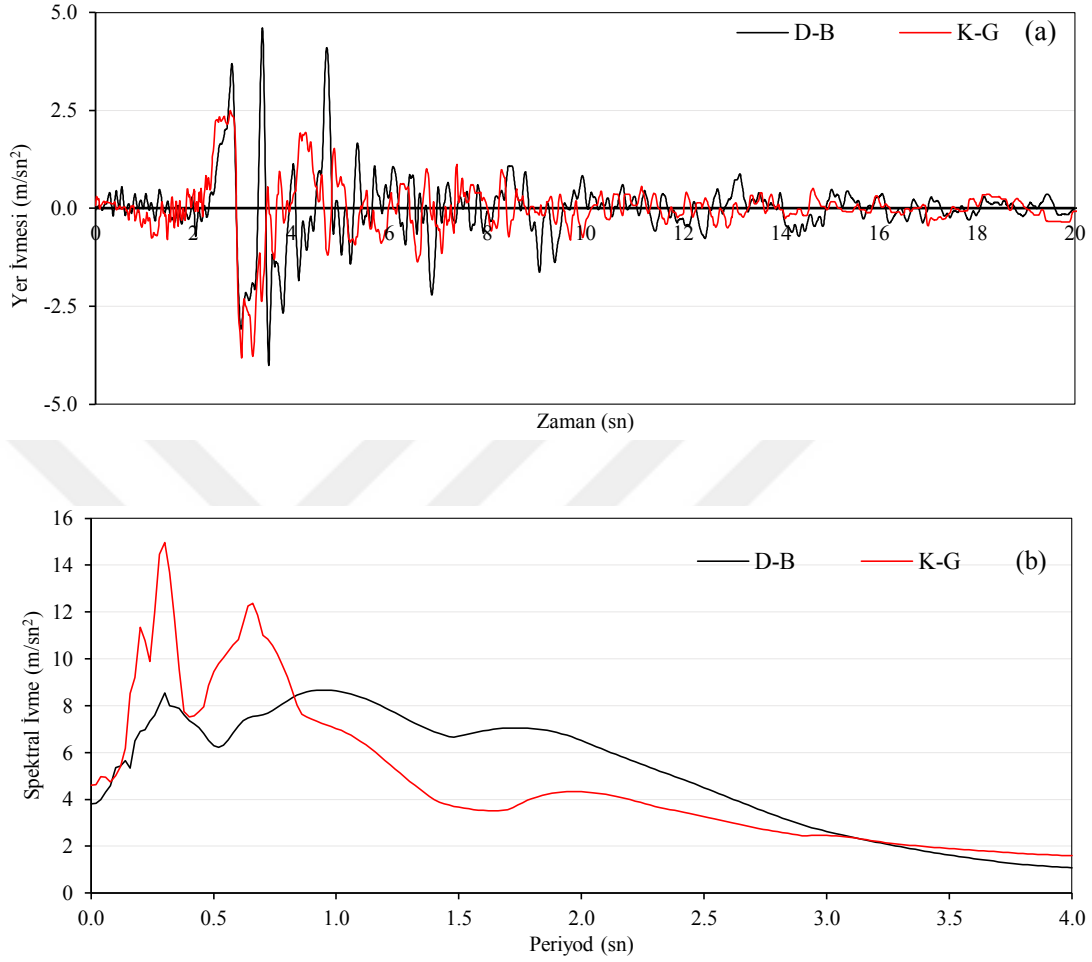
Çizelge 4.8. 1900'dan günümüze Erzurum ve çevresinde meydana gelen depremler

Tarih	Yer	Şiddet	Mag (Ms)	Can Kaybı	Hasarlı Bina
13.09.1924	Horasan (Erzurum)	IX	6.8	60	380
31.05.1946	Varto-Hınıs (Muş)	VIII	5.9	839	3000
03.01.1952	Hasankale (Erzurum)	VIII	5.8	41	701
19.08.1966	Varto-Hınıs (Muş)	IX	6.9	2396	20007
30.10.1983	Erzurum - Kars	VIII	6.9	1155	3241
18.09.1984	Baklaya-Şenkaya (Erzurum)	VIII	6.4	3	570
03.12.1999	Şenkaya (Erzurum)	VII	5.1	1	183
25.03.2004	Aşkale (Erzurum)	VII	5.6	9	1280



Şekil 4.25. Erzurum İli Türkiye Deprem Haritası (URL 1)

Bu çalışmada incelenen yapıların dinamik çözümlemesi zaman tanım alanı hesap yöntemiyle, 13 Mart 1992 tarihinde Erzincan'da meydana gelen 6.8 büyüklüğündeki ve 4.11 m/s² (0.42g) maksimum ivmeli depremin doğu-batı ve kuzey-güney ivme bileşenleri ve ivme spektrumu dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.26). 1992 Erzincan depremi büyüklüğünde bir depremin yapının bulunduğu alanda gelmesi ön görülmemektedir.

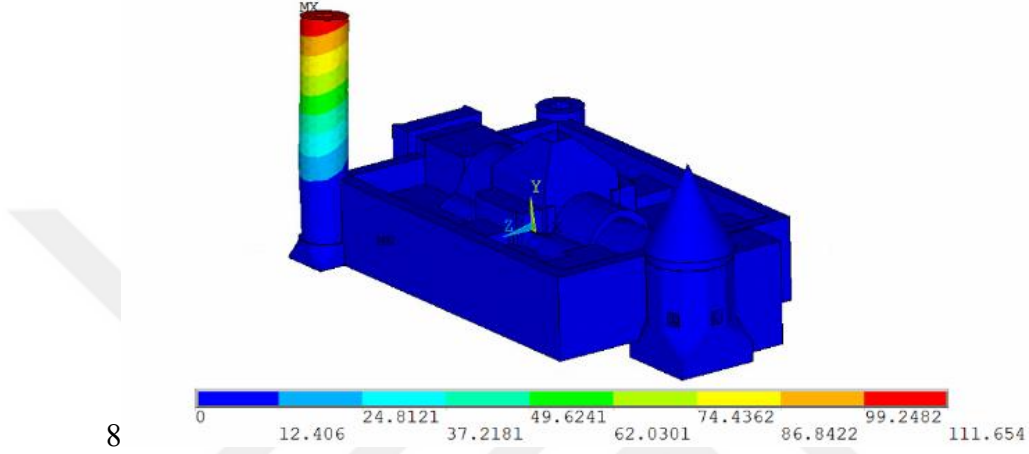


Şekil 4.26. a: Erzincan depremi D-B ve K-G bileşenleri; b: Erzincan depremi D-B ve K-G ivme spektrumu

4.6.1. Yakutiye Medresesi Dinamik Analizi

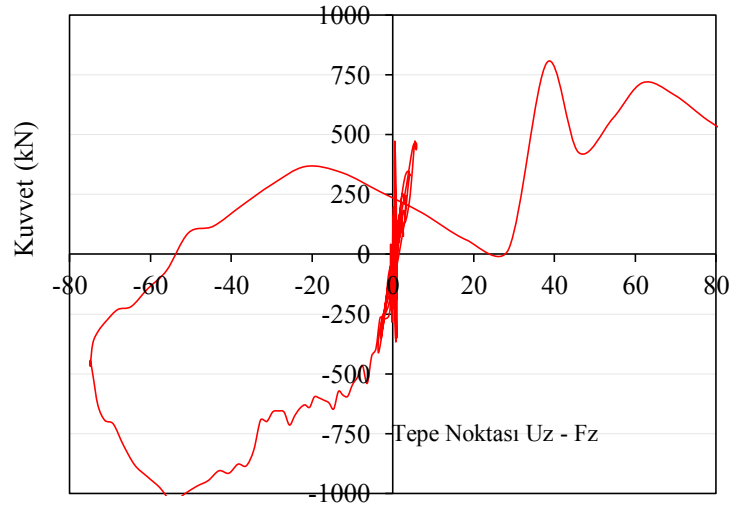
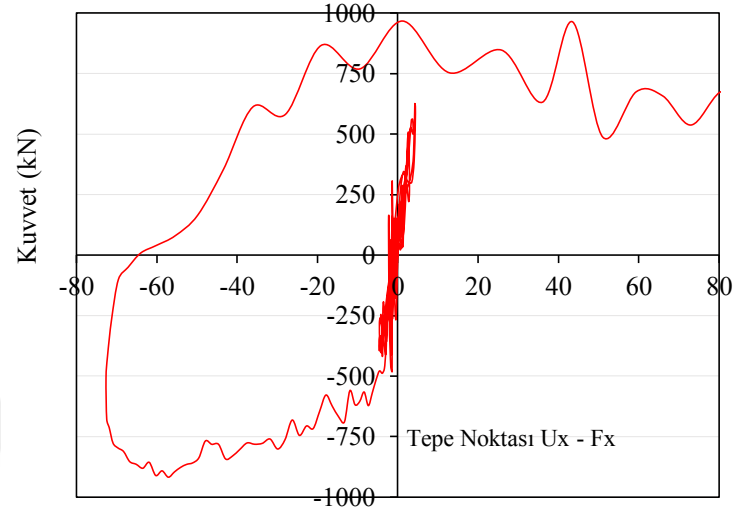
Dinamik analiz sonucu medrese ana kütleinde yapısal bütünlüğe zarar vermeyen lokal çatlamlar dışında bir hasar gözlemlenmemiştir. Ana kütleinin doğrusal davranış sergilediği belirlenmiştir. Ancak minarenin, uygulanan yer hareketi şiddetine karşı yeterli dayanıma sahip olmadığı ve böyle bir depremde göçeceği görülmüştür. Çözümlerden elde edilen bulgular ışığında, maksimum yatay yer değiştirmenin 2.93 sn'de, yapının minaresi halen stabil durumdayken,

minarenin tepesinde olduğu belirlenmiştir ve bu yer değıştirme miktarının 111 mm değerine ulaştığını görölmektedir (Şekil 4.27).



Şekil 4.27. Yakutiye Medresesi dinamik analiz sonucu elde edilen 2.93sn'de yatay yer değıştirmeler (mm)

Şekil 4.28'da minarenin medrese dış duvarlarının üst seviyesinde alınan kesitindeki kesme kuvveti – yer değıştirme eğrileri x ve z yönünde verilmiştir. Eğrilerde, minare ± 5 mm yer değıştirmeler arasında elastik bir davranış gösterirken, uygulanan yer hareketinin şiddetine bağlı olarak elastik davranış özelliğinin kaybettiği ve minarenin göçtüğü görölmektedir.

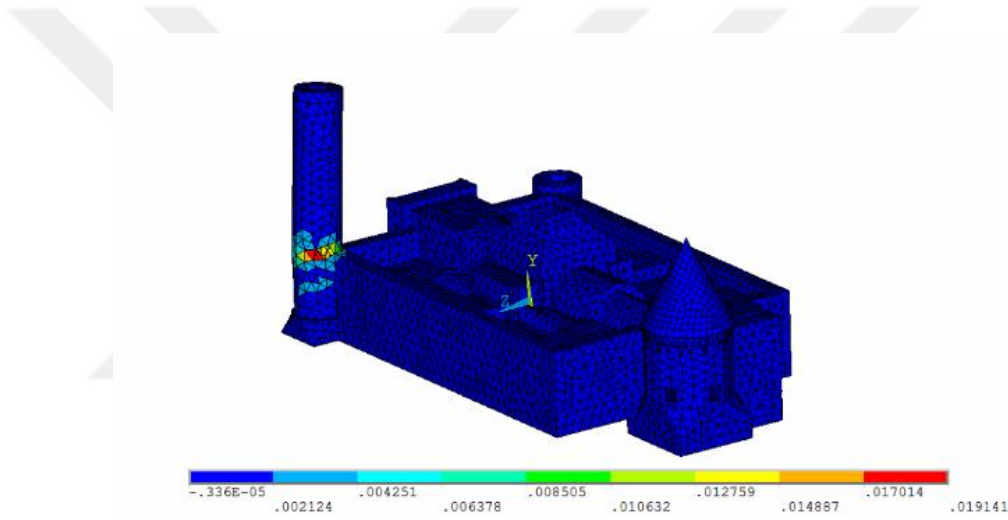


Şekil 4.28. Yakutiye Medresesi dinamik analiz sonucu elde edilen minare zarf eğrileri

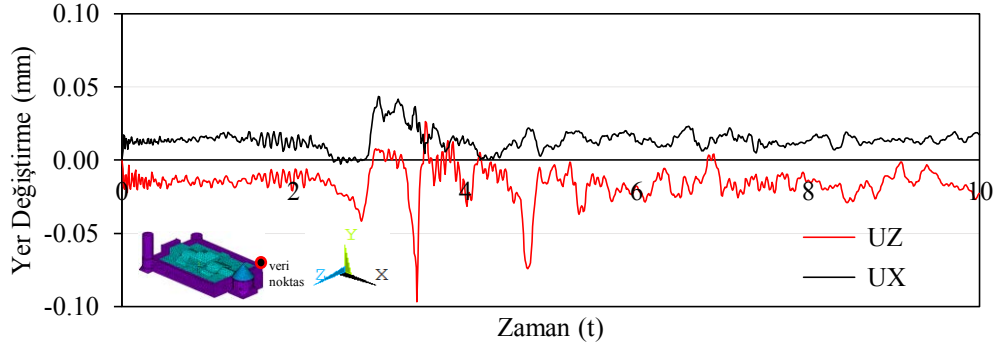
Dinamik analizin 2.89'uncu saniyesinde çekme gerilmeleri altında maksimum birim şekil değiştirme 0.019 olarak elde edilmektedir (Şekil 4.29). Minarenin duvar seviyesinde (mesnedinde) meydana gelen çatlak genişliğinin 30 - 40 mm arası olduğu hesaplanmıştır. Bu miktar yığma

yapılarda “ağır hasar, ciddi onarım ya da yeniden yapım gereklidir” şeklinde yorumlanmıştır (Bayülke 1999).

Şekil 4.30’de görüldüğü gibi yapının taşıyıcı duvarlarında yer değiştirmeler oldukça düşüktür. Yapının köşesinde duvarların rijit olarak birleştiği noktada hesaplanan yer değiştirme 0.1 mm seviyelerinde olmaktadır. Medrese yapısında avluyu örten boşluklu kubbenin üst noktasında yer değiştirme x-z doğrultusunda 0.4 mm seviyesinde hesaplanmıştır.



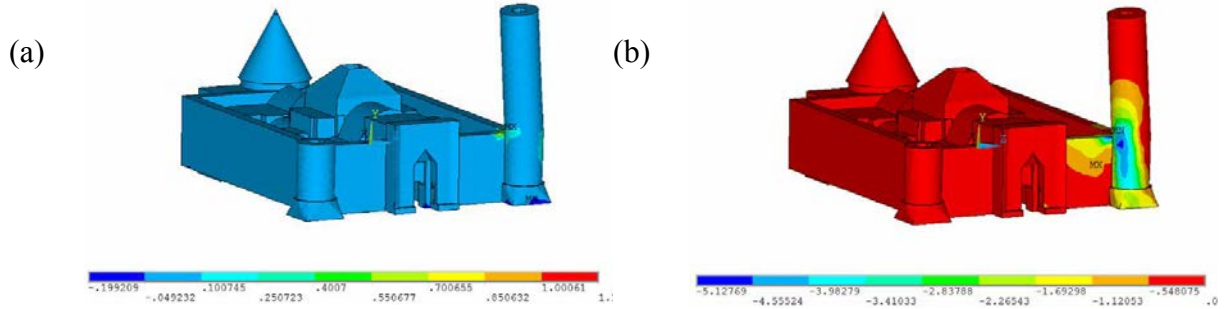
Şekil 4.29. Yakutiye Medresesi dinamik analiz sonucu elde edilen 2.89sn’de çekme gerilmeleri altında birim şekil değiştirme oranı değerleri



Şekil 4.30. Yakutiye Medresesi dinamik analiz sonucu duvarın kuzey doğu tepe noktasında elde edilen x ve z doğrultusu yer değiştirmeleri (mm)

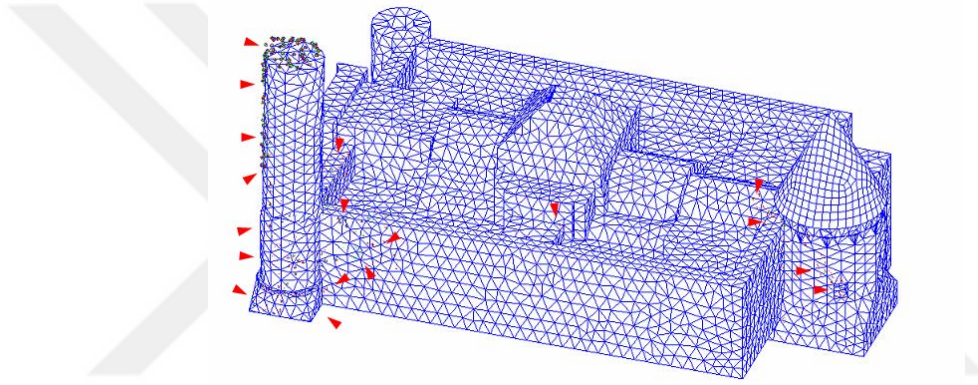
Analizden elde edilen çekme asal gerilmelerine (birinci asal gerilme) bakıldığı zaman çatlama alanlarının minarenin yapıyla birleştiği bölgede, minare ve iki yönlü duvarlarda, restorasyon sonrası yapıldığı düşünülen yanlış uygulanmış, yapının doğu kısmına kalan iki kapı boşluğunda ve yapının avlusunu kapatan yarım kubbelerin duvar birleşimlerinde yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Bu gerilmeler 2.86 sn'de maksimum 1.15 MPa değerine ulaşmaktadır (Şekil 4.31a).

Program çıktılarında üçüncü asal gerilmeler ise basınç gerilmesi olarak ortaya çıkmakta ve yapıda en büyük basınç değeri 2.86 sn'de minare gövdesinde 5.12 MPa olarak elde edilmektedir. Basınç gerilmeleri malzeme özelliklerinde kabul edilen değerlerden düşük olduğundan basınç ezilmesi meydana gelmemektedir. Taşıyıcı duvarlarda basınç gerilmeleri kritik değerlerin altında kalmaktadır (Şekil 4.31b).



Şekil 4.31. Yakutiye Medresesi dinamik analiz sonucu elde edilen 2.86 sn'de a: çekme gerilmeleri b:basınç gerilmeleri (MPa)

Şekil 4.32’de görüldüğü gibi, yapıda çatlaklar minarenin duvarlarla birleşim yerlerinde, minare tepe kısımlarında, yapının iç kısmında bulunan kemerlerde, duvarların mesnet bölgelerinde kümbetin yapıyla birleştiği batı duvarında, kümbetin pencere açıklıklarında, avluyu kapatan kemer çatı mesnetlerinde yoğunlaşmaktadır. Bu bölgelerde çatlaklar meydana gelmekle birlikte, çatlak genişlikleri (birim şekil değiştirme değerleri) çok küçük olduğu için yapının yük taşıma kapasitesine ve yanal rijitliğine olumsuz etkileri yok denilecek kadar azdır.

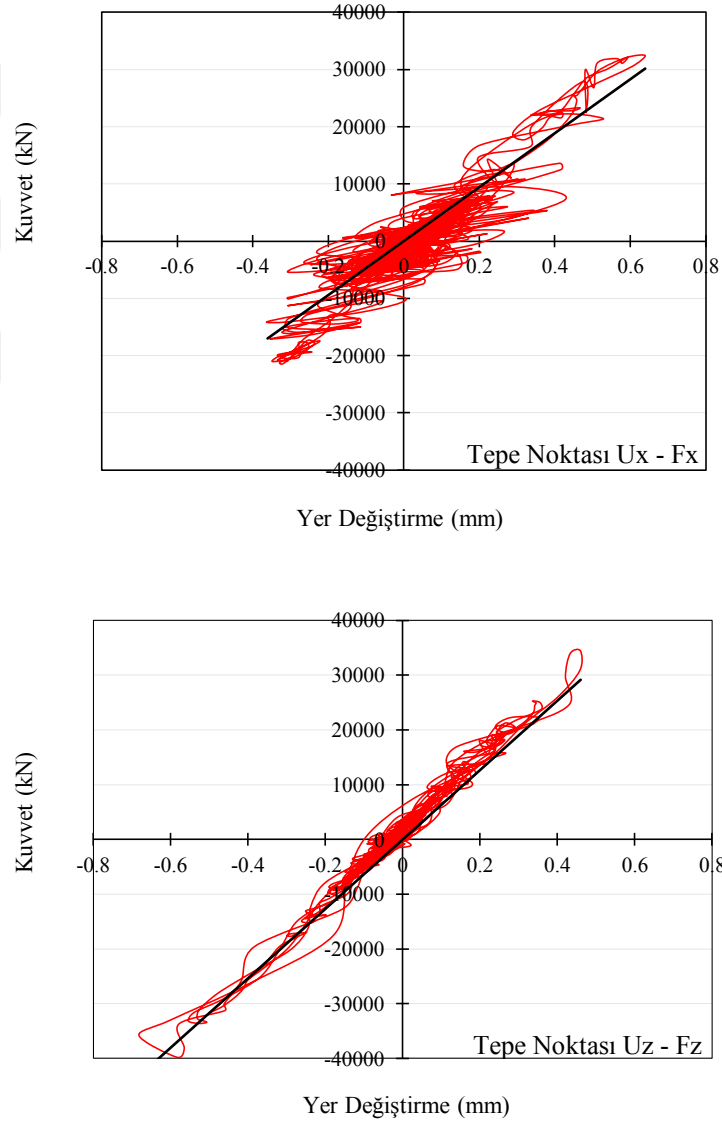


Şekil 4.32. Yakutiye Medresesi dinamik analiz sonucu elde edilen çatlak ve ezilmeler

Şekil 4.33’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki x ve z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi verilmektedir. Bu eğrilerde görüldüğü gibi yapı ana bloğu (minare hariç) bütün olarak elastik davranış sergilemekte ve yapıda oluşması öngörülen çatlaklar yapının davranışına etki etmemektedir.

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelikte (DBYBHY, 2007), Bölüm 5.4.4.’de verilen taşıyıcı duvarlarda toplam uzunluk sınırı hesaplaması yapıya uygulanmış ve l_d/A değeri x yönünde 0.18, z yönünde 0.17 bulunmuştur. Yönetmelikte yığma yapının depreme dayanıklı olması için bu oranın alt sınırı 0.2 olarak verilmiştir. Hesaplanan oranlar bu değere yakındır. Ancak yönetmelikte bu oran duvar kalınlığı asgari 50 cm alınarak önerilmektedir. Medrese yapısının duvar kalınlıkları ortalama olarak 1.3 m olması, yapının kuvvetli yer hareketi etkisi altında elastik davranması ve yer değiştirme taleplerinin düşük olmasını izah etmektedir. Bu

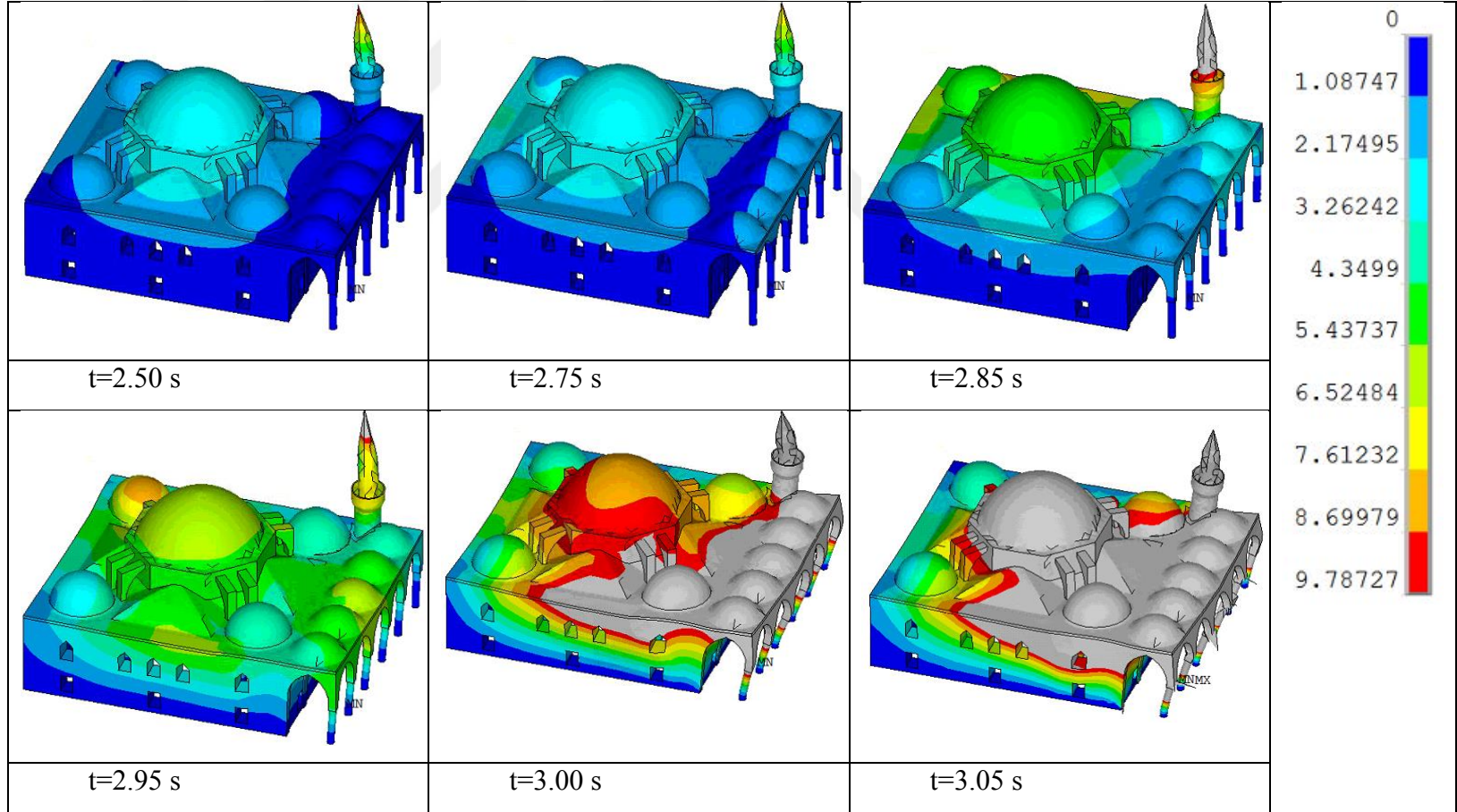
da yapının, yönetmelikte önerilen oranın çok daha emniyetli tarafında kaldığını ve duvar kalınlığının yapı rijitliğine etkisinin oldukça fazla olduğunu göstermektedir. Yapının x ve z yönlerinde duvar alanlarının yapının toplam alanına oranları sırasıyla %23 ve %22'dir. Bu oran yönetmelikte %10 olarak önerilmektedir. Yine bu değerler yapının az hasar görmesini açıklamaktadır.



Şekil 4.33. Yakutiye Medresesi dinamik analizden elde edilen tepe yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti grafikleri

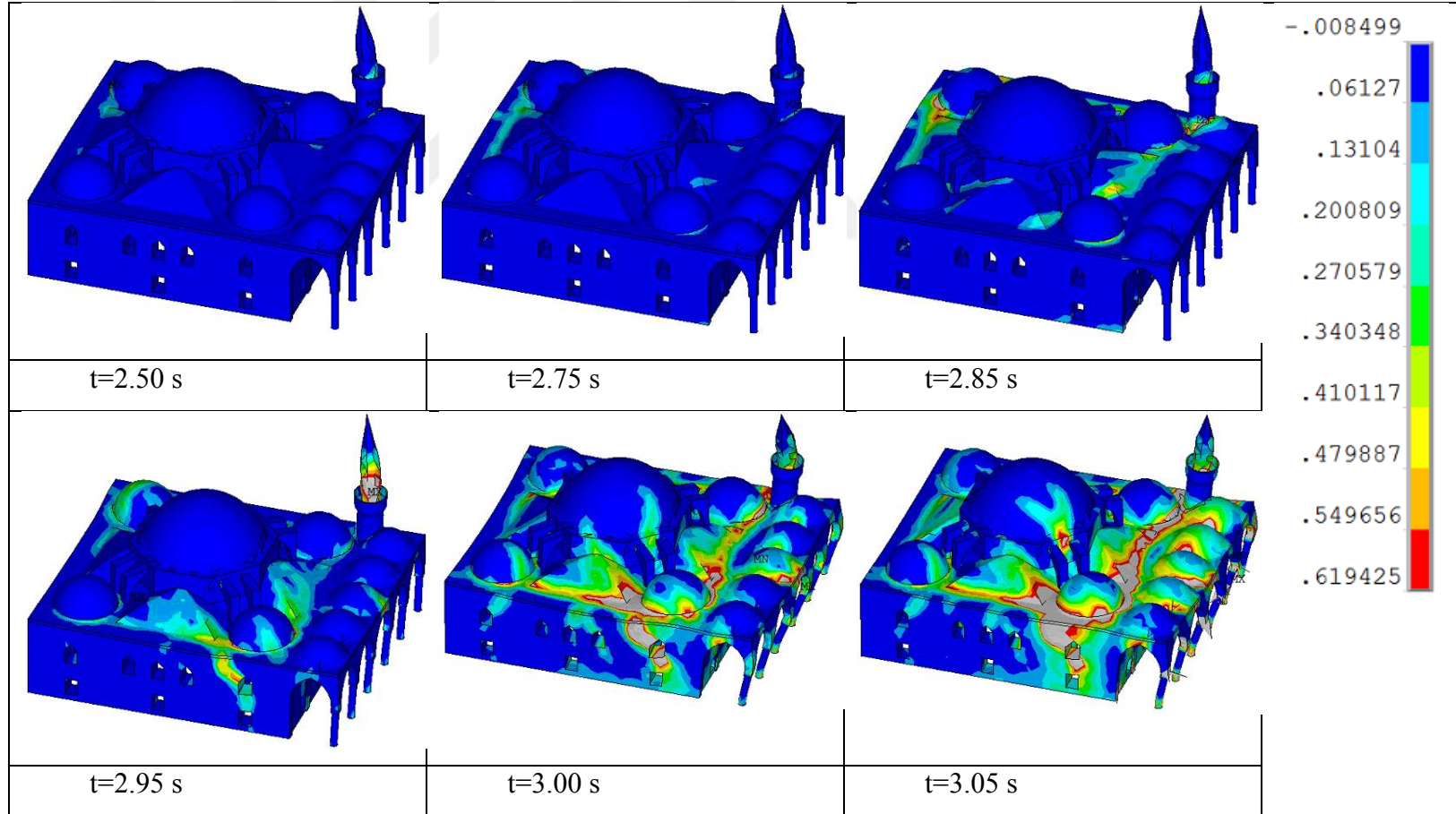
4.6.2. Lala Paşa Cami Dinamik Analizi

Dinamik analiz sonucunda yapıda oluşan yer değiştirmeler Şekil 4.34'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yapı da 2.50'inci saniyeye kadar yer değiştirmeler kabul edilebilir seviyededir. Ancak bu zaman diliminde minare tepesinde meydana gelen yer değiştirme miktarı oldukça fazladır. 2.75'inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. 2.85'inci saniyede, yapının minaresi aşırı yer değiştirmeye maruz kalmış ve ağır hasarlı duruma gelmiştir. Bu zaman diliminde, yapının merkez kubbesi de 40-70 mm aralığında yer değiştirmeye maruz kalmıştır. 2.95'inci saniyede yapının güney-batı kısmında bulunan küçük kubbede ciddi hasar çatlakları oluşmaya başlamaktadır. Bununla beraber yapının son cemaat yerindeki kemerler ve kubbeler de ciddi yer değiştirmeye maruz kalmaktadır. 3.00'üncü saniyede, yapının son cemaat yerinde aşırı yer değiştirmeden dolayı göçme meydana gelmekte, yapının ana kubbesinde ve yapının doğu kısmında pencere boşluklarına doğru ilerleyen geniş çatlaklar oluşmaktadır. 3.05'inci saniyede, yapının büyük kısmında yapısal hasar çatlakları oluşarak yapıda göçme meydana gelmektedir.



Şekil 4.34. Lala Paşa Cami dinamik analiz sırasında meydana gelen yer değiştirme

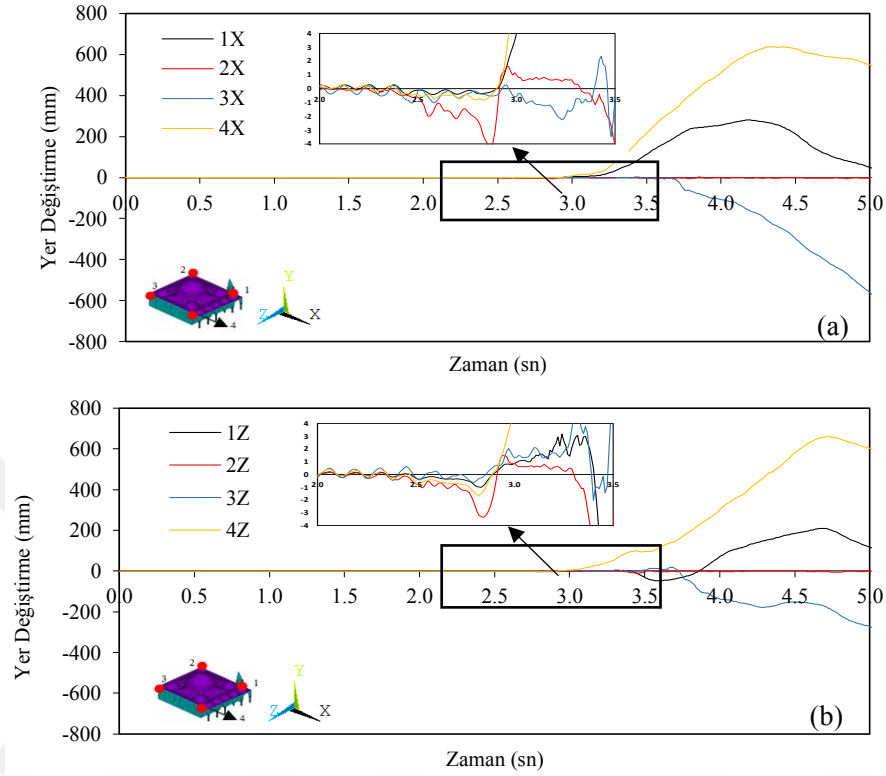
Dinamik analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirme oranları Şekil 4.35’da gösterilmiştir. Şekilde grldğ gibi yapıda 2.50’inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir ancak yapının kuzey-batısında bulunan küçük kubbe çevresinde ve minarenin Őerefe kısmında şekil değiştirmeler yoğunlaşmıştır. 2.75’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında yapı mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. 2.85’inci saniyede, yapının minaresi Őerefe ve duvar üst noktası seviyesinde aşırı şekil değiştirmeye maruz kaldığı için minarenin göçmesine sebep olacak çatlaklar meydana gelmiş ve minarenin göçme bölgesine geçtiği değerlendirilmiştir. Yine bu zaman diliminde yapı ile son cemaat yerinin mesnetlendiği bölgelerde şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı grlmektedir. 2.95’inci saniyede yapının doğu kısmında bulunan yarım kubbenin mesnet bölgesinden pencere boşluğuna doğru bir hat Şeklinde ilerleyen geniş hasar çatlakları meydana gelmiştir. 3.00’nc saniyede, yapının son cemaat yerinde büyük çatlaklardan dolayı göçme meydana gelmiş, doğu kısmında pencere boşluğuna doğru oluşan çatlak hattı, doğu taşıyıcı duvarının göçmesine sebep olmuştur. Yine bu zaman diliminde yapının hemen her yerinde önemli boyutlarda çatlaklar oluşmuştur. 3.05’inci saniyede, yapının ana kubbesinde, kk kubbelerinde, pencere boşluklarının çevrelerinde çatlaklar oluşmuş ve yapı kuzey-batı köşesi hariç tamamen göçmüştür.



Şekil 4.35. Lala Paşa Cami dinamik analiz sırasında meydana gelen birim şekil değiştirmeler

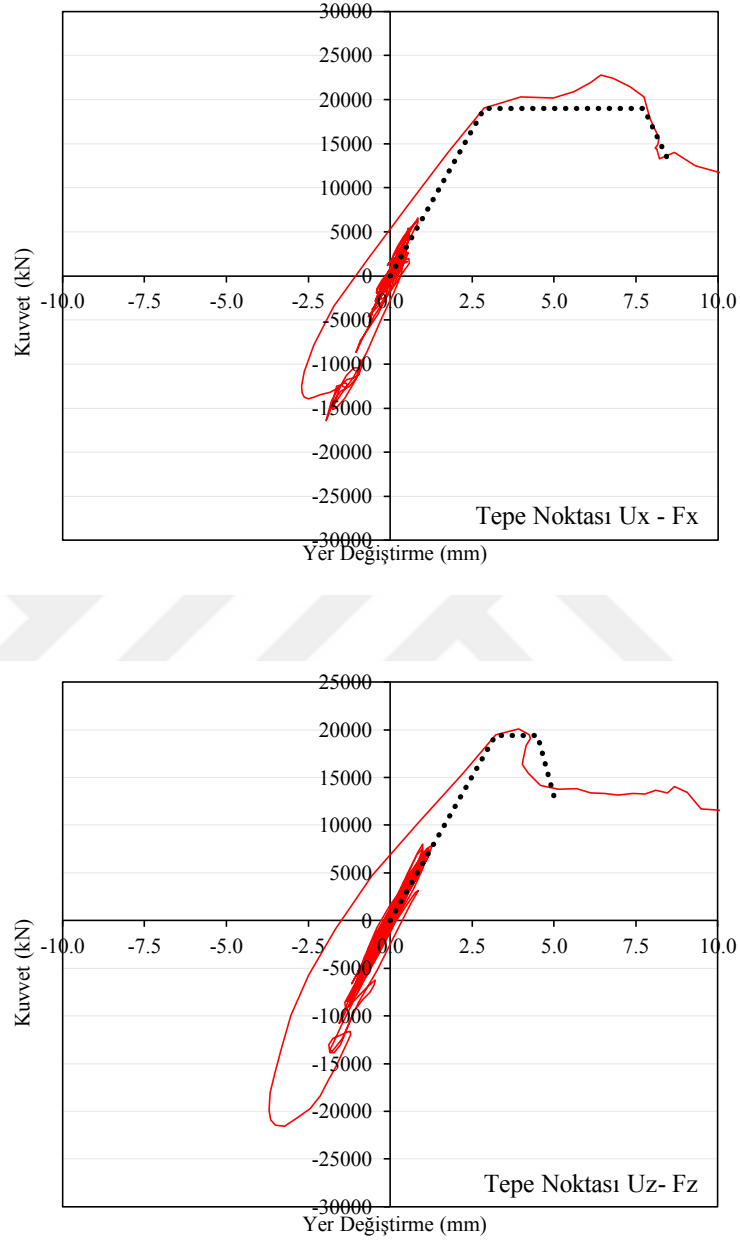
Şekil 4.36'de yapının ana kütesinin (son cemaat yeri hariç) üst köşelerinden zamana bağlı, x ve z yönlerindeki yer değiştirme grafikleri gösterilmiştir. Yapının güneybatı kısmı (2 nolu veri noktası) hariç diğer kısımlarda oluşan yer değiştirmeler, yapının dinamik yük nedeniyle göçtüğünü göstermektedir. 2 nolu veri noktasında göçme meydana gelmemesinin muhtemel sebebinin analizlerde kullanılan deprem bileşenlerinin uygulanış yönüyle alakalı olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.26a'da gösterilen iki yer ivmesi bileşenin etkin bileşkesi model üzerinde 2-4 diyagonali doğrultusunda (yani güneybatı-kuzeydoğu istikametinde) en büyük değerini almaktadır ve yaklaşık olarak 1.1 saniye periyotlu ve 6.1 m/s^2 genliğinde sinüsoidal bir atım şeklinde etkimektedir. Bu istikamette bu atım bağlı olarak hesaplanan en büyük yer yer hızı 1.95 m/s olmaktadır. Bu büyük depremlerde yakın sahada gözlemlenen, oldukça yüksek bir yer hızına tekabül etmektedir. Bu atım etkisinde 2 numaralı köşe önce basınç sonra çekme gerilmesine maruz kalırken, 4 numaralı köşede önce çekme sonra basınç gerilmeleri meydana gelmektedir. Çekme etkisinde oluşan çatlaklar sonucu 4 nolu köşeye birleşen duvarlarda rijitlik kaybı meydana gelmekte ve izleyen çevrimde basınç ve kesme kuvvetleri etkisiyle bu bölgede ağır hasar ortaya çıkmaktadır (Şekil 7.15, $t=2.95-3.00$ saniyeler).



Şekil 4.36. Lala Paşa Camii dinamik analizde yapının köşelerinde oluşan yer değiştirmeler (mm) (a):x doğrultusu; (b): z doğrultusu

Şekil 4.37’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki x ve z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil 4.37. Lala Paşa Cami dinamik analiz sonucu elde edilen taban kesme kuvveti – yer değiştirme eğrisi

DBYBHY (2007), Bölüm 5.4.4.'de, planda birbirine dik doğrultuların her biri boyunca uzanan taşıyıcı duvarların, pencere ve kapı boşlukları sayılmaksızın toplam uzunluğunun brüt kat alanına oranı (l_d/A) $0.2I \text{ m/m}^2$ 'den daha az olmayacaktır hükmüne istinaden, yapılan

hesaplamalarda l_d/A oranı x ve z yönlerinde 0.077 bulunmuştur. Hesaplanan oranlar 0.2 değerinden çok düşüktür. Yapının x ve z yönlerinde duvar alanlarının yapının toplam alanına oranları her iki yönde de %14'dir. Bu oran yönetmelikte %10 olarak önerilmektedir. Yapının duvar kalınlığının fazla olması yapının dinamik yükler karşısında davranışına katkı sağlamamıştır.



5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, tarihi camilerin ve medreselerin literatür ışığında önerilen malzeme mekanik özelliklerinin belirlenmesi yaklaşımını kullanarak en doğru sonlu eleman modelinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda tarihi Yakutiye Medresesi ve Lala Paşa Cami ele alınarak, deneysel ve teorik modal analizler belirlenmiştir.

İlk olarak yapılar yerinde incelenip SolidWorks yazılımı kullanılarak her iki yapının üç boyutlu katı modelleri oluşturulmuştur. Yapı üzerinde yapılan incelemeler neticesinde alınan malzeme basınç dayanımları ve duvar taş örgü örnekleri ışığında yapıların, yapı elemanı (duvar, fil ayağı vb.) basınç dayanımları ve elastisite modülleri belirlenmiştir. Elemanların malzeme özellikleri belirlenmiş üç boyutlu katı modeller ANSYS programına aktarılarak teorik modal analizler gerçekleştirilmiştir. Ele alınan yapıların deneysel modal analiz sonuçları Operasyonel Modal Analiz yöntemiyle belirlenmiştir. Deneysel yöntemde titreştirici olarak rüzgâr, taşıt trafiği, yaya trafiği vb. çevresel titreşimler kullanılmıştır. Yapıların bu etkilere gösterdikleri tepkileri elde etmek için e-QUAKE üç eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. İvmeölçerlerde toplanılan veriler daha sonra Artemis Modal Pro yazılımıyla işlenerek dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi için tavsiye edilen yöntemin uygunluğunu göstermek adına teorik ve deneysel modal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu değerler ışığında cami ve medrese türü yapılarda önerilen bu yöntemin kullanılabileceği görülmüştür. Yapıların gerçek davranışlarına oldukça yakın bir şekilde kestiriminde kullanılabileceği kanaat getirilen sonlu eleman modellerinde ANSYS yazılımı kullanılarak deprem analizleri yapılmıştır. Bu analizler neticesinde yapıların deprem davranışları belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında malzeme özelliklerinin belirlenmesi için önerilen yöntemin kullanılması, deneysel ve teorik olarak elde edilen dinamik karakteristiklerin karşılaştırılması ve yapıların deprem davranışlarının belirlenmesine dair aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

1. Yakutiye Medresesi'nin duvar, fil ayağı, kemerler ve kubbe basınç dayanımı, elastisite modülü sırasıyla 7.29 MPa, 7290 MPa, 13.45 MPa, 13450 MPa, 3 MPa, 3000 MPa olarak belirlenmiştir.

2. Lala Paşa Camisi'nin duvar, fil ayağı, kemerler ve kubbe basınç dayanımı, elastisite modülü sırasıyla 3.92 MPa, 3920 MPa, 5.63 MPa, 5630 MPa, 3 MPa, 3000 MPa olarak belirlenmiştir.

3. Yakutiye Medresesi'nin üzerinde gerçekleştirilen deneysel ve sonlu eleman modeli ile gerçekleştirilen hakim ilk altı yapı teorik frekans değerlerini 14-20 Hz arasında olduğu belirlenmiştir.

4. Lala Paşa Cami'nin üzerinde gerçekleştirilen deneysel ve sonlu eleman modeli ile gerçekleştirilen hakim ilk altı yapı teorik frekans değerlerini 8-14 Hz arasında olduğu belirlenmiştir.

5. Yapıların deneysel ve teorik mod şekilleri karşılaştırıldıklarında oldukça iyi bir uyum olduğu gözlemlenmiştir.

6. Her iki yapının da deneysel ve teorik frekans değerleri karşılaştırıldığında aralarındaki en büyük farkın % 8.5, en küçük farkın % 0.1 olduğu belirlenmiştir.

7. Yakutiye Medresesi'nin deprem analizinde yapının oldukça rijit olduğu ancak analizlerde dikkate alınan 1992 Erzincan depremine benzer bir depremde minarenin ciddi hasar alabileceği hatta yıkılabileceği öngörülmüştür.

8. Lala Paşa Camisi'nin deprem analizlerinde yapının analizlerde dikkate alınan 1992 Erzincan depremine benzer bir depremde ciddi hasar alabileceği öngörülmüştür. Muhtemel yıkılma hikayesi anlatılmıştır.

Bu tez çalışması sonucunda araştırmacılara tarihi yapıların güvenli sonlu eleman modelinin oluşturulması adına bazı önerilerde bulunulmuştur.

1. Araştırmacılar üç yapraklı yığıma duvarların deneysel ve teorik çalışmalara daha çok önem vermeli ve bu çalışmaların sayısını artırmalıdır.

2. Schmith sertlik ölçümü ve önerilen teorik denklemler tarihi yapıların malzeme özelliklerinin belirlenmesine güvenle kullanıldığını belirlemek amacıyla daha çok çalışma yapılmalıdır.

3. Tarihi yapıların güvenli sonlu eleman modellerinin belirlenmesi için deneysel modal analize alternatif yaklaşımların geliştirilmesi gerekmektedir. Buna yönelik çalışmaların artırılması gerekmektedir.

4. Tarihi yapıların sismik davranışlarının belirlenmesi için yapılan deprem analizlerinde 1992 Erzincan deprem kaydı gibi güvenilir koşullarda elde edilmiş deprem kayıtlarının kullanılması önerilmektedir.

Bu çalışmada tarihi camilerin ve medreselerin malzeme özelliklerinin belirlenmesi için önerilen yöntemin sonlu eleman modellerinde güvenle kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- Akan, A. ve Özen, Ö., 2005. Bursa Yeşil Türbenin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Deprem Analizi. Deprem Sempozyumu, Kocaeli, 758-762.
- Aköz, F., 2005. Yığma Yapılarda Hasar Tespiti. Yığma Yapılarda Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı. Ankara.
- ANSYS, Finite Element Analysis Program, 2015.
- Anthoine, A., 1997. Homogenization of Periodic Masonry: Plane Stress. Generalized Plane Strain or 3d Modeling, International Journal of Solids and Structures.
- Aras, F., 2007. Earthquake Protection of Beylerbeyi Palace by Reversible Mixed Technologies, Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Arioğlu, E., 1999. Küfeki Taşının Dayanıklılık Analizi. Yapı Dergisi, 109-113.
- Artar, M., 2002. Structural Identification of the Sehzade Mehmed Mosque Through Static and Dynamic Analyses, Bitirme Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Artemis Modal Pro, 2016.
- Atamtürktür, S., Asce, M. ve Sevim, B., 2012. Seismic Performance Assessment of Masonry Tile Domes through Nonlinear Finite-Element Analysis. Journal of Performance of Constructed Facilities, 26-4, 410-423.
- Aydın, E.Ö., Fahjan, Y.M., Çömlekçioğlu, R., 2007. Deprem Bölgelerindeki Tarihi Kâgir Yapıların Güçlendirilmesinde Kullanılan Yeni Teknikler, International Earthquake Symposium, Kocaeli.
- Bayraktar, A., 2006. Tarihi Yapıların Analitik İncelenmesi ve Sismik Güçlendirme Metodları. Beta Basım, İstanbul.
- Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Türker, T., Sevim, B. ve Ateş, Ş., 2007. Karayolu Köprülerinin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi. 1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu, Antalya, 355-364.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T. ve Domaniç, K. A., 2008. Köprülerin Dinamik Karakteristiklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Yapı Dünyası, 150, 44-57.

- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Türker, T. ve Sevim, B., 2007. Tarihi Yığma Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-1, Ankara, 429-440.
- Bayülke, N. 1995. Depremde Hasar Gören Yapıların Onarımı ve Güçlendirilmesi. TMMOB İzmir: İnşaat Mühendisleri Odası.
- Bayülke, N. 1999. Yapıların Onarımı ve Güçlendirilmesi. İnşaat Mühendisliği Odası İzmir Şubesi, 15.
- Bayülke, N., 1992. Yığma Yapılar, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı- Afet İşleri Genel Müdürlüğü. Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Bendat, J.S. ve Piersol, A.G., 1986. Random data: analysis and measurement procedures. John Wiley & Sons.
- Beyen, K., 2007. Structural Identification for Post-earthquake Safety Analysis of the Fatih Mosque After the 17 August 1999 Kocaeli Earthquake. Journal of engineering structures, 30-8, 2165-2184.
- Binda, L., Pina-Henriques, J., Anzani, A., Fontana, A., Lourenco, P.B., 2006. A contribution for the understanding of load-transfer mechanisms in multi-leaf masonry walls: Testing and modelling. Engineering Structure, 28-8, 1132-1148.
- Bozal M., 2015. Erzurum Lala Paşa Cami Rölöve Restorasyon Restitüsyon Projesi, Envar Mimarlık, Ankara.
- Brincker, R., Zhang, L. ve Andersen P., 2000. Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition. Proceedings 18th International Modal Analysis, Texas, USA, 625-630.
- Cakir, F., Seker, B. S., Durmus, A., Dogangun, A., Uysal H., 2015. Seismic Assesment of a Historical Masonry Mosque by Experimental Tests and Finite element Analyses. KSCE Journal of Civil Engineering, 19(1), 158-164.
- Casarin, F. ve Modena, C., 2006. Structural Assessment and Seismic Vulnerability Analysis of the Reggio Emilia Cathedral. 7 th. International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi, 1263-1270.

- Chiara, C., 2006. Non Linear Modelling of the Elliptical Dome of Vicoforte. 7 th. International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi, 1177-1186.
- Chopra, A.K., 1995. Dynamics of Structures, Prentice Hall International, Inc., Toronto.
- Çakmak, A., Moropoulou A., ve Mullen C., 1995. Interdisciplinary Study of Dynamic Behaviour and Earthquake Response of Hagia Sophia. Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 14-2, 125-133.
- Çam N. 1998. Erzurum'da Yakutiye Medresesi İle İlgili Bazı Mülahazalar. Vakıflar Dergisi, XX, 289-310.
- Çamlıbel, N., 1998. Sinan Mimarlığında Yapı Strüktürünün Analitik İncelenmesi. Doçentlik Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çamlıbel, N., 2000a. Yapıların Taşıma Gücünün İyileştirilmesi. İstanbul.
- Çamlıbel, N., 2000b. Geleneksel Yapılarda Stabilitenin İyileştirilmesi ve Temellerin Takviyesi. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Demir C. ve Ilki A., 2014. Characterization of materials used in the multi-leaf masonry walls of monumental structures in İstanbul, Turkey. Construction and Building Materials, 64, 398-413.
- Durukal, E., Cimilli S. ve Erdik, M., 2003. Dynamic Response of Two Historical Monuments in İstanbul Deduced from the Recordings of Kocaeli and Düzce Earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, 93-2, 694-712.
- Erzurum Çevre Durum Raporu, Erzurum Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 2011.
- Eurocode 6: Design of masonry structures, 1995. Part 1.1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. European Committee for Standardization, ENV 1996-1-1:1995.
- Fahjan, Y. ve Keypour, H., 2006. Effects of Dome System on the Seismic Behaviour of Ottomans Historical Structures. 7 th. International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi, 1-8.
- Gülkan, P. ve Sucuoğlu, H. 1988. Kırsal Yapılarda Deprem Hasarlarının Tayini. Ankara, Deprem Araştırma Bülteni, 62, 5-44.

- Gündoğdu H., 2011. Erzurum: History and civilization. Writers Union of Turkey, Erzurum 2011 Series -1, Ankara-Turkey.
- Hendry, A.W., Sinha B.P. ve Davies, S.R., 2004. Design of Masonry Structures. Department of Civil Engineering University of Edinburgh, UK.
- Jafarov, O., Köksal, H., O., Doran, B. ve Karakoç, C., 2012. An Investigation On The Nonlinear Behavior Of Unreinforced Masonry Walls. Journal of Engineering and Natural Sciences, 133-143.
- Kanıt R. ve Işık, N S., 2004. Horosan Harcı Kullanılarak Yapılan Model Kemerin Performansının Deneysel Ve Sayısal Olarak Belirlenmesi. Politeknik Dergisi, 7-2, 179-183.
- Kanıt, R. ve Işık, N., 2005. Düzlem Dışı Yüklenen Yığma Yapıların Deneysel Davranışı. Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı, Şubat, Ankara.
- Karaesmen, E. 1996. Deprem ve Sonrası. Türkiye Mütcaahhitler Birliği, Ankara.
- Karimi A.H., Karimi M.S., Kheyroddin A., Shahkarami A.A., 2016. Experimental and Numerical Study on Seismic Behavior of An Infilled Masonry Wall Compared to An Arched Masonry Wall. Structures, 8, 144-153.
- Kavalı, E., Şeker, B. Ş., Çakır, F., Uysal, H., 2015. Erzurum Yakutiye Medresesi'nin Yapısal Performansının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Belirlenmesi. 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Aktarılması Sempozyumu, 1, 329-340.
- Konyalı I.H., 1960. History of Erzurum with monuments and inscription. Ercan Matbaası, Istanbul, Turkey.
- Köseoğlu, G.C., Canbay, E., 2015. Assessment and Rehabilitaion of Damaged Historical Cenabı Ahmet Pasha Mosque. Engineering Failure Analysis, 57, 389-398.
- Kuran A. 1969. Anadolu Medreseleri. C I, Ankara.
- Lourenco, P., 2001. Analysis of Historical Constructions: From thrust-lines to advanced simulations. Proceedings of the 3rd International Seminar, Guimarães, Portugal, 6, 91-114.
- Lourenco, P., 2005. Seismic Analysis of a Heritage Building Compound in the Old Town of Lisbon. Conference on 250 th Anniversary of Lisbon Earthquake, Portugal, 362-368.
- Lourenco, P. B., 1996. Computational Strategies for Masonry Structures. Delft University of Technology, the Netherlands, PhD Thesis.

- Massart, T.J., Peerlings, R.H.J., Geers, M.G.D. ve Gottcheiner, S., 2005. Mesoscopic Modeling of Failure in Brick Masonry Accounting for Threedimensional Effects. *Journal of Engineering Fracture Mechanics*, 72, 1238-1253.
- Mele, E. ve Giordano, A., 2003. Modelling and Analysis of A Basilica under Earthquake Loading. *Journal of Cultural Heritage*, 4-4, 355-367.
- Meraki, Ş., Yılmaz, M.E., Arslan, D.Y., Songur, S., Üstünel, C., 2010. Yakutiye Medresesi Rölöve Projesi. A Proje, Ankara.
- Mustafaraj, E. ve Yardım, Y., 2012. Conditional Assessment of Historical Structures: Earthquake Performance os Naziresha Mosque. *International Students' Conference of Civil Engineering*, Tirana-Albania.
- Oliveira, C.S., 2003. Seismic Vulnerability of Historical Constructions: A Contribution. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1,1, 37-82.
- Oliviera, D.V., 2003. Experimental and Numerical Analysis of Blocky Masonry Structures under Cyclic Loading. PhD Dissertation, Minho University, Portugal.
- Overschee P.V. ve Moor B.D., 1996. Subspace identification for linear systems: theory, implementation and applications. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Peeters, B. ve De Roeck, G., 2000. Reference Based Stochastic Subspace Identification in Civil Engineering. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 8-1, 47-74.
- Peeters, B., 2000. System Identification and Damage Detection in Civil Engineering. PhD Thesis, Katholieke University, Leuven, Belgium.
- Qaisar, A. ve Akhtar, N., 2007. Seismic Resistance Evaluation of Unreinforced Masonry Buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 11,2 ,133-146.
- Ramos, J.L.F., 2007. Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures. PhD Dissertation, Minho University, Portugal, 2007.
- Romano, A., 2006. Modelling, Analysis and Testing of Masonry Structures. PhD Dissertation, The University of Naples Federico II, Italy.
- Sesigür, H., Çelik, O.C., Çılı, F., 2007. Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Bileşenler, Hasar Biçimleri, Onarım ve Güçlendirme. *İMO İstanbul Bülten*, 89, 10-21.
- SolidWorks, Modeling Software, 2013.

- Şeker, B. Ş., Doğangün, A., Çakır, F., 2013. Merzifonlu Kara Mustafa Paşa Cami Taşıyıcı Sistemi Üzerine İrdeleme. *SDU International Technologic Science*, 5-1, 112-120.
- Testlab Network, 2010. Teknik Destek Grubu. Ankara.
- T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, 2007.
- Tomazevic, M., 1999. *Earthquake Resistant Design of Masonry Buildings*. Singapore: Imperial College Press, 268.
- Tsoutrelis, C.E. ve Exadaktylos, G.E. 1993. Effect of rock discontinuities on certain rock strength and fracture energy parameters under uniaxial compression. *Geotech Geol Eng*, 11(2), 81–105.
- Türker, T. 2011. Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Hasar Durumlarının Tespiti Ve Değerlendirilmesi. KTU Fen Bilim Enstitüsü, Trabzon.
- URL 1: T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı. Sayısal Veriler, [<http://kyh.deprem.gov.tr/ftpt.htm>], Erişim Tarihi: 30.01.2013.
- Ünay A., 2002. Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı, ODTÜ Mimarlık Fakültesi.
- Üstündağ, C. 2000. İki Katlı Yığma Binaların Yatay Yükler Altındaki Davranışı ve Kesme Güvenliliğinin Sağlanması. İstanbul: İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Vasconcelos G. and Lourenço P.B., 2006. Assessment of the in-plane shear strength of stone masonry walls by simplified models. *Structural Analysis of Historical Constructions*, New Delhi.
- Yenişehirlioğlu, F. ve Madran, E., 1989. Mimar Sinan Yapıları. Türk Tarih Kurumu Basım Evi, Ankara.
- Zucchini A. ve Lourenço P.B., 2002. A Micro-Mechanical Model for the Homogenisation of Masonry. *International Journal of Solids and Structures*, 39-12, 3233-3255.
- Zucchini, A. ve Lourenço, P.B., 2006. Homogenization of Masonry Using A Micromechanical Model: Compressive Behaviour. III European Conference on Computational Mechanics Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering, June, Lisbon, Portugal.

ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında Erzurum’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitim hayatını Erzurum’da tamamladı. 2014 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünü onur öğrencisi olarak başarıyla bitirdi. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi’nde Yüksek Lisans eğitime başladı. Yüksek Lisans Eğitimi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında tamamladı.

