

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TARİHİ YIĞMA YAPILARDA DENEYSEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİYLE
DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİN BELİRLENMESİ, SONLU ELEMAN MODEL
İYİLEŞTİRMESİ VE HASAR TESPİTİ**

DOKTORA TEZİ

Ali Fuat GENÇ

**MART 2023
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TARİHİ YIĞMA YAPILARDA DENEYSEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİYLE
DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİN BELİRLENMESİ, SONLU ELEMAN MODEL
İYİLEŞTİRMESİ VE HASAR TESPİTİ**

Ali Fuat GENÇ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 / 02 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 21 / 03 / 2023

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK
ORCID : - - -

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

“Tarihi Yığma Yapılarda Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi, Sonlu Eleman Model İyileştirmesi ve Hasar Tespiti” başlıklı bu tez çalışması; Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu tez çalışmasını bana öneren ve çalışma süresince her adımda benimle yakından ilgilenen, bilgilerini, maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen değerli Hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Değerli vakitlerini harcayıp tez çalışmamı inceleyerek bilgi ve tavsiyelerini benimle paylaşan, başta tez izleme komitesi üyeleri Sayın Hocalarım Prof. Dr. Süleyman ADANUR ve Doç. Dr. Murat TUTKUN’a ayrı ayrı teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Murat GÜNAYDIN’a, Arş. Gör. Fezayıl SUNCA’ya, Arş. Gör. Ali KAYA’ya, Arş. Gör. Fatih Yesevi OKUR’a, Arş. Gör. Olguhan Şevket KARAHASAN’a, Arş. Gör. Yunus Emrahan AKBULUT’a, Arş. Gör. Zafer YILMAZ’a, İnş. Yük. Müh. Ebru KALKAN OKUR’a, İnş. Yük. Müh. Mustafa YILMAZ’a, İnş. Müh. Alghıhan KARAHASAN’a, İnş. Müh. Ali SARIKOÇ’a, İnş. Müh. Muhammed Cihat ŞAHİN’e, İnş. Müh. Yasin GÜRPINAR’a, Dynamic Academy’nin diğer üyelerine ve desteklerini her zaman hissettiğim KTÜ, İnşaat Mühendisliği’nin kıymetli hocalarına kalpten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen babam Mahmut Yılmaz GENÇ’e, annem Leyla GENÇ’e ve kardeşlerime müteşekkirdiğimi belirtirim. Özellikle tez çalışması sürecinde göstermiş olduğu sabır ve anlayışından dolayı eşim Sevede Nur GENÇ’e ve oğlum Mehmet Bayezid GENÇ’e sonsuz minnet duygularımı ifade eder, bu çalışmanın ülkemize faydalı olmasını dilerim.

Ali Fuat GENÇ

Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Tarihi Yığma Yapılarda Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi, Sonlu Eleman Model İyileştirmesi ve Hasar Tespiti” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 21/03/2023

Ali Fuat GENÇ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	X
SUMMARY	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
TABLolar DİZİNİ.....	XVIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XXI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar	3
1.1.1. Titreşime Dayalı Yapı Sağlığı İzleme ve Hasar Tespiti ile İlgili Çalışmalar... 4	
1.1.2. Sarsma Masası Deneyleri ile İlgili Çalışmalar	16
1.2. Tezin Amacı	19
1.3. Tarihi Yığma Yapılar	20
1.3.1. Tarihi Yığma Yapılarda Kullanılan Malzemeler	20
1.3.1.1. Doğal Taş Malzeme	20
1.3.1.2. Tuğla Malzeme.....	21
1.3.1.3. Harç Malzeme	22
1.3.1.4. Yığma (Kâgir) Malzeme	23
1.3.1.5. Ahşap Malzeme.....	25
1.3.1.6. Metal Bağlantı Elemanları	26
1.3.2. Tarihi Yığma Yapıları Oluşturan Taşıyıcı Sistemler	26
1.3.2.1. Temeller	27
1.3.2.2. Duvarlar ve Payandalar	28
1.3.2.3. Sütunlar ve Ayaklar.....	30
1.3.2.4. Kemerler.....	31
1.3.2.5. TonoZlar	32
1.3.2.6. Kubbeler	33
1.3.2.7. Döşemeler.....	35
1.3.3. Tarihi Yığma Yapılarda Görülen Hasar Türleri	37

1.3.3.1.	Zeminden Kaynaklanan Hasarlar	37
1.3.3.2.	Taşıyıcı Sistem Tasarımındaki Hatalar	38
1.3.3.3.	Hatalı Malzeme Kullanımı	39
1.3.3.4.	Kötü İşçilik.....	39
1.3.3.5.	Doğal Etkenler.....	39
1.3.3.6.	İnsanların Neden Olduğu Hasarlar	41
1.3.3.7.	Hava Kirliliği ve Trafik.....	42
1.3.4.	Tarihi Yığma Yapılarda Uygulanan Restorasyon Teknikleri	43
1.3.4.1.	Sağlamlaştırma	45
1.3.4.2.	Güçlendirme	46
1.3.4.2.1.	Zemin-Temel Güçlendirmesi	46
1.3.4.2.1.1.	Temelin Geniştirilmesi	46
1.3.4.2.1.2.	Kazık Uygulamaları	47
1.3.4.2.1.3.	Zemin İyileştirmesi	47
1.3.4.2.1.4.	Zemindeki Suyun Tahliyesi	49
1.3.4.2.2.	Taşıyıcı Sistemin Güçlendirilmesi	49
1.3.4.2.2.1.	Kısmi Onarım.....	49
1.3.4.2.2.2.	Enjeksiyon.....	51
1.3.4.2.2.3.	Donatı Takviyesi	51
1.3.4.2.2.4.	Gergi, Öngerme, Çemberleme ve Hatıllar	52
1.3.4.2.2.5.	Kesit Geniştirme-Mantolama.....	55
1.3.4.2.2.6.	Destekleme – Payandalama.....	55
1.3.4.2.2.7.	Döşemelerin Güçlendirilmesi.....	56
1.3.4.2.2.8.	Ahşap Çatıların Güçlendirilmesi.....	57
1.3.4.2.2.9.	Güçlendirmede Modern Malzeme Kullanımı	58
1.3.4.3.	Bütünleme	59
1.3.4.4.	Yenileme	59
1.3.4.5.	Yeniden Yapım	60
1.3.4.6.	Temizleme	61
1.3.4.7.	Taşıma	61
1.3.4.8.	Çağdaş Ek.....	62
1.3.5.	Tarihi Yığma Yapılarda Hasar Tespiti	63
1.3.5.1.	Yapının Geçmişi ile İlgili Belgelerin Toplanması	63
1.3.5.2.	Yerinde Gözlem ve İnceleme Yapılması, Rölöve, Restitüsyon Çalışmalarının ve Restorasyon Projelerinin Oluşturulması	63

1.3.5.3.	Depremsellik ve Zemin İncelemesi.....	64
1.3.5.4.	Yerinde Uygulanan Deneyler.....	65
1.3.5.4.1.	Tahribatsız Yöntemler.....	65
1.3.5.4.2.	Az Tahribatlı Yöntemler	67
1.3.5.5.	Laboratuvar Ortamında Yapılan Deneyler	69
1.3.5.6.	Deneysel Modal Analiz Yöntemi Yardımıyla Hasar Tespiti	70
1.3.5.6.1.	Deneysel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Ekipman ve Sistemler	70
1.3.5.6.1.1.	Titreştiriciler ve Sarsıcılar	70
1.3.5.6.1.2.	İvmeölçerler	71
1.3.5.6.1.3.	Veri Toplama Sistemi ve Sinyal İşleme	72
1.3.5.6.2.	Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile İlgili Genel Esaslar	74
1.3.5.6.3.	Çevresel Titreşim Yöntemi	75
1.3.5.6.3.1.	Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) Yöntemi.....	76
1.3.5.6.3.2.	Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi	76
1.3.5.6.4.	Çevresel Titreşim Testlerine Dayalı Hasar Tespit Yöntemleri	77
1.3.5.6.4.1.	Doğal Frekanslara Dayalı Hasar Tespiti	78
1.3.5.6.4.2.	Modal Güvence Kriteri.....	79
1.3.5.6.4.3.	Koordinat Modal Güvence Kriteri	79
1.3.6.	Tarihi Yığma Yapıların Sayısal Olarak Modellenmesi.....	80
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR	83
2.1.	Mevcut Tarihi Yapılar Üzerinde Gerçekleştirilen Çalışmalar	83
2.1.1.	Cephanelik Binası	83
2.1.2.1.	Çevresel Titreşim Testleri	84
2.1.2.2.	Sonlu Eleman Modeli.....	88
2.1.1.3.	Sonlu Eleman Model İyileştirmesi.....	92
2.1.2.	Çorum Saat Kulesi	96
2.1.2.1.	Çevresel Titreşim Testleri	96
2.1.2.2.	Sonlu Eleman Modeli.....	98
2.1.2.3.	Sonlu Eleman Model İyileştirmesi.....	102
2.1.3.	Yavuz Selim Okul Binası.....	104
2.1.3.1.	Çevresel Titreşim Testleri	105
2.1.3.2.	Ultrasonik Dalga Hızı Testleri	107
2.1.3.3.	Sonlu Eleman Modeli.....	110
2.1.3.4.	Sonlu Eleman Model İyileştirmesi.....	115

2.1.4.	İskenderpaşa Cami	118
2.1.4.1.	Cami Yapısı.....	120
2.1.4.1.1.	Çevresel Titreşim Testleri	120
2.1.4.1.2.	Sonlu Eleman Modeli.....	122
2.1.4.1.3.	Sonlu Eleman Model İyileştirmesi.....	125
2.1.4.2.	Minare Yapısı.....	126
2.1.4.2.1.	Çevresel Titreşim Testleri	126
2.1.4.2.2.	Sonlu Eleman Modeli.....	128
2.1.4.2.3.	Sonlu Eleman Model İyileştirmesi	130
2.1.5.	Santa Maria Kilisesi	131
2.1.5.1.	Kilise Binası	132
2.1.5.1.1.	Çevresel Titreşim Testleri	132
2.1.5.1.2.	Sonlu Eleman Modeli.....	135
2.1.5.1.3.	Sonlu Eleman Model İyileştirmesi.....	138
2.1.5.2.	Misafirhane Binası	139
2.1.5.2.1.	Çevresel Titreşim Testleri	139
2.1.5.2.2.	Sonlu Eleman Modeli.....	141
2.1.5.2.3.	Sonlu Eleman Model İyileştirmesi.....	144
2.1.6.	Yeniköy Köprüsü	145
2.1.6.1.	Çevresel Titreşim Testleri	146
2.1.6.2.	Sonlu Eleman Modeli.....	148
2.1.6.3.	Sonlu Eleman Model İyileştirmesi.....	150
2.2.	Ölçekli Kemer Köprü Modeli Üzerinde Gerçekleştirilen Çalışmalar	152
2.2.1.	Kemer Köprü Modeli	152
2.2.1.1.	Köprü Geometrik Özellikleri	152
2.2.1.2.	Köprü İnşasında Kullanılan Malzemeler ve Malzeme Özellikleri.....	154
2.2.1.2.1.	Harç Karışımları ve Malzeme Özellikleri	154
2.2.1.2.2.	Taş Malzeme Özellikleri	157
2.2.1.2.3.	Betonarme Malzeme Özellikleri	157
2.2.1.3.	Kemer Köprü'nün İnşa Aşamaları.....	158
2.2.2.	Köprü'nün Hasarsız Dinamik Karakteristiklerinin Elde Edilmesi	165
2.2.3.	Köprüde Meydana Gelebilecek Hasar Etkilerinin İncelenmesi	169
2.2.3.1.	Kemer Köprü Modelinin Mesnet Çökmesi Durumlarının İncelenmesi	170
2.2.3.2.	Köprü Ayağında Malzeme Boşalması Hasar Durumu	179

2.2.3.3.	Deprem Hasarı.....	185
3.	İRDELEMELER	198
3.1.	Mevcut Tarihi Yapılar Üzerinde Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	198
3.2.	Kemer Köprü Modeli Üzerinde Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	199
3.2.1.	Frekansların Değişimine Dayalı Hasar Tespiti	199
3.2.2.	Mod Şekillerinin Değişimine Dayalı Hasar Tespiti	201
3.2.3.	Sönüm Oranlarının Değişimine Dayalı Hasar Tespiti.....	205
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	208
4.	KAYNAKLAR.....	214
ÖZGEÇMİŞ		



Doktora Tezi

ÖZET

TARİHİ YIĞMA YAPILARDA DENEYSEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİYLE
DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİN BELİRLENMESİ, SONLU ELEMAN MODEL
İYİLEŞTİRMESİ VE HASAR TESPİTİ

Ali Fuat GENÇ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNİŞİK
2023, 237 Sayfa

Bu tez kapsamında tarihi yığma yapıların deneysel dinamik özelliklerinin belirlenmesi, sonlu eleman modellerinin oluşturulması, sonlu eleman model güncelleme ve hasar tespit çalışmalarının yapılması amaçlanmıştır. Çalışma; mevcut yapılar üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar (I) ve laboratuvar modeli üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar (II) olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Mevcut tarihi yapılardan Cephanelik Binası (Trabzon), Çorum Saat Kulesi, Yavuz Selim Okul Binası (Trabzon), İskenderpaşa Camii ve Minaresi (Trabzon), Santa Maria Kilisesi ve Misafirhanesi (Trabzon), Yeniköy Köprüsü (Trabzon) ele alınmış, Deneysel Modal Analiz testleri gerçekleştirilmiş, sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve sonlu eleman model güncelleme işlemleri sunulmuştur. Çalışmanın ikinci kısmında hasar tespit yöntemlerinin uygulanabilmesi amacıyla Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yapı Sağlığı İzleme Laboratuvarı'nda ölçekli olarak inşa edilmiş tek açıklıklı taş kemer köprü üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Köprü modeli üzerinde mesnet çökmesi, köprü ayaklarında malzeme boşalması ve deprem hasarı durumları gerçekleştirilmiş ve Deneysel Modal Analiz testleri yardımıyla hasar tespitleri gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Ayrıca basit onarım ve enjeksiyon uygulamaları ile köprü modeli onarılmış ve onarım etkinliği araştırılmıştır. Tez çalışması neticesinde, titreşim testleri ile elde edilen frekans ve mod şekilleri verilerinin hasarın varlığını belirlemede oldukça uygun bir yöntem olduğu belirlenmiştir. Ancak yapılardaki hasarın yerlerinin belirlenmesi konusunda deneysel verilerin tek başına yetersiz kaldığı, sayısal modellere ve daha fazla deneysel ölçüm noktalarına ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tarihi Yığma Yapılar, Deneysel Modal Analiz, Sonlu Eleman Model Güncellemesi, Kemer Köprü, Hasar Tespiti, Sarsma Masası

PhD. Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS, FINITE ELEMENT MODEL UPDATING AND DAMAGE DETECTION AT HISTORICAL MASONRY STRUCTURES BY EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS METHOD

Ali Fuat GENÇ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK
2023, 237 Pages

In the scope of this thesis, it is aimed to determine the experimental dynamic characteristics, to create finite element models, to perform finite element model updating and damage assessment studies of historical masonry structures. The study is divided into two parts: (I) studies on existing structures and (II) studies on laboratory model. Among the existing historical structures, the Armory Building (Trabzon), Çorum Clock Tower, Yavuz Selim School Building (Trabzon), İskenderpaşa Mosque and Minaret (Trabzon), Santa Maria Church and Guest House (Trabzon), Yeniköy Bridge (Trabzon) were examined, Experimental Modal Analysis tests and finite element models were created and finite element model updating processes were presented. In the second part of the study, studies were carried out on a single span stone arch bridge built to scale in the Structural Health Monitoring Laboratory of Karadeniz Technical University in order to apply the damage detection methods. Support settlement on the bridge model, material discharge at the bridge piers and earthquake damage cases were applied by shaking table tests and damage detections were made with the help of Experimental Modal Analysis tests. In addition, the bridge model was repaired with simple repair and injection applications and the repair efficiency was investigated. As a result of the thesis study, it has been determined that the frequency and mode shapes data obtained by vibration tests are a very suitable method for determining the presence of damage. However, it has been determined that the experimental data alone are insufficient to determine the location of the damage in the structures, and that numerical models and more experimental measurement points are needed.

Key Words: Historical Masonry Structures, Experimental Modal Analysis, Finite Element Model Update, Arch Bridge, Damage Assessment, Shaking Table

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Kısa, periyodik ve sürekli izleme ile titreşime dayalı hasar tespit akış diyagramı (Boscato vd., 2016).....	5
Şekil 1.2. Deneysel Modal Analiz yöntemi ile dinamik karakteristiklerin elde edilmesi (Okur, 2017).....	8
Şekil 1.3. Tarihi yapıların Deneysel Modal Analiz testleri ve Sonlu Eleman modelleri ile ilgili örnek grafik ve modeller	9
Şekil 1.4. Tarihi yapıların sarsma masası deneylerine ait görünüşler	18
Şekil 1.5. Şahmerdan ile kazık çakımı (Stratico,1826), ahşap ızgara sistemi (Dabanlı, 2016).....	27
Şekil 1.6. Demir kuşaklama örnek çizimleri (Kuban, 1982; Tanyeli, 1991; Dabanlı, 2016).	28
Şekil 1.7. Piyale Paşa Camii payandaları (Kuban, 2007).....	28
Şekil 1.8. Nur-u Osmaniye Cami demir kuşak seviyeleri ve görünüşleri (Dabanlı, 2016).....	29
Şekil 1.9. Farklı tipte inşa edilmiş yığma duvarlar (Mascarenhas, 2003; ICS, 2008; Mendes, 2012).	30
Şekil 1.10. Nur-u Osmaniye Cami Avlu sütunları (Dabanlı, 2016) ve II. Bayezid Camii ayakları (Dabanlı, 2008).	31
Şekil 1.11. Kemer elemanın kullanım alanları	32
Şekil 1.12. Tonoç çeşitleri (Çılı ve Sesigür, 2007).....	33
Şekil 1.13. Saint Francis bazilikası, İtalya (Angelini vd., 2017).....	33
Şekil 1.14. Kubbede meydana gelen basınç ve çekme gerilmeleri (Ünay, 2002).	34
Şekil 1.15. S. Pietro kubbesi için hazırlanan kuşak detayları (Poleni, 1748) ve Nur-u Osmaniye Camii kubbesini destekleyen payanda ve ağırlık kulesi (Dabanlı, 2016).....	34
Şekil 1.16. Kubbe geçiş elemanları; pandantif, tromp, Türk üçgeni	35
Şekil 1.17. Volta döşeme detayı (Çelebi, 2001).....	36
Şekil 1.18. Adi volta döşeme detayı (Çelebi, 2001).....	36
Şekil 1.19. Adi volta döşeme örneği (Trabzon Yavuz Selim Binası)	36
Şekil 1.20. Oturma şekilleri ve yapıda oluşturduğu çatlaklar (Çamlıbel, 2000).	37
Şekil 1.21. Samsun Dumlupınar okulunda yapı etrafındaki kazı sonucu oluşan hasar	38
Şekil 1.22. Depremlerden hasar görmüş tarihi yapı örnekleri (Parisi veAugenti, 2013; Altunışık vd., 2016a).....	40

Şekil 1.23.	Tarihi yapı duvarlarında (Ortaköy Camii) meydana gelen tuzlanma hasarı (Yıldırım, 2007).	41
Şekil 1.24.	Bosna Savaşı sırasında hasar gören Mostar Köprüsü (Colak, 2016).	41
Şekil 1.25.	Tarihi yapı duvarlarında hava kirliliği sonucu meydana gelen kararma ve kabuk oluşumu (Yıldırım, 2007).	42
Şekil 1.26.	Mardin’de üzerinde kale bulunan kayaçlardaki çatlak oluşumu ve taş kopması tehlikesi (Ahunbay, 2019).	48
Şekil 1.27.	Fatih Camii (İstanbul) kubbesindeki çatlakların onarımı (Ceylan ve Ocakcan, 2013).	50
Şekil 1.28.	Fatih Camii minaresinde dikiş yöntemi uygulaması (Çılı ve Yıldız, 2013).	50
Şekil 1.29.	Kubbede (Küçük, 2010) ve duvarlarda enjeksiyon uygulaması (Oktay, 2017).	51
Şekil 1.30.	Donatı ile derz güçlendirme uygulaması (Kara, 2009).	52
Şekil 1.31.	Fatih Camii sütun başı gergi sistemi, duvar içi gergi sistemi birleşim detayı ve kurşun ile dolumu (Çılı ve Yıldız, 2013).	53
Şekil 1.32.	Nevşehirli Damat İbrahim Paşa Külliyesi ve I. Mahmut Kütüphanesi yapılarında öngerme çubukları (Ahunbay, 2019).	53
Şekil 1.33.	I. Mahmut Kütüphanesi kubbe çemberleme uygulaması (Çılı ve Yıldız, 2013).	54
Şekil 1.34.	I. Mahmut Kütüphanesi tonoz çevresi ahşap hatıl sistemi (Çılı ve Yıldız, 2013).	55
Şekil 1.35.	Ayasofya ve Kariye Camii payandaları (Ahunbay, 2019).	56
Şekil 1.36.	Ahşap çatılarda güçlendirme uygulamaları ve duvar birleşim uygulamaları (TYDRYK, 2017).	57
Şekil 1.37.	Küçük Ayasofya Cami Kubbe kasnağında FRP uygulaması (Güler vd., 2004).	58
Şekil 1.38.	İznik Ayasofya Camii minaresinde bütünleme uygulaması (Ahunbay, 2019).	59
Şekil 1.39.	Yangın sonrası yenilenen Çorum Müze binası	60
Şekil 1.40.	Savaşta yıkılan Mostar Köprüsü’nün yeniden yapımı (Colak, 2016).	60
Şekil 1.41.	Süleyman Han Camii minaresi söküm, numaralandırma ve tekrar kurulumu işlemleri (KVMGM Arşivi, (2019-2021)).....	61
Şekil 1.42.	İmam Abdullah Zaviyesi türbe bölümünün bütün olarak taşınması ve yeni konumu görünüşleri (KVMGM ve DSİ Arşivi, (2017-2019)).	62
Şekil 1.43.	Yığma duvar üzerinde ultrases ölçümü (Günaydin vd., 2022).	65
Şekil 1.44.	Doğal taşlarda ve yığma duvarlarda N ve P tipi çekiçlerle yüzey sertliği ölçümü (Özturan vd, 2006; Krstevska vd, 2007).	66
Şekil 1.45.	Çatlak genişliği değişimi (a), kapı üstü lentosunda çatlak genişliği ölçümü (Efes Tiyatrosu) (b), çatlak genişliği ölçüm cetveli (c) (Sesigür vd., 2007)..	67

Şekil 1.46.	Flat jack uygulama örnekleri (TYDRYK, 2017).	67
Şekil 1.47.	Yerinde kayma deneyi uygulaması (Yüzer vd., 2015).	68
Şekil 1.48.	Endoskopi uygulama adımları (a) delme işlemi, (b) görsel inceleme ve (c) fotoğraf (Lourenço vd., 2001).	68
Şekil 1.49.	Yapıdan numune (karot) alınması (Krstevska vd, 2007).	69
Şekil 1.50.	Darbe Çekici ve Başlıkları, Brüel&Kjaer 8210 tipi darbe çekici (Günaydın, 2016).	71
Şekil 1.51.	Z24 köprüsünde kullanılan bir elektro-hidrolik sarsıcı (a) (Maeck ve De Roeck, 2003), ve bir çatıya eksantrik kütle sarsıcı montajı (b) (Yu vd., 2004).	71
Şekil 1.52.	Tek eksenli ve üç eksenli ivmeölçerler	72
Şekil 1.53.	Örtüşme problemi örneği; örtüşme ile düşük örnekleme oranı (a) ve hedeflenen örnekleme oranı (b) (Ramos, 2007).	73
Şekil 1.54.	Brüel&Kjaer 3560 C tipi veri toplama ünitesi	73
Şekil 1.55.	Çevresel titreşim testlerine ait akış şeması.....	75
Şekil 1.56.	Detaylı mikro modelleme (a), basitleştirilmiş mikro modelleme (b), makro modelleme (c)	82
Şekil 2.1.	Cephanelik binasına ait görünüşler	84
Şekil 2.2.	Ortam titreşim testinde kullanılan ivmeölçer düzenleri ve bağlantı görünüşü	85
Şekil 2.3.	GFTAA yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk grafikleri	87
Şekil 2.4.	Ölçümler sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli.....	88
Şekil 2.5.	SOLID186 elemanını (ANSYS, 2016).....	89
Şekil 2.6.	Binaya ait rölöve çizimi ve boyutlar	90
Şekil 2.7.	Cephanelik binasının sonlu eleman modeline ait görünüşler.....	90
Şekil 2.8.	Binanın sayısal mod şekilleri	91
Şekil 2.9.	Yerel güncelleme için seçilen parametrelerin yerel hassasiyet matrisi.....	93
Şekil 2.10.	Yerel güncelleme için güncelleme parametrelerindeki değişiklikler	94
Şekil 2.11.	Yerel güncellemeden sonra yığma duvarlarda nihai elastisite modülü dağılımı	94
Şekil 2.12.	Yerel güncellemeden sonra betonarme döşemelerdeki nihai elastisite modülü dağılımı	95
Şekil 2.13.	Çorum saat kulesine ait görünüşler	96
Şekil 2.14.	Ortam titreşim testinde kullanılan ivmeölçer düzeni ve bağlantı görünüşü... ..	97
Şekil 2.15.	GFTAA ve SAB yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk grafiği ve kararlılık diyagramı.....	97
Şekil 2.16.	Ölçüm sonucunda elde edilen ilk beş mod şekli	98

Şekil 2.17.	Çorum saat kulesine ait geometrik özellikler	99
Şekil 2.18.	Saat kulesinin sonlu eleman modeline ait görünüşler	100
Şekil 2.19.	Saat kulesinin sayısal mod şekilleri	101
Şekil 2.20.	Yavuz Selim Okul Binası'na ait bazı görünüşler	104
Şekil 2.21.	Ortam titreşim testinde kullanılan ivmeölçer düzeni ve bağlantı görünüşü. 105	
Şekil 2.22.	GFTAA ve SAB yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk grafiği ve kararlılık diyagramı.....	106
Şekil 2.23.	Ölçüm sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli.....	106
Şekil 2.24.	Ölçüm şeması (a) ve testlere ait görünüşler (b).....	107
Şekil 2.25.	Ultrasonik test ölçüm noktaları	108
Şekil 2.26.	Okul binasına ait plan ve görünüşler.....	110
Şekil 2.27.	Yavuz Selim Okul binasının sonlu eleman modeline ait görünüşler	111
Şekil 2.28.	Mikro ve makro modelleme tekniği ile oluşturulmuş döşeme modelleri.....	112
Şekil 2.29.	Mikro modellenmiş volta döşemenin ilk 5 mod şekli ve doğal frekans değerleri	113
Şekil 2.30.	Makro modellenmiş volta döşemenin ilk 5 mod şekli ve doğal frekans değerleri	113
Şekil 2.31.	Binanın sayısal mod şekilleri	115
Şekil 2.32.	İskenderpaşa camisinin zaman içerisindeki yapısal değişimi (Tuluk, 2007).....	118
Şekil 2.33.	İskenderpaşa camisine ait görünüşler.....	119
Şekil 2.34.	Ortam titreşim testinde kullanılan ivmeölçer düzeni ve bağlantı görünüşü. 120	
Şekil 2.35.	GFTAA yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk grafiği.....	121
Şekil 2.36.	Ölçüm sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli.....	121
Şekil 2.37.	Caminin sonlu eleman modeline ait görünüşler	123
Şekil 2.38.	Caminin sayısal mod şekilleri	124
Şekil 2.39.	Ortam titreşim testinde kullanılan ivmeölçer düzeni ve bağlantı görünüşü. 126	
Şekil 2.40.	GFTAA yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk grafiği.....	127
Şekil 2.41.	Ölçüm sonucunda elde edilen ilk dört mod şekli	127
Şekil 2.42.	Minarenin sonlu eleman modeline ait görünüşler	128
Şekil 2.43.	Minarenin sayısal mod şekilleri	129
Şekil 2.44.	Santa Maria kilisesine ait görünüşler	131
Şekil 2.45.	Misafirhane binasına ait görünüşler	132
Şekil 2.46.	Ortam titreşim testinde kullanılan ivmeölçer düzeni ve bağlantı görünüşü. 133	
Şekil 2.47.	GFTAA ve SAB yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk grafiği ve kararlılık diyagramı.....	134

Şekil 2.48.	Ölçüm sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli.....	134
Şekil 2.49.	Kilise binasına ait plan ve kesit çizimleri.....	135
Şekil 2.50.	Kilise binasının sonlu eleman modeline ait görüşler	136
Şekil 2.51.	Kilise binasının sayısal mod şekilleri.....	137
Şekil 2.52.	Ortam titreşim testinde kullanılan ivmeölçer düzeni	139
Şekil 2.53.	GFTAA ve SAB yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk grafiği ve kararlılık diyagramı.....	140
Şekil 2.54.	Ölçüm sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli.....	140
Şekil 2.55.	Misafirhane binasına ait kesit görüşleri	141
Şekil 2.56.	Misafirhane binasının sonlu eleman modeline ait görüşler.....	142
Şekil 2.57.	Misafirhane binasının sayısal mod şekilleri	143
Şekil 2.58.	Yeniköy köprüsüne ait görüşler	145
Şekil 2.59.	Ortam titreşim testinde kullanılan ivmeölçer düzeni ve bağlantı görüşü.	146
Şekil 2.60.	GFTAA yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk grafiği.....	147
Şekil 2.61.	Ölçüm sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli.....	147
Şekil 2.62.	Köprünün sonlu eleman modeline ait görüşler	148
Şekil 2.63.	Köprünün sayısal mod şekilleri.....	150
Şekil 2.64.	Köprü modeline ait geometrik ölçüler	153
Şekil 2.65.	Harç karışımlarının hazırlanmasına ait fotoğraflar	155
Şekil 2.66.	Harç numunelerinin eğilme ve basınç testlerine ait deney resimleri	156
Şekil 2.67.	Andezit ve bazalt taşların basınç deneylerine ait görüşler	157
Şekil 2.68.	Beton numunelerinin alınması ve basınç deneyine ait fotoğraflar	158
Şekil 2.69.	Temel kalıbının hazırlanması ve beton dökümüne ait fotoğraflar	159
Şekil 2.70.	Kenar beton bloklar için kalıp ve beton dökümlerine ait fotoğraflar.....	160
Şekil 2.71.	Kemer köprünün inşa aşamalarına ait fotoğraflar	161
Şekil 2.72.	Ölçümlere ait ivmeölçer dizilimleri	165
Şekil 2.73.	Deneyisel Modal Analiz testlerine ait görüşler	167
Şekil 2.74.	GFTAA yöntemi ile elde edilen spektral yoğunluk grafiği.....	168
Şekil 2.75.	Deneyisel ölçümler sonucunda elde edilen mod şekilleri	169
Şekil 2.76.	Gerdirme işlemlerine ait şematik gösterim	170
Şekil 2.77.	Mesnet çökmesi hasarı için köprünün ayaklarına yerleştirilen çelik levhalar	170
Şekil 2.78.	Gerdirme işlemlerinin ardından köprüde meydana gelen hasarlar.....	171
Şekil 2.79.	Referanslı ölçümde ivmeölçer dizilimleri	173
Şekil 2.80.	Ölçümlere ait görüşler.....	173

Şekil 2.81.	GFTAA Spektral Yoğunluk Grafikleri	174
Şekil 2.82.	Deneyssel ölçümler sonucunda elde edilen mod şekilleri	175
Şekil 2.83.	Enjeksiyon işlemlerine ait görünüşler	176
Şekil 2.84.	Yeniden yapım işlemlerine ait görünüşler	177
Şekil 2.85.	Onarım sonrası durum için elde edilen spektral yoğunluk grafiği	178
Şekil 2.86.	Deneyssel ölçümler sonucunda elde edilen mod şekilleri	178
Şekil 2.87.	Köprü ayaklarına malzeme boşalması hasarı ile ilgili görünüşler	179
Şekil 2.88.	Her bir hasar adımımda elde edilen GFTAA spektral yoğunluk grafikleri...	181
Şekil 2.89.	Deneyssel ölçümler sonucunda elde edilen mod şekilleri	182
Şekil 2.90.	Malzeme boşalması hasarının tamamlama yapılarak onarılması	183
Şekil 2.91.	Onarım sonrasında elde edilen spektral yoğunluk grafikleri	184
Şekil 2.92.	Deneyssel ölçümler sonucunda elde edilen mod şekilleri	184
Şekil 2.93.	Sarsma masası deneyleri için kurulan deney düzeneği	185
Şekil 2.94.	Deney kurulumuna ait görünüşler	186
Şekil 2.95.	Sarsma masası deneylerinde uygulanan yüklere ait ivme ve yerdeğiştirme grafikleri	187
Şekil 2.96.	Son deprem testinin ardından köprüde meydana gelen hasar durumları	189
Şekil 2.97.	Köprüde meydana gelen hasarların çizim üzerinde gösterimi	191
Şekil 2.98.	Erzincan depremi sonucunda elde edilen yerdeğiştirme ve ivme grafikleri	192
Şekil 2.99.	Parkfield depremi sonucunda elde edilen yerdeğiştirme ve ivme grafikleri	193
Şekil 2.100.	0.7g sinüs dalgası sonucunda elde edilen yerdeğiştirme ve ivme grafikleri	194
Şekil 2.101.	0.9g sinüs dalgası testi sonucunda elde edilen yerdeğiştirme ve ivme grafikleri	195
Şekil 2.102.	Köprünün sol, orta ve sağ noktalarından elde edilen yerdeğiştirme değerleri (a) ve orta noktadan elde edilen yerdeğiştirme oranları (b)	196
Şekil 2.103.	Köprünün orta noktasından elde edilen ivme değerleri ve yüzdesel artış oranları.....	196
Şekil 2.104.	Deprem hasarları sonrasında elde edilen spektral yoğunluk grafikleri	197
Şekil 2.105.	Deneyssel ölçümler sonucunda elde edilen mod şekilleri	197
Şekil 3.1.	Hasar ve onarım durumlarına göre frekansların değişimi	200
Şekil 3.2.	MGK değerlerinin enine, boyuna ve burulma modları için yüzdesel değişimi	201
Şekil 3.3.	Hasarsız duruma göre MGK değerlerinin değişimi	202
Şekil 3.4.	Köprü için 1-KMGK değerlerinin değişimi	205
Şekil 3.5.	Deneyler sonucunda elde edilen sönüm oranlarının değişimi.....	206

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Tez kapsamında gerçek tarihi yapılar üzerinde gerçekleştirilen işlemler	19
Tablo 1.2. Farklı taş cinslerine ait mekanik özellikler (Yılmaz, 2006).	21
Tablo 1.3. Tuğla malzemenin ortalama mekanik özellikleri (Dabanlı, 2008).	21
Tablo 1.4. İstanbul’da yer alan bazı tarihi yapılardaki harçlara ait basınç dayanımları (Kahraman, 2008).	22
Tablo 1.5. Yığma yapıların genel malzeme özellikleri (Tomazeviç 1999).	23
Tablo 1.6. Yığma duvar malzemelerinin mekanik özellikleri (Magenes ve Penna, 2009; TYDRYK, 2017).	24
Tablo 1.7. Yığma duvarların mekanik özelliklerinin, harç, işçilik ve duvarın enine bağlatı durumlarına göre düzeltme katsayıları (TYDRYK, 2017).	24
Tablo 1.8. Ahşap malzemelerin TS 647’ye göre malzeme özellikleri (TS647, 1979). ...	26
Tablo 1.9. Masif Ahşap Malzemenin Emniyet Gerilmeleri (TS647, 1979).	26
Tablo 2.1. Ölçüm testleri kurulumları ve ivmeölçer konumları	86
Tablo 2.2. GFTAA yöntemine göre elde edilen frekans ve sönüm oranları	86
Tablo 2.3. Cephanelik binasının sonlu eleman modelinde kullanılan lineer malzeme özellikleri	91
Tablo 2.4. Deneysel ve başlangıç sayısal frekans ve MGK değerleri	91
Tablo 2.5. Yerel güncelleme için seçilen belirsiz parametreler ve limit değerleri	93
Tablo 2.6. Deneysel ve yerel güncelleştirilmiş sayısal model sonuçları arasındaki farklar	95
Tablo 2.7. GFTAA ve SAB yöntemine göre elde edilen frekans ve sönüm oranları	98
Tablo 2.8. Saat kulesinin sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri	100
Tablo 2.9. Deneysel ve başlangıç model sayısal frekans değerleri	101
Tablo 2.10. Manuel model güncelleme için malzeme özelliklerindeki değişimler	102
Tablo 2.11. Manuel güncellemenin ardından deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar	103
Tablo 2.12. GFTAA ve SAB yöntemine göre elde edilen frekans ve sönüm oranları	107
Tablo 2.13. Ultrasonik test sonuçları	109
Tablo 2.14. Mikro modellenmiş döşemede alınan malzeme özellikleri	112
Tablo 2.15. Makro modellenmiş döşeme için iyileştirilmiş malzeme özellikleri	113
Tablo 2.16. Makro ve mikro modellenmiş döşemelere ait doğal frekans değerleri	114

Tablo 2.17.	Okul binasının sonlu eleman modelinde kullanılan lineer malzeme özellikleri	114
Tablo 2.18.	Deneysel ve başlangıç model sayısal frekans değerleri	115
Tablo 2.19.	İlk aşama Manuel model güncelleme için elastisite modüllerindeki değişim.....	116
Tablo 2.20.	İlk aşama manuel güncellemenin ardından deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar	116
Tablo 2.21.	Son aşama Manuel model güncelleme için elastisite modüllerindeki değişim.....	117
Tablo 2.22.	Son aşama manuel güncellemenin ardından deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar	117
Tablo 2.23.	GFTAA yöntemine göre elde edilen frekans ve sönüm oranları	121
Tablo 2.24.	Caminin sonlu eleman modelinde kullanılan lineer malzeme özellikleri	122
Tablo 2.25.	Deneysel ve başlangıç model sayısal frekans değerleri	124
Tablo 2.26.	Manuel model güncelleme için malzeme özelliklerindeki değişim	125
Tablo 2.27.	Manuel güncellemenin ardından deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar	125
Tablo 2.28.	GFTAA yöntemine göre elde edilen frekans ve sönüm oranları	127
Tablo 2.29.	Minarenin sonlu eleman modelinde kullanılan lineer malzeme özellikleri .	129
Tablo 2.30.	Deneysel ve başlangıç model sayısal frekans değerleri	129
Tablo 2.31.	Manuel model güncelleme için malzeme özelliklerindeki değişim	130
Tablo 2.32.	Deneysel ve iyileştirilmiş sayısal frekanslar arasındaki farklar	130
Tablo 2.33.	GFTAA ve SAB yöntemine göre elde edilen frekans ve sönüm oranları	135
Tablo 2.34.	Kilisenin sonlu eleman modelinde kullanılan lineer malzeme özellikleri ..	137
Tablo 2.35.	Deneysel ve başlangıç model sayısal frekans değerleri	137
Tablo 2.36.	Manuel model güncelleme için elastisite modüllerindeki değişim	138
Tablo 2.37.	Manuel güncellemenin ardından deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar	138
Tablo 2.38.	GFTAA ve SAB yöntemine göre elde edilen frekans ve sönüm oranları	141
Tablo 2.39.	Misafirhane binasının sonlu eleman modelinde kullanılan lineer malzeme özellikleri	143
Tablo 2.40.	Deneysel ve başlangıç model sayısal frekans değerleri	143
Tablo 2.41.	Manuel model güncelleme için elastisite modüllerindeki değişim	144
Tablo 2.42.	Manuel güncellemenin ardından deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar	144
Tablo 2.43.	GFTAA yöntemine göre elde edilen frekans ve sönüm oranları	147
Tablo 2.44.	Köprü'nün sonlu eleman modelinde kullanılan lineer malzeme özellikleri..	149

Tablo 2.45. Deneysel ve başlangıç model sayısal frekans değerleri	149
Tablo 2.46. Manuel model güncelleme için malzeme özelliklerindeki değişim	151
Tablo 2.47. Manuel güncellemenin ardından deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar	151
Tablo 2.48. Doğu Karadeniz Bölgesi'nde yer alan kemer köprülere ait geometrik özellikler (KGM, 2009; Birinci, 2010).	152
Tablo 2.49. Harç karışım oranları.....	154
Tablo 2.50. Kireç katkılı harç numuneleri için standart kür koşulları (TS EN 1015-11, 2000).	155
Tablo 2.51. Harç karışımlarına ait deney sonuçları.....	156
Tablo 2.52. Beton numunelere ait malzeme özellikleri.....	158
Tablo 2.53. Hasarsız durum için yapılan ölçümler sonucunda elde edilen doğal frekans değerleri.....	167
Tablo 2.54. Sağ ve sol mesnet hasarı durumları için yapılan ölçümler sonucunda elde edilen doğal frekans değerleri ve sönüm oranları.....	174
Tablo 2.55. Enjeksiyon karışım oranları (TKRUP, 2013).....	176
Tablo 2.56. Onarım sonrası durum için yapılan ölçümler sonucunda elde edilen doğal frekans değerleri.....	178
Tablo 2.57. Hasarsız-sağ mesnet hasarı-sol mesnet hasarı durumları için yapılan ölçümler sonucunda elde edilen doğal frekans değerleri ve sönüm oranları	179
Tablo 2.58. Deneysel modal analiz testleri sonucunda elde edilen frekans ve sönüm oranları değerleri	180
Tablo 2.59. Tamamlama sonrasında elde edilen frekans ve sönüm oranları değerleri....	184
Tablo 2.60. Malzeme boşalması hasarı öncesi, sonrası ve onarım durumlarında elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması	184
Tablo 2.61. Köprüye uygulanan dinamik yüklemeler ve hasar durumları	187
Tablo 2.62. Onarım sonrasında elde edilen frekans ve sönüm oranları değerleri	197
Tablo 3.1. Köprünün farklı hasar durumlarında elde edilen frekans değerleri.....	200
Tablo 3.2. Köprünün farklı hasar durumlarında elde edilen sönüm oranı değerleri	206

SEMBOLLER DİZİNİ

a	İvme
C	Sönüm
ÇTY	Çevresel Titreşim Yöntemi
DMA	Deneysel Modal Analiz
DTA	Diferansiyel ısısal analiz
E_h	Harcın elastisite modülü
E_k	Yığma malzeme elastisite modülü
E_t	Yığma birim elastisite modülü
f	Frekans
f_{bk}	Yığma duvar basınç dayanımı
$f_{harç}$	Harç basınç dayanımı
$f_{tuğla/taş}$	Yığma birim basınç dayanımı
$F(t)$	Kuvvet vektörü
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
g	Yerçekimi ivmesi
GA	Genetik Algoritma
GFTAA	Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma
GSY	Güç Spektral Yoğunluğu
$G_{xx}(j\omega)$	Etki sinyallerinin GSY fonksiyonu
$G_{yy}(j\omega)$	Tepki sinyallerinin GSY fonksiyonu
$H(j\omega)$	Frekans davranış fonksiyonu
K	Rijitlik
KMGK	Koordinat Modal Güvence Kriteri
LVDT	Lineer Potansiyometrik Cetvel
M	Kütle
OMA	Operasyonel Modal Analiz
SAB	Stokastik Altalan Belirleme
SEM	Elektron Mikroskobu ile Tarama
t_h	Harç kalınlığı
t_t	Yığma birim kalınlığı

TGA	Termogravimetrik analiz
$U(t)$	Yerdeşıştırme
$\dot{U}(t)$	Hız
$\ddot{U}(t)$	İvme
ZTY	Zorlanmış Titreşim Yöntemi
ρ_k	Yığma birim ile harç arasındaki aderans katsayısı
Δ	Değişim oranı
ϕ	Mod şekil vektörü
*	Kompleks eşlenik



1. GENEL BİLGİLER

Tarihi yapılar, geçmişi günümüze bağlayan yazılı olmayan kültür varlıklarıdır. Her toplum tarafından kendi ihtiyacına göre ve özgün mimari bakış açısı ile inşa edilmiş bu yapılar günümüzde insanların ilgi odağı olmaktadır. İdarecilerin, mimar ve mühendislerin koruma yönünde çaba sarf ettiği bu yapılar, tarihçiler için tarihi bir metin, arkeologlar için gün yüzüne çıkarılmayı bekleyen bir hazine ve gezginler için eski uygarlıkların sokaklarında seyahat fırsatı sunan eşsiz definelerdir. Bu bakımdan bu tür yapılar korunmayı fazlasıyla hak etmektedirler.

Tarihi yapılar doğal malzeme kullanılarak yığma tekniği ile inşa edilmiş estetik yapılardır. Ulaşımın ve taşımacılığın zor olduğu zamanlarda inşa edilmelerinden dolayı inşa malzemeleri genellikle yakın çevrelerden temin edilmiştir. İnşa edildikleri devirde herhangi bir inşa standardı olmayan ve tecrübeye dayalı olarak inşa edilen ve her biri kendine has mimarisi ve malzemesi olan bu yapılar zaman içerisinde hasar görmekte ve yıkılmaktadırlar. Tarihi yapıların zarar görmesinde ve yavaş yavaş yok olmasında; depremler, sel felaketleri, yangınlar, yapı malzemelerinde dayanım kaybı, deformasyonlar, aşırı ve düzensiz yüklemeler, zemin oturmaları, savaşlar ve vandalizm önemli rol oynamaktadır (Toker ve Ünay, 2004).

Her bir tarihi yapı malzeme ve inşa tekniğine bağlı olarak farklı mekanik özelliklere sahiptir. Bunun yanında, yüksek birim hacim ağırlığı, düşük çekme-kayma dayanımı ve düşük süneklik bu tür yapıların ortak özelliğidir (Mendes, 2012). Taş, tuğla, harç, ahşap ve metal elemanlar kullanılarak basit bir şekilde inşa edilen bu yapılar, yapısal olarak basınç gerilmelerini taşımaya yönelik tasarlanmalarına rağmen deprem, zemin oturması ve malzeme boşalması gibi yapıda çekme ve kayma gerilmeleri oluşturacak etkilerden dolayı önemli hasarlar alabilmektedirler. Taş, tuğla gibi yığma birim elemanları arasında harç derzlerinin bulunması duvarda süreksizliğe neden olmaktadır. Çekme dayanımı zayıf olan harç derzlerinden çekme gerilmeleri iletilmemekte ve yapıda çatlaklar oluşmaktadır. Bunun yanında aşırı basınç altında yığma birim elemanların dayanımını yitirmesi ile ezilme çatlakları oluşabilmektedir. Yığma duvarlarda oluşacak hasar türleri genellikle yükleme yönüne ve yükleme kombinasyonlarına bağlı olarak değişmektedir (Lourenço, 1996). Her ne kadar yığma duvarlarda oluşabilecek hasar mekanizmaları bilinse de tarihi yığma yapılarda hasar ve göçme mekanizmalarını genelleştirmek oldukça zordur. Bu durum, tarihi

yapıların malzeme özelliklerinin bilinmemesi, geometrik tasarımın karmaşıklığı ve farklı rijitliğe bağlı elemanların birleşim noktalarındaki yük aktarım belirsizliğinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle her bir tarihi yapı özel olarak ele alınmalı, yapısal davranışları incelenmeli ve yapıya uygun gerçekçi müdahaleler uygulanmalıdır.

Hasar gören tarihi yapıların korunması ve güçlendirilmesi uzmanlık gerektiren bir iştir. Tarihi yapılarda mevcut hasarların belirlenmesi, muhtemel oluşabilecek hasarların sayısal simülasyonlarla tahmin edilmesi ve onarım-güçlendirme çalışmalarının gerçekleştirilmesi süreçleri deneysel ve sayısal metotların beraber kullanımına ihtiyaç duyar. Tarihi yapıların yapısal değerlendirmesinde önemli olan nokta yapıdan olabildiğince fazla veri elde edilerek bilgi düzeyinin artırılmasıdır. Bilgi düzeyi yerel olarak yapısal elemanlardan elde edilirken, genel olarak yapının bütününden elde edilmektedir. Yerel düzeyde tahribatsız testler ve/veya az tahribatlı testler (flat jack testi, GPR, tomografi, karot, ultrasonik testler, akustik emisyon vb.) kullanılarak yapının bir bölümünden veri elde etmek mümkündür. Bu testlerden elde edilecek verilerin güvenliği test sayısına bağlıdır ve çoğu zaman yapının geneli hakkında değerlendirme yapma imkânı sunmaz (Elyamani ve Roca, 2018). Bu nedenle, yapının genel davranışı hakkında bilgi sağlayabilecek titreşim testleri ve farklı izleme türleri gibi genel denetim tekniklerinin kullanılması esastır. Mühendislik yapılarının periyodik olarak ya da sürekli izleme yöntemi kullanılarak yapıdan bilgi akışı sağlanmasına “Yapı Sağlığı İzleme” adı verilmektedir. Son yıllarda farklı disiplinlerde oldukça yaygın olarak kullanılan yapı sağlığı izlemesi inşaat mühendisliği alanında da sıklıkla kullanılmaktadır. Bu süreç genel olarak yapıda meydana gelen hasarların tespiti ve yapının kalan ömrünün tahmini ile ilgilidir.

Yapı sağlığı izleme sistemi, izlenecek yapı (bina, köprü, uçak kanadı, rüzgâr türbini vb.) ve çevre arasındaki etkileşimin etkilerinin yanı sıra yapısal dinamik özellikleri ve yüklere verilen tepkiyi tanımlayabilen fiziksel parametreleri ölçmek için kurulmuş çeşitli sensörlerden oluşmaktadır. Sensör seçimi (gerinim ölçerler, ivmeölçerler, fiber (FBG) sensörleri, sıcaklık sensörleri, anemometreler, yük hücreleri vb.), yapıya ve izleme gereksinimlerine bağlıdır (Rainieri vd., 2011). İnşaat mühendisliği ilgi alanında yer alan yapılar için genellikle titreşim verilerini elde etmeye yarayan ivmeölçerler kullanılmaktadır. Yapısal kütle ve rijitliğe bağlı olan titreşim verileri (doğal frekans, mod şekilleri ve sönüm oranları) mühendislik yapıları üzerinde genel yapısal değerlendirme yapma imkânı sunmaktadır.

Titreşime dayalı yapı sağlığı izleme, yapısal dinamiklerdeki değişikliklerin gözlemlenmesine bağlıdır. Yapıda meydana gelen hasar, dinamik karakteristiklerin rijitlik ve kütle fonksiyonları olması nedeniyle kendisini modal özellikler üzerinde gösterir (Hanbay, 2019). Titreşim verilerinde elde edilen değişiklikler üzerinden ve bu verilerle iyileştirilmiş sayısal modeller yardımıyla hasarın varlığı, konumu, yapısal bütünlüğü ve yapının geri kalan ömrü hakkında bilgiler elde edilebilir. Böylece, hasar erken bir aşamada keşfedilebilir ve hasarın boyutunun artması önlenir (Fritzen, 2005). Hasar tespitiyle ilgili Rytter (1993) tarafından dört ayrı seviye sınıflandırması yapılmıştır. Hasar seviyesi ile ilgili olarak, Rytter (1993) tarafından sunulan dört hasar tespit sınıflandırmasına ilaveten daha sonraları araştırmacılar (Worden ve Dulieu-Barton, 2004; Yam vd., 2004) tarafından ilave bir hasar tespit seviyesi (seviye 3) eklenmiştir.

1. Seviye: Yapıda hasarın var olup olmadığının belirlenmesi
2. Seviye: Hasar bölgesinin belirlenmesi
3. Seviye: Hasarın türünün belirlenmesi
4. Seviye: Hasar şiddetinin belirlenmesi
5. Seviye: Yapının kalan ömrünün tahmin edilmesi

Tarihi yapılar yaşam süreçleri boyunca çeşitli nedenlerle sıklıkla hasar görmekte ve onarım ve güçlendirme gibi yapısal müdahalelere ihtiyaç duymaktadırlar. Bu bakımdan, tarihi yapılarda meydana gelen hasarın erkenden tespit edilmesi ve yapıya uygun müdahalelerin gerçekleştirilmesi koruma açısından hayati öneme sahiptir. Bu nedenle titreşim verilerine dayalı hasar tespiti tarihi yapılar için literatürde oldukça yaygın olarak kullanılmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

1.1. Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Tarihi yapılar, inşaat mühendisliği alanında oldukça geniş bir çalışma alanına sahiptir. Bu tür yapıların korunması amacıyla, sayısal modellerinin oluşturulup farklı yüklemeler altında statik ve dinamik davranışlarının belirlenmesi, malzeme özelliklerinin tayini, hafif hasarlı ve hasarsız deneysel uygulamaları, hasar değerlendirmeleri, onarım-güçlendirme müdahaleleri, yapı sağlığı izleme çalışmaları vb. birçok konu için literatürde oldukça geniş bir yayın havuzuna sahiptir. Tez kapsamında yapılacak titreşime dayalı hasar tespiti ve sarsma masası deneylerinden dolayı literatür taraması daraltılarak iki başlık altında sunulmuştur.

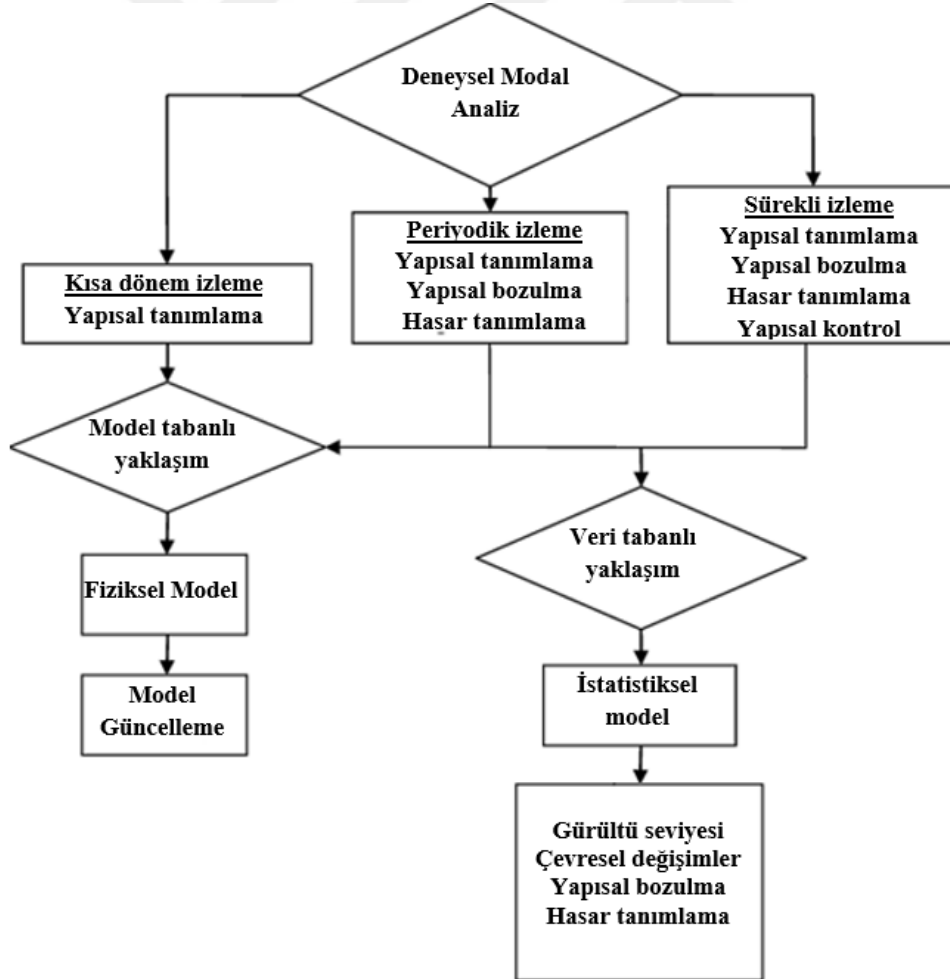
1.1.1. Titreşime Dayalı Yapı Sağlığı İzleme ve Hasar Tespiti ile İlgili Çalışmalar

Hasar tespiti ile ilgili çalışmalar inşaat mühendisliğinin ana motivasyonlarının başında gelmektedir. Bu bağlamda erken hasar tespiti ve doğru müdahale yöntemleri geliştirmeye yönelik farklı uygulama teknikleri geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam etmektedir. 1980’li yıllardan itibaren donanımsal FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) analizlerindeki büyük gelişmeler dinamik tabanlı hasar tespit tekniklerinin yoğun bir şekilde kullanımına sebep oldu. İlk olarak makine mühendisliği, petrol endüstrisi şirketleri, havacılık ve uzay mühendisliği ve inşaat mühendisliği gibi alanlarda kullanım alanları oluştu (Ramos, 2007). İnşaat mühendisliğinde genellikle köprü yapıları için uygulama alanları bulan hasar tespiti çalışmaları günümüzde yığma ve tarihi yapılar dâhil tüm mühendislik yapılarına uygulanmaktadır.

Yapı sağlığı izleme yöntemleri yerel ve genel olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür. Yerel olarak ele alınan uygulamalar, yapının belli bir bölümüyle alakalı olmalarından dolayı genellikle genel yapı davranışı hakkında kapsamlı bir bilgi sunmazlar. Yerel hasar tespiti genellikle belirli periyotlarla sahadan ölçümler alınarak uygulanmaktadır. Yerel hasar tespiti ile alakalı literatürde oldukça fazla sayıda yöntem sunulmuş ve çalışma gerçekleştirilmiştir. Duvar içi haritalama (Binda vd., 1999), çatlakların, boşlukların ve bozulmaların tespiti (Binda vd., 2000), nem içeriği, malzeme özelliğinin bozulması (Riva, 1994), duvar dayanımının tahmini (Garavaglia vd., 2008), duvarlarda oluşan sünme (Anzani vd., 2009), görüntü işleme ile hasar tespiti (Ali vd., 2019; Wang vd., 2019; Dais vd., 2021; Loverdos vd., 2021; Loverdos ve Sarhosis, 2022; Abu-Haifa ve Lee, 2022; Rozsas vd., 2022) vb. birçok konu literatürde incelenmiştir.

Genel (global) yapı sağlığı izleme yöntemleri yapı genelinde inceleme olanağı sağladığı için araştırmacılar için popüler bir konu olma özelliğini günümüzde de devam ettirmektedir. Hasar tespit yöntemlerinin beş ayrı seviye olarak ayrılmasının yanında uygulama biçimi olarak modelden bağımsız ve model tabanlı yöntemler olmak üzere iki ana başlıkta da incelemek mümkündür. Ancak her iki yöntemde de farklı zamanlarda elde edilen ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması esas alınmaktadır. Modelden bağımsız yöntemlerde direk deneysel veriler değerlendirilirken, model tabanlı yöntemlerde sayısal modellerin deneysel verilerle kalibrasyonu sonucunda hasar tespiti gerçekleştirilmektedir (Zimmerman ve Kaouk, 1992; Fan ve Qiao, 2011). Sayısal modellerin deneysel verilerle kalibrasyonu manuel olarak basit ve zorlu bir süreçle yapıldığı gibi, yapay zeka yöntemleri, korelasyon

temelli yöntemler ve genetik algoritma (GA) yöntemleri gibi metotlar kullanılarak otomatik olarak da gerçekleştirilebilmektedir (Friswell ve Mottershead, 1995; Sehgal ve Kumar, 2016; Nguyen, 2022). Literatürde farklı mühendislik yapıları için oldukça fazla sayıda yapı sağlığı izleme ile ilgili hasar tespiti çalışması mevcuttur. Bu çalışmalar genellikle titreşime dayalı hasar tespiti yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Kısa, periyodik ve sürekli izleme ile titreşime dayalı hasar tespit akış diyagramı Şekil 1.1’de sunulmaktadır. Kısa vadeli izleme, yapısal tanımlama için dinamik karakteristiklerin tanımlanmasını amaçlarken, periyodik ve sürekli izleme yapısal bozulma ve hasarın tahminini elde etmeyi amaçlar (Farrar ve Worden, 2007; Russo, 2012). İzleme yönteminin seçimi, elde edilen dinamik karakteristiklerin nasıl kullanılacağına bağlıdır. Deneysel veriler, model güncelleme prosedürleri yoluyla sayısal bir modelin kalibrasyonu için kullanılabileceği gibi uzun süreli izleme sonucunda, parametreler, istatistiksel verilere dayalı bir analitik model oluşturmak için kullanılabilir (Boscato vd., 2015).



Şekil 1.1. Kısa, periyodik ve sürekli izleme ile titreşime dayalı hasar tespit akış diyagramı (Boscato vd., 2016).

Titreşim verileri (doğal frekans, mod şekli, sönüm oranı) yapının kütle ve rijitliğine bağlıdır. Dolayısı ile bir hasar durumunda yapıda kütle kaybının olmayacağı varsayılarak rijitlikteki azalım hasarın varlığına işaret etmektedir. Titreşime dayalı yapı sağlığı izleme tekniklerinin, hasar belirleme araçlarıyla birlikte yapıların bütünlüğünü sorgulamak için verimli bir çözüm sağladığı kanıtlanmıştır (Masciotta vd., 2017; Mesquita vd., 2018). Titreşime dayalı yapı sağlığı izleme teknikleri, hasar tespiti, doğal frekanslarda kalıcı değişimler şeklinde hasar ölçümü için son derece etkilidir (Ubertini vd., 2017; Gentile vd., 2019). Titreşim verilerine dayalı hasar tespit yöntemleri aşağıda belirtilen başlıca gruplara ayrılmaktadır (Doebeling vd., 1998). Literatürde titreşim verilerine dayalı hasar tespiti ile ilgili ayrıca farklı yöntemler de sunulmaktadır (Carden ve Fanning, 2004; Ramos vd., 2010a; Fan ve Qiao, 2011).

- Frekansların değişimine dayalı hasar tespiti
- Mod şekillerinin değişimine dayalı hasar tespiti
- Esnekliğin değişimine dayalı hasar tespiti
- Model güncellemeye dayalı hasar tespiti

Son yıllarda tarihi yığma yapıların yapısal davranışlarının incelenmesinde tahribatsız deneysel yöntemler sıklıkla kullanılmaktadır. Yapının dinamik karakteristikleri olarak tanımlanan doğal frekans, sönüm oranı ve mod şekillerinin elde edilmesinde Operasyonel Modal Analiz yöntemi (OMA) veya diğer ismi ile Deneysel Modal Analiz (DMA) yöntemi son yıllarda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Tahribatsız olması ve ortam koşulları etkisinde tarihi yapıların dinamik karakteristiklerinin elde edilmesinde araştırmacılar tarafından tercih edilmektedir (Saisi vd., 2015).

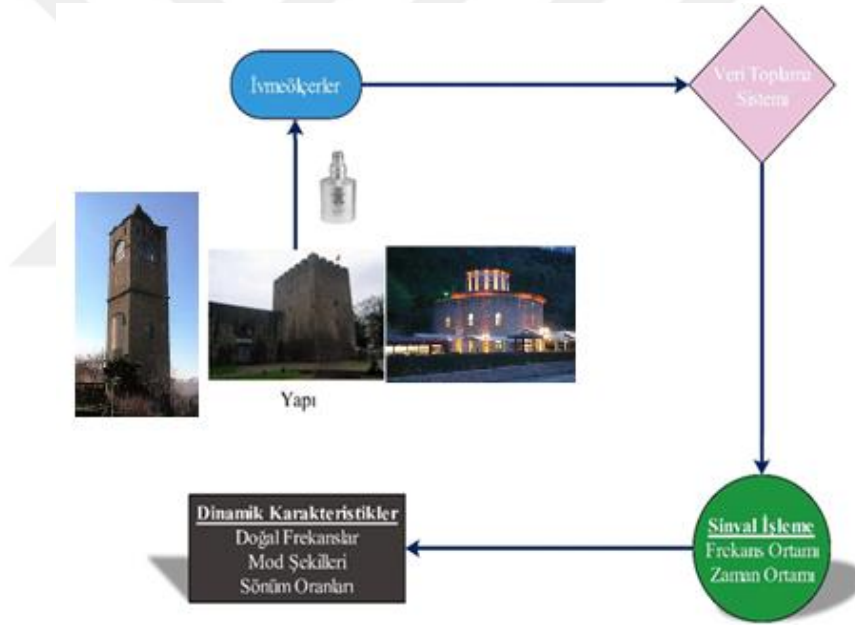
Tarihi yapıların deneysel modal analiz yöntemiyle incelenmesinde literatürde oldukça fazla çalışma mevcuttur. Chiostrini vd. 1992, yıkılmak üzere olan tipik bir Floransa yığma binasını zorlanmış titreşimle deneysel modal analizini gerçekleştirmiştir. İstanbul'da yer alan Ayasofya Camii ortam titreşim testleri ile ölçülmüştür (Durukal, 1992; Erdik vd., 1993). Tzenov ve Dimova (1992), 6. yüzyıldan kalma, tarih boyunca çeşitli yapısal sorunlar yaşayan, özellikle sütunlarında endişe verici çatlaklar oluşan bir Bulgar kilisesinin ortam titreşim testini gerçekleştirmiştir. Modena vd. (1997), ortam titreşim testi ve zorlanmış titreşim testleri ile Verona'da yer alan Roma amfiteyatrosunun (Arena) dinamik karakteristiklerini elde etmiştir. Arena yıllar sonra yalnızca ortam titreşim testi kullanılarak

Lorenzoni vd. (2013) tarafından tekrar test edilmiştir. Eski ve yeni testler arasında belirlenen doğal frekanslardaki ortalama hata %7,3 olarak elde edilmiştir.

Sensör teknolojisindeki ve dinamik tanımlama tekniklerindeki yeniliklerle birlikte, titreşim testi, tarihi yapıların araştırılması aşamasında güçlü bir araç olarak daha fazla kullanılmaktadır. İtalya'daki Gotik Fossanova kilisesi ortam titreşim testleri ile test edilmiştir (De Matteis vd., 2008; De Matteis ve Mazzolani, 2010). Atamtürktür vd. (2009), İngiltere, ABD ve İtalya'da yer alan beş Gotik kilisede gerçekleştirilen deneysel modal analiz testlerini sunmuştur. Ramos vd. (2010), Lizbon'daki Jeronimos Gotik Manastırı'nın ana nefinin dinamik tanımlamasını gerçekleştirerek GFTAA ve SAB sonuçlarını karşılaştırmış ve iki yöntem arasında önemli bir farkın oluşmadığını gözlemlemiştir. Tarihi Reggio Emilia katedralinin modal parametreleri ortam titreşim testleri kullanılarak araştırmacılar tarafından tanımlanmıştır (Casarin, 2006; Casarin ve Modena, 2006; Casarin ve Modena, 2008). Tanımlanan mod şekilleri ve doğal frekanslar daha sonra bir sonlu eleman modelinin güncellenmesinde kullanılmıştır. Ünlü Roma Kolezyumu, Pau ve Vestroni (2008) tarafından deneysel modal analiz yöntemi ile test edilmiştir. Çalışmada elde edilen deneysel veriler kullanılarak sonlu eleman model güncellemesi gerçekleştirilmiştir. Prabhu (2011) ve Prabhu ve Atamturktur (2013) tarafından Washington'daki St. John the Divine katedrali üzerinde deneysel modal analiz ve optimum sensör yerleşimi ile ilgili çalışmalar gerçekleştirmiştir. Tarihi yapıların dinamik olarak test edilmesiyle ilgili daha önce gerçekleştirilen çalışmalara ek olarak, bazı ilave çalışmalardan da söz edilebilir. Deneysel Modal Analiz testleri ile ilgili Roma'da tarihi bir bazilika (Pau ve Vestroni, 2013), 2009 Abruzzo depreminde hasar gören L'Aquila'daki bir kale (Lorenzoni, 2013), Portekiz'de bir kilise (Alaboz, 2009), İspanya'da büyük bir katedral (Caselles vd., 2012; Elyamani vd., 2017a; Elyamani vd., 2017b) ve Kıbrıs'ta yer alan Gotik bir katedral, bir Doğu Roma kilisesi, bir kilise kalıntıları ve bazı okullar (Lourenço vd., 2012; Votsis vd., 2012; Chrysostomou vd., 2013; Votsis vd., 2013) araştırmacılar tarafından incelenmiştir.

Deneysel modal analiz yöntemi ile kısa süreli izleme kapsamında gerçekleştirilen diğer bazı örnek çalışmalar; **camii** (Beyen, 2008; Çalık vd., 2014), **minare** (Bayraktar vd., 2008; Bayraktar vd., 2011; Yanık vd., 2022a), **kule** (Ellis, 1998; Gentile ve Saisi, 2007; Bayraktar vd., 2009a; Ivorra vd., 2011; Foti vd., 2012a; Gentile vd., 2016; Ubertini vd., 2016; Diaferio vd., 2018; Invernizzi vd., 2019; Yanık vd., 2022b), **köprü** (Armstrong vd., 1995; Bensalem vd., 1995; Roca ve Molins, 1997; Bensalem vd., 1998; Nasser, 2001; Brencich ve Sabia, 2008; Krstevska vd., 2008a; Bayraktar vd., 2009b; Bayraktar vd., 2010;

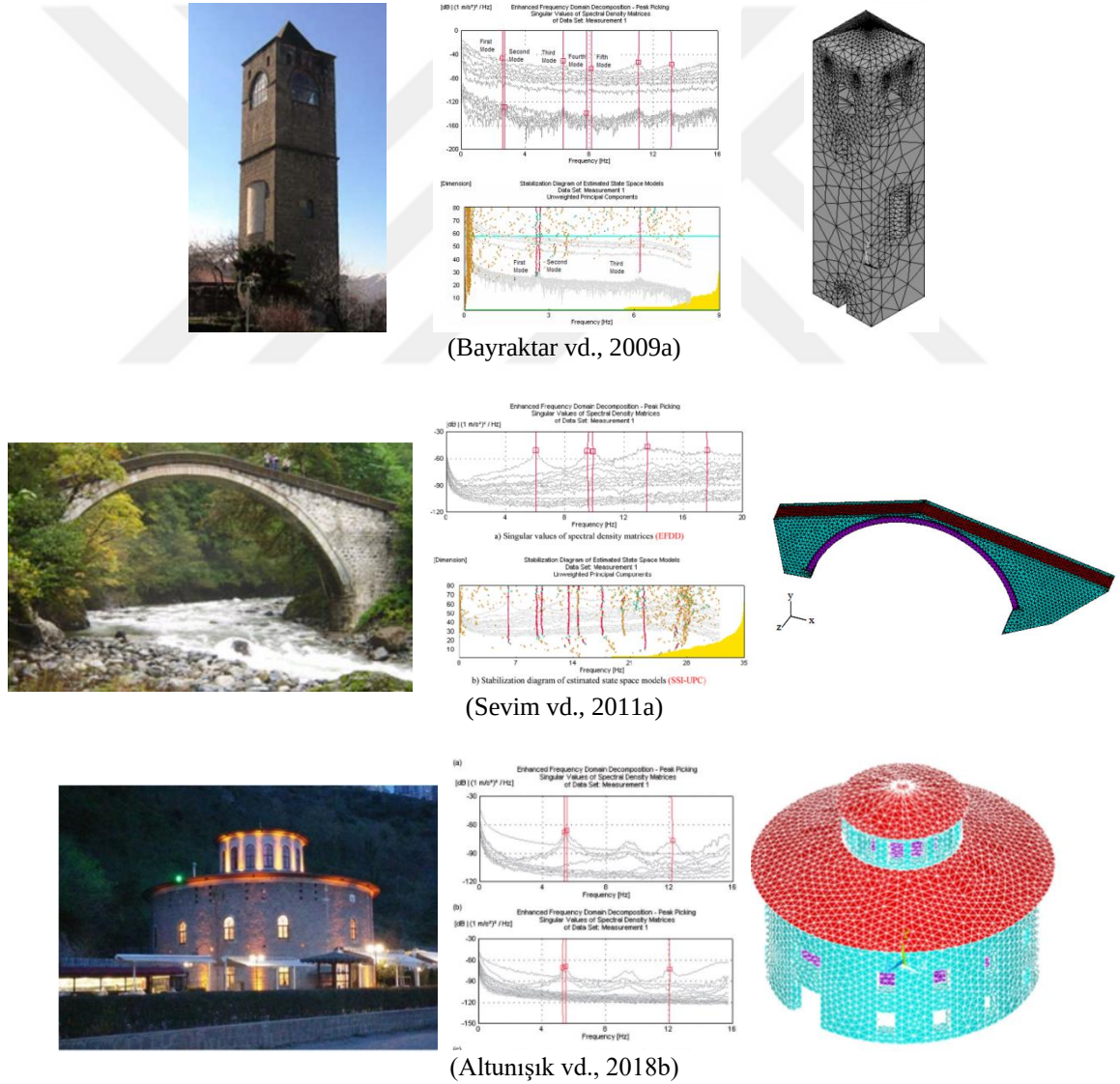
Altunışık vd., 2011; Pau ve Vestroni, 2011; Sevim vd., 2011a; Sena-Cruz vd., 2013; Bayraktar vd., 2015; Pepi vd., 2017), **kilise** (Lourenco vd., 2012; Votsis vd., 2012; Ramos vd., 2013), **burç-kale** (Altunışık vd., 2016b; Altunışık vd., 2018a; Masciotta ve Ramos, 2019), **bina** (Capecchi vd., 1990; Angotti vd., 1992; Slastan ve Foissner, 1995; Vestroni vd., 1996; Genovese ve Vestroni, 1998; Sigmund ve Herman, 1998; Compan vd., 2017; Altunışık vd., 2018b; Ercan, 2018), **yığma sütunlar** (Llorens vd., 2001; Araiza, 2003), **yüksek yapılar** (Aoki vd., 2008; Corbi vd., 2013; Gentile ve Saisi, 2013) vb. yapılar literatürde incelenmiştir. Tarihi yapıların deneysel modal analiz ölçümleri ile ilgili Elyamani ve Roca (2018) tarafından derleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Titreşime dayalı hasar tespiti çalışmaları kapsamında deneysel modal analiz testi akış diyagramı Şekil 1.2’de sunulmaktadır.



Şekil 1.2. Deneysel Modal Analiz yöntemi ile dinamik karakteristiklerin elde edilmesi (Okur, 2017).

Titreşime dayalı hasar tespiti yöntemlerinden bir diğeri de sonlu eleman model güncellemesidir. Model güncelleme, mevcut hasar tahmini için kullanılabileceği gibi, sayısal modeller üzerinde gerçekleştirilecek farklı yükleme simülasyonları için de kullanılmaktadır. Böylece başlangıç sonlu eleman modelinde kabul edilen malzeme ve sınır koşulları, deneysel verilere göre güncellenerek iyileştirilmiş sonlu eleman modelleri üzerinden gerçekçi sonuçlar elde edilebilmektedir. Özellikle tarihi yapıların sismik davranışlarını

doğru bir şekilde tahmin edebilmek amacıyla literatürde sıklıkla kullanılmaktadır (Ivorra ve Pallares, 2006; Casciati ve Al-Saleh, 2010; Bayraktar vd., 2011; Chiorino vd., 2011; Sevim vd., 2011b; Boscatto vd., 2012; Foti vd., 2012b; Bocato vd., 2013; Pau ve Vestroni, 2013; Altunışık vd., 2017; Clementi vd., 2017; Altunışık vd., 2018c; Altunışık vd., 2018d; Altunışık vd., 2018e; Gentile vd., 2019; Pellegrini vd., 2018). Sonlu eleman modellerinin güncellenmesinde kullanılan belirsiz parametrelerin tahmininde kullanılan duyarlılık analizlerinin, son yıllarda farklı istatistiki ve yazılım alanlarındaki gelişmeler ile oldukça hızlı ve başarılı bir şekilde uygulama olanağı doğmuştur. Şekil 1.3'te tarihi yapılar üzerinde gerçekleştirilmiş örnek çalışmalar sunulmaktadır.



Şekil 1.3. Tarihi yapıların Deneyisel Modal Analiz testleri ve Sonlu Eleman modelleri ile ilgili örnek grafik ve modeller

Tarihi yapıların titreşime dayalı yapı sağlığı izlemesi ile ilgili literatürde yer alan diğer örnek yayınlar aşağıda özet olarak sunulmaktadır.

De Sortis vd. (2005), ele aldıkları yığma bir binanın deneysel modal analiz yardımıyla dinamik karakteristiklerini elde etmiş ve elde edilen deneysel veriler üzerinden binanın sayısal modelini güncellemişlerdir. Yan vd. (2007), titreşime dayalı hasar tespiti ile ilgili gelişmeleri derlemişlerdir. Hugo vd. (2008), tarihi bir kilise binası üzerinde fiber sensörlerle yapı izlemesi gerçekleştirmiştir. Çalışmada 19 yer değiştirme sensörü ve 5 sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Çalışma ile yapısal davranışa ait daha derin bilgi sağlayacak verileri toplamak ve iyileştirme müdahalelerinin planlanmasına yardımcı olmak amaçlanmıştır. Ramos vd. (2008), Portekiz'deki Mogadouro Saat Kulesi'ni ve 2005 yılında gerçekleştirilen konsolidasyon çalışmalarının etkilerini deneysel modal analiz testleri ile incelemiştir. Yapısal rehabilitasyondan önce ve sonra iki deneysel modal analiz testi kullanarak, sonlu eleman model güncellemesi ile yapıda ciddi hasarın varlığını tespit etmişlerdir. Bani-Hani vd. (2008), Ürdün'de yer alan tarihi bir minarenin ortam titreşim testine dayalı yapı sağlık izlemesini gerçekleştirmiştir. Minarenin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli SAP2000 bilgisayar programının oluturulmuş ve ortam titreşim testi sonuçları, eski taş ve bozulmuş harcın ölçülen özellikleri ile deneysel olarak elde edilen modal parametrelere göre güncellenmiştir. Anastasi vd. (2009), İtalya'da yer alan tarihi bir yapı üzerinde kablosuz sensör ağı ile yapı sağlığı izleme sistemi kurmuştur. Sistemde titreşim sensörlerine ek olarak, sıcaklık, nem ve şekildeğiştirme sensörleri de kullanılmıştır. Ramos vd. (2010a), yaptıkları çalışmada yığma yapılarıdaki hasarı erken bir aşamada titreşim ölçümleriyle keşfetmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla dinamik hasar tespit yöntemlerine dayalı bir yaklaşım sunulmuştur. Yaklaşımı değerlendirmek için laboratuvarda bir kemer modeli inşa edilmiştir. Daha sonra, kemere hasarlar verilerek ve deneysel modal analiz testleri uygulanmış ve farklı hasar tespit yöntemlerinin etkinliği araştırılmıştır. Ramos vd. (2010b), Portekiz'de yer alan tarihi saat kulesi ve kilise binaları üzerinde titreşim, sıcaklık ve nem değerleri üzerinde sürekli izleme gerçekleştirmiştir. Çalışmada çevresel etkilerin frekans değerleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve çevresel etkilerin göz ardı edilmemesi gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmada yapıların sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve model güncelleme gerçekleştirilmiştir. Ramos (2010c) Portekiz'in Guimaraes kentinde yer alan ve zemin oturmaları ile ağır hasar alan San Torcato Kilisesi'nin yapısal güçlendirmeden önce, titreşim testleri, sonlu eleman model güncellemesi yapılmış ve dinamik analizler uygulanmıştır. Aras vd. (2011), yaptıkları çalışmada Beylerbeyi Sarayı'nın deneysel modal analizini

gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada oluşturulan sonlu eleman modeli deneysel sonuçlara göre kalibre edilmiştir. Prabhu (2011), yaptığı çalışmada bir kemer yapısını ve tarihi bir katedrali ele almıştır. Deneysel çalışmada kemer model üzerinde gürültü sinyallerinin hasar göstergeleri üzerindeki etkilerini incelemiş, katedral yapısı üzerinde optimum sensör yerleşimi ile ilgili çalışmalar gerçekleştirmiştir. Ayrıca çalışmada sonlu eleman model güncellemesi gerçekleştirmiştir. Boscato vd. (2015), tarafından L'Aquila'daki (İtalya) 2009 depreminde ciddi şekilde hasar gören S. Maria del Suffragio kilisesinin sonlu eleman modeli üzerinde bütünsel ve yerel güncelleme teknikleri uygulanmıştır. Güncellenen sonlu eleman modelleri ile yapının sismik davranışı araştırıldı. Kılıç (2015), yaptıkları çalışmada, GPR ve kızılötesi termografi tarafından sağlanan daha kapsamlı teknik testler ile görsel inceleme ile birleştirilmiş entegre yapı sağlığı izleme yaklaşımını önermiştir. Yöntem ile binanın çeşitli yerlerindeki önemli çatlaklar ve diğer hasarlar ortaya çıkarıldı. Ramos vd. (2015), tarihi yapıların yapısal değerlendirmesi için tahribatsız ve tahribatlı testler ile uygulanan Bayesian tekniklerine dayalı bir metodoloji sunmaktadır. Metodolojinin amacı, parametre tahmininin belirsizliklerini azaltmaktır. Çalışmada Saint Torcato kilisesinin granit taşı için elastisite modülü, örnek parametre olarak seçilmiştir. Boscato vd., (2016), ele aldıkları tarihi kule, kilise ve saray yapılarında sürekli izleme ile alakalı ivmeölçer yerleşimi konfigürasyonları üzerinde çalışmışlar ve sensörlerin konfigürasyonu, basitleştirilmiş prosedürlerden kaçınarak yapısal düzensizliği tanımlayacak şekilde uygun olması gerektiği sonucuna varmışlardır. De Stefano vd. (2016), İtalya'da yer alan farklı tarihi yapılar üzerinde gerçekleştirilen yapı sağlığı izleme uygulamalarını derlemiştir. Lorenzoni vd. (2016), tarihi yapılar üzerinde yapı sağlığı izleme uygulaması gerçekleştirdi. Çalışmada veri işleme tarafından oluşan belirsizlik ölçümü, statik ve dinamik izleme parametrelerinde azalma için geliştirilmiştir. Hasar tespit algoritmaları uygulanarak yapısal hasarın neden olduğu değişiklikleri değişen çevresel koşullarının neden olduğu değişikliklerden ayırt etmek için tahmin edilen değerler etrafında güven aralıkları hesaplanmıştır. Compan vd. (2017) Almanya'da yer alan tarihi bir kilise üzerinde deneysel modal analiz testleri gerçekleştirmiş ve kilisenin sonlu eleman modeli genetik algoritma kullanılarak iyileştirilmiştir. Milano'daki (İtalya) San Vittore çan kulesinin otomatik model güncellemesini yürüten Cabboi vd. (2017), çalışmasında RSM (response surface models) ile kulenin üç boyutlu sonlu eleman modelini güncellediler. Benzer şekilde, Torres vd. (2017), Santiago Metropolitan Katedrali'nin (Şili) RSM tabanlı bir model güncellemesini önermiştir. Ortam titreşim testi ve gradyan tabanlı bir optimizasyon yöntemi kullanan bu yazarlar, deneysel ve sayısal doğal frekanslar

arasındaki farkları en aza indirerek bir sonlu eleman modelinin elastik parametrelerini tahmin etmiştir. Finotti vd. (2017) ve Marrongelli vd. (2018), yapısal hasarları saptamak için derin öğrenme kullanarak doğal frekansa dayalı yeni bir teknik geliştirmişlerdir. Doğal frekansların ve sıcaklığın evrimi, İtalya'daki tarihi Gabbia kulesinin derin öğrenme modeli için girdi olarak kullanmışlardır. Böylece deprem öncesi, sırası ve sonrasında yapısal davranışın kaydını içeren girdi verisine karşın iki hasar sınıfı (hasarlı ve hasarsız) elde edilmiştir. Tarihi kuleden elde edilen testler, önerilen tekniğin hasar tespiti ve yapı sağlığı için uygunluğunu göstermiştir. Lamonaca vd. (2018), ivmeölçer sensörlerinden elde edilen verilerden İtalya'daki San Fili Kalesi'ndeki hasarı belirlemek için kalibre edilmiş bir sonlu eleman yöntemi önermiştir. Vincenzi ve Savoia (2015) tarafından önerilen RSM ve diferansiyel evrim algoritmasının kombinasyonuna dayanan model güncelleme yaklaşımı, Modena'daki (İtalya) San Felice sul Panaro ortaçağ kalesinin bir sonlu eleman model güncellemesi için Bassoli vd. (2018) tarafından kullanılmıştır. Sonuçta, 2012'deki Emilia depremi sırasında yapının sonlu eleman modelinin elastik parametrelerindeki yerelleştirilmiş varyasyonlar şeklinde yaşadığı hasar durumlarının tanımlanması için kullanılan model güncelleme yaklaşımının yeterliliğini göstermiştir. Altunışık vd. (2018c), deneysel ve sayısal doğal frekanslar arasındaki farkların en aza indirilmesine dayalı olarak Trabzon'da yer alan bir cephanelik binasının otomatik bir sonlu eleman model güncellemesini sundular. Cavalagli vd.(2018), İtalya'nın Perugia kentindeki San Pietro çan kulesinin üç boyutlu sonlu eleman modeli için türev içermeyen bir model güncelleme algoritması kullanıldı. Ortam titreşim testleri ile güncellenen sonlu eleman modelinin, 2016 yılında Orta İtalya'da meydana gelen sismik olaylarda kulenin yaşadığı hasarı simule edebileceğini gösterdi. Pachon vd. (2018), deneysel olarak tanımlanmış modal özellikler ve bir genetik optimizasyon algoritması temelinde Córdoba (İspanya) şehrinde bulunan tarihi E. Torroja köprüsünün üç boyutlu bir sonlu eleman model güncellemesini gerçekleştirdiler. Potenza vd. (2018), düşük maliyetli bir kablosuz sensör ağı aracılığıyla hasarlı Basilica S.Maria di Collemaggio yapısının uzun süreli yapısal izlemesini gerçekleştirmişlerdir. Dal Cin ve Russo (2019), yağma tarihi yapıya uygulanan uzun vadeli bir izleme sistemi tarafından kaydedilen verilerin güvenilirliğinin değerlendirilmesine olanak sağlayan araştırmayı tartışmışlardır. Uzun süreli izlemede karmaşık yükleme durumları altında yapının durumu incelenmiştir. Kita vd. (2019), İtalya Gubbio'da yer alan Consoli sarayı üzerinde uzun süreli yapı sağlığı izleme sistemi kurarak sıcaklık değişimlerinin yapının statik ve dinamik davranışlarına etkisi incelenmiştir. Çalışmada yapının sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve

model güncellemesi gerçekleştirilmiştir. Garcia-Macias ve Ubertini (2020), Perugia, İtalya’da bulunan Sciri Kulesi üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmayı ele almaktadır. Bu çalışmada, tarihi kulelerin yapısal olarak tanımlanması için otomatikleştirilmiş deneysel modal analiz ve gürültü dekonvolüsyon interferometrisi teknikleri kullanılmıştır. Bu teknikler, tarihi yapıların çalışma koşullarını ve performansını izlemeyi ve güncellemeyi hedeflemektedir. Özellikle Sciri Kulesi üzerinde gerçekleştirilen bu çalışma, tarihi yapıların tam yapısal tanımlanması sürecinin nasıl otomatikleştirilebileceğini ve bu tekniklerin nasıl kullanılabileceğini açıklamaya çalışmaktadır. Bu sayede, tarihi yapıların korunması ve restore edilmesi süreci optimize edilebilir. Silva vd. (2020), yaptıkları çalışmada, Portekiz’in Lisbon şehrinde bulunan Jerónimos Manastırı gibi Dünya Miras Listesi’nde bulunan binaların izlenmesi için düşük maliyetli veri toplama ünitesi tasarlamışlardır. Makalede, bu ünitelerin iklim değişikliklerine maruz kalan binaların durumunu takip etmek için kullanılabileceği önemli bir araç olacağı vurgulanmıştır. Ayrıca, bu veri toplama ünitelerinin kurulumunun ve kullanımının kolay olduğu ve maliyetinin düşük olduğu belirtilmiştir.

Garcia-Macias vd. (2021), yaptıkları çalışmada tarihi yapıların gerçek zamanlı yapısal değerlendirmesi için yenilikçi bir model güncelleme yaklaşımı sunmuştur. Perugia (İtalya) şehrinde yer alan Sciri Kulesi üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarla literatürde yer alan üç farklı model dikkate alınmış ve bunların etkililiği, sayısal bir modelle elde edilenlere karşı modal özelliklere ilişkin tahminlerinin regresyon analizi yoluyla bir yapı sağlığı izleme perspektifinden karşılaştırılmıştır. Carni vd. (2021), yaptıkları çalışmada akustik emisyon sinyalleri ile yapılan yapı sağlığı izleme uygulaması için daha efektif bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntemle düşük güç tüketen uzun menzilli bir iletişim sisteminin tasarımı hedeflenmiştir. Azzara vd. (2021), Lucca’nın (İtalya) tarihi merkezinde bulunan “Torre delle Ore” üzerinde sürekli izleme gerçekleştirmişlerdir. Ölçülen titreşim seviyesi genellikle çok düşük olsa da, iki farklı yüksek hassasiyetli ve doğru deney ekipmanları, araştırma grubunun tüm izleme süresi boyunca kulenin dinamik davranışını takip etmesine olanak sağlamıştır. Karanikoloudis vd. (2021), Lizbon’daki (Portekiz) Melekler Kilisesi’ndeki yapı sağlığı izleme sonuçlarını sunmuşlardır. Makalede uzun dönem yapı sağlığı izleme ile ilgili oluşabilecek hatalı uygulamalar tartışılmıştır. Barsocchi vd. (2021), çalışmada kablosuz sensör ağı ile kaydedilen sinyallerin sürekli işlenmesi için otomatik bir prosedür önermiş ve yığma bir kule üzerinde ölçümler olarak sistem denenmiştir. Bongiovanni vd. (2021), Marcus Aurelius Sütunu’nun yakın tarihli bir ortam titreşim testinden elde edilen deneysel veriler, hem zaman hem de frekans alanında analiz edilerek,

önceki deneysel çalışmalardan elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Makalede, arkeolojik anıtları analiz etmek ve korumak için multidisipliner bir yaklaşımın önemi vurgulanmıştır. Formisano vd. (2021), tarafından Poggio Picenze’de (İtalya’nın L’Aquila bölgesi) bulunan ve 2009 depreminde hasar gören iki yığma kilisenin deneysel modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel verilere göre kalibre edilen sonlu eleman modelleri yardımıyla yapıların sismik davranışları incelenmiştir. Standoli vd. (2021), yaptıkları çalışmada Ferrara (İtalya) bölgesinde yer alan dört farklı kuleye deneysel modal analiz testleri uyguladılar. Deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler yardımıyla kulelere ait sonlu eleman modelleri güncellenerek malzeme özellikleri elde edilmiştir. Milani ve Clementi (2021), Kuzey İtalya’da bulunan dört farklı çan kulesi üzerinde deneysel modal analizler gerçekleştirmiş, malzeme özellikleri genetik algoritma ile elde edilerek sonlu eleman modeli güncellenmiştir. Güncellenen sonlu eleman modeli yardımıyla kulelerin statik ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bal vd. (2021), zayıf zemine sahip Groningen (Hollanda) yer alan tarihi bir binanın depremsellik durumunu, zemin suyu ve toprak hareketlerine bağlı olarak incelemiştir. Çalışma, zemin hareketlerinin deprem etkileriyle nasıl örtüştüğünü ve sonunda küçük çatlaklara ve hasara neden olabileceğini göstermiştir. Aloisio vd. (2021), tarafından yazılan makalede Santa Maria di Collemaggio bazilikasının hem düşük yoğunluklu depremler hem de servis koşulları altında ivmeölçerlerle dinamik tepkileri değerlendirilmiştir.

Tarihi yapıların periyodik ve sürekli yapı sağlığı izleme uygulamaları ile ilgili Clementi vd. (2021) ve Gopinath ve Ramadoss (2021), tarafından derleme çalışmaları sunulmuştur. Ayrıca Mishra (2021), tarihi yapıların yapı sağlığı izleme uygulamalarında makine öğreniminin kapsamlı bir literatür çalışmasını sunmuştur.

Günümüzde bilişim teknolojileri alanında çok hızlı gelişmeler yaşanmaktadır. Nesnelerin interneti günümüzün en güncel konuları arasında yer almaktadır. Nesnelerin, sensörler, yazılımlar ve farklı donanımsal ekipmanlar ile birbirlerine bir ağ ile bağlanıp yapay zeka ve derin öğrenme gibi uygulamalarla etkileşim içerisine sokulmasına, veri toplama ve aktarım sağlamasına nesnelerin interneti adı verilir. Yapı sağlığı izleme uygulamalarının temelinde de yapıdan bilgi aktarımı olmasından dolayı, nesnelerin interneti ile elde edilen gelişmeler bir süre sonra inşaat mühendisliği alanında da farklı gelişmelere yol açmaktadır. Bu bağlamda, güncel olarak Mishra vd. (2022), tarafından inşaat mühendisliği yapılarında yapı sağlığı izlenmesi için nesnelerin interneti kullanımına ilişkin oldukça kapsamlı bir derleme sunmuşlardır. Yazarlar, yapı sağlık izleme için nesnelerin

interneti kullanmanın potansiyel faydalarının yanı sıra bu yaklaşımın zorluklarını ve sınırlamalarını tartışmışlardır. Ayrıca, yapay zeka, derin öğrenme gibi konuların da yapı sağlığı izleme sistemlerine entegre edilmesiyle beraber deneysel uygulamalarda hassas sonuçlar elde edilebilmektedir.

Mevcut yapı sağlığı izleme uygulamaları, esas olarak periyodik görsel denetimlere veya durum incelemelerine dayanmaktadır, ancak son yıllarda, yazılım ve donanım alanlarındaki gelişmeler sürekli izlemeyi mümkün kılmıştır (Chang vd., 2003). Tipik olarak, bir yapıya yüzlerce sensör kurulabilir ve veriler gerçek zamanlı olarak okunabilir. Bu nedenle, mevcut ilgi odağı yapısal açıdan ne tür bilgilerin önemli olduğu ve hasar analizi için verilerin nasıl işlenmesi ve saklanması gerektiğidir (Londono, 2006). Hasar tanımlama analizi ve ilgili izleme alanındaki en son avantajlar göz önüne alındığında, tarihi yığma yapıların dört aşamada izlenmesi önerilmektedir (Ramos, 2007; Ramos, 2008):

1. İlk aşama, tarihi yapılarla ilgili tarihsel bilgi, geometrik ve topografik araştırma, hasar araştırması, tahribatsız testler ile malzemelerin mekanik karakterizasyonu, global titreşim testi ve sayısal model analizi dahil olmak üzere farklı yönlerden yapıdan veri toplamasıdır. Ayrıca bu aşamada yapının sayısal modeli oluşturularak deneysel verilerle güncellenir. Bu aşama, “sıfır” zamanında varsayılan sağlıklı durumdaki yapısal davranışa yönelik ilk yaklaşımdır.
2. İkinci aşamada, sağlık izleme planı sınırlı sayıda sensörle yürütülebilir (örneğin bir çift referans ivmeölçer, kritik bölümlerdeki gerinim ölçerler, sıcaklık ve nem sensörleri, vb.). Veriler periyodik olarak alınarak, olumsuz durumda izleme sistemi alarm gönderebilmelidir. Çevresel ve servis koşulları etkileri incelenmeli ve hasarın varlığı global modal parametrelerle tespit edilmelidir.
3. Üçüncü aşamada, alarm tetiklendikten sonra, daha fazla sensör ve ölçüm noktası ile tam ölçekli bir titreşim testi gerçekleştirilir. Çevresel etkiler filtrelendikten sonra yapıya hasar tespit yöntemleri uygulanır. Böylece, (olası) hasarı global bir şekilde doğrulanır ve konumlandırılır.
4. Son aşamada, hasarı yerel olarak değerlendirmek ve sınıflandırmak için görsel ve tamamlayıcı hasarsız testler ile yerel uygulamalar gerçekleştirilir. Yapıda oluşan hasarı net bir şekilde tanımlamak amacıyla, erişim koşullarına bağlı olarak sonik test veya radar testleri gerçekleştirilebilir.

1.1.2. Sarsma Masası Deneyleri ile İlgili Çalışmalar

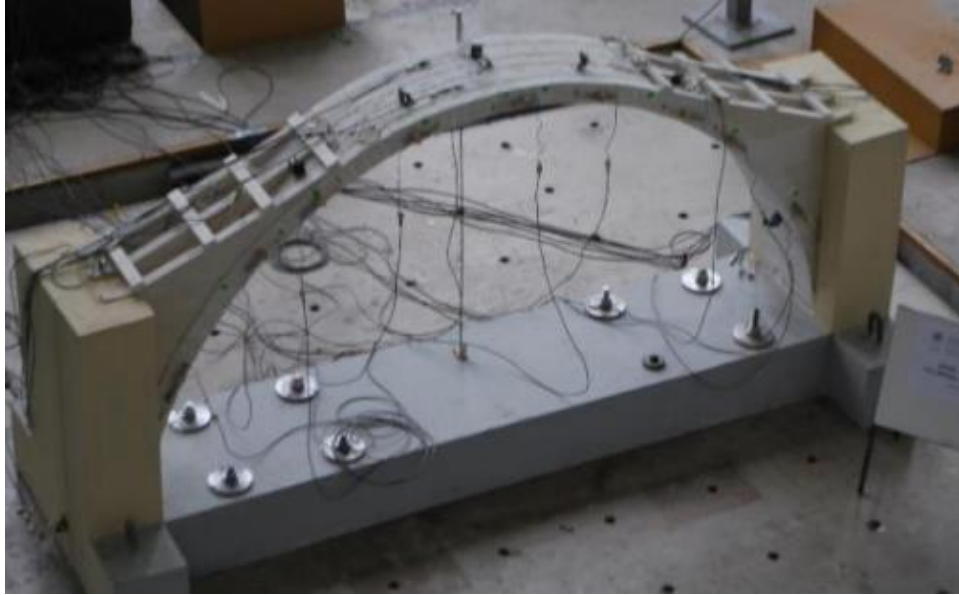
Sarsma masası deneyleri betonarme, yığma, çelik vb. yapıların gerçek dinamik davranışlarının elde edilmesine yönelik araştırmacılar tarafından sıklıkla kullanılmaktadır (Blondet vd., 1980; Modena vd., 1992; Liba vd., 1996; Lu vd., 1996; Zhang, 1997; Zarniç vd., 2001; Elwood and Moehle, 2003; Xianguo vd., 2004; De Canio vd., 2008; Ersubaşı, 2008; Rezaifar vd., 2009; Yang, 2010; da Costa, 2012; Tomaževic and Gams, 2012; Leite 2014; Velez, 2014; Vintzileou vd., 2015; Ali, 2016; Saleem vd., 2016). Bu çalışmalar sarsma masasının kapasitesine göre, prototip modelin inşa edilmesinin yüksek maliyeti nedeniyle ölçeklenmiş modeller üzerinde yapılmaktadır. Yığma yapıların sarsma masasında incelenmesine yönelik literatürde mevcut bazı çalışmalar vardır. Bunlar sismik davranışın yanında güçlendirme yöntemlerini incelemeye yönelik yapılmış çalışmalardır. Benedetti vd., (1998) ½ ölçekli iki katlı 24 adet yığma binayı sarsma masası yardımıyla test ederek güçlendirme yöntemlerini araştırmıştır. Candeias vd. (2004) yaptığı çalışmada 4 katlı yığma bir binanın 1/3 ölçekli modelini sarsma masası yardımıyla zayıf noktalarını araştırmıştır. Ramos vd. (2005), laboratuvar ortamında ürettikleri taş yığma bir bina üzerinde deneysel modal analiz yöntemi ile hasarın varlığının tespiti ile ilgili çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu bağlamda ürettikleri modelin belirli periyotlarda ölçümleri alınmış, sarsma masası testlerinde oluşan hasar, frekans ve mod şekillerindeki değişim üzerinden elde edilmiştir. Juhasova vd., (2008) yaptıkları çalışmada taş yığma basit bir bina üzerinde sarsma masası deneyleri gerçekleştirerek farklı güçlendirme yöntemlerinin etkinliklerini incelemiştir. Taş yığma binaların güçlendirilmesine yönelik yapılan diğer bir çalışmada onarım ve güçlendirme yöntemlerinin verimliliği sarsma masası deneyleri ile incelenmiştir (Mazzon vd., 2009). Liu vd. (2011) yaptıkları çalışmada 1/3 ölçekli iki katlı dolgu duvarların sarsma masası yardımıyla düzlem dışı davranışlarını ve duvar-kiriş birleşimlerini değerlendirmiştir. Portekiz’de bulunan tarihi taş yığma “gaioleiro” binalarının sismik performanslarının incelenmesine ve güçlendirilmesine yönelik yapılan çalışmada sarsma masası deneyleri ve sayısal analizler gerçekleştirilmiştir (Mendes, 2012). Nakagawa vd. (2012) yaptıkları çalışmada yığma binaların sismik performansını sarsma masası deneyleri ile incelemiştir. Mendes vd. (2014) yaptığı çalışmada mevcut yığma yapıların sismik davranışlarını sarsma masasında incelemiş, güçlendirme yöntemlerinin etkinliğini değerlendirmiştir. Sathiparan ve Meguro (2015) tarafından yapılan çalışmada tonoz çatılı kerpiç bir evin güçlendirme etkinliği sarsma masasında incelenmiştir. Bakhshi vd. (2017) yaptıkları çalışmada kerpiç

kubbe tavanlı yığma bir evin sismik performansını ve güçlendirme yöntemlerini araştırmışlardır.

Literatür çalışmaları incelendiğinde genellikle basit bina tipi yığma yapıların sarsma masasında incelendiği görülmektedir. Bunların yanında özel geometriye sahip tarihi yapıların sarsma masasında incelenmesine yönelik çok az sayıda çalışmada yapılmıştır. Makedonya’da bulunan IZIIS (Institute of Earthquake Engineering & Engineering Seismology) dinamik laboratuvarında 1986 yılından itibaren; ½ ölçekli tek katlı taş yığma bir binanın sismik davranışı (Gavrilovic vd., 1987), ½ ölçekli tarihi kerpiç bir binanın sismik davranışı (Gavrilovic vd., 1996; Tolles vd., 2000), 1990-2000 yılları arasında Nikita kilisesinin 1/2.75 ölçekli modeli üzerinde gergi ve enjeksiyon güçlendirmesi ve taban izolatörlerinin etkileri (Gavrilovic vd., 1999; Shendova vd. 2006), 1/6 ölçekli Mustafa Paşa Cami modelinin sismik performansı ve güçlendirme yöntemleri (Mazzolani vd. 2007; Krstevska vd., 2008b; Krstevska vd., 2010), 1/5.5 ölçekli Fossanova Katedrali modelinin (Krstevska vd., 2008c), 1/3.5 ölçekli Nikola Kilisesi modelinin sismik performansı ve güçlendirme yöntemleri (Tashkov vd. 2008) gerçekleştirilmiştir (Shendova vd., 2012). IZIIS laboratuvarında inşa edilen 1/6 ölçekli Mustafa Paşa Camisinin 1/10 ölçekli modeli KOERI (Kandilli Observatory and Earthquake Research institute) laboratuvarında inşa edilerek sismik davranışı ve güçlendirme yöntemleri incelenmiştir (Tashkov vd., 2012). Zhu vd. (2012) tarafından 1/12 ölçekli tarihi taş yığma tapınak modeli üzerinde sarsma masası testleri gerçekleştirilerek sismik davranış araştırılmıştır. Nikolić vd. (2017) tarafından Hırvatistan’ın Split kentinde bulunan Diocletian Sarayı’nın Peristyle meydanındaki tarihi Protian yığma yapısının sarsma masası deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kouris vd. (2017), laboratuvar ortamında inşa ettikleri taş yığma bir bina üzerinde sarsma masası deneyleri gerçekleştirmiştir. Çalışmada oluşan hasarların tahmini için frekans, mod şekli ve sönüm oranlarındaki değişimler kullanılmıştır. Krstevska vd. (2021) ve Kustura vd. (2021), tarafından Mostar köprüsü ve Split’teki antik Protiron yapısının deprem davranışları, ölçekli modeller üzerinden sarsma masası deneyleri ile elde edilmiştir. Sarsma tablası testleri sırasında ölçülen ivmeler, bağıl ve mutlak yer değiştirmeler ve gerinimlerin yanı sıra hasar tanımlaması, sismik stabilitesi, göçme mekanizması ve zayıf noktaları hakkında temel bilgiler sağlanmıştır.



Makedonya, Üsküp'te yer alan IZIIS laboratuvarında inşa edilen ölçekli tarihi yapı modelleri (Shendova vd., 2012).



Mostar köprüsünün 1/9 ölçekli laboratuvar modeli (Kustura vd., 2021).

Şekil 1.4. Tarihi yapıların sarsma masası deneylerine ait görüşler

1.2. Tezin Amacı

Tez kapsamında tarihi yapıların hasarsız deneysel yöntemlerle incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu bağlamda cami, minare, kilise, bina, kule ve köprü gibi gerçek tarihi yapılar üzerinde deneysel modal analiz (titreşim testleri) testleri yapılmış, sayısal modelleri ve model güncelleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Böylece, seçilen gerçek tarihi yapıların başlangıç (hasarsız) deneysel verileri elde edilmiştir. Bu amaç doğrultusunda gerçekleştirilen işlemler Tablo 1.1’de sunulmaktadır.

Tablo 1.1. Tez kapsamında gerçek tarihi yapılar üzerinde gerçekleştirilen işlemler

İncelenen Yapılar	Çevresel Titreşim Testleri	Sonlu Eleman Modeli	Manuel Model Güncelleme	Otomatik Model Güncelleme
Cephanelik Binası	√	√	-	√
Çorum Saat Kulesi	√	√	√	-
Yavuz Selim Okulu	√	√	√	-
İskenderpaşa Camii ve Minaresi	√	√	√	-
Santa Maria Kilisesi ve Misafirhanesi	√	√	√	-
Yeniköy Köprüsü	√	√	√	-

Tarihi yapılarda hasar tespitinin gerçekleştirilebilmesi için incelenen yapıda hasar meydana gelmesi gerekmektedir. Tez kapsamında incelenen gerçek tarihi yapılar üzerinde süreç içerisinde hasar oluşturacak herhangi bir etken oluşmaması nedeniyle hasar tespiti işlemleri gerçekleştirilememiştir. Dolayısı ile tarihi yapılarda meydana gelebilecek hasarı ve hasar tespiti yöntemlerini daha net elde edebilmek amacıyla laboratuvar ortamında ölçekli bir kemer köprü modeli inşa edilmiştir. İnşa edilen köprü üzerinde aşağıdaki hasar durumları uygulanmıştır:

- Mesnet oturması
- Köprü ayaklarında malzeme boşalması (oyulma) hasarı
- Deprem hasarı

Köprü üzerinde uygulanan hasarların tespiti amacıyla, Deneysel Modal Analiz testleri sonucunda elde edilen deneysel frekans ve mod şekilleri kullanılmıştır (Seviye 1). Ayrıca verilen hasarları onarmak amacıyla enjeksiyon, yeniden örme ve tamamlama gibi basit onarım uygulamaları gerçekleştirilmiş ve bu uygulamaların etkinlikleri Deneysel Modal Analiz testleri ile araştırılmıştır.

1.3. Tarihi Yığma Yapılar

1.3.1. Tarihi Yığma Yapılarda Kullanılan Malzemeler

Tarihi yapılar genellikle yığma tekniğiyle inşa edilmiştir. Taş-tuğla ve harç kullanılarak inşa edilen elemanlara yığma (kâgir) malzemeler denilmektedir. Taş, tuğla, kerpiç gibi doğal malzemeler kullanılarak inşa edilen bu yapılar basınç dayanımları oldukça yüksek, çekme dayanımları ise oldukça düşüktür. Bu nedenle bu tür yapılar basınç dayanımını taşımaya yönelik tasarlanmışlardır. Çekme dayanımlarını karşılamaya yönelik zaman içerisinde farklı harç karışımları geliştirilmiştir. Harç dayanımının da oldukça zayıf olmasından dolayı yapılarda meydana gelecek çekme gerilmelerini karşılamak için ahşap ve metal elemanlar kullanılmıştır. Ayrıca yapıların belirli bölümleri ahşap olarak inşa edilmiştir.

1.3.1.1. Doğal Taş Malzeme

İnsanlığın ve yapı mühendisliğinin ilk yapı elemanı olan taş malzeme, binlerce yıl boyunca kullanılmaktadır. Kolay erişilebilir olması ve işleme kolaylığı nedeniyle taş malzeme tarih boyunca tercih sebebi olmuştur. Eski Mısırlılar Aswan granitlerini, Hititliler bazalt taşlarını Urartular volkanik tüfleri, Yunan uygarlıkları mermerleri, Romalılar bazalt, mermer, kireçtaşı, traverten ve volkanik tüfleri, Kommagene krallığı kireçtaşlarını, Selçuklular mermer, andezit, bazalt, volkanik tüf ve yumuşak kalkerleri, Osmanlılar ise traverten, mermer, küfeki, serpantin ve renkli granitleri yoğun olarak kullanmışlardır (MTA, 2018).

Tarihi yapılarda taş; taşıyıcı, kaplama elemanı, süsleme elemanı ve dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Yüksek dayanımından dolayı tercih edilen taş malzeme, basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı ise nispeten düşüktür. Bu nedenle kullanıldıkları yapı bölümleri, çekme gerilmelerinin oluşmaması için yalnızca basınca çalışacak şekilde tasarlanırlar. Taş malzeme basınç gerilmeleri altında oldukça stabil olmasına karşın, zaman içerisinde meydana gelen sıcaklık değişimleri, donma çözülme olayları gibi yapı içerisinde çekme gerilmesi oluşturan olumsuz çevre koşulları, malzeme üzerinde çatlaklara ve hasara neden olmaktadır.

Tek bir kelime ile ifade edilen “taş” malzeme, dayanım, yoğunluk, boşluk oranı, sertlik vb. birçok farklı yapısal özellikten dolayı fazla sayıda sınıflandırmaya sahiptir. Tablo 1.2’de bazı taşlara ait mekanik özellikler sunulmuştur.

Tablo 1.2. Farklı taş cinslerine ait mekanik özellikler (Yılmaz, 2006).

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

1.3.1.2. Tuğla Malzeme

Tarihi yapılarda kullanılan yapı malzemelerinden biri de tuğladır (harman tuğlası). Kullanımı Roma’dan da eskiye dayanan tuğla, Roma’da almaşık duvar yapılarında, Selçuklu ve Osmanlı’da ise kemer, tonoz, minare gibi yapılarda sıklıkla kullanılmıştır.

Tuğla, kilin yüksek sıcaklıklarda pişirilmesiyle elde edilen bir yapı malzemesidir. Tuğlanın fırınlarda pişirilmemiş haline ise kerpiç adı verilmektedir. Tuğlanın dayanım kazanabilmesi için iyi bir şekilde pişirilmesi gerekmektedir. Tuğla malzemenin, taş malzemeye benzer şekilde basınç dayanımı çekme dayanımına göre yüksektir. Dolayısı ile yapıda basınç dayanımı etkisinde çalışacak bölgelerde kullanılır. Dabanlı, (2008)’e göre tuğlanın mekanik özelliklerine ait yaklaşık değerler Tablo 1.3’te sunulmaktadır.

Tablo 1.3. Tuğla malzemenin ortalama mekanik özellikleri (Dabanlı, 2008).

	Basınç Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Tuğla	3-10	0.2-0.5	1000-5000

Literatürde tuğla malzemenin mekanik özelliklerine ait farklı değerler de sunulmaktadır. Tuğlaların fırınlama durumuna göre 1-3 kat basınç dayanımında değişiklik olabildiği, basınç dayanımlarının 10-30MPa arasında değiştiği, çekme dayanımı basınç dayanımının %10’u, kayma dayanımı ise basınç dayanımının %30’u kadar olduğu belirtilmiştir (Ünay, 2002).

1.3.1.3. Harç Malzeme

Harç malzeme literatürde farklı biçimlerde ifade edilse de genel anlamda taş ve tuğla gibi yığma birimler arasında bağlayıcılık görevi üstlenen ve yığma örgünün tamamlanmasını sağlayan yapı malzemesidir. Tarihi yapılarda kullanılan harç malzeme dönemin koşullarına ve tedarik durumlarına göre farklılık göstermiştir. Genel olarak harçlar, bağlayıcı, agrega ve bazen farklı katkı maddeleri de ihtiva etmektedir. Bağlayıcı olarak yaygın olarak kireç kullanılsa da nispeten nadir de olsa çamur ve alçı da kullanılmıştır. Agrega olarak ise, kum, taş ve kiremit kırıkları kullanılmıştır (Dabanlı, 2008).

Eski uygarlıklarda çamur bağlayıcılı harçlar kullanılmıştır. Romalıların kireç harcını kullanması ile beraber günümüze kadar kireç esaslı harçlar kullanılmaya devam etmiştir. Zaman içerisinde farklı formlarda üretilen harçlara Romalılar pişmiş kil ve puzolanik katkıları karıştırarak suyla reaksiyona giren ve sertleşen bir malzeme elde ettiler. Kireç harcı Roma, Selçuklu ve Osmanlılar'da yaygın olarak kullanılmıştır. Tarihi yapılarda kullanılan kireç malzemesi uzun zaman içerisinde priz almakta ve dayanımı devamlı olarak artmaktadır. Bu nedenle daha erken dayanım alması için içerisine kan, yumurta, peynir, gübre, arap zıkkı, hayvan tutkalı, bitki suları, kazein vb. organik ve inorganik katkıları katılmıştır (Sickels, 1981). Ayrıca harcın çekme dayanımını artırmaya yönelik keten, saman ve çeşitli hayvanların tüyleri gibi lifli malzemeler de katkı olarak kullanılmıştır.

Ülkemizde yer alan tarihi yapıların çoğunda horasan harcı kullanılmaktadır. Horasan harcı, hava kirecine, kırılmış öğütülmüş kiremit ve tuğla tozu benzeri pişmiş killerin katılması ile üretilen harca denir. İçeriğindeki tuğla kırıkları nedeniyle tarihi yapılardaki pembemsi harçlar horasan harcı olarak ifade edilmektedir. Horasan harcı çok uzun zamanda sertleşen bir malzemedir. Dolayısı ile kullanıldıkları dönemlerde yapı temelleri inşa edildikten sonra üst yapıya geçmeden uzun bir süre beklenilirdi. Tablo 1.4'te İstanbul'da yer alan bazı tarihi yapılardaki harçların basınç dayanımları sunulmuştur.

Tablo 1.4. İstanbul'da yer alan bazı tarihi yapılardaki harçlara ait basınç dayanımları (Kahraman, 2008).

Tarihi Yapılar	Nokta Yükleme Testi Basınç Dayanımı (MPa)	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa)
Bukoleon Sarayı derz harcı	0.8	8
Lausos Sarayı derz harcı	0.6	6
Aya İrini derz harcı	0.5	5
Acem Ağa Mescidi derz harcı	0.5	5
Aspar Su Sarnıcı çekirdek harcı	0.4	4

1.3.1.4. Yığma (Kâgir) Malzeme

Taş ve tuğla gibi elemanların bağlayıcı harç ile bir araya getirilerek örgü dizilimi oluşturulması ile elde edilen malzemeye yığma (kâgir) adı verilir. Duvar, kemer, tonoz, kubbe gibi yapı elemanların inşasında kullanılır. Kargir malzemenin dayanımı, kullanılan malzeme, işçilik, yapım tekniğine, çevre şartlarına ve zamana bağlıdır (Çamlıbel, 2000). Genel olarak yığma malzeme basınç gerilmelerini taşımaya yönelik kullanılır. Çekme ve kayma dayanımları ise düşüktür. Yığma malzemenin dayanımı harcın dayanımına doğrudan bağlıdır. Malzemenin çekme ve kayma dayanımı olarak harcın malzeme özellikleri kullanılabilir.

Taşın basınç dayanımı, cinsine bağlı olarak oldukça farklı değerler alabilmektedir. Harcın dayanımı ise önemli ölçüde içerdiği bileşenlerin karışım oranlarına bağlıdır (Pauley and Priestley, 1992). Dolayısı ile her bir yığma yapının malzeme ve inşa tekniğine bağlı olarak farklı mekanik özellikleri olduğu rahatlıkla düşünülebilir. Bunun yanında, yüksek birim hacim ağırlığı, düşük çekme-kayma dayanımı ve düşük süneklik bu tür yapıların ortak özelliğidir (Mendes, 2012).

Yığma malzemede kullanılan harç, taş ve tuğlaya göre oldukça zayıftır ve yığma malzemede oluşan hasarlar genellikle harç üzerinde meydana gelir. Harç arayüzünde çekme ve kayma gerilmelerinin neden olduğu iki ayrı göçme modu meydana gelir. Harç ile ilgili yapılan deneysel çalışmalardan anlaşıldığına göre, harç arayüzünde meydana gelen elastik ötesi davranış tamamen plastiktir (Lourenço, 2000).

Yığma yapıların mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik hasarlı ve hasarsız pek çok deney kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak bazı araştırmacılar tarafından geliştirilen ampirik formüller yardımıyla da mekanik özellikler tahmin edilmeye çalışılmaktadır. Tomazeviç (1999)'e göre yığma yapıların genel malzeme özellikleri Tablo 1.5'te verilmektedir.

Tablo 1.5. Yığma yapıların genel malzeme özellikleri (Tomazeviç 1999).

	Taş Yığma	Tuğla Yığma
Basınç Dayanımı (MPa)	0.3-0.9	1.5-10.0
Çekme Dayanımı (MPa)	0.08-0.21	0.10-0.70
Elastite Modülü (MPa)	200-1000	1500-3800
Kayma Modülü (MPa)	70-90	60-165

İstanbul Valiliği ve Vakıflar Genel Müdürlüğü'nün ortak çalışması kapsamında çıkarılan “Tarihi Yapılar için Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu” isimli klavuzda (TYDRYK, 2017) tarihi yapılardaki duvarların mekanik özellikleri ile ilgili örnek değerler sunulmuştur (Tablo 1.6). Ayrıca yığma duvarların mekanik özelliklerinin, harç, işçilik ve duvarın enine bağlatı durumlarına göre düzeltme katsayıları ile revize edilmesi önerilmiştir (Tablo 1.7).

Tablo 1.6. Yığma duvar malzemelerinin mekanik özellikleri (Magenes ve Penna, 2009; TYDRYK, 2017).

Duvar Türü	Basınç Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (kPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Kayma Modülü (MPa)	Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)
Moloz taşlı yığma duvar	0.6-0.9	20-32	690-1050	115-175	19
Kaba yonu taşlı yığma duvar	1.1-1.6	35-51	1020-1440	170-240	20
Kesme taşlı iyi bağlantılı yığma duvar	1.5-2.0	56-74	1500-1980	250-330	21
Yumuşak taşlı (kalker, tüf) yığma duvar	0.8-1.2	28-42	900-1260	150-210	16
Düzgün kesme taşlı, sıvalı yığma duvar	3.0-4.0	78-98	2340-2820	390-470	22
Kireç harçlı tuğla yığma duvar	1.8-2.8	60-92	1800-2400	300-400	18

Tablo 1.7. Yığma duvarların mekanik özelliklerinin, harç, işçilik ve duvarın enine bağlatı durumlarına göre düzeltme katsayıları (TYDRYK, 2017).

Duvar Türü	İyi Bağlayıcı Harç	İyi Düzenlenen Derzli Duvar	Enine Bağlantılı Duvar	Harç Enjeksiyonlu Duvar	Donatılı Sıva İle Güçlendirilmiş Duvar
Moloz taşlı yığma duvar	1.5	1.3	1.5	2.0	2.0
Kaba yonu taşlı yığma duvar	1.4	1.2	1.5	1.7	2.0
Kesme taşlı iyi bağlantılı yığma duvar	1.3	1.1	1.3	1.5	1.5
Yumuşak taşlı (kalker, tüf) yığma duvar	1.5	-	1.5	1.7	2.0
Düzgün kesme taşlı, sıvalı yığma duvar	1.2	-	1.2	1.2	1.2
Kireç harçlı tuğla yığma duvar	1.3	-	1.3	1.5	1.5

Literatürde düzenli örgüye sahip yığma yapılar için farklı ampirik formüller sunulmaktadır. Bunlar genellikle yığma birim ve harcın elastisite ve basınç dayanımları ile geometrik özelliklere göre oluşturulmuştur. Lourenço (2001), yığma duvarların elastisite modüllerini tahmin etmeye yönelik, malzemelerin elastisite modülleri ve geometrik özelliklerine bağlı olarak aşağıdaki formülü geliştirmiştir;

$$E_k = ((t_h + t_t) / [(t_h/E_h) + (t_t/E_t)]) \times \rho_k \quad (1.1)$$

bağıntıda yer alan E_k , yığma malzeme elastisite modülü, t_h , harç kalınlığı, t_t , yığma birim kalınlığı, E_h , harcın elastisite modülü, E_t , yığma birim elastisite modülünü temsil etmektedir. ρ_k ise yığma birim ile harç arasındaki aderansı ifade eden ve 0-1 arasında değer alabilen bir katsayıdır. Ortalama 0.5 kabul edilebilir. Bu bağıntı taş duvarlar için de kullanılabilir.

Yığma duvarların basınç dayanımlarını tahmin etmeye yönelik Eurocode6'da (2005) ampirik bir formül sunulmuştur;

$$f_{bk} = K \times f_{tuğla/taş}^{0.65} \times f_{harç}^{0.25} \quad (1.2)$$

bağıntıda yer alan f_{bk} , yığma duvar basınç dayanımını, $f_{tuğla/taş}$, yığma birim basınç dayanımını, $f_{harç}$ ise harç basınç dayanımını ifade etmektedir. K değeri, yığma yapının tipine bağlı olarak 0.4 ile 0.6 arasında değer alan bir değişkendir.

1.3.1.5. Ahşap Malzeme

Ahşap malzeme hafif olmasının yanında, kolay işlenebilirliği, çekme ve basınca dayanımı nedeniyle inşaat alanında tarih boyunca tercih sebebi olmuştur. Genellikle konut yapılarında kullanılan ahşap malzeme, tarihi yığma yapılarda zayıf zeminlerde kazık, duvarlarda hatıl, kemerlerde gergi, döşemelerde kiriş ve kaplama ve çatılarda taşıyıcı ve kaplama elamanı olarak kullanılmıştır. Ahşap malzeme mekanik özellikleri ve emniyet gerilmeleri ile ilgili TS647'de (1979) Tablo 1.8 ve Tablo 1.9'daki değerler önerilmiştir.

Tablo 1.8. Ahşap malzemelerin TS 647'ye göre malzeme özellikleri (TS647, 1979).

Ahşap Malzeme Türü	Elastisite Modülü (kg/cm ²)		Kayma Modülü (kg/cm ²)
	Liflere Paralel	Liflere Dik	
İğne yapraklı	100000	3000	5000
Meşe, Kayın	125000	6000	10000

Tablo 1.9. Masif Ahşap Malzemenin Emniyet Gerilmeleri (TS647, 1979).

Gerilme Türü	Emniyet Gerilmeleri (kg/cm ²)			
	İğne Yapraklılar			Meşe, Kayın
	I. sınıf	II. sınıf	III. sınıf	
Eğilme	130	100	70	110
Liflere paralel çekme	105	85	0	100
Liflere paralel basınç	110	85	60	100
Liflere dik basınç	20	20	20	30
Makaslama	9	9	9	10

1.3.1.6. Metal Bağlantı Elemanları

Tarihi yığma yapılarda metal elemanlar kenet, zıvana ve gergi gibi farklı amaçlarla kullanılmıştır. Metal elemanlar yapıda oluşan çekme gerilmelerini karşılamak amacıyla kullanılmıştır. Birbirinden ayrı taşları bağlamak amacıyla kenet demiri kullanılmıştır. Kenet demirleri, duvarlarda, kemerlerde ve özellikle minarelerde yatay bağlantıyı sağlamak için sıklıkla kullanılmıştır. Zıvana demirleri ise hem yatay hem düşey bağlantıyı sağlamak için sütun, kemer, ve minarelerde sıklıkla kullanılmıştır. Gergi demirleri ise genellikle kemer ve tonozlarda, kemer ve tonoz mesnetlerinin açılmasını önlemek amacıyla kullanılmıştır.

1.3.2. Tarihi Yığma Yapıları Oluşturan Taşıyıcı Sistemler

Her biri kendine has mimarisi olan tarihi yapılar farklı taşıyıcı elemanların biraraya getirilmesi ile inşa edilmiştir. Tarihi yapılarda sıklıkla kullanılan taşıyıcı elemanlar temeller, duvarlar-payandalar, sütunlar-ayaklar, kemerler, tonozlar, kubbeler ve döşemeler olarak sıralanabilir. Ayrıca kubbeden kemere geçiş elemanı olarak pendentifler ve kubbelerin stabilitesini artırmak amacıyla ağırlık kuleleri gibi yapı elemanları da tarihi yapılarda kullanılmıştır.

1.3.2.1. Temeller

Temeller, yapının kendi ağırlığını, hareketli yüklerini, kar, rüzgâr ve deprem yüklerini zemine ileten taşıyıcı sistem elemanlarıdır (Bayülke, 1992). Tarihi yapılardaki temel sistemleri, yapıların yüksek ağırlıklarından dolayı önemli olmaktadır. Ancak yer altında kaldığı için incelenmesi en zor yapı sistemidir. Tarihi yapılarda inşa edilen temel sistemleri zeminin durumuna göre;

- Sağlam zeminlerde genellikle sığ temeller yapılmıştır. Genellikle ayak ve sütunların altına tekil temeller veya sürekli duvar altlarına sürekli temeller inşa edilmiştir. Tekil ve sürekli temeller, yatay olarak ahşap elemanlar ile birbirlerine mesnetlenmektedir. Böylece, yapı yüklerinin temel alanı boyunca zemine iletilmesi sağlanmaktadır.
- Zayıf ve yumuşak zeminlerde kazıklar kullanılarak derin temeller inşa edilmiştir. Bu temellerde zemine kazık çakılması ile bir temel sistemi inşa edilmiş ve yapı üzerine inşa edilmiştir. Sistemde, kazıklar üst kısımlarından ahşap bir ızgara ile bağlanmaktadır. Ahşap kazıkların genellikle su içinde kalmasından dolayı hava ile temas edememektedir. Böylece bozulma ve çürüme olayının geciktiği, hatta oluşmadığı gözlemlenmiştir (Çamlıbel, 2000).

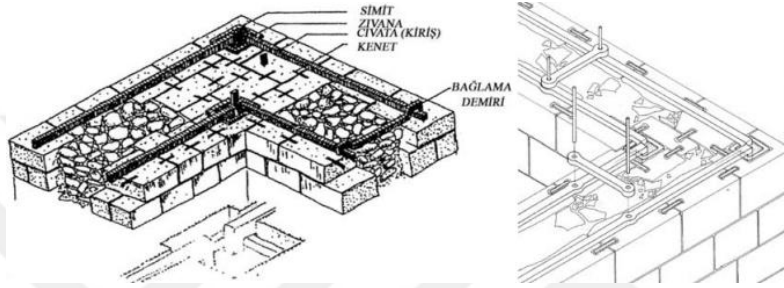
Sığ ve derin temellerin haricinde tarihi yapılarda tonoz temellere de rastlanmaktadır. Bu tip temeller düz ve geniş yüzeylere ihtiyaç duyulması durumunda veya yapının kademeli olarak inşa edilmesi istendiğinde kullanılmıştır (Kara, 2009).



Şekil 1.5. Şahmerdan ile kazık çakımı (Stratico,1826), ahşap ızgara sistemi (Dabanlı, 2016).

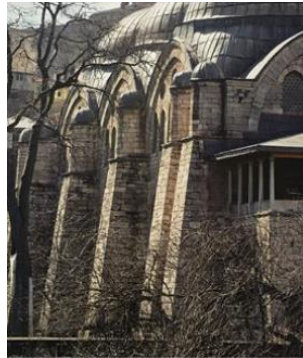
1.3.2.2. Duvarlar ve Payandalar

Tarihi yapılarda duvarlar, yapısal yükleri zemine ileten ana taşıyıcı elemanlardır. Duvar elemanları tarihi yapılarda hem yatay hem düşey yükleri taşımalarından dolayı boyutları oldukça büyük seçilmiştir. Tarihi yapılarda duvarların bir bütün olarak çalışabilmesi ve yükleri aktarabilmesi amacıyla, duvarı oluşturan tuğla-taş malzemeler birbirlerine harç, kenet, zıvana ve hatıllar ile bağlanmıştır.



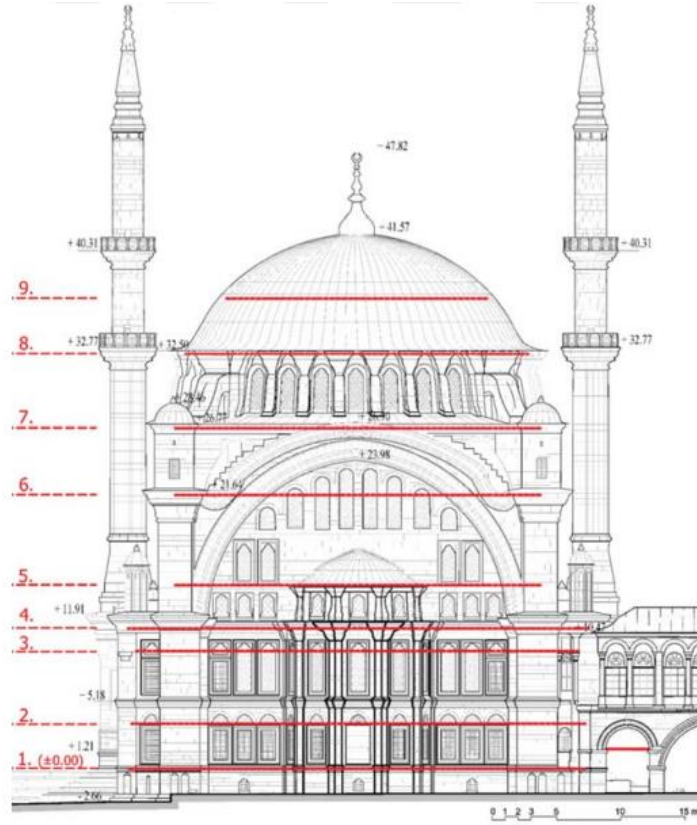
Şekil 1.6. Demir kuşaklama örnek çizimleri (Kuban, 1982; Tanyeli, 1991; Dabanlı, 2016).

Tarihi yapılardaki yığma duvarlar her ne kadar büyük boyutlarda inşa edilseler de, ıııklandırma ve dolaşıım için açılan kapı-pencere boşlukları duvarı zayıflatmaktadır. Ayrıca bu duvarlar düzlem içi yönde oldukça rijit olmalarına karşın düzlem dışı davranışları çok zayıftır. Bunlara ilaveten yapının kubbe, kemer, tonoz gibi üst örtü elemanlarından gelen yüklerin duvarlarda yanal itki oluşturmaları yığma duvarlar için düzlem dışı çökme tehlikesi oluşturmaktadır. Bu nedenle tarihi yapılarda duvarların düzelm dışı hareketlerinin kısıtlamak amacıyla payandalar inşa edilmiştir.



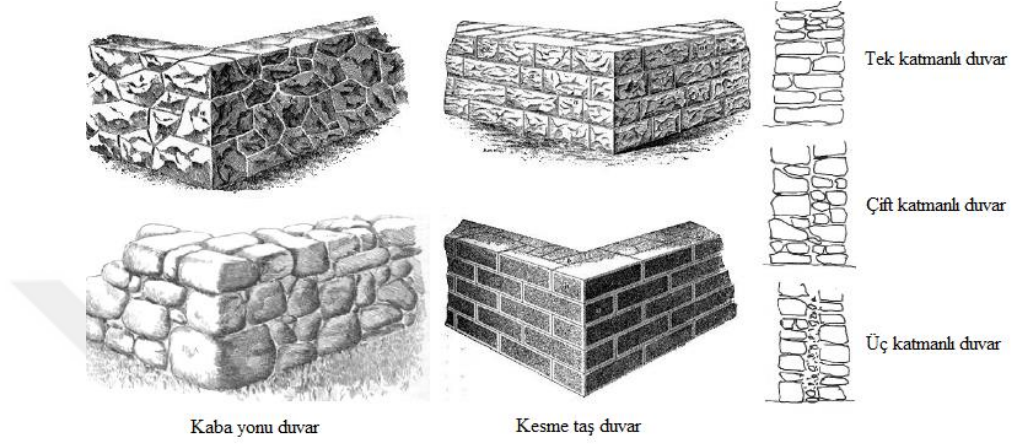
Şekil 1.7. Piyale Paşa Camii payandaları (Kuban, 2007).

Tarihi yapılarda taşıyıcı sistem davranışına bütünlük kazandırmak amacıyla kuşaklama sistemleri geliştirilmiştir. Böylece beden duvarları bir bütün olarak çalışarak, düzlem dışı hareketleri kısıtlamaktadır. Duvar içinde rijitliği artırmak amacıyla kenet ve zıvana gibi demir elemanlar kullanılırken, yapının genel bütünlüğünü sağlamak için demir hatıl ve kuşak türü berkitme elemanları kullanılmıştır.



Şekil 1.8. Nur-u Osmaniye Cami demir kuşak seviyeleri ve görünüşleri (Dabanlı, 2016).

Yığma duvarlar kullanılan malzemeye göre, moloz taş duvar, kesme taş duvar, kaba yonu taş duvar ve tuğla duvar olarak adlandırılmaktadır. Duvarlar yapım türlerine göre ise tek, çift ve üç katmanlı olacak şekilde inşa edilmektedir. Şekil 1.9’da tek, çift ve üç katmanlı duvarlara ait örnek çizimler sunulmuştur.



Şekil 1.9. Farklı tipte inşa edilmiş yığma duvarlar (Mascarenhas, 2003; ICS, 2008; Mendes, 2012).

1.3.2.3. Sütunlar ve Ayaklar

Sütunlar tarihi yapılardaki örtü elemanlarından gelen yükleri zemine aktaran düşey elemanlardır. Kubbe ve tonoz gibi örtü elemanlarından gelen yükler kemerlere aktarılır. Kemerlerde toplanan yükler de sütunlar vasıtası ile zemine iletilir. Genellikle dairesel ve tek parça halinde inşa edilen sütunlar için seçilen taş malzeme cinsi dayanımlarından dolayı mermer ve granit olmuştur.

Tarihi yapılarda kullanılan bir diğer düşey taşıyıcı eleman ayaklardır. Bu elemanlar yekpare olmamakla birlikte yığma olarak inşa edilmişlerdir. Ayaklar taşıyacağı yüke göre farklı ebatlarda inşa edilmiştir. Tarihi yapılarda çokgen kesitli veya daire kesitli ayaklar kullanıldığı gibi, özel olarak tasarlanmış karmaşık biçimli ayaklar da kullanılmıştır. Genellikle kesme taştan inşa edilen ayaklar için inşa malzemesi olarak kireç taşı fazlaca tercih edilmiştir (Ahunbay, 1988; Dabanlı 2016).



Şekil 1.10. Nur-u Osmaniye Cami Avlu sütunları (Dabanlı, 2016) ve II. Bayezid Camii ayakları (Dabanlı, 2008).

1.3.2.4. Kemerler

Kemerler, geniş açıklıkları geçmek amacıyla kullanılan ve çoğu zaman bir ayak veya sütuna oturan, taş veya tuğladan inşa edilmiş eğri eksenli yapılardır. Tarihi yapılarda dairesel, düz, basık, sivri, sepet, kulplu vb. değişik formda kemerler kullanılmıştır. Kemerler açıklıkları geçmek amacıyla kullanıldıkları gibi, yığma duvarlarda hafifletme gözü olarak kapı, pencere üstlerinde de (sağır kemer) kullanılmaktadır.

Kemerler çekme gerilmesi almayacak şekilde yalnızca basınca çalışacak şekilde tasarlanırlar. Kemerler formlarından dolayı yükleri mesnetlerine yatay ve düşey olarak iletirler. Bu açıdan kemerin basıklığı arttıkça yatay itme kuvveti artacağından dolayı kemer mesnetlerinde kalınca duvarlar inşa edilmiş, payandalar yerleştirilmiştir. Yalnızca basınca çalışan kemerler çekme gerilmelerine maruz kaldıklarında mafsallaşarak ağır hasar almakta ve yıkılmaktadır. Bu nedenle tarihi yapılarda kemerlerin mesnetlerden açılarak çekme gerilmelerine maruz kalmasını önlemek amacıyla kemer ayakları arasında ahşap veya metal gergi elemanları kullanılmıştır. Bu gergi elemanların bir başka özelliği ise, kemerden ayaklara gelen itki kuvvetini azaltmaktır (Ünay, 2002). Kemer yapıları üzerine gelen yükü düzgün şekilde iletebilmeleri amacıyla genellikle düzgün kesme taş kullanılarak inşa edilmişlerdir.



Nur-u Osmaniye Camii (Dabanlı, 2016)



Şenyuva Köprüsü

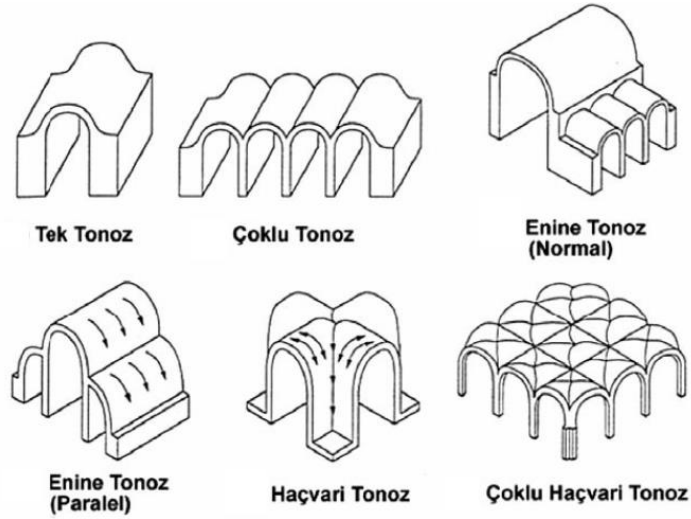


I. Mahmut Su Kemerı (Şahin ve Sönmezer, 2017)

Şekil 1.11. Kemer elemanın kullanım alanları

1.3.2.5. Tonozlar

Tonoz, kemer düzlemine dik olarak uzatılması sonucu oluşan, kemer elemanın çalışma prensibiyle benzer olarak yalnızca basınca çalışan bir örtü elemanıdır. (Ünay, 2002). Tonozlar geometrik olarak beşik (tek), sivri, aynalı, çapraz (haçvari) ve manastır tonozu gibi farklı çeşitlerde inşa edilmiştir. Yapı malzemesi olarak genellikle tuğla kullanılırken, bu tonozlarla beraber taş kemerler de kullanılmıştır (Ahunbay, 1988). Tarihi yapılarda tonozun mesnetlerine gelen yanal kuvvetler, gergiler, payandalar ve temele doğru kalınlaştırılmış duvarlarla karşılanmaktadır. Şekil 1.12’de değişik tipte tonoz şekilleri sunulmuştur. Şekil 1.13’te Saint Francis bazilikasına ait tonoz görseli verilmiştir.



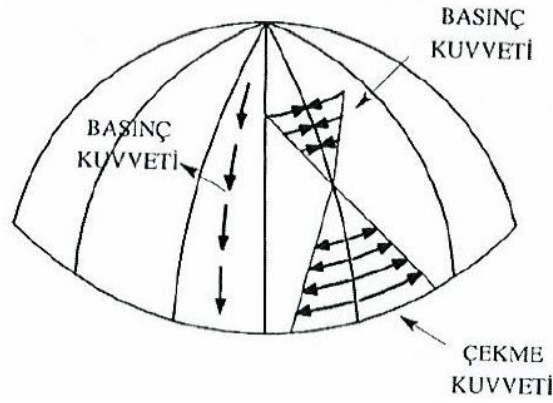
Şekil 1.12. Tono çeşitleri (Çılı ve Sesigür, 2007).



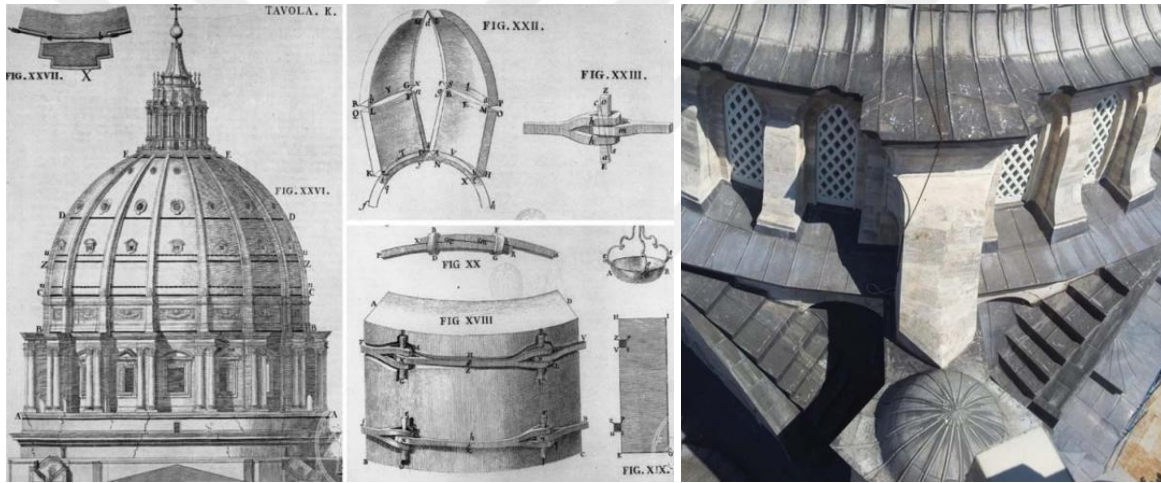
Şekil 1.13. Saint Francis bazilikası, İtalya (Angelini vd., 2017).

1.3.2.6. Kubbeler

Bir kemerin simetri ekseninde döndürülmesi ile elde edilen kubbe, tarihi yapılarda sıklıkla ana örtü elemanı olarak kullanılmıştır. Özellikle cami türü yapılarda ana mekânı örten büyük bir kubbe ve bu kubbeye bağlı daha küçük boyutlu yarım kubbeler bulunmaktadır. Kubbeler basınca çalışan elemanlardır. Ancak kubbe duvarında basınç gerilmeleri oluşurken, kasnak yatay ekseninde düzlem dışı yönde kayma, boyuna doğrultuda ise çekme gerilmeleri oluşur. Özellikle bu bölgelerde açılan pencere boşlukları bu bölgeleri zayıflatmaktadır. Bu nedenle tarihi yapılarda kubbe kasnağının oturduğu bölgeler açılmalara karşı payandalar, ağırlık kuleleri ve kuşaklarla güçlendirilir.

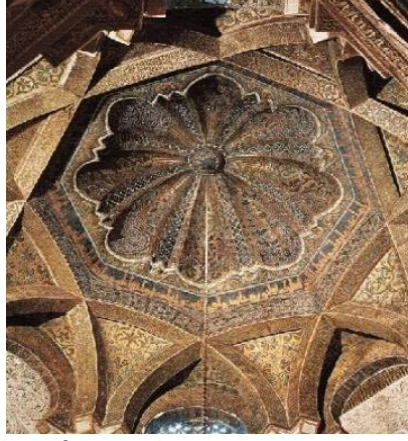


Şekil 1.14. Kubbeye meydana gelen basınç ve çekme gerilmeleri (Ünay, 2002).



Şekil 1.15. S. Pietro kubbesi için hazırlanan kuşak detayları (Poleni, 1748) ve Nur-u Osmaniye Camii kubbesini destekleyen payanda ve ağırlık kulesi (Dabanlı, 2016).

Tarihi yapıların ana mekânları kare veya dikdörtgen formunda inşa edilmiştir. Bu nedenle kubbeden gelen yükler kemerlere ve kemerlerden duvar, sütun veya ayaklara iletilir. Dolayısı ile kubbeden kemerlere olan bu geçişleri sağlamak amacıyla tarihi yapılarda Tromp (tonoz bingi), pendentif (küresel bingi) ve Türk üçgeni gibi yapılar kullanılmıştır. Şekil 1.16'da tromp, pendentif ve Türk üçgeni yapı elemanlarına ait görünüşler sunulmaktadır.



Pandantif, Kurtuba Camii (Kaptan, 2013)



Tromp, Kayrevan Ulu Camii (Hillenbrant, 1994)



Türk üçgeni, Bursa Yeşil Camii

Şekil 1.16. Kubbe geçiş elemanları; pandantif, tromp, Türk üçgeni

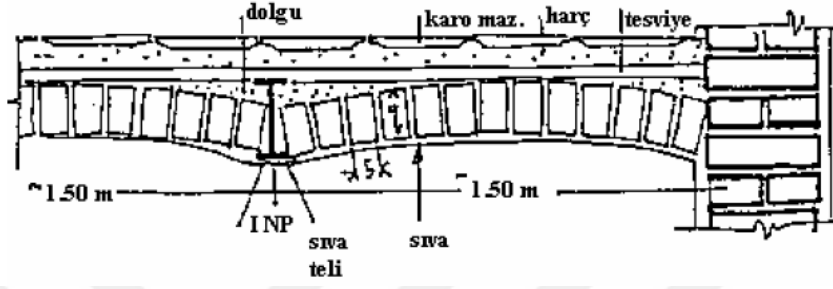
1.3.2.7. Döşemeler

Döşemeler yapıyı düşey olarak katlara ayıran taşıyıcı sistem elemanlarıdır. Tarihi yapılarda kullanım durumlarına göre genellikle kubbe ve tonoz türü yapılarla hacimlerin üstleri örtülürken, bina türü yapılarda ahşap, çelik ve kâgir tipi malzemeler kullanılarak döşemeler inşa edilir.

Döşemeler üzerlerine gelen sabit ve hareketli düşey yükleri taşımakla görevli yapı elemanlarıdır. Ancak deprem esnasında diyafram etkisi ile yatay yük aktarımı gerçekleştirmeleri açısından önemlidir. Döşemenin olmaması veya döşemede boşlukların bulunması binada düzensiz plan oluşturur, duvarların serbest boylarını artırır ve yapının depreme karşı davranışını olumsuz etkiler (Ünay, 2002).

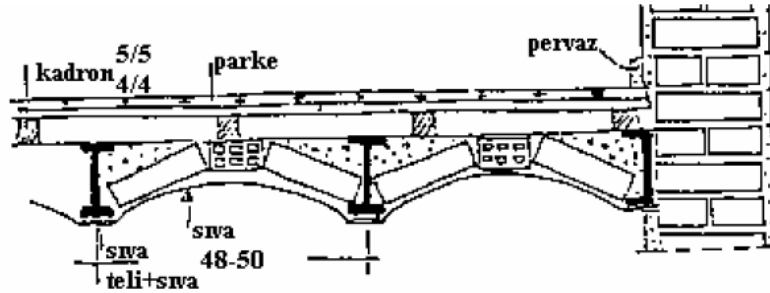
Ahşap döşemeler, ahşap kirişler ve kaplama elemanları kullanılarak inşa edilirler. Kiriş kesitleri ve sayıları, gelecek yüke göre seçilmekle beraber genellikle kısa doğrultuda 50-60cm aralıklarla inşa edilirler. Ahşap döşemeler yeterli rijitlikte olmamaları halinde sehim oluşturmaktadır. Ayrıca ses yalıtımları ve yangın davranışları oldukça zayıftır.

Çelik endüstrisinin gelişmesi ile beraber, çelik profiller üretilerek mühendislik yapılarında kullanılmaya başlanmıştır. Yakın dönem tarihi binalarda çelik profillerin kullanıldığı ve “putrelli” veya “volta döşeme” adı verilen döşeme sistemi geliştirilmiştir. Volta döşemelerde belirli aralıklarla I profilleri yerleştirilir ve araları tonoz şeklinde tuğla örülür. Üst kaplama dolgusu ve döşeme kaplamaları inşa edilerek döşeme tamamlanır.



Şekil 1.17. Volta döşeme detayı (Çelebi, 2001).

Adi volta döşemelerde ise profillerin arası kısa tutulur ve üç adet tuğla kullanılarak profiller arası tonoz oluşturulur. Adi volta döşemelerde tonozlar duvara oturtulmaz, duvar kenarlarına profiller konularak döşeme inşa edilir.



Şekil 1.18. Adi volta döşeme detayı (Çelebi, 2001).



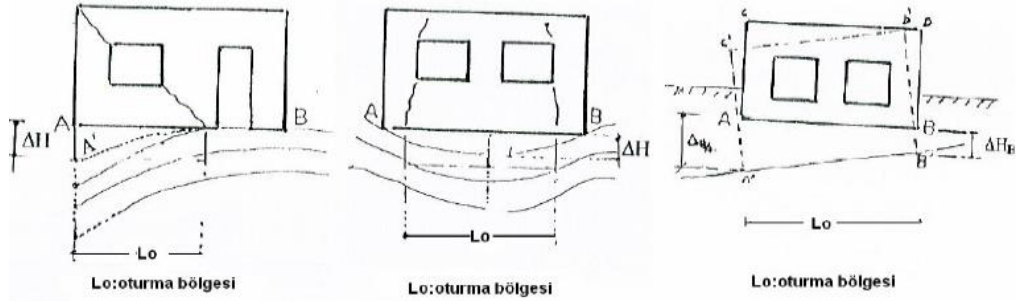
Şekil 1.19. Adi volta döşeme örneği (Trabzon Yavuz Selim Binası)

1.3.3. Tarihi Yığma Yapılarda Görülen Hasar Türleri

1.3.3.1. Zeminden Kaynaklanan Hasarlar

Tarihi yapılarda görülen önemli hasar nedenlerinden biri zemin kaynaklı hasarlardır. Zeminde meydana gelebilecek oturmalar, ayrışmalar, kabarma, parça kopması ve kaymalar üst yapıyı olumsuz yönde etkilemekte, hasar ve çökmelere neden olabilmektedir.

Zemin oturması, bir yapının temel veya alt yapısındaki problemler nedeniyle yapının zemininde oluşan değişimlerin genel adıdır. Düzgün oturmalar, yapının stabilitesini genellikle etkilemez ve oturma hasarı da meydana gelmez. Ancak rölatif oturmalar yapıda çekme ve kayma gerilmeleri oluşturacağı için ağır hasara neden olabilmektedir. Yer altı su seviyesinin değişimi, yapıdan gelen yük değişimleri, temelde yer alan kazıkların zamanla deformasyonu ve çürümesi, yapı çevresinde gerçekleştirilen kazılar, dinamik etkiler-titreşimler zeminde oturma'nın esas nedenleri arasındadır (Çamlıbel, 2000). Yer altı su seviyesinin kontrolü zeminler için çok önemlidir. Bu nedenle tarihi yapıların temel ve zeminlerinde genellikle kapsamlı drenaj sistemleri uygulanmıştır.



Şekil 1.20. Oturma şekilleri ve yapıda oluşturduğu çatlaklar (Çamlıbel, 2000).

Yapı zemininde meydana gelecek donma-çözülme olayları gibi fiziksel etkiler ve temel malzemelerinde bozulmaya neden olan sülfat etkisi gibi kimyasal etkiler, zeminde ayrışmalara neden olarak yapının hasar almasına neden olabilir. Ayrıca zemin türüne bağlı olarak yeraltı suyunun yükselmesi ve depremler gibi nedenlerden dolayı zeminde kabarmalar meydana gelebilir.

Belli bir yükseltide, kayaç üzerine inşa edilen tarihi yapıların zeminlerinde, donma-çözülme, kimyasal olaylar ve depremler gibi nedenlerden dolayı parça kopmaları meydana gelmektedir. Bu durumda yapıda oluşacak hasar diğer zemin kaynaklı hasarlardan daha hızlı

gerçekleşebilir. Ayrıca zayıf zeminlerde deprem, eksantrik yükleme, uygunsuz kazı gibi nedenlerden dolayı zeminlerde kayma meydana gelir ve üst yapı ciddi şekilde hasar alabilir.

Zeminden kaynaklı hasarlar genellikle zaman içerisinde artmaktadır. Bu açıdan yapıda ilk hasarlar oluşması ile beraber izlenmesi ve uygun müdahaleler için hasarın nedeni kesin olarak tespit edilmelidir.



Şekil 1.21. Samsun Dumlupınar okulunda yapı etrafındaki kazı sonucu oluşan hasar

1.3.3.2. Taşıyıcı Sistem Tasarımındaki Hatalar

Tarihi yapılarda başlangıçta yapılan boyutlandırma hataları zamanla yıkıma ve ani göçmeye neden olabilmektedir. Özellikle yatay kuvvetleri taşıyacak duvar, payanda ve gergilerdeki boyutlandırma hataları, kubbe, kemer ve tonoz gibi stabilitesi önemli ölçüde mesnetlerinin stabilitesine bağlı olan yapı elemanlarında ağır hasara ve göçmeye sebebiyet verebilir. Tarihte bu şekilde hasar alan pek çok tarihi yapı mevcuttur. 558 yılında çöken Ayasofya (İstanbul) kubbesi bu açıdan önemli bir örnektir.

Tarihi yapılarda projelendirme aşamasında plandaki düzensizlikler depremlerde burulmaya neden olabilmektedir. Ayrıca yapı yüksekliği boyunca rijitliğinin düzgün olmayan şekilde düzenlenmesi sonucu yapı rijitliğinde meydana gelen ani değişimler, bu değişimlerin yaşandığı noktalarda hasara sebep olmaktadır. Birbirine dik duvarların hatıllar veya diğer bağlantı elemanları ile bağlanmaması her bir duvarın ayrı çalışmasına ve duvarlarda düzlem dışı hareketin artarak hasar almasına neden olmaktadır.

1.3.3.3. Hatalı Malzeme Kullanımı

Bir yapının doğru şekilde projelendirilmesi ve boyutlandırılmasının yanında kullanıcak malzeme türünün seçimi büyük önem arz etmektedir. Günümüze ulaşabilen tarihi yapılar incelendiğinde özenle seçilmiş malzemelerden inşa edildikleri gözlemlenmiştir. Tarihi yapılarda kullanılan malzemelerin seçimi ve uygun şekilde kullanımı yapının ömrünü önemli derecede artırmaktadır. Taş malzemenin içeriğinde kil tabakası bulunması ve doğadaki tabakalmasına ters bir şekilde yapıda kullanımı kolayca deforme olmasına neden olabilmektedir. Tuğla malzemenin iyi fırınlanmamış olması hızlı aşınma, dökülme, yüzey kayıpları, ayrışma ve dağılma şeklinde hasarlara neden olarak duvar dayanımını azaltmaktadır (Mahrebel, 2006). Ayrıca kalitesiz bağlayıcı ve agrega kullanılarak hazırlanmış harçlar duvar dayanımını düşürmektedir. Yapının yatay kuvvetlere karşı bütünsel davranmasını sağlayan metal ve ahşap gergiler, kuşaklar ve hatılların kalitesiz malzemelerle üretilmesi kolay deforme olmakta ve erken dayanım kaybı oluşmaktadır.

1.3.3.4. Kötü İşçilik

Tarihi yapıların ömrü, doğru projelendirme, kaliteli malzeme ve iyi işçilikle doğru orantılıdır. Dolayısı ile bu etkenlerden birinde yaşanacak eksiklik yapının ömrünü doğrudan kısaltacaktır. İnşa malzemelerinin doğru bir şekilde kullanılmaması, yığma yapı için hayati öneme sahip birleşimlerin uygunsuz şekilde gerçekleştirilmesi, uygulamalar esnasında atlanılan küçük detaylar uzun vadede yapının hasar almasına neden olmaktadır.

1.3.3.5. Doğal Etkenler

Tarihi yapılar yaşam süreleri boyunca bulundukları coğrafi bölge koşullarına göre pek çok doğal afetlere maruz kalmaktadır. Doğal afetleri ani ve uzun süreli olarak ikiye ayırmak mümkündür. Ani doğal afetler, genellikle belirli bir zaman diliminde oluşan, periyodik olarak oluşan ve sonlanan etkilerdir. Ani doğal afetlerden en yıkıcı olanı depremlerdir. Tarihi yığma yapılar oldukça ağır yapılardır ve deprem davranışları zayıftır. Ayrıca depremlerin oluşturduğu sarsıntılar zeminde kayma, sıvılaşma ve benzeri olaylara sebebiyet vermekte ve yapıların hasara uğramasına neden olmaktadır. Depremlerin haricinde sel, heyelan, rüzgâr, volkanik aktiviteler gibi doğal afetler de tarihi yapılara önemli ölçüde zarar vermektedir.



Şekil 1.22. Depremlerden hasar görmüş tarihi yapı örnekleri (Parisi ve Augenti, 2013; Altunışık vd., 2016a).

Uzun süreli doğal afetler genellikle yapıda ani hasara sebep olmayan, zamanla yapı malzemesi dayanımını azaltan etmenlerdir. Tarihi yapıları oluşturan malzemelerin donma-çözülme olayına maruz kalması, yazın genleşen malzemelerin kışın donarak daralması, suyun kapıların ve malzeme iç yüzeylerine ulaşması ve malzeme içerisinde gerilme oluşturarak hasara neden olması gibi etkenler uzun süreli etkilerdir. Ayrıca yapının zeminden nem çekmesi ile içinde taşıdığı tuzların duvar yüzeyinde buharlaşması sonucu çiçeklenmelere neden olmaktadır. Yapının yağmur suyu tasfiye boru ve kanallarında yaşanan tıkanıklıklar nedeniyle yağmur suyunun binanın iç kısımlarına ulaşmasına neden olmaktadır. Tıkanan tasfiye borularında ot ve yosun gibi biyolojik varlığın gelişmesi zamanla yapıda daha fazla nem tutulmasına neden olabilmektedir. Rüzgâr gibi etkilerle çatılara, duvar oyuklarına, boşalmış derzlere taşınmış ağaç tohumları zamanla kök salıp büyüyerek yapıya hasar vermektedir. Ayrıca rüzgârın deniz tuzu ve kumlarla etkimesi sonucunda yapıya tuz taşıyarak yüzeylerin zamanla hasar almasına neden olmaktadır. Bu gibi uzun süreli doğal etmenlerin önüne geçebilmek için sürekli bakım yapılması gerekmektedir.



Şekil 1.23. Tarihi yapı duvarlarında (Ortaköy Camii) meydana gelen tuzlanma hasarı (Yıldırım, 2007).

1.3.3.6. İnsanların Neden Olduğu Hasarlar

Tarihi yapıların hasar almasında insanların rolleri de oldukça büyüktür. Özellikle savaşlar, vandalizm, yanlış kullanım ve yanlış restorasyonlar sonucunda hasar gören ve yıkılan tarihi yapıların varlığı diğer etkenlere göre azımsanmayacak kadar çoktur. Şekil 1.24'te Bosna Savaşı sırasında Sırp'lar tarafından tahrip edilen Mostar Köprüsü sunulmaktadır.



Şekil 1.24. Bosna Savaşı sırasında hasar gören Mostar Köprüsü (Colak, 2016).

1.3.3.7. Hava Kirliliği ve Trafik

Tarihi yapıları oluşturan malzemelerin hava ile temas eden yüzeyleri fiziki ve kimyasal etkilere maruz kalmaktadır. Havayı kirleten sanayi atıkları, iklimlendirme sistemleri, kömürle ve petrol ürünleri ile çalışan vapurlar ve motorlu taşıtlardan çıkan zararlı gazlar bu süreci hızlandırmaktadır. Atmosferdeki zararlı gazların artması ile beraber asit yağmurları oluşmakta ve bu yağmurlar tarihi yapıların cephe duvarlarında aşınmalara sebebiyet vermektedir. Islanan yüzeylerdeki süslemeler zamanla aşınmakta ve yüzeylerde kararmaya sebebiyet vermektedir. Ayrıca dış yüzeydeki taşların gözeneklerinin kalsiyum sülfatla dolması ile taşlarda ıslanma alanına kadar bozulma, kabarma ve dökülmeler meydana gelir (Mahrebel, 2006).

Tarihi yapılara hasar veren bir diğer etken de trafiktir. İnşa edildikleri dönemlerde insan ve at arabası trafiğine göre düzenlenmiş olan tarihi sokak dokusunun ağır taşıt trafiğine açılması tarihi yapılarda titreşimlere sebep olmakta, ağır tonajlı taşıtlardan dolayı zeminlerin aşırı yüklenmesine sebebiyet vererek temellerde bozulmalara neden olmaktadır. Ayrıca tarihi kemer köprülerin bir kısmının araç trafiğine açılması, köprülerin aşırı yüklenmesine ve hasar görmesine yol açmaktadır.



Şekil 1.25. Tarihi yapı duvarlarında hava kirliliği sonucu meydana gelen kararma ve kabuk oluşumu (Yıldırım, 2007).

1.3.4. Tarihi Yığma Yapılarda Uygulanan Restorasyon Teknikleri

Tarihi yapıların korunması disiplinlerarası bir çalışma gerektirmektedir. Bu bağlamda 20. yüzyılın başlarında farklı ülkelerden uzmanlar biraraya gelerek tarihi yapıların restorasyonlarında koruma kurallarının gözetilmesini kararlaştırmışlardır. Koruma ile ilgili daha önceki dönemlerde farklı araştırmacılar tarafından öneriler sunulsa da 1931’de Atina’da toplanan uzmanlar tarafından evrensel ilkeler oluşturmanın gerekliliği belirtilerek “Atina Tüzüğü” olarak adlandırılan kararları almışlardır. Bu kararlar daha sonra İtalya Kültür Bakanlığı tarafından “Carta del Restauro” adı ile yürürlüğe girmiştir (Ahunbay, 2019).

Atina toplantısından 33 yıl sonra, 1964 yılında, Venedik’te II. Uluslararası Tarihi Yapı Mimar ve Teknisyenleri Kongresi gerçekleştirilmiş ve “Venedik Tüzüğü” adı altında restorasyon ile ilgili bazı ilkeler kabul edilmiştir. Venedik Tüzüğü’nün ardından 1965 yılında Varşova’da bir toplantı yapılarak ICOMOS olarak adlandırılan Uluslararası Anıtlar ve Sitler Konseyi’i kurulmuştur. Ayrıca 1972 yılında evrensel değer taşıyan anıt ve sitlerin korunması ile alakalı Dünya Mirası Sözleşmesi UNESCO tarafından hazırlanmıştır. Kültürel mirasın her bir alanıyla ilgili ICOMOS bünyesinde ayrıca komiteler oluşturulmuş ve farklı tarihlerde ilke, tüzük ve klavuzlar yayınlamışlardır (Ahunbay, 2019).

Kültürel mirasın korunması ile ilgili uluslararası düzeyde örgütlenen diğer bir kurum Avrupa Konseyi’dir. Avrupa Konseyi tarafından 1975 yılında Avrupa Mimari Miras Yılı Tüzüğü kabul edilmiş ve aynı yıl Amsterdam’da gerçekleştirilen sergi ve sempozyumlarla tüm kıtaya duyurulmuştur (Amsterdam Bildirgesi). İlerleyen yıllarda, konsey tarafında; Avrupa mimari mirasının korunması ile ilgili Granada Tüzüğü (1985), arkeolojik mirasın korunmasına ilişkin Valetta Sözleşmesi (1992), antik gösteri mekânlarının kullanımına ilişkin Verona Tüzüğü (1997), Arkeoloji ve Kent Projesi: Avrupa İyi Uygulama İlkeleri (2000), Avrupa Peyzaj Sözleşmesi-Floransa sözleşmesi (2000) gibi çeşitli tüzük ve sözleşmeler yayınlanmıştır.

Ülkemizde 1950’li yıllara kadar Osmanlı’dan kalma bazı düzenlemeler kullanılmaya devam etmiştir. Daha sonraki yıllarda uluslararası uygulama ve ilkelere paralel yönetmelik, şartname, bildirge, mevzuat ve yasalar çıkarılmıştır. Ülkemizde yapılacak restorasyon çalışmalarının belirli bir çerçevede, belirli ilke ve tekniklerle yürütülmesi amacıyla Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği (TMMOB) tarafından “Taşınmaz Kültür Varlıklarının Rölöve, Restitüsyon ve Restorasyon Projelerine İlişkin Teknik Şartname”si (TMMOB,

2011) ve 2013 yılında “ICOMOS Türkiye Mimari Mirası Koruma Bildirgesi” (ICOMOS, 2013) yayınlanmıştır. Şartnamede restorasyon projelerine ilişkin ilke ve teknikler sunulmaktadır. Buna göre restorasyon projelerinin hazırlanmasında şu ilkeler göz önünde tutulmalıdır (TMMOB, 2011);

- “a) Kültür varlığının korunmasında ve onarılmasındaki amaç, onları bir sanat eseri olduğu kadar, bir tarihi belge olarak da korumaktır. Bu nedenle yapılacak müdahalelerde, yapının bir ya da birden fazla dönemin sosyal, kültürel ve ekonomik yaşamının belgeleri olduğu unutulmamalıdır,
- b) Yapının günümüze ulaşmış sosyo-kültürel ve tarihi kimliğini oluşturan mekânsal, biçimsel ve yapısal özellikleri ve çevre içindeki özgün konumu korunacaktır,
- c) Yeni bir kullanımın gerekmesi halinde, bu kullanım yapının özgün değerlerini ve niteliklerini bozmayacak ve onların algılanmasını güçleştirmeyecek ölçeklerde tasarlanmalıdır,
- d) Onarım müdahaleleri varsayımlara dayandırılmamalıdır, Bu bağlamda restitüsyon projesinin bir etüd olduğu ve bir uygulama projesi niteliği taşımadığı göz önüne alınmalıdır,
- e) Koruma ve kullanım için gerekli müdahaleler, yapının özgün bünyesinden farklı nitelik ve tekniklerle oluşturulmalıdır,
- f) Yapının yaşadığı farklı dönemlerdeki ekler, o dönemin yaşamının ve yapıım tekniklerinin kaybedilmemesi gereken öğeleri ise korunmalıdır,
- g) Bir dönemin açığa çıkartılması için eşdeğer değerlere sahip diğer dönemlerin tahrip ya da yok edilmesinden kaçınılmalıdır,
- h) Restorasyon projesi genellikle, yalnız strüktürün sağlamlaştırılması ve uygulanacak teknolojilerin belirtilmesiyle kalmaz, tarihi yapının yeniden kullanılmasıyla ilgili önerileri de içerir. Verilmesi istenen işlevin yapıya uyarlanabilirliği araştırılır ve yeniden kullanım projesinin eserin kütsel ve mekansal özelliklerini bozacak ekler, değişimler getirmemesine dikkat edilir. Restorasyonda önemli olan yapının korunmasıdır, yeniden kullanım bir araçtır.
- i) Yeni işlev verilen binalarda çağdaş kullanımla ilgili servis mekanlarının bina içine yerleştirilmesi, yapının deprem koşullarına uygun hale getirilmesi, yangına karşı önlem alınması, sakatların binaya girebilmeleri için engellerin kaldırılması gibi konular proje aşamasında çözülmelidir.”

Tarihi yapıların korunması ve restore edilmesinde, bakım, basit onarım ve esaslı onarım gibi farklı yöntemler kullanılabilir. Tasarımda, malzemede, strüktürde ve mimari öğelerde değişiklik gerektirmeyen; çatı aktarımı, oluk onarımı, boya-badana vb. uygulamalar “Bakım” olarak adlandırılır. Basit onarım ise yapılarda bozulan, eksilen, kirlenen, deforme olan elemanların taşıyıcı sisteme ve plan kurgusuna müdahale etmeden, uzman değerlendirmesiyle, belgeleme ve irdelemeye dayalı olarak, özgün biçimlerine uygun şekilde onarılması veya tamamlanmasıdır. Bakım ve basit onarımla giderilemeyen yapısal sorunlar esaslı onarım ile çözümlenmelidir. Projeye dayalı olarak birkaç müdahale tekniğinin bir arada kullanılmasını gerektiren esaslı onarımda müdahalelerin derecesi, yapıdaki hasarların niteliği ve çağdaş kullanımın gerektirdiği donatıların eklenmesi gerekliliğine göre değişir. Hasarlı, ya da eksik olan kesimlere yapılacak müdahale, yapının kullanım amacına uygun olarak malzemelerinin sağlamlaştırılmasından, yeniden yapımına doğru artar (ICOMOS, 2013).

Tarihi yapıların korunmasındaki temel yaklaşım sürekli bakımlarının sağlanmasıdır. Restorasyonda tarihi yapıların olabildiğince az müdahaleyle, özgünlüğünü koruyarak, tarihi belge ve estetik değerinin korunması esastır. Restorasyondan önce yapı ile ilgili belgeleme, projelendirme ve hasar tespitlerinin yapılması elzemdir. Tarihi yapıların restorasyonu için kullanılacak teknikler Sağlamlaştırma, Güçlendirme, Bütünleme, Yenileme, Yeniden Yapım, Temizleme, Taşıma ve Çağdaş Ek olarak sıralanabilir.

1.3.4.1. Sağlamlaştırma

Sağlamlaştırma, özgün yapım detayı kullanılarak bozulmuş bir bileşen, eleman veya sistemi ilk tasarlandığı hale getirildiği onarımdır. Çeşitli nedenlerle özgün taşıyıcılık gücü kaybolan bir yapı bileşeni, elemanı veya sistemi sağlamlaştırma ile ilk taşıyıcılık kapasitesine ve bütünlüğüne ulaştırılır. Örneğin çatlak oluşumu ile hasar alan bir duvarın hasarlı bölgesinin özgün malzeme ile yenilenmesi bir sağlamlaştırma örneğidir (Zakar ve Eyüpgiller, 2015).

1.3.4.2. Güçlendirme

Güçlendirme, sağlamlaştırılmadan farklı olarak bozulmuş bir yapı bileşeni, elemanı veya sistemi özgün yapım detayından farklı bir uygulama ile ilk tasarımından daha güçlü hale getirildiği onarım türüdür. Güçlendirme ile özgün bileşen, eleman veya sistem kompozisyonuna ek malzemeler veya elemanlar getirilerek, özgün taşıyıcılık gücünü artırıcı müdahaleler gerçekleştirilir (Zakar ve Eyüpgiller, 2015). Güçlendirme, zemin-temel ve taşıyıcı sistem güçlendirmesi olarak iki ana başlıkta ele alınabilir.

1.3.4.2.1. Zemin-Temel Güçlendirmesi

Tarihi yapıların zemin ve temelleri zaman içerisinde maruz kaldığı titreşim, yük artışı, yer altı su seviyesindeki değişimler, yüzey suları, depremler ve yakın çevredeki diğer temel inşaatları gibi nedenlerden dolayı zayıflamaktadır. Bu nedenlerin sonucu olarak genellikle temelde dönme veya oturma meydana gelir. Böylece, temele oturan yapının taşıyıcı sistem elemanlarında iç kuvvetler ve gerilmeler artarak çatlaklara ve yapı elemanlarında ayrılmalara neden olur. Bu gibi durumlarda zeminin güçlendirilerek temel yüklerinin daha derindeki taşıyıcı tabakalara aktarılması gerekir. Tarihi yapılarda temel ve zemin problemleri ile ilgili olarak genellikle başvurulmuş müdahale yöntemleri aşağıda sıralanmıştır (TYDRYK, 2017).

1.3.4.2.1.1. Temelin Genişletilmesi

Sağlam zemin tabakasının yüzeye yakın olduğu durumlarda kullanılabilecek bu müdahale yöntemi, temellerin yük taşıma kapasitelerini arttırmayı ve zemin gerilmelerini azaltmayı hedeflemektedir. Enkesiti büyük duvarların temellerinin her iki tarafı eşit miktarda genişletilerek zemine iletilen gerilmeler azaltılır. Uygulamada mevcut temel ile genişletme kısımları arasındaki bağlantı sağlıklı bir şekilde oluşturulmalı, temelin monolitik davranış sergilemesi sağlanmalıdır (TYDRYK, 2017).

1.3.4.2.1.2. Kazık Uygulamaları

Zemin taşıma gücünün düşük olduğu zeminlerde temel yüklerinin daha derindeki taşıyıcı zemin tabakalarına aktarılmasında kazık uygulamaları gerçekleştirilmektedir. Mini, fore, çakma vb. kazık türleri bu uygulamalar için kullanılabilir. Ancak çakma kazık uygulamasında tarihi yapıda titreşim oluşturacağı için uygun bir müdahale yöntemi değildir. Kazıkların yapının olabildiğince geneline yayılması ve yapı temelleri ile bağlantısının yeterli düzeyde olması kazık uygulaması için dikkat edilmesi gereken hususlardır (TYDRYK, 2017).

1.3.4.2.1.3. Zemin İyileştirmesi

Zayıf zeminlerin iyileştirilmesine yönelik birçok uygulama mevcuttur (TYDRYK, 2017):

- Taş kolon: Genellikle kohezyonu az zeminlerde ve siltli kumlarda uygulanmaktadır. Uygulamada zeminde açılan çukura vibratör yardımıyla çakıl ve kırma taş malzemesi doldurulup sıkıştırılmaktadır.
- Düşey diren: Genellikle suya doymuş zayıf ve kohezyonlu zeminlerde uygulanmaktadır. Zemine düşey olarak yerleştirilen bir diren yardımıyla suyun zeminden tahliyesi sağlanmaktadır.
- Ağırlık düşürme: Genellikle granüler zeminlerde, dolgu alanlarında ve karstik ortamlarda uygulanan dinamik kompaksiyon yöntemidir. Uygulamada ağır bir yük tekrarlı olarak farklı yüksekliklerden zemin üzerine düşürülerek zemin sıkıştırılmaktadır.
- Derin karıştırma: Zayıf ve geçirgen zeminlerde etkili olan bu yöntemde zemin, çimentolu maddelerle yerinde karıştırılarak mukavemet artışı sağlanmaktadır.
- Kimyasal/harç enjeksiyonu: Kum, çakıl veya kil ihtiva eden zeminlerde uygulanmaktadır. Uygulamada, hazırlanan kimyasal karışım veya harç basınç ile zemin içerisindeki boşluklara enjekte edilir.
- Geosentetikler: Genellikle yumuşak ve zayıf zeminler ile şev duraylılığı olan bölgelerde uygulanmaktadır. Uygulamada geotekstil malzeme ile zemin donatılır.

Zemin iyileştirmesi için kullanılan yöntemler arasından zemine çeşitli kimyasalların enjekte edilmesi veya harç enjeksiyonu gibi uygulamalar zemin taşıma gücünü artırabilir. Kısa sürede ve kolayca uygulanabildiği, titreşim oluşturmadağı ve taşıma gücünü artırması açısından tarihi yapılarda kullanımı uygundur. Ancak uygulama basıncının doğru bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Aksi takdirde temellerde ve duvarlarda bozulmalara yol açabilir. Ağırlık düşürme yöntemi sıvılaşmaya karşı zeminin güçlendirilmesi amacıyla kullanılabilir, ancak bu yöntemin yapıda titreşim yaratması riski mevcuttur (TYDRYK, 2017).

Kayaç türü sert zeminler üzerine inşa edilmiş özellikle kale, saray vb. tarihi yapılar azımsanmayacak kadar çoktur. Bu yapıların zeminleri her ne kadar oldukça sert ve sağlam olsalar da zaman içerisinde kayaç kopma durumları yaşanabilmektedir. Bu tür durumları önlemek amacıyla ayrılma ve kopma eğilimi gösteren kayaçlar ankrajlar yardımıyla sağlamlaştırılmaktadır. Ayrıca anakayada yer alan çatlaklar enjeksiyonlarla doldurularak dayanım artırılabilir (Ahunbay, 2019). Yunanistan'da yer alan Atina Akropolü'nde, anakayanın zamanla çatlaması ve taş kopmalarına karşın kireç esaslı enjeksiyon ve paslanmaz demir çubuklarla ankraj işlemleri uygulanmıştır (Andronopoulos, 1976).



Şekil 1.26. Mardin'de üzerinde kale bulunan kayalardaki çatlak oluşumu ve taş kopması tehlikesi (Ahunbay, 2019).

1.3.4.2.1.4. Zemindeki Suyun Tahliyesi

Tarihi yapıların zeminlerinin yumuşamasına ve taşıma gücünü kaybetmesine neden olan yer altı su seviyesi zemin içerisinde çakıl ve kum drenleri oluşturularak giderilebilir. Ayrıca modern-sentetik malzemeler kullanılarak drenaj yapılabilir. Uygulamada üst yapıda farklı oturmalar sebebiyet verecek düzensiz su tahliyesinden kaçınılmalıdır. Bazı tarihi yapılarda zemin suyunu tahliye etmek amacıyla inşa edildikleri tarihte açılmış kuyular ve bu kuyuları birbirine bağlayan tüneller mevcuttur. Bu yapılar tarihi yapının temelini uzun bir süre boyunca doğrudan su ve nem etkisinden korumaktadır. Tarihi yapı zeminlerine yapılacak müdahalelerde bu sistemin korunmasına özen gösterilmelidir (TYDRYK, 2017).

Zeminlerinin güçlendirilmesi ile ilgili herhangi bir müdahale gerçekleştirmeden önce ayrıntılı incelemeler (inceleme çukuru, sondaj vb.) gerçekleştirilerek zemin etüd raporu hazırlanmalı ve bu bilgiler ışığında müdahale yöntemi seçilmelidir.

1.3.4.2.2. Taşıyıcı Sistemin Güçlendirilmesi

Çeşitli nedenlerden dolayı temel, duvar, kemer, tonoz, kubbe, sütun, ayak ve gergi gibi elemanlar üzerinde oturmalar, çatlaklar, şişme, ayrılmalar, kopmalar ve kısmi çökme meydana gelebilmektedir. Bunları önlemek amacıyla günümüze kadar geleneksel teknikler kullanılmış ancak geleneksel tekniklerin yetersiz kaldığı durumlarda modern malzemeler kullanılarak taşıyıcı sistem elemanları güçlendirilmiştir. Tarihi yapıları güçlendirmek amacıyla aşağıdaki teknikler kullanılmıştır.

1.3.4.2.2.1. Kısmi Onarım

Tarihi yapılarda çeşitli nedenlerden dolayı sıva dökülmeleri, çatlaklar, ezilmeler, parça kopmaları, malzeme bozulmaları ve derz boşalmaları gibi kısmi hasarlar meydana gelebilir. Derz boşalmalarına karşı derzler özgün harç malzeme ile doldurulur. Uygulama duvarın her iki yüzüne sırayla yapılmalı, önce derzler temizlenmeli, kopmuş derz kalıntıları çıkarılmalıdır. Yığma duvarda malzeme dökülmesi, parça kopması ve bölgesel boşlukların meydana gelmesi durumunda bu boşluklar özgün malzeme ile yeniden örülebilir. Bu işlemler özgün malzeme ve detay kullanıldığı için sağlamlaştırma olarak adlandırılabilir.



Şekil 1.27. Fatih Camii (İstanbul) kubbesindeki çatlakların onarımı (Ceylan ve Ocakcan, 2013).

Tarihi yığma yapı elemanlarında basınç dayanımlarının aşılması ile ezilmeler, çekme dayanımlarının aşılması ile çatlaklar meydana gelmektedir. Çatlaklara en yaygın müdahale yöntemi, özgün malzeme ile uyumlu kireç esaslı, yüksek dayanımlı harç ile doldurma yapılmasıdır. Büyük ve derin çatlak durumlarında özgün malzeme ile dikiş ve sonrasında boşlukların kireç esaslı bir harç ile doldurulması ile onarım yapılabilir. Ayrıca bu durumlarda uzman görüşü alınarak, paslanmaz metal kenet uygulaması yapılabilmektedir. Kenetlerin taş duvarlarda kullanımı uygunken, tuğla duvarlarda tuğla ile dikiş yapılması uygundur. Kenetler kurşunla montaj edilmeli, epoksi kullanılmamalıdır. Bu uygulamada yaygın olarak metal kenet kullanımının yanı sıra tarihi yapıların dokusu ile uyumlu olmayan lifli polimer malzemeler de kullanılmaktadır (TYDRYK, 2017).



Şekil 1.28. Fatih Camii minaresinde dikiş yöntemi uygulaması (Çılı ve Yıldız, 2013).

1.3.4.2.2.2. Enjeksiyon

Enjeksiyon, özellikle düzensiz ve derzleri boşalmış yığma duvarlarda ve orta kısmında boşluklu dolgu malzemesi bulunan sandık duvarların bütünlüğünün yeniden sağlanması için kullanılmaktadır. Enjeksiyon uygulaması için bağlayıcılığı yüksek ve özgül malzemeler ile uyumlu bir harç uygun bir basınç altında boşluklu duvara enjekte edilerek duvarın mekanik özellikleri iyileştirilebilir. Duvardaki boşluk oranına bağlı olarak uygulamanın verimliliği artabilmektedir. Uygulamada kullanılan enjeksiyon harcı ince, akıcı ve özgül duvar malzemesi ile uyumlu olmalıdır. Fazla akışkan enjeksiyon harcında duvarlarda çiçeklenme problemi ortaya çıkabilir. Bu nedenle duvar bezemesi bulunan duvarlarda bu durumlar gözönüne alınmalıdır (TYDRYK, 2017).

Enjeksiyon geri dönüşü olmayan bir uygulamadır. Bu nedenle iyice değerlendirildikten sonra uygulama aşamasına geçilmelidir. Duvarda neme ve bozulmaya sebebiyet vereceği için enjeksiyonda çimento katkısı kullanılmamalıdır. Uygulama öncesinde uygulama bölgesinde yer alan zayıf toz tabakası yıkanmalı, hasar gören hatıllar değiştirilerek, varsa hatıl boşlukları özgül malzeme ile kapatıldıktan sonra işe başlanılmalıdır (TYDRYK, 2017).



Şekil 1.29. Kubbede (Küçük, 2010) ve duvarlarda enjeksiyon uygulaması (Oktay, 2017).

1.3.4.2.2.3. Donatı Takviyesi

Yığma duvarların çekme dayanımı oldukça düşüktür. Duvarlar çekme gerilmesi aldıklarında kolayca çatlaklar oluşabilir. Bu nedenle yığma duvarlara donatı takviyesi yapılmaktadır. Donatı ile duvarda çekme gerilmesi oluşan bölgelere lokal ve pratik bir çözüm olmasının yanında, duvar malzemesi ile uyumlu olmasına ve ek hasar

oluşturmamasına dikkat edilmelidir. Paslanmaz çelik ve lifli polimer donatıların duvar derzlerine yerleştirilmesi ile duvar dayanımının artırıldığı bu yöntem sıvasız duvarlarda görünüşü etkileyeceği için tercih edilmez. Yatay ve düşey ankrajlar atılarak duvarın bir bütün olarak çalışması sağlanır. Uygulamada derzler 4-5 cm boşaltılır, donatılar derzlere yerleştirilerek bazik enjeksiyon ile üzerleri kapatılır. Sandık duvarların bir bütün olarak çalışmasında da bu yöntem çelik lamalar ve özel ankrajlar yardımıyla kullanılır.



Şekil 1.30. Donatı ile derz güçlendirme uygulaması (Kara, 2009).

1.3.4.2.2.4. Gergi, Öngerme, Çemberleme ve Hatıllar

Düşeyden ayrılmış duvarların stabilitesini sağlamak ve yıkılmasını önlemek amacıyla gergi çubukları kullanılmıştır. Uygulamada, hasarlı sütun, ayak, duvar ve tonozlar gergiler yardımıyla sağlam duvarlara bağlanır. Gergiler ayrıca inşa aşamasında kemer ve tonozların açılmasını, sütun ve duvarların yıkılmasını önlemek amacıyla kullanılmışlardır (Ahunbay, 2019). Gergi uygulamasında gerginin efektif çalışabilmesi için gergilerin bağlandığı elemanlar ve uç bağlantı noktalarındaki yapı-gergi aderansı tam sağlanmalıdır.



Şekil 1.31. Fatih Camii sütun başı gergi sistemi, duvar içi gergi sistemi birleşim detayı ve kurşun ile dolumu (Çılı ve Yıldız, 2013).

Tarihi yapıların ciddi hasar durumlarında öngerme uygulanmaktadır. Öngerme uygulamasında, hasarlı sütun, ayak ve duvarlar gibi düşey taşıyıcı elemanlar ile kemer, tonoz ve kubbeler gibi eğrisel öğeler duvar üst seviyelerinden paslanmaz çubuklarla (kuşak) sıkıca sarılır ve açılmaları önlenmiş olur. Bu uygulamadan önce yapının zemini ve temelindeki problemler giderilmeli, duvarlardaki hasarlar onarılmalıdır (Ahunbay, 2019).



Şekil 1.32. Nevşehirli Damat İbrahim Paşa Külliyesi ve I. Mahmut Kütüphanesi yapılarında öngerme çubukları (Ahunbay, 2019).

Tarihi yapılarda hasar gören sütun, ayak ve kubbeler metal çemberleme uygulaması ile güçlendirilmektedir. Çemberleme tamamen geri alınabilir bir uygulama olduğu için tarihi yapılar için oldukça uygundur. Eski uygulamalarda yüksek sıcaklık altında hazırlanana çemberleme yerine yerleştirildikten sonra soğuma ile tam kavrama sağlanırdı. Günümüzde parçalı olarak cıvatalarla sıkıştırılarak bu kavrama sağlanmaktadır. Uygulamada çelik çember ile duvar yüzeyi arasına kurşun akıtılır veya levha olarak yerleştirilir (TYDRYK, 2017).



Şekil 1.33. I. Mahmut Kütüphanesi kubbe çemberleme uygulaması (Çılı ve Yıldız, 2013).

Tarihi yığma yapıların sağlıklı yapısal davranışı büyük oranda duvar-duvar, duvar-döşeme, duvar-kemer/tonoz gibi bağlantılarının stabilitesini kaybetmemesine bağlıdır. Ancak bu yapılarda hasarlar bu noktalarda meydana gelmekte ve duvarlarda düzlem dışı göçme davranışı hâkim olmaktadır. Bu nedenle bağlantı yerlerinin stabilitesini arttırmak ve düzlem dışı göçme durumlarının engellenmesi gerekmektedir. Tarihi yapılarda yapıyı planda boydan boya dolaşan ahşap veya metal hatıllar bulunmaktadır. Tonozların başlangıç noktalarında tonoz boyunca, kubbelerde genellikle sekizgen planlı ahşap hatıllar bulunmaktadır. Bu elemanlar zamanla çürümekte ve hasar görmektedir. Dolayısı ile bu elemanların özgün malzeme ile yenilenmesi gerekmektedir. Ayrıca birbirine dik yığma duvarlar çelik tij veya levhalar ile birbirlerine bağlanabilmektedir. Yığma duvarların düzlem dışı hareketlerini sınırlamak amacıyla kat seviyelerinde veya saçak seviyesinden bağ kirişleri oluşturulabilir, duvarın içinden ve dışından yapıyı saracak kuşaklamalar gerçekleştirilebilir (TYDRYK, 2017).



Şekil 1.34. I. Mahmut Kütüphanesi tonoz çevresi ahşap hatıl sistemi (Çılı ve Yıldız, 2013).

1.3.4.2.2.5. Kesit Genişletme-Mantolama

Tarihi yapılarda sütun, ayak ve duvar elemanların yatay kesitlerinin yetersiz olduğu durumlarda kesit genişletme-mantolama uygulamaları gerçekleştirilir. Özgün dokuyu örtmesinden dolayı tarihi yapılar için çok da uygun bir yöntem değildir (Ahunbay, 2019).

Tarihi yapılarda kesit artırımı özgün malzeme ile yapılabildiği gibi nadirde olsa donatılı olarak mantolama yapılabilmektedir. Tarihi yapı duvarlarında çok geniş çatlaklar (veya yarılmalar) olması veya ileri düzeyde hasar olması durumlarında mantolama yapılmaktadır. Tuğla duvarlar gibi düzgün yüzeyli duvarlarda kullanımı etkindir. Uygulaması kolay ve efektif olmasının yanında sıvasız ve bezemelerin bulunduğu tarihi yapı duvarlarında kullanılmamalıdır. Mantolama duvarın her iki tarafına yapılarak birbirine ankraj edilmelidir. Donatı olarak lifli polimer kullanılabileceği gibi, elzem durumlarda çelik hasır kullanılabilir. Harç olarak özgün malzeme ile uyumlu kireç esaslı harçlar kullanılmalıdır (TYDRYK, 2017).

1.3.4.2.2.6. Destekleme – Payandalama

Tarihi yapılarda kubbe, kemer tonoz gibi elemanların mesnetlerinde açılma meydana gelmesi yapı sağlığı için çok tehlikelidir. Bu tehlikeli durumu önlemek amacıyla alınan önlemlerden biri de yapı köşelerine ve kemer mesnet hizalarına yatay hareketi önleyici payandalar ilave edilmesidir. Bu uygulamada dikkat edilmesi gereken nokta payandaların zayıf duvarlara tek noktadan bağlanmamasıdır. Bu durumda rijit payanda zayıf duvarda

zımbalama etkisi ile hasara neden olur. Uygulamada payandaların bağlanacağı noktalarda yastıklama yapılması ile itkinin daha geniş yüzeye dağıtılması sağlanarak duvarda oluşabilecek gerilmeler azaltılır (Mahrebel, 2006).



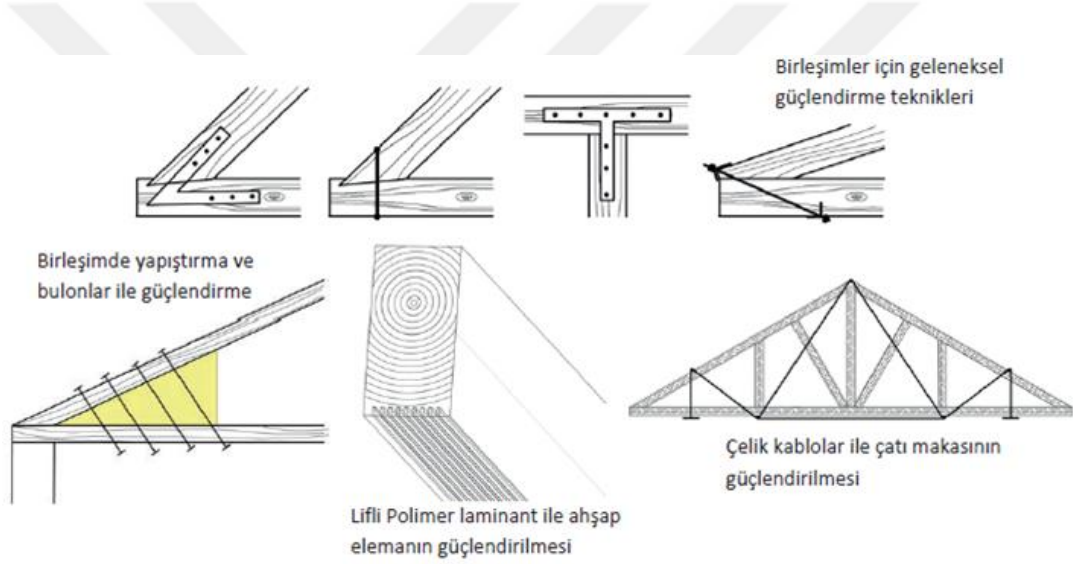
Şekil 1.35. Ayasofya ve Kariye Camii payandaları (Ahunbay, 2019).

1.3.4.2.2.7. Döşemelerin Güçlendirilmesi

Tarihi yapılarda genellikle ahşap ve volta döşemeler kullanılmıştır. Ahşap malzeme neme ve yangına karşı oldukça dayanıksızdır. Ayrıca geniş açıklıklı ve görece ince olan döşemelerde döşeme yatay yükleri duvarlara iletmede yetersiz kalır (rijit diyafram çalışmaz). Bu durumda ahşap döşemelere alt ve üst kaplama tahtaları çakılır, kirişler arasına takoz (boyunduruk) eklenerek döşemenin rijitliği artırılır. Rijitliği daha da artırmak amacıyla ilk kaplamaya dik ikinci bir kaplama atılabilir. Kaplamaların döşeme ile bağlantısı çivilerle sağlanır. Ahşap döşeme kirişlerin duvarlara oturan kısımları zaman içerisinde nemden dolayı çürüyebilir. Bu nedenle bu kısımlar kontrol edilmeli, gerekli ise değiştirilmeli ve duvara oturan kısımlar çürümeyi azaltmak için kireç harcı ile kaplanmalıdır. Döşeme rijitliğinin artırılması için kirişlerin duvara oturan uzunlukları artırılabilir. Volta döşemelerde bulunan demir profiller zamanla paslanabilir. Bu nedenle paslarının temizlenip pas koruyucu sürülebilerek koruma sağlanabilir (TYDRYK, 2017).

1.3.4.2.2.8. Ahşap Çatıların Güçlendirilmesi

Genellikle bina türü tarihi yapılarda kullanılan ahşap çatılar makas aşık, mertek ve dikmelerden oluşturulur. Zamanla nemden ve böceklenmeden hasar gören ahşap elemanlar özgün malzeme ile değiştirilmelidir. Birleşim detayları gerekmesi durumunda metal plaka ve çubuklar ile takviye edilmelidir. Tahkikler sonucunda yetersiz kalması durumunda çatı makası çekme çubukları çelik plakalar, halatlar ve gergiler ile desteklenebilir. Ahşap çatı imalatında çatı makaslarının duvara iyi mesnetlenmemesi durumunda duvarda düzlem dışı hareket oluşturur ve hasara neden olur. Bu nedenle çatı makaslarının doğrudan duvar yerine duvar üstü teşkil edilmiş hatıllara oturtulması sağlıklı olacaktır (TYDRYK, 2017).



(a) Çatı makas elemanların güçlendirme uygulamaları



(b) Yanlış uygulama örneği, gerçek hasar durumu ve çatı elemanlarının hatıla mesnetlenmesi

Şekil 1.36. Ahşap çatılarda güçlendirme uygulamaları ve duvar birleşim uygulamaları (TYDRYK, 2017).

1.3.4.2.2.9. Güçlendirmede Modern Malzeme Kullanımı

Tarihi yapıların restorasyon uygulamalarında ana ilke özgünlüğün korunmasıdır. Ancak bazı durumlarda özgün malzeme yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle yapının görüntüsünü bozmayacak modern malzemelerin kullanımına uzman görüşü alınarak karar verilebilir.

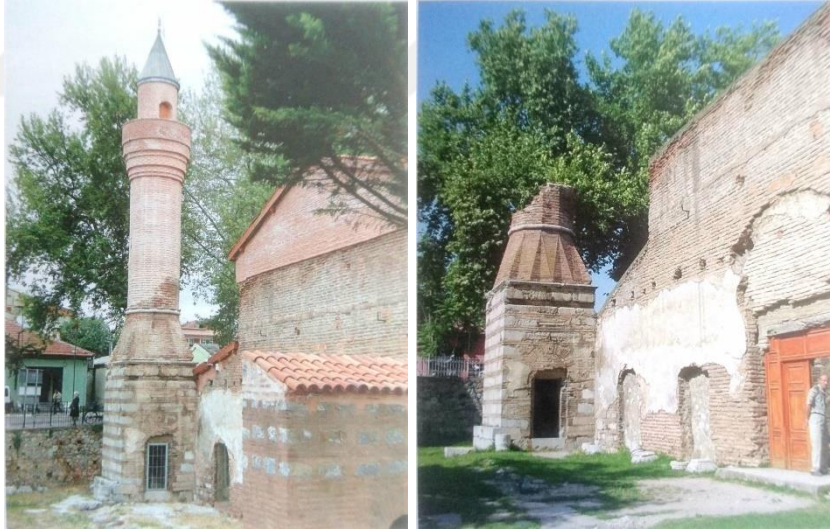
Son yıllarda özellikle lifli polimer uygulamaları yaygınlaşmıştır. Kubbe, tonoz gibi elemanlarda kaplama altında rahatlıkla uygulanan bu yöntem etkili sonuçlarda sağlamaktadır. Ancak yapının nefes almasını engelleyeceği ve duvar içi nem oranını artıracığı için kullanımına karar verilirken dikkat edilmelidir. Tarihi yapılarda kullanılan bir diğer uygulamada lifli polimer çubukların duvar derzlerinde ve mantolamada kullanılmasıdır. Karar verilmesi halinde çelik elemanlar yerine kullanılabilir. Ayrıca tarihi yapıların onarımında uygun olmasa da bazı durumlarda çimento veya kimyasal esaslı harçlar kullanılmaktadır. Bu harçların kullanımı geri döndürülemediği, duvarlarda nem tutmasından dolayı zamanla bozulmaya ve çirkeşlemeye neden olduğu için kullanımı uygun değildir. Ahşap elemanların yetersiz kaldığı ve kesit büyütmenin uygun olmadığı yerlerde ahşap elemanların yerine lamine elemanlar kullanılabilir. Ancak bağlantı detayları ahşaptan farklı olduğu için düzgün bir şekilde projelendirilmelidir.



Şekil 1.37. Küçük Ayasofya Cami Kubbe kasnağında FRP uygulaması (Güler vd., 2004).

1.3.4.3. Bütünleme

Tarihi yapılar zaman içerisinde deprem, yangın, savaş vb. etkilerden dolayı hasar görmüş ve yıkılmıştır. Bir kısmı kopmuş, yıkılmış ve kaybolmuş tarihi yapıların tekrardan işlevsel hale getirilmesi, estetik bütünlüğünün sağlanması ve yapı güvenliğinin tesis edilmesine bütünleme adı verilmektedir. Venedik Tüzüğü'nde yer alan “Eksik kısımlar tamamlanırken, bütünle uyumlu bir şekilde bağdaştırılmalıdır; fakat bu onarımın, aynı zamanda sanatsal ve tarihi tanıklığı yanlış bir şekilde yansıtmaması için, özgünden ayırdedilebilecek bir şekilde yapılması gereklidir” ifadesi dikkate alınarak bütünleme yapılacak kısımların eski dokudan ayırt edilebilecek seviyede olması beklenmektedir. Eski dönemlerde yapılan bütünleme çalışmaları malzeme tedarikindeki sıkıntılardan dolayı doğal olarak farklılığın oluşmasına neden olmuştur. Günümüzde ki uygulamalarda da yapı malzemesi ile uyumlu ancak müdahale dönemini yansıtacak şekilde imalat yapılması uygun olacaktır.



Şekil 1.38. İznik Ayasofya Camii minaresinde bütünleme uygulaması (Ahunbay, 2019).

1.3.4.4. Yenileme

Zamanla hasar alarak onarılamaz duruma gelen yapı elemanları yeni malzeme kullanılarak tarihi yapıya işlev kazandırılmasına yenileme adı verilmektedir. Ayrıca günümüzde kullanım durumunda bulunan pek çok tarihi yapı ilk yapılış amacından farklı bir

işlevde hizmet vermektedir. Bu bağlamda yapının dış görünüşünü bozmadan gerekli minimum müdahale ile bazı bölümlerin yenilenmesi gerekmektedir. Günümüzde kullanım durumunda olan, özellikle bina türü yapılarda mecburi bir gereksinim olarak yenileme uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Örneğin bugün Çorum Müzesi olarak kullanılan yapının zamanında bir yangın sonucu döşeme ve çatı sistemlerinin yok olduğu bilinmektedir. Bina, müze olarak kullanılacak olması nedeniyle döşeme ve çatı sistemi yeni yüklerle göre dizayn edilmiş yeni malzemeler ile yenilenerek hizmete sunulmuştur.



Şekil 1.39. Yangın sonrası yenilenen Çorum Müze binası

1.3.4.5. Yeniden Yapım

Tümüyle yıkılmış veya büyük ölçüde hasar görmüş tarihi yapıların elde edilen verilere dayanarak yeniden inşa edilmesidir. Her ne kadar özgün tarihi yapı yok olmuş olsa da yeniden yapımla simgesel değeri yaşatılmış olacaktır. Bu uygulamaya en meşhur örnek olarak Bosna Savaşı sırasında yıkılıp daha sonra yeniden yapılan Mostar Köprüsü verilebilir.



Şekil 1.40. Savaşta yıkılan Mostar Köprüsü'nün yeniden yapımı (Colak, 2016).

1.3.4.6. Temizleme

Tarihi yapıya sonradan eklenen ve estetik değer taşımayan eklerden arındırma, iç ve dış cephe yüzeylerinde yapılan mekanik ve kimyasal işlemlere temizleme denir. Tarihi yapılar çevre koşullarının etkisiyle zamanda yüzey kirlenmesine maruz kalmaktadır. Bu nedenle periyodik olarak yüzey temizliğinin yapılması gerekmektedir. Ancak temizleme uygulamaları cephe görünüşlerine zarar vermeden yapılmalıdır. Öncelikle yapı yüzeyinin malzemesi ve yüzeyde birikmiş kir tabakasının niteliği belirlenip ona göre uygulamalar yapılmalıdır. Uygulamalarda taşları ve harcı aşındırması bakımından asidik temizlik malzemelerden kaçınılmalıdır.

1.3.4.7. Taşıma

Genel olarak tarihi yapıların yerinde korunması esastır. Ancak yüksek kamu çıkarı olan durumlarda tarihi yapıların taşınması gerekebilir. Venedik Tüzüğü'nün 7. maddesinde tarihi yapıların taşınması ile ilgili “Anıtın korunması bunu gerektirdiği, ya da çok önemli ulusal, ya da uluslararası çıkarların bulunduğu durumlar dışında izin verilmemelidir” ifadesi yer almaktadır. Bu bağlamda yerinde korunması olanaksız olan tarihi yapı parça parça sökülerek veya bir bütün olarak uygun bir konuma taşınabilmektedir. Bu uygulamaya örnek olarak Ilısu Barajı ve Hidroelektrik Santrali (HEPP) Projesi'nin tamamlanmasıyla büyük bir bölümü su altında kalmış olan Hasankeyf Aşağı Şehir bölgesindeki Tarihi yapıların taşıma uygulamaları verilebilir.



Şekil 1.41. Süleyman Han Camii minaresi söküm, numaralandırma ve tekrar kurulumu işlemleri (KVMGM Arşivi, (2019-2021)).



Şekil 1.42. İmam Abdullah Zaviyesi türbe bölümünün bütün olarak taşınması ve yeni konumu görünüşleri (KVMGM ve DSİ Arşivi, (2017-2019)).

1.3.4.8. Çağdaş Ek

Tarihi yapıların yeniden kullanımı ve yeni işlevlerine uyarlanması için hazırlanan projelerde, yeni işlevin gerektirdiği hizmet birimlerini yerleştirmek, konfor koşullarını sağlamak gibi gereksinimler için ek mekân ve donanımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Venedik Tüzüğü'nün 13. maddesinde “Eklemelere ancak yapının ilgi çekici bölümlerine, geleneksel konumuna, kompozisyonun, dengesine ve çevresiyle olan bağlantısına zarar gelmediği durumlarda izin verilebilir” ifadesi yer almaktadır. Ekler günümüz mimarisini yansıtacak şekilde tasarlanmalı ve eski yapıyla uyumlu olmalıdır. Ancak yeniden kullanımları sırasında ağır programlar yüklenen tarihi yapılarda ekler büyümekte ve kütleli uyum sağlanamamaktadır (Ahunbay, 2019).

1.3.5. Tarihi Yığma Yapılarda Hasar Tespiti

Restorasyon uygulamalarını gerektirecek hasarın oluşumu bir süreç içerisinde veya deprem, yangın, savaş vb. ani olaylar neticesinde meydana gelir. Bu noktada hasarın erkenden tespit edilmesi ve müdahale edilmesi yapı sağlığı açısından önemlidir. Genellikle büyük hasarlara sebebiyet veren ve önlenmesi imkânsız olan deprem gibi ani etkilerin hasarları gözlemsel inceleme ile rahatlıkla belirlenebilirken, çevresel faktörler nedeniyle uzun bir süreç içerisinde, tedrici olarak ortaya çıkan hasarın gözle görülmesi mümkün olamayabilmektedir. Bu nedenle tarihi yapıların periyodik veya sürekli izleme ile takip edilerek hasarın varlığı erken dönemde farkedilmesi yapı sağlığı için büyük önem taşımaktadır. Hasarın varlığı tespit edilmesi durumunda, aşama aşama hasarın nedenleri, boyutu ve bölgelerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, yerinde gözlem ve incelemeler yapılması, malzeme özelliklerini belirlemeye yönelik hasarsız ve az hasarlı deneysel testlerin gerçekleştirilmesi, laboratuvar deneyleri ve yapıyı bütüncül olarak değerlendirme imkânı sağlayan deneysel dinamik karakteristiklerin elde edilmesi bu sürecin araçları olarak kullanılmaktadır.

1.3.5.1. Yapının Geçmişi ile İlgili Belgelerin Toplanması

Tarihi yapıların hasar nedenleri, ilk inşa süreçlerine, geçirdiği doğal afetlere ve geçmiş yıllarda yapılan bazı onarımlar, ekler, kazılar vb. işlemlere dayanabilmektedir. Bu bağlamda, tarihi yapı ile ilgili yapının banisi ve mimarının kim olduğu, inşa tarihi, inşa aşamaları, yapım tekniği, yapısal eklemeleri, geçirdiği doğal afetler ve onarımlar mümkün olduğunca elde edilmeye çalışılmalıdır. Bu tür kitabi bilgiler yapıda oluşan hasarın nedenleri hakkında önemli ipuçları verebilir.

1.3.5.2. Yerinde Gözlem ve İnceleme Yapılması, Rölöve, Restitüsyon Çalışmalarının ve Restorasyon Projelerinin Oluşturulması

Hasar tespiti ile ilgili yapı üzerinde gerçekleştirilecek ilk değerlendime süreci yerinde yapılan gözlemler ve incelemelere dayanır. Bu bağlamda, yapı elemanlarında ve yapı malzemelerindeki bozulmalar tespit edilerek, hasarların seviyesi, boyutları ve tipleri kaydedilmelidir. Yapıda meydana gelen çatlak, hasar, duvarlarda oluşan düşeyden sapmalar,

yapı elemanlarında eğilmelere ve göçmeler tespit edilmeli, fotoğraf ve video gibi dijital ortamlarda kaydedilerek hasar haritaları çıkarılmalıdır. Yapının geometrisi ile ilgili değişimler tespit edilmelidir. Ayrıca yapıdaki yük aktarım elemanları belirlenmelidir (Dabanlı, 2008).

Yapının durumunu daha net ortaya koyabilmek adına; Rölöve ve Rölöve raporu (analiz ve değerlendirmeler, fotoğraf albümü ile birlikte), Restitüsyon önerisi ve Restitüsyon raporu, Restorasyon önerisi ve Restorasyon raporları oluşturulması gerekmektedir. Rölöve çalışmalarında farklı dönemlerde yapılan uygulama ve ekleri gösterecek Dönem Analizi ve hasarları ve hasar tiplerini gösteren Hasar Analizi gerçekleştirilir. Yapı ile ilgili yapılması önerilen uygulamaları kapsayan Restorasyon Müdahale Öneri Paftası hazırlanır (TYDRYK, 2017). Yapı üzerinde yer alan hasarları, geometrik farklılaşmayı, farklı malzemeleri vb. görsel olarak elde etmek amacıyla gelişmiş fotogrametrik, lazer tarama ve jeodezik deneysel yöntemler kullanılmaktadır.

1.3.5.3. Depremsellik ve Zemin İncelemesi

Depremler ve zeminden kaynaklı problemler tarihi yapıların hasar görmesinde etkili olan olaylardır. Ayrıca zemin durumu deprem yüklerine doğrudan etki edebilmektedir. Bu bağlamda korunması planlanan tarihi yapılar için yapının bulunduğu bölgenin zemin ve deprem karakteristiği elde edilmeleir. Tarihi yapının bulunduğu arazinin durumunun incelenmesi amacıyla, yüzey incelemesi, inceleme çukurları, sondaj uygulaması, sonda/arazi deneyleri, jeofizik yöntemler kullanılmaktadır. Elde edilen verilere göre Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (TBDY, 2018) göre yapının bulunduğu zemin sınıfı belirlenir. Yapının bulunduğu yerin deprem karakteristikleri zemin sınıfına ve yapının bulunduğu koordinatlara göre TBDY deprem haritalarından elde edilir. Deprem karakteristiğine göre yapıya gelecek yükler belirlenerek yapının mevcut taşıyıcı elemanlarının yeterli olup olmadığı değerlendirilir.

1.3.5.4. Yerinde Uygulanan Deneyler

Tarihi yapılarda malzeme özelliklerini belirlemeye yönelik tahribatsız deneysel yöntemler ve az tahribatlı deneysel yöntemlerden yararlanılır. Yapı üzerinde farklı noktalardan alınan verilerle genel yapı malzeme özellikleri tahmin edilmeye çalışılır.

1.3.5.4.1. Tahribatsız Yöntemler

Yüzey sıcaklığı ve nem, yüzey sertliği ve ultrases ölçümü, magnometri, infrared/termografi, georadar/radar tarama, gibi tahribatsız deneyler tarihi yapılarda malzeme özelliklerinin araştırılması amacı ile sıklıkla kullanılmaktadır. Yüzey sıcaklığı ve nem ölçümleri, yüzey sertliği ve ultrases sonuçlarının doğru olarak değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır.

Yüksek frekanslı ses dalgası üreten aletler yardımıyla gerçekleştirilen ultrases deneylerinde ampirik formüller ile basınç dayanımı elastisite modülü gibi değerler tahmin edilebileceği gibi karot numunelerin deney sonuçlarına göre birlikte değerlendirilerek malzeme dayanım tahmini yapılması daha uygundur.



Şekil 1.43. Yığma duvar üzerinde ultrases ölçümü (Günaydin vd., 2022).

Schmidt çekici veya darbe çekici olarak adlandırılan sertlik ölçüm testinde N tipi (doğal taş, beton vb. gibi dayanımı yüksek malzeme) ve P tipi (harç, tuğla vb. gibi dayanımı düşük malzeme) çekiçler bulunmaktadır. Ölçüm alınan bölgede en az 10 vuruş yapılarak

duvarın basınç dayanımı ve yapı genelindeki dağılımını tahmin etmek amacıyla basınç tek başına değil, ultrases ölçümü ve karot basınç dayanımı gibi farklı yöntemlerle birlikte uygulanmalıdır. Sertlik ölçümü deneyinde duvardaki sıva ve kaplama kaldırılmalıdır (TYDRYK, 2017).



Şekil 1.44. Doğal taşlarda ve yığma duvarlarda N ve P tipi çekiçlerle yüzey sertliği ölçümü (Özturan vd, 2006; Krstevska vd, 2007).

Tarihi yapılarda yapı elemanları içerisinde yer alan ve yüzeye yakın olan metal elemanların tespit edilmesi amacıyla Manyetik Tarama gerçekleştirilir. Yüzeye yakın bölgelerdeki hasarın varlığını tespit etmek amacıyla, malzemelerin elektromanyetik radyasyon yayılımına bağlı olarak Termografi Yöntemi kullanılır. Malzemenin hasar alması ile ısı akışının değişmesi sonucu yüzey sıcaklığı değişir, böylece kızılötesi tarayıcılarla hasarın yeri tahmin edilebilir. Ayrıca yapı içindeki büyük boşlukların, farklı malzemelerin, çok cidarlı/tabakalı duvarların ve hasar durumunun tespit edilmesi amacı ile Georadar Yöntemi kullanılmaktadır. Yöntemde, ortam içerisine elektromanyetik dalgalar gönderilerek alıcı verici arasında geçen zamana bağlı olarak boşluk ve çatlakların varlığı ve malzemelerin fiziksel özellikleri tahmin edilebilir (TYDRYK, 2017).

Tarihi yapılarda meydana gelen hasar genellikle çatlak oluşumu ile gözlemlenir. Çatlak oluşumu sonucu bölgede oluşan iç kuvvetler yapının diğer elemanlarına aktarılır. Çatlak oluşan bölgede zaman içerisinde iç kuvvetleri karşılamada yetersiz kalması dolayısıyla çatlak oluşumu genişler. Yapıda oluşan çatlağın genişliği hareketli yük ve sıcaklık değişimine bağlı olarak değişebilir. Burada önemli olan çatlak gelişiminin uzun zaman içerisindeki eğimidir. Bu nedenle çatlağın belli bir süre (en az 1 yıl) izlenmesi uygun olacaktır. Böylece çatlağın gelişen bir çatlak olup olmadığı belirlenmiş olur (Sesigür vd., 2007).



Şekil 1.45. Çatlak genişliği değişimi (a), kapı üstü lentosunda çatlak genişliği ölçümü (Efes Tiyatrosu) (b), çatlak genişliği ölçüm cetveli (c) (Sesigür vd., 2007).

1.3.5.4.2. Az Tahribatlı Yöntemler

Tarihi yapıların malzeme özelliklerinin belirlenmesinde tahribatsız deneyler tek başlarına yetersiz kalabilmektedir. Bu bağlamda tahribatsız deney sonuçlarının değerlendirilmesine yardımcı olması için yetkili kurumlardan izin alınması koşulu ile yerinde basınç deneyi, kayma deneyi, endoskopi, karot numune alınması gibi az tahribatlı deneyler de yapılabilmektedir.

Flat-jack deneyi olarak adlandırılan yerinde basınç deneyi, elemana uygulanan kuvvetin ve kuvvete karşılık gelen boy değişiminin ölçülmesine olanak sağlar. Tekli plak ile elemanın gerilme seviyesi ve şekil değiştirme yeteneği, çift plak ile basınç mukavemeti ve elastisite modülü elde edilebilir (TYDRYK, 2017).



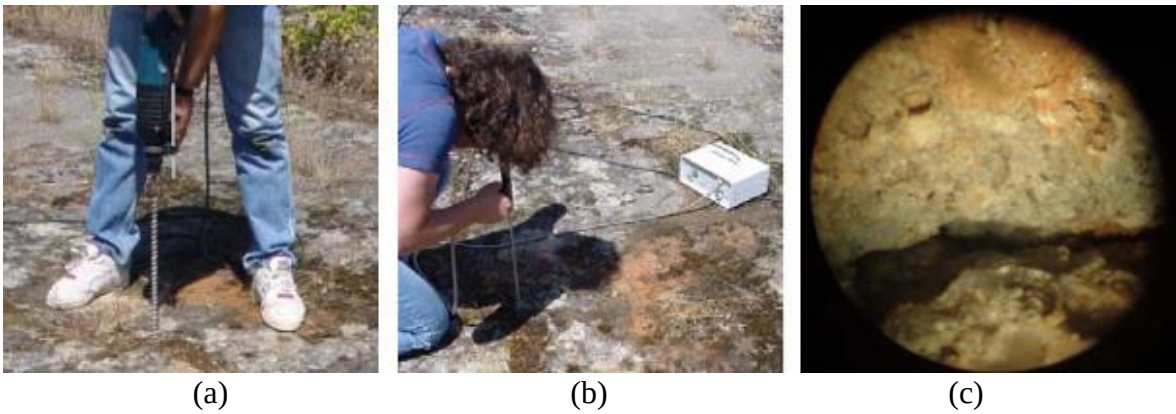
Şekil 1.46. Flat jack uygulama örnekleri (TYDRYK, 2017).

Duvarın kayma dayanımının elde edilebilmesi amacıyla yerinde kayma deneyi uygulanmaktadır. Deney için duvar içerisine iki boşluk açılır, bir taraftan yatay kuvvet uygulanır, diğer tarafta yatay yerdeğiştirme ölçülür. Ölçülen en büyük yatay kuvvet değeri ile kayma dayanımı hesaplanır.



Şekil 1.47. Yerinde kayma deneyi uygulaması (Yüzer vd., 2015).

Tarihi yapılarda yer alan büyük boyutlardaki taşıyıcı sistem elemanlarının iç kısımlarında kullanılan malzemeleri belirlemek amacıyla endoskopi yöntemi kullanılır. Yöntemde duvara 1cm çapında bir delik açılır ve çubuk kamera taşıyıcı ile elemanın iç kısmı gözlemlenir. Georadar sonuçlarını doğrulamada kullanılabilir.



Şekil 1.48. Endoskopi uygulama adımları (a) delme işlemi, (b) görsel inceleme ve (c) fotoğraf (Lourenço vd., 2001).

1.3.5.5. Laboratuvar Ortamında Yapılan Deneyler

Tarihi yapı malzemelerinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin daha doğru bir şekilde incelenebilmesi amacıyla gerekli durumlarda yapıdan taş, tuğla, harç ve ahşap numuneler alınarak laboratuvarında test edilmesi gerekir. Ancak bu duruma tarihi yapının önem derecesine göre her zaman izin verilmeyebilir. Bu nedenle incelenen yapı ile benzer niteliklere sahip ve tahrip olmuş farklı bir yapıdan numune alınarak incelenen yapının malzeme özellikleri değerlendirilebilir.



Şekil 1.49. Yapıdan numune (karot) alınması (Krstevska vd, 2007).

Yapıdan alınan numunelerin basınç testi ile basınç dayanımları ve elastisite modülleri hesaplanır. Ayrıca yapılacak fiziksel laboratuvar deneyleri ile boşluklu birim hacim ağırlık/yoğunluk, boşluksuz birim hacim ağırlık, toplam boşluk oranı/porozite, doluluk oranı/kompasite, hacimce su emme/dışa açık boşlukların oranı, ağırlıkça su emme, kılcal/kapiler su emme katsayıları belirlenir. Malzemelerin içyapısının belirlenmesi amacı ile SEM (Scanning Electron Microscopy), XRay analizi, DTA (Differential Thermal Analyses), TGA (Thermal Gravimetric Analyses) analizi ve petrografik analizler gerçekleştirilebilir. Malzemenin içyapı özelliklerinin, harç örneklerinde agrega-bağlayıcı oranının ve puzolanik aktivitenin belirlenmesi amacı ile çeşitli kimyasal deneyler gerçekleştirilir. Bu deneyler her yapı için gerekmeyebilir. Bu nedenle hangilerinin yapılması gerektiğine uzman bir ekip tarafından karar verilir (TYDRYK, 2017).

1.3.5.6. Deneysel Modal Analiz Yöntemi Yardımıyla Hasar Tespiti

Genel (global) yapı sağlığı izleme yöntemleri yapı genelinde inceleme olanağı sağlamaktadır. Titreşime dayalı yapı sağlığı yöntemi olan Deneysel Modal Analiz (DMA) yöntemi tüm yapılar için oldukça sık kullanılmaktadır. Dinamik karakteristikler olarak adlandırılan doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranlarını elde etmeye yarayan DMA yöntemi ölçüm sırasında dikkate alınan etkiye bağlı olarak iki gruba ayrılmaktadır: (i) Zorlanmış Titreşim Yöntemi (ZTY), (ii) Çevresel Titreşim Yöntemi (ÇTY). Zorlanmış Titreşim Yöntemi, yapının bir sarsıcı (shaker) ile titreştirilip, titreşim hareketine yapının verdiği tepkinin ölçülmesi ilkesine dayanır. Çevresel Titreşim Yöntemi ise yapının çevresel etkiler altında titreşiminin ölçülmesi temeline dayanır ve ZTY yöntemine göre önemli avantajları vardır. Tez çalışması kapsamında, incelenen tarihi yapılara ve laboratuvar modellerine ait dinamik karakteristikler çevresel titreşim testler ile belirlenmiştir.

1.3.5.6.1. Deneysel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Ekipman ve Sistemler

1.3.5.6.1.1. Titreştiriciler ve Sarsıcılar

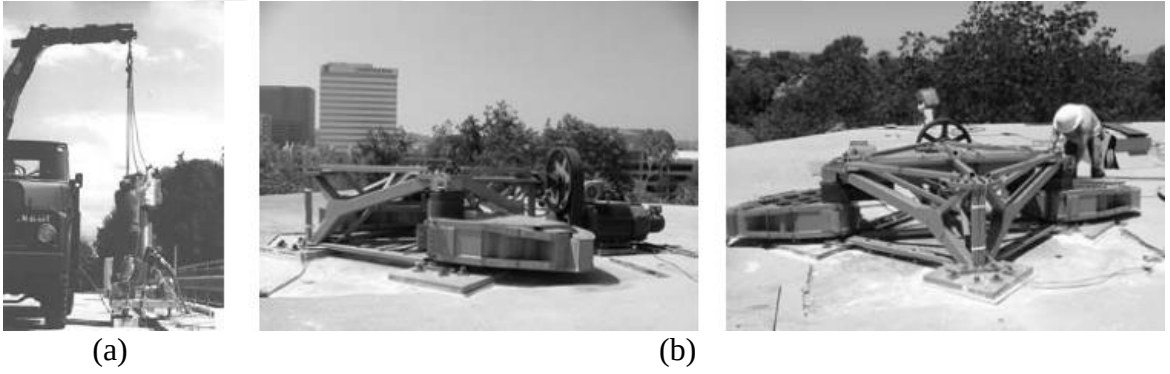
Mühendislik yapılarının titreşim tepkileri trafik, deprem, rüzgâr gibi çevresel etkiler altında ölçüleceği gibi sarsma masası, darbe çekiçleri ve titreştiriciler gibi yapay etkiler altında ölçülmektedir. Büyük mühendislik yapılarında yapay titreştiricilerin kullanımı zor ve yetersiz olması nedeniyle, bu tür yapılar doğal titreşimler altında ölçülebilmektedir. Buna karşın laboratuvar modellerinin titreşim deneylerinde yapay titreştiriciler kullanılmaktadır. Doğal etkenler altında titreşim ölçümü yapılması ucuz ve daha kolay bir yöntem olmasından ötürü mühendislik yapılarının titreşim ölçümlerinde çoğunlukla yapay titreştiriciler kullanılmaz (Altunışık, 2010). Mekanik, elektromanyetik ve elektro hidrolik sarsıcılar olmak üzere üç tip sarsıcı vardır.

Darbe çekiçleri ve sarsıcılar deneysel modal analiz yönteminde kullanılan yapay titreştiricilerdir. Darbe çekiçleri nispeten daha küçük yapıların ve laboratuvar koşullarında üretilen numunelerin ölçümlerinde tercih edilmektedir. Darbe çekiçleri ile rastgele titreşimler uygulanabileceği gibi büyüklük ve zamanla değişimi belirlenebilen titreşimler üretilmektedir.



Şekil 1.50. Darbe Çekici ve Başlıkları, Brüel&Kjaer 8210 tipi darbe çekici (Günaydın, 2016).

Sarsıcılar Zorlanmış Titreşim Testlerinde kullanılan, ele alınan yapının tipine ve hâkim titreşim frekansına bağlı olarak çeşitli özelliklerde dalga hareketleri uygulayabilen ölçüm aletleridir. Bu tür sarsıcılar gerçek yapılar üzerinde gerçekleştirilen arazi çalışmalarında tercih edilmektedir. Uygulamada yapıların üzerine uygun bir şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir. Hatalı kullanım sonucu yapıya hasar verme ihtimalleri vardır.



Şekil 1.51. Z24 köprüsünde kullanılan bir elektro-hidrolik sarsıcı (a) (Maeck ve De Roeck, 2003), ve bir çatıya eksantrik kütle sarsıcı montajı (b) (Yu vd., 2004).

1.3.5.6.1.2. İvmeölçerler

DMA testlerinde yapının titreşimi ivmeölçerler yardımıyla ölçülür. Bu nedenle ele alınan yapının özelliklerine (tipi, hâkim titreşim frekansı, vb.) bağlı olarak uygun ivmeölçerler seçimi ölçüm hassasiyeti açısından önemlidir. Günümüzde MEMS kapasitif, piezoelektrik ve piezorezistif gibi farklı özellikte pek çok ivmeölçer çeşidi mevcuttur. piezoelektrik ivmeölçerler diğer ivmeölçer tiplerine göre daha fazla tercih edilmektedir. (Günaydın, 2016). İvmeölçer seçiminde, ölçülecek frekans aralığı, maksimum ivme genliği, hassasiyeti ve çalışma sıcaklığı parametrelerine dikkat edilmelidir. Tez çalışması kapsamında Brüel&Kjaer 4507 B (1V/g hassasiyet, 0.4-6000Hz frekans aralığı, $\pm 7g$

maksimum ivme), Brüel&Kjaer 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler (10V/g hassasiyet, 0.1-1500Hz frekans aralığı, $\pm 0.5g$ maksimum ivme) ve Brüel&Kjaer 4506 B (0.5V/g hassasiyet, 0.3-2000Hz frekans aralığı, $\pm 14g$ maksimum ivme) tipi üç eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır (Şekil 1.52).

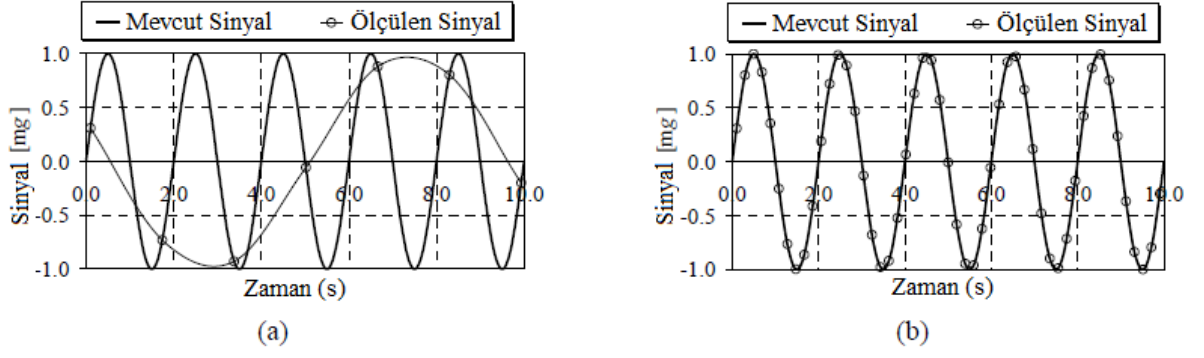


Şekil 1.52. Tek eksenli ve üç eksenli ivmeölçerler

1.3.5.6.1.3. Veri Toplama Sistemi ve Sinyal İşleme

İvmeölçerler yardımıyla yapıdan elde edilen ham titreşim sinyallerini toplamak ve bunların işlemesi için ilgili yazılımlara transfer etmek amacıyla veri toplama ünitesi kullanılmaktadır. Toplanan ham veriler yazılımlar yardımıyla işlenerek dinamik karakteristikler elde edilmektedir. Veri toplama sistemi, veri toplama ünitesi ve bilgisayardan oluşmaktadır.

İvmeölçerler yardımıyla toplanan veriler ham haldedir ve ivmeölçer kapasitesi içerisinde gürültü sinyalleri dâhil tüm sinyalleri içerir. Bu nedenle sinyallerin toplanmasında gürültü tepkilerinin bastırması, sinyal kalitesinin artırılması, gereksiz/istenmeyen sinyallerin temizlemesi, örnekleme oranı (veri toplama aralığı) vb. bazı koşullamaların yapılması elde edilen verilerin daha sağlıklı işlenmesine olanak sağlayacaktır. Şekil 1.53'te farklı örnekleme aralıkları ile elde edilebilecek sonuçları gösteren grafikler sunulmaktadır. Sinyal koşullama süreci, veri toplama sistemlerinde var olan yazılımlar ile yürütülmektedir.



Şekil 1.53. Örtüşme problemi örneği; örtüşme ile düşük örnekleme oranı (a) ve hedeflenen örnekleme oranı (b) (Ramos, 2007).

Tez kapsamında gerçekleştirilen çevresel titreşim testleri sırasında 17 kanallı Brüel&Kjaer 3560 C tipi veri toplama ünitesi kullanılmıştır. Veri toplama sistemi, ivmeölçer sayısının veya kablo uzunluklarının yetersiz kaldığı durumlarda referans sensörler vasıtasıyla referanslı ölçümlerin gerçekleştirilmesine müsaade etmektedir. Şekil 1.54’te Brüel&Kjaer 3560 C tipi veri toplama ünitesi ve kullanılan bilgisayara ait görsel sunulmuştur.



Şekil 1.54. Brüel&Kjaer 3560 C tipi veri toplama ünitesi

Yapıların deneysel dinamik karakteristiklerini elde etmek amacıyla ivmeölçerlerden elde edilen ham verinin işlenmesi gerekmektedir. Sinyal işleme olarak adlandırılan bu süreç, bilgisayar ortamında özel yazılımlar kullanılarak yürütülmektedir. Veri toplama sisteminde toplanan veriler bilgisayar ortamına zaman tanım alanında aktarılmaktadır. Ancak işlem kolaylığı sağlaması ve hesaplama gereksinimleri nedeniyle veriler frekans tanım alanına

Fourier serilerinden faydalanılarak aktarılmakta ve dinamik karakteristikler elde edilmektedir. Tez kapsamında çevresel titreşim testlerinde, ivmeölçerlerin veri toplama ünitesine tanıtılması, ham titreşim sinyallerinin depolanması, sinyal koşullama süreçlerinin yürütülmesi ve verilerin bilgisayar ortamına transfer edilmesinde PULSE (2006) yazılımı kullanılmıştır. Sinyal işleme ve dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde ise OMA (OMA, 2006) yazılımından faydalanılmıştır.

1.3.5.6.2. Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile İlgili Genel Esaslar

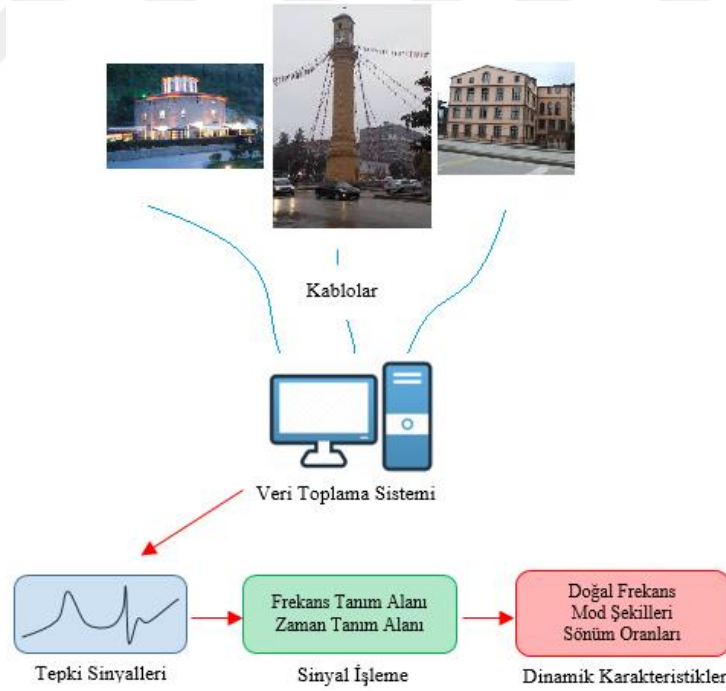
DMA yöntemi genel (global) yapı sağlığı izleme araçlarından en önemlisidir. Yöntem deneysel dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde, hasar tespit çalışmalarında ve sonlu eleman model güncelleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. DMA ölçümlerinde sıcaklık ve nem değişimlerine (iklimsel) karşı sonuçlar değişebilmektedir. Ancak bu değişim yapının malzeme özelliklerinde ve sınır koşullarında değişime neden olmaz. Öte yandan yapının titreşim tepkilerinin küçük olduğu ve doğrusal elastik davranış gösterdiği kabul edilir. Ele alınan yapının bir noktasından elde edilen yapısal davranışın bütün yapıyı yansıttığı, dolayısıyla yapının bir bütün ve sürekli olduğu varsayılır.

DMA yöntemiyle gerçekleştirilen titreşim testlerinin sağlıklı bir biçimde yürütülmesi ve ele alınan yapı hakkında doğru değerlendirmelerin yapılabilmesi için aşağıdaki maddeler göz önüne alınması gerekir:

- Titreşim testleri öncesinde yapının sonlu eleman modeli oluşturulmalı ve sayısal mod şekilleri ve bu modlara karşılık gelen frekans değerleri yaklaşık olarak belirlenerek deneysel ölçüm için frekans aralığına karar verilmelidir.
- Yapı için gerekli ve uygun olan DMA yöntemi (Zorlanmış veya Çevresel) tercih edilmelidir.
- Ölçüm kalitesi açısından uygun ivmeölçer türü seçilmeli, ivmeölçer yerleşim noktaları hedeflenen mod şekillerini elde edebilecek biçimde, uygun sayıda teşkil edilmelidir.
- Titreşim testlerinde istenilen verinin elde edilebilmesi amacıyla frekans aralığı, hassasiyeti, sinyal filtreleme, ölçüm süresi, örnekleme oranı gibi özelliklerin belirlenmesi ile gereksiz ortam ve gürültü sinyallerinin ham titreşim verileri üzerindeki etkileri azaltılır (Altunışık, 2010).

1.3.5.6.3. Çevresel Titreşim Yöntemi

Tez kapsamında gerçekleştirilen ölçümlerde çevresel titreşim testleri kullanılmıştır. Bu nedenle bu bölümde çevresel titreşim testlerine ait denklemler sunulmaktadır. Çevresel koşullar etkisinde gerçekleştirilen çevresel titreşim testleri etki davranış fonksiyonunun elde edilememesi nedeniyle Operasyonel Modal Analiz olarak da adlandırılmaktadır. Elde edilen titreşim sinyalleri zaman ve frekans tanım alanlarında işlenerek dinamik karakteristikler elde edilir. Frekans ve zaman tanım alanlarına dayalı literatürde farklı yöntemler geliştirilmiş olmakla beraber her iki grup yöntemler sinyal işleme için kullanılmaktadır. Literatürde ÇTY'ne dayalı dinamik karakteristiklerin elde edilmesi amacıyla frekans tanım alanında; piklerin seçilmesi, frekans ortamında ayrıştırma, geliştirilmiş frekans ortamında ayrıştırma ve polimax yöntemleri kullanılırken, zaman tanım alanında; rastgele azaltım, tekrarlı, maksimum olasılık ve stokastik altalan belirleme yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır (Caetano, 2000). Çevresel titreşim testleri akış şeması Şekil 1.55'te sunulmaktadır.



Şekil 1.55. Çevresel titreşim testlerine ait akış şeması

Bu tez çalışması kapsamında dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde ve deneysel yöntemlere dayalı hasar tespit çalışmalarında Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma (GFTAA) ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemleri kullanılmıştır.

1.3.5.6.3.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) Yöntemi

Frekans Ortamında Ayırıştırma (FOA) yöntemi Brincker (2000) tarafından geliştirilmiştir. GFTAA yöntemi ise FOA yöntemini temel almakla birlikte Brincker vd. (2001) tarafından geliştirilmiştir. FOA yönteminde, modlar, yanıtların spektral yoğunluk spektrumlarından hesaplanan tekil değer ayırıştırma grafiklerinde tepe noktalarını konumlandırarak basitçe seçilir. FOA yöntemi, Hızlı Fourier Dönüşümü analizinden tek bir frekans çizgisinin kullanılmasına dayandığından, tahmin edilen doğal frekansın doğruluğu FFT çözünürlüğüne bağlıdır ve modal sönüm hesaplanamaz. Bununla birlikte, GFTAA, hem doğal frekansların hem de mod şekillerinin gelişmiş bir tahminini verir ve ayrıca sönümlemeyi de içerir (Bendat ve Piersol, 2004; Jacobsen vd., 2006; Altunışık, 2010).

GFTAA'da, bir rezonans zirvesi etrafında tanımlanan tek serbestlik dereceli (TSD) Güç Spektral Yoğunluğu (GSY) işlevi, Ters Ayrık Fourier Dönüşümü kullanılarak zaman alanına geri alınır. Doğal frekans, zamanın bir fonksiyonu olarak sıfır geçiş sayısının belirlenmesiyle ve sönüm oranı ilgili TSD normalize edilmiş oto korelasyon fonksiyonunun logaritmik azalımıyla elde edilir. GFTAA yönteminde, ölçülemeyen etki kuvveti ile ölçülen davranış fonksiyonu arasındaki ilişki (Bendat ve Piersol, 2004; Jacobsen vd., 2006; Altunışık, 2010) aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$G_{yy}(j\omega) = H(j\omega) * G_{xx}(j\omega) H(j\omega)^T \quad (1.3)$$

Denklem (1.3)'te, $G_{yy}(j\omega)$ ve $G_{xx}(j\omega)$ tepki ve etki sinyallerinin GSY fonksiyonlarını, $H(j\omega)$ frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. * ve T üstel ifadeleri ise kompleks eşleniğini ve transpozisini ifade etmektedir. Denklemin çözümü literatürde (Felber, 1993; Peeters, 2000; Rainieri vd., 2007) ayrıntılı olarak sunulmuştur.

1.3.5.6.3.2. Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi

SAB, korelasyonlara veya spektrumlara dönüştürmeye gerek kalmadan doğrudan zaman verileriyle çalışan, salt çıktılı bir zaman etki alanı yöntemidir. Yöntem, özellikle operasyonel modal parametre tanımlaması için uygundur, ancak inşaat mühendisleri için ayrıntılı olarak açıklanması zor bir prosedürdür. Titreşim yapılarının modeli bir dizi

doğrusal, sabit katsayı ve ikinci dereceden diferansiyel denklem (Peeters ve De Roeck, 1999) ile tanımlanabilir:

$$[M]\{\ddot{U}(t)\} + [C_2]\{\dot{U}(t)\} + [K]\{U(t)\} = \{F(t)\} = [B_2]\{u(t)\} \quad (1.4)$$

Burada M, C, K sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir. R(t) titreşim kuvvetini, U(t), $\dot{U}(t)$, $\ddot{U}(t)$ ise zamana bağlı yer değiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. F(t) kuvvet vektörü olarak, ortamdaki verileri simgeleyen B matrisi ve u(t) vektörü cinsinden ifade edilmektedir. Dinamik denge denklemi, denklem (1.4), titreşen yapının davranışını temsil etmesine rağmen bu şekliyle SAB yöntemine uygun değildir. Bu yüzden, denklem (1.4) daha uygun bir form olan ayrık-zaman stokastik durum-uzay modeline dönüştürülmektedir (Yu ve Ren, 2005). Denklemin çözümü literatürde (Ewins, 1984; Juang, 1994) ayrıntılı olarak verilmektedir.

1.3.5.6.4. Çevresel Titreşim Testlerine Dayalı Hasar Tespit Yöntemleri

Hasar tespiti için görsel ve yerel deneysel yöntemler ile ilgili sınırlamalar göz önüne alındığında genel (global) yapı sağlığı izleme yöntemleri daha efektif bir yaklaşım olarak karşımıza çıkar. Titreşime dayalı genel hasar tespit yöntemleri, “modelden bağımsız-tepki tabanlı yöntem” veya “model tabanlı yöntem” olarak sınıflandırılabilir. Modelden bağımsız yöntem, yalnızca yapılardan elde edilen deneysel yanıt verilerine bağlıdır. Model tabanlı yöntem ise, yapının deneysel verilerle güncellenmiş ayrıntılı bir sayısal modeli üzerinden hasar tespiti gerçekleştirilir. Modelden bağımsız hasar tespit yöntemi harici uyarımlara bağlı tepkilerin ölçüldüğü yapısal sistemin modal testlerini içerir. Bir yapısal sistemin dinamik ve statik tepkileri yapısal parametrelerin bir fonksiyonu olduğundan, bu parametreler dinamik özelliklerdeki değişiklikler kullanılarak tanımlanabilir. Hasar gelişiminin sonuçlarından biri, bazı tepkilerde değişikliklere neden olan yerel rijitlik azalımıdır. Bu nedenle, hasar tespiti ve güvenlik değerlendirmesi için yapının dinamik karakteristiklerinin izlenmesi gereklidir. Öte yandan, model tabanlı hasar tespit yönteminde (Zimmerman ve Kaouk, 1994), sonlu elemanlar modeli iyileştirmesinin genel çerçevesinden yararlanılır (Abdo, 2014).

Model tabanlı yöntemler genellikle hasarın varlığını, yerini ve siddetini tahmin etme yeteneğine sahiptir. Bununla birlikte, modelden bağımsız yöntemler genellikle inşaat

mühendisliği yapısına uygulandığında hasarın varlığı ve konumu ile sınırlıdır (Guan ve Karbhari, 2008). Yapısal sağlık izlemede yukarıdaki yöntemlerden yalnızca birinin kullanılmasının zorunlu olmadığını belirtmekte fayda vardır. Bazı araştırmacılar daha etkili hasar tespiti için hem modelden bağımsız yöntemler hem de model tabanlı yöntemleri birleştirmişlerdiler. Literatürde titreşime dayalı pek çok hasar tespit yöntemleri kullanılmaktadır. Başlıca hasar tespit yöntemleri aşağıda sıralanmaktadır (Abdo, 2014):

- Doğal frekanslar ile gerçekleştirilen hasar tespiti,
- Sönüm oranları ile gerçekleştirilen hasar tespiti,
- Mod şekilleri ile gerçekleştirilen hasar tespiti,
 - ❖ Modal güvence kriteri (MGK)
 - ❖ Koordinat modal güvence kriteri (KMGK)
 - ❖ Mod şekli eğrilik yöntemi
- Modal esneklik yöntemi,
- Modal rijitlik yöntemi,
- Sayısal model güncellemeye dayalı hasar tespiti.

Bu tez çalışması kapsamında frekans değişimleri ile yürütülen hasar tespit çalışmalarının yanı sıra mod şekillerindeki değişimleri dikkate alan hasar tespit yöntemlerinden MGK ve KMGK yöntemleri kullanılmıştır.

1.3.5.6.4.1. Doğal Frekanslara Dayalı Hasar Tespiti

Yapıların kütle ve rijitliklerine bağlı yapısal özelliklerdeki değişikliklerin titreşim frekanslarında değişikliklere neden olduğu bilinmektedir. Bu nedenle yapısal hasar tanımlama ve sağlık izleme uygulamalarında doğal frekanslardaki değişimin takip edilmesi yaygın olarak kullanılmaktadır. Çok sayıda çalışma, herhangi bir yapısal hasarın, yapının doğal frekanslarındaki bir düşüşü yansıttığını göstermiştir. Ancak doğal frekanslardaki her değişim hasar kaynaklı oluşmayabilir. Nem ve sıcaklık gibi çevresel koşullar doğal frekanslarda değişime neden olmaktadır. Dolayısı ile herhangi bir değerlendirme yaparken bu parametreleri gözönüne alınması gerekmektedir. Frekans değişimine dayalı hasar tespiti yöntemi ile elde edilen değişimler bir uyarı niteliği taşır. Bu nedenle mod şekillerindeki

değişim ile karşılıklı olarak incelenmeden hasarın varlığından açık bir şekilde söz edilemez. Bu yöntemde değişim oranı (Δ), hasarlı (f_d) ve hasarsız (f_u) durumdaki frekans değerleri kullanılarak Denklem (1.5)'de verilen bağıntı ile elde edilir.

$$\Delta = \left| \frac{f_d - f_u}{f_d} \right| \quad (1.5)$$

1.3.5.6.4.2. Modal Güvence Kriteri

Yapı dinamiğindeki hasara bağlı değişimin bir diğer göstergesi mod şekillerindeki değişimlerdir. Mod şekilleri üzerinden yapıdaki hasarın varlığının tespiti ve hasar bölgesini tahmin etmeye yönelik MGK, KMGK ve Mod Şekli Eğrilik yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden en yaygını olan MGK yöntemi ile hasarlı ve hasarsız durumlarda yapıdan elde edilen modlara ait şekil vektörleri kıyaslanmaktadır. MGK değeri Denklem (1.6) kullanılarak elde edilir.

$$MGK(i, j) = \frac{|\phi'_{xi} \cdot \phi_{aj}|^2}{(\phi'_{xi} \cdot \phi_{xi}) \cdot (\phi'_{aj} \cdot \phi_{aj})} \quad (1.6)$$

Burada, ϕ_{xij} ve ϕ_{aj} farklı hasar durumlarında elde edilen mod şekil vektörlerinin ifade etmektedir. $MGK(i, j)$ değeri elde edilen mod şekillerinin ne derece benzer olduklarını göstermektedir. Dikkate alınan tüm mod şekillerinden elde edilen MGK değerleri kullanılarak bir matris oluşturulur. MGK değerinin 1.00'e yakın olması farklı durumlar için elde edilen mod şekilleri arasındaki benzerliğin iyi olduğu anlamına gelmektedir.

1.3.5.6.4.3. Koordinat Modal Güvence Kriteri

MGK yöntemi hasarlı durumlarda elde edilen mod şekillerinin genel benzerliğini göstermektedir. KMGK yöntemi ise iki titreşim mod şeklini karşılaştırırken ölçüm alınan tüm noktadaki modal yer değiştirmeler arasındaki ilişkiyi ele alınmaktadır. Böylece, hesaplanan KMGK değerleri, yapı içindeki hasarın bölgesini göstermektedir. KMGK değeri Denklem (1.7) kullanılarak elde edilir.

$$\text{KMGK}(i) = \frac{\left(\sum_{j=1}^{N_m^x} |\phi_{xij} \cdot \phi_{aij}| \right)^2}{\left(\sum_{j=1}^{N_m^x} |\phi_{xij} \cdot \phi_{xij}| \right) \cdot \left(\sum_{j=1}^{N_m^x} |\phi_{aij} \cdot \phi_{aij}| \right)} \quad (1.7)$$

Burada, ϕ_{xij} ve ϕ_{aij} farklı hasar durumlarında elde edilen mod şekil vektörlerinin i.ci düğüm noktası modal yer değiştirme değerini, N_m ise dikkate alınan mod şekli sayısını ifade etmektedir. Elde edilen KMGK değerinin 1.00'e yakın olması dikkate alınan hasar durumlarına ait mod şekillerinin ilgili ölçüm noktasında örtüştüğünü, sıfıra yakın olması mod şekillerinin örtüşmediğini ve ilgili ölçüm noktasında hasarın varlığını göstermektedir. Kademeli hasar durumlarında artan hasar ile beraber KMGK göstergesi sıfıra yaklaştığı için değişimler oldukça küçük kalmaktadır. Bu nedenle Okur (2017) hasarın meydana geldiği ölçüm noktasının açık bir biçimde tespit edilmesi için verileri 1-KMGK değerleri üzerinden karşılaştırmıştır.

1.3.6. Tarihi Yığma Yapıların Sayısal Olarak Modellenmesi

Tarihi yapılar genellikle yığma tekniği kullanılarak inşa edilmiştir. Bu nedenle sayısal olarak modellenmelerinde yığma türü yapıların sayısal olarak modelleme tekniklerinin, idealleştirmelerinin ve malzeme modellerinin kullanılması gerekmektedir. Tarihi yapılarda mimari detay yoğunluğu oldukça fazladır. Ayrıca süsleme elemanları ve taşıyıcı elemanlar çoğu zaman aynı malzemede tasarlanır. Bu nedenle sayısal modeldeki karmaşıklığı azaltmak ve yapının gerçek davranışını yansıtabilmek için geometrik basitleştirmeler ve kabuller kaçınılmaz olmaktadır. Ancak bu idealleştirmeler sınırlı ve basit düzeyde olmalıdır.

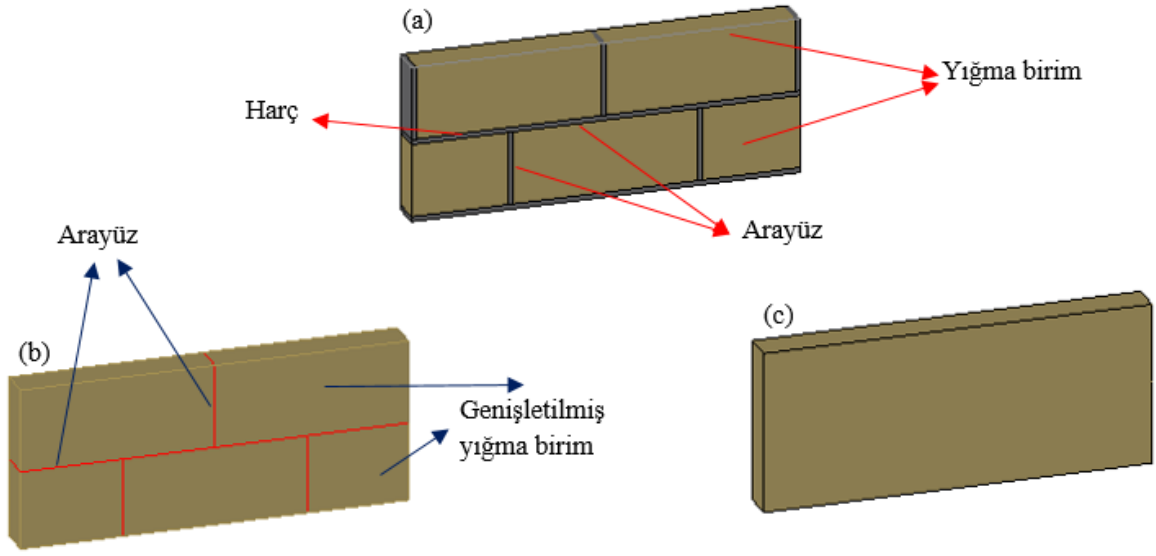
Tarihi yığma yapıların malzeme özellikleri homojen ve izotropik değildir. Mekanik davranışları doğrusal olmamakla beraber çoğu zaman elastik davranış sergilemezler. Ayrıca inşa edildikleri malzemeler belirli bir standartta olmaması nedeniyle gerilme-şekildeğiştirme ilişkisini net bir şekilde ortaya koymak oldukça zordur. Bu nedenle gerçek malzemeyi temsil eden bir malzeme modeli seçilmelidir. Doğrusal olmayan malzeme seçiminin analiz sürelerini artırdığı, yakınsama hataları ile sıklıkla karşılaşıldığı ve bağlantı elemanlarının zayıf olduğu yapılarda malzemenin çalışmadığı gibi durumlardan dolayı her zaman doğru sonuçlar sağlamayabilir. Bu noktada tarihi yığma yapıların değerlendirilmesinde doğrusal

elastik malzeme kullanılarak yapılan analizler yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapının gerçek davranışını kesin olarak elde edilememesine rağmen yapı davranışının yaklaşık olarak tahmin edilmesine olanak sağlar.

Tarihi yığma yapıları oluşturan yığma elemanlar tuğla, taş, kerpiç gibi birim elemanlar ve harç gibi bağlayıcı malzemeden oluşmaktadır. Homojen olmayan bu durum nedeni ile sayısal modellemesi oldukça zordur. Literatürde yığma yapıların teorik olarak modellenmesinde üç farklı yöntem kullanılmaktadır (Lourenço, 1996);

- Detaylı Mikro Modelleme
- Basitleştirilmiş Mikro Modelleme
- Makro Modelleme

Detaylı mikro modellemede her birim, harç ve arayüzler ayrı ayrı modellenerek gerçek yapıyı temsil edilir. Bu modelleme tekniği daha doğru sonuçlar sunar, ancak çok fazla modelleme ve hesaplama çabası gerektirir. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğinde taşların harcın orta noktasına kadar genişletildiği varsayılır ve harç yapısı modellenmez. Yöntemde harç ve harç-taş ara yüzünün etkisi ara yüzey elemanları ile temsil edilmektedir. Makro modelleme ise birim, harç ve arayüzlerin homojen bir sürekli ortam olarak modellendiği genelleştirilmiş bir modelleme tekniğidir. Bu teknikte taş, harç ve arayüz özellikleri yerine yığma duvarın temsili malzeme özellikleri kullanılmaktadır. Malzeme özellikleri homojenize edilmiş yığma birimler dikkate alınarak kullanılır. Mikro modelleme ve basitleştirilmiş mikro modelleme teknikleri daha çok küçük yığma yapı elemanları için kullanılırken makro modelleme tekniği büyük boyutlu yığma yapılar için kullanılmaktadır. Detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme tekniklerine ait temsili çizimler Şekil 1.56'da sunulmaktadır.



Şekil 1.56. Detaylı mikro modelleme (a), basitleştirilmiş mikro modelleme (b), makro modelleme (c)

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda gerçek tarihi yığma yapıların sonlu eleman modellerinin oluşturulmasında makro modelleme tekniği kullanılmıştır. Gerçekleştirilen modal analizlerde malzeme özellikleri doğrusal elastik olarak dikkate alınmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

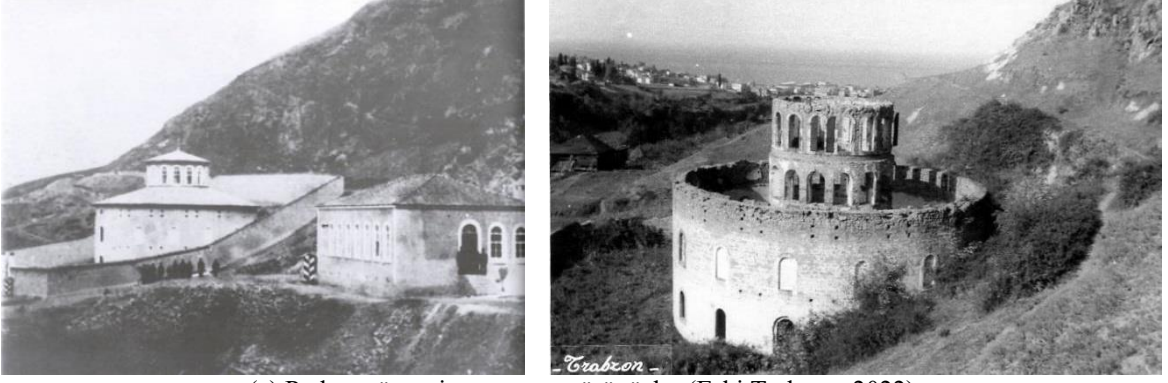
Tez kapsamında mevcut tarihi yapılar ve ölçekli tarihi kemer köprü modeli üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Mevcut tarihi yapılar üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarda, deneysel modal analiz testleri, sonlu eleman modelleri ve sonlu eleman model güncellemeleri sunulmuştur. Mevcut yapılar için yapı sağlığı izleme ve hasar tespitinin başlangıç işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ancak incelenen yapıların süreç içerisinde herhangi bir etkenden dolayı hasar görmüş olmaması nedeniyle hasar tespiti gerçekleştirilememiştir. Bu nedenle laboratuvar ortamında Doğu Karadeniz'deki tarihi kemer köprüleri temsil eden tek açıklıklı kemer köprü modeli oluşturulmuş ve oluşturulan model üzerinde mesnet oturması, ayak boşalması ve deprem hasarlarının etkileri deneysel modal analiz yöntemiyle araştırılmıştır. Ayrıca köprünün onarımında kullanılan enjeksiyon ve yeniden örme gibi basit onarımların etkinliği deneysel modal analiz yöntemiyle incelenmiştir.

2.1. Mevcut Tarihi Yapılar Üzerinde Gerçekleştirilen Çalışmalar

2.1.1. Cephanelik Binası

Cephanelik binası Trabzon ili, Ortahisar ilçesi, Boztepe mahallesinde yer almaktadır. Binanın Yıldız Sarayı albümlerindeki resminin altında hicri 1305 yılında yaptırıldığı yazılmaktadır. Buradan cephaneliğin 1887 tarihinde yaptırıldığı kesin olarak anlaşılmaktadır. Kapısı üzerindeki II. Abdülhamit'in tuğrası ve kitabe de bu durumu doğrular. 1916-1918 Rus işgali sırasında mühimmat deposu olarak kullanılmış ve 9 Temmuz 1919'da bir patlamayla çatı örtüsü yıkılmıştır. Bu patlamada bina ciddi şekilde hasar görmüş ve 2000'li yıllardaki restorasyonuna kadar harabe halinde kalmıştır (KültürPortalı, 2022).

Bina yaklaşık 25-40 metre çapında iç içe dairevi iki bölümden oluşmaktadır. Bu dairevi bölümler, sırasıyla dışta 10m ve içte 16m yüksekliğe sahiptir. İç kule dört katlı, dış kule ise üç katlıdır. Kalın dairesel duvarlar kesme taştan yapılmıştır. Duvar kalınlıkları tabandan yukarıya doğru azalmaktadır. Cephanelik binasının bazı görünümüleri Şekil 2.1'de sunulmaktadır.



(a) Patlama öncesi ve sonrası görünüşler (Eski Trabzon, 2022)



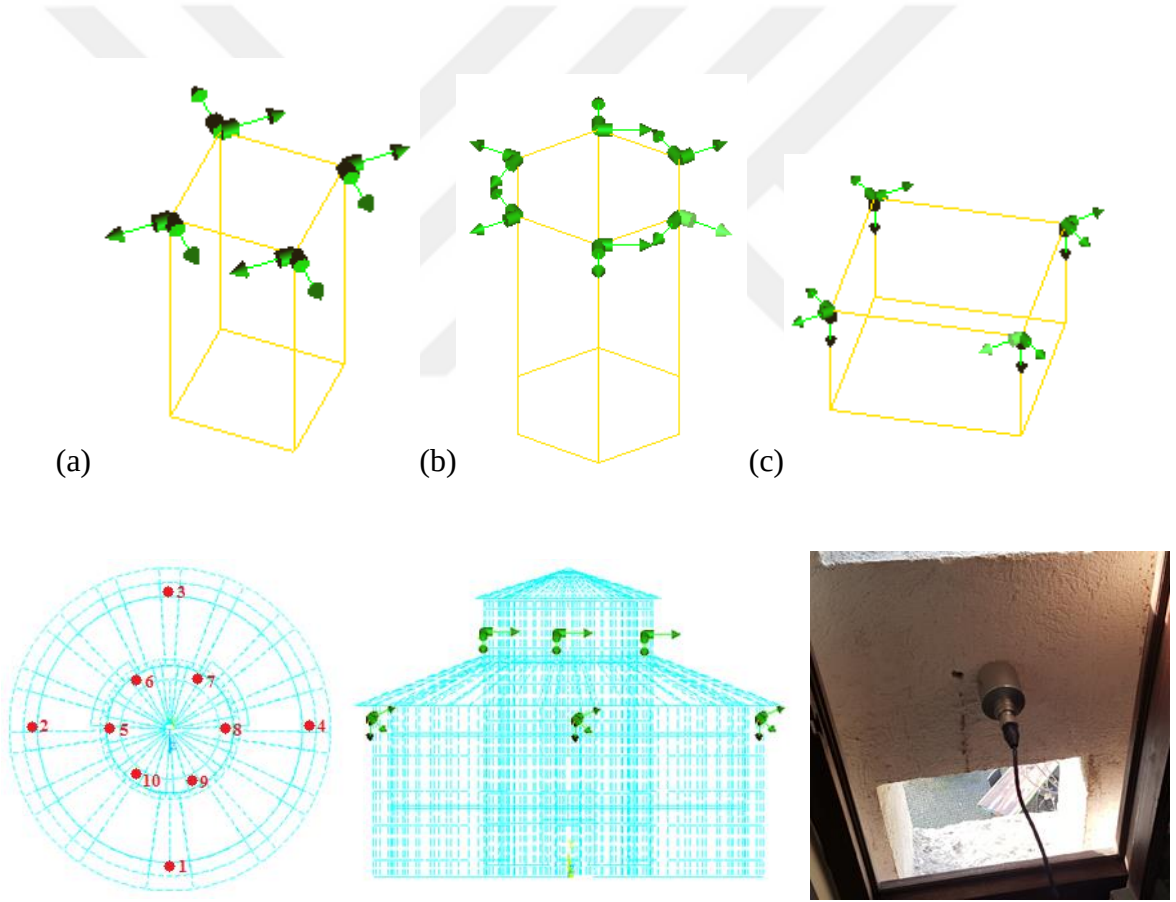
(b) Mevcut görünüşler

Şekil 2.1. Cephanelik binasına ait görünüşler

2.1.2.1. Çevresel Titreşim Testleri

Cephanelik binasının frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristiklerini deneysel olarak elde etmek amacıyla çevresel titreşim testleri uygulanmıştır. Deneysel ölçümler için kullanılan test ekipmanı; 17 kanallı veri toplama sistemi, 10V/g hassasiyetinde ve 0.1-1500 Hz frekans aralığına sahip tek eksenli ivmeölçerler, 0.5V/g frekans aralığına sahip üç eksenli ivmeölçerlerden oluşmaktadır. Ölçümlerden elde edilen titreşim verileri, B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesinde toplanmış ve PULSE yazılımına aktararak işlenmiştir. İşlenen sinyaller OMA yazılımına aktararak dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Ortam titreşim testinde frekans aralığı 0-12.5Hz olarak seçilmiştir. Binanın dinamik karakteristikleri GFTAA yöntemi kullanılarak elde edilmiştir.

Dairesel şekilli yapılar için özel bir problem olan ölçüm noktalarının seçimi güvenilir mod şekilleri elde etmek için çok önemlidir. Bu konu, model güncelleme prosedürleri ve yapı sağlığı izleme açısından daha da önemlidir. Bu çalışmada, bu belirsizlikleri gidermek için üç farklı ölçüm testi kurulumu dikkate alınmıştır. İlk ölçüm düzeneğinde sekiz adet tek eksenli ivmeölçer dairesel iç duvarın kat noktalarına yerleştirilmiştir (Şekil 2.2a). İkincisinde, dış dairesel duvarın üst noktalarına on iki tek eksenli ivmeölçer yerleştirilmiştir (Şekil 2.2b). Üçüncü kurulumda, dış dairesel duvarın üçüncü katına dört adet üç eksenli ivmeölçer yerleştirilmiştir (Şekil 2.2c). Şekil 2.2’de her ölçüm testi kurulumu için ivmeölçer konumlarının ayrıntılı bir görünümü sunulmaktadır. Deneysel ölçümler ile ilgili genel kurulum bilgileri Tablo 2.1’de sunulmaktadır.



Şekil 2.2. Ortam titreşim testinde kullanılan ivmeölçer düzenleri ve bağlantı görünüşü

Tablo 2.1. Ölçüm testleri kurulumları ve ivmeölçer konumları

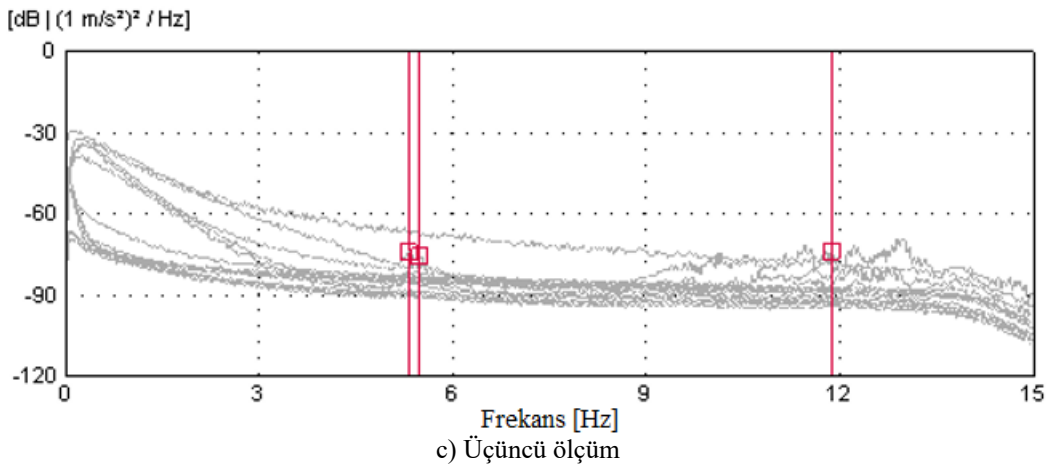
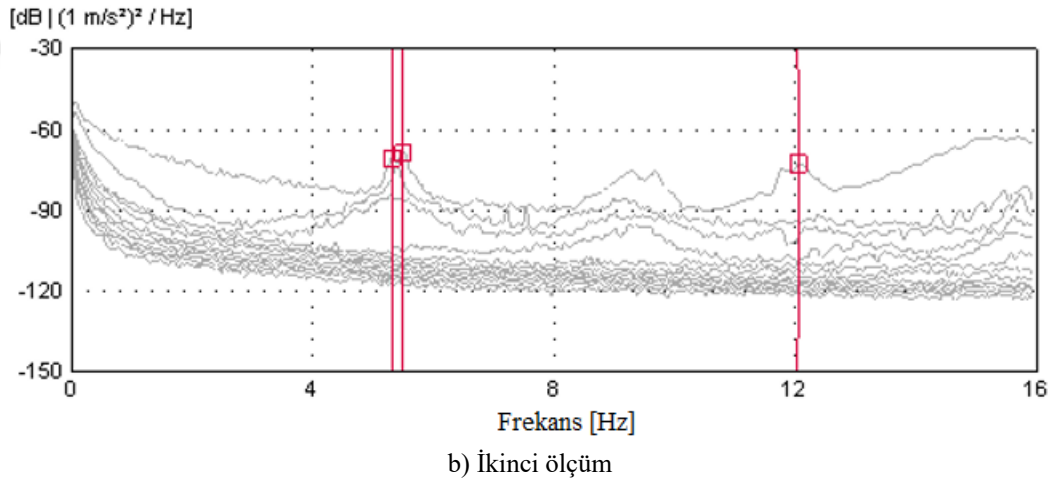
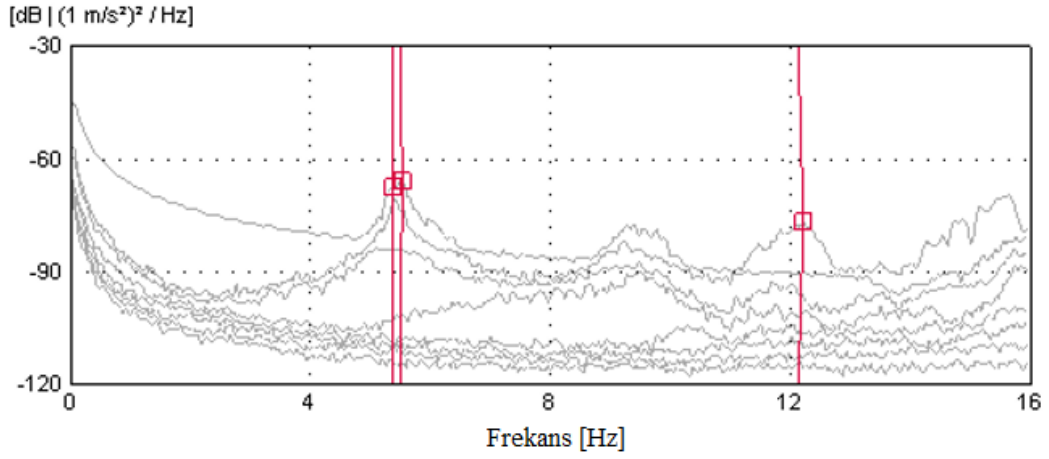
Test Kurulumu	Noktalar	İvmeölçer Yönleri			Frekans Aralığı (Hz)	Süre (Dk.)
		<i>Düşey</i>	<i>Enine</i>	<i>Boyuna</i>		
1	6-7/9-10	---	√	√	0-12.5	60
2	5-10	---	√	√	0-12.5	60
3	1-4	√	√	√	0-12.5	60

Çevresel titreşim testi sonucunda toplanan sinyallerin GFTAA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrisleri Şekil 2.3'te sunulmaktadır. Çevresel titreşim testi sonucunda elde edilen ilk üç mod şekilleri Şekil 2.4'te verilmektedir. İlk üç mod şekli sırasıyla enine, boyuna ve burulma modları olarak elde edilmiştir.

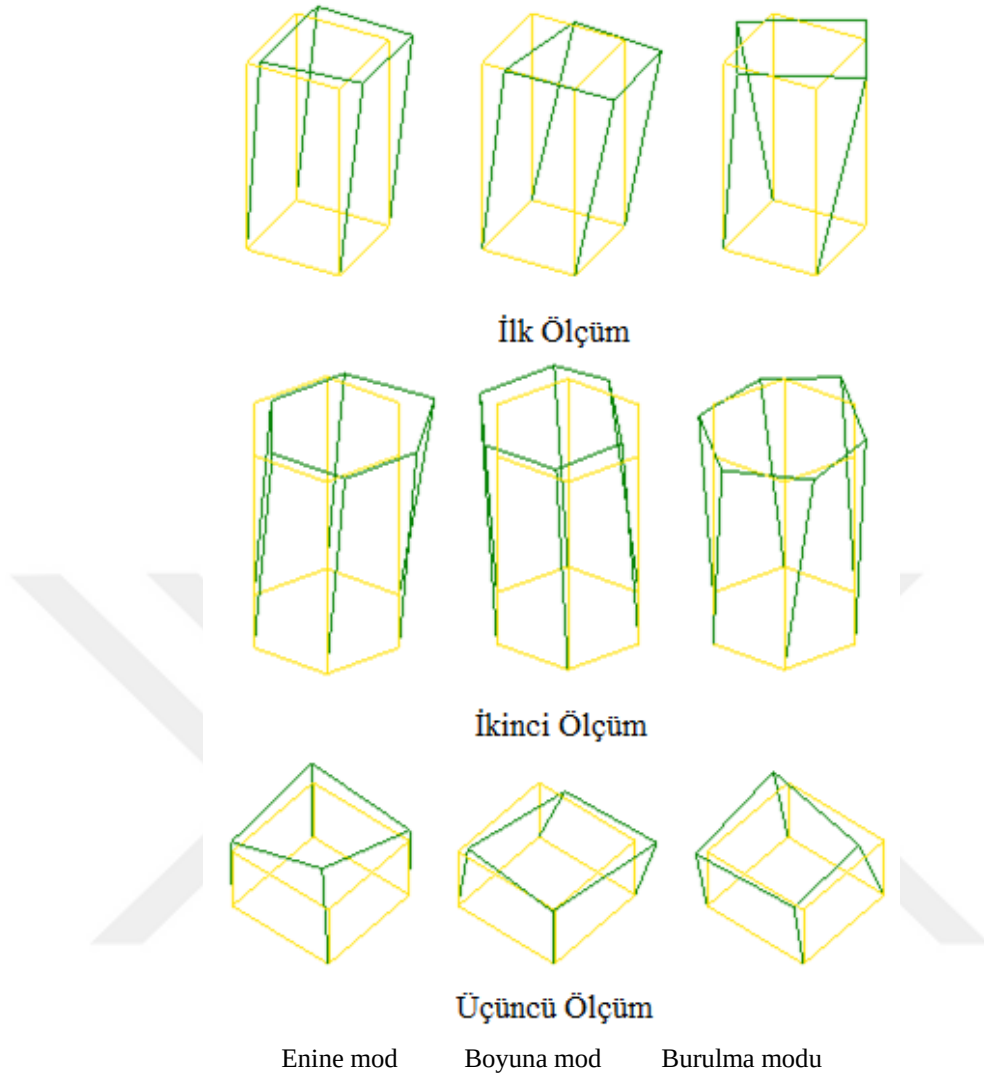
Bina için GFTAA tekniği kullanılarak elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri Tablo 2.2'de verilmiştir. Doğal frekans değerleri 5.32Hz-12.147Hz aralığında elde edilmiştir. Her bir ölçüm testi sonucunda elde edilen doğal frekans değerleri birbirlerine oldukça yakın olarak elde edilmiştir. Doğal frekanslar arasındaki maksimum fark üçüncü modlar arasında %0.74 olarak hesaplanmıştır. Testler sonucunda elde edilen sönüm oranları değerleri %0.14 ile 2.20 arasında değişmektedir. Ölçüm sonuçlarında elde edilen sönüm oranları arasında anlamlı bir ilişki sağlanamamıştır.

Tablo 2.2. GFTAA yöntemine göre elde edilen frekans ve sönüm oranları

Mod	Frekans (Hz)			Sönüm Oranı (%)		
	<i>İlk test</i>	<i>İkinci test</i>	<i>Üçüncü test</i>	<i>İlk test</i>	<i>İkinci test</i>	<i>Üçüncü test</i>
1	5.36	5.34	5.32	0.68	0.63	1.06
2	5.51	5.51	5.48	0.81	1.21	0.57
3	12.14	12.05	11.87	2.20	1.48	0.14
Maksimum fark (%)						
1		0.37	0.37		7.94	40.56
2		0.00	0.55		33.06	112.28
3		0.74	0.01		48.65	957.14



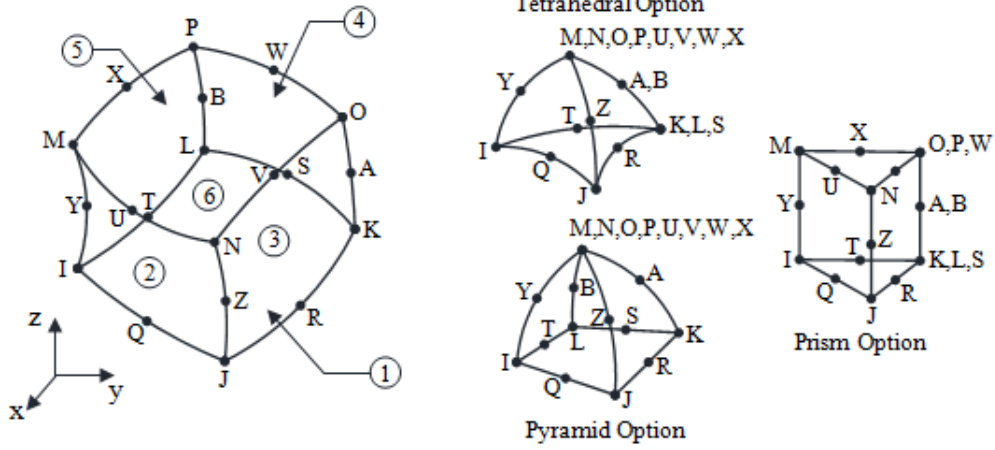
Şekil 2.3. GFTAA yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk grafikleri



Şekil 2.4. Ölçümler sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli

2.1.2.2. Sonlu Eleman Modeli

Cephanelik binasının sonlu eleman modeli ANSYS yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Binanın sonlu eleman modelinde SOLID186 katı eleman tipi kullanılmıştır. Bu eleman 20 düğüm noktasına ve her bir düğüm üç serbestlik derecesine sahiptir. Eleman elastik, plastik, sünme gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca eleman meshleme için dörtgen, piramit veya prizma seçeneklerine sahiptir ve bu seçenekler modeller için kolay meshleme yapabilmeyi sağlamaktadır (ANSYS, 2016). SOLID186'nın şematik resmi Şekil 2.5'te verilmiştir.

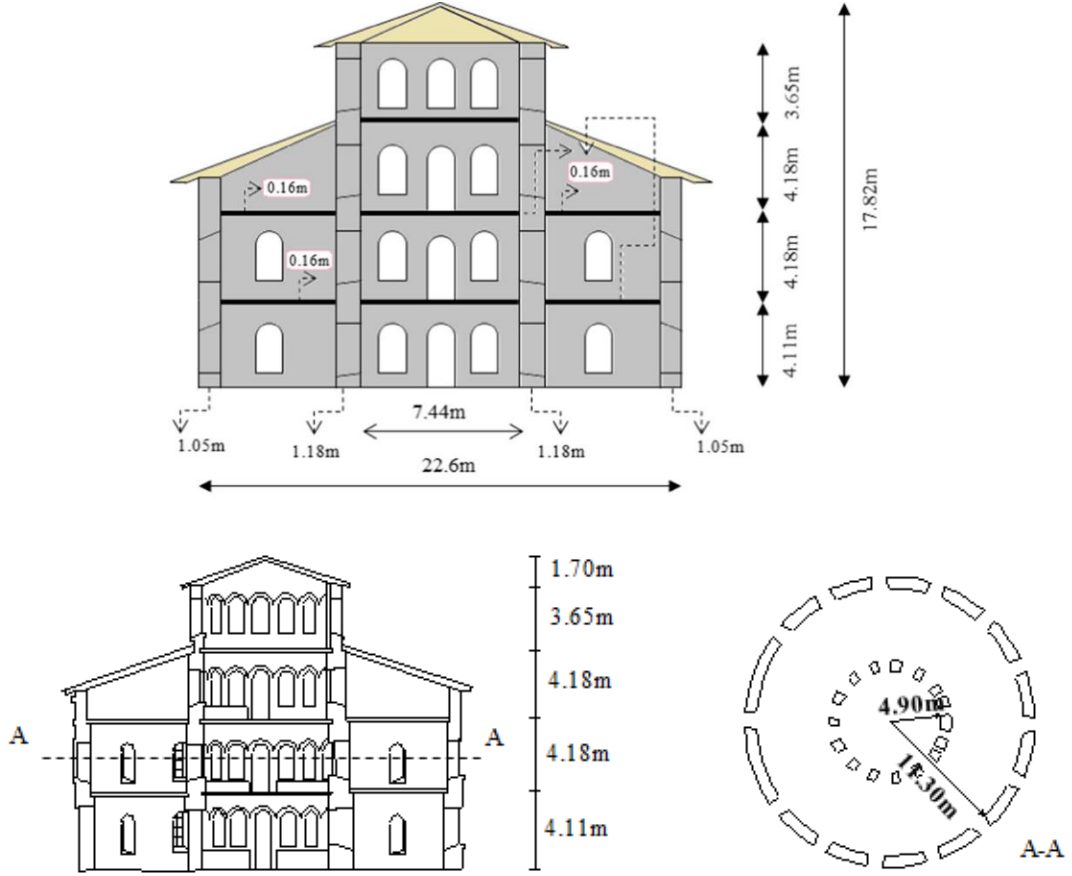


Şekil 2.5. SOLID186 elemanını (ANSYS, 2016).

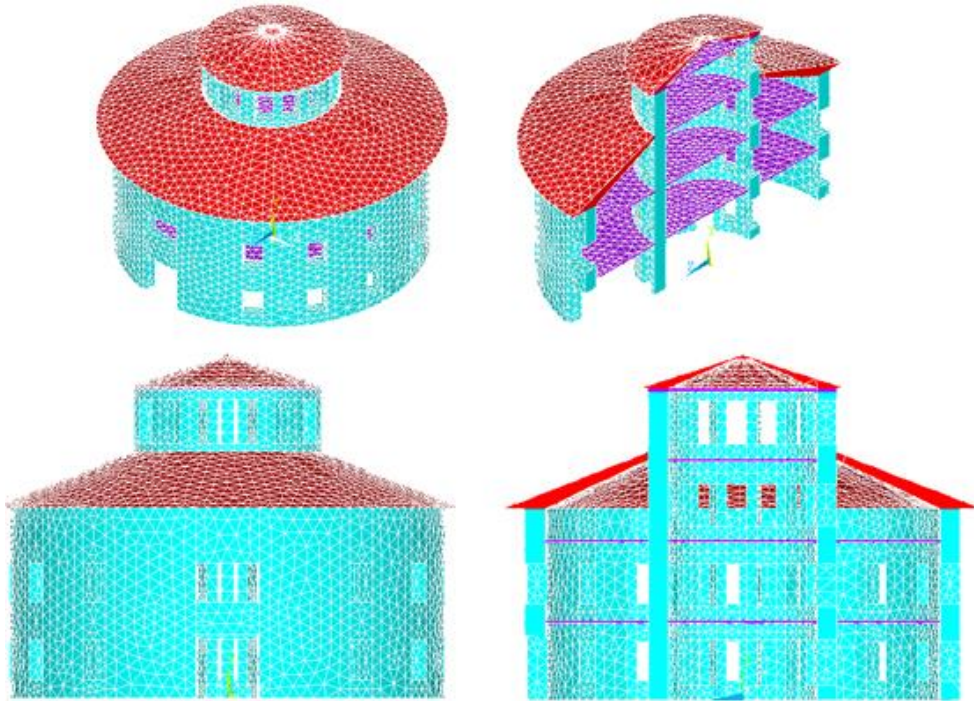
Binanın geometrik özelliklerini gösteren rölöve çizimleri Şekil 2.6’da verilmiştir. Bina iç içe geçmiş iki silindirik duvarı vardır ve bu duvarlar sırasıyla 118.5cm ve 105cm kalınlıklara sahiptir. İç silindirik yapı dört katlı dış silindirik yapı ise üç katlıdır. Açıklıklar ve kapılar yarım daire kemerli olarak inşa edilmiştir. Modelin toplam yüksekliği 17.82m’dir ve kat yükseklikleri sırasıyla 4.11m, 4.18m, 4.18m ve 3.65m’dir. İç ve dış silindirik duvarların yarıçapları sırasıyla 4.90m ve 11.30m’dir. Restorasyon çalışmalarında binaya 16cm kalınlığında betonarme döşemeler eklenmiştir. Çatı iskeleti olarak da çelik profiller kullanılmıştır.

Cephanelik binasının sonlu eleman modeli 120943 düğüm ve 68064 katı eleman içermektedir. Sonlu eleman modelinde yığma duvarlar makro model tekniği ile modellenmiştir. Bina modelinde yer alan elemanların birbirleri ile tam bağlı olduğu kabul edilmiştir. Bina sonlu eleman modeli Şekil 2.7’de sunulmaktadır.

Tarihi cephanelik binasının taşıyıcı yapı elemanları yığma duvarlar, betonarme döşemeler ve çatı örtüsünde kullanılan çelik kirişler olmak üzere üç farklı malzemeden oluşmaktadır. Cephanelik binasının malzeme özellikleri ile ilgili herhangi bir deneysel çalışma yapılmamıştır. Dolayısı ile analizler için seçilen başlangıç malzeme özellikleri literatürden elde edilmiştir. Seçilen malzeme özellikleri Tablo 2.3’te sunulmaktadır.



Şekil 2.6. Binaya ait rölöve çizimi ve boyutlar



Şekil 2.7. Cephanelik binasının sonlu eleman modeline ait görüntüler

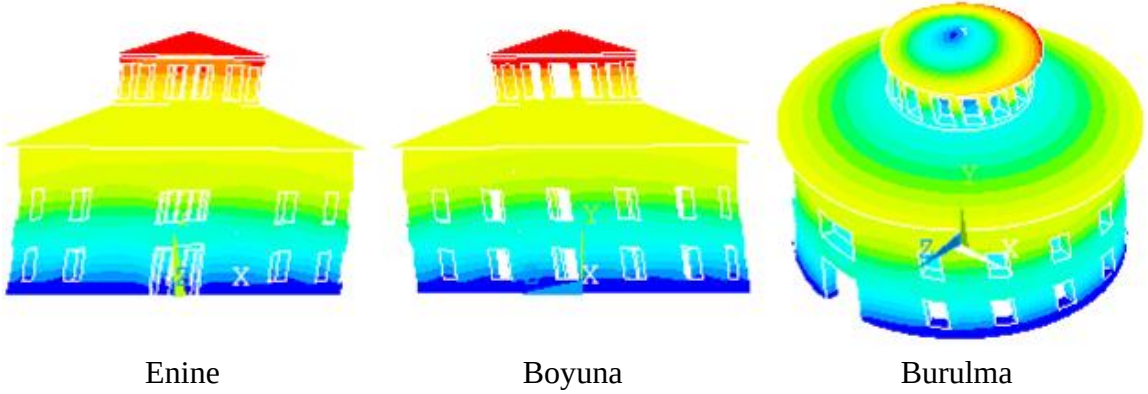
Tablo 2.3. Cephanelik binasının sonlu eleman modelinde kullanılan lineer malzeme özellikleri

Elemanlar	Malzeme Özellikleri		
	Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı (-)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)
Yığma duvarlar	2.0E9	0.2	2200
Betonarme elemanlar	2.5E10	0.2	2500

Cephanelik binasının başlangıç sayısal dinamik karakteristikleri sonlu eleman modal analizi yardımıyla elde edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen ilk üç doğal frekans sırasıyla 5.88Hz, 5.92Hz ve 10.44Hz olarak elde edilmiştir. Cephanelik binasının sayısal mod şekilleri sırasıyla enine, boyuna ve burulma modları olarak elde edilmiştir. Elde edilen mod şekilleri, Şekil 2.8’de sunulmaktadır. MGK değerlerini elde etmek için deneysel ve sayısal modal yer değiştirmeler kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal doğal frekanslar karşılaştırmalı olarak Tablo 2.4’te verilmiştir. Frekanslar arasındaki maksimum fark %14 olarak 3. modda elde edilmiştir.

Tablo 2.4. Deneysel ve başlangıç sayısal frekans ve MGK değerleri

Mod Numarası	Frekans (Hz)			MGK (%)
	GFTAA	Fark (%)	Başlangıç Model	
1	5.36	9.7	5.88	90.5
2	5.51	7.4	5.92	93.7
3	12.14	14.0	10.44	91.0



Şekil 2.8. Binanın sayısal mod şekilleri

2.1.1.3. Sonlu Eleman Model İyileştirmesi

Sayısal ve deneysel testlerden elde edilen sonuçlar arasında bazı farklılıkların olduğu Tablo 2.4'ten görülebilir. Bu farklılıklar malzeme özellikleri ve sınır koşullarındaki bazı belirsizliklerden kaynaklanmaktadır. Bu farklılıkları gidermek ve daha gerçekçi bir sayısal model elde etmek amacıyla sonlu eleman model güncelleştirmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Cephanelik binası için manuel ve bütünsel otomatik model güncelleme gerçekleştirilememiştir. Dolayısı ile binanın model güncellemesi için yerel otomatik model güncelleme yöntemi kullanılmıştır.

Cephanelik binasının otomatik model güncellemesi için FEMtools yazılımı (FEMtools, 2016) kullanılmıştır. FEMtools programı otomatik model güncelleme için geliştirilmiş bir yazılımdır. Model güncelleme işlemi için öncelikle ANSYS yazılımında oluşturulan başlangıç sonlu eleman modeli FEMtools yazılımına aktarılmıştır. Daha sonra eleman matrisleri oluşturularak FEMtools yazılımı yardımıyla binanın modal analizi gerçekleştirilmiştir.

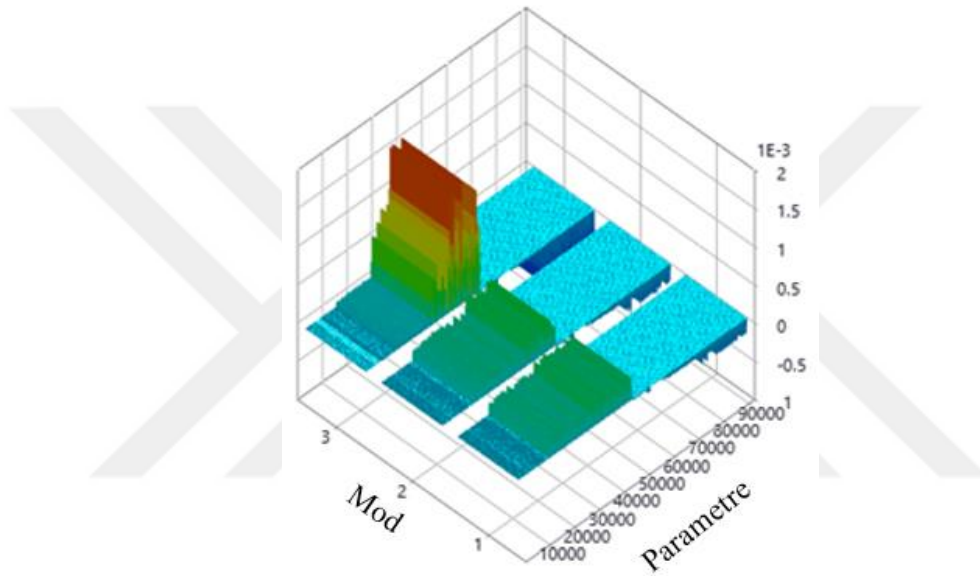
FEMtools programında yapılacak duyarlılık analizi için olası belirsiz parametreler izin verilen sınır değerleri ile tanımlanmalıdır. Bina modeli için elastisite modülü ve birim hacim ağırlıkları belirsiz parametreler olarak seçilmiştir.

- Yığma duvarların (1), betonarme döşemelerin (2) elastisite modülü, E
- Yığma duvarların (3), betonarme döşemelerin (4) malzeme yoğunluğu, BHA.

Cephanelik binasının güncellenmemiş malzeme özellikleri (Tablo 2.3) yerel model güncellemesi için başlangıç değerleri olarak kabul edilmiştir. Belirsiz parametrelerin ve yerel güncelleme için her bir parametrenin izin verilen sınırları Tablo 2.5'te listelenmektedir. Bu parametreler üzerinden her bir sonlu eleman için duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Duyarlılık analizi sonucunda seçilen parametrelerin yerel hassasiyet matrisi Şekil 2.9'da gösterilmektedir.

Tablo 2.5. Yerel güncelleme için seçilen belirsiz parametreler ve limit değerleri

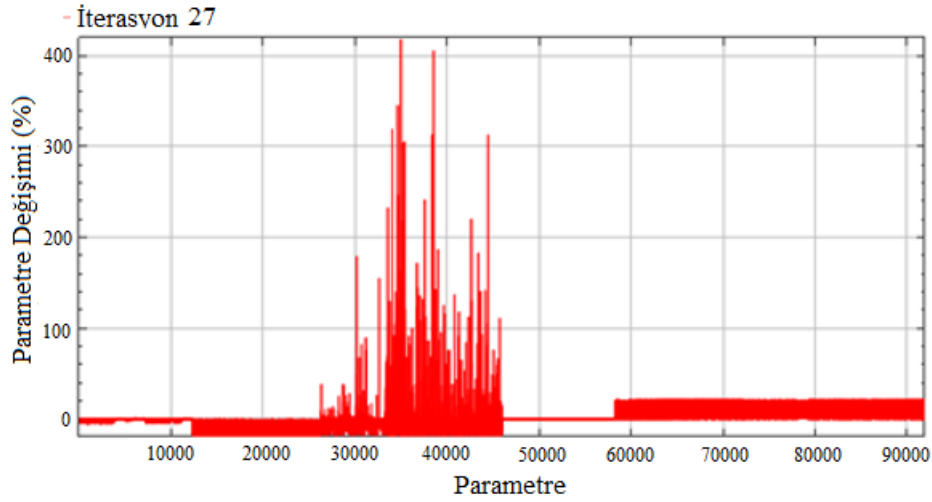
Parametre	Eleman	Yerel Güncelleme			
		Par.	Alt Limit	Üst Limit	Başlangıç değeri
1	Yığma duvar	E	-18 (%)	900 (%)	2.0E9 (N/m ²)
2	Betonarme döşeme	E	-17 (%)	20 (%)	2.5E10 (N/m ²)
3	Yığma duvar	BHA	-20 (%)	20 (%)	1800 (kg/m ³)
4	Betonarme döşeme	BHA	-10 (%)	0 (%)	2500 (kg/m ³)



Şekil 2.9. Yerel güncelleme için seçilen parametrelerin yerel hassasiyet matrisi

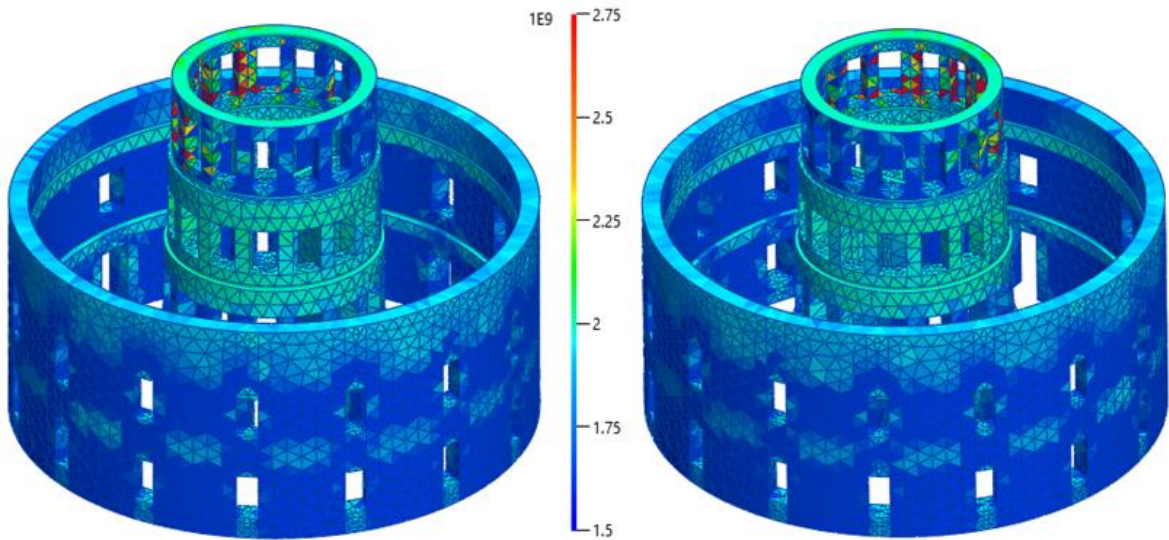
Duyarlılık analizi sonucunda yığma duvarların elastisite modülü ve birim hacim ağırlığının (parametre 1 ve parametre 3) frekans değişimlerine en duyarlı parametreler olduğu görülmüştür. Doğal frekanslar, diğer parametrelerin (parametre 2 ve 4) değişimlerine karşı daha az duyarlı olduğu sonucu elde edilmiştir.

Duyarlılık analizinden sonra yerel model güncellemesi için analiz gerçekleştirilmiştir. 27 iterasyondan sonra yakınsama sağlanmıştır. İterasyon sırasında yerel güncelleme parametrelerinin değerlerindeki değişim Şekil 2.10'da sunulmaktadır. Şekilden de görüldüğü gibi, güncelleme parametrelerinde maksimum %415'lik bir değişiklik gerçekleştirilmiştir.



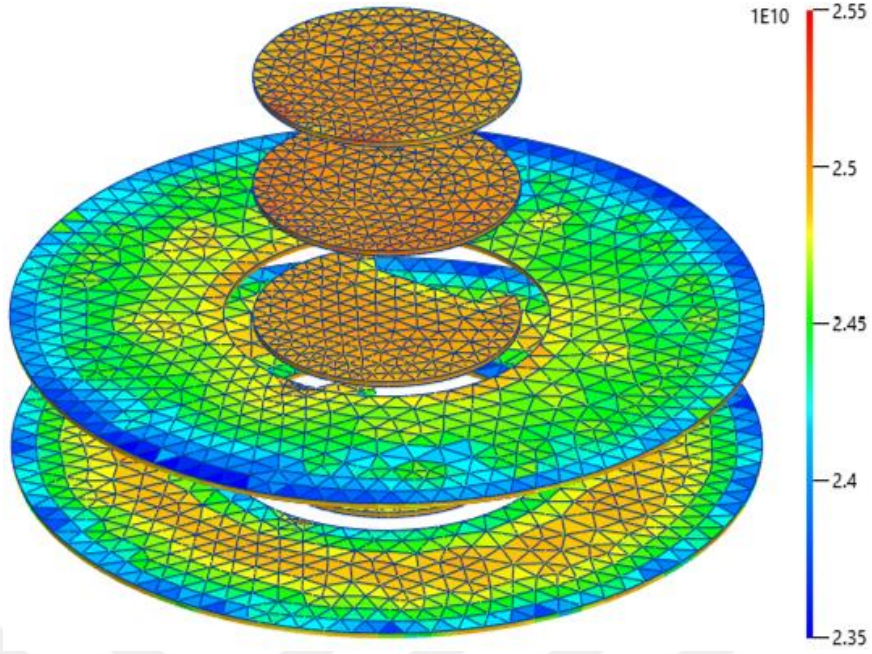
Şekil 2.10. Yerel güncelleme için güncelleme parametrelerindeki değişiklikler

Yığma duvarların başlangıç elastisite modülü $2.0E9N/m^2$ olup yerel model güncelleme işleminden sonraki nihai değerleri Şekil 2.11’de gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere elastisite modülü değerleri $1.5E9N/m^2$ ile $2.75E9N/m^2$ aralığında değişmektedir.



Şekil 2.11. Yerel güncellemeden sonra yığma duvarlarda nihai elastisite modülü dağılımı

Betonarme döşemelerin analiz öncesi elastisite modülü $2.5E10N/m^2$ olup model güncelleme işleminden sonraki nihai değerleri Şekil 2.12’de verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere betonarme döşemelerin elastisite modülü $2.35E10N/m^2$ ile $2.55E10N/m^2$ aralığında değişmektedir.



Şekil 2.12. Yerel güncellemeden sonra betonarme döşemelerdeki nihai elastisite modülü dağılımı

Deneyssel ve yerel güncelleştirilmiş sonlu eleman modelinden elde edilen frekanslar Tablo 2.6’da göstermektedir. Başlangıç sayısal model için %14 olan frekanslar arasındaki maksimum fark, yerel güncellemeden sonra %0.54’e düşürülmüştür.

Tablo 2.6. Deneyssel ve yerel güncelleştirilmiş sayısal model sonuçları arasındaki farklar

Mod Numarası	Frekans (Hz)		
	GFTAA	Yerel Güncelleme	Maks. fark (%)
1	5.36	5.35	0.18
2	5.51	5.54	0.54
3	12.14	12.15	0.08

Cephanelik binası ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar Altunişik vd. (2018b) ve Altunişik vd. (2018c) yayınlarında detaylı olarak anlatılmıştır. Yayınlarda ayrıca yapının doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri sunulmaktadır.

2.1.2. Çorum Saat Kulesi

Çorum saat kulesi Çorum ili merkezinde yer almaktadır. Yapı 1894 yılında Hasan Paşa tarafından yaptırılmıştır. Kule, kaide, merdiven, geçiş bölümü, silindirik gövde ve üst gövde (saat bölgesi), kubbeden oluşmaktadır. Kule sarı kesme taştan yapılmıştır. Kulenin toplam yüksekliği 24.70m'dir. Kuleye ait görünüşler Şekil 2.13'te verilmiştir.

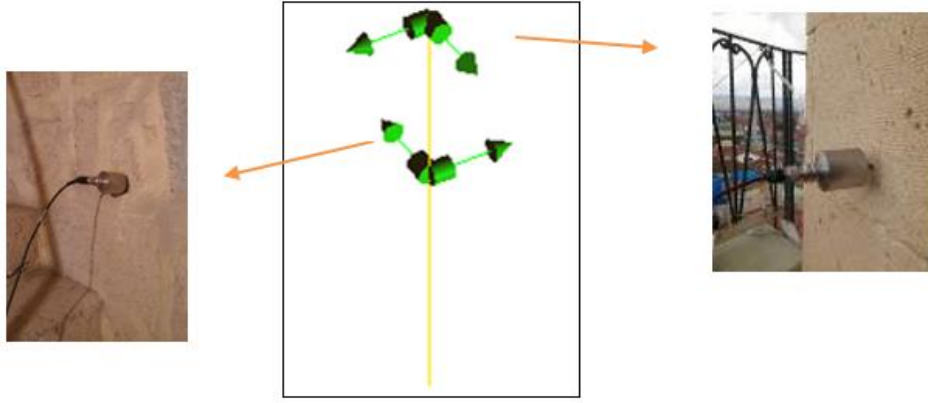


Şekil 2.13. Çorum saat kulesine ait görünüşler

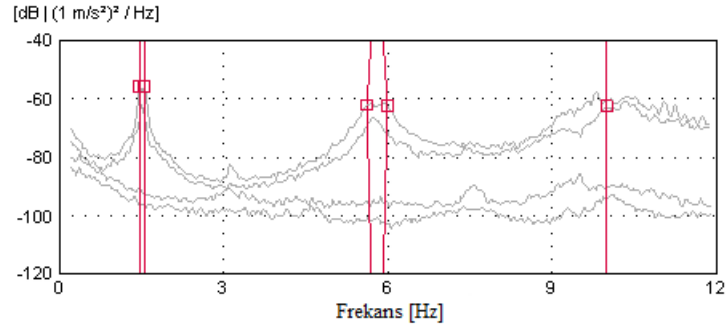
2.1.2.1. Çevresel Titreşim Testleri

Kulenin frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristiklerini deneysel olarak elde etmek amacıyla çevresel titreşim testleri uygulanmıştır. Deneysel ölçümler sırasında B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. 30 dakika boyunca devam eden ölçümlerdeki titreşim verileri B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesinde toplanmış ve PULSE yazılımına aktararak işlenmiştir. İşlenen sinyaller OMA yazılımına aktararak dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Ortam titreşim testinde frekans aralığı 0-15Hz olarak seçilmiştir. İvmeölçerler kulenin orta ve üst balkon kısmına yerleştirilmiştir (Şekil 2.14). Kulenin dinamik karakteristikleri hem GFTAA hem de SAB yöntemleri kullanılarak elde edilmiştir.

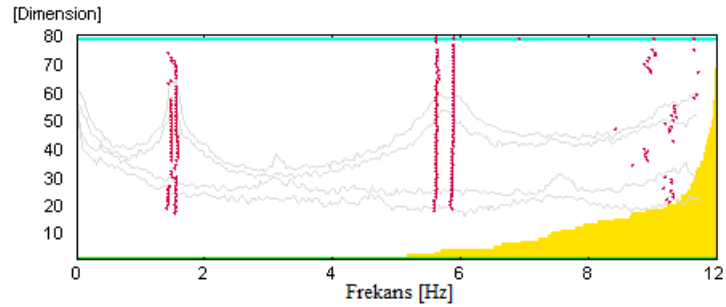
Çevresel titreşim testi sonucunda toplanan sinyallerin GFTAA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve SAB yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen kararlılık diyagramı Şekil 2.15'te sunulmaktadır. Çevresel titreşim testi sonucunda elde edilen ilk beş mod şekilleri Şekil 2.16'da verilmektedir. İlk beş mod şekli sırasıyla 1. enine, 1. Boyuna, 2. enine, 2. boyuna ve burulma modları olarak GFTAA ve SAB yöntemlerinde benzer şekilde elde edilmiştir.



Şekil 2.14. Ortam titreşim testinde kullanılan ivmeölçer düzeni ve bağlantı görünüşü

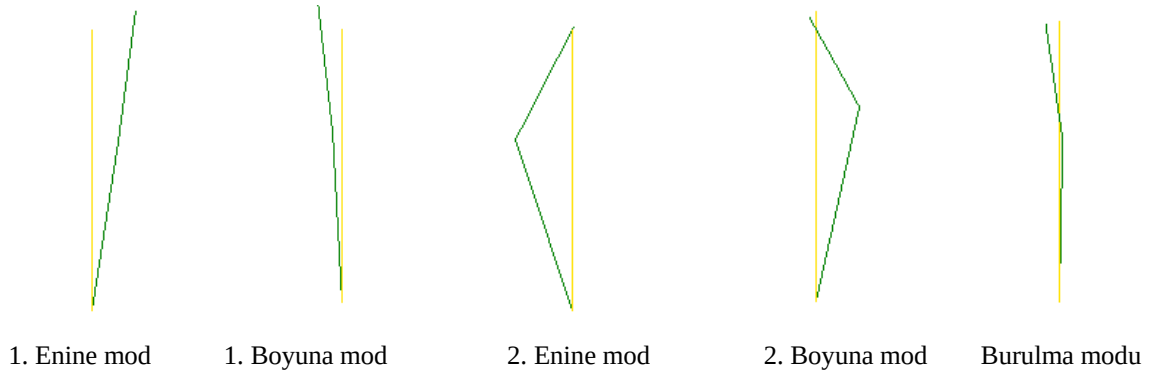


(a) Spektral yoğunluk grafiği



(b) Kararlılık diyagramı

Şekil 2.15. GFTAA ve SAB yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk grafiği ve kararlılık diyagramı



Şekil 2.16. Ölçüm sonucunda elde edilen ilk beş mod şekli

Saat kulesinin hem GFTAA hem de SAB teknikleri kullanılarak belirlenen deneysel dinamik karakteristikleri Tablo 2.7’de karşılaştırılmıştır. Doğal frekanslar, GFTAA ve SAB teknikleri için sırasıyla 1.482Hz-9.991Hz ve 1.479Hz-9.949Hz aralığında elde edilmiştir. İkinci modda elde edilen maksimum %1.23’lük hata ile doğal frekanslar arasında net bir uyum olduğu görülmektedir. Tabloda verilen MGK değerleri incelendiğinde iki metot arasındaki benzerlik oldukça yüksektir. Ancak sönüm oranları arasında anlamlı bir uyum yoktur.

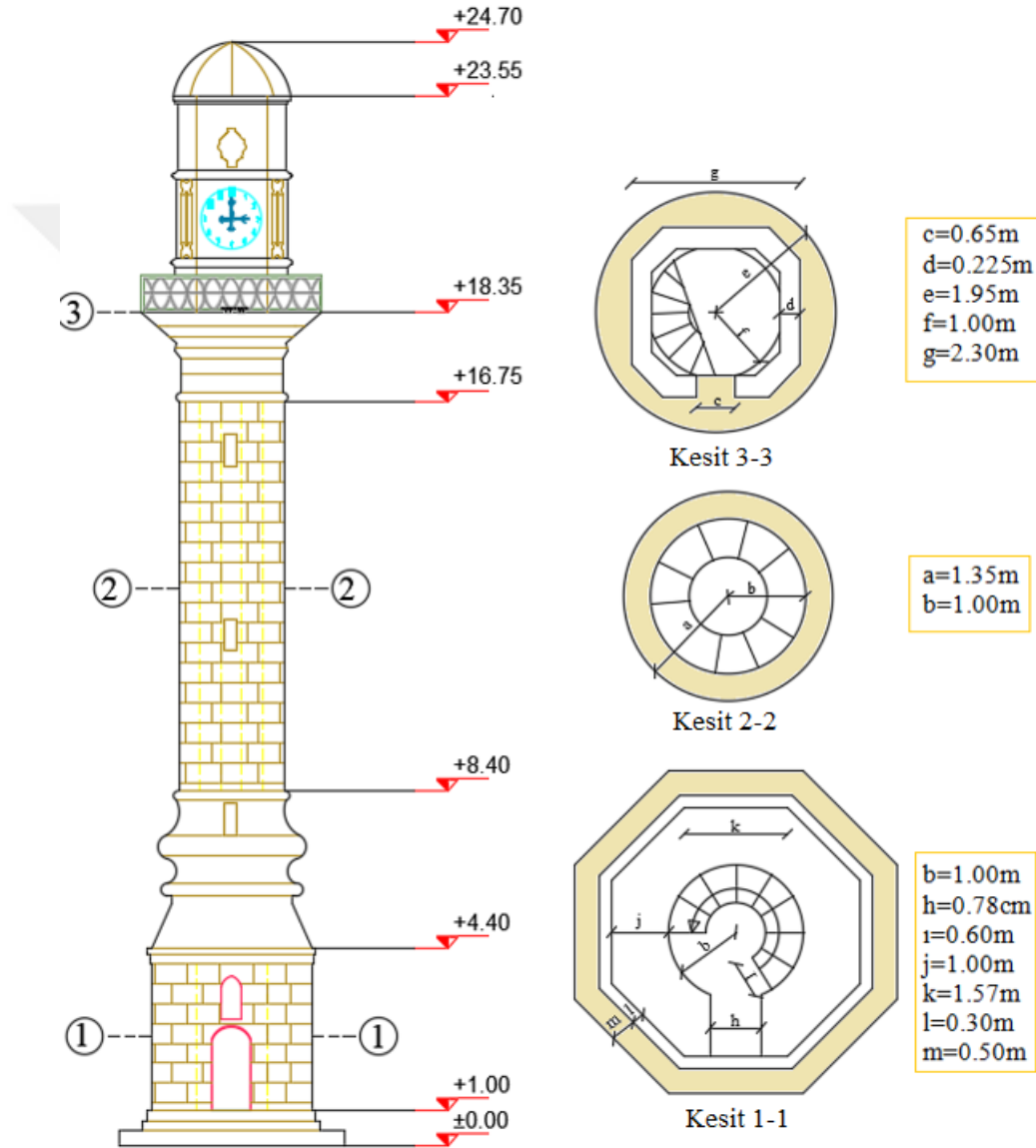
Tablo 2.7. GFTAA ve SAB yöntemine göre elde edilen frekans ve sönüm oranları

Mod Numarası	Frekans (Hz)			Sönüm Oranı (%)			MGK (%)
	GFTAA	Fark(%)	SAB	GFTAA	Fark(%)	SAB	
1	1.482	0.20	1.479	1.633	54.7	0.739	99.9
2	1.555	0.58	1.564	1.871	80.9	0.357	99.5
3	5.702	1.23	5.632	0.637	267.8	2.343	98.2
4	5.923	0.54	5.891	1.855	16.8	2.168	98.5
5	9.991	0.42	9.949	0.353	1385.0	5.242	99.4

2.1.2.2. Sonlu Eleman Modeli

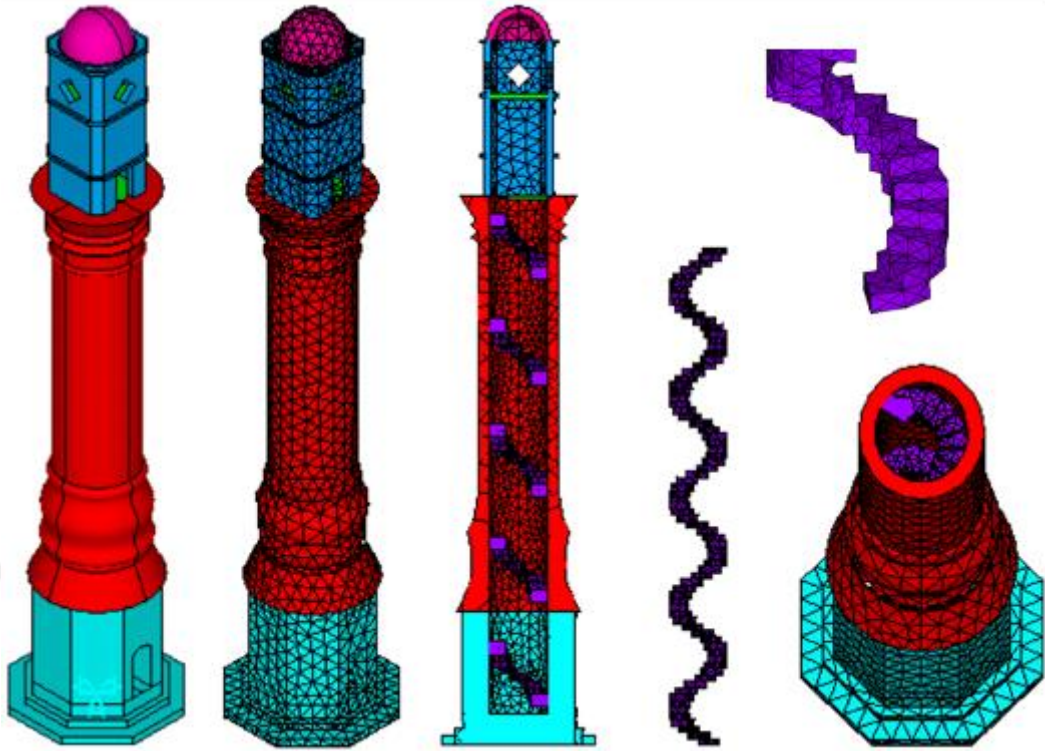
Çorum saat kulesinin sonlu eleman modeli ANSYS yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Kulenin sonlu eleman modelinde SOLID186 katı eleman tipi kullanılmıştır. Yapının modellemesinde kullanılan rölöve çizimleri Şekil 2.17’de verilmiştir. Kulenin toplam yüksekliği 24.70m’dir. Taban şekli sekizgen olup, yüksekliği 4.40m ve çapı

4.10m'dir. Silindirik gövde 9.95m yüksekliğe ve 2.70m çapa sahiptir. Saatin bulunduğu üst gövde 5.20m yüksekliğinde dikdörtgen şeklindedir. Kule duvarlarının kalınlıkları yerden kaide noktasına kadar 1m, minberden silindirik gövdenin tepe noktasına kadar 0.35m'dir. Kulenin iç duvarına desteklenen merdivenler 0.22m basamak yüksekliğine ve 0.15m basamak genişliğine sahiptir. Her merdiven sırasıyla 0.4m ve 1.0m'lik bir iç ve dış yarıçapa sahiptir.



Şekil 2.17. Çorum saat kulesine ait geometrik özellikler

Kulenin sonlu eleman modelinde yığma duvarlar makro model tekniği ile modellenmiştir. Kulenin sonlu eleman modelinde yer alan elemanların birbirleri ile tam bağlı olduğu varsayılmıştır. Saat kulesinin sonlu eleman modeli Şekil 2.18'de gösterilmektedir.



Şekil 2.18. Saat kulesinin sonlu eleman modeline ait görüşler

Saat kulesinin sonlu eleman modelinde, kaide, merdiven, silindirik gövde ve saat bölgesi, kubbe ve ahşap döşeme olmak üzere altı farklı yapısal eleman bileşeni bulunmaktadır. Saat kulesinin malzeme özellikleri ile ilgili herhangi bir deneysel çalışma yapılmamıştır. Malzeme özellikleri literatürde bulunan yığma yapı yayınlara benzer şekilde alınmıştır. Saat kulesinin sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.8’de verilmektedir.

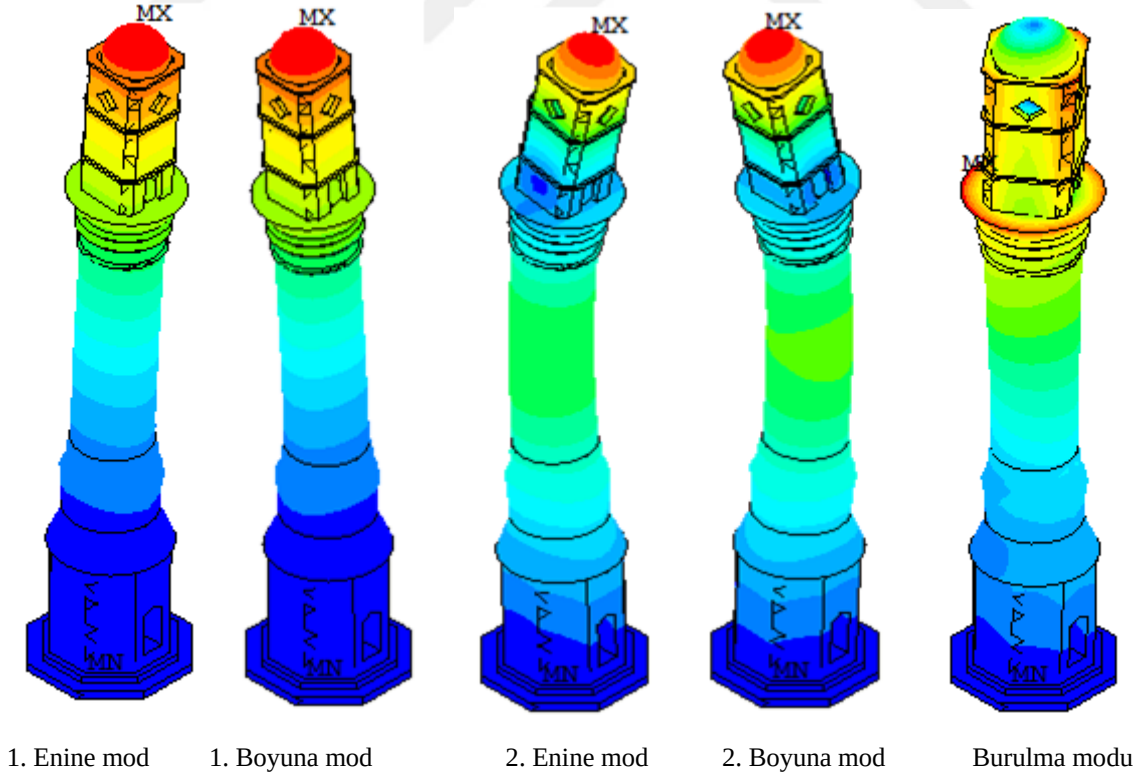
Tablo 2.8. Saat kulesinin sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri

Elemanlar	Malzeme Özellikleri		
	Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı (-)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)
Kaide	2.00E9	0.20	2250
Merdivenler	1.50E9	0.20	2250
Silindirik gövde	2.00E9	0.20	2250
Üst gövde	1.80E9	0.20	2250
Kubbe	2.20E9	0.20	2250
Ahşap döşeme	1.00E9	0.20	600

Saat kulesinin başlangıç sayısal dinamik karakteristikleri sonlu eleman modal analizi yardımıyla elde edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen ilk beş frekans değeri 1.25Hz-8.134Hz değerleri aralığında elde edilmiştir. Kulenin mod şekilleri sırasıyla 1. enine, 1. boyuna, 2. enine, 2. boyuna ve burulma modları olarak elde edilmiştir. Elde edilen mod şekilleri, Şekil 2.19’da sunulmaktadır. Deneysel ve sayısal doğal frekanslar Tablo 2.9’da verilmiştir. Frekanslar arasındaki maksimum fark %23.44 olarak elde edilmiştir.

Tablo 2.9. Deneysel ve başlangıç model sayısal frekans değerleri

Mod Numarası	Frekans (Hz)			
	GFTAA	SAB	Fark (%)	Başlangıç Model Model
1	1.482	1.479	18.50	1.250
2	1.555	1.564	23.44	1.267
3	5.702	5.632	5.120	5.424
4	5.923	5.891	8.220	5.473
5	9.991	9.949	22.83	8.134



Şekil 2.19. Saat kulesinin sayısal mod şekilleri

2.1.2.3. Sonlu Eleman Model İyileştirmesi

Sayısal ve deneysel testlerden elde edilen sonuçlar arasında bazı farklılıkların olduğu Tablo 2.9'dan görülmektedir. Bu farklılıklar malzeme özellikleri ve sınır koşullarındaki bazı belirsizliklerden kaynaklanmaktadır. Bu farklılıkları gidermek ve daha gerçekçi bir sayısal model elde etmek amacıyla sonlu eleman model güncelleştirmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Güncelleme, manuel olarak deneme yanılma yoluyla gerçekleştirilmiştir.

Manuel model güncellemede, deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki hataları en aza indirmek için elemanların elastisite modülleri ve birim hacim ağırlıkları güncelleme parametreleri olarak seçilmiştir. Kule için manuel güncelleme işlemi, kaide, merdiven, silindirik gövde ve üst gövde (saat bölgesi), kubbe ve ahşap döşemenin elastisite modüllerinin ve birim hacim ağırlıklarının değiştirilmesiyle sağlanmıştır. Model güncellemesinden önce ve sonra güncelleme parametrelerindeki değişiklikler Tablo 2.10'da gösterilmektedir. Manuel model güncelleme için nihai sayısal frekanslar Tablo 2.11'de sunulmaktadır. Tablo 2.11'de görüldüğü gibi deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki maksimum farklar %23.44'den %4.7'ye düşürülmüştür. Tablodan da görüleceği üzere modlar arasındaki uyum %85 seviyesi üzerindedir.

Tablo 2.10. Manuel model güncelleme için malzeme özelliklerindeki değişimler

Eleman	Malzeme Özellikleri					
	Elastisite modülü(N/m^2)			Birim H. Ağırlığı(kg/m^3)		
	Başlangıç	Fark. (%)	Güncellenmiş	Başlangıç	Fark. (%)	Güncellenmiş
Kaide	2.00E9	62.5	3.25E9	2250	6.2	2390
Merdiven	1.50E9	66.6	5.00E8	2250	6.2	2390
Silindirik gövde	2.00E9	62.5	3.25E9	2250	6.2	2390
Üst gövde	1.80E9	41.7	1.05E9	2250	6.2	2390
Kubbe	2.20E9	13.6	2.50E9	2250	13.3	2550
Ahşap döşeme	1.00E9	-	1.00E10	600	-	600

Tablo 2.11. Manuel güncellemenin ardından deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar

Mod Numarası	Frekans (Hz)				MGK (%)
	GFTAA	SAB	Manuel Güncelleme	Maks. fark (%)	
1	1.482	1.479	1.523	2.7	87.5
2	1.555	1.564	1.541	0.9	89.4
3	5.702	5.632	5.973	4.7	95.5
4	5.923	5.891	6.031	1.8	92.1
5	9.991	9.949	9.520	4.7	91.6

Çorum saat kulesi ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar Genç vd. (2019), Ertürk vd. (2021) ve Gunaydin vd. (2022a) yayınlarında detaylı olarak anlatılmıştır. Yayınlarda ayrıca yapının sismik davranışı bölgeye özel ivme kayıtları ve zemin durumlarına bağlı ölçeklendirilmiş ivme kayıtları ile incelenmiştir.

2.1.3. Yavuz Selim Okul Binası

Yavuz Selim Okul Binası Trabzon ili, Ortahisar ilçesinde, Gazipaşa Mahallesi, Nemlioğlu Konak Sokağı üzerinde yer almaktadır. Okul binası olarak inşa edilen yapı, ilk yapıldığı yıllarda Fransız Rahibe Okulu olarak faaliyet göstermiştir. Yapının üzerinde herhangi bir kitabe bulunmamaktadır. Trabzon salnamelerdeki bilgilere göre yapı, Fransızlar tarafından Sen Greguvar adı altında 1874-75 tarihinde açılmıştır. İlk açıldığı tarihlerde toplam 135 öğrencisi bulunduğu kayıt altına alınmış ve derecesinin ise Rüштиye (Ortaokul) olduğu belirtilmiştir (Yolalıcı, 1994). Bina Milli Eğitim Bakanlığı bünyesinde “Yavuz Selim İlkokulu” adıyla uzun yıllar Trabzon’a hizmet vermiştir. Okul Binasına ait görüşler Şekil 2.20’de verilmektedir.

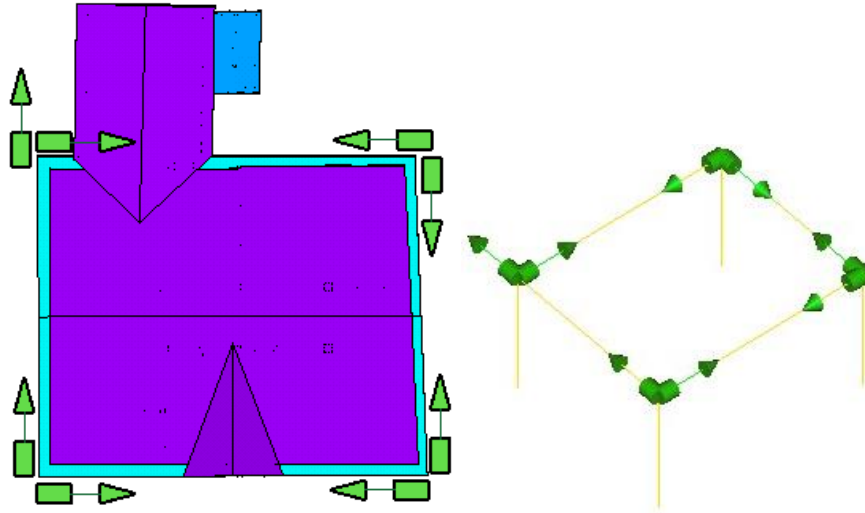


Şekil 2.20. Yavuz Selim Okul Binası’na ait bazı görüşler

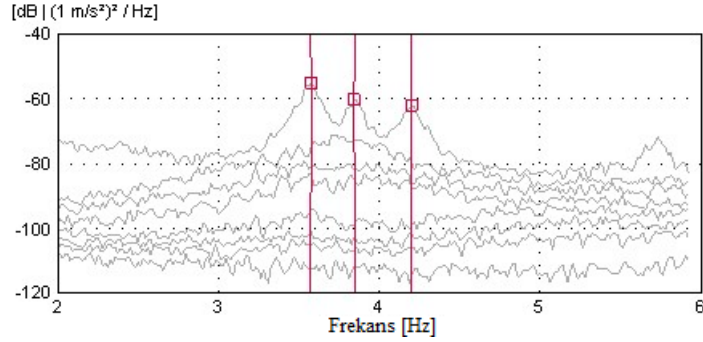
2.1.3.1. Çevresel Titreşim Testleri

Binaya ait deneysel dinamik karakteristiklerin (doğal frekans, mod şekli, sönüm oranı) elde edilebilmesi amacıyla çevresel titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde 17 kanallı B&K 3560 veri toplama ünitesi, 10 V/g hassaslığında B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler, tek eksenli ivmeölçer kabloları, PULSE (sinyallerin kaydedilmesi) ve OMA (sinyallerin işlenmesi) yazılımları kullanılmıştır. Ölçüm süresi 20-30dk olarak alınmıştır. İvmeölçerler mod şekillerinin daha net alınabilmesi için binanın çatı katında köşe noktalarına yerleştirilmiştir (Şekil 2.21). Dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde GFTAA ve SAB yöntemleri kullanılmıştır.

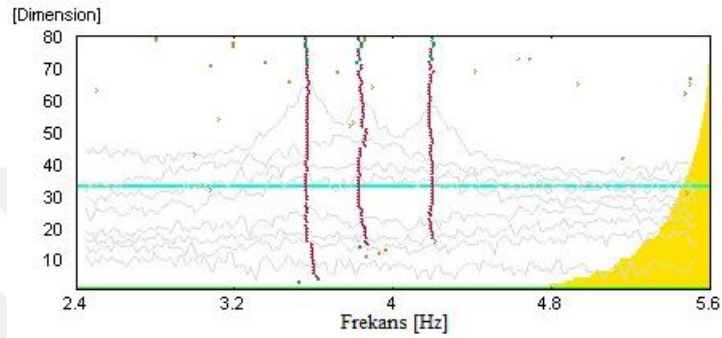
Çevresel titreşim testi sonucunda toplanan sinyallerin GFTAA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve SAB yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen kararlılık diyagramı Şekil 2.22’de sunulmaktadır. Çevresel titreşim testi sonucunda elde edilen ilk üç mod şekilleri Şekil 2.23’te verilmektedir. İlk üç mod şekli sırasıyla enine, boyuna ve burulma modları olarak GFTAA ve SAB yöntemlerinde benzer şekilde elde edilmiştir.



Şekil 2.21. Ortam titreşim testinde kullanılan ivmeölçer düzeni ve bağlantı görünüşü

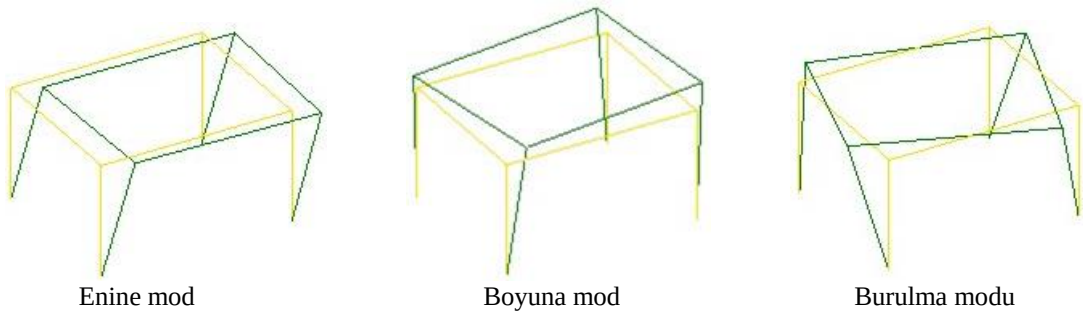


(a) Spektral yoğunluk grafiği



(b) Kararlılık diyagramı

Şekil 2.22. GFTAA ve SAB yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk grafiği ve kararlılık diyagramı



Enine mod

Boyuna mod

Burulma modu

Şekil 2.23. Ölçüm sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli

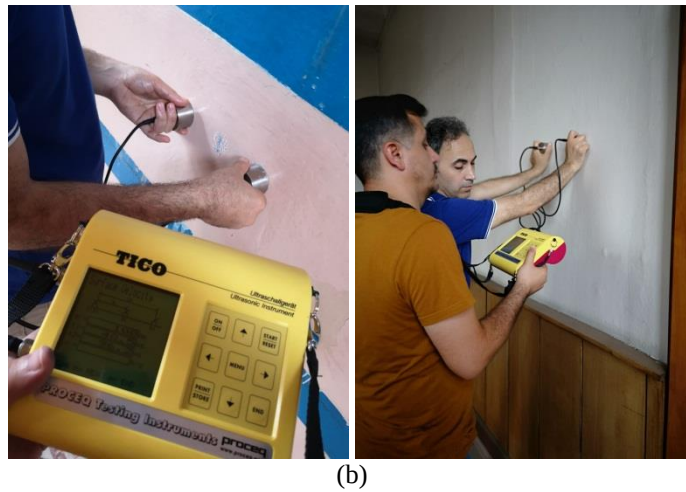
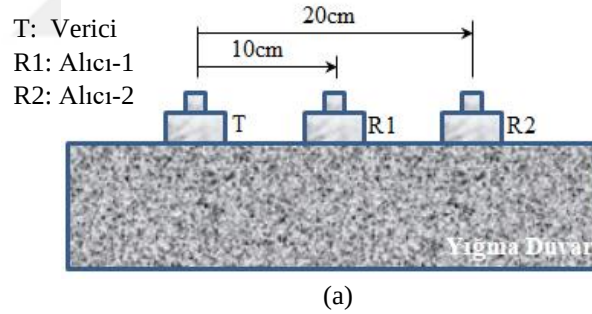
Binanın hem GFTAA hem de SAB teknikleri kullanılarak belirlenen deneysel dinamik karakteristikleri Tablo 2.12’de karşılaştırılmıştır. Doğal frekanslar GFTAA ve SAB yöntemleri için sırasıyla 3.57Hz-4.20Hz ve 3.56Hz-4.20Hz aralığında hesaplanmıştır. İkinci modda elde edilen maksimum %0.5’lik hata ile doğal frekanslar arasında net bir uyum olduğu görülmektedir. Tabloda verilen MGK değerleri incelendiğinde iki yöntem arasındaki benzerliğin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Ancak sönüm oranları arasında anlamlı bir uyum yoktur.

Tablo 2.12. GFTAA ve SAB yöntemine göre elde edilen frekans ve sönüm oranları

Mod Numarası	Frekans (Hz)			Sönüm Oranı (%)			MGK (%)
	GFTAA	Fark(%)	SAB	GFTAA	Fark(%)	SAB	
1	3.57	0.3	3.56	1.34	45.5	0.73	99.9
2	3.85	0.5	3.83	0.99	20.2	1.19	99.0
3	4.20	0.0	4.20	1.33	3.7	1.38	99.3

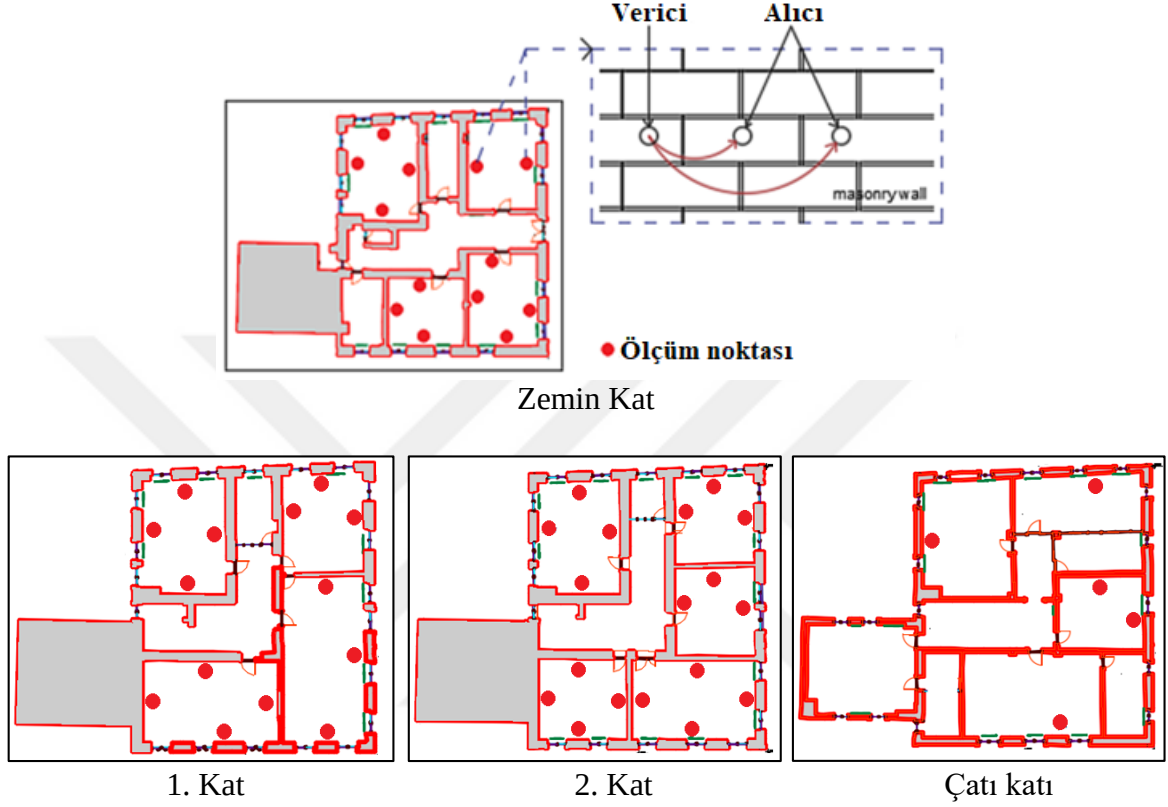
2.1.3.2. Ultrasonik Dalga Hızı Testleri

Elastisite modülü ve birim hacim ağırlığı gibi malzeme özelliklerini elde etmek için binanın duvarlarında ultrasonik testler gerçekleştirilmiştir. Test için yüksek frekanslı ses dalgaları üreten bir alet kullanılmıştır. Bu test ile malzeme yoğunluğuna ve malzeme içerisindeki boşluklara bağlı olarak dalga hızının yayılmasıyla ilgili malzeme özelliği tahmini yapılmaktadır. Test ile ilgili şematik görünüm ve test sırasındaki bazı görüntüler Şekil 2.24’te gösterilmiştir.



Şekil 2.24. Ölçüm şeması (a) ve testlere ait görüntüler (b)

Ultrasonik testler binanın her katında uygulanmıştır. Test sırasındaki ölçüm noktaları Şekil 2.25'te gösterilmektedir. Ultrasonik testlerden elde edilen veriler ve her test için elde edilen elastisite modülü ve birim hacim ağırlıkları değerleri Tablo 2.13'te gösterilmektedir.



Şekil 2.25. Ultrasonik test ölçüm noktaları

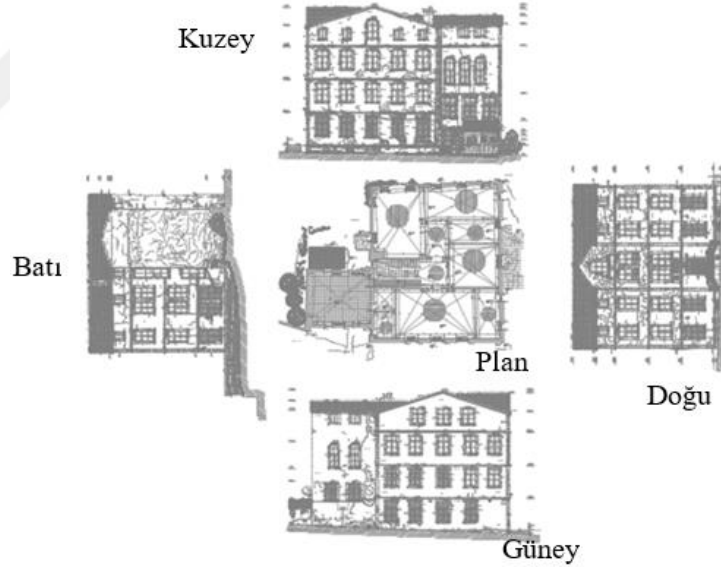
Tablo 2.13'te görüldüğü gibi elde edilen elastisite modülleri $4.48E8$ - $3.68E9$ N/m² aralığında elde edilmiştir. Birim hacim ağırlıkları ise 1.959 - 2.475 gr/cm³ aralığında hesaplanmıştır. Elastisite modülü ortalama değerleri zemin kat için $1.6E9$ N/m², birinci kat için $1.54E9$ N/m², ikinci kat için $1.46E9$ N/m² ve çatı katı için $1.0E9$ N/m² olarak hesaplanmıştır. Ayrıca birim hacim ağırlıklarının ortalama değerleri sırasıyla 2.218 gr/cm³, 2.211 gr/cm³, 2.197 gr/cm³ ve 2.132 gr/cm³ olarak hesaplanmıştır. Bu değerler her kat için sayısal modelde yığma duvarların malzeme özellikleri olarak dikkate alınabilir ancak bunlar malzeme özelliklerini tam olarak temsil etmeyebilir. Bu nedenle bu değerler kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar, çevresel titreşim testinden elde edilen deneysel sonuçlara göre güncelleştirilmesi gerekir.

Tablo 2.13. Ultrasonik test sonuçları

Katlar	Duvarlar	Testler								E (N/m ²)
		V _R (m/s)					Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (gr/cm ³)	
Zemin Kat	1	911	2700	3030	1486	-	2229	3639	2.408	2.87E+09
	2	1038	1190	1066	908	891	1117	1825	2.026	6.07E+08
	3	1071	2120	-	-	-	1750	2858	2.267	1.67E+09
	4	1873	-	-	-	-	2054	3355	2.359	2.39E+09
	5	1178	1264	-	-	-	1339	2187	2.120	9.13E+08
	6	1346	2550	-	-	-	2137	3489	2.383	2.61E+09
	7	892	-	-	-	-	978	1598	1.960	4.50E+08
	8	856	1653	-	-	-	1376	2247	2.134	9.70E+08
	9	1563	2030	-	-	-	1971	3218	2.335	2.18E+09
	10	2090	711	-	-	-	1536	2509	2.194	1.24E+09
	11	924	-	-	-	-	1014	1655	1.977	4.87E+08
	12	1776	-	-	-	-	1948	3181	2.328	2.12E+09
	13	1832	-	-	-	-	2010	3282	2.346	2.27E+09
	Ortalamalar								2.218	1.60E+09
1. Kat	1	1058	836	-	-	-	1039	1696	1.989	5.15E+08
	2	454	571	1151	1543	1543	1154	1885	2.043	6.53E+08
	3	1727	917	-	-	-	1450	2368	2.163	1.09E+09
	4	1490	-	-	-	-	1634	2669	2.228	1.43E+09
	5	2180	1152	-	-	-	1827	2984	2.291	1.84E+09
	6	1923	1642	-	-	-	1955	3193	2.330	2.14E+09
	7	1669	-	-	-	-	1831	2990	2.292	1.84E+09
	8	1236	-	-	-	-	1356	2214	2.126	9.38E+08
	9	2270	-	-	-	-	2490	4066	2.475	3.68E+09
	10	1473	-	-	-	-	1616	2638	2.222	1.39E+09
	11	1124	-	-	-	-	1233	2013	2.077	7.58E+08
	12	2070	-	-	-	-	2271	3708	2.419	2.99E+09
	13	1153	-	-	-	-	1265	2065	2.090	8.02E+08
	Ortalamalar								2.211	1.54E+09
2. Kat	1	746	1425	-	-	-	1191	1944	2.059	7.00E+08
	2	2690	1015	-	-	1420	1874	3060	2.306	1.94E+09
	3	607	1134	-	-	1210	1079	1762	2.008	5.61E+08
	4	767	-	-	-	1170	1062	1735	2.001	5.42E+08
	5	1473	1742	-	-	-	1763	2879	2.271	1.69E+09
	6	1235	-	-	-	-	1355	2212	2.126	9.36E+08
	7	1890	746	1560	-	-	1534	2505	2.193	1.24E+09
	8	1585	-	-	-	-	1739	2839	2.263	1.64E+09
	9	2040	1220	-	-	-	1788	2920	2.279	1.75E+09
	10	2170	-	-	-	-	2380	3887	2.448	3.33E+09
	11	2220	-	-	-	-	2435	3977	2.462	3.50E+09
	12	1239	-	-	-	-	1359	2219	2.128	9.43E+08
	13	1049	-	-	-	-	1151	1879	2.041	6.49E+08
	14	1395	-	-	-	-	1530	2499	2.192	1.23E+09
	15	2430	1318	-	-	-	2056	3357	2.360	2.39E+09
	16	1370	-	-	-	-	1503	2454	2.182	1.18E+09
	17	1032	-	-	-	-	1132	1849	2.033	6.25E+08
	Ortalamalar								2.197	1.46E+09
Çatı Katı	1	890	-	-	-	-	976	1594	1.959	4.48E+08
	2	1049	-	-	-	-	1151	1879	2.041	6.49E+08
	3	1055	-	-	-	-	1157	1890	2.044	6.57E+08
	4	1534	-	-	-	-	1683	2748	2.244	1.53E+09
	5	1353	-	-	-	-	1484	2424	2.175	1.15E+09
	6	864	958	2140	1686	1401	1546.4	2525	2.198	1.26E+09
	7	1103	1233	2440	-	-	1746.3	2852	2.265	1.66E+09
	Ortalamalar								2.132	1.00E+09

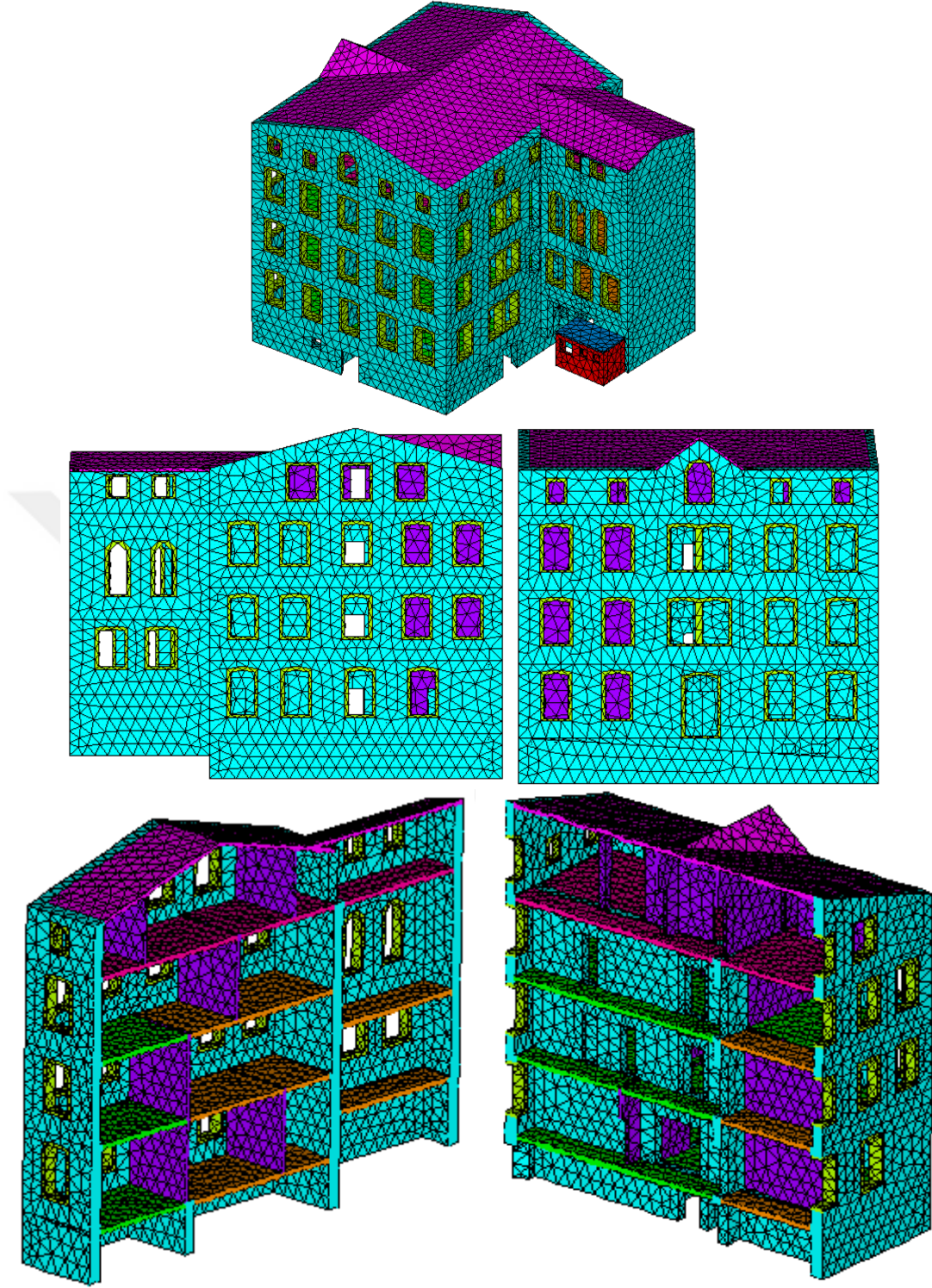
2.1.3.3. Sonlu Eleman Modeli

Yavuz Selim Okul binasının sonlu eleman modeli ANSYS yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Binanın sonlu eleman modelinde SOLID186 katı eleman tipi kullanılmıştır. Yapının modellemesinde kullanılan rölöve çizimleri Şekil 2.26’da verilmiştir. Yavuz Selim Okul binası; 1 adet bodrum kat, 3 adet normal kat ve 1 adet çatı katı olmak üzere toplam 5 kattan oluşmaktadır. Bina taşıyıcı sistemi yığma yapı tipindedir. Duvarlar taş malzemeden, çatı katı hariç diğer döşemeler ise volta döşeme olarak inşa edilmiştir. Çatı katında ise ahşap döşeme kullanılmıştır. Bina’nın üzeri beşik çatı ile örtülmüş olup, çatı oluklu kiremitlerle kaplanmıştır. Bina’nın dış duvar kalınlıkları yaklaşık olarak 50-70cm aralığında, iç duvar kalınlıkları ise 20-50cm aralığında değişmektedir. Bina toplam yüksekliği zemin kattan itibaren 16.8m’dir. Ana binaya ek olarak yapının batı tarafında aynı yükseklikte ek bir bina daha mevcuttur.



Şekil 2.26. Okul binasına ait plan ve görüşler

Yapının sonlu eleman modeli, 147095 düğüm noktası ve 77216 üç boyutlu sonlu elemandan ağından oluşmaktadır. Yapının sonlu eleman modelinde yığma duvarlar makro model, volta döşemeler idealleştirilmiş ortotropik makro model olarak modellenmiştir. Yapının sonlu eleman modelinde yer alan elemanların birbirleri ile tam bağlı olduğu varsayılmıştır. Yavuz Selim Okul binasının sonlu eleman modeli Şekil 2.27’de gösterilmektedir.

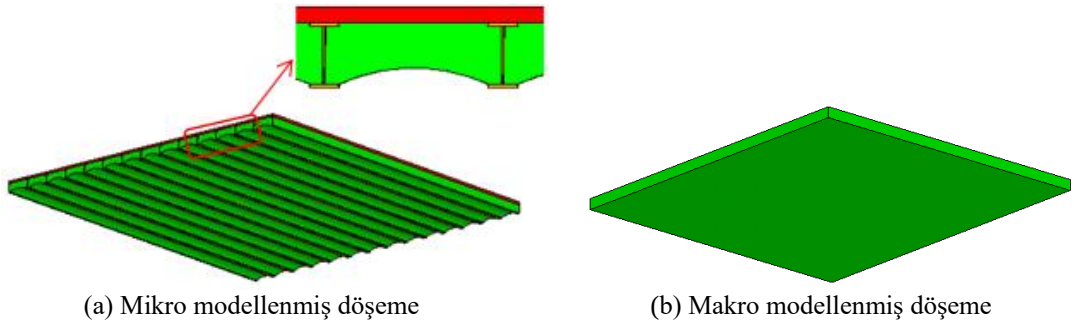


Şekil 2.27. Yavuz Selim Okul binasının sonlu eleman modeline ait görüşler

Binanın sonlu eleman modeli makro modelleme tekniği ile oluşturulmuştur. Yığma duvarlar, ahşap döşemeler ve çatı elemanlar izotropik olarak, volta döşemeler ise ortotropik malzeme olarak dikkate alınmıştır. Literatürde volta döşemenin malzeme özellikleri ile ilgili kapsamlı bir çalışma bulunamadığından dolayı volta döşemenin ortotropik malzeme özellikleri bir döşeme modeli üzerinden model güncelleme yapılarak elde edilmiştir. Bunun için 7.0m*7.7m*0.25m boyutlarında bütün kenarları mesnetli bir döşeme hem mikro hem de makro modelleme tekniği ile oluşturulmuştur. Mikro modellenmiş döşemeden elde edilen frekans ve mod şekilleri referans alınarak makro modellenmiş döşeme parametreleri iyileştirilmiştir. Mikro modellenmiş döşemede alınan malzeme özellikleri Tablo 2.14’te verilmektedir. Mikro ve makro modellenmiş döşemeler Şekil 2.28’de sunulmaktadır.

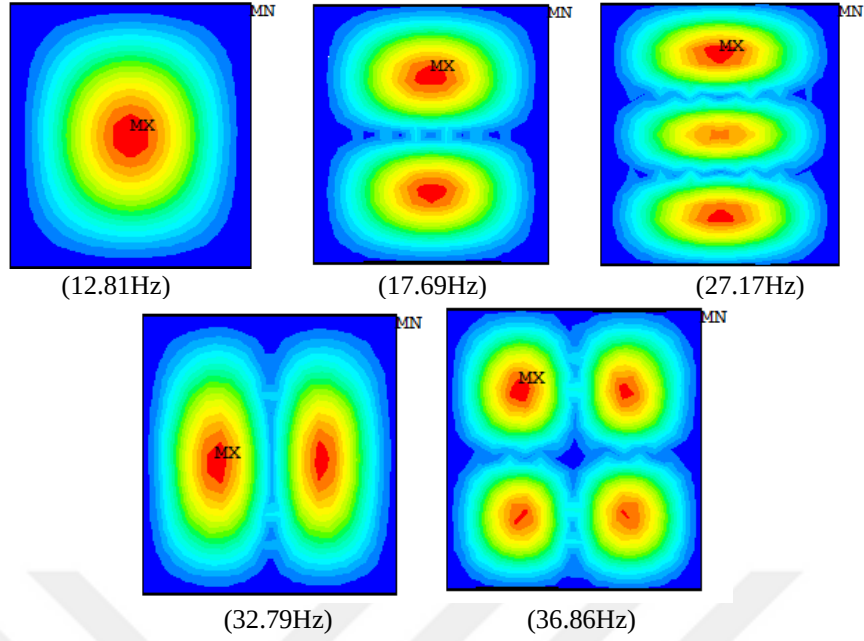
Tablo 2.14. Mikro modellenmiş döşemede alınan malzeme özellikleri

Elemanlar	Malzeme Özellikleri		
	Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı (-)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)
I Profil	2.1E11	0.30	7850
Harman Tuğlası	1.50E9	0.20	1700
Şap	5.00E9	0.20	2000



Şekil 2.28. Mikro ve makro modelleme tekniği ile oluşturulmuş döşeme modelleri

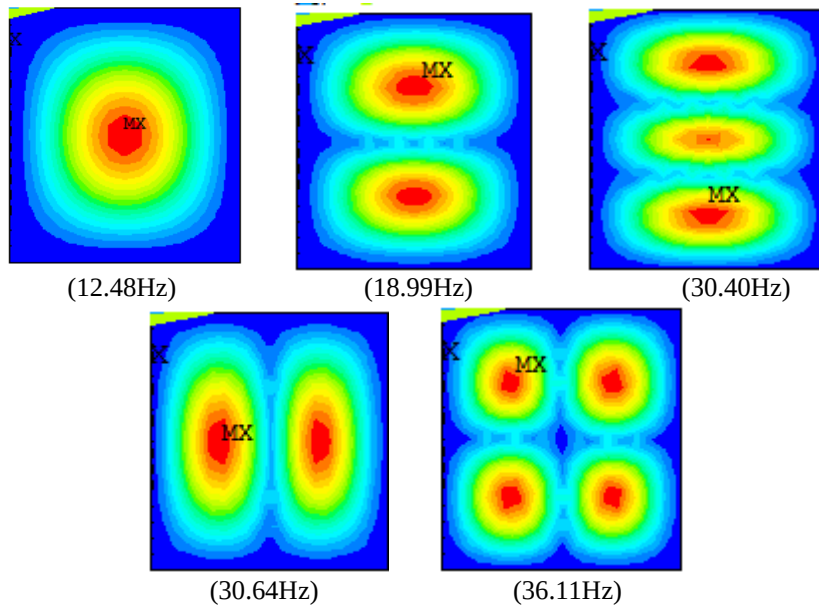
Mikro modellenmiş döşemenin modal analizi sonucunda elde edilen mod şekilleri ve frekans değerleri Şekil 2.29’da verilmektedir. Bu sonuçlara göre makro modellenmiş döşemenin iyileştirilmesi amacıyla ortotropik malzeme özellikleri kullanılmış, mod şekilleri ve frekans değerleri arasındaki farklar kabul edilebilir seviyeye düşürülmüştür. İyileştirme sonucunda makro modellenmiş döşeme için elde edilen malzeme özellikleri Tablo 2.15’te ve doğal frekans, mod şekli sonuçları Şekil 2.30’da sunulmaktadır.



Şekil 2.29. Mikro modellenmiş volta döşemenin ilk 5 mod şekli ve doğal frekans değerleri

Tablo 2.15. Makro modellenmiş döşeme için iyileştirilmiş malzeme özellikleri

	Elastisite Modülü (N/m ²)			Poisson Oranı (-)			Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)
	Ex	Ey	Ez	PRXY	PRYZ	PRXZ	
<i>X yönünde volta döşeme</i>	7E9	2E9	3E9	0.3	0.2	0.2	2000
<i>Y yönünde volta döşeme</i>	2E9	7E9	3E9	0.2	0.3	0.2	2000



Şekil 2.30. Makro modellenmiş volta döşemenin ilk 5 mod şekli ve doğal frekans değerleri

Şekil 2.29 ve Şekil 2.30'dan da görülebileceği gibi mikro ve makro modellenmiş döşemelerden elde edilen mod şekilleri benzer çıkmıştır. Her iki döşemeden elde edilen doğal frekans değerleri Tablo 2.16'da karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tablodan da görüleceği üzere aradaki farklar kabul edilebilir seviyelerdedir.

Tablo 2.16. Makro ve mikro modellenmiş döşemelere ait doğal frekans değerleri

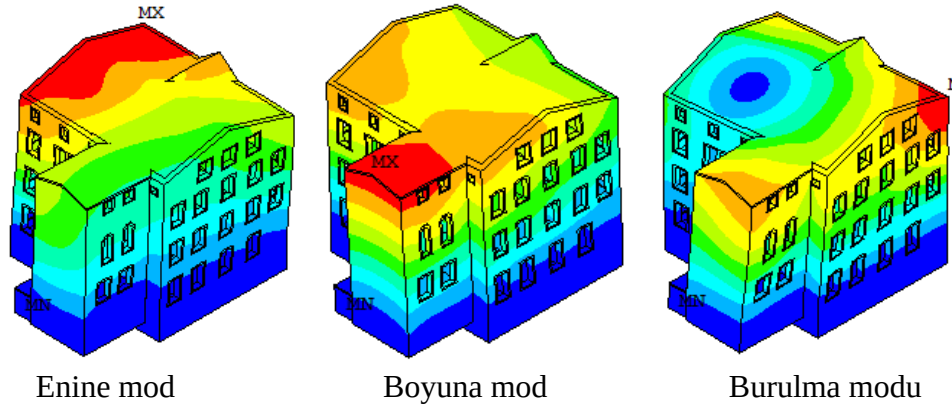
Mod Numarası	Makro Model Volta Döşeme	Farklılık (%)	Mikro Model Volta Döşeme
1	12.48	2.6	12.81
2	18.99	6.8	17.69
3	30.40	10.6	27.17
4	30.64	7.0	32.79
5	36.11	2.1	36.86

Volta döşeme ile ilgili idealleştirilmiş malzeme özelliği belirlendikten sonra diğer malzeme özellikleri literatür çalışmaları ile benzer şekilde seçilmiştir. Bina'nın sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.17'de verilmektedir.

Tablo 2.17. Okul binasının sonlu eleman modelinde kullanılan lineer malzeme özellikleri

Elemanlar	Malzeme Özellikleri						
	Elastisite Modülü (N/m ²)			Poisson Oranı (-)			Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)
Zemin kat duv.	2.0E9			0.2			2200
1. kat duvarları	2.0E9			0.2			2200
2. kat duvarları	2.0E9			0.2			2200
Çatı katı duvarları	2.0E9			0.2			2200
İç ince duvarlar	2.0E9			0.2			1000
Ahşap Döşeme	1.0E9			0.2			600
X yönünde volta döşeme	7E9	2E9	3E9	0.3	0.2	0.2	2000
Y yönünde volta döşeme	2E9	7E9	3E9	0.2	0.3	0.2	2000
Çatı Örtüsü	1.0E9			0.2			700

Okul binasının başlangıç sayısal dinamik karakteristikleri sonlu eleman modal analizi yardımıyla elde edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen ilk üç frekans değeri 4.13Hz ile 5.18Hz değerleri aralığında elde edilmiştir. Bina'nın mod şekilleri sırasıyla enine, boyuna ve burulma modları olarak elde edilmiştir. Elde edilen mod şekilleri, Şekil 2.31'de sunulmaktadır. Deneysel ve sayısal doğal frekanslar ve MGK değerleri Tablo 2.18'de verilmiştir. Frekanslar arasındaki maksimum fark %23.3 olarak elde edilmiştir. MGK değerlerindeki yüksek oranlar modlar arasında uyumun varlığını göstermektedir.



Şekil 2.31. Binanın sayısal mod şekilleri

Tablo 2.18. Deneysel ve başlangıç model sayısal frekans değerleri

Mod Numarası	Frekans (Hz)				MGK (%)
	GFTAA	SAB	Fark (%)	Başlangıç Model Model	
1	3.57	3.56	15.7	4.13	96.8
2	3.85	3.83	19.2	4.59	86.2
3	4.20	4.20	23.3	5.18	93.8

2.1.3.4. Sonlu Eleman Model İyileştirmesi

Sayısal ve deneysel testlerden elde edilen sonuçlar arasında bazı farklılıkların olduğu Tablo 2.18’den görülmektedir. Bu farklılıklar malzeme özellikleri ve sınır koşullarındaki bazı belirsizliklerden kaynaklanmaktadır. Bu farklılıkları gidermek ve daha gerçekçi bir sayısal model elde etmek amacıyla sonlu eleman model güncelleştirmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Güncelleme, manuel olarak deneme yanılma yoluyla gerçekleştirilmiştir.

Manuel model güncellemede, deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki hataları en aza indirmek için elemanların elastisite modülleri ve birim hacim ağırlıkları güncelleme parametreleri olarak seçilmiştir. Model güncellemenin ilk aşamasında ultrasonik testlerden elde edilen ortalama değerler direk olarak kullanılmıştır. Bu aşamadaki parametre değişimleri Tablo 2.19’da göstermektedir. Manuel model güncelleme için ilk aşamada elde edilen sayısal frekanslar Tablo 2.20’de sunulmaktadır. Tablo 2.20’den görüldüğü gibi, deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki maksimum farklar %23.3’ten %8.8’e düşürülmüştür. Mod şekillerindeki uyumu gösteren MGK değerleri oldukça yüksek seviyede elde edilmiştir.

Tablo 2.19. İlk aşama Manuel model güncelleme için elastisite modüllerindeki değişim

Eleman	Malzeme Özellikleri					
	Elastisite modülü(N/m^2)			Birim H. Ağırlığı(kg/m^3)		
	Başlangıç	Fark. (%)	Güncellenmiş	Başlangıç	Fark. (%)	Güncellenmiş
Zemin kat duv.	2.00E9	20.0	1.60E9	2200	0.8	2218
1. kat duvarları	2.00E9	23.0	1.54E9	2200	0.5	2211
2. kat duvarları	2.00E9	27.0	1.46E9	2200	0.1	2197
Çatı katı duvarları	2.00E9	50.0	1.00E9	2200	3.1	2132
İç ince duvarlar	2.00E9	50.0	1.00E9	1000	-	1000
Ahşap Döşeme	1.00E9	-	1.00E9	600	-	600
Çatı Örtüsü	1.00E9	-	1.00E9	700	-	700

Tablo 2.20. İlk aşama manuel güncellemenin ardından deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar

Mod Numarası	Frekans (Hz)				MGK (%)
	GFTAA	SAB	Manuel Güncelleme	Maks. fark (%)	
1	3.57	3.56	3.61	1.1	97.5
2	3.85	3.83	4.04	4.9	87.8
3	4.20	4.20	4.57	8.8	94.0

İlk aşamada frekanslar arasında elde edilen maksimum 8.8'lik fark kabul edilebilir sınırı aşmaktadır (%5). Dolayısı ile tekrar bir güncelleme işlemi gerçekleştirilmiş ve ultrasonik testlerden elde edilen değerler de güncellenmiştir. Model güncellemesinden önce ve sonra güncelleme parametrelerindeki değişiklikler Tablo 2.21'de göstermektedir. Manuel model güncelleme için nihai sayısal frekanslar Tablo 2.22'de sunulmaktadır. Tablo 2.22'den de görüldüğü gibi, deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki maksimum farklar %8.8'den %4.7'ye düşürülmüştür. Son güncelleme ile birlikte MGK değerlerinde de artış olduğu da gözlemlenmiştir.

Tablo 2.21. Son aşama Manuel model güncelleme için elastisite modüllerindeki değişim

Eleman	Malzeme Özellikleri					
	Elastisite modülü(N/m^2)			Birim H. Ağırlığı(kg/m^3)		
	Başlangıç	Fark. (%)	Güncellenmiş	Başlangıç	Fark. (%)	Güncellenmiş
Zemin kat duv.	1.60E9	9.4	1.75E9	2218	3.7	2300
1. kat duvarları	1.54E9	9.1	1.40E9	2211	4.0	2300
2. kat duvarları	1.46E9	10.9	1.30E9	2197	4.7	2300
Çatı katı duvarları	1.00E9	20.0	1.20E9	2132	7.9	2300
İç ince duvarlar	1.00E9	50.0	1.50E9	1000	70.0	1700
Ahşap Döşeme	1.00E9	200.0	3.00E9	600	-	600
Çatı Örtüsü	1.00E9	50.0	5.00E8	700	-	700

Tablo 2.22. Son aşama manuel güncellemenin ardından deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar

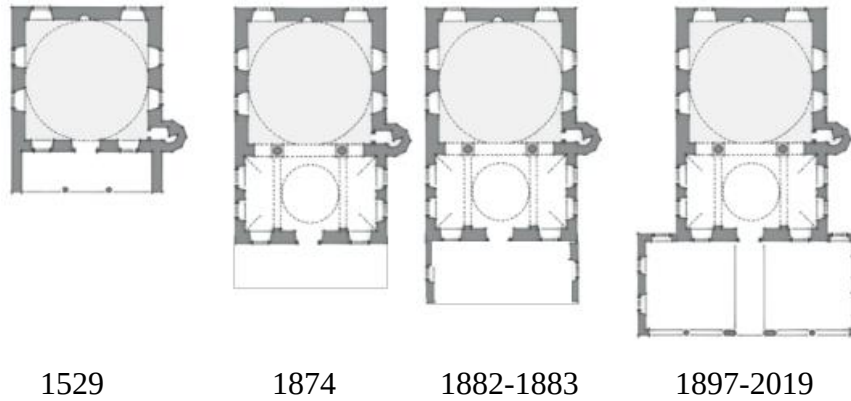
Mod Numarası	Frekans (Hz)				MGK (%)
	GFTAA	SAB	Manuel Güncelleme	Maks. fark (%)	
1	3.57	3.56	3.54	0.8	97.7
2	3.85	3.83	3.94	2.3	88.4
3	4.20	4.20	4.40	4.7	94.4

Yavuz Selim Okul binası ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar Günaydin vd. (2022b) yayınında detaylı olarak anlatılmıştır. Yayında ayrıca yapının sismik davranışı incelenmiştir.

2.1.4. İskenderpaşa Cami

İskenderpaşa Camisi Trabzon ili, Ortahisar ilçesinde yer almaktadır. İskenderpaşa Camii, Trabzon'daki en önemli Osmanlı camilerinden biridir. Tarihi kayıtlardaki mevcut belgeler, yapının Kanuni devri Trabzon valilerinden İskender Paşa tarafından 1529 yılında yaptırıldığını göstermektedir. Farklı dönemlerde çeşitli eklerle genişletilerek restore edilmiş olan cami, taş duvar üzerine oturtulmuş tek kubbeli, taş-tuğla örgülü düzgün minareli ve kırma çatı ile örtülü son mahfili ile 16. yüzyıla ait bir sanat eseridir. Bu tipoloji 1874 yılına kadar orijinal halini korumuştur. Bu dönemde kuzey duvarı kaldırılarak yerine iki taş sütun, kemerler üzerine oturtulmuş yarım kubbeli tonozlarla yerleştirilmiş küçük bir kubbe ve son mahfil mekanı eklenmiştir. Dokuz yıl sonra (1882-1883) son cemaat yeri yıkılarak nispeten daha büyük bir son cemaat yeri yapılmıştır. Camideki son onarım 1897 yılında son cemaat yerinin genişletilerek bugünkü haline getirilmesiyle gerçekleştirilmiştir (Tuluk, 2007; Açıcı, 2017). Şekil 2.32'de caminin yıllar içerisindeki değişimi sunulmaktadır.

On altıncı yüzyıla tarihlenen cami, dikdörtgen bir ibadethane (11.16m x 16.80m) ve bu mekâna yatay olarak bitişik dikdörtgen bir son mahfili (16.67m x 7.67m) içermektedir. İstinat duvarlarının kalınlıkları 0.79m ile 1.03m arasında değişmektedir. Caminin 9.15m çapında büyük bir kubbesi, 4.44m çapında küçük kubbesi ve 23.23m yüksekliğinde bir minaresi vardır. Minare, caminin batı duvarına bitişik olup, mescitten küçük bir kapı ile minarenin şerefesine geçilmektedir. Ayrıca ibadet mahallinde iki silindirik sütun bulunmaktadır. Şekil 2.33'te camiye ait görünüşler sunulmaktadır.



Şekil 2.32. İskenderpaşa camisinin zaman içerisindeki yapısal değişimi (Tuluk, 2007).



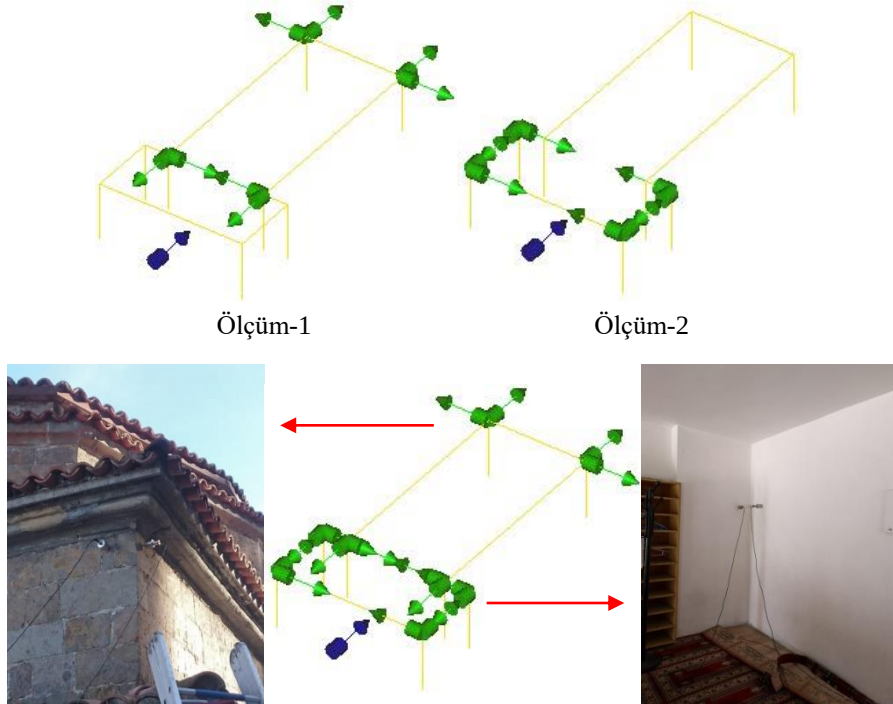
Şekil 2.33. İskenderpaşa camisine ait görünüşler

2.1.4.1. Cami Yapısı

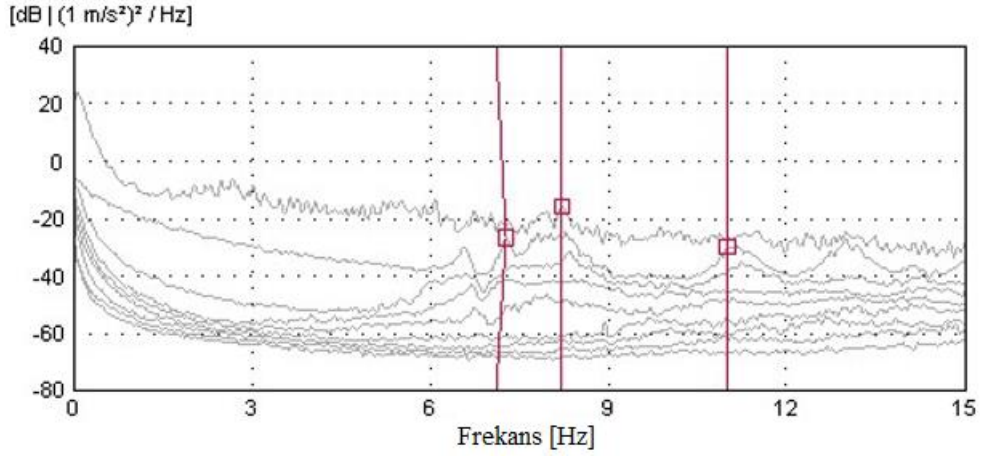
2.1.4.1.1. Çevresel Titreşim Testleri

Cami yapısının frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristiklerini deneysel olarak elde etmek amacıyla çevresel titreşim testleri uygulanmıştır. Deneysel ölçümler sırasında B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. 30 dakika boyunca devam eden ölçümlerdeki titreşim verileri B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesinde toplanmış ve PULSE yazılımına aktararak işlenmiştir. İşlenen sinyaller OMA yazılımına aktararak dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Ortam titreşim testinde frekans aralığı 0-25Hz olarak seçilmiştir. Toplam 9 adet ivmeölçer caminin üst kotlarına yatayda yerleştirilmiştir (Şekil 2.34). Caminin dinamik özellikleri, sinyal işlemeden sonra GFTAA yöntemi kullanılarak elde edilmiştir.

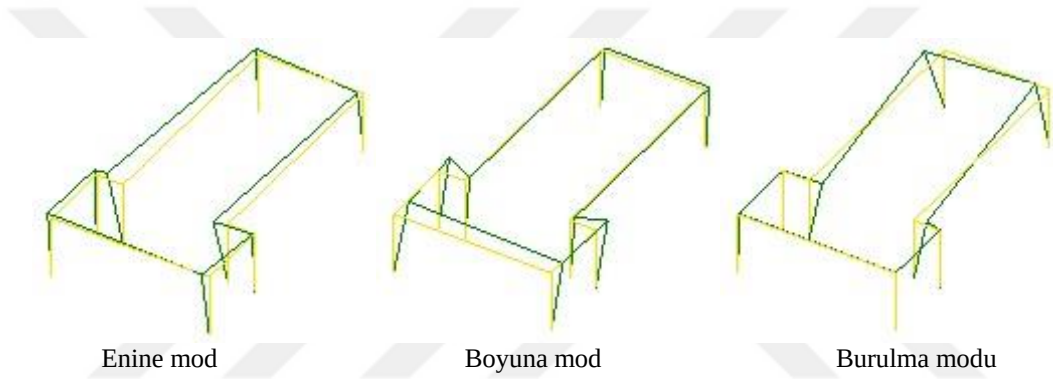
Çevresel titreşim testi sonucunda toplanan sinyallerin, GFTAA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrisleri Şekil 2.35'te sunulmaktadır. Çevresel titreşim testi sonucunda elde edilen ilk üç mod şekilleri Şekil 2.36'da verilmektedir. İlk üç mod şekli sırasıyla enine, boyuna ve burulma modları olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.34. Ortam titreşim testinde kullanılan ivmeölçer düzeni ve bağlantı görünüşü



Şekil 2.35. GFTAA yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk grafiği



Şekil 2.36. Ölçüm sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli

Caminin GFTAA yöntemi kullanılarak elde edilen deneysel dinamik karakteristikleri Tablo 2.23'te sunulmaktadır. Doğal frekanslar sırasıyla 7.12Hz-11.02Hz aralığında hesaplanmıştır. Sönüm oranları ise % 0.26-1.45 değerleri arasında elde edilmiştir.

Tablo 2.23. GFTAA yöntemine göre elde edilen frekans ve sönüm oranları

Mod Numarası	GFTAA	
	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	7.12	1.45
2	8.20	0.50
3	11.02	0.26

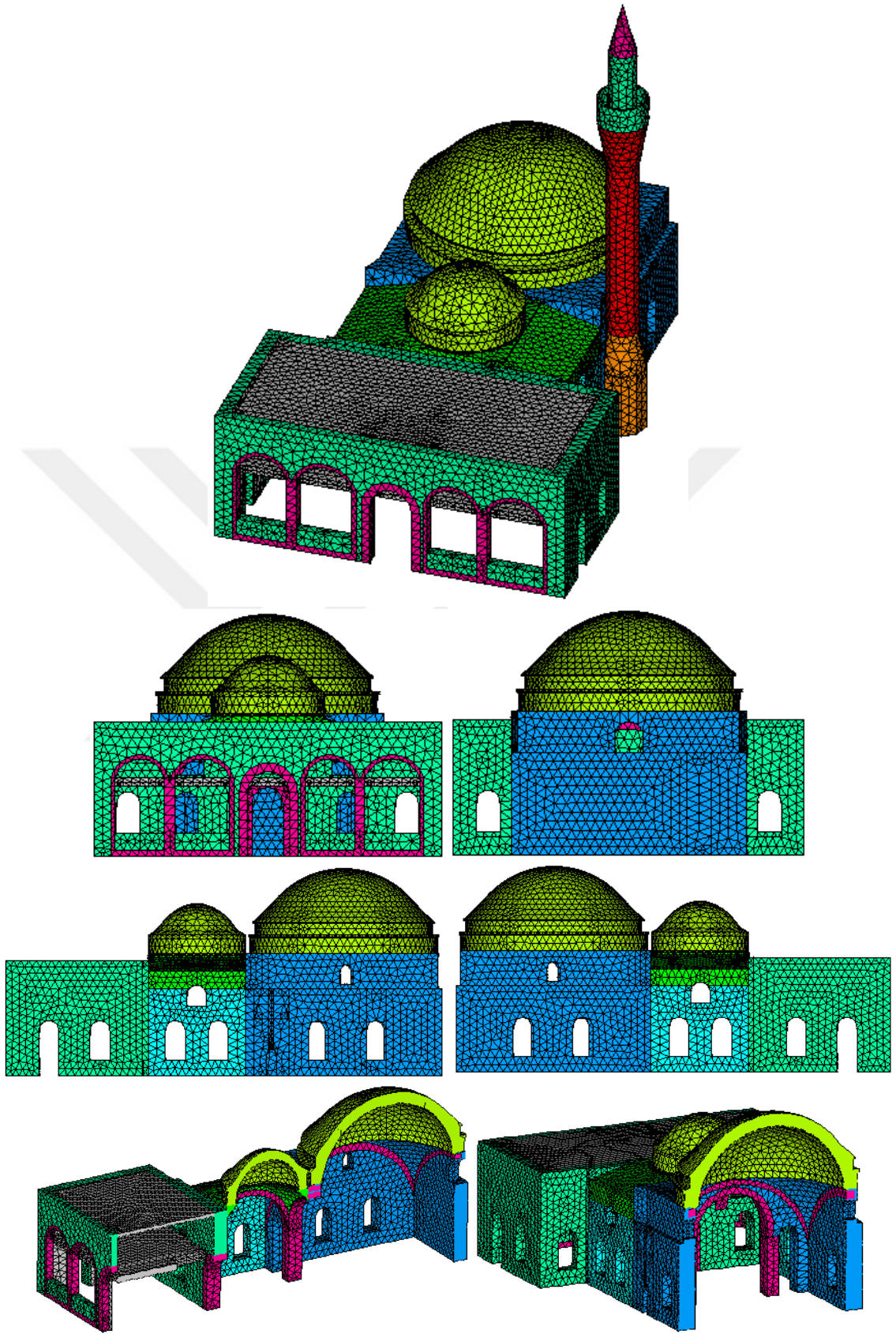
2.1.4.1.2. Sonlu Eleman Modeli

Cami yapısının sonlu eleman modeli ANSYS yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Caminin sonlu eleman modelinde SOLID186 katı eleman tipi kullanılmıştır. Cami yapısı dikdörtgen bir ibadethane (11.16m x 16.80m) kısmına ve bu mekâna yatay olarak bitişik dikdörtgen bir son mahfil (16.67m x 7.67m) mekânına sahiptir. Beden duvarlarının kalınlıkları 0.79m ile 1.03m arasında değişmektedir. Caminin 9.15m çapında büyük bir kubbesi, 4.44m çapında küçük kubbesi vardır. Caminin sonlu eleman modelinde yığma duvarlar makro model olarak modellenmiştir. Yapının sonlu eleman modelinde yer alan elemanların birbirleri ile tam bağlı olduğu varsayılmıştır. Caminin sonlu eleman modeli Şekil 2.37’de gösterilmektedir.

Caminin sonlu eleman modelinde, harim mekânı duvarları, orta kısım duvarları, son cemaat kısmı duvarları, kemerler, kubbe, tonoz ve betonarme elemanlar yer almaktadır. Caminin malzeme özellikleri ile ilgili herhangi bir deneysel çalışma yapılmamıştır. Malzeme özellikleri literatürde bulunan yığma yapı yayınlarına benzer şekilde seçilmiştir. Caminin sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.24’te verilmektedir.

Tablo 2.24. Caminin sonlu eleman modelinde kullanılan lineer malzeme özellikleri

	Elemanlar	Malzeme Özellikleri		
		Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı (-)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)
Cami Yapısı	Ana mekân duvarlar	2.00E9	0.20	2000
	Orta kısım duvarlar	2.00E9	0.20	2000
	Son cemaat yeri duvarları	2.00E9	0.20	2000
	Kemerler	3.00E9	0.20	2000
	Kubbe	2.00E9	0.20	1600
	Tonoz	2.00E9	0.20	1600
	Betonarme elemanlar	2.00E10	0.20	2400

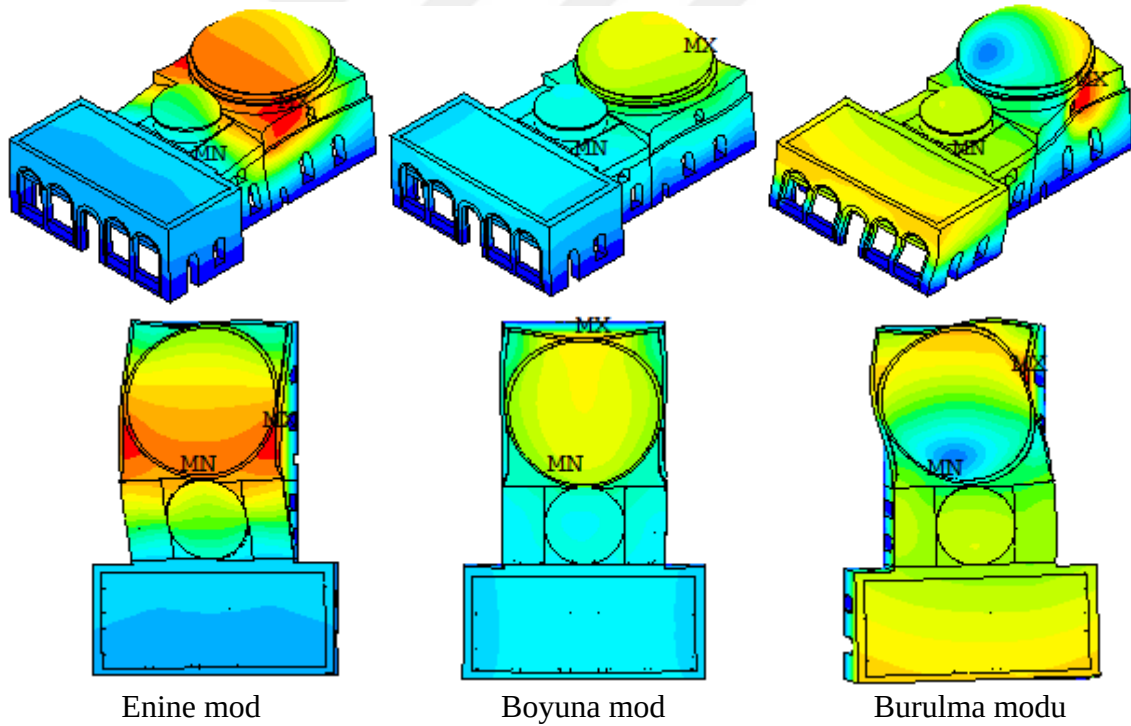


Şekil 2.37. Caminin sonlu eleman modeline ait görüşler

Caminin başlangıç sayısal dinamik karakteristikleri sonlu eleman modal analizi yardımıyla elde edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen ilk üç frekans değeri 7.79Hz ile 10.05Hz değerleri aralığında elde edilmiştir. Caminin mod şekilleri sırasıyla enine, boyuna, ve burulma modları olarak elde edilmiştir. Elde edilen mod şekilleri, Şekil 2.38’de sunulmaktadır. Deneysel ve sayısal doğal frekanslar Tablo 2.25’te verilmiştir. Frekanslar arasındaki maksimum fark %18.6 olarak elde edilmiştir.

Tablo 2.25. Deneysel ve başlangıç model sayısal frekans değerleri

Mod Numarası	Frekans (Hz)		
	GFTAA	Fark (%)	Başlangıç Model
1	7.12	9.4	7.79
2	8.20	18.6	9.73
3	11.02	8.8	10.05



Şekil 2.38. Caminin sayısal mod şekilleri

2.1.4.1.3. Sonlu Eleman Model İyileştirmesi

Sayısal ve deneysel testlerden elde edilen sonuçlar arasında bazı farklılıkların olduğu Tablo 2.25'ten görülmektedir. Bu farklılıklar malzeme özellikleri ve sınır koşullarındaki bazı belirsizliklerden kaynaklanmaktadır. Bu farklılıkları gidermek ve daha gerçekçi bir sayısal model elde etmek amacıyla sonlu eleman model güncelleştirmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Camii için güncelleme manuel olarak deneme yanılma yoluyla yapılmıştır.

Manuel model güncellemede deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki hataları en aza indirmek için elemanların elastisite modülleri ve birim hacim ağırlıkları güncelleme parametreleri olarak seçilmiştir. Model güncellemesinden önce ve sonra güncelleme parametrelerindeki değişiklikler Tablo 2.26'da gösterilmektedir. Manuel model güncelleme için nihai sayısal frekanslar Tablo 2.27'de sunulmaktadır. Tablo 2.27'den de görüldüğü gibi, deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki maksimum farklar %18.6'dan %4.9'a düşürülmüştür.

Tablo 2.26. Manuel model güncelleme için malzeme özelliklerindeki değişim

Eleman	Malzeme Özellikleri					
	Elastisite modülü(N/m^2)			Birim H. Ağırlığı(kg/m^3)		
	Başlangıç	Fark. (%)	Güncellenmiş	Başlangıç	Fark. (%)	Güncellenmiş
Ana mekân duvarlar	2.00E9	30.0	1.40E9	2000	10.0	2200
Orta kısım duvarlar	2.00E9	30.0	1.40E9	2000	10.0	2200
Son cemaat yeri duv.	2.00E9	75.0	3.50E9	2000	10.0	2200
Kemerler	3.00E9	16,6	3.50E9	2000	10.0	2200
Kubbe	2.00E9	25.0	1.50E9	1600	9,4	1750
Tonoz	2.00E9	25.0	1.50E9	1600	9,4	1750
Betonarme elemanlar	2.00E10	50.0	3.00E10	2400	-	2400

Tablo 2.27. Manuel güncellenmenin ardından deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar

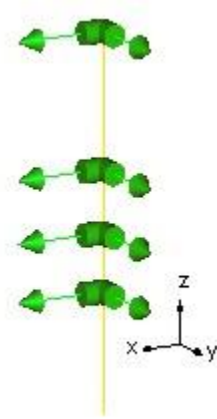
Mod Numarası	Frekans (Hz)		
	GFTAA	Manuel Güncelleme	Maks. fark (%)
1	7.12	7.47	4.9
2	8.20	8.60	4.9
3	11.02	10.75	2.4

2.1.4.2. Minare Yapısı

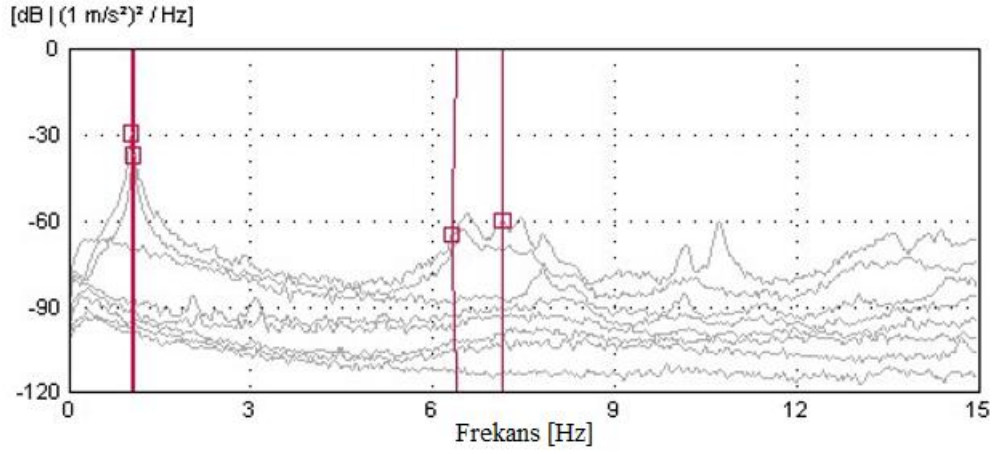
2.1.4.2.1. Çevresel Titreşim Testleri

Minare yapısının frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristiklerini deneysel olarak elde etmek amacıyla çevresel titreşim testleri uygulanmıştır. Deneysel ölçümler sırasında B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. 10 dakika boyunca devam eden ölçümlerdeki titreşim verileri, B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesinde toplanmış ve PULSE yazılımına aktararak işlenmiştir. İşlenen sinyaller OMA yazılımına aktararak dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Ortam titreşim testinde frekans aralığı 0-25Hz olarak seçilmiştir. Toplam 8 adet ivmeölçer minarenin dört farklı noktasına yatay yönlerde olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 2.39). Minarenin dinamik karakteristikleri, sinyal işlemeden sonra GFTAA yöntemi kullanılarak elde edilmiştir.

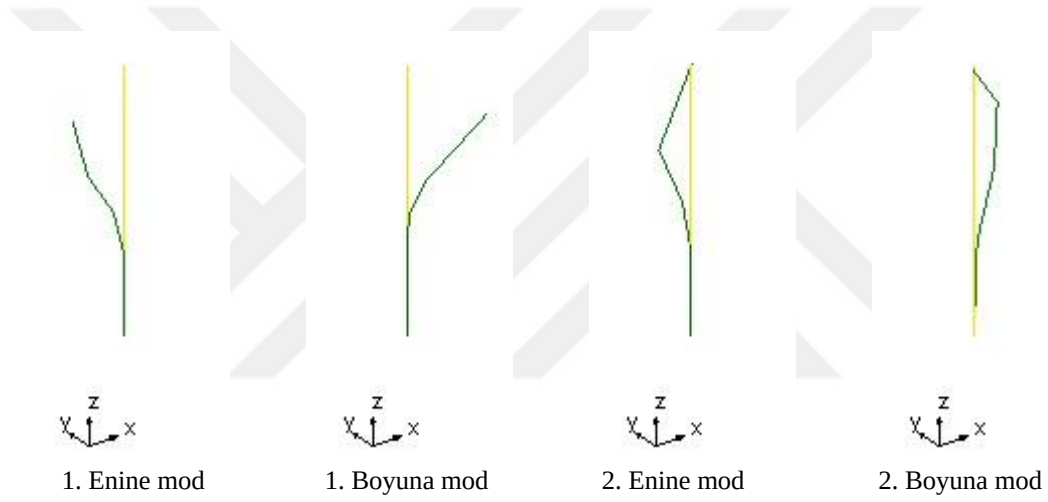
Çevresel titreşim testi sonucunda toplanan sinyallerin, GFTAA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrisleri Şekil 2.40'ta sunulmaktadır. Çevresel titreşim testi sonucunda elde edilen ilk dört mod şekilleri Şekil 2.41'de verilmektedir. İlk dört mod şekli sırasıyla 1. enine, 1. boyuna, 2. Enine ve 2. Boyuna modlar olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.39. Ortam titreşim testinde kullanılan ivmeölçer düzeni ve bağlantı görünüşü



Şekil 2.40. GFTAA yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk grafiği



Şekil 2.41. Ölçüm sonucunda elde edilen ilk dört mod şekli

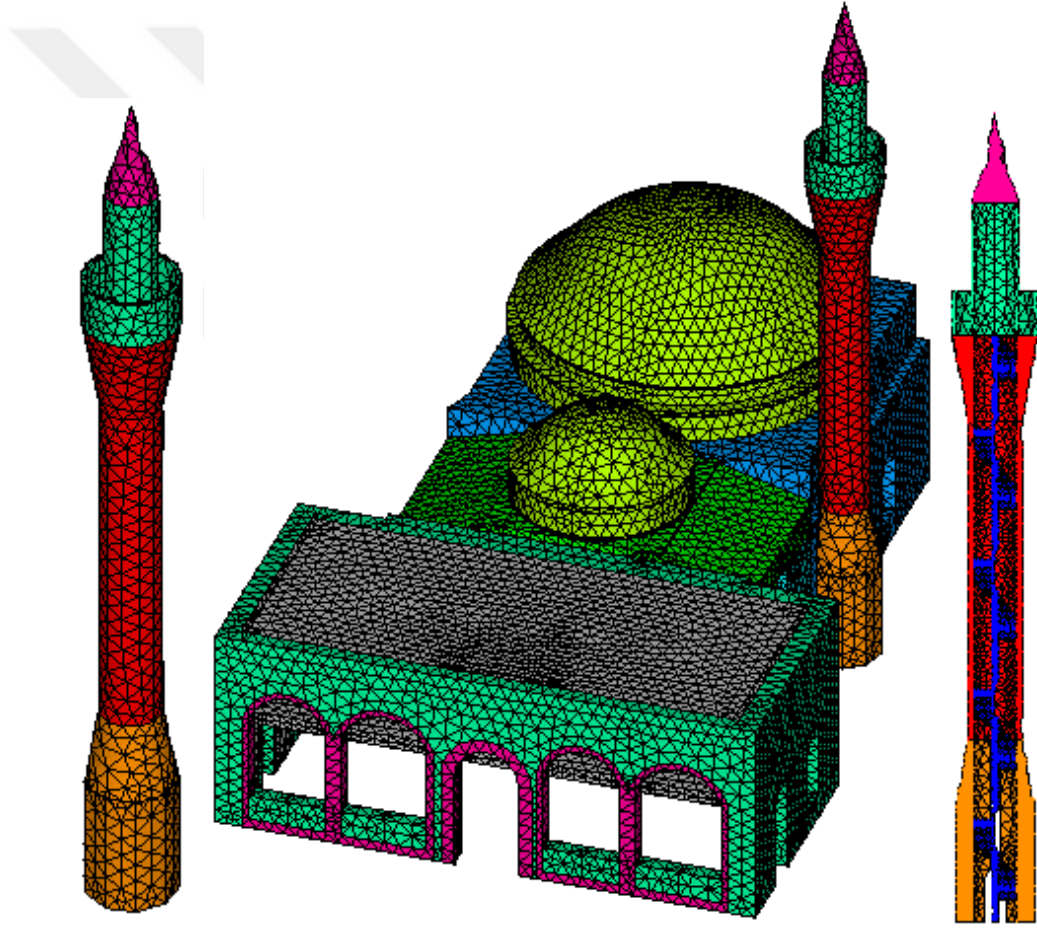
Minarenin GFTAA yöntemi kullanılarak belirlenen deneysel dinamik karakteristikleri Tablo 2.28’de sunulmaktadır. Doğal frekanslar sırasıyla 1.04Hz-7.15Hz aralığında hesaplanmıştır. Sönüm oranları ise % 0.26-2.43 değerleri arasında elde edilmiştir.

Tablo 2.28. GFTAA yöntemine göre elde edilen frekans ve sönüm oranları

Mod Numarası	GFTAA	
	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	1.04	2.43
2	1.06	0.93
3	6.40	0.26
4	7.15	1.03

2.1.4.2.2. Sonlu Eleman Modeli

Minare yapısının sonlu eleman modeli ANSYS yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Caminin sonlu eleman modelinde SOLID186 katı eleman tipi kullanılmıştır. Minare modeli minare kaidesi ve geçiş kısmı, minare gövdesi, merdivenler, şerefe, parapet ve külah kısımlarından oluşmaktadır. Minarenin boyu 23.23m yüksekliğindedir. Minarenin sonlu eleman modelinde yığma duvarlar makro model olarak modellenmiştir. Yapının sonlu eleman modelinde yer alan elemanların birbirleri ile tam bağlı olduğu varsayılmıştır. Minarenin sonlu eleman modeli Şekil 2.42’de gösterilmektedir.



Şekil 2.42. Minarenin sonlu eleman modeline ait görünüşler

Minarenin malzeme özellikleri ile ilgili herhangi bir deneysel çalışma yapılmamıştır. Malzeme özellikleri literatürde bulunan yığma yapı yayınlarına benzer şekilde seçilmiştir. Minarenin sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.29’da verilmektedir.

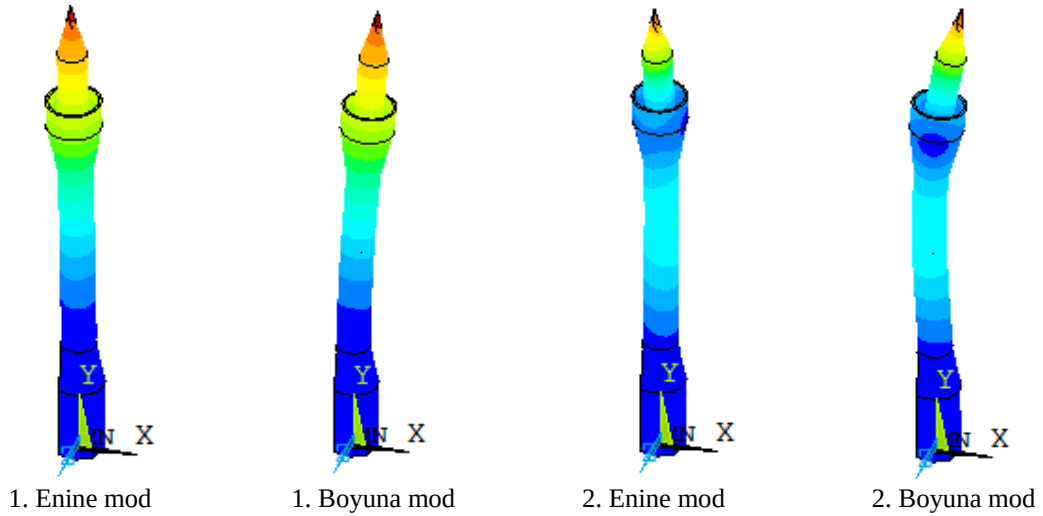
Tablo 2.29. Minarenin sonlu eleman modelinde kullanılan lineer malzeme özellikleri

	Elemanlar	Malzeme Özellikleri		
		Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı (-)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)
Minare Yapısı	Minare kaidesi ve geçiş kısmı	2.00E9	0.20	2000
	Minare gövdesi	2.00E9	0.20	2000
	Minare merdivenler	2.00E9	0.20	2000
	Minare şerefe ve parapet	2.00E9	0.20	2000
	Külâh	1.00E9	0.20	500

Minarenin başlangıç sayısal dinamik karakteristikleri sonlu eleman modal analizi yardımıyla elde edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen ilk dört frekans değeri 0.94Hz ile 6.06Hz değerleri aralığında elde edilmiştir. Minarenin mod şekilleri sırasıyla 1. enine, 1. Boyuna, 2. enine, 2. boyuna modları olarak elde edilmiştir. Elde edilen mod şekilleri, Şekil 2.43'te sunulmaktadır. Deneysel ve sayısal doğal frekanslar Tablo 2.30'da verilmiştir. Frekanslar arasındaki maksimum fark %15.2 olarak elde edilmiştir.

Tablo 2.30. Deneysel ve başlangıç model sayısal frekans değerleri

Mod Numarası	Frekans (Hz)		
	GFTAA	Fark (%)	Başlangıç Model Model
1	1.04	9.6	0.94
2	1.06	11.3	0.94
3	6.40	5.9	6.02
4	7.15	15.2	6.06



Şekil 2.43. Minarenin sayısal mod şekilleri

2.1.4.2.3. Sonlu Eleman Model İyileştirmesi

Sayısal ve deneysel testlerden elde edilen sonuçlar arasında bazı farklılıkların olduğu Tablo 2.30'dan görülebilir. Bu farklılıklar malzeme özellikleri ve sınır koşullarındaki bazı belirsizliklerden kaynaklanmaktadır. Bu farklılıkları gidermek ve daha gerçekçi bir sayısal model elde etmek amacıyla sonlu eleman model güncelleştirmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Minare için güncelleme manuel olarak deneme yanılma yoluyla yapılmıştır.

Manuel model güncellemede deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki hataları en aza indirmek için elemanların elastisite modülleri ve birim hacim ağırlıkları güncelleme parametreleri olarak seçilmiştir. Minare için manuel güncelleme işlemi kaide, merdiven, gövde ve şerefe elastisite modüllerinin ve birim hacim ağırlıklarının değiştirilmesiyle sağlanmıştır. Model güncellemesinden önce ve sonra güncelleme parametrelerindeki değişiklikler Tablo 2.31'de göstermektedir. Manuel model güncelleme için nihai sayısal frekanslar Tablo 2.32'de sunulmaktadır. Tablo 2.32'den de görüldüğü gibi, deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki maksimum farklar %15.2'den %4.8'e düşürülmüştür. İskenderpaşa Camii ve Minaresi ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar Günaydın (2020) ve Genç vd. (2022) yayınlarında sunulmuştur.

Tablo 2.31. Manuel model güncelleme için malzeme özelliklerindeki değişim

Eleman	Malzeme Özellikleri					
	Elastisite modülü(N/m^2)			Birim H. Ağırlığı(kg/m^3)		
	Başlangıç	Fark (%)	Güncellenmiş	Başlangıç	Fark (%)	Güncellenmiş
Minare kaidesi ve geçiş kısmı	2.00E9	50.0	3.00E9	2000	10.0	2200
Minare gövdesi	2.00E9	37.5	2.75E9	2000	-	2000
Minare merdivenler	2.00E9	-	2.00E9	2000	10.0	2200
Minare şerefe ve parapet	2.00E9	37.5	2.75E9	2000	-	2000
Külâh	1.00E9	-	1.00E9	500	-	500

Tablo 2.32. Deneysel ve iyileştirilmiş sayısal frekanslar arasındaki farklar

Mod Numarası	Frekans (Hz)		
	GFTAA	Manuel Güncelleme	Maks. fark (%)
1	1.04	1.09	4.8
2	1.06	1.09	2.8
3	6.40	6.71	4.8
4	7.15	6.99	2.2

2.1.5. Santa Maria Kilisesi

Santa Maria Kilisesi Trabzon ili merkezinde yer almaktadır. Kilise, Katoliklere ait tarihi bir kilisedir. Kilise binası 1869-1874 yılları arasında Trabzon'a gelen turistler için yapıldığı düşünülmektedir. Kilise, Roma-barok tarzında inşa edilmiştir. Yapı taş örgü ile inşa edilmiştir. Yapı dikdörtgen planlıdır ve 20x14m ölçülerindedir. Binanın yüksekliği yaklaşık 12.4m'dir. Oldukça geniş bir avluya sahip olan kilisenin çatısı tonoz ve kemerlerle kapatılmıştır. Kilisede bulunan 4 adet taş kolon ve yığma duvarlar yapısal yükleri zemine iletmektedir. Sütunlar birbirlerine kemerlerle bağlanmıştır. Kilise binasının görünüşleri ve çizimleri Şekil 2.44'te verilmiştir.



Şekil 2.44. Santa Maria kilisesine ait görünüşler

Misafirhane binasının yapım tarihi hakkında yazılı bir kaynak yoktur. Ancak yapının 1854 yıllarında yapıldığı tahmin edilmektedir. Bu tarih yapının duvarlarındaki rakamlarda görülmektedir. Misafirhane binası bir bodrum, üç normal kat ve bir çatı katı olmak üzere toplam beş kattan oluşmaktadır. Ana taşıyıcı duvarlar taş malzemeden, iç bölmeler, kuzey uzantısı ve çatı katı tuğla malzemeden yapılmıştır. Yapının bodrum kat tavanı tonoz bir yapı ile geçilmektedir. Binanın 1. normal katındaki banyoların döşemeleri betonarme olarak yapılmıştır. Bu kısımlar dışında yapının kalan döşemeleri ahşaptır. Misafirhane Binasına ait görünüşler ve çizimler Şekil 2.45’te verilmiştir.

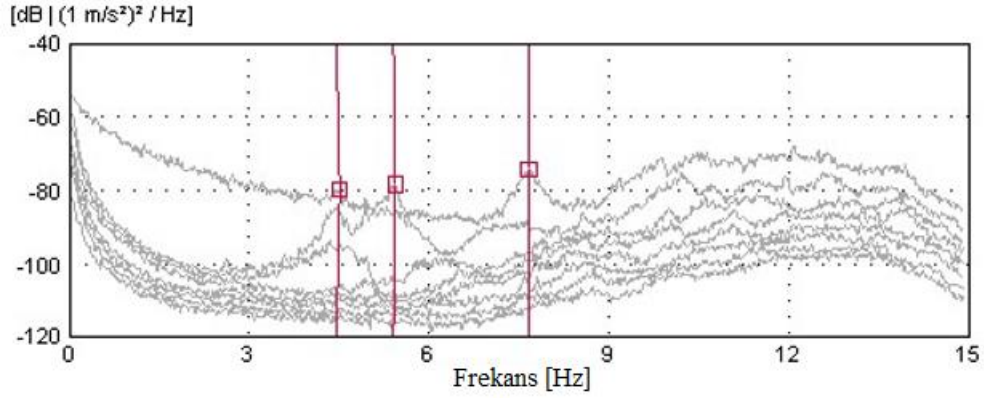


Şekil 2.45. Misafirhane binasına ait görünüşler

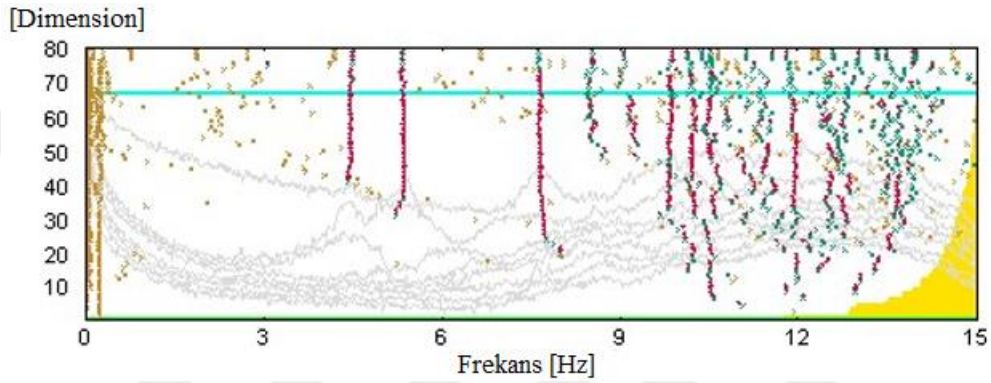
2.1.5.1. Kilise Binası

2.1.5.1.1. Çevresel Titreşim Testleri

Kilisenin frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristiklerini deneysel olarak elde etmek amacıyla çevresel titreşim testleri uygulanmıştır. Deneysel ölçümler sırasında B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. 30 dakika boyunca devam eden ölçümlerdeki titreşim verileri B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesinde toplanmış ve PULSE yazılımına aktararak işlenmiştir. İşlenen sinyaller OMA yazılımına aktararak dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Ortam titreşim testinde frekans aralığı 0-

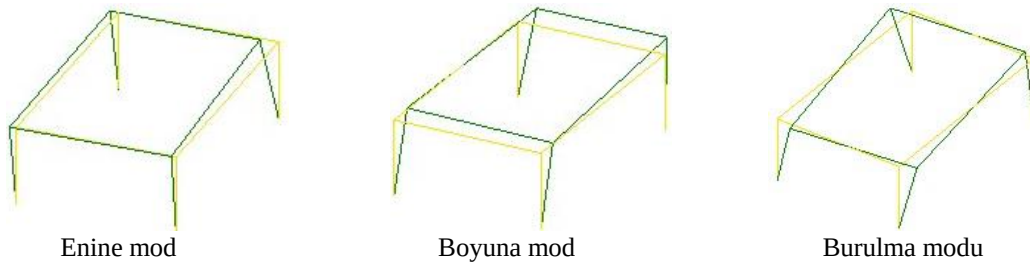


(a) Spektral yoğunluk grafiği



(b) Kararlılık diyagramı

Şekil 2.47. GFTAA ve SAB yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk grafiği ve kararlılık diyagramı



Şekil 2.48. Ölçüm sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli

Kilisenin hem GFTAA hem de SAB yöntemleri kullanılarak belirlenen deneysel dinamik özellikleri Tablo 2.33'te karşılaştırılmıştır. Doğal frekanslar, GFTAA ve SAB yöntemleri için sırasıyla 4.46Hz-7.67Hz ve 4.47Hz-7.68Hz aralığında hesaplanmıştır. İkinci modda elde edilen maksimum %0.93'lük hata ile doğal frekanslar arasında net bir uyum olduğu görülmektedir. Ancak sönüm oranları arasında anlamlı bir uyum yoktur.

Tablo 2.33. GFTAA ve SAB yöntemine göre elde edilen frekans ve sönüm oranları

Mod Numarası	Frekans (Hz)			Sönüm Oranı (%)		
	GFTAA	Fark(%)	SAB	GFTAA	Fark(%)	SAB
1	4.46	0.22	4.47	1.43	40.5	2.01
2	5.41	0.93	5.36	1.36	133.1	3.17
3	7.67	0.13	7.68	1.97	1.5	1.94

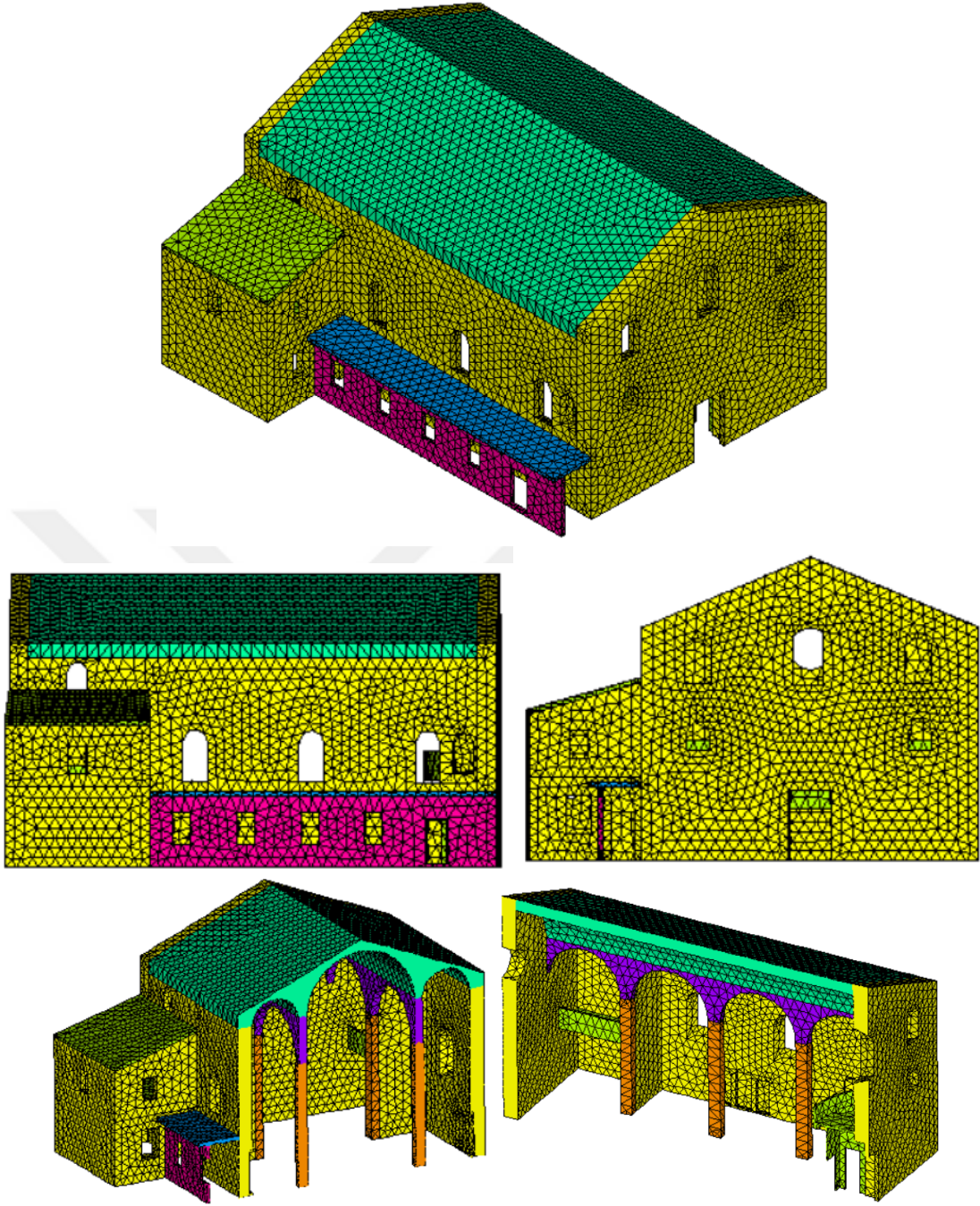
2.1.5.1.2. Sonlu Eleman Modeli

Kilise binasının sonlu eleman modeli ANSYS yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Binanın sonlu eleman modelinde SOLID186 katı eleman tipi kullanılmıştır. Bina modellemesinde kullanılan plan ve kesit çizimleri Şekil 2.49’da verilmiştir. Bina yığma olarak taş malzeme kullanılarak inşa edilmiştir. Yapı, sütunlar, kemerler, tonozlar, yığma duvarlar, ahşap elemanlar ve son yüzyılda yapılan betonarme eklentilerden oluşmaktadır.



Şekil 2.49. Kilise binasına ait plan ve kesit çizimleri

Kilisenin sonlu eleman modelinde yığma duvarlar makro model olarak modellenmiştir. Kilisenin sonlu eleman modelinde yer alan elemanların birbirleri ile tam bağlı olduğu varsayılmıştır. Yapının zemine oturduğu kısımları ankastre mesnet olarak kabul edilmiştir. Kilisenin sonlu eleman modeli Şekil 2.50’de gösterilmektedir.



Şekil 2.50. Kilise binasının sonlu eleman modeline ait görüşler

Kilise binasının sonlu eleman modelinde kemer, tonoz, taş yığma duvar, tuğla duvar, taş sütunlar, ahşap döşeme ve çatı ve betonarme döşeme olmak üzere yedi farklı yapısal eleman bileşeni bulunmaktadır. Binanın malzeme özellikleri ile ilgili herhangi bir deneysel çalışma yapılmamıştır. Malzeme özellikleri literatürde bulunan yığma yapı yayınlara benzer şekilde seçilmiştir. Binanın sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.34’te verilmektedir.

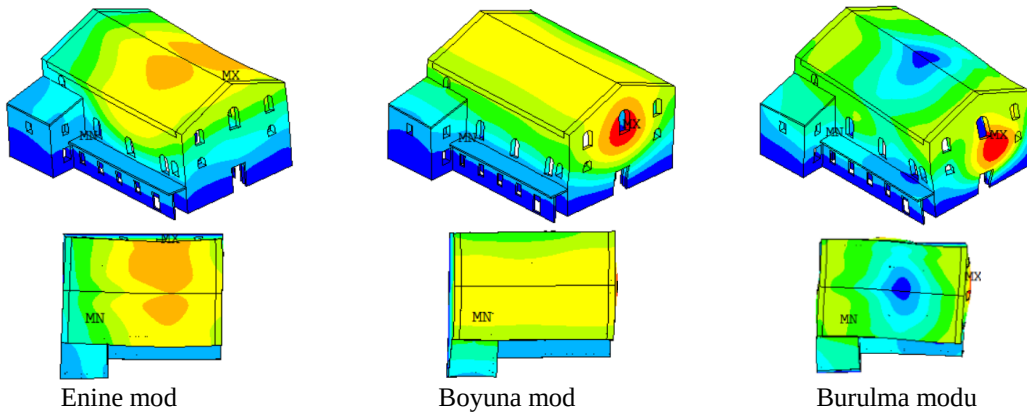
Tablo 2.34. Kilisenin sonlu eleman modelinde kullanılan lineer malzeme özellikleri

Elemanlar	Malzeme Özellikleri		
	Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı (-)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)
Kemer	2.00E9	0.2	2000
Tonoz	2.00E9	0.2	2000
Taş yığma duvar	2.00E9	0.2	2000
Tuğla duvar	2.00E9	0.2	1750
Sütun	2.0E10	0.2	2400
Ahşap döşeme	1.00E9	0.2	500
Betonarme döşeme	2.0E10	0.2	2400

Kilisenin başlangıç sayısal dinamik karakteristikleri sonlu eleman modal analizi yardımıyla elde edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen ilk üç frekans değeri 5.90Hz ile 10.34Hz değerleri aralığında elde edilmiştir. Binanın mod şekilleri sırasıyla enine, boyuna ve burulma modları olarak elde edilmiştir. Elde edilen mod şekilleri, Şekil 2.51’de sunulmaktadır. Deneysel ve sayısal doğal frekanslar Tablo 2.35’te verilmiştir. Frekanslar arasındaki maksimum fark %34.8 olarak elde edilmiştir. Tablodaki MGK değerlerinden de görüleceği üzere deneysel ve başlangıç sayısal mod şekilleri arasında yüksek bir uyumluluk mevcuttur.

Tablo 2.35. Deneysel ve başlangıç model sayısal frekans değerleri

Mod Numarası	Frekans (Hz)				MGK (%)
	GFTAA	SAB	Fark (%)	Başlangıç Model	
1	4.46	4.47	32.3	5.90	80.8
2	5.41	5.36	30.1	7.04	91.6
3	7.67	7.68	34.8	10.34	82.5



Şekil 2.51. Kilise binasının sayısal mod şekilleri

2.1.5.1.3. Sonlu Eleman Model İyileştirmesi

Sayısal ve deneysel testlerden elde edilen sonuçlar arasında bazı farklılıkların olduğu Tablo 2.35'ten görülmektedir. Bu farklılıklar malzeme özellikleri ve sınır koşullarındaki bazı belirsizliklerden kaynaklanmaktadır. Bu farklılıkları gidermek ve daha gerçekçi bir sayısal model elde etmek amacıyla sonlu eleman model güncelleştirmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Güncelleme, manuel olarak deneme yanılma yoluyla yapılmıştır.

Manuel model güncellemede, deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki hataları en aza indirmek için elemanların elastisite modülleri ve birim hacim ağırlıkları güncelleme parametreleri olarak seçilmiştir. Model güncellemesinden önce ve sonra güncelleme parametrelerindeki değişiklikler Tablo 2.36'da gösterilmektedir. Manuel model güncelleme için nihai sayısal frekanslar Tablo 2.37'de sunulmaktadır. Tablo 2.37'den de görüldüğü gibi, deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki maksimum farklar %34.8'den %2.2'ye düşürülmüştür. Tablodan da görüleceği üzere modlar arasındaki uyum başlangıç değerlerine göre artmıştır.

Tablo 2.36. Manuel model güncelleme için elastisite modüllerindeki değişim

Eleman	Malzeme Özellikleri					
	Elastisite modülü(N/m^2)			Birim H. Ağırlığı(kg/m^3)		
	Başlangıç	Fark. (%)	Güncellenmiş	Başlangıç	Fark. (%)	Güncellenmiş
Kemer	2.00E9	25.0	2.50E9	2000	15.0	2300
Tonoz	2.00E9	-	2.00E9	2000	15.0	2300
Taş yığma duvar	2.00E9	40.0	1.20E9	2000	15.0	2300
Tuğla duvar	2.00E9	37.5	1.25E9	1750	-	1750
Sütun	2.0E10	-	2.0E10	2400	4.2	2300
Ahşap döşeme	1.00E9	50.0	5.00E8	500	-	500
Betonarme döşeme	2.0E10	-	2.0E10	2400	-	2400

Tablo 2.37. Manuel güncellemenin ardından deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar

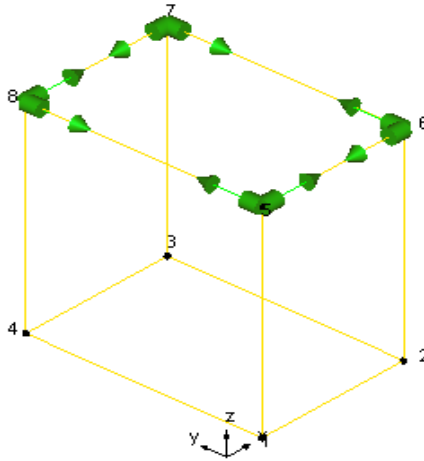
Mod	Frekans (Hz)				MGK (%)
	GFTAA	SAB	Manuel Güncelleme	Maks. fark (%)	
1	4.46	4.47	4.54	1.8	82.4
2	5.41	5.36	5.29	2.2	92.3
3	7.67	7.68	7.74	0.9	83.9

2.1.5.2. Misafirhane Binası

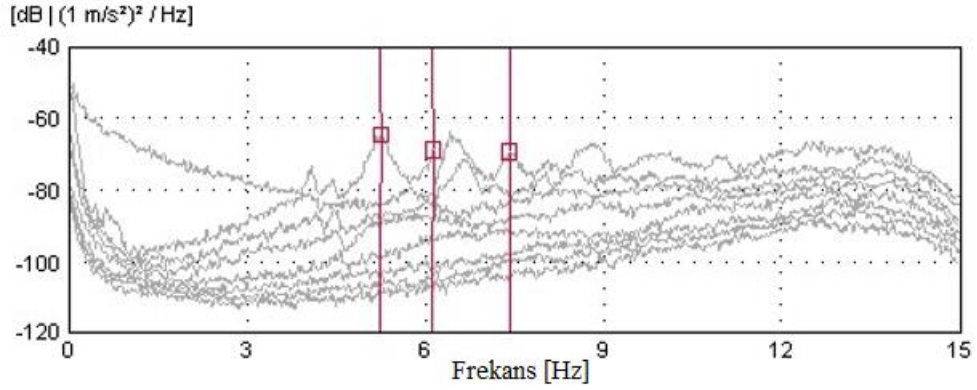
2.1.5.2.1. Çevresel Titreşim Testleri

Misafirhane binasının frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristiklerini deneysel olarak elde etmek amacıyla çevresel titreşim testleri uygulanmıştır. Deneysel ölçümler sırasında B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. 30 dakika boyunca devam eden ölçümlerdeki titreşim verileri, B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesinde toplanmış ve PULSE yazılımına aktarılarak işlenmiştir. İşlenen sinyaller OMA yazılımına aktarılarak dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Ortam titreşim testinde frekans aralığı 0-25Hz olarak seçilmiştir. İvmeölçerler binanın en üst katına yerleştirilmiştir (Şekil 2.52). Binanın dinamik karakteristikleri, sinyal işlemeden sonra hem GFTAA hem de SAB yöntemleri kullanılarak elde edilmiştir.

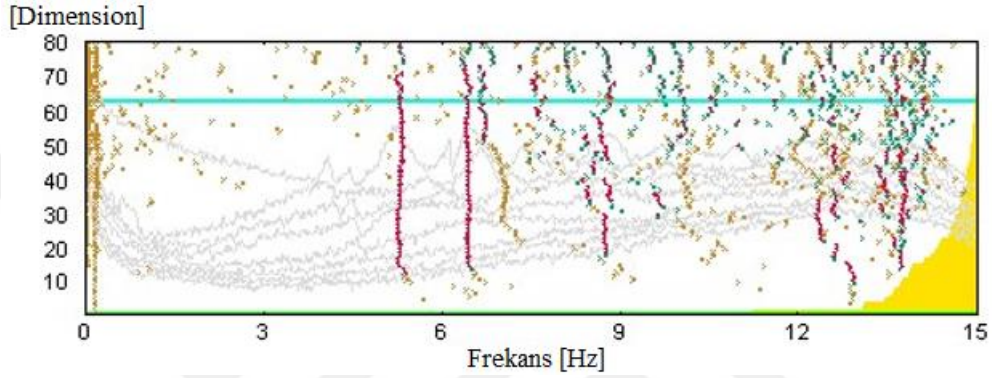
Çevresel titreşim testi sonucunda toplanan sinyallerin GFTAA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve SAB yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen kararlılık diyagramı Şekil 2.53'te sunulmaktadır. Çevresel titreşim testi sonucunda elde edilen ilk üç mod şekilleri Şekil 2.54'te verilmektedir. İlk üç mod şekli sırasıyla enine, boyuna ve burulma modları olarak GFTAA ve SAB yöntemlerinde benzer şekilde elde edilmiştir.



Şekil 2.52. Ortam titreşim testinde kullanılan ivmeölçer düzeni

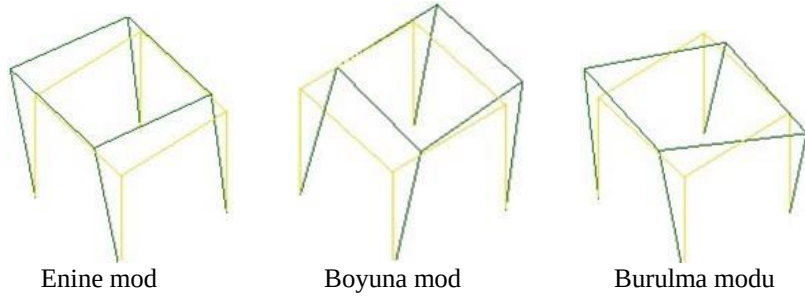


(a) Spektral yoğunluk grafiği



(b) Kararlılık diyagramı

Şekil 2.53. GFTAA ve SAB yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk grafiği ve kararlılık diyagramı



Şekil 2.54. Ölçüm sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli

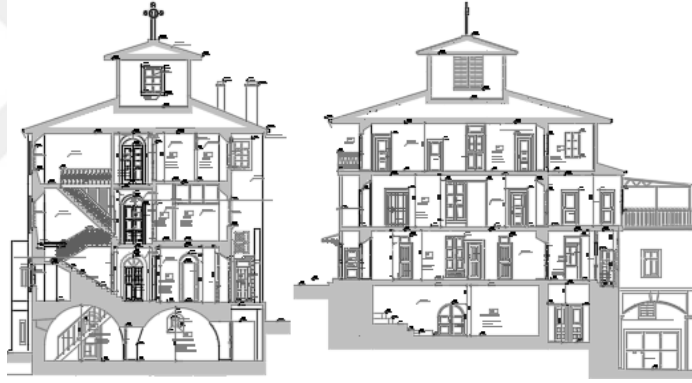
Binanın hem GFTAA hem de SAB teknikleri kullanılarak belirlenen deneysel dinamik karakteristikleri Tablo 2.38’de karşılaştırılmıştır. Doğal frekanslar, GFTAA ve SAB teknikleri için sırasıyla 5.24Hz-7.43Hz ve 5.30Hz-7.73Hz aralığında hesaplanmıştır. İkinci modda elde edilen maksimum %4.81’lik hata ile doğal frekanslar arasında yaklaşık bir uyum olduğu görülmektedir. Ancak sönüm oranları arasında anlamlı bir uyum yoktur.

Tablo 2.38. GFTAA ve SAB yöntemine göre elde edilen frekans ve sönüm oranları

Mod Numarası	Frekans (Hz)			Sönüm Oranı (%)		
	GFTAA	<i>Fark(%)</i>	SAB	GFTAA	<i>Fark(%)</i>	SAB
1	5.24	1.13	5.30	2.32	54.05	1.85
2	6.13	4.81	6.44	0.35	508.57	2.13
3	7.43	3.88	7.73	1.07	7.48	1.15

2.1.5.2.2. Sonlu Eleman Modeli

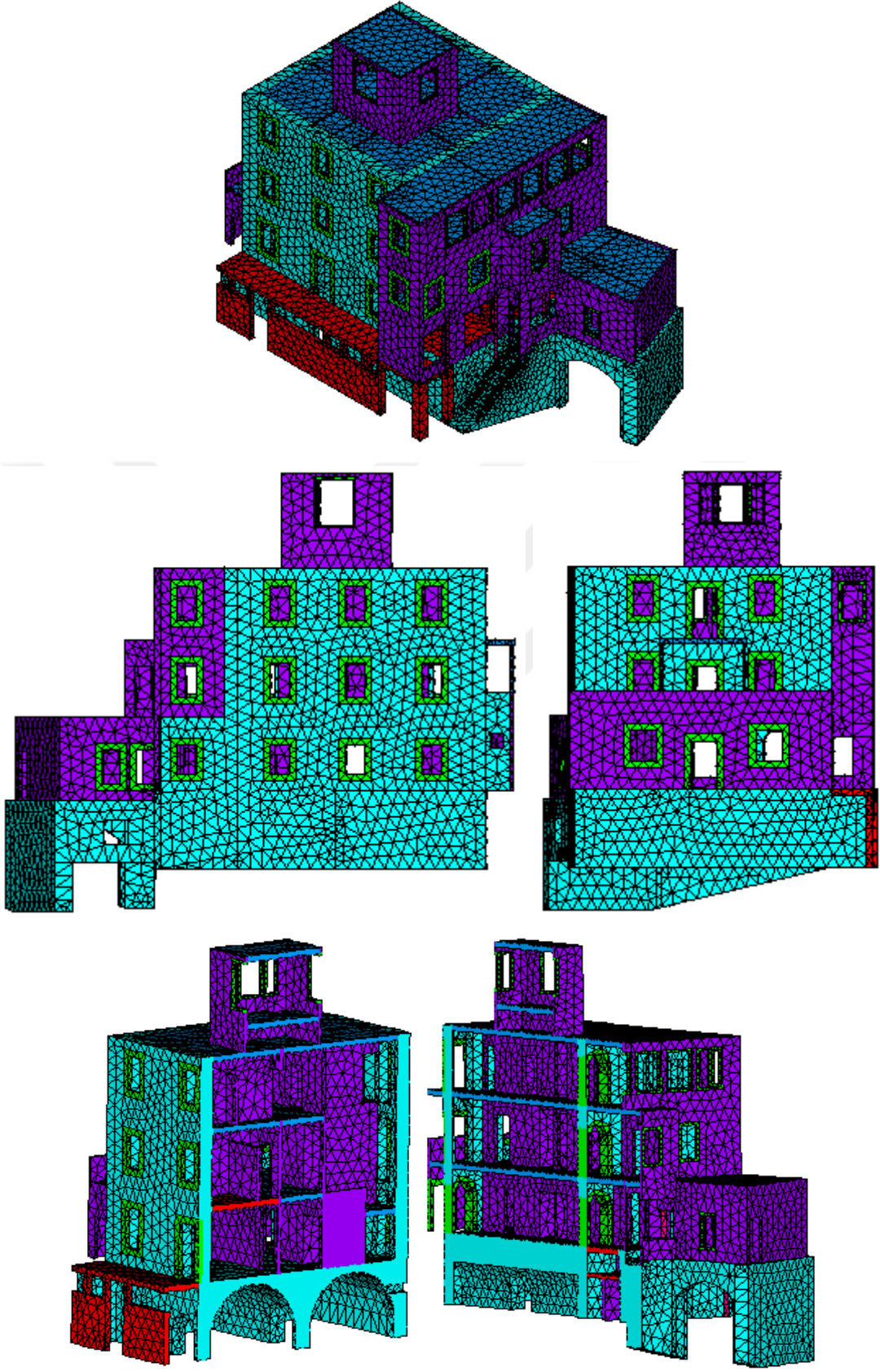
Misafirhane binasının sonlu eleman modeli ANSYS yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Binanın sonlu eleman modelinde SOLID186 katı eleman tipi kullanılmıştır. Yapının modellemesinde kullanılan kesit görüşleri Şekil 2.55'te verilmiştir. Yapı, bodrum kat, zemin kat, 1 ve 2. katlar olmak üzere 4 kattan oluşmaktadır.



Şekil 2.55. Misafirhane binasına ait kesit görüşleri

Binanın sonlu eleman modelinde yığma duvarlar makro model olarak modellenmiştir. Misafirhane binasının sonlu eleman modelinde yer alan elemanların birbirleri ile tam bağlı olduğu varsayılmıştır. Yapının zemine oturduğu kısımları ankastre mesnet olarak kabul edilmiştir. Misafirhane binasının sonlu eleman modeli Şekil 2.56'da gösterilmektedir.

Misafirhane binasının sonlu eleman modelinde, taş yığma duvar, tuğla duvar, taş sütunlar, ahşap döşeme ve betonarme döşemeler olmak üzere beş farklı yapısal eleman bileşeni bulunmaktadır. Binanın malzeme özellikleri ile ilgili herhangi bir deneysel çalışma yapılmamıştır. Malzeme özellikleri literatürde bulunan yığma yapı yayınlara benzer şekilde alınmıştır. Binanın sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.39'da verilmektedir.



Şekil 2.56. Misafirhane binasının sonlu eleman modeline ait görünüşler

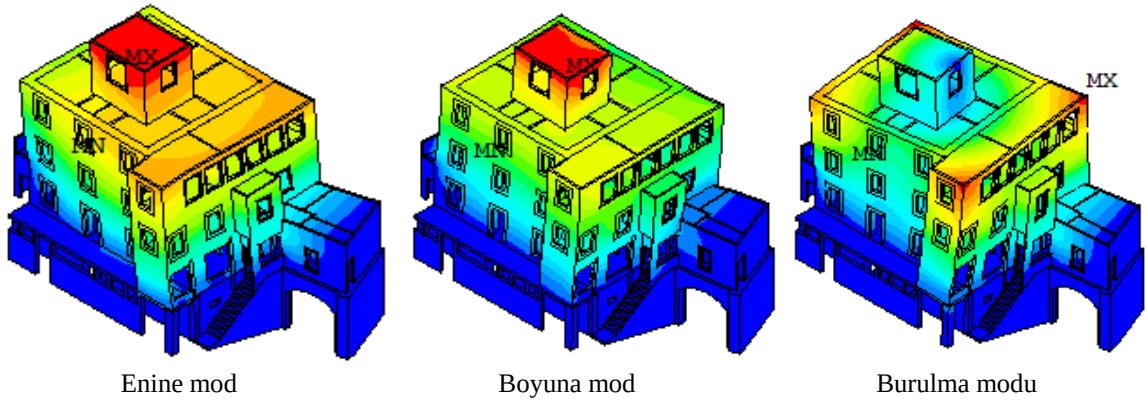
Tablo 2.39. Misafirhane binasının sonlu eleman modelinde kullanılan lineer malzeme özellikleri

Elemanlar	Malzeme Özellikleri		
	Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı (-)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)
Taş yığma duvar	2.00E9	0.2	2000
Tuğla duvar	2.00E9	0.2	1750
Sütun	2.0E10	0.2	2400
Ahşap döşeme	1.00E9	0.2	500
Betonarme döşeme	2.0E10	0.2	2400

Misafirhane binasının başlangıç sayısal dinamik karakteristikleri sonlu eleman modal analizi yardımıyla elde edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen ilk üç frekans değeri 6.95Hz ile 10.05Hz değerleri aralığında elde edilmiştir. Binanın mod şekilleri sırasıyla enine, boyuna ve burulma modları olarak elde edilmiştir. Elde edilen mod şekilleri Şekil 2.57’de sunulmaktadır. Deneysel ve sayısal doğal frekanslar Tablo 2.40’ta verilmiştir. Frekanslar arasındaki maksimum fark %35.3 olarak elde edilmiştir. Tablodaki MGK değerlerinden de görüleceği üzere deneysel ve başlangıç sayısal mod şekilleri arasında üçüncü mod hariç yüksek bir uyumluluk mevcuttur.

Tablo 2.40. Deneysel ve başlangıç model sayısal frekans değerleri

Mod Numarası	Frekans (Hz)				MGK (%)
	GFTAA	SAB	Fark (%)	Başlangıç Model	
1	5.24	5.30	32.6	6.95	97.4
2	6.13	6.44	33.4	8.18	89.9
3	7.43	7.73	35.3	10.05	56.7



Şekil 2.57. Misafirhane binasının sayısal mod şekilleri

2.1.5.2.3. Sonlu Eleman Model İyileştirmesi

Sayısal ve deneysel testlerden elde edilen sonuçlar arasında bazı farklılıkların olduğu Tablo 2.40'tan görülmektedir. Bu farklılıklar malzeme özellikleri ve sınır koşullarındaki bazı belirsizliklerden kaynaklanmaktadır. Bu farklılıkları gidermek ve daha gerçekçi bir sayısal model elde etmek amacıyla sonlu eleman model güncelleştirmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Güncelleme, manuel olarak deneme yanılma yoluyla yapılmıştır.

Manuel model güncellemede deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki hataları en aza indirmek için elemanların elastisite modülleri ve birim hacim ağırlıkları güncelleme parametreleri olarak seçilmiştir. Model güncellemesinden önce ve sonra güncelleme parametrelerindeki değişiklikler Tablo 2.41'de göstermektedir. Manuel model güncelleme için nihai sayısal frekanslar Tablo 2.42'de sunulmaktadır. Tablo 2.42'de görüldüğü gibi, deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki maksimum farklar %35.3'ten %0.81'e düşürülmüştür. Tablodan da görüleceği üzere modlar arasındaki uyum başlangıç değerlerine göre oldukça iyidir. Başlangıçta üçüncü modda elde edilen %56.7'lik MGK değeri güncellemeden sonra %91.9 seviyesine çıkmıştır. Santa Maria Kilisesi ve Misafirhanesi ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar Altunışık vd. (2022) yayınında detaylı olarak sunulmuştur.

Tablo 2.41. Manuel model güncelleme için elastisite modüllerindeki değişim

Eleman	Malzeme Özellikleri					
	Elastisite modülü(N/m^2)			Birim H. Ağırlığı(kg/m^3)		
	Başlangıç	Fark (%)	Güncellenmiş	Başlangıç	Fark (%)	Güncellenmiş
Taş yığma duvar	2.00E9	40.0	1.20E9	2000	15.0	2300
Tuğla duvar	2.00E9	37.5	1.25E9	1750	-	1750
Sütun	2.0E10	-	2.0E10	2400	4.2	2300
Ahşap döşeme	1.00E9	50.0	5.00E8	500	-	500
Betonarme döşeme	2.0E10	-	2.0E10	2400	-	2400

Tablo 2.42. Manuel güncellemenin ardından deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar

Mod Numarası	Frekans (Hz)				MGK (%)
	GFTAA	SAB	Manuel Güncelleme	Maks. fark (%)	
1	5.24	5.30	5.21	0.57	97.3
2	6.13	6.44	6.16	0.49	90.4
3	7.43	7.73	7.49	0.81	91.9

2.1.6. Yeniköy Köprüsü

Yeniköy Köprüsü Trabzon ili, Arsin ilçesinde, Yanbolu deresi üzerinde yer almaktadır. Tek kemer gözlü olarak inşa edilen Yeniköy Köprüsü'nün yapım tarihi 19. yüzyıldır. Köprü planda kuzeybatı-güneydoğu doğrultusunda inşa edilmiştir. Köprü'nün kemeri sivri kemer formunda inşa edilmiş olup malzeme olarak kesme taş kullanılmıştır. Köprü'nün geri kalan kısımlarında moloz taş malzeme kullanılmıştır. Köprü genişliği 4.24m, uzunluğu ise 27.14m'dir. Köprü kemeri 16.38m genişliğinde 6.98m yüksekliğindedir. Köprü 2011 yılında restore edilerek kullanıma açılmıştır. Şekil 2.58'de köprüye ait görüşler sunulmaktadır.

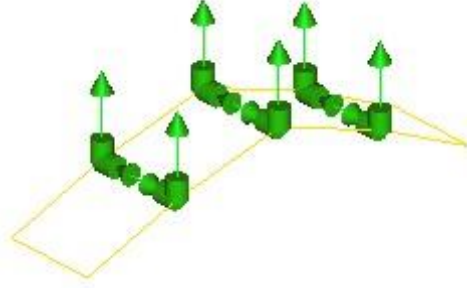


Şekil 2.58. Yeniköy köprüsüne ait görüşler

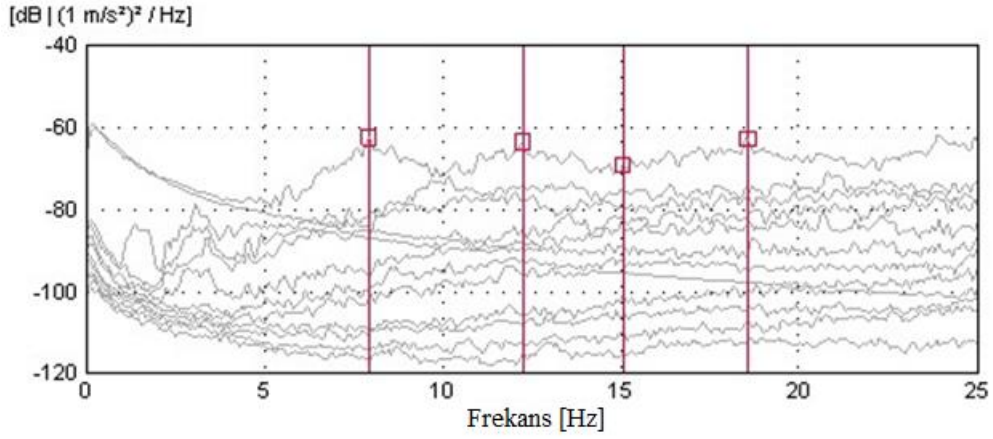
2.1.6.1. Çevresel Titreşim Testleri

Köprü yapısının frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristiklerini deneysel olarak elde etmek amacıyla çevresel titreşim testleri uygulanmıştır. Deneysel ölçümler sırasında B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. 30 dakika boyunca devam eden ölçümlerdeki titreşim verileri, B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesinde toplanmış ve PULSE yazılımına aktarılarak işlenmiştir. İşlenen sinyaller OMA yazılımına aktarılarak dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Ortam titreşim testinde frekans aralığı 0-25Hz olarak seçilmiştir. Toplam 12 adet ivmeölçer köprünün 6 noktasında yatayda ve düşeyde yerleştirilmiştir (Şekil 2.59). Köprünün dinamik özellikleri, sinyal işlemeden sonra GFTAA yöntemi kullanılarak elde edilmiştir.

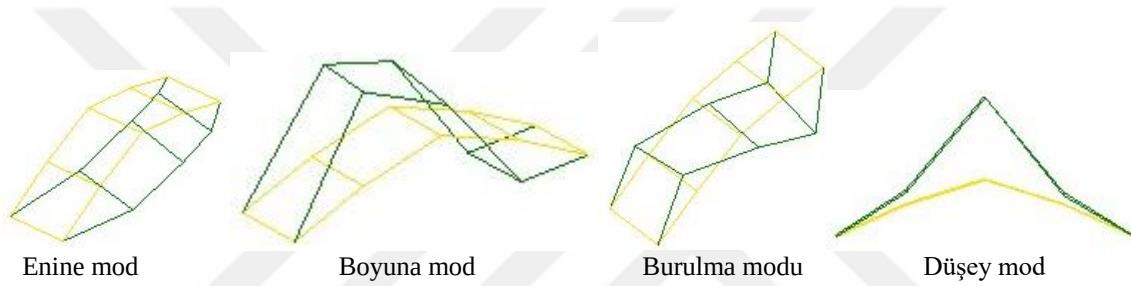
Çevresel titreşim testi sonucunda toplanan sinyallerin, GFTAA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrisleri Şekil 2.60'ta sunulmaktadır. Çevresel titreşim testi sonucunda elde edilen ilk dört mod şekilleri Şekil 2.61'de verilmektedir. İlk dört mod şekli sırasıyla enine, boyuna, burulma ve düşey modları olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.59. Ortam titreşim testinde kullanılan ivmeölçer düzeni ve bağlantı görünüşü



Şekil 2.60. GFTAA yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk grafiği



Şekil 2.61. Ölçüm sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli

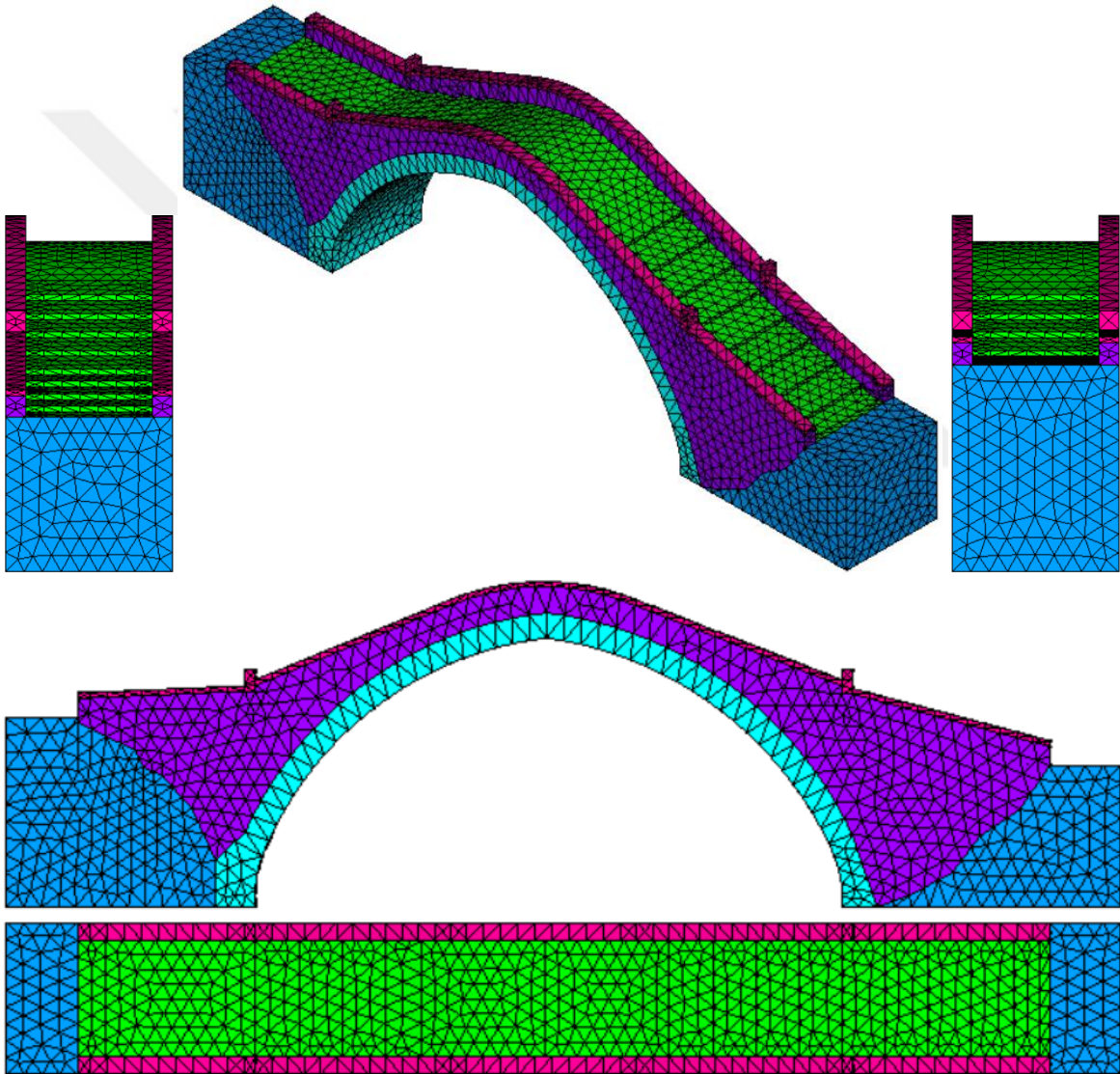
Köprünün GFTAA yöntemi kullanılarak elde edilen deneysel dinamik karakteristikleri Tablo 2.43'te sunulmaktadır. Doğal frekanslar 8.21Hz-18.38Hz aralığında hesaplanmıştır. Sönüm oranları ise % 0.85-12.16 değerleri arasında elde edilmiştir.

Tablo 2.43. GFTAA yöntemine göre elde edilen frekans ve sönüm oranları

Mod Numarası	GFTAA	
	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	8.21	12.16
2	12.35	10.09
3	15.08	0.85
4	18.38	7.56

2.1.6.2. Sonlu Eleman Modeli

Köprü yapısının sonlu eleman modeli ANSYS yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Köprünün sonlu eleman modelinde SOLID186 katı eleman tipi kullanılmıştır. Sayısal modelde yığma duvarlar makro model tekniği ile modellenmiştir. Yapının sonlu eleman modelinde yer alan elemanların birbirleri ile tam bağlı olduğu varsayılmıştır. Köprünün sonlu eleman modeli Şekil 2.62’de gösterilmektedir.



Şekil 2.62. Köprünün sonlu eleman modeline ait görünüşler

Köprünün sonlu eleman modelinde kemer, süs kemeri, tempan duvar, dolgu, yol döşemesi, korkuluk ve zemin elemanlar yer almaktadır. Köprünün malzeme özellikleri ile ilgili herhangi bir deneysel çalışma yapılmamıştır. Malzeme özellikleri TYDRYK, (2017) kılavuzunda örnek olarak sunulan malzeme özellikleri kullanılmıştır (Tablo 1.6). Köprünün sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.44’te verilmektedir.

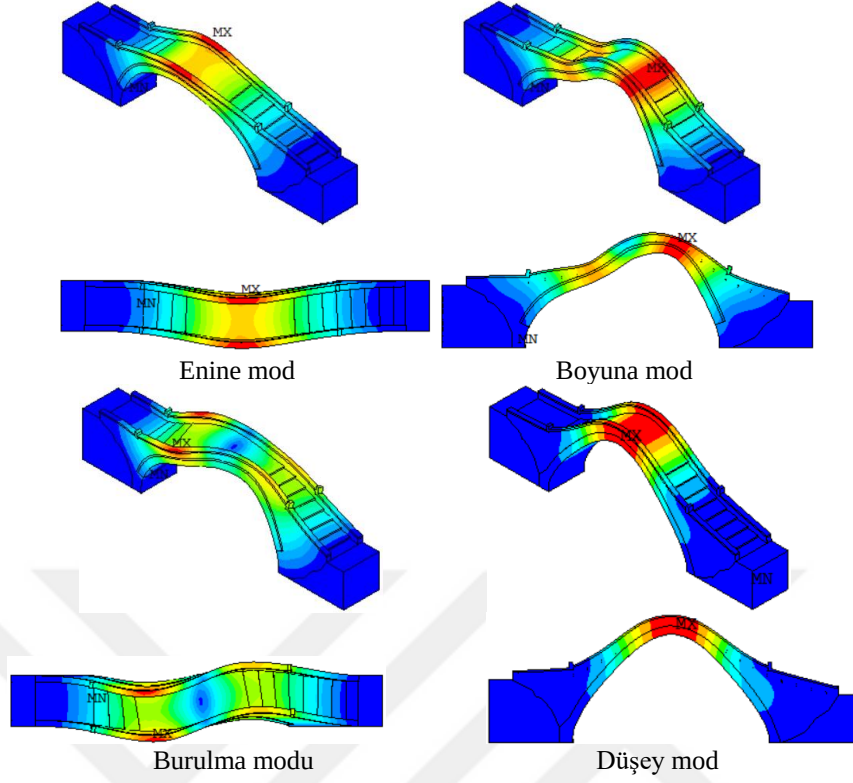
Tablo 2.44. Köprünün sonlu eleman modelinde kullanılan lineer malzeme özellikleri

Elemanlar	Malzeme Özellikleri		
	Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı (-)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)
Kemer	2.00E9	0.20	2100
Tempan duvar	1.50E9	0.20	1900
Dolgu	1.00E9	0.20	1900
Yol döşemesi	1.50E9	0.20	2000
Korkuluk	2.00E9	0.20	2100
Zemin	5.00E9	0.25	2200

Köprünün başlangıç sayısal dinamik karakteristikleri sonlu eleman modal analizi yardımıyla elde edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen ilk üç frekans değeri 5.07Hz ile 10.05Hz değerleri aralığında elde edilmiştir. Köprünün mod şekilleri sırasıyla enine, boyuna, burulma ve düşey modları olarak elde edilmiştir. Elde edilen mod şekilleri, Şekil 2.63’te sunulmaktadır. Deneysel ve sayısal doğal frekanslar Tablo 2.45’te verilmiştir. Frekanslar arasındaki maksimum fark %28.7 olarak elde edilmiştir.

Tablo 2.45. Deneysel ve başlangıç model sayısal frekans değerleri

Mod Numarası	Frekans (Hz)		
	GFTAA	Fark (%)	Başlangıç Model
1	8.21	25.1	6.15
2	12.35	15.5	10.44
3	15.08	16.4	12.61
4	18.38	28.7	13.11



Şekil 2.63. Köprünün sayısal mod şekilleri

2.1.6.3. Sonlu Eleman Model İyileştirmesi

Sayısal ve deneysel testlerden elde edilen sonuçlar arasında bazı farklılıkların olduğu Tablo 2.45'ten görülmektedir. Bu farklılıklar malzeme özellikleri ve sınır koşullarındaki bazı belirsizliklerden kaynaklanmaktadır. Bu farklılıkları gidermek ve daha gerçekçi bir sayısal model elde etmek amacıyla sonlu eleman model güncelleştirmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Köprü için güncelleme manuel olarak deneme yanılma yoluyla yapılmıştır.

Manuel model güncellemede, deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki hataları en aza indirmek için elemanların elastisite modülleri ve birim hacim ağırlıkları güncelleme parametreleri olarak seçilmiştir. Model güncellemesinden önce ve sonra güncelleme parametrelerindeki değişiklikler Tablo 2.46'da gösterilmektedir. Manuel model güncelleme için nihai sayısal frekanslar Tablo 2.47'de sunulmaktadır. Tablo 2.47'den de görüldüğü gibi, deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki maksimum farklar %28.7'den %4.4'e düşürülmüştür.

Tablo 2.46. Manuel model güncelleme için malzeme özelliklerindeki değişim

Eleman	Malzeme Özellikleri					
	Elastisite modülü(N/m^2)			Birim H. Ağırlığı(kg/m^3)		
	Başlangıç	Fark. (%)	Güncellenmiş	Başlangıç	Fark. (%)	Güncellenmiş
Kemer	2.00E9	150.0	5.00E9	2100	-	2100
Tempan duvar	1.50E9	66.7	2.50E9	1900	15.8	2200
Dolgu	1.00E9	-	1.00E9	1900	10.5	2100
Yol döşemesi	1.50E9	-	1.50E9	2000	20.0	2400
Korkuluk	2.00E9	50.0	1.00E9	2100	14.3	2400
Zemin	5.00E9	-	5.00E9	2200	-	2200

Tablo 2.47. Manuel güncellemenin ardından deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar

Mod Numarası	Frekans (Hz)		
	GFTAA	Manuel Güncelleme	Maks. fark (%)
1	8.21	7.85	4.4
2	12.35	12.88	4.3
3	15.08	15.24	1.1
4	18.38	18.00	2.1

2.2. Ölçekli Kemer Köprü Modeli Üzerinde Gerçekleştirilen Çalışmalar

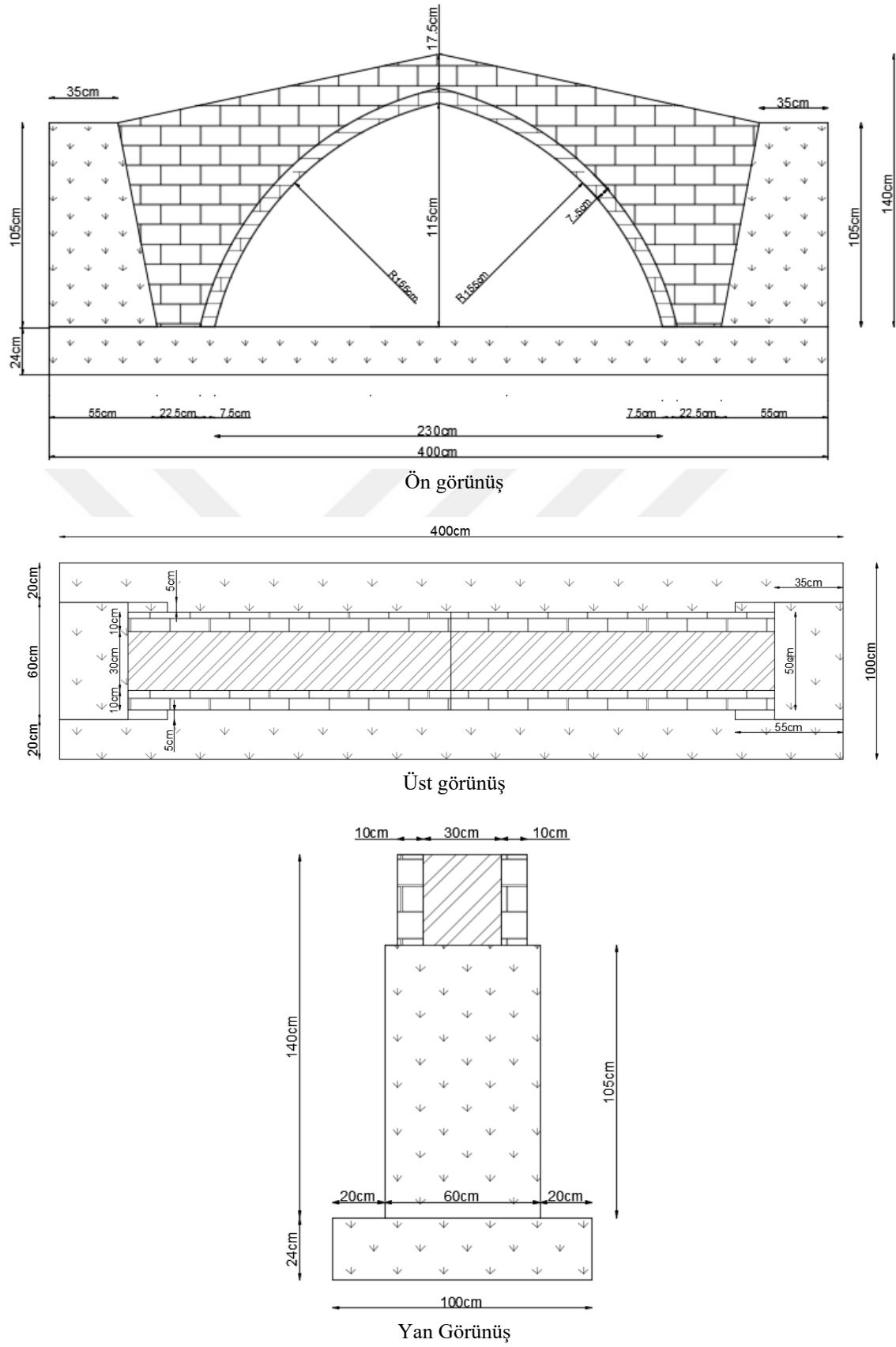
2.2.1. Kemer Köprü Modeli

2.2.1.1. Köprü Geometrik Özellikleri

Tez kapsamında incelenen tek açıklıklı kemer köprü modeli Doğu Karadeniz bölgesindeki köprülerin geometrik özelliklerini (Tablo 2.48) yansıtabilecek şekilde inşa edilmiştir. Köprülerin kemer açıklığının yüksekliğe oranı genellikle 2 kat olması nedeniyle, laboratuvar koşulları göz önüne alınarak 2.3m kemer açıklığı ve 1.15m kemer yüksekliğine sahip sivri kemerli köprü modeli seçilmiş ve laboratuvarda inşa edilmiştir. Tez kapsamında inşa edilen köprüye ait geometrik özellikler Şekil 2.64’te sunulmaktadır.

Tablo 2.48. Doğu Karadeniz Bölgesi’nde yer alan kemer köprülere ait geometrik özellikler (KGM, 2009; Birinci, 2010).

İl	İlçe	Köprü Adı	Döşeme Uzunluğu (m)	Döşeme Genişliği (m)	Kemer Tipi	Kemer Yüksekliği (m) ve Adeti	Kemer Açıklıkları (m)
Trabzon	Maçka	Bağışlı	18.20	3.60	Çift Merkezli, Basık Sivri	5.00/1	10.00
		Coşandere	22.50	4.00		7.00/1	13.60
	Akçaabat	Söğütlü	39.40	4.50		4.60/2	8.0-7.90
	Arsin	Yeniköy	27.75	4.20-6.20		6.65/1	15.60
		Kaşıkcı	20.20	3.40-4.60		5.40/1	12.00
	Vakfikebir	Folderesi	29.50	5.00		8.50/1	15.00
	Şalpazarı	Güdün	30.00	3.70		8.00/1	11.20
	Yomra	Gürpınar	19.50	3.40		6.20/1	12.40
Rize	Çamlıhemşin	Mikron	33.80	3.00	Tek Merkezli, Dairesel	10.60/1	19.50
		Şenyuva	52.40	2.50		12.40/1	24.80
		Osmanlı	51.70	3.50		13.00-3.00/2	25.20-6.00
		Ham	31.00	2.90		8.20/1	16.40
		Kale	32.70	2.70		7.40/1	14.80
	İkizdere	Güneyce	46.50	2.80		6.25/1	12.50
		Dereköy	30.00	3.10		7.25/1	16.00
	Pazar	Suçatı	49.91	2.40		10.70/1	21.27
	Ardeşen	Yukarıdurak	42.00	3.20		8.60-7.60/2	17.20-15.20
	Merkez	Ambarlık	36.00	3.20		6.00/1	20.00
Gümüşhane	Torul	İlecik	22.70	3.60	Çift Merkezli, Sivri	6.70/1	11.70
		Köprübaşı	71.50	6.20		6.20/1	24.00
		Harşit Köprüü	68.25	6.00	Tek Merkezli, Dairesel	9.30/3	18.60
	Şiran	Dibekli	39.00	4.20		6.10/1	13.50
	Merkez	Tohumoğlu	64.80	5.30		8.00-7.00/2	16.00-14.00



Şekil 2.64. Köprü modeline ait geometrik ölçüler

2.2.1.2. Köprü İnşasında Kullanılan Malzemeler ve Malzeme Özellikleri

Tarihi taş yığma kemer köprüler genel olarak taş, harç ve dolgudan oluşmaktadır. Doğu Karadeniz Bölgesi'nde yer alan kemer köprüler incelendiğinde, taş malzeme olarak kemerlerde andezit taşı, tempan duvarlarda ise bazalt taşı, harç malzeme olarak da kireç esaslı bağlayıcıların kullanıldığı görülmüştür. Bu nedenle proje kapsamında ölçekli köprü modeline uygun olarak andezit taşı ve bazalt taşları tedarik edilmiş ve boyutları küçültülmüştür. Köprünün oturacağı mesnet kısımları ise betonarme olarak inşa edilmiştir.

2.2.1.2.1. Harç Karışımları ve Malzeme Özellikleri

Köprü inşasında kullanılacak harç karışımları için 8 farklı karışım hazırlanmıştır. Karışımlara ait oranlar Tablo 2.49'da verilmektedir. Karışımlarda sönmüş kireç, hidrolik kireç, taş tozu, taş kırığı, kum ve su farklı oranlarda kullanılmıştır. Dökümlere ait fotoğraflar Şekil 2.65'te sunulmaktadır.

Tablo 2.49. Harç karışım oranları

	Karışımlar							
	Sönmüş Kireç Katkılı			Hidrolik Kireç Katkılı				
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Sönmüş K.	560 gr	560 gr	550 gr	-	-	-	-	-
Hidrolik K.	-	-	-	450 gr	500 gr	250 gr	500	350
Taş Kırığı (0.3-1.2mm)	320 gr	320 gr	900 gr	600 gr	875 gr	350 gr		350
Taş Tozu (0-0.3mm)	320 gr	320 gr	200 gr	620 gr	190 gr	350 gr		
Kum	230 gr	230 gr	100 gr	-	190 gr	455 gr	1000	700
Su	270 gr	170 gr	130 gr	320 gr	335 gr	300 gr	300	300
Numune Sayısı	6	3	3	6	3	3	6	6



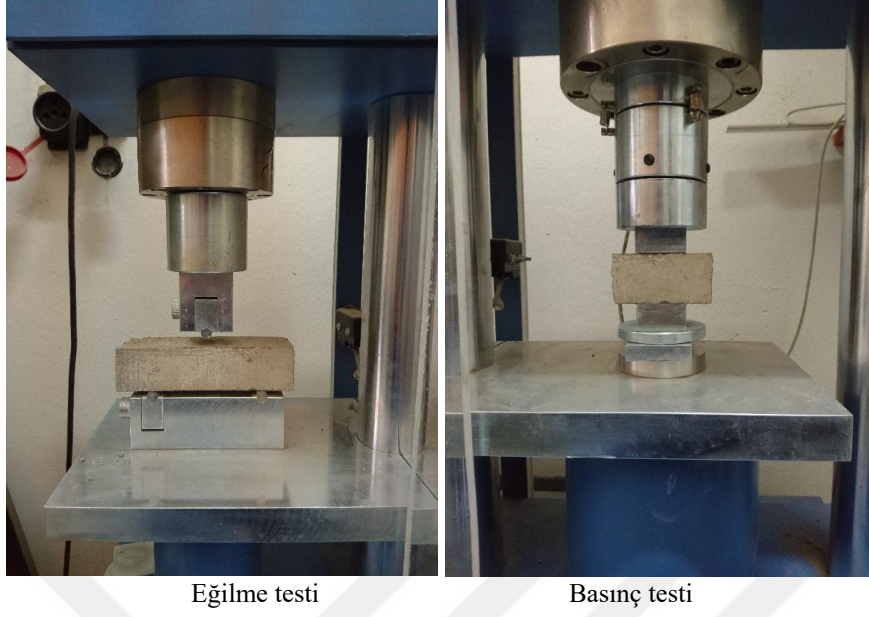
Şekil 2.65. Harç karışımlarının hazırlanmasına ait fotoğraflar

Harç karışımlarına ait basınç ve eğilme değerlerini elde edebilmek amacıyla TS EN 1015-11 (2020) standardına göre 4x4x16 cm boyutlarında numuneler dökülmüştür. Dökümler yapıldıktan sonra TS EN 1015-11 standardına göre numuneler 28 gün küre tabi tutulmuştur. TS EN 1015-11 standardında hava kireci (Sönmüş kireç) ve hidrolik kireç katkılı harçların kür koşulları ile ilgili belirtilen uygulama esasları Tablo 2.50’de verilmektedir.

Tablo 2.50. Kireç katkılı harç numuneleri için standart kür koşulları (TS EN 1015-11, 2000).

	% 95± 5 bağıl nemde veya polietilen torbada		% 65± 5 bağıl nemde	Toplam
	Kalıp içerisinde	Kalıpsız	Kalıpsız	
Hava kireci katkılı harçlar	5	2	21	28
Hidrolik kireç katkılı harçlar	2	5	21	28
*Ortam koşulu 20 ± 2°C				

28 günlük kür işlemi tamamlandıktan sonra numuneler TS EN 1015-11’e göre eğilme ve basınç deneylerine tabi tutulmuşlardır. Şekil 2.66’da deneylere ait fotoğraflar sunulmaktadır. Deneyler sonucunda elde edilen ortalama eğilme ve basınç dayanımı değerleri Tablo 2.51’de sunulmaktadır.



Şekil 2.66. Harç numunelerinin eğilme ve basınç testlerine ait deney resimleri

Harç karışımlarına ait sonuçlar incelendiğinde tarihi yapılarda kullanılan harç dayanımlarına benzer olması için VII ve VIII numaralı karışımlar köprü inşaatında kullanılmıştır. VII numaralı karışım kemer inşasında, VIII numaralı karışım ise köprünün geri kalan duvarlarında kullanılmıştır. Tarihi yapılarda kullanılan harçlar genel olarak sönmüş kireç (hava kireci) ihtiva etmektedir. Ancak sönmüş kirecin 6 ay gibi uzun sürelerde dayanım kazanması nedeniyle standart hidrolik kireçli karışımlar köprü inşası için seçilmiştir.

Tablo 2.51. Harç karışımlarına ait deney sonuçları

Karışımlar	Birim Hacim Ağırlık (Kg/m ³)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)
I	1312	0.0	0.37
II	1388	0.0	0.56
III	1590	0.0	0.56
IV	1986	1.25	3.49
V	1998	1.50	3.77
VI	1865	0.50	1.42
VII	1748	0.25	2.25
VIII	1850	0.40	3.10

2.2.1.2.2. Taş Malzeme Özellikleri

Köprünün kemer ve tempan duvarlarında kullanılacak taş malzemeler için taş ocaklarından andezit ve bazalt taşı tedarik edilmiştir. Andezit taşı düzgün kesim olarak kemerlerde, korkuluklarda ve yol zemininde, bazalt taşı ise moloz taş olarak tempan duvarlarda kullanılmıştır. Kesme andezit taşı için hazırlanan 7x7x7 cm boyutlarındaki taş numuneler üzerinde TS EN 1926 (2007) standardına göre yapılan basınç deneyi sonucunda basınç dayanımı ortalama 51 MPa olarak elde edilmiştir. Andezit taşına ait birim hacim ağırlığı ise 2303kg/m³ olarak elde edilmiştir. Bazalt taşı için karot numuneler üzerinde gerçekleştirilen tek eksenli basınç dayanımı sonucunda basınç dayanımı 158 MPa olarak elde edilirken, birim hacim ağırlığı 2500kg/m³ olarak elde edilmiştir. Deneylere ait görünüşler Şekil 2.67’de sunulmaktadır.



Şekil 2.67. Andezit ve bazalt taşların basınç deneylerine ait görünüşler

2.2.1.2.3. Betonarme Malzeme Özellikleri

Köprünün mesnetleneceği kenar kısımlar ve oturacağı temel betonarme olarak inşa edilmiştir. Beton malzemeye ait malzeme özelliklerini belirlemek amacıyla dökümler esnasında 150x150x150mm’lik küp numuneler alınmıştır. Köprünün temelinde ve daha sonra dökülen kenar kısımlarında kullanılan betonun birim hacim ağırlıkları ve basınç dayanım değerleri Tablo 2.52’de verilmektedir. Beton numunelerine ve basınç deneylerine ait fotoğraflar Şekil 2.68’de sunulmaktadır. Modelin betonarme kısımlarında donatı olarak standart S420 donatı çeliği kullanılmıştır. Donatılar için çekme deneyi yapılmamıştır.

Tablo 2.52. Beton numunelere ait malzeme özellikleri

	Birim Hacim Ağırlık (Kg/m ³)	Basınç Dayanımı (MPa)
Temel betonu	2370	41.9
Kenar mesnet betonları	2355	31.0



Şekil 2.68. Beton numunelerinin alınması ve basınç deneyine ait fotoğraflar

2.2.1.3. Kemer Köprü'nün İnşa Aşamaları

Kemer köprü modelinin laboratuvarda inşa edilmesi amacıyla öncelikle temel kalıbı sarsma masası tij düzenine ve aralıklarına göre hazırlanmıştır. Sarsma masasına bağlantıyı sağlayacak bu tijler için kalıpta plastik borular yardımıyla boşluklar bırakılmıştır. Temel kalıbı hazırlandıktan sonra donatı demirleri yerleştirilmiş ve beton döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Köprü temelinin inşa edilmesi ile ilgili fotoğraflar Şekil 2.69'da verilmektedir.



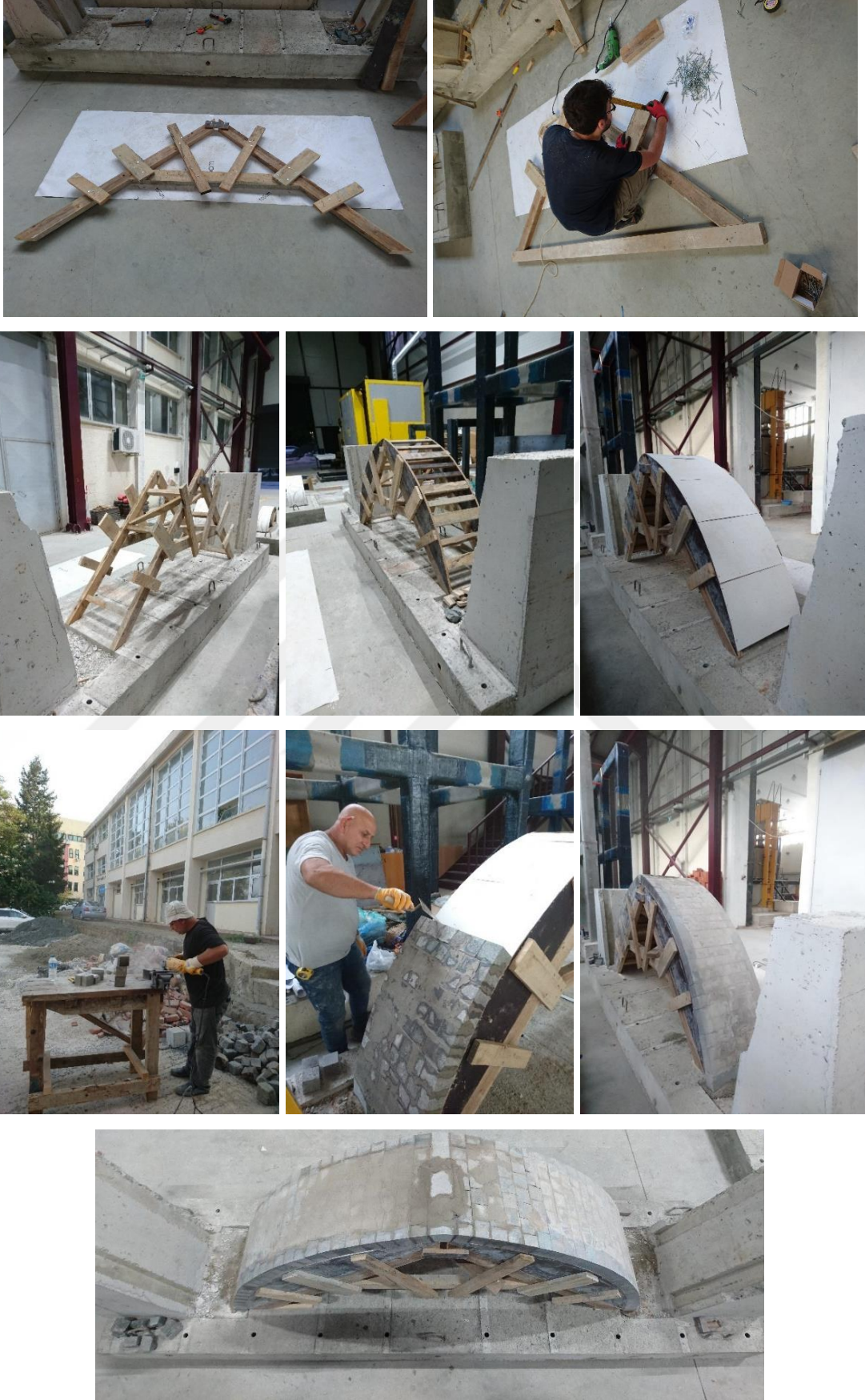
Şekil 2.69. Temel kalıbının hazırlanması ve beton dökümüne ait fotoğraflar

Temel dökümü gerçekleştirildikten sonra köprünün yaslanacağı kenar dayanak betonlarının kalıpları oluşturulmuş, donatıları örülmüş ve betonları dökülmüştür. Kenar betonların kalıp işlemleri ve beton döküm işlemlerine ait fotoğraflar Şekil 2.70’te sunulmaktadır.



Şekil 2.70. Kenar beton bloklar için kalıp ve beton dökümlerine ait fotoğraflar

Kenar beton blokların dökülmesinin ardından kemer köprü inşasına başlanmıştır. Öncelikle kemer köprü için ahşap kalıp hazırlanmış, ardından sırasıyla köprüye ait kemer, süs kemeri tempan duvarlar, yol zemini ve korkuluklar inşa edilmiştir. Kemer köprü inşaat aşamalarına ait fotoğraflar Şekil 2.71’de verilmektedir. Köprü kalıbı için proje çıktısı alınarak üzerinde ahşap kalıp oluşturulmuştur. Kemer inşasında kullanılan andezit taşlar kemer formuna göre traşlanarak kullanılmıştır. Bazalt taşları ise kırılarak tempan duvarlarda kullanılmıştır. Dolgu için ise moloz taşlar kullanılmış, ara ara harç tesfiyesi yapılmıştır.



Şekil 2.71. Kemer köprü'nün inşa aşamalarına ait fotoğraflar

Şekil 2.71'in devamı,



Şekil 2.71'in devamı,



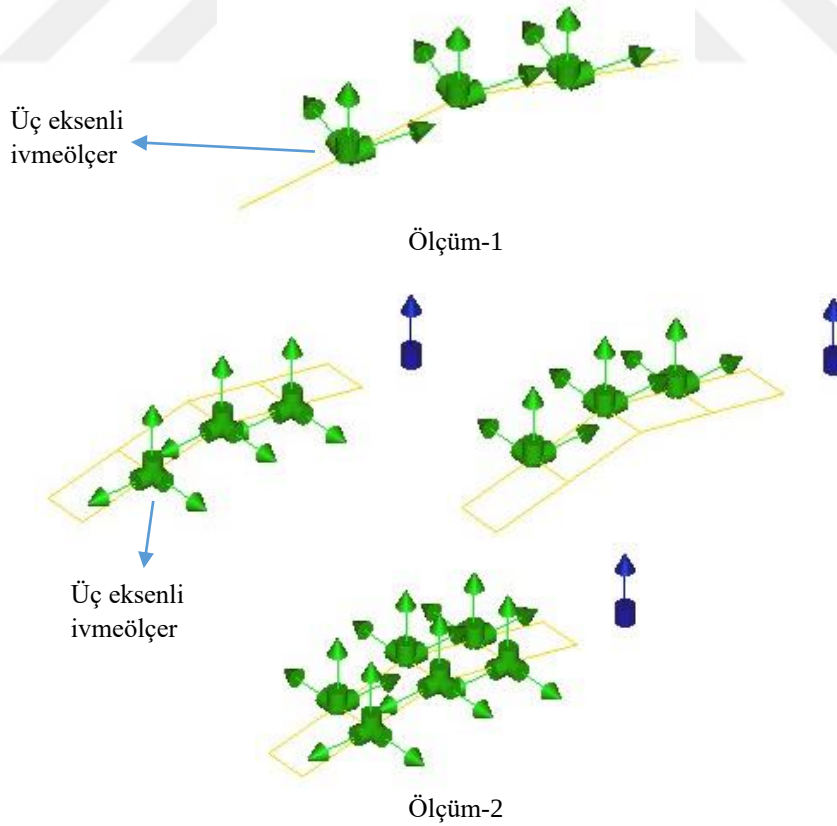
Şekil 2.71'in devamı,



2.2.2. Köprünün Hasarsız Dinamik Karakteristiklerinin Elde Edilmesi

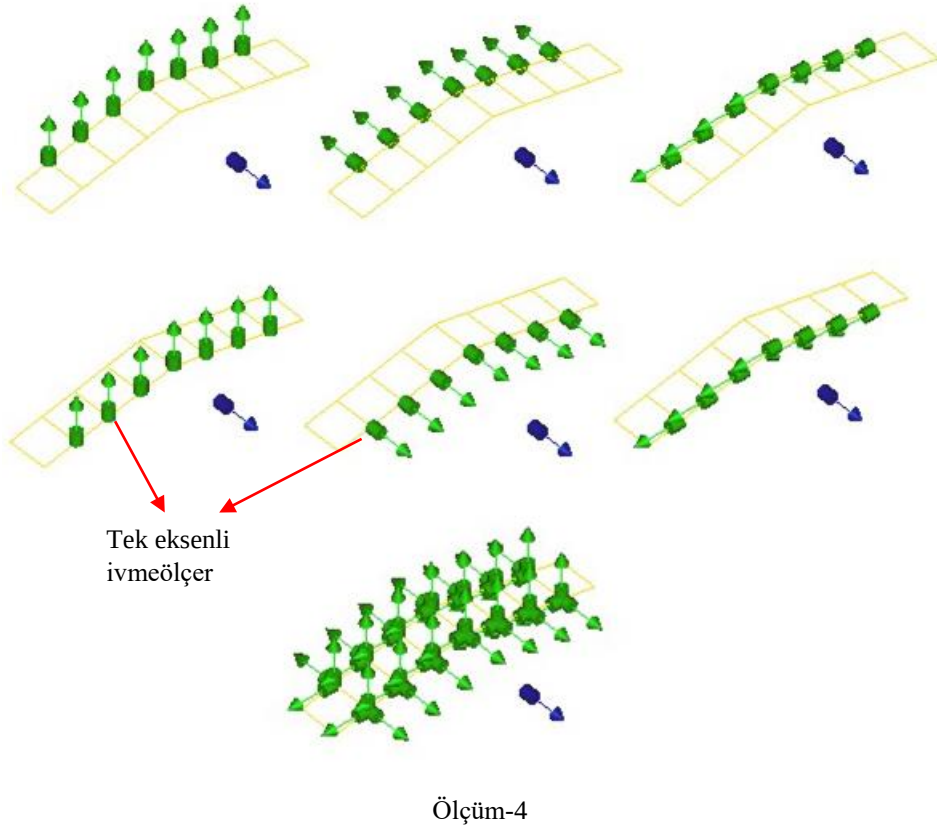
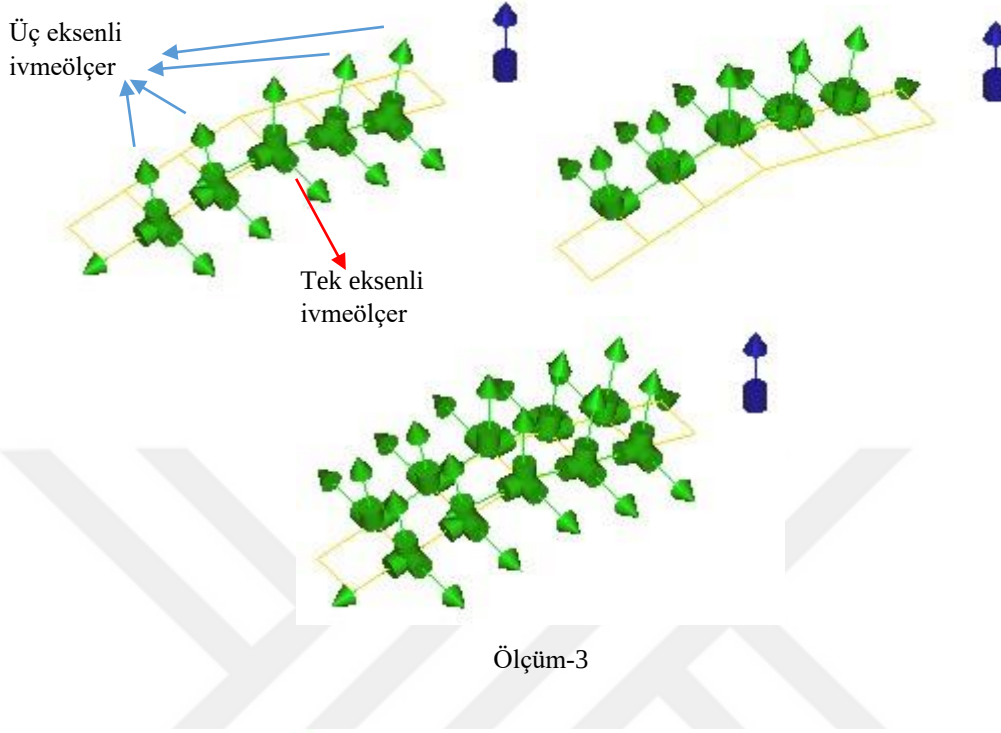
Köprü inşa edildikten ve dayanımını kazandıktan sonra hasarsız durum için Deneysel Modal Analiz (DMA) testleri uygulanmış ve doğal frekans, mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilmiştir. Ölçümler esnasında B&K 4507 B 005 tipi tek eksenli ve B&K 4506 B 003 tipi üç eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. İvmeölçerlerden alınan veriler B&K 3560 C tipi 17 kanallı veri toplama sisteminde toplanmıştır. İvmeölçerlerin veri toplama ünitesine tanıtılması, sinyallerin veri toplama ünitesinde depolanması, sinyal koşullandırma işlemlerinin tamamlanması ve bilgisayara aktarılmasında Brüel&Kjaer firması tarafından geliştirilen PULSE (2006) yazılımı kullanılmıştır. Alınan sinyallerin işlenmesi ve dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde OMA (2006) yazılımı kullanılmıştır.

Kemer köprü üzerinden, dinamik karakteristiklerin daha net bir şekilde elde edilebilmesi amacıyla 4 farklı ölçüm alınmıştır. Bu ölçümlerin ivmeölçer dizilimine ait şematik gösterimler Şekil 2.72’de verilmektedir. Ölçümlere ait görünüşler ise Şekil 2.73’te sunulmaktadır.



Şekil 2.72. Ölçümlere ait ivmeölçer dizilimleri

Şekil 2.72'nin devamı,



Ölçüm-1’de köprünün yol eksenine 3 adet üç eksenli ivmeölçer yerleştirilerek referanssız olarak ölçüm alınmıştır. Ölçüm-2’de köprünün tabliye kenarlarına 3’er adet üç eksenli ivmeölçerler yerleştirilerek referanslı olarak ölçüm alınmıştır. Ölçüm-3’te köprünün tabliye kenarlarına 4’er adet üç eksenli ve köprü ortasına denk gelecek şekilde 3’er adet tek eksenli ivmeölçerler yerleştirilerek referanslı olarak ölçüm alınmıştır. Ölçüm-4’te ise köprünün tabliye kenarlarına 7’şer adet tek eksenli ivmeölçerler yerleştirilerek referanslı olarak ölçüm alınmıştır.

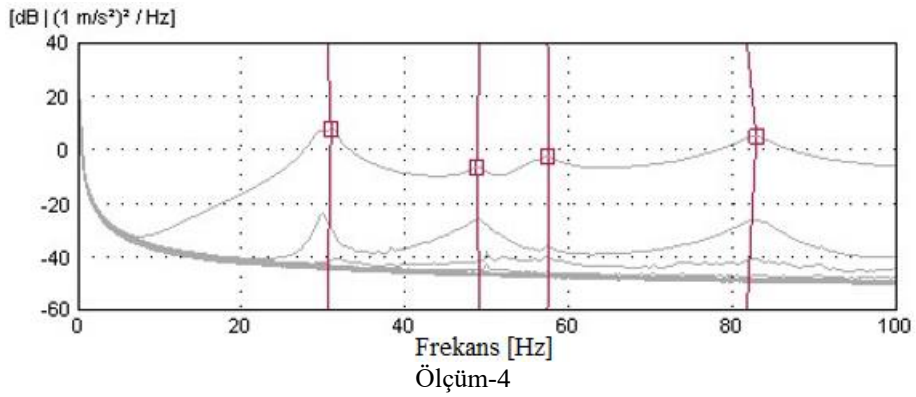
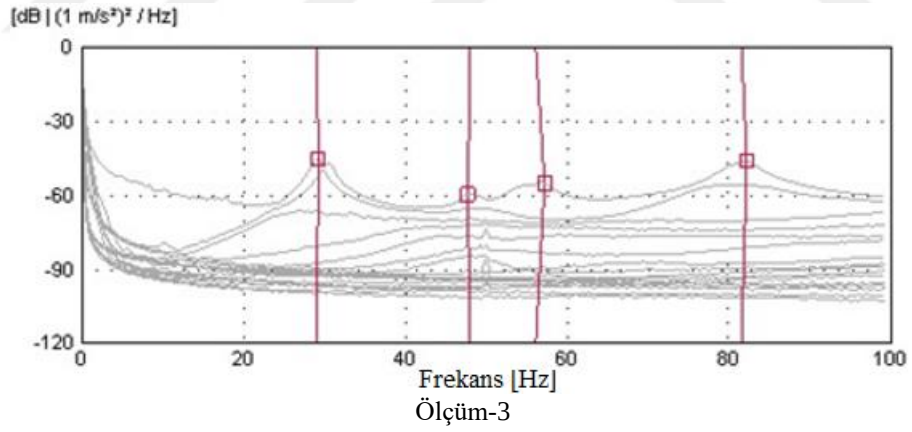
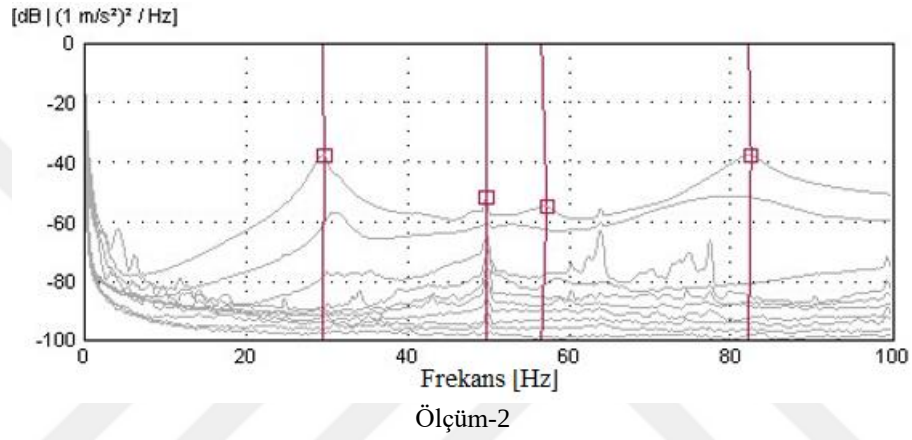
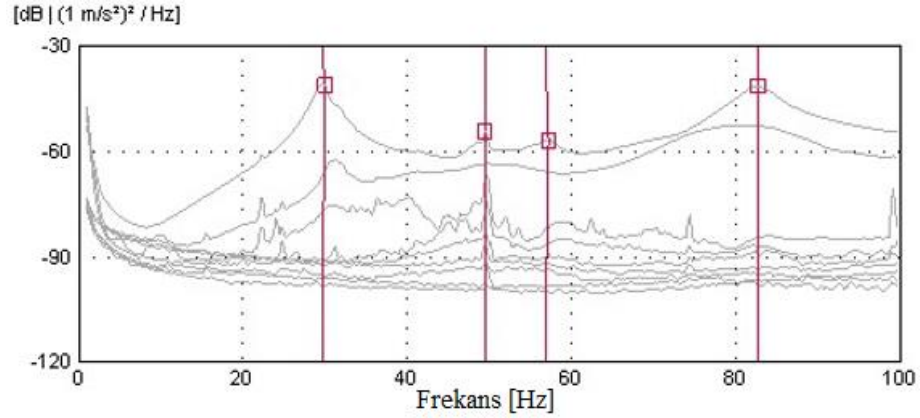


Şekil 2.73. Deneysel Modal Analiz testlerine ait görünüşler

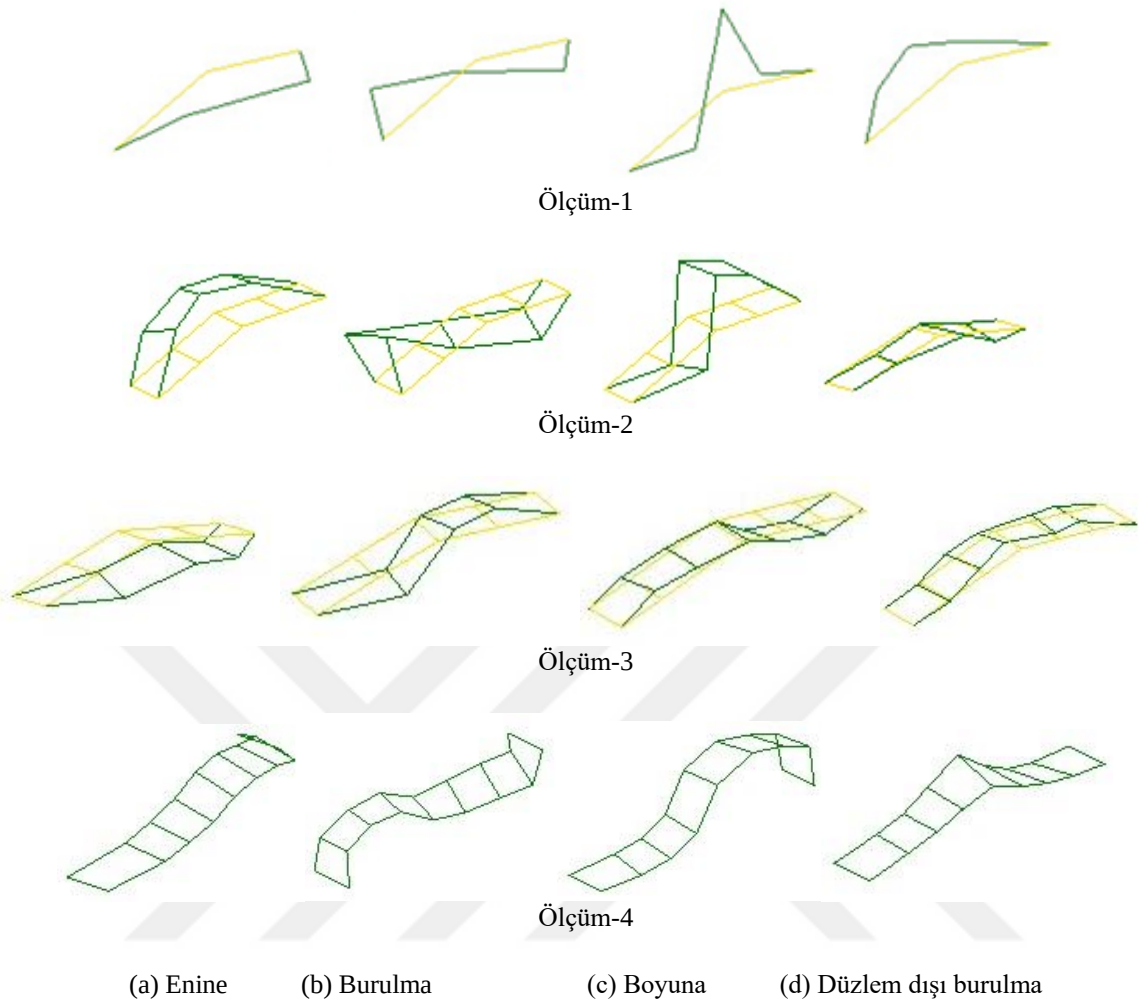
Kemer köprünün hasarsız durumu için gerçekleştirilen analizler sonucunda GFTAA yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk grafikleri Şekil 2.74’te sunulmaktadır. Testler sonucunda elde edilen frekans değerleri Tablo 2.53’te verilmektedir. Ölçümler sonucunda elde edilen mod şekilleri Şekil 2.75’te sunulmaktadır.

Tablo 2.53. Hasarsız durum için yapılan ölçümler sonucunda elde edilen doğal frekans değerleri

Mod	Ölçüm-1		Ölçüm-2		Ölçüm-3		Ölçüm-4	
	GFTAA (Hz)	Sönüm O. (%)	GFTAA (Hz)	Sönüm O. (%)	GFTAA (Hz)	Sönüm O. (%)	GFTAA (Hz)	Sönüm O. (%)
1	29.62	3.01	29.51	2.62	29.15	1.44	30.52	2.65
2	49.49	0.79	48.67	0.38	48.07	1.09	49.18	1.35
3	56.80	3.80	56.58	3.49	56.14	3.33	57.46	4.79
4	82.72	3.50	82.17	2.79	81.60	2.82	81.84	6.38



Şekil 2.74. GFTAA yöntemi ile elde edilen spektral yoğunluk grafiği



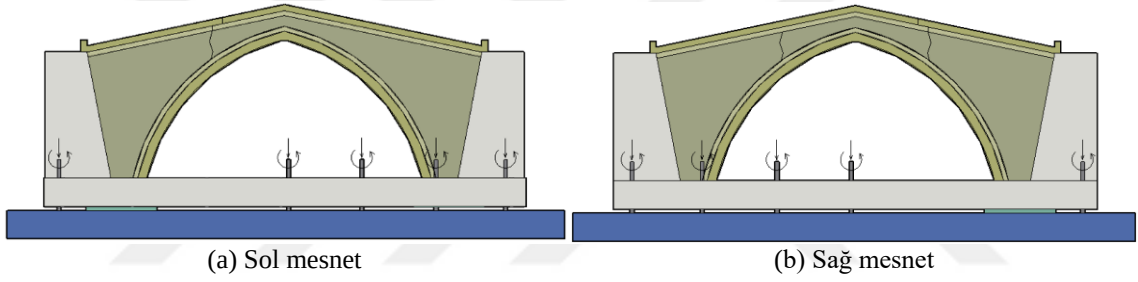
Şekil 2.75. Deneysel ölçümler sonucunda elde edilen mod şekilleri

2.2.3. Köprüde Meydana Gelebilecek Hasar Etkilerinin İncelenmesi

Tarihi kemer köprüler zaman içerisinde farklı, doğal veya insan kaynaklı etmenlerden dolayı hasar görebilmektedir. Kemer köprülerin yapısal davranışlarına en fazla etki edebilecek etkenlerden olan mesnet çökmesi, kenar ayaklar malzeme boşalması ve deprem hasarı bu tez kapsamında incelenmiştir. Bu bağlamda laboratuvar ortamında inşa edilen kemer köprü modeli üzerinde üç farklı hasar verilmiş ve dinamik karakteristikler üzerindeki değişimler incelenmiştir. Her bir hasar sonrasında yapı geleneksel yöntemlerle onarılmaya çalışılmış ve diğer hasar adımına geçilmiştir.

2.2.3.1. Kemer Köprü Modelinin Mesnet Çökmesi Durumlarının İncelenmesi

Kemer köprü modeli üzerinde ilk olarak mesnet çökmesi durumu incelenmiştir. Kemer köprü üzerinde mesnet çökmesinin incelenebilmesi için sarsma masası tij delikleri kullanılmıştır. Tij çubuklarının gerdirilmesi ile köprünün sağ ve sol kısımlarına hasar verilmiştir. Köprünün sağ tarafına hasar vermek için hasar verilmesi istenen bölgenin altına çelik levha yerleştirilmiş ve köprünün diğer tarafındaki tijler gerdirilerek mesnet çökmesi elde edilmiştir. Aynı yöntem kullanılarak köprünün sol tarafına da hasar verilmiştir. Şekil 2.76’da gerdirme uygulamalarının şematik gösterimi ve Şekil 2.77’de gerdirme uygulamaları verilmektedir. Şekil 2.78’de gerdirme işlemlerinin ardından köprünün sağında ve solunda meydana gelen çatlaklar sunulmaktadır.



Şekil 2.76. Gerdirme işlemlerine ait şematik gösterim



Şekil 2.77. Mesnet çökmesi hasarı için köprünün ayaklarına yerleştirilen çelik levhalar



a) Sol mesnet hasarı



b) Sağ mesnet hasarı

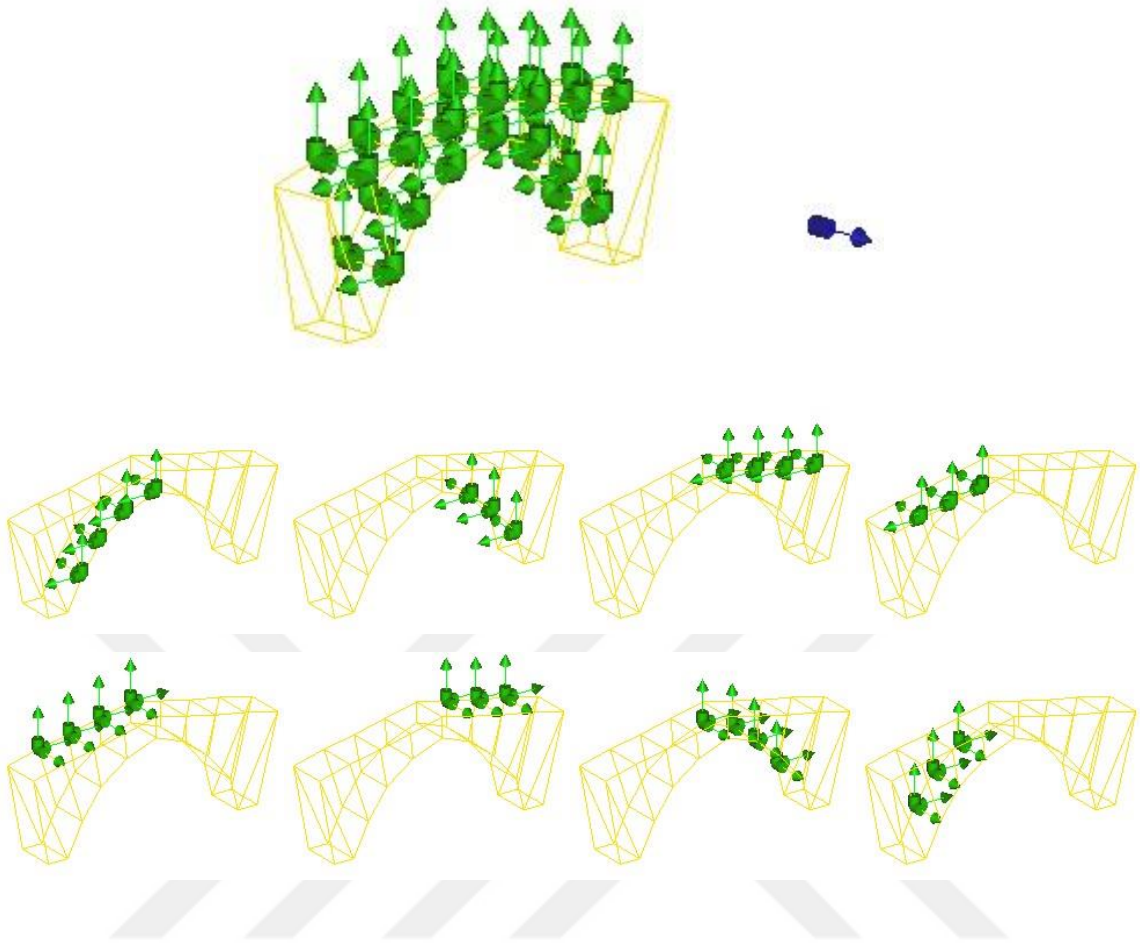
Şekil 2.78. Gerdirme işlemlerinin ardından köprüde meydana gelen hasarlar

Şekil 2.78'in devamı,



Köprü'nün sağ ve sol mesnetlerine uygulanan mesnet çökmelerinin ardından yapıda önemli derecede hasarlar meydana gelmiştir. Bu hasar durumlarının dinamik karakteristiklere etkisinin incelenebilmesi amacıyla Deneysel Modal Analiz (DMA) testleri uygulanmış ve doğal frekans, mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilmiştir. Ölçümler esnasında B K 4507 B 005 tipi tek eksenli ve B K 4506 B 003 tipi üç eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. İvmeölçerlerden alınan veriler B K 3560 C tipi 17 kanallı veri toplama sisteminde toplanmıştır. İvmeölçerlerin veri toplama ünitesine tanıtılması, sinyallerin veri toplama ünitesinde depolanması, sinyal koşullandırma işlemlerinin tamamlanması ve bilgisayara aktarılmasında PULSE (2006) yazılımı kullanılmıştır. Alınan sinyallerin işlenmesi ve dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde OMA (2006) yazılımı kullanılmıştır.

Kemer köprü üzerinden, dinamik karakteristiklerin daha net bir şekilde elde edilebilmesi amacıyla, önceki ölçümlerden farklı olarak kemer üzerine de ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Ölçümde üç eksenli ivmeölçerler kullanılarak 8 referanslı ölçüm alınmıştır. Bu ölçümlerin ivmeölçer dizilimine ait şematik gösterimler Şekil 2.79'da verilmektedir. Ölçümlere ait görünüşler ise Şekil 2.80'de sunulmaktadır.



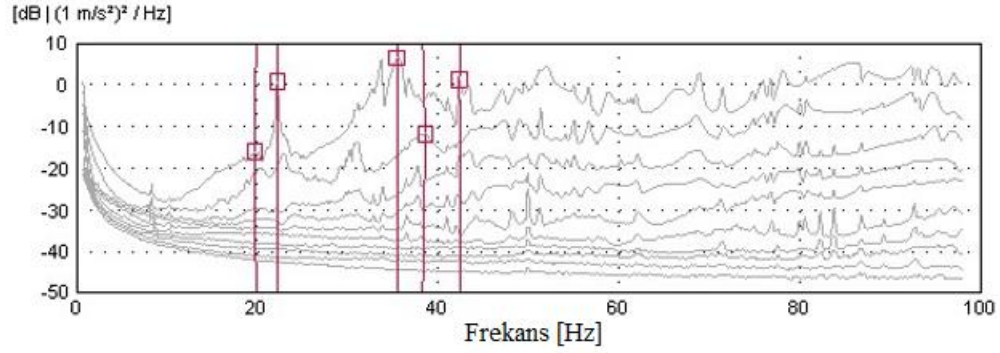
Şekil 2.79. Referanslı ölçümde ivmeölçer dizilimleri



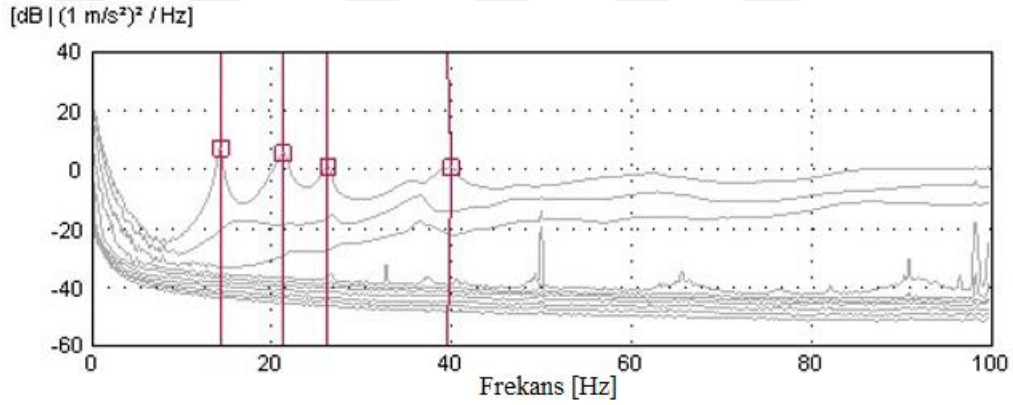
Şekil 2.80. Ölçümlere ait görüşler

Sağ ve sol mesnet hasarları sonrasında alınan ölçüm sonuçlarına göre elde edilen GFTAA spektral yoğunluk grafikleri Şekil 2.81’de verilmektedir. Ölçümler sonucunda elde edilen frekans değerleri karşılaştırmalı olarak Tablo 2.54’te sunulmaktadır. Elde edilen mod

şekilleri Şekil 2.82’de sunulmaktadır. Hasar arttıkça mod şekillerinin önemli ölçüde değiştiği gözlemlenmiştir.



(a) Sol mesnet hasarı sonrası

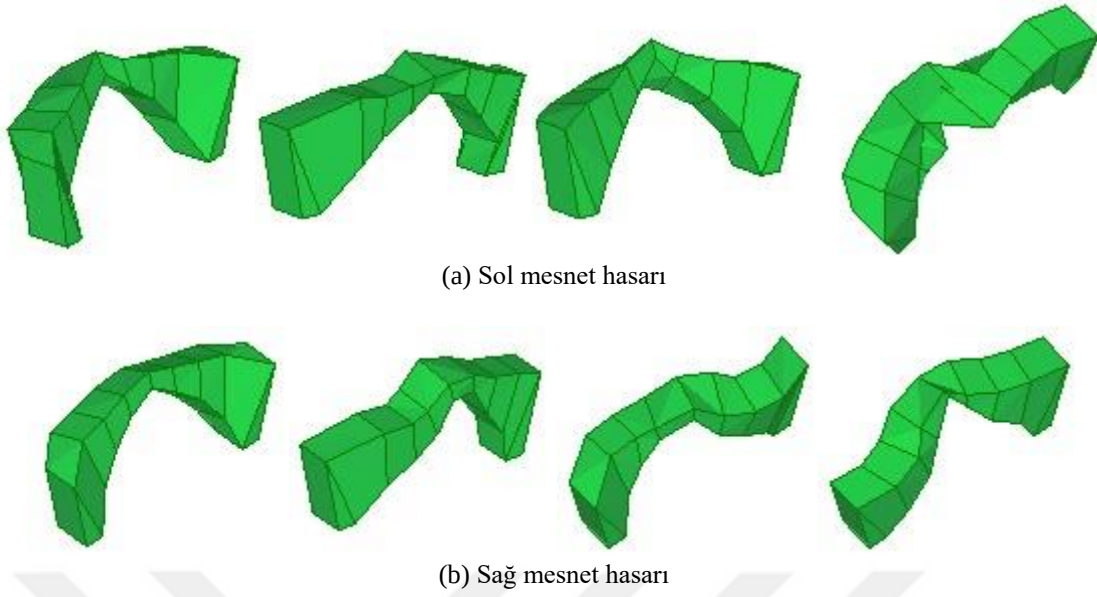


(b) Sağ mesnet hasarı sonrası

Şekil 2.81. GFTAA Spektral Yoğunluk Grafikleri

Tablo 2.54. Sağ ve sol mesnet hasarı durumları için yapılan ölçümler sonucunda elde edilen doğal frekans değerleri ve sönüm oranları

	Sol mesnet hasarı			Sağ mesnet hasarı		
	GFTAA	Sönüm oranı (%)	Mod Şekli	GFTAA	Sönüm oranı (%)	Mod Şekli
1	19.88	1.47	Enine	14.28	0.03	1. Enine
2	22.31	0.12	Boyuna	21.25	0.22	Boyuna
3	35.64	0.18	Düzlem d. Eğilme	26.19	0.18	Burulma
4	42.55	0.36	Burulma	39.53	0.46	2. Enine



Şekil 2.82. Deneysel ölçümler sonucunda elde edilen mod şekilleri

Hasarlı köprüyü onarmak amacıyla köprüye enjeksiyon işlemi uygulanmış ve hasarlı kısımlar tamamlanmıştır. Şekil 2.78’de görüleceği üzere köprünün tempan duvarı, korkuluk ve yol zemininde önemli ölçüde hasarlar meydana gelmiştir. Ancak köprünün kemer yapısında düşey çatlak ilerlemesi gözlemlenmemiştir. Bu hasarların giderilmesi için; çatlakların ve dolgu içerisindeki boşlukların doldurulması amacıyla enjeksiyon ve duvarlarda, yol zemininde ve korkuluklardaki çatlakların giderilmesi için bölgesel yeniden yapım uygulamaları seçilmiştir. Onarım uygulamalarında kullanılan enjeksiyon şerbeti “Tarihi Köprüler Restorasyon Uygulama Projesi ve Restorasyon Uygulaması İşleri” (TKRUP, 2013) uygulama tarifine göre uygulanmıştır. Ancak kaymak kireç yerine hidrolik kireç kullanılmıştır. Enjeksiyona ait karışım oranları Tablo 2.55’te sunulmaktadır. Enjeksiyon işlemi için öncelikle köprünün ön ve arka yüzeyinde tempan duvarlardan aralıklarla delikler matkap yardımıyla açılmıştır. Daha sonra bu deliklere 10-15cm’lik akvaryum hortumu yerleştirilmiştir. Bu hortumların içerisine üflenerek enjeksiyon için uygun olup olmadıkları kontrol edilmiştir. Hava giden hortumlara 50cc’lik tıbbi şırıngalar yardımıyla enjeksiyon işlemi uygulanmıştır. Enjeksiyon işlemlerine ait görünüşler Şekil 2.83’te verilmektedir.

Tablo 2.55. Enjeksiyon karışım oranları (TKRUP, 2013).

KTk-7/30	Enjeksiyon Harcı, Bünyesel Boşlukların Doldurulmasında (%30 Oranında Puzolan Esaslı Hidrolik Kireç Katkılı)	%60 Kaymak Kireç %10 Taş Tozu %30 Katkı 2
----------	---	---



Şekil 2.83. Enjeksiyon işlemlerine ait görünüşler

Mesnet hasarı sonucunda köprüde oluşan çatlaklar enjeksiyonla kapatılamayacak düzeyde (yaklaşık 2-3mm) olmasından dolayı bu kısımlar sökülerek özgün malzeme ile dikiş işlemi yapılmıştır. Hasarlı duvarların, yol zemini ve korkulukların yeniden örülmesinde köprü inşasında kullanılan harç karışımı kullanılmıştır. Yeniden örme işlemlerine ait görünüşler Şekil 2.84’te verilmektedir.

Yapılan onarım işlemlerinin ardından onarımın etkinliğinin gözlemlenmesi amacıyla Deneysel Modal Analiz testleri yapılmıştır. Test sonucunda elde edilen GFTAA spektral yoğunluk grafiği Şekil 2.85’te sunulmaktadır. Onarım sonrası elde edilen frekans ve sönüm oranları Tablo 2.56’da sunulmaktadır. Frekanslara ait mod şekilleri Şekil 2.86’da verilmektedir.

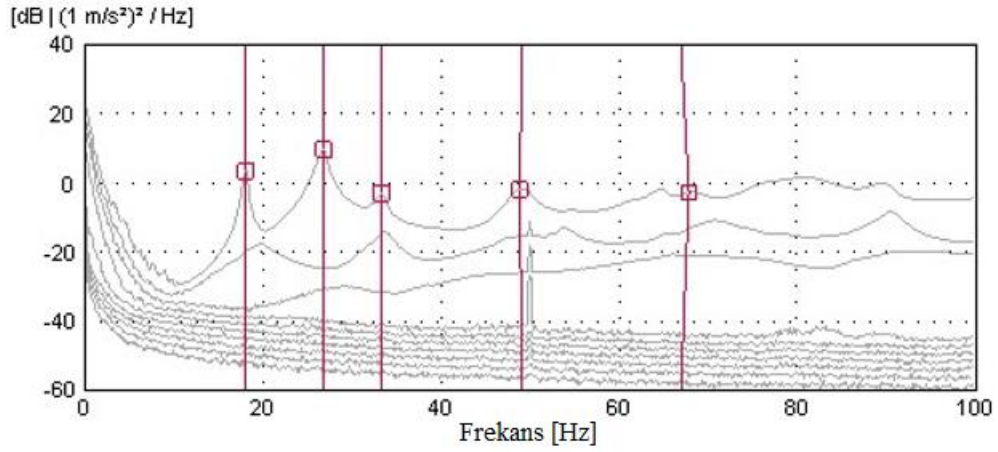


(a) Hasarlı bölgelerin açılması işlemleri



(b) Tamamlama işlemleri

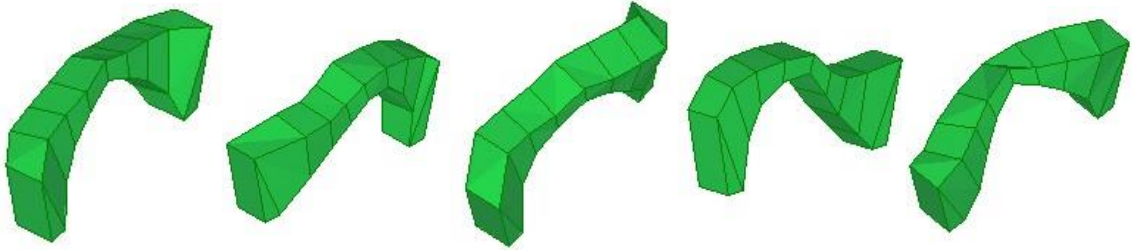
Şekil 2.84. Yeniden yapım işlemlerine ait görüşler



Şekil 2.85. Onarım sonrası durum için elde edilen spektral yoğunluk grafiği

Tablo 2.56. Onarım sonrası durum için yapılan ölçümler sonucunda elde edilen doğal frekans değerleri

Mod Numarası	Onarım Sonrası		
	GFTAA (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Mod Şekli
1	18.10	1.23	Enine
2	26.79	1.94	1. Boyuna
3	33.34	1.40	Burulma
4	49.17	3.21	2. Boyuna
5	66.96	2.88	Düzlem d. Eğilme



Şekil 2.86. Deneysel ölçümler sonucunda elde edilen mod şekilleri

Kemer köprü'nün hasarsız durumu, sol-sağ mesnet çökmesi hasar durumları ve onarım sonrasında elde edilen frekans değerleri ve mod şekilleri Tablo 2.57'de karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Hasarsız durum için tabloda yazan frekanslar Ölçüm-4 için elde edilen değerlerdir. Hasar arttıkça mod şekillerinin değişmesinden dolayı karşılaştırmalar enine, boyuna ve burulma modları üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2.57. Hasarsız-sağ mesnet hasarı-sol mesnet hasarı durumları için yapılan ölçümler sonucunda elde edilen doğal frekans değerleri ve sönüm oranları

	Mod Şekli	Hasarsız	<i>Fark (%)</i>	Sol mesnet hasarı	<i>Fark (%)</i>	Sağ mesnet hasarı	<i>Fark (%)</i>	Onarım Sonrası
1	Enine	30.52	34.8	19.88	28.1	14.28	26.7	18.10
2	Burulma	49.18	13.5	42.55	38.4	26.19	27.3	33.34
3	Boyuna	57.46	61.2	22.31	4.7	21.25	26.1	26.79

2.2.3.2. Köprü Ayağında Malzeme Boşalması Hasar Durumu

Kemer köprü modeli üzerinde gerçekleştirilen bir diğer hasar durumu için kenar ayaklar oyularak malzeme boşalması hasar durumu gerçekleştirilmiştir. Oyulma işlemi için öncelikle tempan duvarlardan taşlar sökülüş daha sonra kemer taşları sökülerek oyulma gerçekleştirilmiştir. Köprü kemerinin 4 köşe kısmında malzeme boşalması gerçekleştirilmiş ve her hasar ardında Deneysel Modal Analiz testleri uygulanmıştır. Kemer köprü üzerinde gerçekleştirilen malzeme boşalması hasarı işlem adımlarına ait görünüşler Şekil 2.87’de sunulmaktadır. Köprü ayaklarındaki oyulma işleminin ardından köprünün geri kalan kısmında ve kederde herhangi bir çatlak oluşmamıştır.



Ön sol ayak



Ön sağ ayak



Arka sağ ayak



Arka sol ayak

Şekil 2.87. Köprü ayaklarına malzeme boşalması hasarı ile ilgili görünüşler

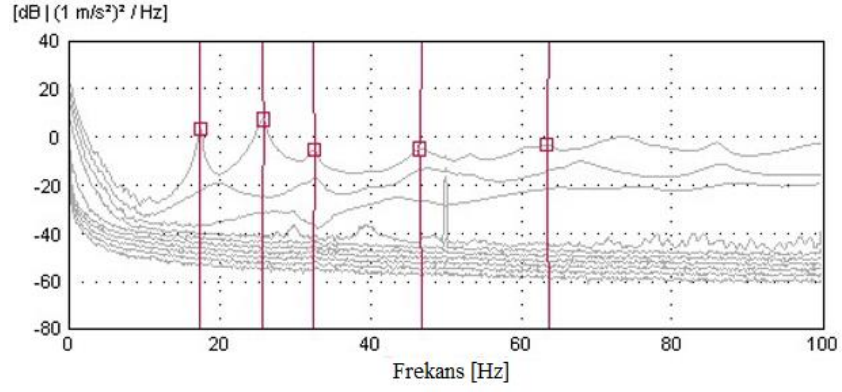
Şekil 2.87'nin devamı,



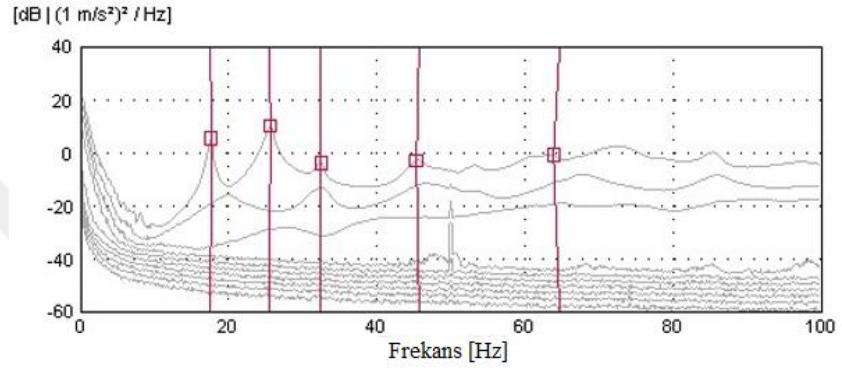
Kemer köprü modeli üzerinde gerçekleştirilen her bir hasar sonrasında Deneysel Modal Analiz testleri sonucunda dinamik karakteristikler GFTAA yöntemine göre elde edilmiştir. GFTAA yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk grafikleri Şekil 2.88'de sunulmaktadır. Testler sonucunda elde edilen frekans ve sönüm oranları değerleri Tablo 2.58'de verilmektedir. Frekanslara ait mod şekilleri Şekil 2.89'da verilmektedir.

Tablo 2.58. Deneysel modal analiz testleri sonucunda elde edilen frekans ve sönüm oranları değerleri

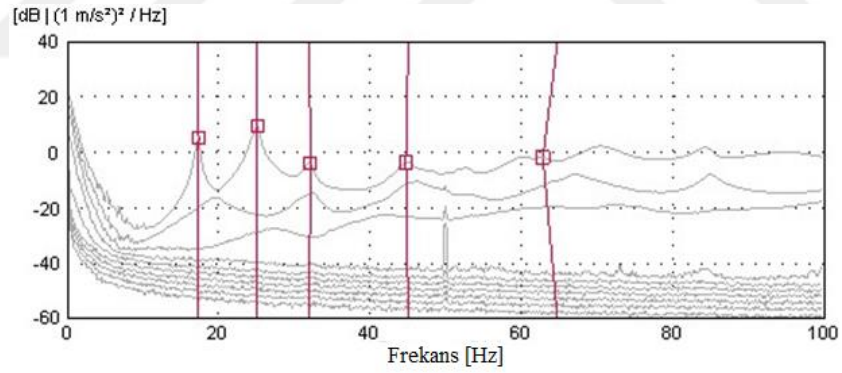
	Mod Şekli	Sol-ön Malz. Boşalması Hasarı		Sol-arka Malz. Boşalması Hasarı		Sağ-ön Malz. Boşalması Hasarı		Sağ-arka Malz. Boşalması Hasarı	
		Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	Enine	17.58	1.29	17.52	1.28	17.31	1.27	16.98	1.24
2	1. boyuna	25.74	1.90	25.59	1.90	25.02	1.78	24.87	1.77
3	Burulma	32.51	1.25	32.38	1.23	32.01	1.41	31.73	1.59
4	2. boyuna	46.94	3.06	45.73	2.87	45.08	2.62	44.62	2.18
5	Düzlem d. Eğilme	64.72	2.60	63.72	2.09	64.82	2.63	62.83	1.11



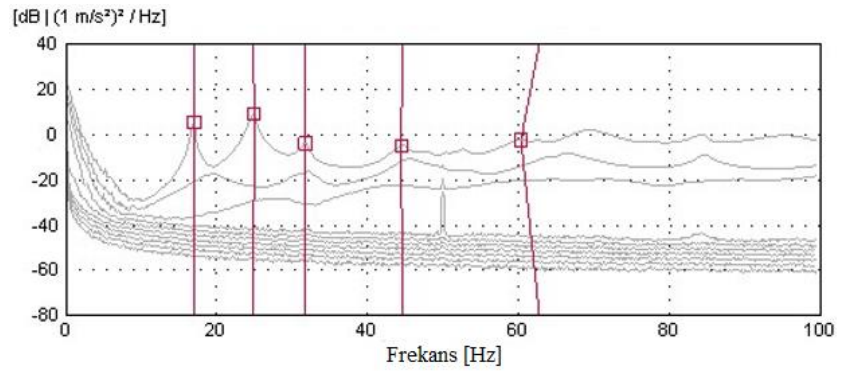
a) Sol-ön malzeme boşalması hasarı



b) Sol-arka malzeme boşalması hasarı

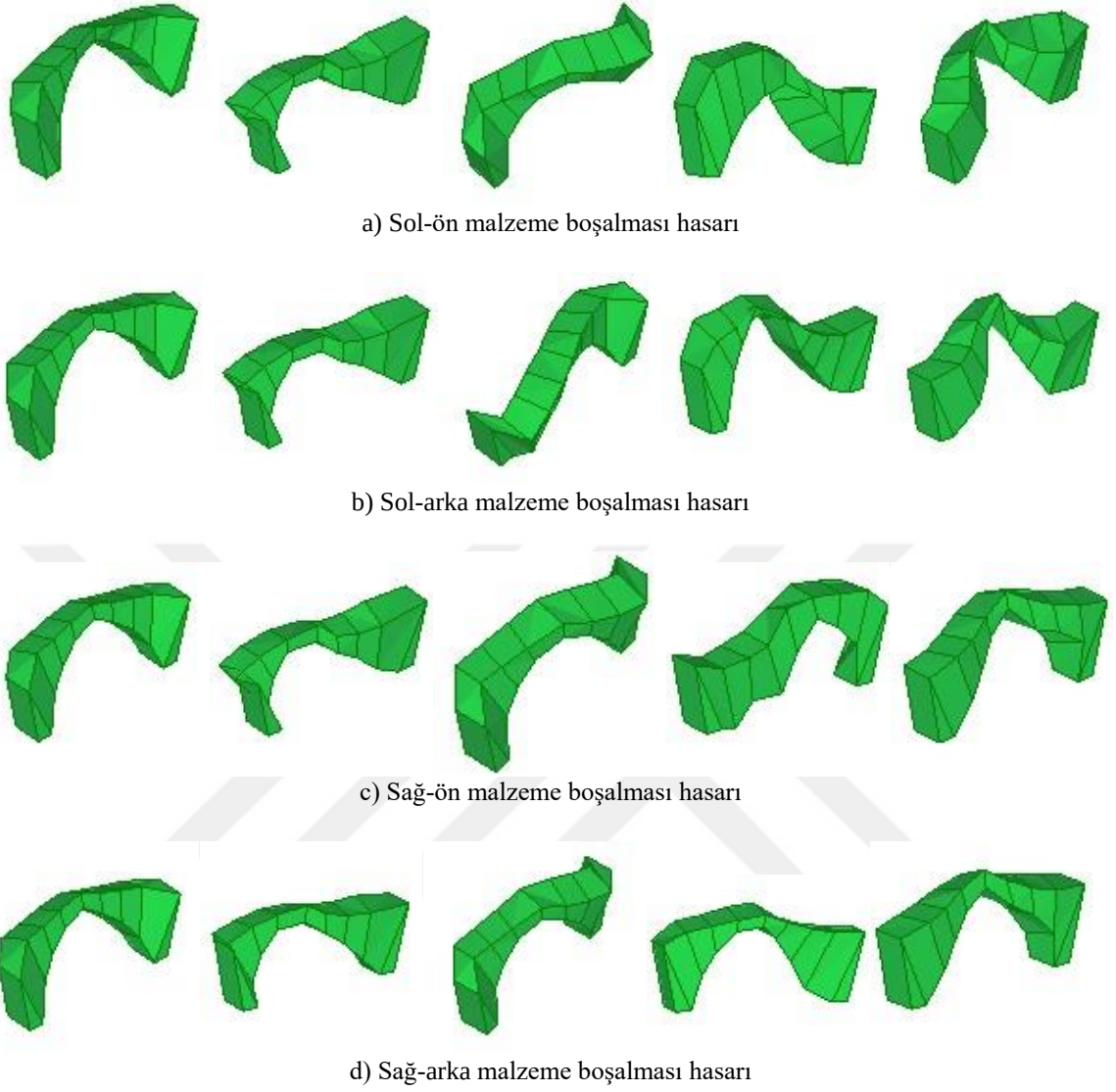


c) Sağ-ön malzeme boşalması hasarı



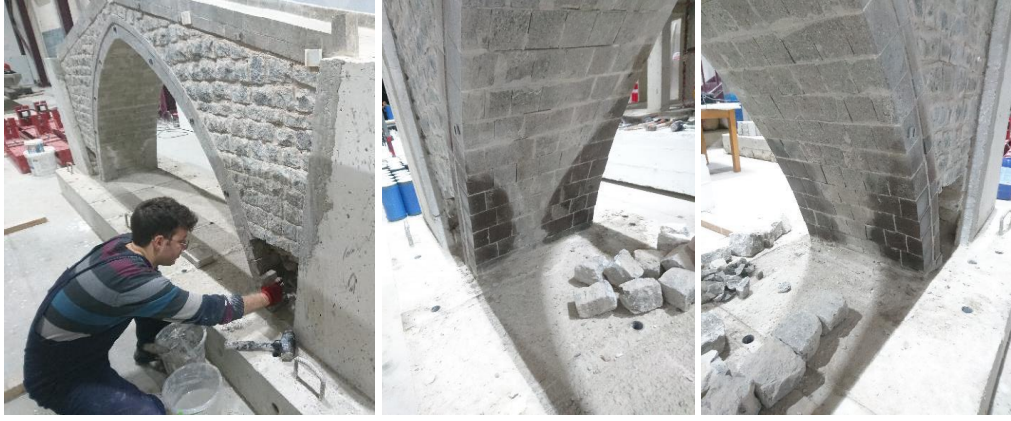
d) Sağ-arka malzeme boşalması hasarı

Şekil 2.88. Her bir hasar adımında elde edilen GFTAA spektral yoğunluk grafikleri



Şekil 2.89. Deneysel ölçümler sonucunda elde edilen mod şekilleri

Hasarlı köprüyü onarmak amacıyla köprü ayaklarındaki boşalmalara özgün malzeme ve harç kullanılarak tamamlama işlemi yapılmıştır. Tamamlama yapılırken önce kemerler inşa edilmiş daha sonra tempan duvarlar tamamlanmıştır. Tamamlama işlemlerine ait görüşler Şekil 2.90'da verilmektedir.



(a) Kemerlerin tamamlanması

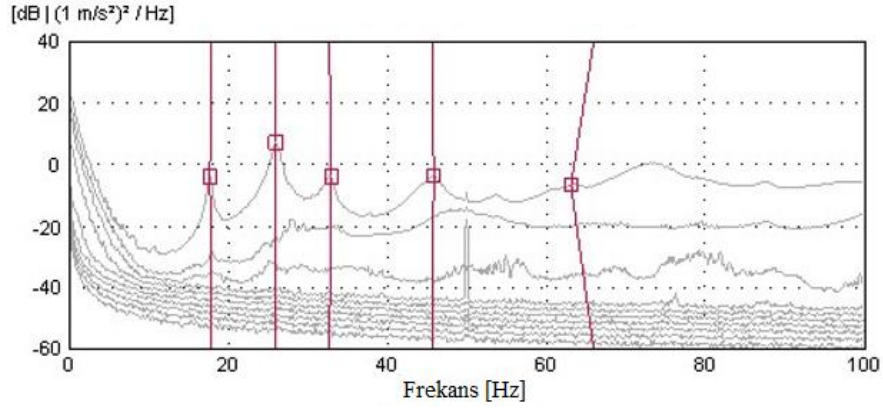


(b) Tempan duvarların tamamlanması



Şekil 2.90. Malzeme boşalması hasarının tamamlama yapılarak onarılması

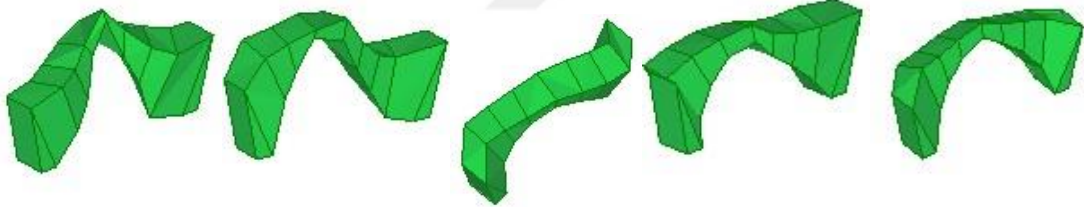
Köprüdeki malzeme boşalması hasarlarının tamamlama yapılarak onarılmasının ardından köprünün dinamik karakteristiklerindeki değişimi incelemek amacıyla 28 gün sonra Deneysel Modal Analiz testleri uygulanmıştır. Testler sonucunda GFTAA yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk grafikleri Şekil 2.91’de sunulmaktadır. Testler sonucunda elde edilen frekans ve sönüm oranları değerleri Tablo 2.59’da verilmektedir. Frekanslara ait mod şekilleri Şekil 2.92’de sunulmaktadır.



Şekil 2.91. Onarım sonrasında elde edilen spektral yoğunluk grafikleri

Tablo 2.59. Tamamlama sonrasında elde edilen frekans ve sönüm oranları değerleri

Mod Numarası	Tamamlama Sonrası		
	GFTAA (Hz)	Sönüm oranı (%)	Mod Şekli
1	17.78	1.30	Enine
2	25.96	1.75	1. boyuna
3	32.74	1.54	Burulma
4	45.66	3.01	2. boyuna
5	65.98	0.64	Düzlem d. Eğilme



Şekil 2.92. Deneysel ölçümler sonucunda elde edilen mod şekilleri

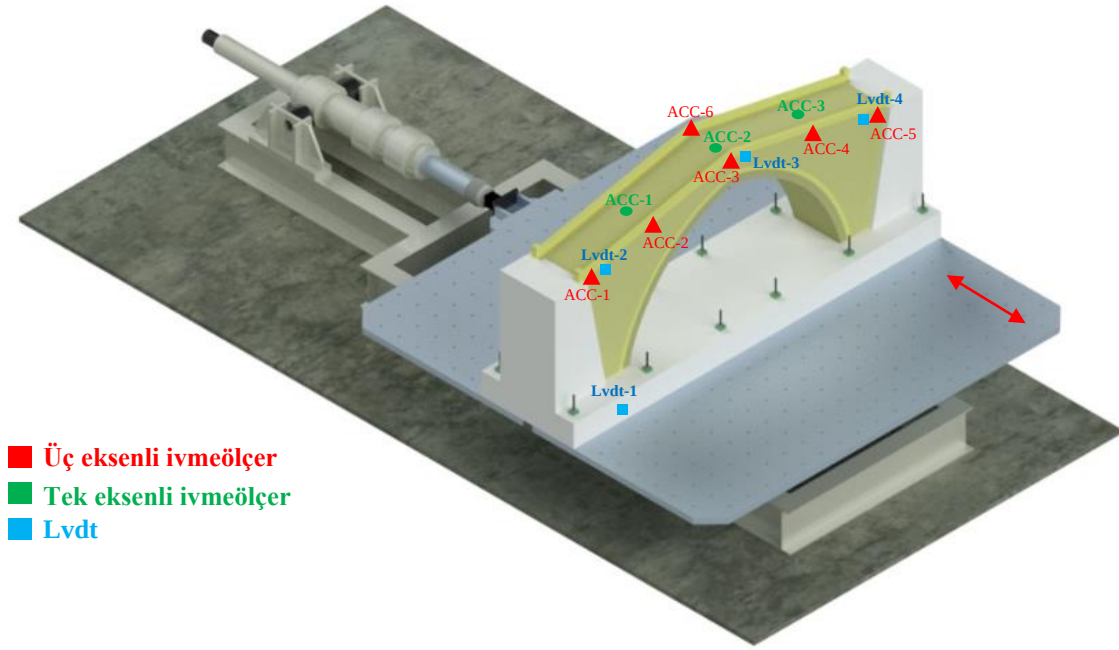
Kemer köprü üzerinde gerçekleştirilen hasar öncesi ve sonrasında elde edilen frekans değerleri ve mod şekilleri Tablo 2.60'ta karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Karşılaştırmalar enine, boyuna ve burulma modları üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2.60. Malzeme boşalması hasarı öncesi, sonrası ve onarım durumlarında elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması

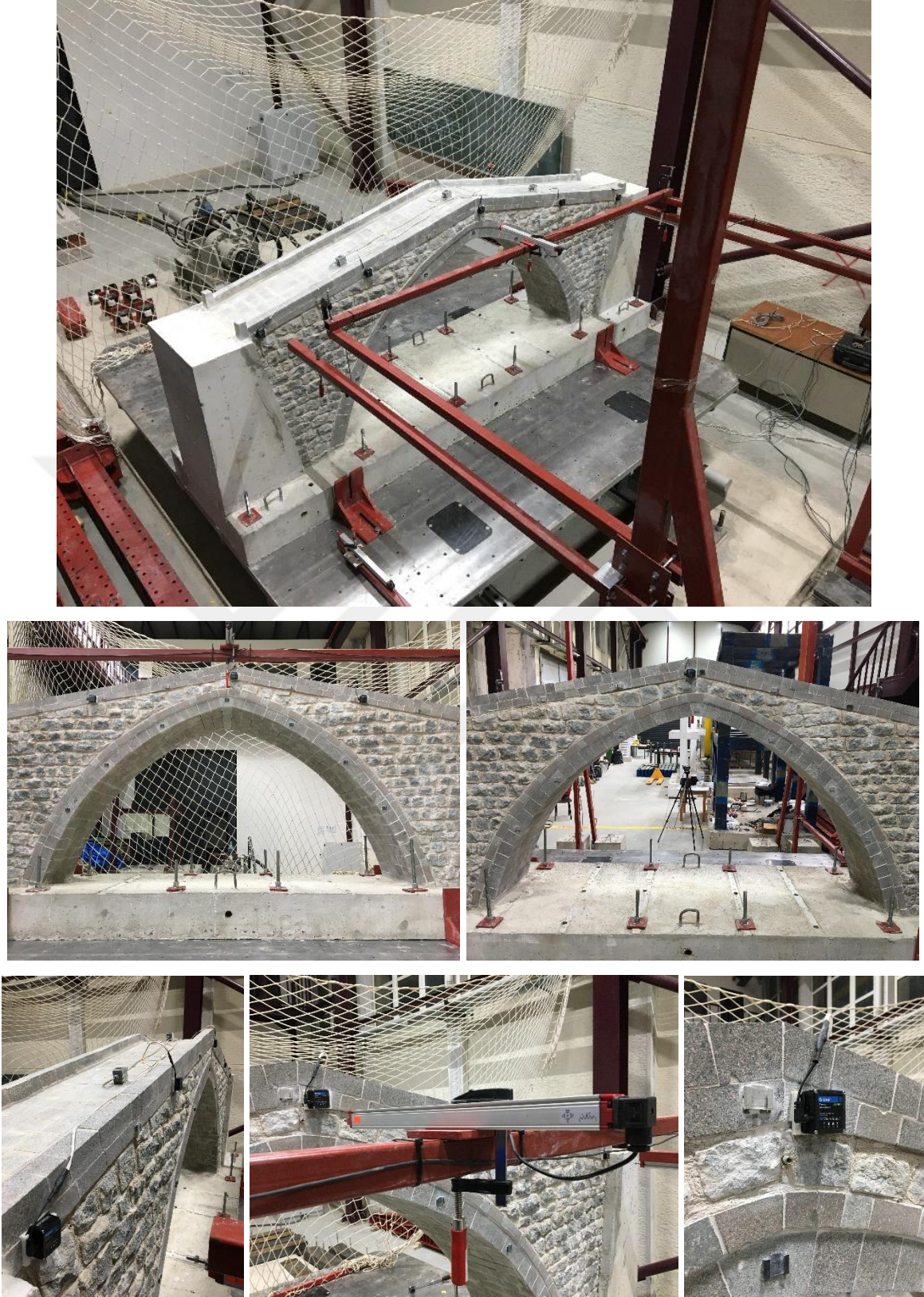
	Mod Şekli	Malz. Boşalması Hasarı Öncesi (Hz)	Fark (%)	Malz. Boşalması Hasarı Sonrası (Hz)	Fark (%)	Onarım Sonrası (Hz)
1	Enine	18.10	6.2	16.98	4.7	17.78
2	Boyuna	26.79	7.1	24.87	4.4	25.96
3	Burulma	33.34	4.8	31.73	3.2	32.74

2.2.3.3. Deprem Hasarı

Mesnet çökmesi ve köprü ayaklarında malzeme boşalması (oyulma) hasarlarının ardından son olarak deprem hasarı kemer köprüye uygulanmıştır. Dinamik yüklemeler köprünün zayıf olduğu memba-mansap doğrultusunda köprü düzlemine dik şekilde uygulanmıştır. Kemer köprü modeli sarsma masasına 12 tij ve 4 adet L tipi dayanak yardımıyla bağlanmıştır. Deney esnasında yerdeğiştirme değerlerini almak amacıyla 1 adet LVDT temele, 3 adet LVDT köprü tabliyesine yerleştirilmiştir. Köprüde meydana gelecek ivme değerlerini elde etmek amacıyla köprü tabliyesinin bir tarafına 5 adet 3 eksenli ivmeölçer, diğer tarafında da köprüde oluşabilecek dönmeyi elde etmek amacıyla 1 adet ivmeölçer yerleştirilmiştir. Ayrıca fazlaca veri sağlaması amacıyla köprünün tabliye-yol ortasına 3 adet tek eksenli ivmeölçer yerleştirilmiştir. Deney kurulumuna ait şematik gösterim Şekil 2.93'te sunulmaktadır. Deney kurulumuna ait görünüşler Şekil 2.94'te gösterilmektedir.



Şekil 2.93. Sarsma masası deneyleri için kurulan deney düzeneği

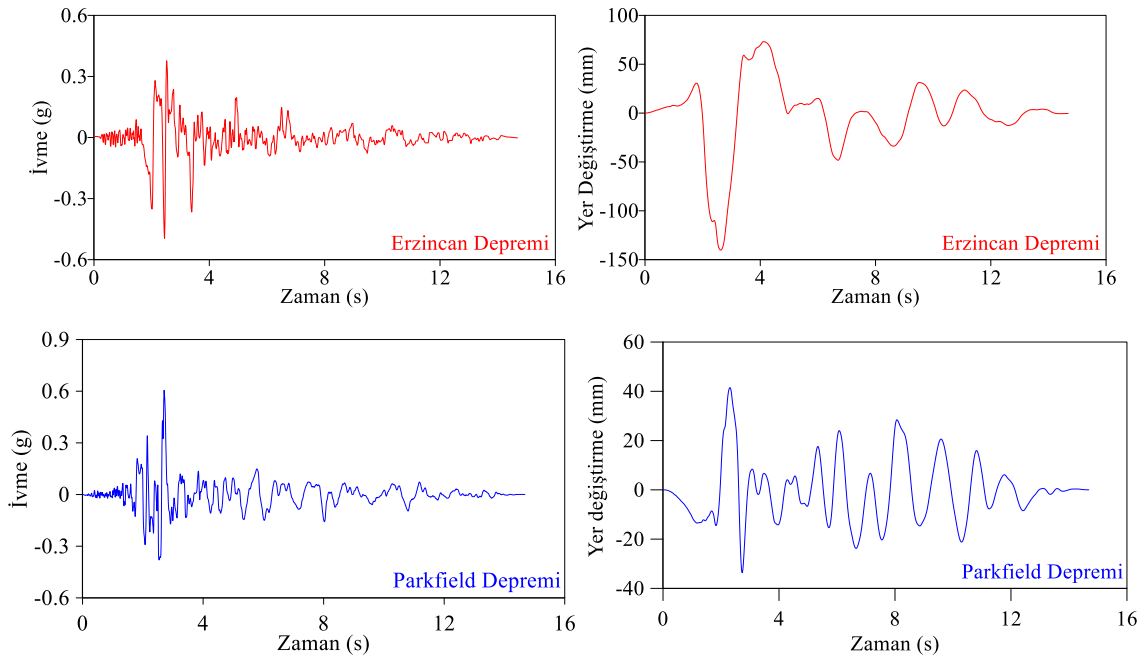


Şekil 2.94. Deney kurulumuna ait görüşler

Tarihi yapıların ölçekli modelleri üzerinden dinamik davranışlarının incelenmesi ile alakalı literatürde benzetim yasaları uygulanmaktadır. Tarihi yapılarda gerçek yapının dinamik davranışını yakalamak amacıyla “yerçekimi kuvvetleri ihmal edilen” benzetim modeli kullanılmaktadır. Tarihi yapılarda ilave yüklemelerin yapılacağı rijit döşeme seviyeleri olmadığı için benzeşimi yakalamak adına uygulanan yük artırılmaktadır. Bu çalışma kapsamında herhangi bir tarihi köprünün deprem davranışı incelenmediğinden dolayı genel deprem hasarının incelenebilmesi amacıyla ölçeklendirme kurallarına uyulmadan farklı deprem ve sinüs dalgaları ile yapıda hasar oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu bağlamda köprüye Tablo 2.61’de sunulan dinamik yüklemeler sırasıyla uygulanmıştır. Özel olarak bir tarihi yapının ölçekli modeli üzerinden deprem davranışı elde edilmek istenilseydi yüklemelerin benzetim yasasına uygun olarak uygulanması gerekirdi. Tarihi köprüye uygulanan ivme ve yerdeğiştirme grafikleri Şekil 2. 95’te sunulmaktadır.

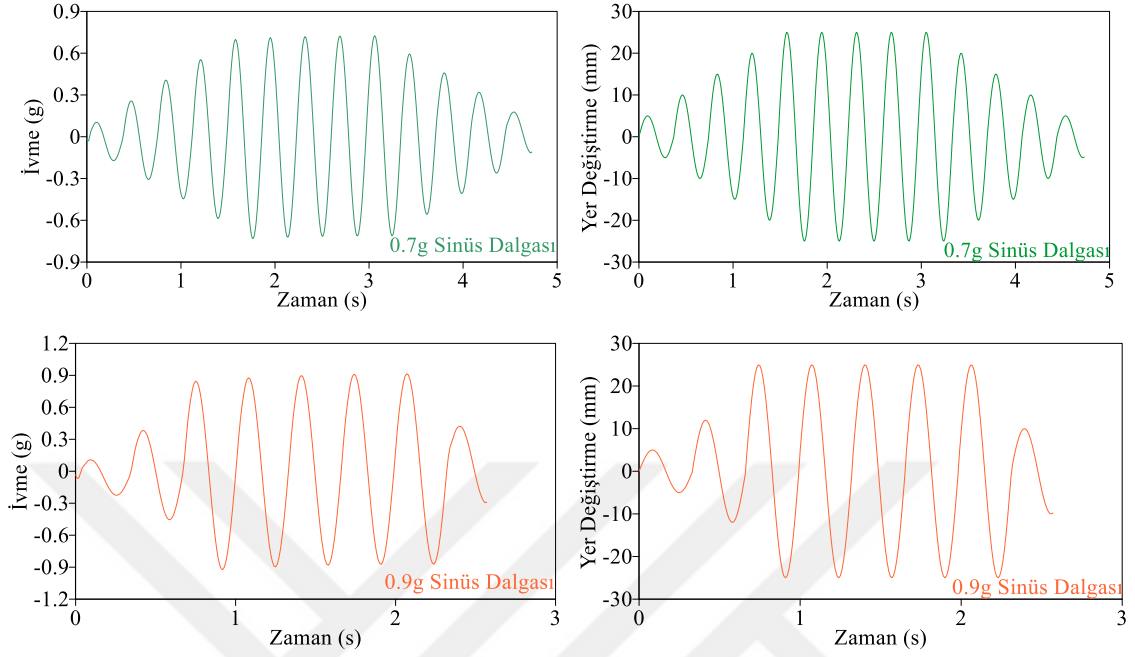
Tablo 2.61. Köprüye uygulanan dinamik yüklemeler ve hasar durumları

Test Numarası	Test Adı	Hasar Durumu
Test-1	Erzincan	Hasar yok
Test-2	Parkfield	Hasar yok
Test-3	0.7g-Sinüs-5Pik-25mm	Hasar yok
Test-4	0.9g-Sinüs-5Pik-25mm	Ağır hasar



Şekil 2.95. Sarsma masası deneylerinde uygulanan yüklere ait ivme ve yerdeğiştirme grafikleri

Şekil 2.95'in devamı,



Sarsma masasında gerçekleştirilen ilk üç test adımında yapı üzerinde herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. Son test olan 0.9g'lik sinüs dalgasında ise yapıda ağır hasar meydana gelmiştir. Bu aşamada köprünün korkuluklarının bir kısmı kopup yere düşerken kemerde enine yönde açılmalar meydana gelmiştir. Ancak oldukça fazla çatlak ve açılma oluşmasına rağmen köprünün kemeri stabilitesini korumuş ve köprü ayakta kalabilmiştir. Köprünün tempan duvarlarında köprünün düzlem dışı rölatif yerdeğiştirmesine bağlı olarak derz çatlakları meydana gelmiştir. Köprünün batı cephesi daha fazla hasar alırken doğu cephesinde nispeten daha az hasar meydana gelmiştir. Köprü kemerinin inşasında kenet demirlerinin kullanılmamış olması kemerde enine yönde açılmaya neden olmuştur. Köprüde meydana gelen hasarlara ait görüşler Şekil 2.96'da sunulmaktadır. Deprem sonrası köprüde meydana gelen hasar durumları Şekil 2.97'de köprü çizimi üzerinde gösterilmektedir.



(a) Köprünün batı cephesi

Şekil 2.96. Son deprem testinin ardından köprüde meydana gelen hasar durumları

Şekil 2.96'nın devamı,

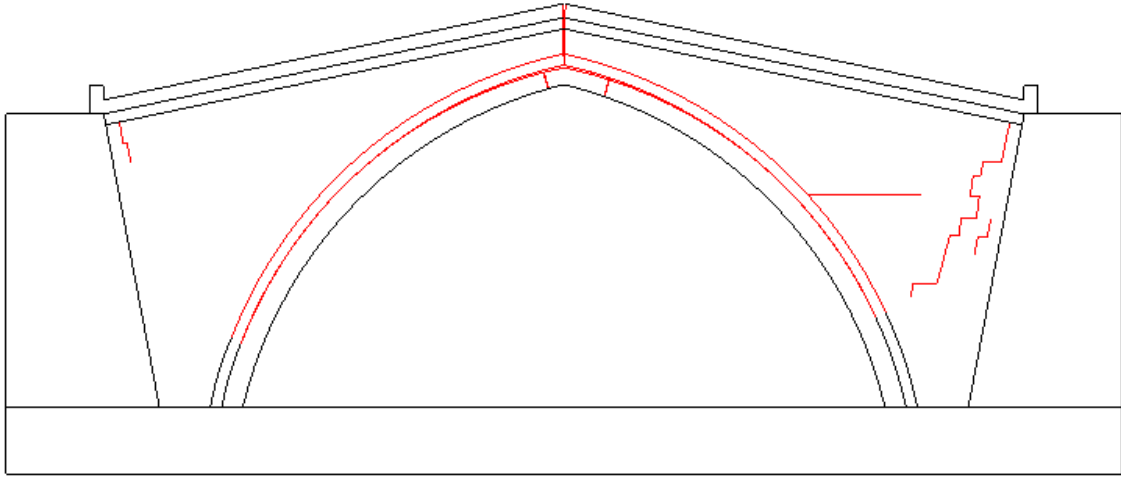


(b) Köprünün doğu cephesi

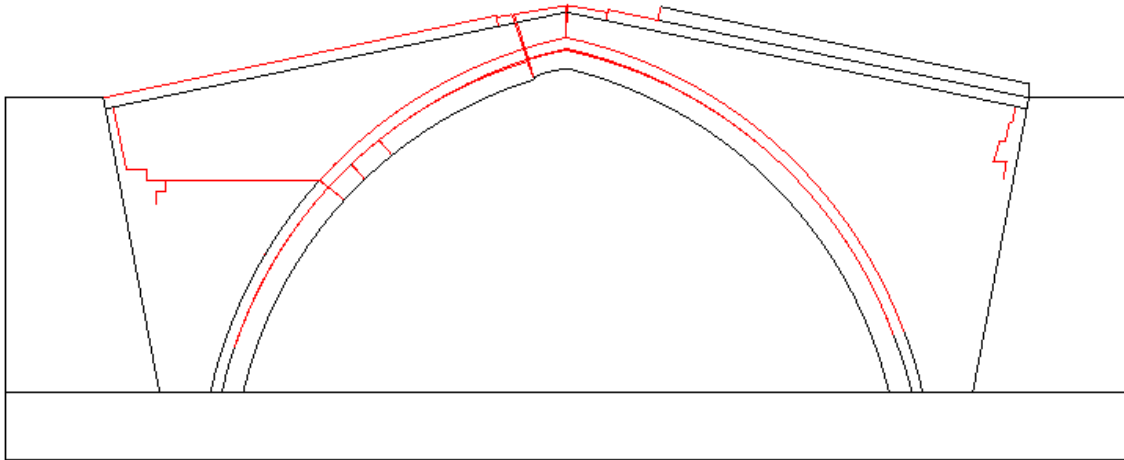
Şekil 2.96'nın devamı,



(c) Kemerin sağ ve sol alt görünüşleri



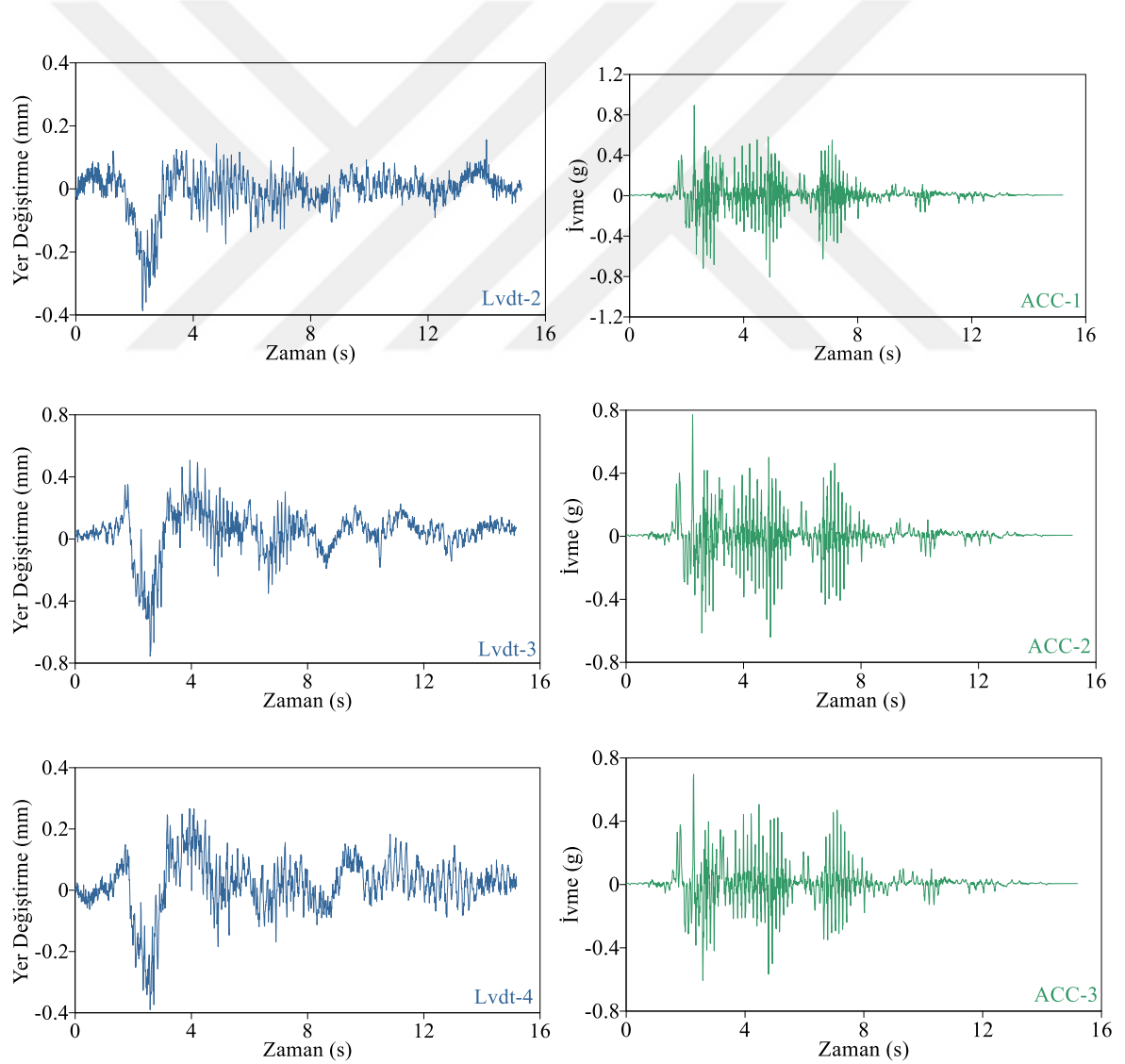
(a) Köprünün doğu cephesinde meydana gelen hasarlar



(b) Köprünün batı cephesinde meydana gelen hasarlar

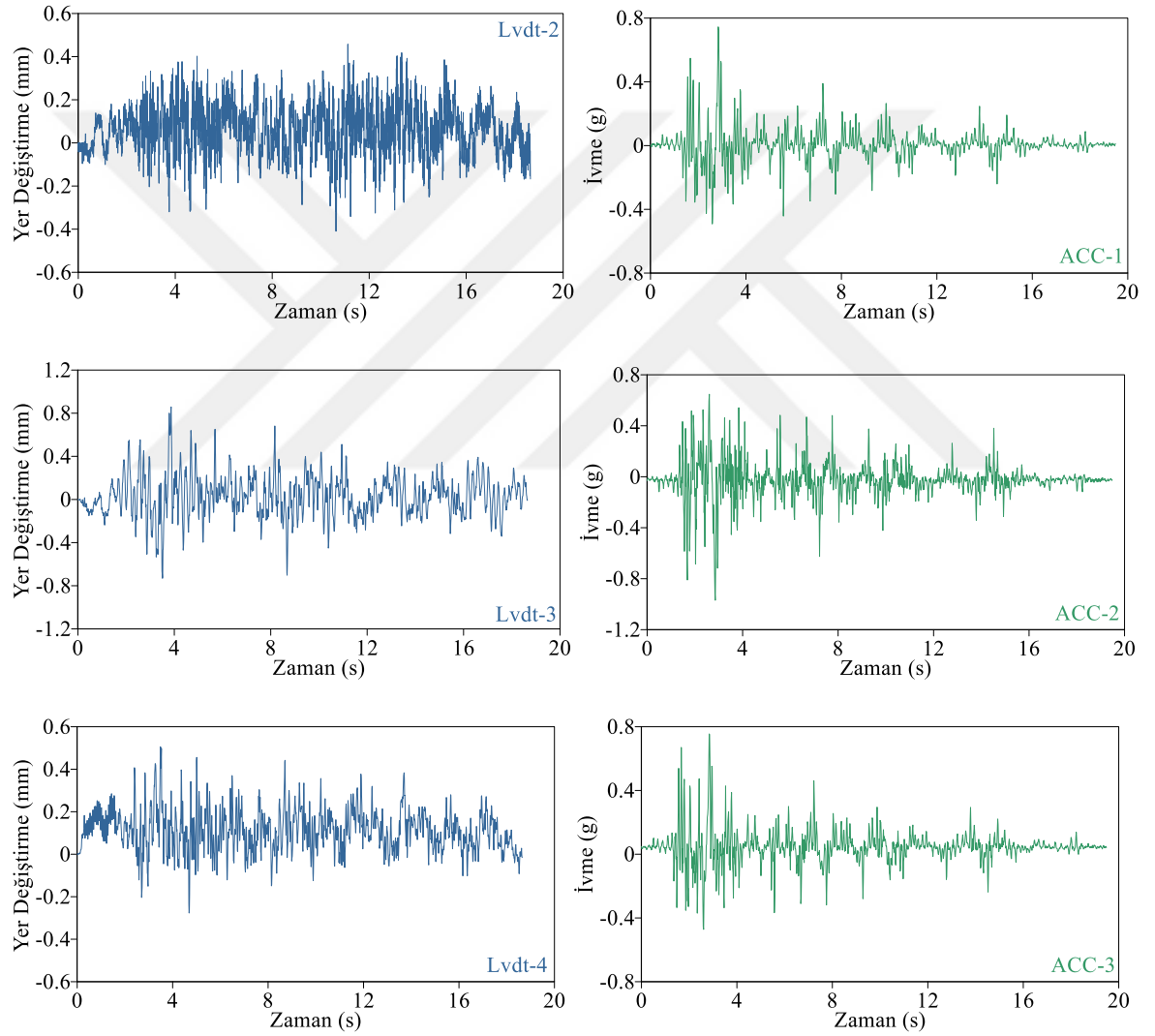
Şekil 2.97. Köprüde meydana gelen hasarların çizim üzerinde gösterimi

Kemer köprünün sarsma masası deneyleri esnasında ivmeölçer ve yerdeğiştirme ölçerler ile performansı takip edilmiştir. Yapı ilk üç test adımında oldukça rijit davranmış ve oldukça az rölatif yerdeğiştirme gerçekleştirmiştir. Bu nedenle, yapı üzerindeki tüm noktalardan veri alınmasına rağmen köprünün sağ, sol ve ortasından elde edilen veriler tez kapsamında sunulmaktadır. Bu bağlamda ilk testte (Erzincan Depremi) elde edilen rölatif yerdeğiştirme ve ivme değerleri Şekil 2.98’de sunulmaktadır. Erzincan depremi sonuçları incelendiğinde maksimum rölatif yerdeğiştirme değeri köprü ortasında 0.75mm değerinde elde edilirken köprünün sağ ve sol kenarlarında yaklaşık 0.4mm değerinde rölatif yerdeğiştirme değerleri oluşmuştur. İvme sonuçları incelendiğinde köprünün ortasında, sağında ve solunda sırasıyla 0.89g, 0.77g ve 0.69g’lik ivme değerleri elde edilmiştir.



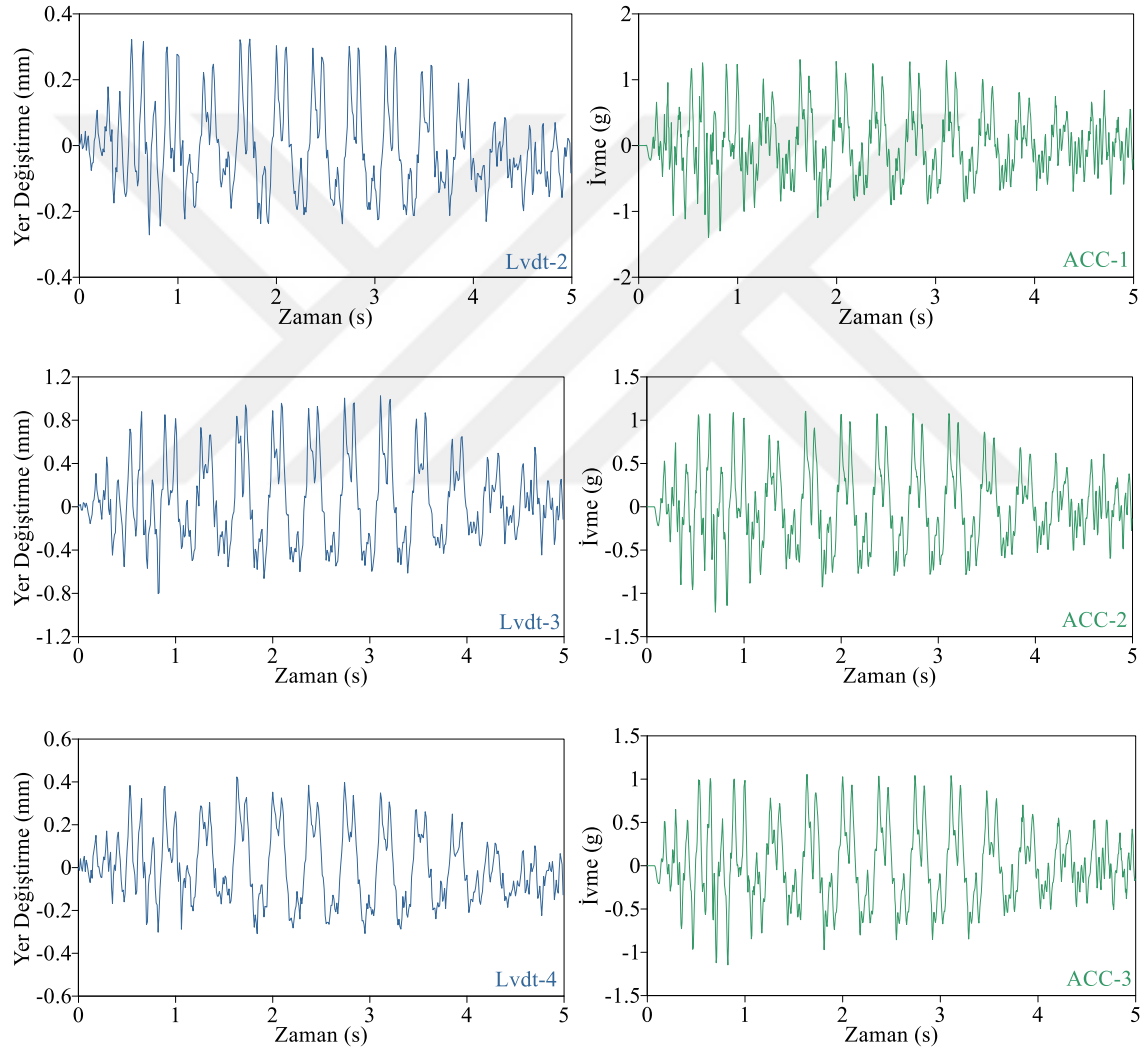
Şekil 2.98. Erzincan depremi sonucunda elde edilen yerdeğiştirme ve ivme grafikleri

Sarsma masası deneylerinden ikinci testte (Parkfield Depremi) elde edilen rölatif yerdeğiştirme ve ivme değerleri şekil 2.99’da sunulmaktadır. Bu testte yapı üzerinde herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. Parkfield depremi sonuçları incelendiğinde maksimum rölatif yerdeğiştirme değeri köprü ortasında 0.86mm değerinde elde edilmiştir. Köprünün sağ ve sol noktalarında ise 0.46mm ve 0.50mm değerinde rölatif yerdeğiştirme değerleri oluşmuştur. İvme sonuçları incelendiğinde köprünün ortasında, sağında ve solunda sırasıyla 0.97g, 0.75g ve 0.74g’lik ivme değerleri elde edilmiştir.



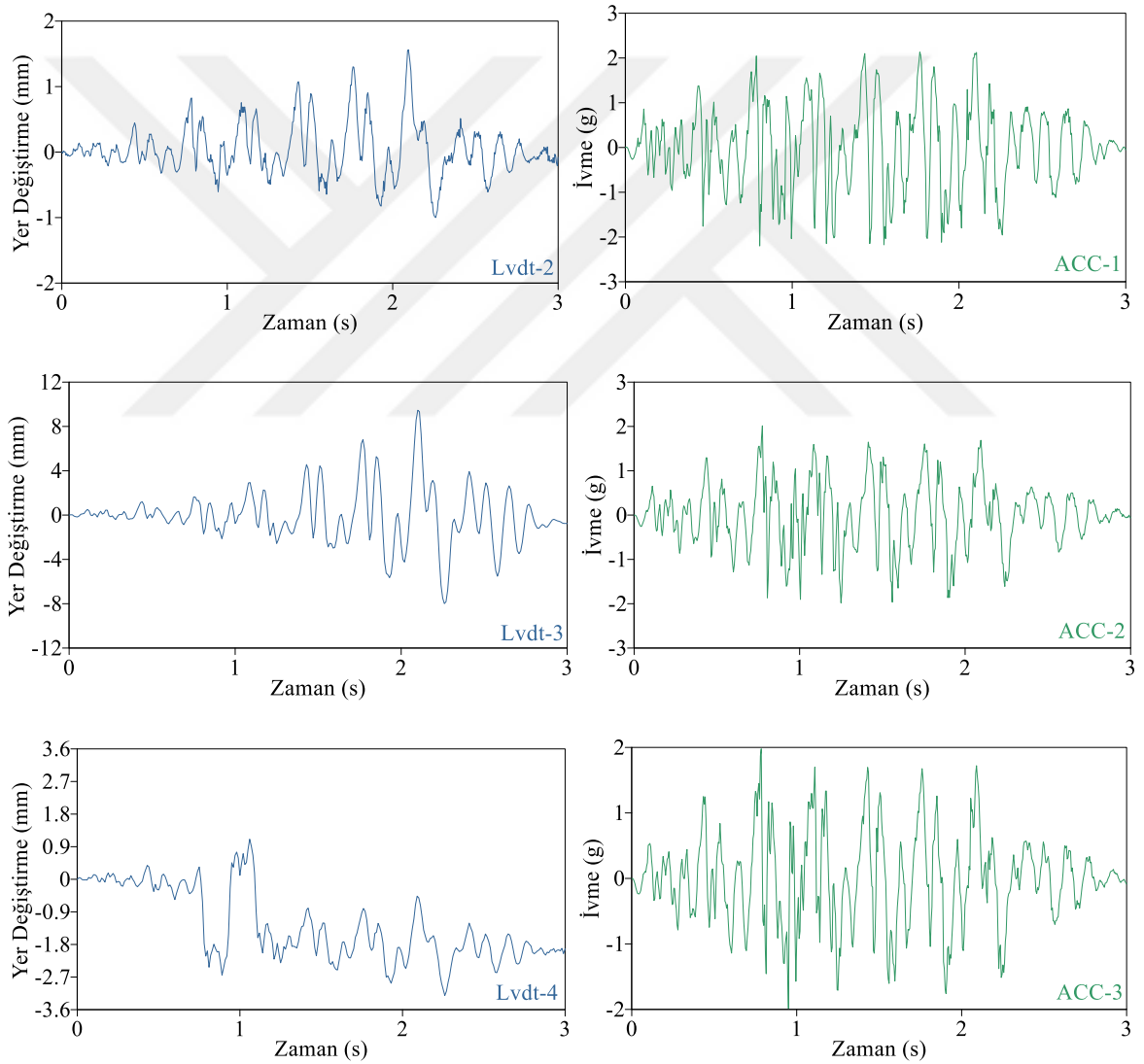
şekil 2.99. Parkfield depremi sonucunda elde edilen yerdeğiştirme ve ivme grafikleri

Sarsma masası deneylerinden üçüncü testte (0.7g Sinüs Dalgası) elde edilen rölatif yerdeğiştirme ve ivme değerleri Şekil 2.100'de sunulmaktadır. Bu testte yapı üzerinde herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. Deney sonuçları incelendiğinde maksimum rölatif yerdeğiştirme değeri köprü ortasında 1.04mm değerinde elde edilmiştir. Köprünün sağ ve sol kenarlarında yaklaşık 0.52mm ve 0.39mm değerinde rölatif yerdeğiştirme değerleri oluşmuştur. İvme sonuçları incelendiğinde köprünün ortasında, sağında ve solunda sırasıyla 1.39g, 1.21g ve 1.15g'lik ivme değerleri elde edilmiştir.



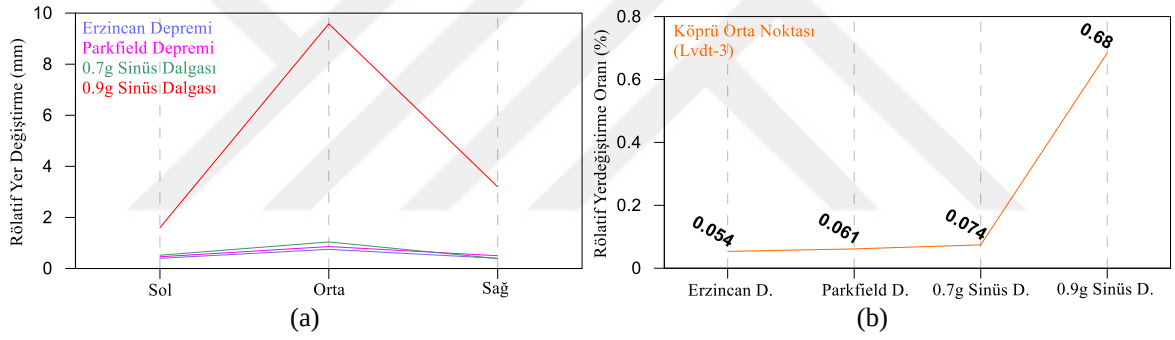
Şekil 2.100. 0.7g sinüs dalgası sonucunda elde edilen yerdeğiştirme ve ivme grafikleri

Sarsma masası deneylerinden dördüncü testte (0.9g Sinüs Dalgası) elde edilen rölatif yerdeğiştirme ve ivme değerleri şekil 2.101’de sunulmaktadır. Bu testte yapının korkulukları sökülmüş, kemer enine yönde açılmış, kemer ile tempan duvar arası açılmış ve tempan duvarlarda çatlaklar meydana gelmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde maksimum rölatif yerdeğiştirme değeri köprü ortasında 9.58mm değerinde elde edilmiştir. Köprünün sağ ve sol kenarlarında yaklaşık 1.6mm ve 3.2mm değerinde rölatif yerdeğiştirme değerleri oluşmuştur. İvme sonuçları incelendiğinde köprünün ortasında, sağında ve solunda sırasıyla 2.20g, 2.01g ve 2.00g’lik ivme değerleri elde edilmiştir.

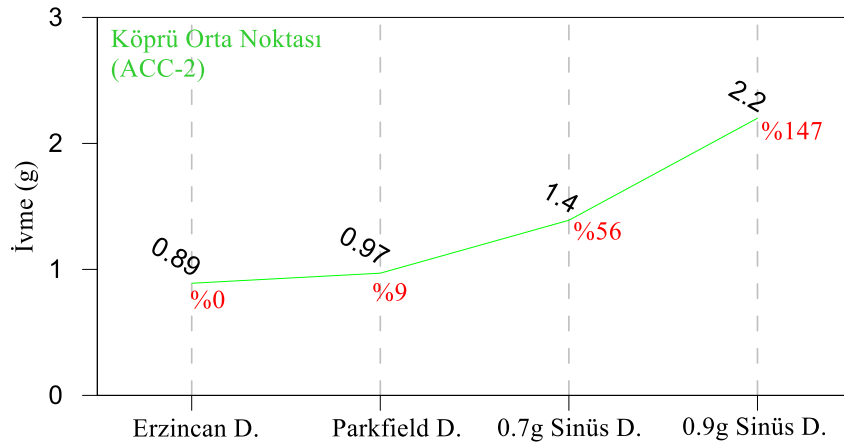


şekil 2.101. 0.9g sinüs dalgası testi sonucunda elde edilen yerdeğiştirme ve ivme grafikleri

Sarsma masası deneylerinin ardından elde edilen rölatif yerdeğiştirme sonuçları ve rölatif yerdeğiştirme oranları Şekil 2.102’de sunulmuştur. Şekilden de görüleceği üzere ilk üç testte elde edilen yerdeğiştirme değerleri son teste göre oldukça düşüktür. Buradan yapının gevrek olarak ani hasar gördüğü rahatlıkla söylenebilir. Ayrıca köprünün sol, orta ve sağ noktalarındaki yerdeğiştirmelerin sunulduğu grafik incelendiğinde köprünün son testte hafif burulma gerçekleştirdiği görülmektedir. Bu sonuç köprünün hasar görünüşlerinden (Şekil 2.97) de teyit edilebilir. Sarsma masası testlerine ait rölatif yerdeğiştirme oranları incelendiğinde köprünün %0.68’lik bir değerde ağır hasar aldığı görülmüştür. Köprünün orta noktasından (ACC-2) elde edilen ivme değerleri Şekil 2.103’te karşılaştırılmaktadır. Şekilden de görüleceği üzere uygulanan dinamik yük arttıkça köprü orta noktasında elde edilen ivme değeri artmaktadır. İlk test ile son test arasında %147’lik bir ivme artışı meydana geldiği görülmektedir.

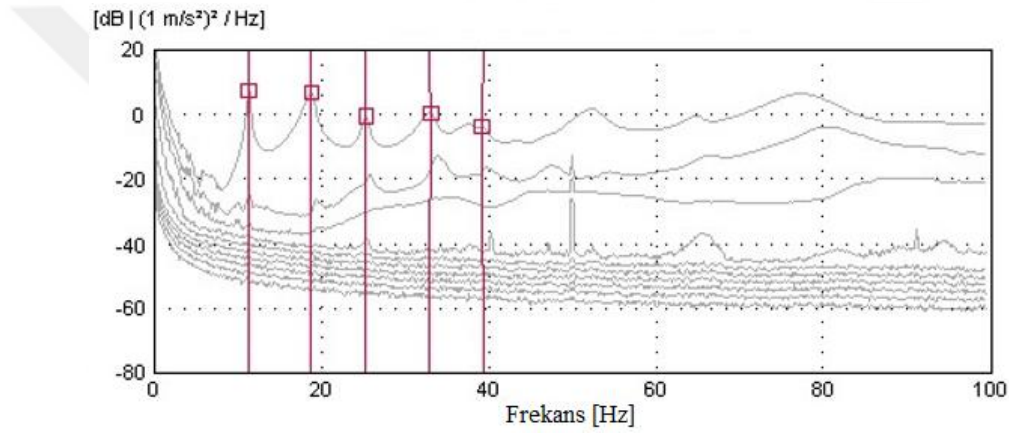


Şekil 2.102. Köprünün sol, orta ve sağ noktalarından elde edilen yerdeğiştirme değerleri (a) ve orta noktadan elde edilen yerdeğiştirme oranları (b)



Şekil 2.103. Köprünün orta noktasından elde edilen ivme değerleri ve yüzdesel artış oranları

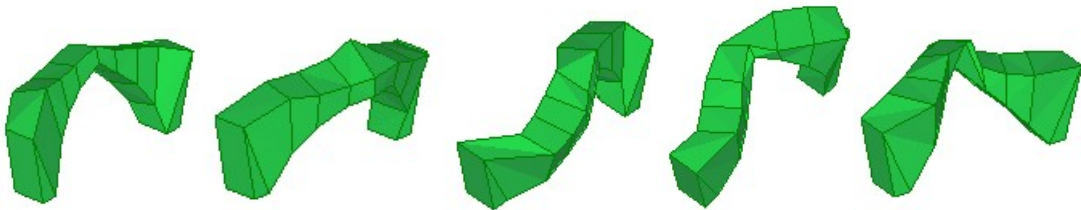
Kemer köprü modelinin her bir sarsma masası testi sonrasında Deneysel Modal Analiz testi uygulanmış ancak köprünün frekans değerleri ile sarsma masasının frekans değerleri birbirlerine çok yakın olduğu için istenilen verim elde edilememiştir. Bu nedenle köprünün önceki hasar durumları ile daha doğru bir karşılaştırma yapabilmek adına sarsma masası deneylerinin akabinde sarsma masasından yere indirilerek Deneysel Modal Analiz testi gerçekleştirilmiştir. Test sonucunda dinamik karakteristikler GFTAA yöntemine göre elde edilmiştir. GFTAA yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk grafikleri Şekil 2.104'te sunulmaktadır. Testler sonucunda elde edilen frekans ve sönüm oranları değerleri Tablo 2.62'de verilmektedir. Frekanslara ait mod şekilleri Şekil 2.105'te gösterilmektedir.



Şekil 2.104. Deprem hasarları sonrasında elde edilen spektral yoğunluk grafikleri

Tablo 2.62. Onarım sonrasında elde edilen frekans ve sönüm oranları değerleri

Mod Numarası	Deprem Hasarı Sonrası Durum		
	GFTAA	Sönüm oranı	Mod Şekli
1	11.41	1.20	1. Enine
2	18.73	2.53	Boyuna
3	25.33	1.38	Burulma
4	32.85	2.52	2. Enine
5	39.39	2.04	Düzlem d. Eğilme



Şekil 2.105. Deneysel ölçümler sonucunda elde edilen mod şekilleri

3. İRDELEMELER

Doktora tezi kapsamında mevcut tarihi yapılar ve laboratuvarında inşa edilen kemer köprü modeli üzerinde deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular tezin ikinci bölümünde sunulmaktadır. Tezin bu kısmında ise elde edilen sonuçların hasar tespiti yönünden değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir.

3.1. Mevcut Tarihi Yapılar Üzerinde Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Tez kapsamında farklı tarihi yapılar üzerinde Deneysel Modal Analiz testleri gerçekleştirilerek yapılara ait dinamik karakteristikler elde edilmiş, sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve sonlu eleman model güncellemesi gerçekleştirilmiştir. Mevcut yapılarda hasar tespiti yapabilmek için periyodik veya sürekli izleme gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ele alınan tarihi yapılar için başlangıç (hasarsız durum) deneysel dinamik karakteristikler elde edilmiş ancak bu süreç içerisinde yapılarda herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. Dolayısı ile bir hasar değerlendirmesi gerçekleştirilememiştir. Ancak ileriki süreçlerde yapının hasar alması veya yapının rijitliğine etki edecek farklı müdahaleler olması durumunda başlangıç deneysel veriler kullanılarak hasar tespiti gerçekleştirilebilecektir.

İncelenen tarihi yapıların sonlu eleman modelleri oluşturularak sonlu eleman model güncellemesi gerçekleştirilmiştir. Model güncelleme ile beraber tüm yapılarda deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar kabul edilebilir sınır olan %5'in altına düşürülmüştür. Böylece güncellenmiş sonlu eleman modelleri yardımıyla yapılara ait daha güvenilir sayısal analizler (statik, dinamik vb.) elde edilebilmektedir. Bu bağlamda; Cephanelik Binası (Altunışık vd., 2018b; Altunışık vd., 2018c), Çorum Saat Kulesi (Genç vd., 2019; Ertürk vd., 2021; Gunaydin vd., 2022a), Yavuz Selim Okulu (Günaydin vd., 2022b), İskenderpaşa Camii ve Minaresi (Günaydin, 2020; Genç vd., 2022), Santa Maria Kilisesi ve Misafirhanesi (Altunışık vd., 2022) ile ilgili literatürde farklı çalışmalar gerçekleştirilerek yapısal performansları araştırılmıştır.

3.2. Kemer Köprü Modeli Üzerinde Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

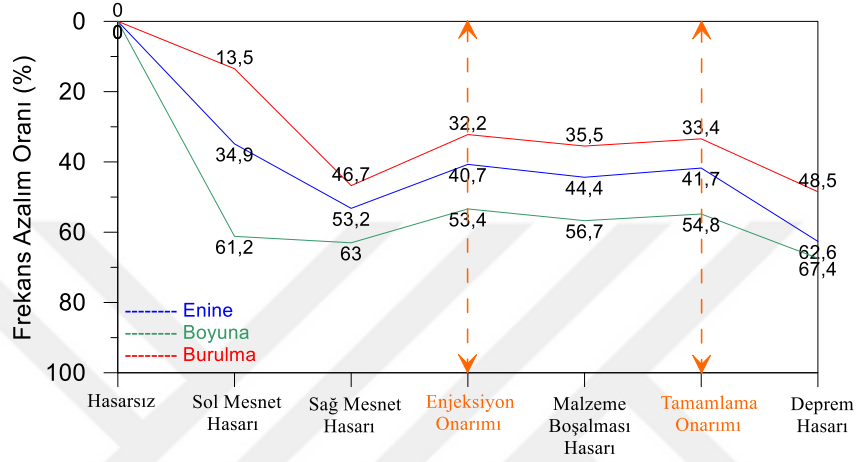
Tarihi yapılarda hasar tespiti ile ilgili çalışmaların gerçekleştirilebilmesi adına laboratuvar ortamında kemer köprü modeli inşa edilmiştir. İnşa edilen köprüye, mesnet çökmesi, malzeme boşalması ve deprem hasarı uygulayarak frekans ve mod şekilleri üzerinden hasar tespiti gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Kemer köprü modelinin hasar ile beraber bazı modların kaybolduğu ve yeni modların oluşmasından dolayı, daha doğru bir karşılaştırma yapabilmek adına sadece ilk üç mod (enine, boyuna ve burulma) dikkate alınmıştır.

3.2.1. Frekansların Değişimine Dayalı Hasar Tespiti

Dinamik karakteristikler yapıların kütle ve rijitliklerine bağlı olmalarından dolayı bu parametrelerdeki değişimlerde bize kütle veya rijitlik değişimi olduğunu ifade eder. Genellikle yapılarda hasar meydana gelse bile kütle değişimi ihmal edilebilecek seviyede olmaktadır. Bu nedenle dinamik karakteristiklerdeki değişim direk olarak rijitlik değişiminin bir göstergesi olarak hasarın varlığını ifade edebilir. Bu bağlamda kemer köprü modelinin farklı hasar durumları için elde edilen frekans değişimleri incelenerek yapıdaki hasarın varlığı tespit edilebilir (Hasar tespiti, Seviye-1). Kemer köprüünün farklı hasar durumlarında elde edilen frekans değişimleri enine, boyuna ve burulma modları için Tablo 3.1’de sunulmaktadır. Frekansların hasar ve onarımlar sonucundaki değişim oranları grafiği Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere mesnet hasarları sonrası yapı tüm modlarda yaklaşık %50’lik frekans düşüşü yaşanmıştır. Bu durum köprüünün ağır hasar durumuna geçtiğini göstermektedir. Köprüünün her iki tarafına uygulanan hasar ile kemerin hemen üzerinde mafsallaşma meydana gelmiş, kemerde hasar oluşmadığı için köprü ayakta kalabilmiştir. Enjeksiyon onarımı ile üç modda sırasıyla %14.5, %12.5 ve %9.6 oranlarında iyileşme sağlanmıştır. Malzeme boşalması hasarı sonrasında frekanslarda %5’in altında bir değişim gerçekleşmiştir. Bunun nedeni duvarlarda kullanılan harcın nispeten kuvvetli bir harç olmasına ve enjeksiyon uygulamasının köprü dolgusunda rijitlik artışı sağlamasına bağlanabilir. Tamamlama onarımı ile frekanslardaki iyileşmenin %5’in altında kalması bu durumu desteklemektedir. Köprü üzerindeki son uygulama olan deprem hasarı ile beraber üç modda sırasıyla %15.1, %20.9 ve %12.6 oranlarında frekans düşüşü gerçekleşmiştir.

Tablo 3.1. Köprünün farklı hasar durumlarında elde edilen frekans değerleri

Mod Şekli	Hasarsız (Hz)	Sol Mesnet Hasarı (Hz)	Sağ Mesnet Hasarı (Hz)	Enjeksiyon Onarımı (Hz)	Malzeme Boşalması Hasarı (Hz)	Tamamlama Onarımı (Hz)	Deprem Hasarı (Hz)
Enine	30.52	19.88	14.28	18.10	16.98	17.78	11.41
Boyuna	57.46	22.31	21.25	26.79	24.87	25.96	18.73
Burulma	49.18	42.55	26.19	33.34	31.73	32.74	25.33



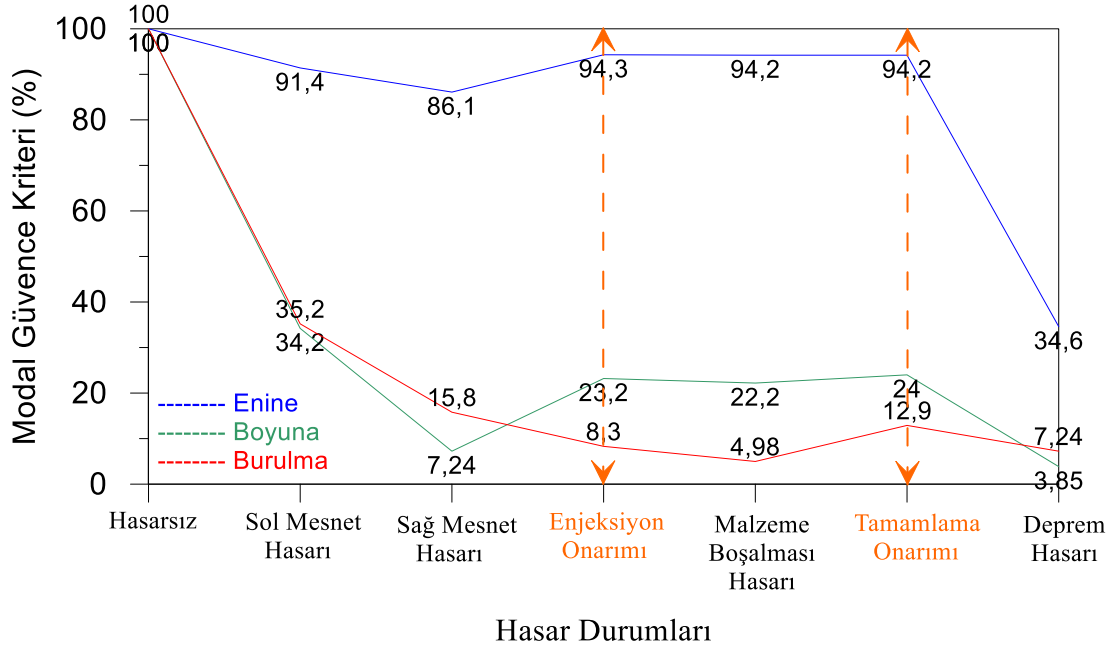
Şekil 3.1. Hasar ve onarım durumlarına göre frekansların değişimi

Elde edilen frekans sonuçlarına göre kemer köprüler üzerinde mesnet çökmesi yıkıcı bir etkiye sahipken malzeme boşalması durumlarında köprünün frekans değerlerinde önemli derecede hasar oluşturmamaktadır. Ancak bu sonuç tempan duvarlarda kullanılan harc kalitesi, dolgu malzemesinin kalitesi ve varsa bağlantı elemanları ile beraber ayrıca değerlendirilmesi gerekmektedir. Deprem hasarı ise yapı frekanslarında önemli derecede düşüşe sebebiyet verirken, oluşan hasar menba-mansap doğrultusundaki düzlem dışı harekete bağlıdır. Bu nedenle hasarsız köprülerin ve enine doğrultuda kenetlerle güçlendirilmiş kemerli köprülerin davranışı ayrıca incelenmelidir. Frekans sonuçlarına göre enjeksiyon iyi bir performans sağlasa da yapı rijitliğini geriye getiremezken tamamlama onarımı ile malzeme boşalmasından doğan rijitlik kaybı giderilebilmiştir.

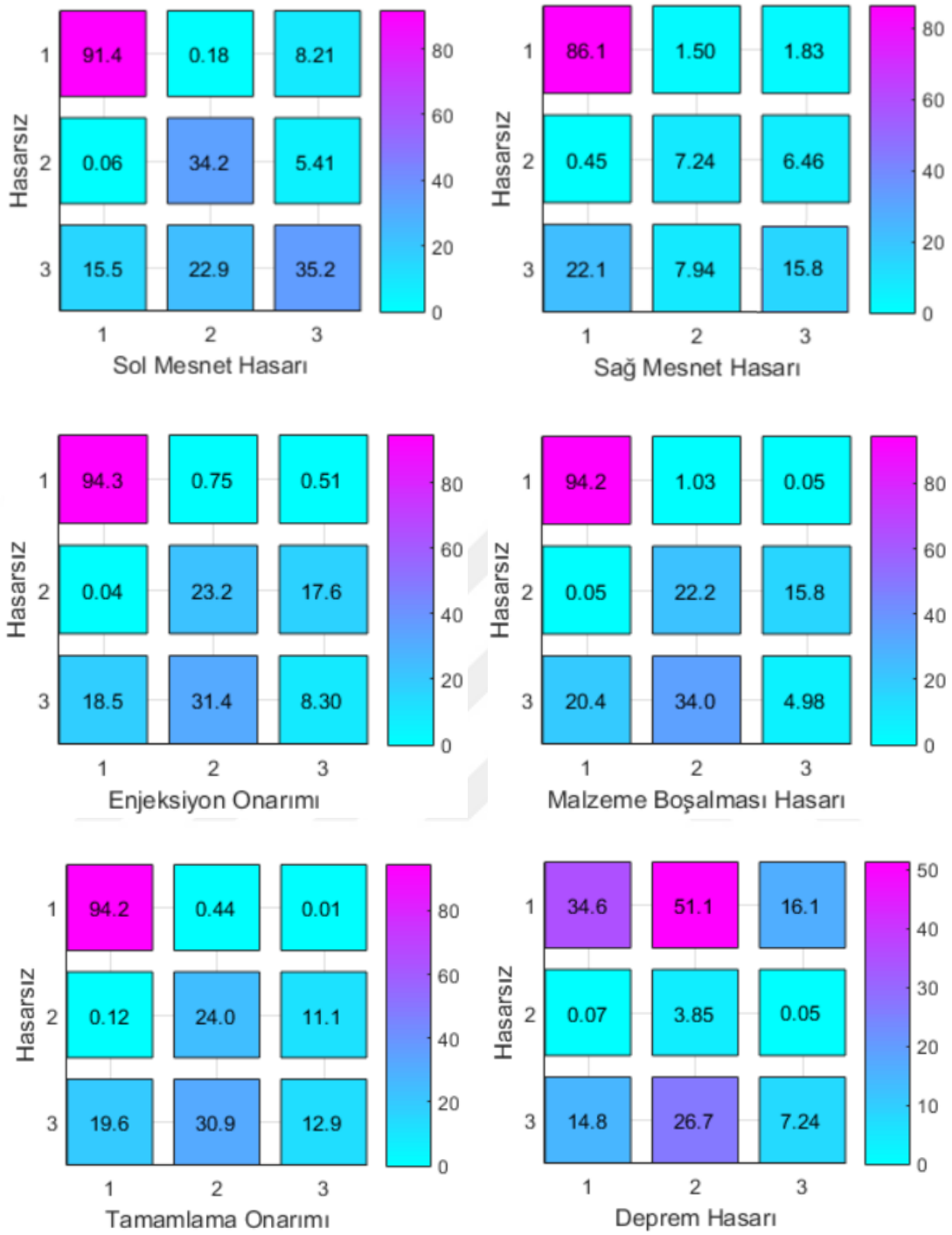
Frekans değişimleri yalnızca hasar nedeniyle oluşmaz. Nem ve sıcaklık değişimleri frekans değerleri üzerinde etkilidir (Xia vd., 2012; Wang vd., 2022). Yaklaşık 3 yıllık deneysel çalışma süreci içerisinde farklı mevsim koşulları oluşsa da deneylerin laboratuvar ortamında gerçekleştirilmesi nispeten ideal bir ortam oluşturduğu düşünülmektedir. Literatürde yapı rijitliğindeki değişimin, dolayısı ile hasarın bir göstergesi olarak doğal titreşim frekansının %5 oranında değişmesi gerektiği ifade edilmiştir (Salawu, 1997).

3.2.2. Mod Şekillerinin Değişimine Dayalı Hasar Tespiti

Mod şekillerinde meydana gelen değişimleri dikkate alarak hasarın varlığının (Hasar Tespiti, Seviye-1) elde edilebilmesi amacıyla MGK değerleri elde edilmiştir. MGK değeri Denklem (1.6) kullanılarak elde edilir. MGK değerinin 100'e yakın olması farklı durumlar için elde edilen mod şekilleri arasındaki benzerliğin iyi olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısıyla MGK değerlerindeki belirgin azalmalar hasarın varlığını ortaya koymaktadır. Kemer köprü modeli için MGK değerleri, hasarsız durum ve takip eden her bir durumda elde edilen mod şekilleri kıyaslanarak elde edilmiştir. Kemer köprüünün hasarsız durumunda gerçekleştirilen Deneysel Modal Analiz testlerinde köprü tabliyesi üzerinde 4 farklı ivmeölçer yerleşimi ile ölçüm alınmıştır. Daha sonraki ölçümlerde ise çok daha genel bir ivmeölçer yerleşimi ile ölçüm gerçekleştirilmiştir. Modlar arasında kıyaslama yapabilmek için hasarsız durumdaki ölçümlerden Ölçüm-2 sonuçları kullanılmış, hasar sonrası genel ölçümlerin Ölçüm-2'deki (Şekil 2.72) ivmeölçer noktalarına karşılık gelen ivmeölçer sonuçları kullanılmıştır. Artan hasarla birlikte azalan MGK değerleri Şekil 3.2'de sunulmuştur. Enine, boyuna ve burulma modları için elde edilen detaylı MGK grafikleri Şekil 3.3'te sunulmaktadır.



Şekil 3.2. MGK değerlerinin enine, boyuna ve burulma modları için yüzdesel değişimi



Şekil 3.3. Hasarsız duruma göre MGK değerlerinin değişimi

Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'ten de görüleceği üzere mod şekilleri hasarla beraber bozulmaktadır. Elde edilen MGK değerleri hasarın varlığını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Özellikle mesnet çökmesi ve deprem hasarı sonucunda MGK değerleri önemli ölçüde azalış göstermiştir. Ancak malzeme boşalması hasarı sonucunda mod şekillerinde

dikkate değer bir farklılaşma gerçekleşmemiştir. Bu durumları frekans sonuçlarında da görebilmekteyiz. MGK değerlerine göre mod şekillerindeki değişimler her bir mod için aşağıdaki gibi değerlendirilebilir:

- ❖ Enine Mod: Enine mod şekli deprem hasarına kadar önemli bir seviye olan %85'in üzerinde kalmıştır. Ancak deprem hasarı ile beraber köprünün hasarsız durumuna göre benzerlik oranı %34.6 değerine düşmüştür. Buradan deprem hasarından meydana gelen ağır hasarın enine moddaki değişimlerini göstermektedir.
- ❖ Boyuna Mod: Köprünün boyuna modu ilk mesnet hasarı ile beraber MGK değeri %34.2 değerine düşmüştür. İkinci mesnet hasarı ile beraber ise %7.24 gibi oldukça düşük bir değere inmiştir. Köprüye uygulanan mesnet çökmesi hasarları oldukça ağır hasar durumları olduğu bu sonuçlardan rahatlıkla gözükmektedir. Kemer tipi yapılar için en tehlikeli hasar tipi olan mafsallaşma oluşumu boyuna modları önemli derecede etkilemiş köprü dolgu malzemelerinin ve kemerin rijitliği ile ayakta kalabilmiştir. Ancak bu hasar durumunda köprü üzerinde meydana gelebilecek herhangi tekil veya yayılı yük köprünün çökmesine neden olabilir. Mesnet çökmesi hasarının boyuna moda etkileri frekans sonuçlarındaki %63'lük düşüşle de rahatlıkla gözlemlenebilmektedir. Enjeksiyon onarımı ile beraber boyuna moddaki MGK değeri %7.24'ten %23.2 değerine artmıştır. Bu durum yapıda meydana gelen ağır hasarın enjeksiyon ile geri döndürülemeyeceğini göstermektedir. Malzeme boşalması hasarının boyuna moda önemli bir etkisi olmamıştır. Ancak bu durum her zaman geçerli olmayabilir. Malzeme boşalmasının boyutları ve malzeme özellikleri bu durumu değiştirebilir. Tamamlama onarımı ile MGK değeri %24 seviyesine çıksa da deprem ile beraber boyuna modun hasarsız duruma göre benzerliği %3.85 gibi oldukça düşük değerlere inmiştir.
- ❖ Burulma Modu: Köprünün burulma modu ilk mesnet hasarı ile beraber MGK değeri %35.2 değerine düşmüştür. İkinci mesnet hasarı ile beraber ise %15.8 gibi oldukça düşük bir değere inmiştir. Mesnet çökmesi hasarları ile beraber köprünün iki tarafında meydana gelen ağır hasarlar burulma modundaki değişimle rahatlıkla gözükmektedir. Düşey yönde kemere kadar uzanan çatlaklar yapının burulma rijitliğini önemli derecede azaltmıştır. Enjeksiyon onarımı ile beraber burulma modundaki MGK değeri %8.3 değerine düşmüştür. Bunun nedeni olarak köprü inşasında dolgu malzemesinde mevcut homojen olmayan ve enjeksiyon ile heterojen şekilde doldurulmuş boşluklar olabilir. Malzeme boşalması hasarı MGK

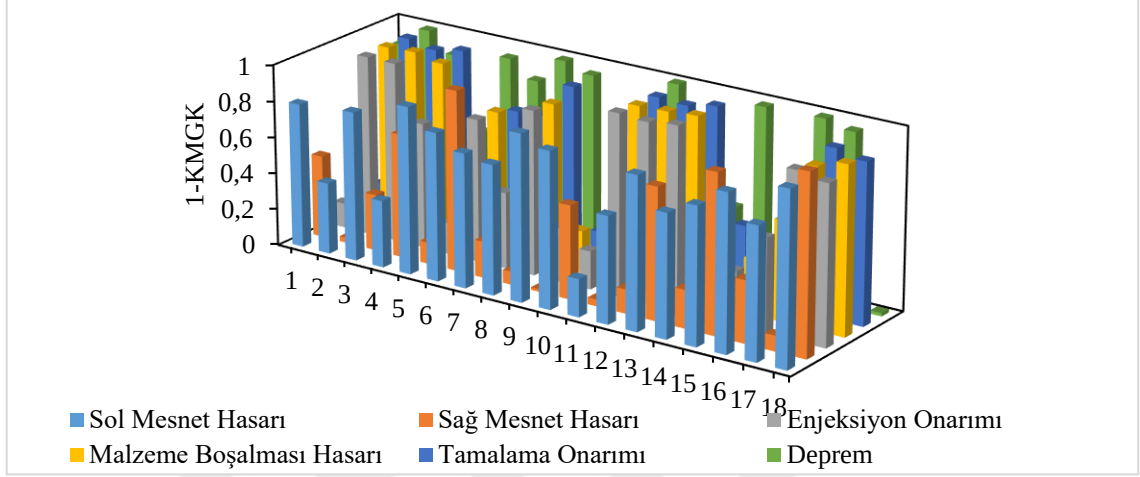
değerlerini %4.98 değerine düşürmüştür. Malzeme boşalması hasarında diğer modlarda önemli bir değişim olmamasına rağmen burulma modunda yaklaşık %50 bir düşüş gerçekleşmiştir. Dolayısı ile bu tür hasarın göstergesi olarak burulma modları takip edilebilir. Tamamlama onarımı ile MGK değeri %12.9 seviyesine çıksa da deprem ile beraber burulma modunun hasarsız duruma göre benzerliği %7.24 gibi oldukça düşük değerlere inmiştir.

Sonuç olarak mod şekillerine dayalı hasar tespit yöntemlerinden olan Modal Güvence kriteri hasarın varlığı hakkında önemli bir gösterge olduğu gözlemlenmiştir. Mesnet çökmesi hasarı ile köprüde oluşan düşey çatlaklar boyuna ve burulma modlarının MGK değerlerinin bir anda düşmesine neden olmuştur. Ayrıca deprem hasarı sonucunda yapının kemerinde açılma, tempan duvarlarında çatlaklar meydana gelmesi ile enine modun MGK değerleri ani düşerek hasarın varlığını göstermiştir. Köprü ayaklarında meydana gelen malzeme boşalmaları ile yapının burulma modunda düşüş meydana gelmiştir. Yapıda gerçekleştirilen enjeksiyon onarımı ve örgü tamamlama işlemi sonucunda elde edilen rijitlik kazanımı yine MGK değerlerinde yükselişe neden olmuştur.

Modal güvence kriteri yapıda meydana gelen hasarın modlar üzerindeki genel göstergesidir. Seviye-1 hasar tespiti, yani hasarın varlığının belirlemek amacıyla kullanımı uygundur. Ancak hasarın nerede meydana geldiğini (Seviye-2) belirlemede yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle hasarın yerlerini belirlemek amacıyla mod şekillerine dayalı hasar tespit yöntemlerinden bir diğeri olan Koordinat Modal Güvence Kriteri (KMGK) kullanılmıştır. KMGK değerleri Denklem (1.7) kullanılarak hasarsız ve hasarlı durumlardaki mod genliklerinden elde edilmiştir. Okur (2017), KMGK değerlerinde artan hasarla birlikte meydana gelen azalmaların oldukça küçük olması nedeniyle hatalı değerlendirmeler yapmamak ve hasarın meydana geldiği ölçüm noktasının açık bir biçimde tespit edilmesi için verileri, 1- KMGK değerleri üzerinden karşılaştırmıştır. Dolayısıyla 1- KMGK değerinin artması hasarın ilgili ölçüm noktasında oluştuğunu ifade etmektedir. Bu çalışmada da benzer şekilde değerlendirme yapılmıştır. Şekil 3.4'te hasar ve onarım durumlarından elde edilen 1- KMGK değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu değerler çevresel titreşim testlerinde köprü tabliyesi üzerinden alınan 6 ölçüm noktası için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Bu çalışmada da bu kriter incelenmiş ancak verimli sonuç alınamamıştır. Bunun nedeni yapının bir anda ağır hasar seviyesine geçmesidir. Şekil 3.4 incelendiğinde 1-KMGK değerleri yapıdaki hasarın varlığını bariz bir şekilde gösterirken hasarın konumunu elde

edememiştir. Genellikle kiriş, kolon gibi sabit enkesitli elemanlarda iyi sonuçlar verebilen bu yöntem, tarihi yapılar gibi oldukça değişken geometriye sahip yapılarda uygun sonuçlar veremeyebilmektedir.



Şekil 3.4. Köprü için 1-KMGK değerlerinin değişimi

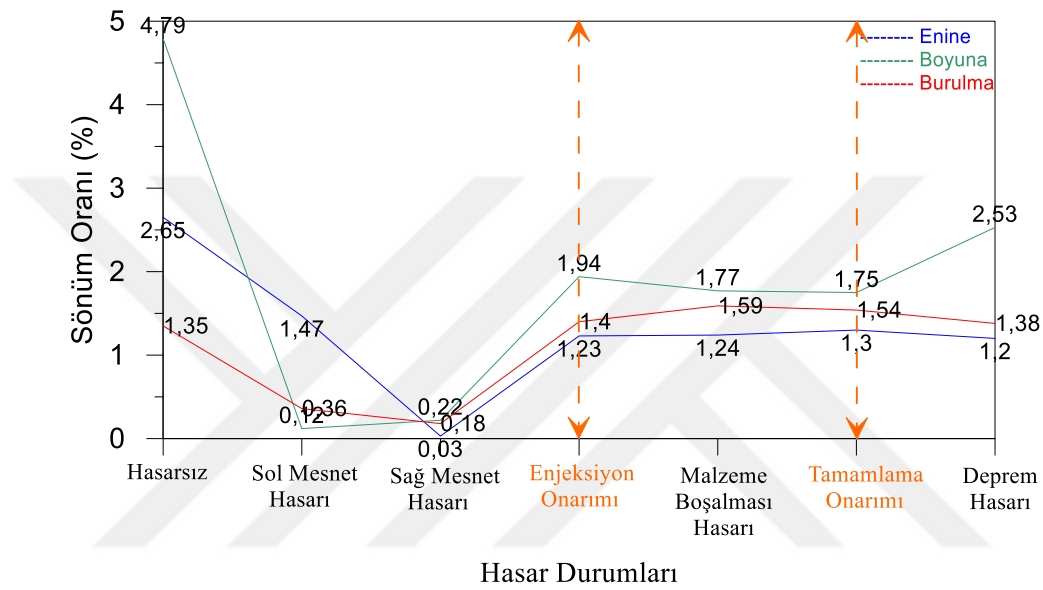
MGK ve KMGK ile ilgili literatürde oldukça fazla sayıda çalışma yapılmış ve etkinlikleri araştırılmıştır. Pandey vd. (1991) ve Radzienski vd. (2011), hem MAC hem de COMAC'ın hasarı erken dönemlerde tespit edemediğini gözlemlemiştir. Salawu ve Williams (1994), hem MGK hem de KMGK'ın hasara duyarlı olduğunu ancak hasarın yerini açıkça gösteremediğini vurgulamıştır. Bu çalışmada da MGK ve KMGK sonuçları incelendiğinde her iki yöntemin hasarın varlığını rahatlıkla belirlediği görülmüştür. Ancak düşük hasar seviyelerinde bu yöntemlerin etkinliği ayrıca değerlendirilmelidir. Hasarın yerinin belirlenmesi ile ilgili KMGK yöntemi yetersiz kalmıştır.

3.2.3. Sönüm Oranlarının Değişimine Dayalı Hasar Tespiti

Kemer köprü modeli üzerinde gerçekleştirilen Deneysel Modal Analiz testleri sonucunda elde edilen sönüm oranı değerleri Tablo 3.2'de sunulmaktadır. Her bir moda ait değişimler Şekil 3.5'te grafiksel olarak gösterilmiştir. Kemer köprü üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sönüm oranlarının hasar durumlarına bağlı olarak net bir değişim gözlemlenmemiştir.

Tablo 3.2. Köprünün farklı hasar durumlarında elde edilen sönüm oranı değerleri

Mod Şekli	Sönüm Oranları						
	Hasarsız (%)	Sol Mesnet Hasarı (%)	Sağ Mesnet Hasarı (%)	Enjeksiyon Onarımı (%)	Malzeme Boşalması Hasarı (%)	Tamamlama Onarımı (%)	Deprem Hasarı (%)
Enine	2.65	1.47	0.03	1.23	1.24	1.30	1.20
Boyuna	4.79	0.12	0.22	1.94	1.77	1.75	2.53
Burulma	1.35	0.36	0.18	1.40	1.59	1.54	1.38



Şekil 3.5. Deneyler sonucunda elde edilen sönüm oranlarının değişimi

Şekil 3.5 incelendiğinde sönüm oranlarının mesnet çökmesi hasarı sonucunda tüm modlarda düşüş yaşadığını, enjeksiyon onarımı ile yükseldiğini, malzeme boşalması hasarı ve tamamlama onarımı sonucunda önemli bir değişim yaşamadığını ancak deprem hasarı sonucunda boyuna modda artış yaşarken enine ve burulma modlarında düştüğü gözlemlenmiştir. Kemer köprü modeli üzerinde elde edilen sonuçlara göre sönüm oranlarının hasar ile beraber ilişkisi net bir şekilde gözlemlenememiştir. Ancak köprünün ağır hasar durumuna geçtiği mesnet çökmesi hasarında tüm modlarda sönüm oranlarının azaldığı ve onarımla yükseldiği söylenebilir. Çevresel titreşim testleri esnasında deney numunesinde oluşan farklı büyüklükteki uyarımların sönüm oranlarını etkileyebildiğini ve dolayısıyla sönüm oranında meydana gelen değişimlerin doğrudan hasar büyüklüğü ile ilişkilendirilemeyeceği Günaydın (2016) tarafından ifade edilmiştir. Bu bağlamda sönüm oranlarının net bir şekilde takip edilebilmesi için belirsiz uyarım sağlayan Çevresel Titreşim

Yöntemi yerine belirli bir girdi uyarımı sağlayan Zorlanmış Titreşim Yöntei kullanılabilir. Literatürdeki farklı çalışmalarda hasar ile beraber sönüm oranlarının arttığı da ifade edilmiştir. Dolayısı ile sönüm oranlarının hasar ile ilişkilendirilmesi konusunda daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.



3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında tarihi yığma yapıların Deneysel Modal Analiz yardımıyla dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi, sonlu eleman modellerinin oluşturulması, sonlu eleman model iyileştirmelerinin gerçekleştirilmesi ve hasar tespitlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla hazırlanan tez kapsamında cami, minare, kilise, bina, kule, köprü gibi mevcut tarihi yapılar ve Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yapı Sağlığı İzleme Laboratuvarı'nda inşa edilmiş ölçekli kemer köprü modeli üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Mevcut tarihi yapılar üzerinde deneysel modal analiz (titreşim) testleri yapılmış, sayısal modelleri ve model güncelleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Mevcut tarihi yapılarla ilgili yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmaktadır:

- Mevcut tarihi yapılardan; Cephanelik Binası, Çorum Saat Kulesi, Yavuz Selim Okul Binası, İskenderpaşa Camii ve Minaresi, Santa Maria Kilisesi ve Misafirhane Binası, Yeniköy Köprüsü tez kapsamında incelenmiştir.
- Titreşime dayalı hasar tespit yöntemlerinin başlangıç aşaması olan hasarsız (ilk-başlangıç) durumdaki dinamik karakteristikleri (doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranları) Deneysel Modal Analiz testleri ile elde edilmiştir. Dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde GFTAA ve SAB yöntemleri kullanılmıştır.
- Yapılara ait sonlu eleman modelleri üç boyutlu olarak oluşturulmuştur.
- Deneysel ve sayısal doğal frekanslar arasındaki farkları azaltmak amacıyla malzeme özellikleri üzerinden sonlu eleman model güncelleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bazı yapılarda otomatik bazı yapılarda manuel olarak gerçekleştirilen model güncelleme sonrası deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar %5'in altına düşürülmüştür.
- Yavuz Selim Okul binası duvarlarında ultrasonik dalga hızı testleri gerçekleştirilmiş ve duvarlara ait elastisite modülü ve birim hacim ağırlığı değerleri elde edilmiştir.

Mevcut yapılar üzerinde gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmektedir:

- Cephanelik binası dairesel yapıda olmasından dolayı 3 farklı deneysel ölçüm alınmıştır. Deneysel Modal Analiz testleri sonucunda elde edilen doğal frekans değerleri 5.32Hz-12.147Hz aralığında, sönüm oranları ise % 0.14-2.20 aralığında elde edilmiştir. Yapının mod şekilleri enine, boyuna ve burulma olarak elde edilmiştir. Cephanelik binasının üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Manuel model iyileştirme gerçekleştirilemeyen yapı için yerel-otomatik model iyileştirme ile deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar başlangıçtaki %14 olan değerden %0.54 değerinin altına düşürülmüştür.
- Çorum Saat Kulesi üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda doğal frekans değerleri 1.482Hz-9.991Hz aralığında, sönüm oranları ise % 0.35-1.87 aralığında elde edilmiştir. Yapının mod şekilleri 1. enine, 1. boyuna, 2. enine, 2. boyuna ve burulma modları olarak elde edilmiştir. Saat kulesinin üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve manuel model iyileştirme ile deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar başlangıçtaki %23.44 olan değerden %4.7 değerinin altına düşürülmüştür.
- Yavuz Selim Okul Binası üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda doğal frekans değerleri 3.57Hz-4.20Hz aralığında, sönüm oranları ise % 0.99-1.34 aralığında elde edilmiştir. Yapının mod şekilleri enine, boyuna ve burulma modları olarak elde edilmiştir. Okul binasının yığma duvarları üzerinde ultrasonik testler gerçekleştirilerek elastisite modülleri $4.48\text{E}8\text{-}3.68\text{E}9\text{ N/m}^2$ aralığında, birim hacim ağırlıkları ise $1.959\text{-}2475\text{ gr/cm}^3$ aralığında hesaplanmıştır. Okul binasının üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve manuel model iyileştirme ile deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar başlangıçtaki %23.3 olan değerden %4.7 değerinin altına düşürülmüştür.
- İskenderpaşa Camisi üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda doğal frekans değerleri 7.12Hz-11.02Hz aralığında, sönüm oranları ise % 0.26-1.45 aralığında elde edilmiştir. Yapının mod şekilleri enine, boyuna ve burulma modları olarak elde edilmiştir. Caminin üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve manuel model iyileştirme ile deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar başlangıçtaki %18.6 olan değerden %4.9 değerinin altına düşürülmüştür.
- İskenderpaşa Minaresi üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda doğal frekans değerleri 1.04Hz-7.15Hz aralığında, sönüm oranları ise % 0.26-2.43 aralığında elde edilmiştir. Yapının mod şekilleri 1. enine, 1. boyuna, 2. enine ve 2.

boyuna modları olarak elde edilmiştir. Minarenin üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve manuel model iyileştirme ile deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar başlangıçtaki %15.2 olan değerden %4.8 değerinin altına düşürülmüştür.

- Santa Maria Kilisesi üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda doğal frekans değerleri 4.46Hz-7.67Hz aralığında, sönüm oranları ise % 1.36-1.97 aralığında elde edilmiştir. Yapının mod şekilleri enine, boyuna ve burulma modları olarak elde edilmiştir. Kilisenin üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve manuel model iyileştirme ile deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar başlangıçtaki %34.8 olan değerden %2.2 değerinin altına düşürülmüştür.
- Santa Maria Misafirhanesi üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda doğal frekans değerleri 5.24Hz-7.43Hz aralığında, sönüm oranları ise % 0.35-2.32 aralığında elde edilmiştir. Yapının mod şekilleri enine, boyuna ve burulma modları olarak elde edilmiştir. Misafirhanenin üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve manuel model iyileştirme ile deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar başlangıçtaki %35.3 olan değerden %0.81 değerinin altına düşürülmüştür.
- Yeniköy Köprüsü üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda doğal frekans değerleri 8.21Hz-18.38Hz aralığında, sönüm oranları ise % 0.54-12.16 aralığında elde edilmiştir. Yapının mod şekilleri enine, boyuna, burulma ve düşey mod olarak elde edilmiştir. Köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve manuel model iyileştirme ile deneysel ve sayısal frekanslar arasındaki farklar başlangıçtaki %28.7 olan değerden %4.4 değerinin altına düşürülmüştür.

Mevcut tarihi yapılar üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda başlangıç (hasarsız) deneysel veriler elde edilerek hasar tespit uygulamalarının ilk basamağı oluşturulmuştur. Yapıların ileriki yıllarda muhtemel hasar senaryoları sonrasında tekrar edilecek deneysel ölçümler sonucunda hasar tespit işlemleri gerçekleştirilebilecektir.

Tarihi yapılarda hasar tespiti işlemlerini gerçekleştirebilmek adına Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yapı Sağlığı İzleme Laboratuvarı'nda Doğu Karadeniz'deki kemer köprüleri temsilen ölçekli kemer köprü modeli inşa edilmiş ve yapay hasarlar uygulanarak titreşime dayalı hasar tespit işlemleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar modeli üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar aşağıda sunulmaktadır:

- Ölçekli kemer köprü modelinini kemer kısmı andezit kesme taştan, tempan duvarlar bazalt kırma taştan ve dolgu malzemeleri moloz taş kullanılarak inşa edilmiştir. Hidrolik kireç katkılı harç yapının inşasında kullanılmıştır.
- Köprü modeli üzerinde mesnet oturması, köprü ayaklarında malzeme boşalması ve deprem hasarı uygulanmıştır.
- Mesnet çökmesi hasarı sonrasında enjeksiyon, malzeme boşalması hasarı sonrasında ise örgü tamamlama onarımları gerçekleştirilmiştir.
- Köprü üzerinde gerçekleştirilen hasar ve onarım uygulamaların etkinlikleri, Deneysel Modal Analiz testleri yardımıyla dinamik karakteristikler üzerinden incelenmiştir.
- Köprü üzerinde deprem hasarının incelenebilmesi için sarsma masası kullanılmış ve Erzincan, Parkfield, 0.7g ve 0.9g sinüs dalgaları kullanılmıştır.

Kemer köprü üzerinde gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmektedir:

- Deneyler sonucunda doğal frekanslarda elde edilen değişimler aşağıda sıralanmaktadır:
 - Köprüde mesnet hasarları sonrası enine, boyuna ve burulma modlarında yaklaşık %50'lik frekans düşüşü yaşanmış ve köprü ağır hasar durumuna geçmiştir.
 - Enjeksiyon onarımı ile üç modun frekanslarında sırasıyla %14.5, %12.5 ve %9.6 oranlarında iyileşme sağlanmıştır.
 - Malzeme boşalması hasarı sonrasında köprü frekanslarında %5'in altında bir azalış gerçekleşmiştir.
 - Tamamlama onarımı sonrasında köprü frekanslarındaki iyileşme %5'in altında kalmıştır.
 - Deprem hasarı ile beraber enine, boyuna ve burulma modlarında sırasıyla %15.1, %20.9 ve %12.6 oranlarında frekans düşüşü gerçekleşmiştir.
- Deneyler sonucunda mod şekillerindeki değişimler MGK ve KMGK kriterleri ile incelenmiştir. Mod şekillerindeki değişimler enine, boyuna ve burulma modları üzerinden takip edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır:
 - Enine Mod: Enine mod şekli deprem hasarına kadar önemli bir seviye olan %85'in üzerinde kalmıştır. Ancak deprem hasarı ile beraber köprünün hasarsız durumuna göre benzerlik oranı %34.6 değerine düşmüştür. Buradan deprem

hasarından meydana gelen ağır hasarın enine moddaki değişimlerini göstermektedir.

- Boyuna Mod: Köprünün boyuna modu ilk mesnet hasarı ile beraber MGK değeri %34.2 değerine düşmüştür. İkinci mesnet hasarı ile beraber ise %7.24 gibi oldukça düşük bir değere inmiştir. Köprüye uygulanan mesnet çökmesi hasarları oldukça ağır hasar durumları olduğu bu sonuçlardan rahatlıkla gözükmektedir. Enjeksiyon onarımı ile beraber boyuna moddaki MGK değeri %7.24'ten %23.2 değerine artmıştır. Bu durum yapıda meydana gelen ağır hasarın enjeksiyon ile geri döndürülemeyeceğini göstermektedir. Tamamlama onarımı ile MGK değeri %24 seviyesine çıksa da deprem ile beraber boyuna modun hasarsız duruma göre benzerliği %3.85 gibi oldukça düşük değerlere inmiştir.
 - Burulma Modu: Köprünün burulma modu ilk mesnet hasarı ile beraber MGK değeri %35.2 değerine düşmüştür. İkinci mesnet hasarı ile beraber ise %15.8 gibi oldukça düşük bir değere inmiştir. Enjeksiyon onarımı ile beraber burulma modundaki MGK değeri %8.3 değerine düşmüştür. Malzeme boşalması hasarı MGK değerlerini %4.98 değerine düşürmüştür. Tamamlama onarımı ile MGK değeri %12.9 seviyesine çıksa da deprem ile beraber burulma modunun hasarsız duruma göre benzerliği %7.24 gibi oldukça düşük değerlere inmiştir.
 - KMGK kriteri sonuçları ile hasarın varlığı tespit edilmiş ancak hasarın yeri tespit edilememiştir. Bunun nedeni yapının bir anda ağır hasar seviyesine geçmesidir.
- Kemer köprü modeli üzerinde elde edilen sonuçlara göre sönüm oranlarının hasar ile beraber ilişkisi net bir şekilde gözlemlenememiştir. Ancak deprem hasarı hariç sönüm oranlarının hasar ile beraber düştüğü, onarım ile beraber yükseldiği gözlemlenmiştir.

Kemer köprü ile ilgili elde edilen sonuçlara göre mesnet çökmesi bu tür yapılarda önemli bir hasar nedeni olduğu gözlemlenmiştir. Köprü ayaklarında gerçekleşen malzeme boşalması hasarı ise köprü davranışına önemli bir etkisi olmamıştır. Ağır hasarlı fakat basit onarımdan geçmiş tarihi köprülerde deprem hasarı ise oldukça etkilidir. Ancak hasarsız durumdaki kemer köprülerin deprem davranışları ile ilgili böyle bir çıkarım yapmak doğru olmayabilir.

Kemer köprülerin geleneksel malzemelerle güçlendirilmesi ile ilgili elde edilen sonuçlar incelendiğinde enjeksiyon onarımının köprü rijitliğini artırdığı gözlemlenmiştir. Ancak ağır hasarlı durumdaki bir köprüyü hasarsız durumuna döndürmede başarısız olduğu

söylenbilir. Tamamlama onarımının ise malzeme boşalmasındaki rijitlik kaybını giderdiği gözlemlenmiştir.

Kemer köprü üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda yapıda oluşan hasarın varlığının (Hasar tespiti, Seviye-1) dinamik karakteristikler üzerinden rahatlıkla takip edilebileceği söylenbilir. Ancak hasarın konumu ile ilgili net bir veri elde edilememiştir. Dolayısı ile bu kapsamda daha fazla çalışmanın yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Deneysel çalışmalar ve elde edilen sonuçlar ışığında konu ile alakalı yapılan öneriler aşağıda sunulmuştur:

- ❖ Tarihi yapılarda hasarın varlığının tespiti ile ilgili Deneysel Modal Analiz test sonuçları oldukça yararlı olmaktadır. Ancak hasar bölgesinin tespiti için daha fazla sayıda ivmeölçere ihtiyaç duyulabilir. Bu durum hem uygulamada zor hem pahalı olması nedeniyle hasar bölgesinin tespiti için sonlu eleman yerel model güncelleme işlemleri daha efektif bir çözüm olarak kullanılabilir.
- ❖ Bu çalışmada kullanılan kesme taşlar taş kesme makinesi ile boyutlandırılmıştır ve yüzeyleri pürüzsüzdür. Gerçek tarihi yapılarda kullanılan taşların ise yüzeyleri daha pürüzlü olması nedeniyle harç ile aderansı yüksek olmaktadır. Bu bağlamda kesme taşların yüzey pürüzlülüğüne göre incelenmesi faydalı olacaktır.
- ❖ Bu çalışmada kenet ve zıvana gibi metal bağlantı elemanları kullanılmamıştır. Bu tür bağlantı elemanları kullanılarak tarihi köprüler ayrıca değerlendirilebilir.
- ❖ Tarihi kemer köprüler genellikle su taşkınları nedeniyle hasar görmektedir. Bu tür köprülerin su taşkınları yönünden yapısal davranışları incelenebilir.

4. KAYNAKLAR

- Abdo, M., 2014. Structural Health Monitoring, History, Applications and Future, A Review Book. Open Science Publishers, ABD, ISBN: 978-1-941926-07-9.
- Abu-Haifa, M. ve Lee, S.,J., 2022. Image-Based Modeling-to-Simulation of Masonry Walls, Journal of Architectural Engineering, 28, 4, 06022001.
- Açııcı, F.K., 2017. İskender Pasha Mosque and Külliye (Turkish-Ottoman Social Complex) as a Turkish Era Structure, International Refereed Journal of Design and Architecture, 10, 275-289.
- Ahunbay, Z., 1988. Mimar Sinan Yapılarında Kullanılan Yapım Teknikleri ve Malzeme, Mimarbaşı Koca Sinan: Yaşadığı Çağ ve Eserleri, İstanbul, 531- 538.
- Ahunbay, Z., 2019. Kültür Mirasını Koruma İlke ve Teknikleri. YEM Yayınları, İstanbul.
- Alaboz. M., 2009. Dynamic Identification and Modal Updating of St. Torcato Church, Yüksek Lisans Tezi, Minho Üniversitesi, Portekiz.
- Ali, A., 2016. Strengthening Masonry for Seismic Actions in Developing Countries, Doktora Tezi, Manchester Üniversitesi, İngiltere.
- Ali, L., Khan, W. ve Chaiyasarn, K., 2019. Damage Detection and Localization in Masonry Structure Using Faster Region Convolutional Networks, GEOMATE Journal, 17, 59, 98-105.
- Aloisio, A., Antonacci, E., Fragiaco, M. ve Alaggio, R., 2021. The Recorded Seismic Response of the Santa Maria Di Collemaggio Basilica to Low-Intensity Earthquakes, International Journal of Architectural Heritage, 15, 1, 229-247.
- Altunışık, A.,C., 2010. Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Altunışık A.,C., Bayraktar A., Sevim B. ve Birinci F., 2011. Vibration-Based Operational Modal Analysis of the Mikron Historic Arch Bridge After Restoration, Civil Engineering and Environmental Systems, 28, 247-259.
- Altunisik, A.,C., Bayraktar, A. ve Genc, A.,F., 2016a. A Study on Seismic Behaviour of Masonry Mosques after Restoration, Earthquakes and Structures, 10, 6, 1331-1346.
- Altunışık, A.,C., Adanur, S., Genç., A.,F., Günaydın, M. ve Okur, F.,Y., 2016b. Non-destructive Testing of an Ancient Masonry Bastion, Journal of Cultural Heritage, 22, 1049-1054.

- Altunisik, A.,C., Adanur, S., Genc, A.,F., Gunaydin, M. ve Okur, F.,Y., 2017. An Investigation of the Seismic Behaviour of an Ancient Masonry Bastion Using Non-Destructive and Numerical Methods, Experimental Mechanics, 57, 2, 245-259.
- Altunişik A.,C., Genç A.,F., Günaydin M., Adanur S. ve Okur F.,Y., 2018a. Ambient Vibration-Based System Identification of a Medieval Masonry Bastion for Health Assessment using Nonlinear Analyses, International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation, 19, 107-124.
- Altunişik A.,C., Genç A.,F., Günaydin M., Okur F.,Y. ve Karahasan O.,Ş., 2018b. Dynamic Response of a Historical Armory Building Using the Finite Element Model Validated by The Ambient Vibration Test, Journal of Vibration and Control, 24, 5472-5484.
- Altunişik A.,C., Okur F.,Y., Genç A.,F., Günaydin M. ve Karahasan O.,Ş., 2018c. Automated Model Updating Effect on the Linear and Nonlinear Dynamic Responses of Historical Masonry Structures, Experimental Techniques, 42, 605-621.
- Altunişik A.,C., Okur F.,Y., Genç A.,F., Günaydin M. ve Adanur S., 2018d. Automated Model Updating of Historical Masonry Structures Based on Ambient Vibration Measurements, Journal of Performance of Constructed Facilities, 32, 04017126.
- Altunişik A.,C., Karahasan O.,Ş., Okur F.,Y., Kalkan E. ve Özgan K., 2018e. Finite Element Model Updating and Dynamic Analysis of a Restored Historical Timber Mosque Based on Ambient Vibration Tests, Journal of Testing and Evaluation, 47, 212-225.
- Altunişik, A.,C., Genç, A.,F., Ertürk, E., Günaydin, M., Okur, F.,Y. ve Sevim, B., 2022. Soil–Structure Interaction and Earthquake Input Models Effect on the Structural Response of the Santa Maria Church and Guesthouse Building, Journal of Earthquake Engineering, 1-32.
- Anastasi, G., Re, G.,L. ve Ortolani, M., 2009. WSNs for Structural Health Monitoring of Historical Buildings, 2nd Conference on Human System Interactions, IEEE, 574-579.
- Andronopoulos, B., 1976. The Stability of the Rock. Measures to be Taken, The Acropolis, 13-18.
- Angelini, M.,G., Baiocchi, V., Costantino, D. ve Garzia, F., 2017. Scan to BIM for 3D Reconstruction of the Papal Basilica of Saint Francis in Assisi in Italy, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 22-24 Mayıs, Floransa, İtalya.
- Angotti, F., Vignoli, A., Giuseppetti, G. ve Panzeri, P., 1992. Experimental Evaluation of the Dynamic Behaviour of a Stone Masonry Building Causing Progressive Damage, 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, İspanya.
- ANSYS 2016. Swanson Analysis System. ABD.
- Anzani, A., Garavaglia, E. ve Binda, L., 2009. Long-term Damage of Historic Masonry: A Probabilistic Model, Construction and Building Material, 23, 713–24.

- Aoki, T., Sabia, D. ve Rivella, D., 2008. Influence of Experimental Data and FE Model on Updating Results of a Brick Chimney, Advances in Engineering Software, 39, 4, 327-335.
- Araiza, J.,C., 2003. Dynamic Assessment of Structural Building Components, Doktora Tezi, Katalonya Teknik Üniversitesi, İspanya.
- Aras, F., Krstevska, L., Altay, G. ve Tashkov, L., 2011. Experimental and Numerical Modal Analyses of a Historical Masonry Palace, Construction and Building Materials, 25, 1, 81-91.
- Armstrong, D., Sibbald, A., Fairfield, C. ve Forde, M., 1995. Modal Analysis for Masonry Arch Bridge Spandrel Wall Separation Identification, NDT and E International, 28, 6, 377-386.
- Atamturktur, S., Pavic, A., Reynolds, P. ve Boothby, T., 2009. Full_Scale Modal Testing of Vaulted Gothic Churches: Lessons Learned, Experimental Techniques, 33, 4, 65-74.
- Azzara, R.,M., Girardi, M., Iafolla, V., Lucchesi, D.,M., Padovani, C. ve Pellegrini, D., 2021. Ambient Vibrations of Age-Old Masonry Towers: Results of Long-Term Dynamic Monitoring in the Historic Centre of Lucca, International Journal of Architectural Heritage, 15, 1, 5-21.
- Bakhshi, A., Ghannad, M., Yekrangnia, M. ve Masaali, H., 2017. Shaking Table Tests on Dome-Roof Adobe Houses, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 46, 3, 467-490.
- Bal, İ.,E., Dais, D., Smyrou, E. ve Sarhosis, V., 2021. Monitoring of a Historical Masonry Structure in Case of Induced Seismicity, International Journal of Architectural Heritage, 15, 1, 187-204.
- Bani-Hani, K.,A., Zibdeh, H.,S. ve Hamdaoui, K., 2008. Health Monitoring of a Historical Monument in Jordan Based on Ambient Vibration Test, Smart Structures and Systems, 4, 2, 195-208.
- Barsocchi, P., Bartoli, G., Betti, M., Girardi, M., Mammolito, S., Pellegrini, D. ve Zini, G., 2021. Wireless Sensor Networks for Continuous Structural Health Monitoring of Historic Masonry Towers, International Journal of Architectural Heritage, 15, 1, 22-44.
- Bassoli, E., Vincenzi, L., D’Altri, A.,M., de Miranda, S., Forghieri, M. ve Castellazzi, G., 2018. Ambient Vibration-Based Finite Element Model Updating of an Earthquake-Damaged Masonry Tower, Structural Control and Health Monitoring, 25, 5.
- Bayraktar A., Altunişik A.,C., Sevim B., Türker T., Akköse M. ve Coskun N., 2008. Modal Analysis, Experimental Validation, and Calibration of a Historical Masonry Minaret, Journal of Testing and Evaluation, 36, 516-524.

- Bayraktar A., Türker T., Sevim B., Altunişik A.,C. ve Yildirim F., 2009a. Modal Parameter Identification of Hagia Sophia Bell-Tower via Ambient Vibration Test, Journal of Testing and Evaluation, 28, 37-47.
- Bayraktar A., Birinci F., Altunişik A.,C., Türker T. ve Sevim B., 2009b. Finite Element Model Updating of Senyuva Historical Arch Bridge Using Ambient Vibration Tests, Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 4, 177-185.
- Bayraktar A., Altunişik A.,C., Birinci F., Sevim B. ve Türker T., 2010. Finite-Element Analysis and Vibration Testing of a Two-Span Masonry Arch Bridge, Journal of Performance of Constructed Facilities, 24, 46-52.
- Bayraktar A., Altunişik A.,C., Sevim B. ve Türker T., 2011. Seismic Response of a Historical Masonry Minaret Using a Finite Element Model Updated with Operational Modal Testing, Journal of Vibration and Control, 17, 129-149.
- Bayraktar, A., Türker, T. ve Altunişik, A.,C., 2015. Experimental Frequencies and Damping Ratios for Historical Masonry Arch Bridges, Construction and Building Materials, 75, 234-241.
- Bayülke, N., 1992. Yığma Yapılar, Ankara.
- Bendat, J.,S. ve Piersol, A.,G., 2004. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 3th Edition, John Wiley and Sons, ABD.
- Benedetti, D., Carydis, P. ve Pezzoli, P., 1998. Shaking Table Tests on 24 Simple Masonry Buildings, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 27, 1, 67-90.
- Bensalem, A., Fairfield, C. ve Sibbald, A., 1995. Non-Destructive Testing for Arch Bridge Assessment, 1st International Conference on Arch Bridges, İngiltere, 459-468.
- Bensalem, A., Ali-Ahmed, H., Fairfield, C.,A. ve Sibbald, A., 1998. Non-Destructive Testing as a Tool for Detection of Gradual Safety Factor Deterioration of Loaded Arches, Arch Bridges, Rotterdam, Hollanda, 271-279.
- Beyen, K., 2008. Structural Identification for Post-Earthquake Safety Analysis of the Fatih Mosque After the 17 August 1999 Kocaeli Earthquake, Engineering Structures, 308, 2165-2184.
- Binda, L., Baronio, G., Gavarini, C., De Benedictis, R. ve Tringali, S., 1999. Investigation on Materials and Structures for the Reconstruction of the Partially Collapsed Cathedral of Noto (Sicily). Sixth International Conference on Structural Studies, Repairs and Maintenance of Historical Buildings, STREMAH 99, Dresden, Germany, 323-32.
- Binda, L., Saisi, A. ve Tiraboschi, A., 2000. Investigation Procedures for the Diagnosis of Historic Masonries, Construction and Building Material, 14, 4, 199-233.

- Birinci, F., 2010. Taş Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Blondet, J.,M., Clough, R.,W. ve Maphin, S.,A., 1980. Evaluation of Shaking Table Test Program on Response Behavior of a Two Story Reinforced Concrete Frame, Rapor No. UCB/EERC-80/42, EERC, Kaliforniya Üniversitesi, Berkeley, Kaliforniya, ABD.
- Bongiovanni, G., Buffarini, G., Clemente, P. ve Saitta, F., 2021. Time and Frequency Domain Analyses in The Experimental Dynamic Behaviour of the Marcus Aurelius' Column, International Journal of Architectural Heritage, 15, 1, 64-78.
- Boscato, G., Rocchi, D. ve Russo, S., 2012. Anime Sante Church's Dome after 2009 L'Aquila Earthquake, Monitoring and Strengthening Approaches, Advanced Materials Research, 446, 3467–3485.
- Boscato, G., Ceravolo, R., Pecorelli, M.,L., Ponzalino, S., Russo, S. ve Zanotti F.,L., 2013. Sensitivity Analysis of Damaged Monumental Structures: The Example of S. Maria Del Suffragio in L'Aquila, AIMETA Kongresi, Torino, İtalya, 1-10.
- Boscato, G., Ceravolo, R., Zanotti F.,L. ve Russo, S., 2015. Global Sensitivity-Based Model Updating for Heritage Structure, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 30, 8, 620–635.
- Boscato, G., Dal Cin, A., Ientile, S. ve Russo, S., 2016. Optimized Procedures and Strategies for the Dynamic Monitoring of Historical Structures, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 6, 2, 265-289.
- Brencich, A. ve Sabia, D., 2008. Experimental Identification of a Multi-Span Masonry Bridge: The Tanaro Bridge, Construction and Building Material, 22, 2087-2099.
- Cabboi, A., Gentile, C. ve Saisi, A., 2017. From Continuous Vibration Monitoring to FEM-Based Damage Assessment: Application on a Stone-Masonry Tower, Construction and Building Materials, 156, 252-265.
- Caetano, E., 2000. Dynamic of Cable-stayed Bridges: Experimental Assessment of Cable-Structure Interaction, Doktora Tezi, Engineering Faculty of University of Porto, Portekiz.
- Candeias, P., Costa, A.,C. ve Coelho, E., 2004. Shaking Table Tests of 1:3 Reduced Scale Models of Four Story Unreinforced Masonry Buildings, 13th World Conf. on Earthquake Eng, Vancouver, Kanada, 1-10.
- Capecchi, D., Vestroni, F. ve Antonacci, E., 1990. Experimental Study of Dynamic Behaviour of an Old Masonry Building, 9th European Conf. on Earth. Eng., Moskova, Rusya Federasyonu.

- Carden, E.,P. ve Fanning, P., 2004. Vibration Based Condition Monitoring: a Review, Structural Health Monitoring, 3, 4, 355-377.
- Carni, D.,L., Scuro, C., Olivito, R.,S., Lamonaca, F., Ali, G. ve Cala, S., 2022. Structural Health Monitoring System Design for Historical Heritage Building. *Journal of Physics: Conference Series*, 1, IOP Publishing, 1-6.
- Casarin, F., 2006. Structural Assessment and Seismic Vulnerability Analysis of a Complex Historical Building, *Doktora Tezi*, Trento Üniversitesi/ Padova Üniversitesi, İtalya.
- Casarin, F. ve Modena, C., 2006. Structural Assessment and Seismic Vulnerability Analysis of the Reggio Emilia Cathedral, Italy, Structural Analysis of Historical Constructions, 1263-1270.
- Casarin, F. ve Modena, C., 2008. Seismic Assessment of Complex Historical Buildings: Application to Reggio Emilia Cathedral, Italy, International Journal of Architectural Heritage, 2, 3, 304-327.
- Casciati, S. ve Al-Saleh, R., 2010. Dynamic Behavior of a Masonry Civic Belfry Under Operational Conditions, Acta Mechanica, 215, 211–24.
- Caselles, O., Clapes, J., Roca, P. ve Elyamani, A., 2012. Approach to Seismic Behavior of Mallorca Cathedral. 15th World Conference of Earthquake Engineering, Lizbon, Portekiz, 24-28 Eylül.
- Cavalagli, N., Comanducci, G. ve Ubertini, F., 2018. Earthquake-Induced Damage Detection in a Monumental Masonry Bell-Tower Using Long-Term Dynamic Monitoring Data, Journal of Earthquake Engineering, 22, 96-119.
- Ceylan, O. ve Ocakcan, T., 2013. Fatih Camii 2007-2012 Restorasyonu Uygulamaları, *Vakıflar Restorasyon Yıllığı*, 7, 44-63.
- Chang, P.,C., Flatau, A. ve Liu, S.,C., 2003. Health Monitoring of Civil Infrastructure, Structural health monitoring, 2, 3, 257-267.
- Chiorino, M.,A., Ceravolo, R., Spadafora, A., Zanotti Fragonara, L. ve Abbiati, G., 2011. Dynamic Characterization of Complex Masonry Structures: The Sanctuary of Vicoforte, International Journal of Architectural Heritage, 5, 3, 296–314.
- Chiostrini, S., Foraboschi, P. ve Vignoli, A., 1992. Structural Analysis and Damage Evaluation of Existing Masonry Buildings by Dynamic Experimentation and Numerical Modelling, 10th World Conference on Earthquake Engineering, 3481-3486.
- Chrysostomou, C., Kyriakides, N., Kappos, A., Kouris, L., Georgiou, E.ve Millis, M., 2013. Seismic Retrofitting and Health Monitoring of School Buildings of Cyprus, Open Construction and Building Technology Journal, 7, 208-220.

- Clementi, F., Pierdicca, A., Formisano, A., Catinari, F. ve Lenci, S., 2017. Numerical Model Upgrading of a Historical Masonry Building Damaged During the 2016 Italian Earthquakes: The Case Study of the Podestà Palace in Montelupone (Italy), Journal of Civil Structural Health Monitoring, 7, 5, 703-717.
- Clementi, F., Formisano, A., Milani, G. ve Ubertini, F., 2021. Structural Health Monitoring of Architectural Heritage: From the Past to the Future Advances, International Journal of Architectural Heritage, 15, 1, 1-4.
- Colak, I., 2016. The Reconstruction of the Old Bridge in Mostar, Chapter 14 in DAAAM International Scientific Book, DAAAM International, 151-162. ISBN 978-3-902734-09-9, ISSN 1726-9687.
- Compan, V., Pachon, P. ve Camara, M., 2017. Ambient Vibration Testing and Dynamic Identification of a Historical Building. Basilica of the Fourteen Holy Helpers Germany, Procedia Engineering, 199, 3392-3397.
- Corbi, O., Zaghw, A.,H., Elattar, A. ve Saleh, A., 2013. Preservation Provisions for the Environmental Protection of Egyptian Monuments Subject to Structural Vibrations, International Journal of Mechanics, 7, 3, 172-179.
- Çalık, İ., Bayraktar, A., Türker, T. ve Karadeniz, H., 2014. Structural Dynamic Identification of a Damaged and Restored Masonry Vault Using Ambient Vibrations, Measurement, 55, 462-472.
- Çamlıbel, N., 2000. Yapıların Taşıma Gücünün İyileştirilmesi, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Çelebi, R., 2001. Yapı Bilgisi, İstanbul Kültür Üniversitesi Yayınları No:12, İstanbul.
- Çılı, F. ve Sesigür, H., 2007. Tarihi Yapıların Onarımı/Güçlendirilmesi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Seminer Notları.
- Çılı, F. ve Yıldız, H., 2013. Fatih Camii ve I. Mahmut Kütüphanesi Güçlendirme Çalışmaları, Vakıflar Restorasyon Yıllığı, 7, 66-84.
- Da Costa, A.,A., 2012. Seismic Assessment of the Out-of-Plane Performance of Traditional Stone Masonry Walls, Doktora Tezi, Porto Üniversitesi, Portekiz.
- Dabanlı, Ö., 2008. Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dabanlı, Ö., 2016. Nur-u Osmaniye Camii'nin Deprem Performansının Belirlenmesi ve Koruma Önerileri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dais, D., Bal, I.,E., Smyrou, E. ve Sarhosis, V., 2021. Automatic Crack Classification and Segmentation on Masonry Surfaces Using Convolutional Neural Networks and Transfer Learning, Automation in Construction, 125, 103606.

- Dal Cin, A. ve Russo, S., 2019. Evaluation of Static and Dynamic Long-Term Structural Monitoring for Monumental Masonry Structure, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 9, 2, 169-182.
- De Canio, G., Muscolino, G., Palmeri, A., Poggi, M. ve Clemente, P., 2008. Shaking Table Tests Validating Two Strengthening Interventions On Masonry Buildings, AIP Conference Proceedings, 1020, 1, 896-902.
- De Matteis, G., Colanzi, F., Eboli, A. ve Mazzolani, F.,M., 2008. Seismic Vulnerability Evaluation of the Fossanova Gothic Church, Structural Analysis of Historical Construction, CRC Press Balkema, 1225-1235.
- De Matteis, G. ve Mazzolani, F.,M., 2010. The Fossanova Church: Seismic Vulnerability Assessment by Numeric and Physical Testing, International Journal of Architectural Heritage, 4, 3, 222-245.
- De Sortis, A., Antonacci, E. ve Vestroni, F., 2005. Dynamic Identification of a Masonry Building Using Forced Vibration Tests, Engineering Structures, 27, 2, 155-165.
- De Stefano, A., Matta, E. ve Clemente, P., 2016. Structural Health Monitoring of Historical Heritage in Italy: Some Relevant Experiences, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 6, 1, 83-106.
- Diaferio, M., Foti, D. ve Potenza, F., 2018. Prediction of the Fundamental Frequencies and Modal Shapes of Historic Masonry Towers by Empirical Equations Based on Experimental Data, Engineering Structures, 156, 433-442.
- Doebbling, S.,W., Farrar C.,R. ve Prime, M.,B., 1998. A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods, Shock and vibration digest, 30, 2, 91-105.
- Durukal, E., 1992. Structural Identification and Seismic Vulnerability Assessment of Aya Sofya. Yüksek Lisans Tezi, Bogaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Ellis, B.,R., 1998. Non-Destructive Dynamic Testing of Stone Pinnacles on the Palace of Westminster, Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 128, 3, 300-307.
- Elwood, K.,J., ve Moehle, J.,P., 2003. Shaking Table Tests and Analytical Studies on the Gravity Load Collapse of Reinforced Concrete Frames, PEER Report No. 2003/01, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Kaliforniya Üniversitesi, Berkeley, Kaliforniya, ABD.
- Elyamani, A., Caselles, O., Roca, P. ve Clapes, J., 2017a. Dynamic Investigation of a Large Historical Cathedral, Structural Control and Health Monitoring, 24, 3.
- Elyamani, A., Roca, P., Caselles, O. ve Clapes, J., 2017b. Seismic Safety Assessment of Historical Structures Using Updated Numerical Models: The Case of Mallorca cathedral in Spain, Engineering Failure Analysis, 74, 54-79.

- Elyamani, A. ve Roca Fabregat, P., 2018. A Review on the Study of Historical Structures Using Integrated Investigation Activities for Seismic Safety Assessment, Part I: Dynamic Investigation, Scientific Culture, 4, 1, 1-27.
- Ercan, E., 2018. Assessing the Impact of Retrofitting on Structural Safety in Historical Buildings via Ambient Vibration Tests, Construction and Building Materials, 164, 337-349.
- Erdik, M., ve Durukal, E., Yuzugullu, B., Beyen, K. ve Kadakal, U., 1993. Strong-Motion Instrumentation of Aya Sofya and the Analysis of Response to an Earthquake of 4.8 Magnitude, 3rd Conference: Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings III, Bath, İngiltere, 99-114.
- Ersubaşı, F., 2008. Yığma Yapıların Deprem Davranışının Sarsma Masasında Dinamik Olarak İncelenmesi ve Farklı Güçlendirme Seçeneklerinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye.
- Ertürk, E., Altunişik, A.,C. ve Genç, A.,F., 2021. Effect of Ground Motion Scaling Methods on Seismic Response of Masonry Clock Towers, Iranian Journal of Science and Technology, 1-24.
- Eski Trabzon, Eski Trabzon Fotoğraf Arşivi, T.C. Trabzon Valiliği, Trabzon. <http://www.trabzon.gov.tr/eski-trabzon> 12.12.22
- Eurocode6, 2005. EN 1996-1-1: Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures, European Committee for Standardization, Brüksel, Belçika.
- Ewins, D.,J., 1984. Modal Testing: Theory and Practice, Letchworth, Hertfordshire, England: Research Studies Press, New York.
- Fan, W. ve Qiao, P., 2011. Vibration-Based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study, Structural Health Monitoring, 10, 1, 83-111.
- Farrar, C.,R. ve Worden, K., 2007. An Introduction to Structural Health Monitoring, Philosophical Transactions of the Royal Society A, 365, 1851, 303–315.
- Felber, A.,J., 1993. Development of Hybrid Bridge Evaluation System, Doktora Tezi, British Columbia Üniversitesi, Vancouver, Kanada.
- FEMtools, 2016. Dynamic Design Solutions, FEMtools Model Updating Theoretical Manual, Version 3.8., Leuven, Belçika.
- Finotti, R.,P., de Souza Barbosa, F., Cury, A.,A. ve Gentile, C., 2017. A Novel Natural Frequency-Based Technique to Detect Structural Changes Using Computational Intelligence, Procedia engineering, 199, 3314-3319.

- Formisano, A., Di Lorenzo, G., Krstevska, L. ve Landolfo, R., 2021. Fem Model Calibration of Experimental Environmental Vibration Tests on Two Churches Hit by L'aquila Earthquake, International Journal of Architectural Heritage, 15, 1, 113-131.
- Foti, D., Ivorra, S. ve Sabba, M.,F., 2012a. Dynamic Investigation of an Ancient Masonry Bell Tower with Operational Modal Analysis: A Non-Destructive Experimental Technique to Obtain the Dynamic Characteristics of a Structure, The Open Construction and Building Technology Journal, 6, 384-391.
- Foti, D., Diaferio, M., Giannoccaro, N.,I. ve Mongelli, M., 2012b. Ambient Vibration Testing, Dynamic Identification and Model Updating of a Historic Tower, NDT & e International, 47, 88-95.
- Friswell, M.,I. ve Mottershead, J.,E., 1995. Finite Element Model Updating in Structural Dynamics, Solid Mechanics and its Applications, Springer, No: 38 Dordrecht, 292 s.
- Fritzen, C.,P., 2005. Vibration-Based Structural Health Monitoring–Concepts and Applications, Key Engineering Materials, 293, 3-20.
- Gabrilovic, P., Shendova, V., Tashkov, L.,J., Krstevska, L., Ginell, W. ve Toles, L., 1996. Shaking Table Tests of Adobe Structures, Report IZIIS, Üsküp, 36-99.
- Gabrilovic, P., Shendova, V. ve Ginell, W., 1999. Seismic Strengthening and Repair of Byzantine Churches, Journal of Earthquake Engineering, 3, 2, 199–235.
- Garavaglia, E., Anzani, A., Binda, L. ve Cardani, G., 2008. Fragility Curve Probabilistic Model Applied to Durability and Long Term Mechanical Damage of Masonry, Materials and Structures, 41, 4, 733-749.
- Garcia-Macias, E. ve Ubertini, F., 2020. Automated Operational Modal Analysis and Ambient Noise Deconvolution Interferometry for the Full Structural Identification of Historic Towers: A Case Study of the Sciri Tower in Perugia, Italy, Engineering Structures, 215, 110615.
- Garcia-Macias, E., Ierimonti, L., Venanzi, I. ve Ubertini, F., 2021. An Innovative Methodology for Online Surrogate-Based Model Updating of Historic Buildings Using Monitoring Data, International Journal of Architectural Heritage, 15, 1, 92-112.
- Gavrilovic, P., Stankovic, V. ve Bojadziev, M., 1987. Experimental Investigation of a Model of Masonry Building on Seismic Shaking Table, VIII Congress of Structural Engineers.
- Genç, A.,F., Ergün, M., Günaydin, M., Altunişik, A.,C., Ateş, Ş., Okur, F.,Y. ve Mosallam, A.,S., 2019. Dynamic Analyses of Experimentally-Updated FE Model of Historical Masonry Clock Towers Using Site-Specific Seismic Characteristics and Scaling Parameters According to the 2018 Turkey Building Earthquake Code, Engineering Failure Analysis, 105, 402-426.

- Genç, A.,F., Altunisik, A.,C., Gunaydin, M. ve Okur, F.,Y., 2022. Finite Element Model Updating of İskenderpaşa Mosque and Minaret Based on Experimental Measurements, Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics, 5, 4, 264-276.
- Genovese, F. ve Vestroni, F., 1998. Identification of Dynamic Characteristics of a Masonry Building, 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, Fransa.
- Gentile, C. ve Saisi, A., 2007. Ambient Vibration Testing of Historic Masonry Towers for Structural Identification and Damage Assessment, Construction and building materials, 21, 6, 1311-1321.
- Gentile, C. ve Saisi, A., 2013. Operational Modal Testing of Historic Structures at Different Levels of Excitation, Construction and Building Materials, 48, 1273-1285.
- Gentile, C., Saisi, A. ve Cabboi, A., 2015. Structural Identification of a Masonry Tower Based on Operational Modal Analysis, International Journal of Architectural Heritage, 9, 2, 98-110.
- Gentile, C., Guidobaldi, M. ve Saisi, A., 2016. One-year Dynamic Monitoring of a Historic Tower: Damage Detection Under Changing Environment, Meccanica, 51, 11, 2873-2889.
- Gentile, C., Ruccolo, A. ve Saisi, A., 2019. Continuous Dynamic Monitoring to Enhance the Knowledge of a Historic Bell-Tower, International Journal of Architectural Heritage, 13, 7, 992-1004.
- Gopinath, V.,K. ve Ramadoss, R., 2021. Review on Structural Health Monitoring for Restoration of Heritage Buildings, Materials Today: Proceedings, 43, 1534-1538.
- Guan, H. ve Karbhari, V.,M., 2008. Vibration-Based Structural Health Monitoring of Bibliography Highway Bridges, Report No. CA06-0081, University of California, ABD.
- Günaydın, M., 2016. Onarılmış ve Lifli Polimer Kompozit Malzemelerle Güçlendirilmiş Betonarme Binaların Dinamik Davranışlarının Deneysel ve Analitik Yöntemlerle İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- Gunaydin, M., 2020. In situ Dynamic Investigation on the Historic “İskenderpaşa” Masonry Mosque With Non-destructive Testing, Smart Structures and Systems, 26, 1, 1-10.
- Gunaydin, M., Erturk, E., Genc, A.,F., Okur, F.,Y., Altunisik, A.,C. ve Tavsan, C., 2022a. FE Model Updating and Seismic Performance Evaluation of a Historical Masonry Clock Tower, Earthquakes and Structures, 22, 1, 65-82.
- Gunaydin, M., Genç, A.,F., Altunışık, A.,C., Hacıfendioğlu, K., Okur, F.,Y., Okur, E. ve Adanur, S., 2022b. Structural Condition Assessment of a Historical Masonry School

Building Using Experimental and Numerical Methods, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 12, 5, 1083-1113.

Güler, K., Sağlamer, A., Celep, Z. ve Pakdamar, F., 2004. Structural and Earthquake Response Analysis of the Little Hagia Sophia Mosque, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Kanada.

Hanbay, S., 2019. Vibration-Based Structural Health Monitoring of a Wind Turbine Incorporating Environmental and Operational Conditions, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Hillenbrand, R., 1994. Islamic Architecture: Form, Function, and Meaning. Columbia University Press, New York.

ICOMOS, 2013. ICOMOS Türkiye Mimari Mirası Koruma Bildirgesi.

ICS, 2008. A Treatise on Architecture and Building Construction V3: Prepared for students of the international correspondence schools (1899), International Correspondence Schools Kessinger.

Invernizzi, S., Lacidogna, G., Lozano-Ramírez, N.,E. ve Carpinteri, A., 2019. Structural Monitoring and Assessment of an Ancient Masonry Tower, Engineering Fracture Mechanics, 210, 429-443.

Ivorra, S. ve Pallares, F.,J., 2006. Dynamic Investigations on a Masonry Bell Tower, Engineering and Structures, 28, 5, 660–7.

Ivorra, S., Pallares, F.,J. ve Adam, J.,M., 2011. Masonry Bell Towers: Dynamic Considerations, Structures and Buildings, 164.

Jacobsen N.,J., Andersen P. ve Brincker, R., 2006. Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis., Proceedings of ISMA2006: International Conference on Noise & Vibration Engineering, Leuven, Belçika.

Juang, J.,N., 1994. Applied System Identification, Englewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall Inc.

Juhasova, E., Sofronie, R. ve Bairrao, R., 2008. Stone Masonry in Historical Buildings, Ways to Increase Their Resistance and Durability, Engineering Structures, 30, 8, 2194-2205.

Kahraman, G., 2008. Erken Bizans dönemi horasan harçlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kaptan, K., 2013. Early Islamic Architecture and Structural Configurations, International Journal of Architecture and Urban Development, 3, 2, 5-12.

- Kara, H.,G., 2009. Tarihi Yığma Yapıların Taşıyıcı Sistemleri, Güvenliğinin İncelenmesi, Onarımı ve Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- KGM, 2009. 10. Bölge Müdürlüğü Arşivi, Trabzon.
- Kilic, G., 2015. Using Advanced NDT for Historic Buildings: Towards an Integrated Multidisciplinary Health Assessment Strategy, Journal of Cultural Heritage, 16, 4, 526-535.
- Kita, A., Cavalagli, N. ve Ubertini, F., 2019. Temperature Effects on Static and Dynamic Behavior of Consoli Palace in Gubbio, Italy, Mechanical Systems and Signal Processing, 120, 180-202.
- Kouris, L.,A.,S., Penna, A. ve Magenes, G., 2017. Seismic Damage Diagnosis of a Masonry Building Using Short-Term Damping Measurements, *Journal of Sound and Vibration*, 394, 366-391.
- Krstevska, L., Tashkov, L.,J., Arun, G. ve Akoz, F., 2007. Evaluation of Seismic Behaviour of Historical Monuments, International Symposium Studies on Historical Heritage, Antalya, Turkey, September 17-21.
- Krstevska, L., Kustura, M. ve Tashkov, L.,J., 2008a. Experimental In-Situ Testing of Reconstructed Old Bridge in Mostar, Proc. of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Ekim, Pekin, Çin.
- Krstevska, L., Tashkov, L.,J., Gramatikov, K., Mazzolani, F. ve Landolfo, R., 2008b. Shaking Table Testing of Mustafa Pasha Mosque Model, FP6-PROHITECH Project, IZIIS, Üsküp.
- Krstevska, L., Tashkov, L.,J., Gramatikov, K. ve Kozinakov, D., 2008c, Shaking Table Testing of Fossanova Model, FP6-PROHITECH Final Report, IZIIS, Üsküp.
- Krstevska, L., Tashkov, L., Gramatikov, K., Landolfo, R., Mammana, O., Portioli, F. ve Mazzolani, F., 2010. Large-Scale Experimental Investigation on Mustafa Pasha Mosque, Journal of Earthquake Engineering, 14, 6, 842-873.
- Krstevska, L., Nikolić, Z. ve Kustura, M., 2021. Shake Table Testing of Two Historical Masonry Structures for Estimation of Their Seismic Stability, International Journal of Architectural Heritage, 15, 2, 45–63.
- Kuban, D., 1982. Tarih-i Camii Şerif-i Nur-u Osmanî ve XVIII. yüzyıl Osmanlı yapım tekniği üzerine gözlemler, Türk ve İslam Sanatı Üzerine Denemeler, Arkeoloji ve Sanat Yayınları, İstanbul, 123-140.
- Kuban, D., 2007. Osmanlı Mimarisi, Yem Yayınları, İstanbul.

- Kustura, M., Smoljanovic, H., Nikolic, Z. ve Krstevska, L., 2021. Experimental and Numerical Analysis of the Global Behaviour of the 1:9 Scale Model of the Old Bridge in Mostar, Coupled Systems Mechanics, 10, 1, 1-19.
- KültürPortalı, Gezilecek Yerler, Trabzon-Cephanelik, Türkiye Kültür Portalı, <https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/trabzon/gezilecekyer/trabzon-cephanelik> 12.12.22
- KVMGM ve DSİ Arşivi, 2017-2019. Hasankeyf'te Bulunan Anıt Eserleri Taşıma ve Koruma Yapımı işi (Cumhur-Alp İnşaat), Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü, Ankara.
- KVMGM ve DSİ Arşivi, 2019-2021. Hasankeyf'te Bulunan Anıt Eserlerin Taşıma ve Koruma Tamamlanması Yapımı işi (Er-Bu İnşaat), Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Lamonaca, F., Olivito, R.,S., Porzio, S., Cami, D.,L. ve Scuro, C., 2018. Structural Health Monitoring System for Masonry Historical Construction, Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (MetroArchaeo), IEEE, 330-335.
- Leite, J.,C., 2014. Seismic Behaviour of Masonry Infill Walls: Test and Design, Doktora Tezi, Minho Üniversitesi, Portekiz.
- Liba, M., Mizuno, H., Goto, T. ve Kato, H., 1996. Shaking Table Test on Seismic Performance of Confined Masonry Wall, Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, 659.
- Lima, H.,F., da Silva Vicente, R., Nogueira, R.,N., Abe, I., de Brito Andre, P.,S., Fernandes, C. ve de Lemos Pinto, J., 2008. Structural Health Monitoring of the Church of Santa Casa Da Misericórdia of Aveiro Using FBG Sensors, IEEE Sensors Journal, 8, 7, 1236-1242.
- Liu, M., Cheng, Y. ve Liu, X., 2011. Shaking Table Test on Out-of-Plane Stability of Infill Masonry Wall, Transactions of Tianjin University, 17, 2, 125-131.
- Llorens, M., Mata, P., Araiza, J.,C. ve Roca, P., 2001. Damage Characterization in Stone Columns by Dynamic Test. Application to the Cloister of Girona Cathedral, Spain, Historical Constructions, Minho Üniversitesi, Guimarães, 469-478.
- Londono, N.,A., 2006. Use of Vibration Data for Structural Health Monitoring of Bridges, Doktora Tezi, Carleton Üniversitesi, Ottawa, Kanada.
- Lorenzoni, F., 2013. Integrated Methodologies Based on Structural Health Monitoring for the Protection of Cultural Heritage Buildings, Doktora Tezi, Trento Üniversitesi, İtalya.
- Lorenzoni, F., Casarin, F., Modena, C., Caldon, M., Islami, K. ve Da Porto, F., 2013. Structural Health Monitoring of the Roman Arena of Verona, Italy, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 3, 4, 227-246.

- Lorenzoni, F., Casarin, F., Caldon, M., Islami, K. ve Modena, C., 2016. Uncertainty Quantification In Structural Health Monitoring: Applications on Cultural Heritage Buildings, Mechanical Systems and Signal Processing, 66, 268-281.
- Lourenço, P.,B., 1996. Computational Strategies for Masonry Structures, Doktora tezi, Delft Teknik Üniversitesi, Hollanda.
- Lourenço, P.,B., 2000. Current Experimental and Numerical Issues in Masonry Research, Minho Üniversitesi, Portekiz.
- Lourenço, P.,B., Vasconcelos, G. ve Ramos, L., 2001. Assessment of the stability conditions of a Cistercian cloister, Second International Congress of Studies in Ancient Structures.
- Lourenço, P.,B., Trujillo, A., Mendes, N. ve Ramos, L.,F., 2012. Seismic Performance of the St. George of the Latins Church: Lessons Learned From Studying Masonry Ruins, Engineering structures, 40, 501-518.
- Loverdos, D., Sarhosis, V., Adamopoulos, E. ve Drougkas, A., 2021. An Innovative Image Processing-Based Framework for the Numerical Modelling of Cracked Masonry Structures, Automation in Construction, 125, 103633.
- Loverdos, D. ve Sarhosis, V., 2022. Automatic Image-Based Brick Segmentation and Crack Detection of Masonry Walls Using Machine Learning, Automation in Construction, 140, 104389.
- Lu, X., Zhou, Q., Wu, X. ve Zhang, W., 1998. Shaking Table Testing on Model Building Constructed in Moderate Seismic Region. Int. Workshop on Earthquake Engineering for Regions of Moderate Seismicity, Hong Kong, 227-237.
- Maeck, J. ve De Roeck, G., 2003. Description of Z24 Benchmark, Mechanical Systems and Signal Processing, 71, 1, 127-131.
- Magenes G. ve Penna A., 2009. Existing Masonry Buildings: General Code Issues and Methodes of Analysis and Assessment, Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint Workshop, 185-198, Napoli, İtalya.
- Mahrebel, H.,A., 2006. Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistem Özellikleri, Hasarlar, Onarım ve Güçlendirme Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Marrongelli, G., Finotti, R., Gentile, C. ve Barbosa, F., 2018. An Artificial Intelligence Strategy to Detect Damage From Response Measurements: Application on an Ancient Tower, MATEC Web of Conferences, 211, EDP Sciences.
- Mascarenhas, J., 2003. Construction Systems - III: Walls and Basic Materials. Livros Horizonte, Técnicas de Construção, Portekiz. (Portekizce)

- Masciotta, M.,G., Ramos, L.,F. ve Lourenço, P.,B., 2017. The Importance of Structural Monitoring as a Diagnosis and Control Tool in The Restoration Process of Heritage Structures: A Case Study in Portugal, Journal of Cultural Heritage, 27, 36-47.
- Masciotta, M.,G. ve Ramos, L.,F., 2019. Dynamic Identification of Historic Masonry Structures. Long-term Performance and Durability of Masonry Structures, Woodhead Publishing, 241-264.
- Mazzolani, F., Krstevska, L., Tashkov, L.,J., Gramatikov, K. ve Landolfo, R., 2007. Shaking Table Testing of Mustafa Pasha Mosque Model. FP6-PROHITECH Final Report, IZIIS, Üsküp.
- Mazzon, N., Valluzzi, M.,R., Aoki, T., Garbin, E., De Canio, G., Ranieri, N. ve Modena, C., 2009. Shaking Table Tests on Two Multi-Leaf Stone Masonry Buildings, Proceedings of the 11th Canadian Masonry Symposium, Toronto, Kanada.
- Mendes, N., 2012. Seismic Assessment of Ancient Masonry Buildings: Shaking Table Tests and Numerical Analysis, Doktora Tezi, Minho Üniversitesi, Portekiz.
- Mendes, N., Lourenço, P.,B. ve Campos-Costa, A., 2014. Shaking Table Testing of an Existing Masonry Building: Assessment and Improvement of the Seismic Performance, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 43, 2, 247-266.
- Mesquita, E., Arede, A., Pinto, N., Antunes, P. ve Varum, H., 2018. Long-term Monitoring of a Damaged Historic Structure Using a Wireless Sensor Network, Engineering Structures, 161, 108-117.
- Milani, G. ve Clementi, F., 2021. Advanced Seismic Assessment of Four Masonry Bell Towers in Italy After Operational Modal Analysis (OMA) identification, International Journal of Architectural Heritage, 15, 1, 157-186.
- Mishra, M., 2021. Machine Learning Techniques for Structural Health Monitoring of Heritage Buildings: A State-of-the-Art Review and Case Studies, Journal of Cultural Heritage, 47, 227-245.
- Mishra, M., Lourenço, P.,B. ve Ramana, G.,V., 2022. Structural Health Monitoring of Civil Engineering Structures by Using the Internet of Things: A Review, Journal of Building Engineering, 48, 103954.
- Modena, C., La Mendola, P. ve Terrusi, A., 1992. Shaking Table Study of a Reinforced Masonry Building Model, 10th World Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, Hollanda.
- Modena, C., Rossi, P.,P. ve Zonta, D., 1997. Static and Dynamic Investigation on the Roman Amphitheatre (Arena) in Verona. IABSE Int. Colloquium, Inspection and Monitoring of the Architectural Heritage, 73-80.
- MTA, 2018. Dünyada ve Türkiye’de Doğal Taşlar, Maden Teknik Arama, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, Duran Serdar KARAHAN.

- Nakagawa, T., Narafu, T., Imai, H., Hanazato, T., Ali, Q. ve Minowa, C., 2012. Collapse Behavior of a Brick Masonry House Using a Shaking Table and Numerical Simulation Based on the Extended Distinct Element Method, Bulletin of Earthquake Engineering, 10, 1, 269-283.
- Nasser, M.,A., 2001. Dynamic Analysis of Arched Style Masonry Structures, IMAC-XIX: A Conference on Structural Dynamics, 2, 1363-1369.
- Nguyen, Q.,T., 2022. Yüksek Yapılar İçin Modal Analiz Tabanlı Hasar Tespiti ve Yapı Sağlığı İzleme Yaklaşımı, Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Nikolić, Z., Krstevska, L., Marović, P. ve Smoljanović, H., 2017. Shaking Table Test of Scaled Model of Protiron Dry Stone Masonry Structure, Procedia Engineering, 199, 3386-3391.
- Oktay, D., 2017. Tarihi Kireç Harçlarına Uygun Enjeksiyon Malzemelerinin Üretilmesi ve Model Duvarlarda Uygulanmasının Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- OMA, 2006. Operational Modal Analysis, Release 4.0. Structural Vibration Solution A/S, Denmark.
- Özturan, T., Aköz, F. ve Yüzer, N., 2006. İstanbul Fatih Camii ve Külliyesi Alt ve Üst Yapı Onarım – Restorasyon Proje ve Müşavirlik Projesi Malzeme İncelemeleri Raporu, İstanbul.
- Pachon, P., Castro, R., García-Macías, E., Compan, V. ve Puertas, E., 2018. E. Torroja's Bridge: Tailored Experimental Setup for SHM of a Historical Bridge with a Reduced Number of Sensors, Engineering Structures, 162, 11-21.
- Parisi, F. ve Augenti, N., 2013. Earthquake Damages to Cultural Heritage Constructions and Simplified Assessment of Artworks, Engineering Failure Analysis, 34, 735-760.
- Pau, A. ve Vestroni, F., 2008. Vibration Analysis and Dynamic Characterization of the Colosseum, Structural Control and Health Monitoring, 15, 8, 1105-1121.
- Pau, A. ve Vestroni, F., 2011. Dynamic Characterization of Ancient Masonry Structures, Advances in Vibration Analysis Research, Intech, 213-230.
- Pau, A. ve Vestroni, F., 2013. Vibration Assessment and Structural Monitoring of the Basilica of Maxentius in Rome, Mechanical Systems and Signal Processing, 41, 1, 454-66.
- Paulay, T. ve Priestley, M., 1992. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, John Wiley & Sons, New York.

- Peeters, B. ve De Roeck, G., 1999. Reference Based Stochastic Subspace Identification in Civil Engineering. Proceedings of the 2nd International Conference on Identification in Engineering Systems, Swansea, Birleşik Krallık.
- Peeters, B., 2000. System Identification and Damage Detection in Civil Engineering, Doktora Tezi, K.U, Leuven, Belçika.
- Pellegrini, D., Girardi, M., Lourenço, P.,B., Masciotta, M.,G., Mendes, N., Padovani, C. ve Ramos, L.,F., 2018. Modal Analysis of Historical Masonry Structures: Linear Perturbation and Software Benchmarking, Construction and Building Materials, 189, 1232-1250.
- Pepi, C., Gioffre, M., Comanducci, G., Cavalagli, N., Bonaca, A. ve Ubertini, F., 2017. Dynamic Characterization of a Severely Damaged Historic Masonry Bridge, Procedia engineering, 199, 3398-3403.
- Poleni, G., 1748. Memorie Istoriche Della Gran Cupola del Tempio Vaticano. Padova.
- Potenza, F., Federici, F., Lepidi, M., Gattulli, V., Graziosi, F. ve Colarieti, A., 2015. Long-term structural monitoring of the damaged Basilica S. Maria di Collemaggio through a low-cost wireless sensor network, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 5, 5, 655-676.
- Prabhu, S.A., 2011. Structural Health Monitoring of Historic Masonry Monuments, Doktora Tezi, Clemson Üniversitesi, ABD.
- Prabhu, S. ve Atamturktur, S., 2013. Selection of Optimal Sensor Locations Based on Modified Effective Independence Method: Case Study on a Gothic Revival Cathedral, Journal of Architectural Engineering, 19, 4, 288-301.
- PULSE, 2006. Analyzers and Solutions, Release 11.2. Bruel and Kjaer, Sound and Vibration Measurement A/S, Denmark.
- Rainieri, C., Fabbrocino, G., Cosenza, E. ve Manfredi, G., 2007. Implementation of OMA Procedures Using Labview: Theory and Application. 2nd International Operational Modal Analysis Conference, Copenhagen, Danimarka.
- Rainieri, C., Fabbrocino, G. ve Cosenza, E., 2011. Integrated Seismic Early Warning and Structural Health Monitoring of Critical Civil Infrastructures in Seismically Prone Areas. Structural Health Monitoring, 10, 3, 291-308.
- Ramos, L.,F., Lourenço, P.,B. ve Costa, A.,C., 2005. Operational Modal Analysis for Damage Detection of a Masonry Construction, International Operational Modal Analysis Conference, Kopenhag, 495-502.
- Ramos, L.,F., 2007. Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, Doktora Tezi, Minho Üniversitesi, Braga, Portekiz.

- Ramos, L.,F., Lourenço, P.,B., De Roeck, G. ve Campos-Costa, A., 2008. Damage Identification in Masonry Structures with Vibration Measurements. *Structural Analysis of Historic Construction: Preserving Safety and Significance*, Two Volume Set, CRC Press, 331-340.
- Ramos, L.,F., De Roeck, G., Lourenço, P.,B. ve Campos-Costa, A., 2010a. Damage Identification on Arched Masonry Structures Using Ambient and Random Impact Vibrations, *Engineering Structures*, 32, 1, 146-162.
- Ramos, L.,F., Marques, L., Lourenço, P.,B., De Roeck, G., Campos-Costa, A. ve Roque, J., 2010b. Monitoring Historical Masonry Structures With Operational Modal Analysis: Two Case Studies, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24, 5, 1291-1305.
- Ramos, L.,F., Alaboz, M. ve Aguilar, R., 2010c. Dynamic Identification and Monitoring of St. Torcato Church, *Advanced Materials Research*, 133, 275-280.
- Ramos, L.,F., Aguilar, R., Lourenço, P.,B. ve Moreira, S., 2013. Dynamic Structural Health Monitoring of Saint Torcato Church, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 351, 1-15.
- Ramos, L.,F., Miranda, T., Mishra, M., Fernandes, F.,M. ve Manning, E., 2015. A Bayesian Approach for NDT Data Fusion: The Saint Torcato Church Case Study, *Engineering Structures*, 84, 120-129.
- Rezaeifar, O., Kabir, M.,Z. ve Bakhshi, A., 2009. Shaking Table Test of a 1:2.35 Scale 4-Story Building Constructed with a 3D Panel System, *Transaction A: Civil Engineering*, 16, 3, 199.
- Riva, G., 1994. Il Contributo Del Leindagini Non Distruttive Nella Valutazione Del Patrimonio Architettonico A Struttura Muraria. In: Bilanci e prospettive, attidel Convegno di studi, Bressanone 5–8, Padova, Libreria Progetto, 559–66.
- Roca, P. ve Molins, C., 1997. Dynamic Load Tests on Masonry Structures as Inspection Technique, *Inspection and Monitoring of the Architectural Heritage*, IABSE 1997, 133-140.
- Rozsas, A., Slobbe, A., Huizinga, W., Kruithof, M., Ajithkumar Pillai, K., Kleijn, K. ve Giardina, G., 2022. Siamese Convolutional Neural Networks to Quantify Crack Pattern Similarity in Masonry Facades, *International Journal of Architectural Heritage*, 1-23.
- Russo, S., 2012. Testing and Modelling of Dynamic Out-of-Plane Behavior of the Historic Masonry Facade of Palazzo Ducale in Venice, Italy. *Engineering Structures*, 46, 130–139. doi:10.1016/j.engstruct. 2012.07.032 35.
- Rytter, A., 1993. Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures, Doktora Tezi, Aalborg Üniversitesi, Danimarka.

- Saisi, A., Gentile, C. ve Guidobaldi, M., 2015. Post-earthquake continuous dynamic monitoring of the Gabbia tower in mantua, Italy, Construction and Building Materials, 81, 101–112.
- Salawu, O.,S., 1997. Detection of Structural Damage through Changes in Frequency: A Review, Engineering Structures, 19, 9, 718-723.
- Saleem, M.,U., Numada, M., Amin, M.,N. ve Meguro, K., 2016. Seismic Response of PP-Band and FRP Retrofitted House Models Under Shake Table Testing, Construction and Building Materials, 111, 298-316.
- Sathiparan, N. ve Meguro, K., 2015. Strengthening of Adobe Houses with Arch Roofs Using Tie-Bars and Polypropylene Band Mesh, Construction and Building Materials, 82, 360-375.
- Sehgal, S. ve Kumar, H., 2016. Structural Dynamic Model Updating Techniques: A State of the Art Review, Archives of Computational Methods in Engineering, 23, 515–533.
- Sena-Cruz, J., Ferreira, R.,M., Ramos, L.,F., Fernandes, F., Miranda, T. ve Castro, F., 2013. Luiz Bandeira Bridge: Assessment of a Historical Reinforced Concrete (RC) Bridge, International Journal of Architectural Heritage, 7, 6, 628-652.
- Sesigür, H., Çelik, O.,C. ve Çılı, F., 2007. Tarihi yapılarda taşıyıcı bileşenler, hasar biçimleri, onarım ve güçlendirme, İMO İstanbul Bülten, 89, 10-21.
- Sevim, B., Bayraktar, A., Altunişik, A.,C., Atamturktur, S. ve Birinci, F., 2011a. Assessment of Nonlinear Seismic Performance of a Restored Historical Arch Bridge Using Ambient Vibrations, Nonlinear Dynamics, 63, 755-770.
- Sevim, B., Bayraktar, A., Altunişik, A.,C., Atamturktur, S. ve Birinci, F., 2011b. Finite Element Model Calibration Effects on the Earthquake Response of Masonry Arch Bridges, Finite Elements in Analysis and Design, 47, 621-634.
- Shendova, V., Rakicevic, Z., Gabrilovic, P. ve Jurukovski, D., 2006. Retrofitting of Byzantine Church Using Passive Base Control System, 4th world conference on structural control and monitoring, San Diego, Kaliforniya, ABD.
- Shendova, V., Rakicevic, Z.,T., Krstevska, L., Tashkov, L. ve Gavrilovic, P., 2012. Shaking Table Testing of Models of Historic Buildings and Monuments–IZIIS’experience. In Role of Seismic Testing Facilities in Performance-Based Earthquake Engineering, 221-245.
- Sickels, L.,B., 1981. Organics and Synthetics: Their Use as Additives in Mortars, Mortars, Cements and Grouts Used in the Conservation of Historic Buildings, Proceedings of Symposium in Rome, Roma, İtalya, 25-52.
- Sigmund, V.,A. ve Herman, K., 1998. Dynamic Characteristics as Indicators of Structural Integrity. ABSE Colloquium, IABSE Report, 77. Berlin, Almanya.

- Silva, H.,E., Coelho, G.,B. ve Henriques, F.,M., 2020. Climate Monitoring in World Heritage List Buildings with Low-Cost Data Loggers: The case of the Jerónimos Monastery in Lisbon (Portugal), Journal of Building Engineering, 28, 101029.
- Slastan, J.,A. ve Foissner P., 1995. Masonry Building Dynamic Characteristics Evaluation by Means of Ambient Vibration, 10th European Conference on Earthquake Engineering, Viyana, Avusturya.
- Standoli, G., Giordano, E., Milani, G. ve Clementi, F., 2021. Model Updating of Historical Belfries Based on OMA Identification Techniques, International Journal of Architectural Heritage, 15, 1, 132-156.
- Stratigo, S., 1826. M.Vitruvii Pollionis Architectura. Utini.
- Şahin, S. ve Sönmezer, Ş., 2017. Osmanlı Mimarisinde Figürlü Tasvir Sanatı Hakkında Daha Önce Bilinmeyen Bir Örnek: I. Mahmut Su Kemer, Sanat Tarihi Yıllığı, 26, 105-140.
- Tanyeli, G., 1991. Kanuni ve II. Selim Türbeleri Teknik Çözümleme, Taç Vakfı Yıllığı I, 97-101.
- Tashkov, L.,J., Krstevska, L. ve Gramatikov, K., 2008. Shaking Table Testing of Model of St. Nicholas Church to Scale 1/3.5, FP6-PROHITECH Final Report, IZIIS, Üsküp.
- Tashkov, L.,J., Krstevska, L., Safak, E., Cakti, E., Edincliler, A. ve Erdik, M., 2012. Comparative Study of Large and Medium Scale Mosque Models Tested on Seismic Shaking Table. 15th World Conference On Earthquake Engineering. Lizbon, Portekiz.
- TBDY, 2018. Türk Bina Deprem Yönetmeliği, Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ankara.
- TKRUP, 2013. Tarihi Köprüler Restorasyon Uygulama Projesi ve Restorasyon Uygulaması İşleri,
- TMMOB, Taşınmaz Kültür Varlıklarının Rölöve, Restitüsyon ve Restorasyon Projelerine İlişkin Teknik Şartname, 28.12.2011, 31-42.
- Toker, S. ve Ünay, A., 2004. Mathematical Modeling and Finite Element Analysis of Masonry Arch Bridges, Gazi Univ J Sci, 17(2), 24-25.
- Tolles, L., Kimbro, E., Webster, F. ve Ginell, W., 2000. Seismic Stabilization of Historic Adobe Structures. Final report of Getty Seismic Adobe Project, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, ABD.
- Tomazeviç M., 1999. Earthquake-Resistance Design of Masonry Buildings, Series on Innovation in Structures and Construction, 1, Imperial College Press.

- Tomazeviç, M. ve Gams, M., 2012. Shaking Table Study and Modelling of Seismic Behaviour of Confined AAC Masonry Buildings, Bulletin of Earthquake Engineering, 10, 3, 863-893.
- Torres, W., Almazán, J.,L., Sandoval, C. ve Boroschek, R., 2017. Operational Modal Analysis and FE Model Updating of the Metropolitan Cathedral of Santiago, Chile, Engineering Structures, 143, 169-188.
- TS 647, 1979. Ahşap Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1015-11, 2020. Kâgir Harcı-Deney Yöntemleri-Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımının Tayini, TSE, Ankara.
- TS EN 1926, 2007. Doğal taşlar- Deney metotları- Basınç dayanımı tayini, TSE, Ankara.
- Tuluk, Ö.,İ., 2007. Trabzon İskender Paşa Camii: Fiziksel Gelişim Süreci Üzerine Bir Değerlendirme, Uluslararası Karadeniz İncelemeleri Dergisi, 1, 9-23.
- TYDRYK, 2017. Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, İstanbul Valiliği ve Vakıflar Genel Müdürlüğü, ISBN:978-975-19-6779-4.
- Tzenov, L. ve Dimova, S., 1992. Experimental Study of the Church 'Sveta Sofia'. 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, 19-24 Temmuz, 3403-3408.
- Ubertini, F., Comanducci, G. ve Cavalagli, N., 2016. Vibration-Based Structural Health Monitoring of a Historic Bell-Tower Using Output-Only Measurements and Multivariate Statistical Analysis, Structural Health Monitoring, 15, 4, 438-457.
- Ubertini, F., Comanducci, G., Cavalagli, N., Pisello, A.,L., Materazzi, A.,L. ve Cotana, F., 2017. Environmental Effects on Natural Frequencies of the San Pietro Bell Tower in Perugia, Italy, and Their Removal for Structural Performance Assessment, Mechanical Systems and Signal Processing, 82, 307-322.
- Ünay, A.,İ., 2002. Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı, ODTÜ, Ankara.
- Velez, L.,A., 2014. Seismic Behavior of Concrete Block Masonry Buildings, Doktora Tezi, Porto Üniversitesi, Portekiz.
- Vestroni F., Beolchini G.,C., Antonacci E. ve Modena C., 1996. Identification of Dynamic Characteristics of Masonry Buildings from Forced Vibration Tests, 11th World Conference on Earthquake Engineering, Akapulko, Meksika.
- Vincenzi, L. ve Savoia, M., 2015. Coupling Response Surface and Differential Evolution for Parameter Identification Problems, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 30, 5, 376-393.

- Vintzileou, E., Mouzakis, C., Adami, C.,E. ve Karapitta, L., 2015. Seismic Behavior of Three-Leaf Stone Masonry Buildings Before and After Interventions: Shaking Table Tests on a Two-Storey Masonry Model, Bulletin of Earthquake Engineering, 13, 10, 3107-3133.
- Votsis, R.,A., Kyriakides, N., Chrysostomou, C.,Z., Tantele, E. ve Demetriou, T., 2012. Ambient Vibration Testing of Two Masonry Monuments in Cyprus, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 43, 58-68.
- Votsis, R.,A., Kyriakides, N., Tantele, E. ve Chrysostomou, C.,Z., 2013. Effect of Damage on the Dynamic Characteristics of St. Nicholas Cathedral in Cyprus, ECCOMAS Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Kos Adası, Yunanistan, 12-14 Haziran.
- Wang, N., Zhao, X., Zhao, P., Zhang, Y., Zou, Z. ve Ou, J., 2019. Automatic Damage Detection of Historic Masonry Buildings Based on Mobile Deep Learning, Automation in Construction, 103, 53-66.
- Wang, Z., Yang, D.,H., Yi, T.,H., Zhang, G.,H. ve Han, J.,G., 2022. Eliminating Environmental and Operational Effects on Structural Modal Frequency: A Comprehensive Review, Structural Control and Health Monitoring, 29, 11, e3073.
- Worden, K. ve Dulieu-Barton, J.,M., 2004. An Overview of Intelligent Fault Detection in Systems and Structures, Structural Health Monitoring, 3, 1, 85-98.
- Xia, Y., Chen, B., Weng, S., Ni, Y.,Q. ve Xu, Y.,L., 2012. Temperature Effect on Vibration Properties of Civil Structures: A Literature Review and Case Studies, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2, 1, 29-46.
- Xianguo, Y., Jiaru, Q. ve Kangning, L., 2004. Shaking Table Test and Dynamic Response Prediction on an Earthquake-Damaged RC Building, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 3, 2, 205-214.
- Yam, L.,H., Yan, Y.,J. ve Wei, Z., 2004. Vibration-Based Non Destructive Structural Damage Detection, Key Engineering Materials, 270, 1446-1453.
- Yan, Y.,J., Cheng, L., Wu, Z.,Y. ve Yam, L.,H., 2007. Development in Vibration-Based Structural Damage Detection Technique, Mechanical systems and signal processing, 21, 5, 2198-2211.
- Yang, G., 2010. Dynamic Analyses of a Masonry Building Tested in a Shaking Table, Yüksek Lisans Tezi, Minho Üniversitesi, Portekiz.
- Yanık, Y., Aymelek, A., Çalık, İ. ve Türker, T., 2022. Vibration Testing and Performance Evaluation of Hagia Sophia Bell Tower After Recent Restoration, Construction and Building Materials, 347, 128617.

- Yanık, Y., Türker, T., Calık, I. ve Yildirim, O., 2022. Investigation of Environmental and Time Depended Effects on Historical Masonry Minarets by Vibration Test, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 37, 2, 799-813.
- Yıldırım, N., 2007. Kireçtaşlarında Tuzların Yıkıcı Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yılmaz, P., 2006. Tarihi Yapıların Modellenmesi ve Deprem Güvenliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Yolalıcı, M.,E., 1994. Maarif Salnamelerine Göre; Trabzon Vilayetinde Eğitim ve Öğretim Kurumları, Osmanlı Tarihi Araştırma ve Uygulama Merkezi Dergisi, OTAM, 5, 5, 435-473.
- Yu, D.,J. ve Ren, W.,X., 2005. EMD- Based Stochastic Subspace Identification of Structures from Operational Vibration Measurements, Engineering Structures, 27, 1741- 1751.
- Yu, E., Whang, D.,H., Venogupal, R., Stewart, J.,P. ve Wallace, J.,W., 2004. Force-Vibration Testing using the Linear Shaker Seismic Simulation (LSSS) Testing Method, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Ağustos, Vancouver, B.C., Kanada, 2206.
- Yüzer, N., Doran B., Coşandal A., Hazar A.,B., Berilgen M.,M. ve Büyükpınar Ç., 2015. Tarihi Yapıların Tuğla Duvar Özgün Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi ve Yük Altında Davranışının Model Deneylerle Araştırılması, TÜBİTAK 111M568 No'lu Proje, Sonuç Raporu.
- Zakar L. ve Eyüpgiller, K.,K., 2015. Mimari Restorasyon Koruma Teknik ve Yöntemleri, Ömür Matbaacılık A.Ş., İstanbul, 192 s.
- Zarniç, R., Gostiç, S., Crewe, A.,J. ve Taylor, C.,A., 2001. Shaking Table Tests of 1: 4 Reduced-Scale Models of Masonry Infilled Reinforced Concrete Frame Buildings, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 30, 6, 819-834.
- Zhang, M.,Z., 1997. Study on Similitude Laws for Shaking Table Test, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 17, 2, 52-58.
- Zimmerman, D.,C. ve Kaouk, M., 1992. Eigenstructure Assignment Approach for Structural Damage Detection, AIAA journal, 30, 7, 1848-1855.
- Zimmerman, D.,C. ve Kaouk, M., 1994. Structural Damage Detection Using a Minimum Rank Update Theory, Journal of Vibration and Acoustics, 116, 222-231.

ÖZGEÇMİŞ

Ali Fuat GENÇ, ilk ve orta öğrenimini (1997-2004) Mareşal Fevzi Çakmak İlköğretim Okulu'nda, lise öğrenimini (2004-2008) Affan Kitapçıoğlu Lisesi'nde, lisans eğitimini (2008-2012) Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde ve yüksek lisans eğitimini (2012-2015) Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tamamladı. 2015 yılı Şubat ayında Karadeniz Teknik Üniversitesi, of Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak atanan Genç, 2015 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora eğitimine başladı. Halen Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak görev yapan GENÇ, evli ve bir çocuk babasıdır. Ali Fuat GENÇ'in lisansüstü eğitimi boyunca yayınladığı makaleler (SCI ve SCI expanded) ve kitaplar aşağıda sunulmaktadır:

SCI İndekslerine Giren Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. Lakot E. A., Şensoy S. A., Tavşan F., Günaydın M., Genç A. F., Yılmaz Z., Altunışık A. C. (2023). Timber Vernacular Structures:'Serender' Turkish Storage Buildings in Eastern Black Sea Region, Journal of Architectural Conservation, 1-21. (Basımda)
2. Kaya A., Adanur S., Bello R. A., Genç A. F., Okur F. Y., Sunca F., Günaydın M., Altunışık A.C., Sevim B. (2023). Post-Earthquake Damage Assessments of Unreinforced Masonry (Urm) Buildings by Shake Table Test and Numerical Visualization, Engineering Failure Analysis, 143.
3. Günaydın M., Demirkır C., Altunışık A. C., Gezer E. D., Genç A. F., Okur F. Y. (2023). Diagnosis and Monitoring of Historical Timber Velipasa Han Building Prior to Restoration, International Journal of Architectural Heritage, 17, 2, 285-309.
4. Altunışık A. C., Genç A. F., Ertürk E., Günaydın M., Okur F. Y., Sevim B. (2022). Soil-Structure Interaction and Earthquake Input Models Effect on the Structural Response of the Santa Maria Church and Guesthouse Building, Journal of Earthquake Engineering.
5. Günaydın M., Genç A. F., Altunsisk A. C., Hacıfendioğlu K., Okur F. Y., Okur E., Adanur S. (2022). Structural Condition Assessment of a Historical Masonry School Building Using Experimental and Numerical Methods, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 12, 5, 1083-1113.
6. Hacıfendioğlu K., Genç A. F., Nayır S., Ayas S., Altunışık A. C. (2022). Automatic Estimation of Post-Fire Compressive Strength Reduction of Masonry Structures Using Deep Convolutional Neural Network, Fire Technology, 58, 5, 2779-2809.

7. Erturk E., Altunışık A. C., Genç A. F. (2022). Effect of Ground Motion Scaling Methods on Seismic Response of Masonry Clock Towers, *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering*, 46, Sa.4, Ss.3001-3024.
8. Günaydın M., Ertürk E., Genç A. F., Okur F. Y., Altunışık A. C., Tavşan C. (2022). Fe Model Updating and Seismic Performance Evaluation of a Historical Masonry Clock Tower, *Earthquakes and Structures*, 22, 1, 65-82.
9. Altunışık A. C., Sunca F., Genç A. F., Tavşan C. (2021). Post-Earthquake Damage Assessments of Historic Mosques and Effects of Near-Fault and Far-Fault Ground Motions on Seismic Responses, *International Journal of Architectural Heritage*.
10. Okur E. K., Altunışık A. C., Okur F. Y., Meral M., Yılmaz Z., Günaydın M., Genç A. F. (2021). Dynamic Response of a Traditional Himis, Mansion Using Updated FE Model With Operational Modal Testing, *Journal of Building Engineering*, 43.
11. Genç A. F., Kahya V., Altunışık A. C., Günaydın M., Demirkır C. (2021). Assessment of Modal Characteristics of Cross-Laminated Timber Beams Subject To Successive Damages, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 21, 3.
12. Günaydın M., Genç A. F., Karahasan O. Ş., Altunışık A. C., Okur F. Y., Adanur S. (2020). Nonlinear Dynamic Response of a Rc Frame For Different Structural Conditions Including the Effect of FE Model Updating, *International Journal of Civil Engineering*, 18, 5, 551-567.
13. Genç A. F., Ergun M., Günaydın M., Altunışık A. C., Ateş Ş., Okur F. Y., Mosallam A. S. (2019). Dynamic Analyses of Experimentally-Updated Fe Model of Historical Masonry Clock Towers Using Site-Specific Seismic Characteristics and Scaling Parameters According to the (2018) Turkey Building Earthquake Code, *Engineering Failure Analysis*, 105, 402-426.
14. Altunışık A. C., Kanbur B., Genç A. F., Kalkan E. (2019). Structural Response of Historical Masonry Arch Bridges Under Different Arch Curvature Considering Soil-Structure Interaction, *Geomechanics and Engineering*, 18, 2, 141-151.
15. Altunışık A. C., Okur F. Y., Genç A. F., Gunaydin M., Karahasan O. Ş. (2018). Automated Model Updating Effect on the Linear and Nonlinear Dynamic Responses of Historical Masonry Structures, *Experimental Techniques*, 42, 6, 605-621.
16. Altunışık A. C., Genç A. F., Gunaydin M., Okur F. Y., Karahasan O. Ş. (2018). Dynamic Response of a Historical Armory Building Using the Finite Element Model Validated By the Ambient Vibration Test, *Journal of Vibration and Control*, 24, 22, 5472-5484.
17. Altunışık A. C., Karahasan O. Ş., Genç A. F., Okur F. Y., Günaydın M., Kalkan E., Adanur S. (2018). Effect of Fiber-Reinforced Polymer Strengthening on Dynamic Characteristics of Reinforced Concrete Frame Using Model Updating, *Acı Structural Journal*, 115, 6, 1589-1601.
18. Altunışık A. C., Karahasan O. Ş., Genç A. F., Okur F. Y., Gunaydin M., Adanur S. (2018). Sensitivity-Based Model Updating of Building Frames Using Modal Test Data, *Ksce Journal of Civil Engineering*, 22, 10, 4038-4046.
19. Altunışık A. C., Karahasan O. Ş., Genç A. F., Okur F. Y., Gunaydin M., Kalkan E., Adanur S. (2018). Modal Parameter Identification of Rc Frame Under Undamaged, Damaged, Repaired and Strengthened Conditions, *Measurement*, 124, 260-276.

20. Altunışık A. C., Genç A. F., Gunaydin M., Adanur S., Okur F. Y. (2018). Ambient Vibration-Based System Identification of a Medieval Masonry Bastion for Health Assessment Using Nonlinear Analyses, *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 19, 2, 107-124.
21. Altunışık A. C., Okur F. Y., Genç A. F., Gunaydin M., Adanur S. (2018). Automated Model Updating of Historical Masonry Structures Based on Ambient Vibration Measurements, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 32, 1.
22. Altunışık A. C., Genç A. F. (2017). Earthquake Response of Heavily Damaged Historical Masonry Mosques After Restoration, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17, 10, 1811-1821.
23. Altunışık A. C., Ateş Ş., Hüsem M., Genç A. F. (2017). Collapse of Steel Cantilever Roof of Tribune Induced by Snow Loads, *Steel and Composite Structures*, 23, 3, 273-283.
24. Altunışık A. C., Adanur S., Genç A. F., Gunaydin M., Okur F. Y. (2017). An Investigation of the Seismic Behaviour of An Ancient Masonry Bastion Using Non-Destructive and Numerical Methods, *Experimental Mechanics*, 57, 2, 245-259.
25. Altunışık A. C., Adanur S., Genç A. F., Gunaydin M., Okur F. Y. (2016). Non-Destructive Testing of An Ancient Masonry Bastion, *Journal of Cultural Heritage*, 22, 1049-1054.
26. Altunışık A. C., Bayraktar A., Genç A. F. (2016). A Study on Seismic Behaviour of Masonry Mosques After Restoration, *Earthquakes and Structures*, 10, 6, 1331-1346.
27. Altunışık A. C., Kanbur B., Genç A. F. (2015). The Effect of Arch Geometry on the Structural Behavior of Masonry Bridges, *Smart Structures and Systems*, 16, 6, 1069-1089.
28. Altunışık A. C., Bayraktar A., Genç A. F. (2015). Determination of the Restoration Effect on the Structural Behavior of Masonry Arch Bridges, *Smart Structures and Systems*, 16, 1, 101-139.

Kitap ve Kitap Bölümleri

1. Altunışık A. C., Günaydin M., Genç A. F., Okur F. Y. İnşaat Mühendisliğinde Ansys Uygulamaları, *Dynamic Academy Yazılım İnşaat San. Tic. Ltd. Şti*, 2018.
2. Altunışık A. C., Genç A. F., Günaydin M., Okur F. Y. Structural Identification of Historical Masonry Structures: Finite Element Analyses, Ambient Vibration Tests, Model Updating And Earthquake Response, *Scholar Press--Lambert Academic Publishing*, Balti, 2017.