



**İSKENDERUN TEKNİK**  
ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EğİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK  
LİSANS  
TEZİ**

**YAPI SAğLIğI İZLEME  
SİSTEMLERİ İLE YAPILARIN  
DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN  
BELİRLENMESİ**

**Halil Çağrı YILMAZ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİğİ  
ANABİLİM DALI**

**TEMMUZ 2021**



**YAPI SAĞLIĞI İZLEME SİSTEMLERİ İLE YAPILARIN DİNAMİK  
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

**Halil Çağrı YILMAZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2021**

Halil Çağrı YILMAZ tarafından hazırlanan “YAPI SAĞLIĞI İZLEME SİSTEMLERİ İLE YAPILARIN DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Selçuk KAÇIN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....  
.....

**Başkan:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....  
.....

**Üye:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....  
.....

**Üye:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....  
.....

**Üye:** Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....  
.....

Tez Savunma Tarihi: ...../...../...

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,

Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,

Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,

Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,

Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Halil Çağrı YILMAZ

01/07/2021

YAPI SAĞLIĞI İZLEME SİSTEMLERİ İLE YAPILARIN DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN  
BELİRLENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)

Halil Çağrı YILMAZ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2021

ÖZET

Bu çalışmada yapı sağlığı izleme sistemleri yardımıyla yapıların dinamik karakteristikleri elde edilmeye çalışılmıştır. Yapıların dinamik karakteristiklerinin (doğal frekans, mod şekli ve modal sönüm oranı) belirlenmesi yapıların dinamik yükler altındaki davranışlarını belirlememiz için oldukça önemlidir. Dinamik karakteristikler teorik ve deneysel yöntemler yardımıyla belirlenebilmektedir. Yapısal sağlık izleme sistemleri, sensör teknolojilerindeki hızlı değişim, sensörlere daha kolay erişilmesi ve tahribatsız bir yöntem olmasından dolayı son yıllarda oldukça yaygınlaşmıştır. Yapı sağlığı izleme sistemleri ile yapıların gerçek zamanlı takibi ve gelişebilecek olumsuzluklara müdahale saatler mertebesine inmiştir. Yapıların titreşim etkisi altındaki tepkileri çeşitli sensörler (ivmeölçerler, hızölçerler vb.) yardımıyla kayıt altına alınmakta ve elde edilen verilerin analizleri ile dinamik karakteristikler elde edilmektedir. Deneysel çalışma kapsamında güçlendirilme uygulaması yapılmasına karar verilmiş iki okul binasının güçlendirme öncesi ve sonrası çevrel titreşim tepki kayıtları alınmıştır. Deneysel çalışma sonucu elde edilen tepki kayıtları analiz edilerek okul binalarına ait dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Ayrıca deneysel analizlerin karşılaştırılması amacıyla okul binalarının güçlendirme öncesi ve sonrası yapısal analiz programı yardımıyla sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. Elde edilen dinamik karakteristiklerin hem deneysel hem nümerik olarak kıyaslanması, yapı sağlığı izleme sistemlerinden elde edilen sonuçların güvenilirliği açısından ve güçlendirme uygulamalarının değerlendirilmesi açısından avantajları olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler : Yapı sağlığı izleme sistemleri, dinamik analiz, çevrel titreşim

Sayfa Adedi : 68

Danışman : Dr. Öğrt. Üyesi Selçuk KAÇIN

DETERMINATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF STRUCTURES WITH  
STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEMS

(M. Sc. Thesis)

Halil Çağrı YILMAZ

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

July 2021

ABSTRACT

In this study, it is aimed to find dynamic characteristics of structures utilizing structural health monitoring systems. Determining the dynamic characteristics of structures (natural frequency, mode shape and modal damping ratio) is very important in determining the behavior of the structures under dynamic loads. Dynamic characteristics can be determined using theoretical and experimental methods. Structural health monitoring systems have become quite common in recent years, thanks to the rapid changes in sensor technologies, easier access to sensors and being non-destructive method. Real-time building monitoring and interference with possible adverse events with structural health monitoring systems has been reduced to hourly levels. The responses of structures under the effect of vibration are recorded with the help of various sensors (accelerometers, speedometers, etc.) and the dynamic characteristics are determined by analyzing the obtained data. response records obtained as a result of the experimental study. Within the scope of the experimental study, ambient vibration response records were obtained from two existing school buildings. The dynamic characteristics of the school buildings were calculated through analysis of the response records obtained from the experimental study. In addition, for the purpose of compare the experimental analysis, before the strengthening and after the strengthening of the school buildings, the finite element model was created and analyzed employing a structural analysis program. The experimental and numerical data were compared and it was observed the results were in good agreement. Thus, it can be said that structural health monitoring systems used in the present study is reliable. Since this method is less time consuming than other methods, it was observed that it has more advantage during investigation of strengthening applications.

Key Words : Structural health monitoring systems, dynamic analysis, ambient vibration

Page Number : 68

Supervisor : Assistant Professor Selcuk KACIN

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin bütün aşamalarında yanımda olup daima beni destekleyen, cesaretlendiren, tecrübesiyle hiçbir yardımı esirgemeyen değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Selçuk KAÇIN'a saygılarımı sunup, teşekkürü borç bilirim.

Tezimin deneysel çalışmalarında benimle birlikte kendi çalışmaları gibi benimseyip yardımlarını eksik etmeyen Arş.Gör. Sezer SANCAR ve Arş.Gör. Ada YILMAZ'a çok teşekkür ederim. Ayrıca İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki değerli hocalarıma ve değerli mesai arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde büyük emeği olan, desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen sevgili annem Durdane YILMAZ'a, değerli babam Hacı Murat YILMAZ'a, beraber büyüdüğüm ve en yakın arkadaşım olan abim Op.Dr. Bilge Kağan YILMAZ'a, evimizin haylazı küçük kardeşim Metehan YILMAZ'a ve ablam Arş.Gör.Dr. Ayşe YALÇINKAYA YILMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
3. TEORİK ve DENEYSEL MODAL ANALİZ .....	16
3.1. Teorik Modal Analiz.....	16
3.1.1. Tek serbestlik dereceli sistemler .....	16
3.1.2. Çok serbestlik dereceli sistemler .....	19
3.2. Deneysel Modal Analiz .....	20
3.2.1. Geleneksel deneysel modal analiz .....	21
3.2.2. Operasyonel modal analiz .....	22
4. MATERYAL ve YÖNTEM .....	29
4.1. Materyal .....	29
4.1.1. İncelenen yapılar hakkında bilgiler.....	30
4.2. Yöntem .....	35
4.2.1. Titreşim kayıtlarının alınması.....	35
4.2.2. Yapısal analiz yazılımı ile modelleme ve analiz.....	37
4.2.3.ARTEMIS yazılımı ile modelleme ve analiz .....	40



	<b>Sayfa</b>
5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....	44
5.1. Deneysel ve Teorik Çalışma Analiz Sonuçları.....	44
5.1.1. Güçlendirme öncesi ve sonrası ARTEMIS yazılımı analiz sonuçları.....	44
5.1.2. Güçlendirme öncesi ve sonrası yapısal analiz yazılımı analiz sonuçları .....	52
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	57
6.1. Sonuç.....	57
6.2. Öneriler .....	59
KAYNAKLAR.....	60
DİZİN.....	68

**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 5.1. Güçlendirme öncesi GFTAA ve SAB yöntemi analiz sonuçları.....	45
Çizelge 5.2. Güçlendirme sonrası GFTAA ve SAB yöntemi analiz sonuçları.....	47
Çizelge 5.3. Güçlendirme öncesi GFTAA ve SAB yöntemi analiz sonuçları.....	50
Çizelge 5.4. Güçlendirme sonrası GFTAA ve SAB yöntemi analiz sonuçları.....	51
Çizelge 5.5. Güçlendirme öncesi okul binasının teorik analiz sonuçları.....	52
Çizelge 5.6. Güçlendirme sonrası okul binasının teorik analiz sonuçları .....	53
Çizelge 5.7. Güçlendirme sonrası okul binasının teorik analiz sonuçları.....	54
Çizelge 5.8. Güçlendirme öncesi ve sonrası okul binaları OMA ve teorik analiz sonuçları.....	55
Çizelge 5.9. Güçlendirme öncesi ve sonrası Payas Mesleki ve Teknik Lisesi OMA ve teorik analiz sonuçları.....	56
Çizelge 5.10. Güçlendirme öncesi ve sonrası Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi OMA ve teorik analiz sonuçları.....	56

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Türkiye deprem tehlikesi haritası (AFAD, 2019) .....	1
Şekil 1.2. Yapı sağlığı izleme sistem şeması.....	3
Şekil 3.1. (a) Tek serbestlik dereceli sistem kütle-yay modeli, (b) serbest cisim diyagramı.....	16
Şekil 3.2. Çok serbestlik dereceli sistem kütle-yay modeli.....	20
Şekil 3.3. Geleneksel deneysel modal analiz titreşim üretici cihazlar a) sarsma tablası b) darbe çekici c) yapay titreşim üretici (shaker) (Teknik Destek Grubu; Ataç, 2009).....	21
Şekil 3.4. İvmeölçer sensör örnekleri (Teknik Destek Grubu; Yetkin, Erkek ve Calayır, 2016) .....	22
Şekil 4.1. Sensörler ve Veri toplama ünitesi .....	29
Şekil 4.2. Verilerin bilgisayar yardımıyla kayıt edilmesi ve yazılım arayüzü .....	30
Şekil 4.3. Okul binası görünüşü.....	30
Şekil 4.4. Okul binası güçlendirme öncesi ve sonrası tipik kat planı .....	31
Şekil 4.5. Perde duvar uygulaması aşamaları.....	32
Şekil 4.6. Okul binası görünüşü.....	32
Şekil 4.7. Okul binası güçlendirme öncesi ve sonrası tipik kat planı .....	33
Şekil 4.8. Perde duvar uygulaması aşamaları .....	34
Şekil 4.9. Sırasıyla ilk ve ikinci aşama ivmeölçer sensör yerleşimi .....	35
Şekil 4.10. Titreşim kayıtlarının alınması .....	35
Şekil 4.11. İvmeölçer sensör yerleşimi .....	36
Şekil 4.12. Titreşim kayıtlarının alınması .....	36
Şekil 4.13. Güçlendirme sonrası sensör yerleşimi.....	37
Şekil 4.14. Duvarı temsil eden eşdeğer diyagonal basınç çubuğu (TBDY, 2018) .....	38
Şekil 4.15. Okul bina sonlu eleman modelleri, a) Payas Mesleki ve Teknik Lisesi b) Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi.....	39

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.16. Artemis yazılımı ile oluşturulan örnek model ve sensör yerleşimi.....	40
Şekil 4.17. ARTEMIS yazılımı arayüzü .....	41
Şekil 4.18. Okul binaları basit modelleri ve sensör yerleşimleri a) Payas Mesleki ve Teknik Lisesi b) Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi .....	42
Şekil 5.1. Güçlendirme öncesi Payas Mesleki ve Teknik Lisesi spektral yoğunluk fonksiyonu .....	44
Şekil 5.2. Güçlendirme öncesi Payas Mesleki ve Teknik Lisesi kararlılık diyagramı.....	45
Şekil 5.3. Güçlendirme sonrası Payas Mesleki ve Teknik Lisesi spektral yoğunluk fonksiyonu .....	46
Şekil 5.4. Güçlendirme sonrası Payas Mesleki ve Teknik Lisesi kararlılık diyagramı.....	47
Şekil 5.5. Okul binasının güçlendirme öncesi y doğrultusu ve x doğrultusu mod şekilleri .....	48
Şekil 5.6. a) güçlendirme öncesi y doğrultusu ve x doğrultusu mod şekilleri b) güçlendirme sonrası y doğrultusu ve x doğrultusu mod şekilleri.....	48
Şekil 5.7. Güçlendirme öncesi Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi spektral yoğunluk fonksiyonu .....	49
Şekil 5.8. Güçlendirme öncesi Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi kararlılık diyagramı .....	49
Şekil 5.9. Güçlendirme sonrası Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi spektral yoğunluk fonksiyonu .....	50
Şekil 5.10. Güçlendirme sonrası Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi kararlılık diyagramı.....	51
Şekil 5.11. Okul binasının güçlendirme öncesi y doğrultusu ve x doğrultusu mod şekilleri.....	52
Şekil 5.12. Okul binasının güçlendirme öncesi sırasıyla ilk iki mod şekli .....	53
Şekil 5.13. Okul binasının güçlendirme sonrası sırasıyla ilk iki mod şekli .....	53
Şekil 5.14. Okul binasının güçlendirme öncesi sırasıyla ilk iki mod şekli .....	54
Şekil 5.15. Okul binasının güçlendirme öncesi sırasıyla ilk iki mod şekli .....	55

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler

**cm**

Santimetre

**dk**

Dakika

**g**

Gram

**Hz**

Hertz

**kg**

Kilogram

**m**

Metre

**m<sup>2</sup>**

Metrekare

**mm**

Milimetre

**MPa**

Megapaskal

**N**

Newton

**sn**

Saniye

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

**ABE**

Amerikan Beton Enstitüsü

**AFAD**

Afet ve Acil Durum

**ARTEMIS**

Ambient Response Testing and  
Modal Identification Software

**ASD**

Ayarlanmış Sıvı Damperli

**ASK**

Avrupa Standartlar Komitesi

**BHFT**

Bayesian Hızlı Fourier Transform

**BSA**

Basit Frekans Alanı

**ÇİZA**

Çok referanslı İbrahim Zaman Alanı

**ÇSDS**

Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

**ÇTT**

Çevrel Titreşim Testi

**DMA**

DeneySEL Modal Analiz

**DUT**

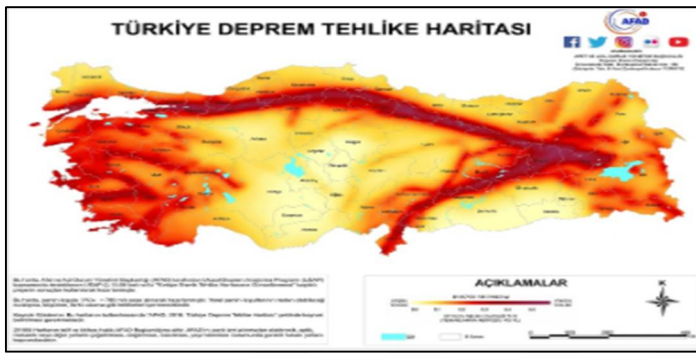
Doğal Uyarım Tekniği

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>FEMA</b>	Federal Emergency Management Agency
<b>FTA</b>	Frekans Tanım Alanı
<b>FTAA</b>	Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma
<b>FTF</b>	Frekans Tepki Fonksiyonu
<b>GDMA</b>	Geleneksel Deneysel Modal Analiz
<b>GDMA</b>	Geleneksel Deneysel Modal Analiz
<b>GFTAA</b>	Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma
<b>GSY</b>	Güç Spektral Yoğunluk
<b>HFD</b>	Hızlı Fourier Dönüşümü
<b>HS</b>	Hindistan Standartları
<b>MKY</b>	Model Kalibrasyon Yöntemimi
<b>OHO</b>	Otoregresif Hareketli Ortalamalar
<b>OMA</b>	Operasyonel Modal Analiz
<b>PS</b>	Piklerin Seçilmesi
<b>SAB</b>	Stokastik Alt alan Belirleme
<b>SEM</b>	Sonlu Elemanlar Metodu
<b>TAFD</b>	Ters Ayrık Fourier Dönüşümü
<b>TBDY</b>	Türkiye Bina Depren Yönetmeliği
<b>TDA</b>	Tekil Değer Ayrıştırma
<b>TMA</b>	Teorik Modal Analiz
<b>TS</b>	Türk Standartları
<b>TSDS</b>	Tek Serbestlik Dereceli Sistemler
<b>TSYS</b>	Tepkilerin Spektral Yoğunluk Spektrumu
<b>VOHO</b>	Vektör Otoregresif Hareketli Ortalamalar
<b>YSİ</b>	Yapı Sağlığı İzleme
<b>ZTA</b>	Zaman Tanım Alanı

## 1. GİRİŞ

Ülkemiz mevcut konumu itibariyle deprem kuşağında yer almaktadır (Şekil 1.1). Ülkemizde bulunan mevcut yapılar sürekli olarak küçük ya da büyük ölçekli deprem kuvvetlerine maruz kalmaktadırlar. Sürekli olarak deprem kuvvetine maruz kalan yapıların zamanla hasar düzeyleri değişmektedir. Sürekli meydana gelen bu değişim yapıların gerçek performanslarının değerlendirilmesinin yapılamamasına sebep olmakta ve olası büyük ölçekli depremlerde deprem kuvvetinin yıkıcı etkisi tahmin edilememektedir.



Şekil 1.1 Türkiye deprem tehlike haritası (AFAD, 2019)

Mevcut yapılarda oluşan hasarlar sadece deprem kuvvetinin etkisinden kaynaklanmayıp bunun yanında rüzgar kuvveti, yapı çevresinde meydana gelen metro ve tünel inşaatları, patlatmalı saha çalışmaları ve kazı çalışmaları gibi birçok farklı dinamik etkiden kaynaklanmaktadır. Deprem kuvvetinde olduğu gibi bütün bu dinamik yükler yapıların hasar düzeyinde değişiklik meydana getirebilmektedir. Bu nedenle mevcut yapılarının servis ömrü süresince hasar durumunun belirlenmesi ve gerçek performansının değerlendirilmesi oldukça önem arz etmektedir. Yapıların dinamik yükler etkisi altındaki davranışını anlayabilmek için yapılara ait dinamik karakteristikler (doğal frekans, mod şekli, sönüm oranı) belirlenmelidir. Yapılarda meydana gelen değişiklikler (hasar, güçlendirme vb.) sonucu dinamik karakteristiklerde değişim meydana gelebilir ve bu değişimlerin takip edilmesiyle yapının rijitliği ve hasar düzeyi hakkında fikir sahibi olunabilir. Farrar ve Jauregui (1998a, 1998b) yaptıkları çalışmalar ile dinamik karakteristiklerdeki değişimi takip ederek hasar tespiti yapılabileceğini belirtmişlerdir.

Dinamik karakteristikler olarak adlandırılan doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranının yapıların özelliklerini yansıtacak şekilde belirlenmesi amacıyla yapılarda oluşan titreşimlerin incelenmesi çalışmalarının tümü modal analiz olarak isimlendirilmektedir.

Modal analiz, titreşim teorisine dayalı bir yöntemdir. Titreşim, bir sistemin salınım hareketlerini tanımlayan bir terim olup, serbest ve zorlamalı titreşim olmak üzere iki çeşittir (Kaçın, Bikçe, Geneş, Doğanay ve Ünlüsoy, 2011; Kaçın ve Soysal, 2017).

Yapıların modal analizi teorik ve deneysel yöntemler kullanılarak iki şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Teorik modal analiz (TMA) yöntemleri ile analiz aşamasında ilk olarak gerçek sistemle eş değer olacak ve matematik olarak daha kolay analiz edilebilecek basitleştirilmiş bir analitik model oluşturulmalıdır. Daha sonra analitik modele karşılık gelen matematik model belirlenir ve analiz için diferansiyel denklemler çözülerek aranan dinamik karakteristiklerin elde edilir. Yapı sistemlerinin gittikçe büyük ve kompleks hale gelmesi ile teorik yöntemler kullanılarak yapılan modal analiz zorlaşmaktadır. Bu zorluğun ortadan kaldırılması amacıyla belirli kabuller yapılarak nümerik yöntemler geliştirilmiş ve bilgisayar yardımıyla büyük ve kompleks olan yapılar dahi çözülebilir hale gelmiştir. Yapıların analizinde nümerik yöntem olarak sıklıkla Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) tercih edilmektedir. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak oluşturulan analitik model pek çok kabul ile oluşturulmaktadır. Yapılan bu kabullerin temel sebebi ise; yapının mesnetlenme biçimi, yapıya ait malzeme özelliklerindeki belirsizlikler, ani dinamik etkiye sahip yüklerin oluşturacağı hasarların tam olarak bilinmemesi ve analiz içindeki belirsizlik ve bilinmeyenler olarak verilebilir. Teorik modal analiz yöntemindeki kabuller sonucu yapının gerçek dinamik davranışı bulunamamakta yeterli yaklaşık sonuçlar elde edilmektedir.

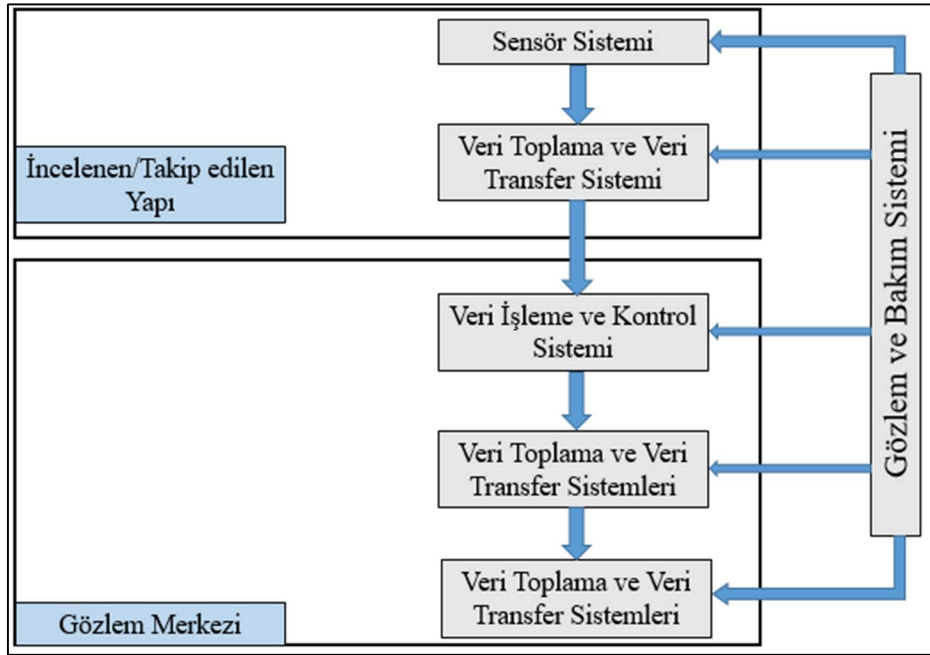
Deneysel Modal Analiz (DMA) yöntemi ile teorik analizlerdeki kabullerden kurtulup yapının gerçek dinamik davranışı elde edilebilmektedir. Deneysel modal analiz ile teorik çalışmaların da doğruluğu sağlanmış olmaktadır. Genel itibari ile incelenen yapının etkilere verdiği tepkinin (titreşimin) takibine dayanan DMA yöntemi birçok mühendislik alanında kullanılmaktadır.

Herhangi bir ürün veya yapının dinamik özelliklerinin hasarlı ve hasarsız durumlar için belirlenmesi ve performans düzeyinin değerlendirilmesi geçmişten günümüze gelişen teknoloji ile birlikte DMA yöntemi kullanılarak daha kolay ve hızlı hale gelmiştir. DMA çalışmalarını kapsamında kullanılan ivmeölçer, hızölçer vb. gibi elektronik cihazlardaki gelişmeler ve erişilebilirlik kolaylığı mühendislik alanında Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) sistemleri olarak bina türü yapılarda yeni bir mühendislik disiplini oluşturmuştur. YSİ sistemleri yapıların kullanım aşamasında da düzenli ya da aralıklı olarak sensörler aracılığı



ile elde edilen verilerin takip edilmesi, gerektiği durumlarda önlemler alınması, yapıdaki hasarların tespiti gibi konuları kapsayan bir mühendislik alanıdır (Şekil 1.2).

YSİ sistemlerinden elde edilen verilerin değerlendirilmesiyle olası risklerin önlenmesi saatler mertebesine düşmüştür. Pek çok avantajı olan bu sistemlerin önemini ülkelerin bu alan ile ilgili çıkardıkları kanun ve düzenlemeler ile anlamaktayız (AFAD, 2019).



Şekil 1.2 Yapı sağlığı izleme sistem şeması

Bu tez çalışması kapsamında YSİ sistemleri kullanılarak Hatay İli İskenderun ve Payas ilçelerinde yer alan iki okul binasından güçlendirme öncesi ve sonrası alınan çevrel titreşim kayıtlarının analizi ile okullara ait dinamik özellikler elde edilmeye çalışılmıştır.

Yüksek lisans tezi altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde konu hakkında genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde konuyla alakalı literatür çalışmaları yer almaktadır. Üçüncü bölümde teorik modal analiz yöntemi tanımı, deneysel modal analiz yöntemi tanımı deneysel modal analiz uygulama alanları ve çözüm yöntemleri açıklanmıştır. Dördüncü bölümde deneysel çalışmada kullanılan materyaller, incelenen okul binaları hakkında bilgiler, deneysel ölçümler hakkında bilgiler, okul binalarının nümerik analizi için kullanılan yazılım ve titreşim kayıtlarının analizinde kullanılan yazılım hakkında bilgilere yer verilmiştir. Beşinci bölümde analiz sonuçları ve sonuçlar hakkında tartışma yapılmıştır. Altıncı bölümde ise; tez çalışmasından elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yapı Sağlığı İzlemesi (YSİ) inşaat mühendisliği yapılarının davranışlarının ve yapısal bütünlüklerinin depreme ya da diğer yıkıcı dinamik etkilere karşı aralıklı veya devamlı olarak izlenmesi, kullanım durumundaki yapıların servis performanslarının değerlendirilmesi ve raporlanması çalışması olarak tanımlanmaktadır. İnşaat mühendisliği alanı kapsamında birçok farklı yapı üzerinde başarılı YSİ uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Her ülkede ulaşım ağında çok önemli bir öneme sahip olan köprüler (Brownjohn, 1988; Gentile, 2005; Benedettini, Alaggio ve Manetta, 2005; Bas, Apaydin, Ilki ve Catbas, 2018), kültürel mirasın simgesi olan tarihi yapılar (Ramos ve diğerleri, 2007; Bağbancı ve Bağbancı, 2018; Baraccani, Palermo, Gasparini ve Trombetti, 2021), orta ve yüksek katlı binalar (Venture ve Turek, 2005; Tamura ve diğerleri, 2005, Aldırmaz, 2020), barajlar (Baptista, Mendes ve Oliveira, 2005), stadyumlar (Reynolds, Mohanty ve Pavic, 2005), tüneller (Domaneschi ve diğerleri, 2020) ve rüzgar türbinleri (Ibsen ve Liingaard, 2005) gibi birçok farklı büyüklükteki yapıda araştırmacılar tarafından uygulaması yapılmıştır.

Fanning ve Boothby (2001) üç adet tarihi kemer köprü üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemini kullanarak deneysel analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca köprülerin 3-boyutlu lineer olmayan sonlu eleman modelleri oluşturmuş ve analiz etmişlerdir. Teorik modelden elde edilen sonuçlar ile OMA sonuçları karşılaştırılmıştır.

Zapico, Gonzalez, Friswell, Taylor ve Crewe (2003) çok açıklıklı bir karayolu köprüsünün dinamik parametrelerini bulmak için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneysel çalışmada köprünün 1/50 ölçekli modelini oluşturmuşlardır. Oluşturulan model köprü, 4 m uzunluğunda ve dört açıklığa sahiptir. Model köprü ayakları farklı yükseklikte zemine oturmuş durumdadır. Dört farklı kesit tip ayak kullanılan modelde ayakların düşey ve yatay yükler altında göstereceği davranışı belirlemeyi amaçlamışlardır. Model köprünün dinamik parametrelerini belirlemek için köprü sarma tablası üzerinde zorlanmış titreşim testlerine tabi tutulmuştur. Deneysel ölçümler sırasında enine yönde ve düşük yoğunluklu titreşimler uygulanmıştır. Elde edilen Frekans Tepki Fonksiyonları (FTF) kullanılarak dinamik parametrelerden doğal frekanslar ve mod şekilleri belirlenmiştir. Ayrıca model köprü sonlu eleman yöntemi ile analiz edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucu ve numerik çalışmalar sonucu elde edilen dinamik

parametreler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu gözlemlenen farklılıklar model güncellemesi çalışması gereksinimi doğurmuştur. Model güncellemesinde sınır şartlarındaki ve malzeme özelliklerindeki değişimler yardımıyla fark %30'lardan %2'lere kadar düşürülmüştür.

Aoki, Komiyama, Sabia ve Rivella (2004) Japonya bulunan 3 açıklı Rakanji taş kemer köprüsü üzerinde deneysel ve teorik çalışmalar yapmışlardır. Köprü'nün sonlu eleman modelini oluşturmak için köprü malzeme özelliklerini belirleme testleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen test sonuçları ile köprü modellenmiş ve analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda köprüye ait teorik mod şekilleri ile doğal frekansları hesaplanmıştır. Deneysel çalışma ile köprü üzerinden çevresel titreşimlerin etkisi altında ivme kayıtları alınmıştır. Elde edilen bu deneysel verilerin analiz edilmesiyle köprüye ait deneysel dinamik karakteristiklerini hesaplanmıştır. Deneysel çalışmada elde edilen ivme kayıtlarının analizinde zaman tanım alanındaki veri işleme yöntemleri kullanılmıştır. Teorik çalışma ile deneysel çalışma sonuçları kıyaslanmış ve aralarında iyi uyum olduğu gözlemlenmiştir.

Ren, Zatar ve Harik (2004) 1972 yılında inşa edilmiş betonarme bir köprü'nün sismik davranışını belirlemek için köprü üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Altı açıklıklı ve 509 m uzunluğuna sahip köprü Güney ABD'deki Cumberland Nehri üzerinde bulunmaktadır. Deneysel çalışma kapsamında çevresel titreşim etkisi altında köprüden üç eksenli ivmeölçerler yardımıyla titreşim kayıtları alınmıştır. Kayıtlar için üç adet ivmeölçer kullanılmıştır. Ayrıca köprü'nün yapı analiz programıyla (SAP2000) sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model analiz edilmiş ve köprüye ait dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Deneysel çalışma sonucu kayıt altına alınan titreşim verileri Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) ve Stokastik Alt alan Belirleme (SAB) yöntemleri ile işlenmiş ve dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar ile sonlu eleman modeli sonuçları kıyaslanmış ve farklılıklar gözlemlenmiştir. Farklılıkların giderilmesi için köprü'nün sonlu eleman modeli üzerinde iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Bölgede daha önce meydana gelen depremler sonucu elde edilen deprem kayıtlar kullanılarak köprü'nün sismik davranışı incelenmiştir.

Bayraktar ve diğerleri (2010) inşası devam eden ve tamamlanmış olmak üzere farklı inşaaşamalarında bulunan üç betonarme binanın dinamik parametrelerini elde etmek amacıyla deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deneysel çalışma karkas hal, tuğlalı hal ve yapımı

tamamlanmış halde üç farklı bina üzerinde gerçekleştirilmiştir. Binalar üzerinde gerçekleştirilen ölçümlerin analiz edilmesi ile her bir binanın dinamik parametreleri (doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları) hesaplanmıştır. Ek olarak binaların birinci doğal titreşim frekansları standartlarda kullanılan yaklaşık yöntemlerden yararlanılarak hesaplanmıştır. Deneysel ölçüm ve hesap sonucu elde edilen frekans değerleri kıyaslanmıştır. Deneysel çalışma ile bulunan birinci doğal frekans değerinin yaklaşık yöntemlerden yararlanılarak elde edilen birinci doğal frekans değerinden daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.

Bayraktar (2012) çalışmasında iki açıklıktan oluşan bir üst geçit ile on açıklıktan oluşan Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisini seçmiştir. İki yapının dinamik parametreleri deneysel ve teorik yöntemlerle belirlenmiştir. Deneysel dinamik parametreler belirlenirken elde edilen çevresel titreşim kayıtları Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi ile belirlenmiştir. Titreşim sinyallerinin ayrıştırma işlemlerinde frekans alanı yöntemi olan GFTAA ve zaman alanı yöntemi olan SAB yöntemleri kullanılmıştır. Dinamik parametrelerin teorik olarak belirlenmesinde ise SAP2000 yapı analiz programı kullanılmıştır. Üst geçidin çevresel titreşim kayıtları her üç doğrultu (x, y ve z ) için ölçülmüştür. Deneysel çalışmada biri referans kabul edilen sekiz adet ivmeölçer kullanılmıştır. Prefabrik üretim tesisinin çevresel titreşim kayıtları iki doğrultu (x ve y) için ölçülmüştür. Deneysel çalışmada on iki adet tek eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda teorik ve deneysel doğal frekanslar arasında karşılaştırma yapılmış ve farklılıkların olduğu görülmüştür. Farklılıkların giderilmesi için yapı analiz programı kullanılarak oluşturulan sonlu eleman modellerinin deneysel verilerden elde edilen bilgiler kullanılarak iyileştirilmesi yapılmıştır. İyileştirme çalışması sonrasında analitik ve deneysel sonuçlar arasında uyum artırılmıştır.

Bayraktar (2012) iki farklı tarihi yapı (Hamza Paşa Türbesi ve Kavak Meydan Şadırvanı) üzerinde teorik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Her iki yapıda da dinamik parametrelerin teorik olarak belirlenmesinde SAP2000 yapı analiz programı kullanılmıştır. Deneysel dinamik parametrelerin belirlenebilmesi için de OMA yöntemi kullanılarak titreşim testi gerçekleştirilmiş ve çevresel titreşim etkisindeki yapılardan ivme kayıtları alınmıştır. Ölçümler sırasında Hamza Paşa Türbesi ve Kavak Meydan Şadırvanında sırasıyla 19 ve 12 adet tek eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Kullanılan ivmeölçerler yatay ve düşey doğrultuda konumlandırılmıştır. Toplanan çevresel titreşim kayıtlarının analizi GFTAA ve

SAB yöntemleri ile yapılmıştır. Her iki tarihi yapıdan deneysel ve teorik yöntemlerle elde edilen dinamik parametreler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu farklılıklar gözlenmiştir. Farklılıkların giderilmesi için model iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. İyileştirme çalışmalarında sınır şartları, malzemenin elastisite modülü ve yoğunluğu seçilmiştir. Model iyileştirmesi sonucunda teorik ve deneysel sonuçlar arasında uyum sağlamıştır.

Benzer bir şekilde Türker ve Bayraktar (2014) Samsunun Bafra ilçesinde yer alan yaklaşık 250 metre uzunluğa sahip tarihi Ali Çetinkaya köprüsünün dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar yapmışlardır. Ali Çetinkaya köprüsünün dinamik karakteristikleri OMA yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Tarihi köprünün sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve deneysel çalışma ile elde edilen sonuçlar yardımıyla modelin kalibrasyonu yapılarak modeli güncellemişlerdir. Güncellenen sonlu eleman modeli üzerinde ölü yük ve hareketli yük gibi farklı yük koşulları altında analizler gerçekleştirmişlerdir.

Durgun, Aktaş ve Kutaniş (2013) üç katlı çelik bir yapı modelinin dinamik karakteristiklerini laboratuvar deneyleri ile belirlemeye çalışmışlardır. Oluşturulan model yapı 60×60 cm boyutlarına sahip sarsma tablası üzerine yerleştirilmiştir. Model bina katlarına ivmeölçerler yerleştirilmiş. Sarsma tablası üzerinde bulunan model binaya zorlanmış titreşim uygulanmış ve ivme kayıtları alınmıştır. Model hasarsız ve hasarlı olmak üzere iki farklı deneye tabi tutulmuştur. Hasarsız durumda çelik yapı modelinin dinamik parametreleri (doğal frekansları, sönüm oranları ve mod şekilleri), alınan ivme kayıtlarının analizleri sonucu belirlenmiştir. Hasarlı deney için çelik model yapı kolonlarında hasar oluşturulup tekrar ivme kayıtları alınmıştır. Hasarlı model üzerinde yapılan deneyden alınan kayıtlar üzerinde filtreleme işlemi gerçekleştirilmiş ve kayıtlar analiz edilmiştir. Analiz sonucu hasarlı modele ait dinamik parametreler belirlenmiştir. Bu deneysel çalışma ile çelik yapı modellerinin hasarlı ve hasarsız durumlardaki dinamik parametrelerinde gerçekleşen değişimler karşılaştırılmıştır.

Brencich ve Sabia (2008) 1866 yılında inşa edilen 18 açıklıklı tarihi Tanaro köprüsü üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Tarihi köprü farklı hasar durumları altında incelenmiştir. Deneysel çalışmada ilk olarak köprüye ait malzeme özelliklerini belirlemek için testler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen malzeme verileri ile köprünün 5 farklı sonlu eleman modeli

oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin analizi ile mod şekilleri ve doğal frekansları her model için hesaplanmıştır. Daha sonra köprünün belirli bölgelerinde ivmeölçerler yardımıyla köprünün dinamik testleri yapılmış her bir test için köprüye ait dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen analizler ile köprü dinamik karakteristikleri doğru olarak belirlenmek isteniyorsa köprünün büyük bir kısmının incelenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Ramos, De Roeck, Lourenço ve Campos-Costa (2009) yaptıkları deneysel çalışmalar ile yığma bir kemeri laboratuvar ortamında modellemiştir. Model üzerinde hasar analizleri gerçekleştirmişlerdir. Model yığma kemerin hasarsız durumdan aşamalı olarak hasara maruz bırakılması ile deneysel çalışma tamamlanmıştır. İlk olarak kemerin hasarsız halde dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir, daha sonra aşamalı olarak hasara maruz bırakılmış her bir aşamada tekrar dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen analiz sonuçları, yapılan çalışmanın gerçek bir yapıya uygulanması durumunda titreşim tabanlı hasar tespit yöntemlerinin tarihi yığma yapıların korunmasında etkili bir yöntem olabileceği sonucuna varılmıştır.

De Stefano (2007) bir barok kilisesinin yığma kubbesi üzerinde çevre, çekiç, düşürülen objeler ve helikopter tarafından oluşturulan rüzgar türbülansı gibi farklı titreşim etkilerini kullanarak dinamik deneyler gerçekleştirmiştir. Deneyler sonucu kubbeye ait ilk altı mod şekli belirlenmiştir. Ayrıca yığma kubbenin sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Sonlu eleman modeli oluşturulurken kubbenin komşu yapılarla etkileşimini sağlamak için modele elastik yaylar atanmıştır. Deneysel ve teorik çalışma, model iyileştirmesi için kullanılan parametrelerin ve model oluşturulurken yapılan mühendislik kabullerindeki belirsizlikleri ortaya çıkarmıştır.

Atamtürktür, Asce ve Sevim (2012) iki farklı Guastavino tarzı yığma kubbenin doğrusal olmayan deprem performansı üzerinde gerçekleştirilen teorik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Kubbelerin sismik performansları doğrusal olmayan sonlu eleman modelleri ile belirlenmiştir. Yapılar üzerinde gerçekleştirilen titreşim tepkilerinin ölçümleri yardımıyla sonlu eleman modellerinin geliştirilmesi sağlanmıştır. Model geliştirmesinden sonar 1940 El Centro depremi ivme kayıtlarını kullanarak kubbelerin deprem performansını belirlemişlerdir.

Zhou ve diğeri (2017) Laibinde yer alan 10 adet yüksek katlı yapının dinamik davranışını incelemişlerdir. Doğal periyot ve mod şekli OMA yöntemi ile hesaplanmıştır. Ek olarak binaların analitik modelleri oluşturulup analiz edilerek dinamik parametreler elde edilmiştir. Yapılan bu deneysel çalışmada dolgu duvarların ağırlıklarının ve rijitliklerinin yapının dinamik karakteristikleri üzerindeki etkisi tartışılmıştır.

Mohammed ve diğeri (2017) 2015 yılında gerçekleşmiş olan Nepal depreminde hasar almış 18 katlı bir yapının deprem sonrası sistem tanımlaması için saha çalışmaları yapmışlardır. Binayı temsil edecek iki adet sonlu eleman modeli oluşturulmuş ayrıca ivmeölçer ve sismometreler yardımıyla iki ayrı test sistemi kullanılarak bina üzerinde çevrel titreşim testi gerçekleştirmişlerdir. Toplanan verilerin analizi ile binaya ait modal parametreler çıkartılmıştır. Bu parametreler sonlu eleman modellerinin iyileştirme çalışmasında kullanılmıştır.

Altunışık ve diğeri (2012) Eynel çelik otoyolu köprüsü üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışma ile köprünün sonlu eleman modelini deneme yanılma yolu ile iyileştirme çalışması yapmışlardır. Sonlu eleman modelinin iyileştirme çalışması OMA metodu kullanılarak elde edilen modal parametreler yardımıyla gerçekleştirilmiştir. İyileştirme çalışmaları sonucunda iki model arasında ciddi miktarda yer değiştirme farkı olduğunu gözlemlemişlerdir.

Ventura ve diğeri (2001) 15 katlı betonarme bir yapının üzerinde Çevresel Titreşim Testi (ÇTT) gerçekleştirerek yapıya ait dinamik karakteristikleri elde etmeye çalışmışlardır. Deneysel çalışma kapsamında yapının tüm katlarından ölçüm alınarak yapıya ait ilk 6 doğal periyot ve bu periyotlara ait mod şekillerini belirlemişlerdir. Ayrıca yapıya ait sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. Deneysel çalışma sonu elde edilen modal parametreler yardımıyla sonlu eleman modeli üzerinde iyileştirme çalışmaları yapmışlardır.

Cunha ve diğeri (2004) Vasco de Gama köprüsü üzerinde çevrel titreşim testi yaparak köprüye ait dinamik karakteristiklerden frekans ve sönüm oranlarını hesaplamaya çalışmışlardır. Deneysel çalışma kapsamında 6 adet üç eksenli ivmeölçer kullanmışlardır. İvmeölçerlerin 2 tanesini referans diğer 4 tanesini hareketli ivmeölçer kabul ederek ölçümlerini tamamlamışlardır. Deneysel çalışma ile elde edilen titreşim kayıtlarını Frekans

Tanım Alanında Ayırıştırma (FTAA) ve SAB yöntemlerini kullanarak analiz etmişler ve köprüye ait frekans ve sönüm oranlarını hesaplamışlardır.

Türker (2014) mevcut bir betonarme yapıya ait temeli 1/20 ölçekte tasarlayıp operasyonel modal analizini gerçekleştirmiştir. Yapı temelini üç farklı zemine oturarak 0-100 Hz frekans aralığında ölçümler almıştır. Ölçümleri 9 adet tek eksenli ivmeölçerler yardımıyla yapmıştır. 10 dakikalık ölçümler sonucunda 1.moddaki en yüksek frekansın çakıllı zeminde meydana geldiğini gözlemlemiştir.

Votsis ve diğerleri (2012) iki adet tarihi yapı üzerinde çevrel titreşim testleri yapmışlar ve yapılara ait dinamik karakteristikleri belirlemişlerdir. Ayrıca yapılara ait sonlu eleman modelleri oluşturmuşlar deneysel çalışma sonucu elde ettikleri verilerin analizleri yardımıyla sonlu eleman modelleri üzerinde iyileştirme çalışması yapmışlardır.

Bayraktar, Sevim, Altunışık ve Türker (2007) tarihi bir yapı olan İskender Paşa camisi minaresinin dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla çevrel titreşim testleri yapmışlardır. Çevrel titreşim testi ile minareye ait tepki kayıtları üç eksenli ivmeölçer yardımıyla elde edilmiştir. Deneysel çalışma sonucu minareye ait ilk yedi modu elde etmişlerdir. Ayrıca minarenin sonlu eleman modeli oluşturularak nümerik analizi yapılmıştır. Deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlar kıyaslanmış ve sonuçlar arasında farklılıklar tespit edilmiştir. Sonuçlar arasındaki farklılıkların giderilebilmesi amacıyla nümerik model üzerinde iyileştirme çalışması yapmışlardır.

Cunha, Caetano ve Moutinho (2000) daha önce üzerinde çalışma yaptıkları bir yapıya çevrel titreşim testi uygulamışlardır. Yapıya ait frekans ve mod şekilleri elde etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçları geçmiş çalışmanın sonuçları ile kıyaslamış ve benzer sonuçlar olduklarını görmüşlerdir.

Bartoli, Betti ve Giardano (2013) tarihi Torre Grossa çan kulesi üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalar ile yapının statik ve dinamik performanslarını belirlemeye çalışmışlardır. Deneysel çalışma kapsamında yapı üzerinde zorlanmış titreşim testi gerçekleştirmişlerdir. İki adet tahrikçi kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucu yapıya ait dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Yapının sonlu eleman modelinin oluşturulması ve malzeme özelliklerinin belirlenmesi için yapıdan karot örnekleri alınmıştır.



Oluşturulan sonlu eleman modeli analiz edilerek deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Choi, Park, Hyun, Kim ve Choi (2010) endüstriyel bir yapı olan Ulchin nükleer enerji santrali birim beş üzerinde çevrel titreşim testleri yapmışlardır. Kubbe benzeri betonarme yapıdan ivmeölçerler yardımıyla tepki kayıtları alınmış ve FTAA metodu kullanılarak analiz edilmiştir. Yapının nümerik modelinin oluşturulması için sonlu eleman metodu ile analiz yapan ABAQUS v6.5 ticari yazılımı kullanılmış ve analiz gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma ve nümerik çalışma sonuçları karşılaştırılarak gözlenen farklılıklar sonlu eleman modeli üzerinde gerçekleştirilen iyileştirme çalışmaları ile giderilmeye çalışılmıştır.

Başpolat, Bayraktar, Başağa ve Türker (2013) Türkiye’de bulunan Deriner beton kemer barajının dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla çevrel titreşim testleri yapmışlardır. Çevrel titreşim kayıtları alınırken barajın büyüklüğünden ve sensör sayısını yetersizliği nedeniyle referanslı ölçüm yapmışlardır. Kayıt altına alınan çevrel titreşim tepkilerini GFTAA metodu ile analiz edip baraja ait ilk beş doğal frekans ve bu frekanslara ait mod şekillerini elde etmişlerdir.

Soyöz ve diğerleri (2013) Boğaziçi Üniversitesi Kuzey Kampüsünde yer alan betonarme bir eğitim binası üzerinde deneysel ve analitik çalışmalar yapmışlardır. Bina üzerinde güçlendirme öncesi ve sonrası çevrel titreşim ve zorlanmış titreşim testleri yapmışlardır. Perde duvar ve kolon mantolama ile güçlendirilen binadan güçlendirme sonrası titreşim üretici cihaz ile zorlanmış titreşim testi gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen verileri GFTAA metodu ile analiz ederek çevrel titreşim ve zorlanmış titreşim sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Ventura, Laverick, Brincker ve Anderson (2003), 54 katlı The 777 Tower ve 52 katlı Figueroa at Wilshire Tower binalarında deneysel modal analiz çalışması yapmışlardır. Çevrel titreşim kayıtları FTAA metodu ile analiz edilmiş ve binalara ait dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Ayrıca binalara Northridge deprem kayıtları uygulanıp deprem performansını değerlendirmişlerdir.

Vivo, Brutti ve Leofanti (2013) 30 metre uzunluğuna sahip yaklaşık 137 ton ağırlığında olan Vega fırlatma sistemi üzerinde zorlanmış titreşim ve çevresel titreşim testleri gerçekleştirmişlerdir. Zorlanmış titreşim testi ölçümlerinde titreşim üretici cihazlar ile yapıya dış tahrik uygulanmıştır. Testler sonucu elde edilen kayıtların analizinde Doğal Uyarım

Tekniği (DUT) metodu kullanılmıştır. Hem zorlanmış titreşim testi hem de çevrel titreşim testi sonuçları kıyaslandığında ilk iki frekansın birbirine çok yakın olduğunu gözlemlemişlerdir.

alık, Demirtaş, Bayraktar ve Türker (2012) yenileme çalışması yapılabilmesi için tarihi bir yapı üzerinde çevrel titreşim testleri yapmışlardır. Tarihi yapının analitik modeli için yapıdan elde ettikleri malzeme özellikleri ile sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır. evrel titreşim testi sonuçları ile oluşturdukları analitik model üzerinde güncelleme yaparak yenileme çalışması için önerilerde bulunmuşlardır.

Okuyucu (2020) tek katlı betonarme bir yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar yapmıştır. Statik ve mimari projesi olmayan yapının önce rölevesi alınmış ve taşıyıcı sistemi yerinde incelemeler ile belirlenmiştir. Yapıya ait malzeme özelliklerini belirlemek için darbe çekici ve ultra ses yöntemi uygulanmıştır. Daha sonra yapının sonlu eleman modelini oluşturmuştur. Modelde dolgu duvarların yapısal davranışa etkisini ihmal ederek sadece ağırlık olarak tanımlamıştır. Yapı zerine yerleştirilen 8 adet ivmeölçer yardımıyla çevrel titreşim etkisinde yapının tepki kayıtlarını almıştır. Tepki kayıtlarının analizinde FTAA ve GFTAA yöntemlerini kullanmıştır. Deneysel alışma sonuçları ile numerik model üzerinde iyileştirme çalışması yapmışlardır.

Aras (2019) 9 katlı betonarme bir binanın yıkım sürecinde dinamik özelliklerinin gözlemlenmesi çalışması yapmıştır. Belirlenen her yıkım aşaması sonrası gerçekleştirilen çevrel titreşim testi uygulaması ile yapıya ait tepki kayıtları alınmıştır. Kayıtların analizinde GFTAA yöntemi kullanılmıştır. Her aşama için elde edilen periyot değerleri 5 farklı standart formülasyonu ile karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir.

Kömür, Deneme ve Yerli (2016) düzlem elik ereve sistemleri üzerinde laboratuvar ortamında deneysel çalışmalar yapmışlardır. Tek açıklıklı tek katlı ve tek açıklıklı üç katlı iki farklı model zeninde gerçekleştirilen çalışmada tek eksenli ivmeölçer yardımıyla OMA gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ereve sistemler sonlu eleman metodu kullanılarak modellenmiş ve modal analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel ve numerik çalışma sonuçları kıyaslandıklarında aralarında fark olduğu gözlemlenmiştir. Bu farkın ereve sisteme yerleştirilen ivmeölçerlerin ağırlığından kaynaklandığını düşünülerek sonlu eleman modeli üzerinde güncelleme çalışmaları yapmışlardır. Güncellenen sonlu eleman modeli

sonuçları ile deneysel çalışma sonuçları tekrar karşılaştırıldığında sonuçların birbirine çok yaklaştığını görmüşlerdir.

Boru ve Kutanis (2015) 1975 Deprem Yönetmeliğine göre tasarlanmış 5 katlı bir binanın dinamik özelliklerini belirlemek için OMA çalışması gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışma kapsamında binaya 8 adet 3 eksenli ivmeölçer yerleştirilmiş ve 30 dakika boyunca 0.005 örneklem aralığında çevrel titreşim kaydı almışlardır. Kayıtların analizinde frekans tanım alanı yöntemi olan GFTAA yöntemi kullanmışlardır. Ayrıca karşılaştırma yapılması amacıyla bina sonlu eleman metodu ile modellenmiş ve analiz edilmiştir. Deneysel ve numerik çalışma sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçlar arasında farklılıklar olduğu görmüşlerdir. Farklılıkların giderilmesi amacıyla sonlu eleman modeli üzerinde iyileştirme çalışmaları yapılmasına karar vermişlerdir. İyileştirme çalışmasında değişiklik yapılması için malzeme özelliklerinden olan elastisite modülü seçilmiştir.

Aytulun ve Soyöz (2020) yüksek bir bina üzerinde deprem öncesi, sırası ve sonrası için yapı sağlığı izleme çalışmaları yapmışlardır. Çalışma kapsamında yapı sağlığı izleme sistemi kurulmuş binanın gerçek zamanlı takibini yapan, uzaktan ve otomatik veri transferini gerçekleştiren ve verilerin analizlerini yapan bir yazılım geliştirmişlerdir. 2019 yılı ortasından itibaren titreşim veri kayıtları alınan bina 5,7 büyüklüğündeki Marmara depremine maruz kalmış ve tepkisi kayıt altına alınmıştır. Böylece deprem öncesi, sırası ve sonrası tepki kayıtları elde edilen binanın OMA yöntemleri ile analizleri gerçekleştirilip sonuçlar arasında karşılaştırma yapılmıştır.

Aras ve Karapınar (2021) 3 katlı çelik yapı üzerinde hem yapım aşamasında hem de yapımı tamamlandıktan sonra OMA çalışması gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmada çevrel sıcaklık ve servis yüklerinin dinamik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Farklı servis yükleri ve farklı ortam sıcaklıkları altında yapıdan çevrel titreşim tepki kayıtları alınmıştır. Son olarak yapının sonlu eleman modelini oluşturmuş ve analiz etmişlerdir. Deneysel ve numerik çalışma sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

Zhang, Yang, Xiong, Yang ve Yu (2019) Shanghai da bulunan 250 metre yüksekliğe sahip yüksek yapı üzerinde YSI çalışmaları yapmışlardır. Çalışma kapsamında tiltmetre ve ivmeölçer sensör olmak üzere iki çeşit ölçüm aleti kullanmışlardır. Elde ettikleri çevrel titreşim verilerinin analizi için Bayesian Hızlı Fourier Transform (BHFT), GFTAA ve SAB

yöntemlerinden yararlanmışlardır. Analizler sonucu elde edilen frekans ve sönüm oranları birbiriyle kıyaslanmış, frekans değerlerinin birbirine çok yakın olmasına karşın sönüm oranı değerlerinde uyumsuzluklar olduğunu görmüşlerdir.

Özçelik, Yormaz, Amaddeo, Girgin ve Kahraman (2019) kullanımda olan çelik demiryolu köprüsü üzerinde çevrel titreşim testleri gerçekleştirmiştir. Köprüden elde ettiği tepki kayıtlarının analizinde GFTAA ve SAB yöntemlerini kullanmıştır. Ayrıca köprünün sonlu eleman modelini oluşturmuş ve modal analizini gerçekleştirmiştir. Deneysel çalışma analizleri ile elde ettiği dinamik karakteristikler yardımıyla köprü sonlu eleman modeli üzerinde güncelleme çalışması yapmıştır.

Türker ve Yanık (2020) Aydın ili Didim ilçesinde bulunan tarihi İlyasbey camisi üzerinde caminin yapısal davranışını belirlemek amacıyla deneysel ve numerik çalışmalar yapmışlardır. İlyasbey camisi kare planlı bir yapı olup caminin minaresi 1955 yılında meydana gelen depremde yıkılmış daha sonra restorasyon çalışmaları ile tamamlanmıştır. Deneysel çalışma kapsamında 8 adet ivmeölçer sensör yardımıyla ÇTT gerçekleştirilmiştir. Dinamik özelliklerin belirlenmesinde kayıt altına alınan titreşim verilerinin analizi için GFTAA yönteminden yararlanılmıştır. Ayrıca caminin röleve işlemleri sonucu elde edilen veriler yardımıyla camiye ait başlangıç analitik model oluşturulmuştur ve modal analizi gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar ile başlangıç analitik model sonuçları kıyaslanmış aralarında farklar olduğu görülmüştür. Farkların giderilip caminin mevcut durumunu temsil edecek analitik modelin oluşturulması için deneysel sonuçlar yardımıyla model üzerinde iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. İyileştirme çalışmaları sonucu sonuçlar arasındaki ortalama fark % 3.67'ye kadar azaltılabilmektedir.

Tarpø, Georgakis, Brandt ve Brincker (2020) 22 katlı kulenin Ayarlanmış Sıvı Damperli (ASD) ve dampersiz durumda yapısal sönüm hesaplaması için deneysel çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışma hem çevrel titreşim etkisinde hem de zorlanmış titreşim etkisinde gerçekleştirilmiştir. Çevrel titreşim analizinde yoğun olarak rüzgar yükü etkisi kayıt altına alınırken zorlanmış titreşim testi için iki adet eksantrik ağırlıklı uyarıcılar kullanılmıştır. Elde edilen tepki titreşim kayıtlarının analizinde GFTAA ve Çok referanslı İbrahim Zaman Alanı (ÇİZA) metodunu kullanmışlardır. Analizler sonucunda sıvı damperli ve dampersiz durumlar için yapısal sönümdeki değişimi değerlendirilmişlerdir.

Yanık, Türker, Yıldırım ve Dede (2020) yaptıkları çalışmada malzeme özelliklerinden olan elastisite modülünü belirlemek için Model Kalibrasyon Yöntemini (MKY) kullanmışlardır. MKY kullanırken ÇTT veri analizleri sonucu buldukları dinamik karakteristiklerden yararlanmışlardır. Ayrıca deney elemanının analitik modelini oluşturup analiz etmişlerdir. Deneysel verilerin Matlab programı ile analiz ve numerik analizleri kıyaslayacak ve tekrarlı analizlerle kalibrasyon çalışması gerçekleştirecek bir yazılım geliştirmişlerdir. Başlangıç elastisite modülü  $2.0 \times 10^{11}$  Pa olan deneysel elemanın model kalibrasyon işlemleri sonucu elastisite modülü  $1.82 \times 10^{11}$  Pa olarak elde edilmiştir.

Güneş (2017) yaptığı deneysel çalışma ile 5 katlı yığma bir yapı üzerinde OMA yöntemi ile yapının dinamik karakteristiklerini belirlemeye çalışmıştır. İki adet üç eksenli ivme ölçer ile referanslı olarak toplamda dört kez ölçüm alınmıştır. Zemin katın referans kabul edildiği ölçümlerde ilk olarak ivmeölçer ile zemin kattan titreşim kayıtları alınmıştır. Daha sonra zemin kat ivmeölçeri sabit bırakılarak ilk üç kattan sırasıyla referanslı ölçüm alınmıştır. Kayıt altına alınan çevrel titreşim tepki kayıtları GFTAA ve SAB yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Ayrıca yığma yapı SAP2000 yapısal analiz programı ile modellenerek modal analizi gerçekleştirilmiştir. Teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar kıyaslanmış ve deneysel veriler yardımıyla analitik model üzerinde güncelleştirme çalışmaları yapılmıştır.

Savaş (2020) taşıyıcı sistemi yeni tamamlanmış iki betonarme bina üzerinde yaptığı deneysel çalışma ile binalara ait dinamik karakteristikleri OMA yöntemi ile elde etmeye çalışmıştır. Ek olarak binaların başlangıç sonlu eleman modellerini oluşturmuş elde ettiği deneysel sonuçlar yardımıyla sonlu eleman modelini kalibre etmiştir. Statik proje raporunda sunulan veriler ile elde ettiği deneysel ve analitik analiz verilerini kıyaslamış ve önemli miktarda fark olduğunu gözlemlemiştir. Sonuçların değerlendirilmesiyle OMA yönteminin betonarme çerçeve türü yapılarda yapım kalitesi kontrolü yöntemi olarak değerlendirilebileceği sonucuna varmıştır.

### 3. TEORİK VE DENEYSEL MODAL ANALİZ

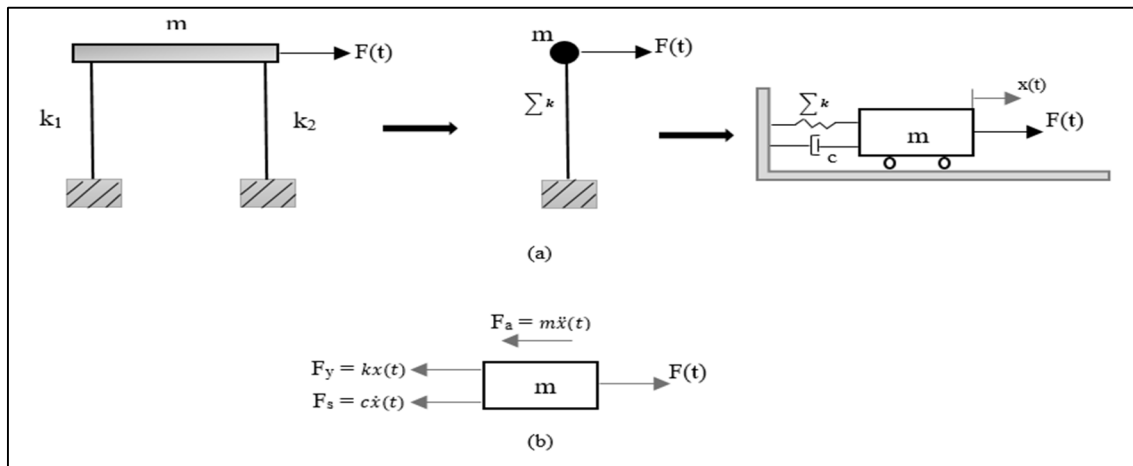
Mühendislik yapılarının dinamik karakteristiklerini (doğal frekanslarını, mod şekillerini ve sönüm oranlarını) belirlemek amacıyla yapılan ve yapılarda oluşan titreşimlerin incelenmesini temel alan teorik ve deneysel çalışmaların tümü literatürde modal analiz olarak adlandırılmaktadır (Chopra, 2006).

#### 3.1. Teorik Modal Analiz

Teorik modal analiz yöntemi, analizi yapılacak olan sistemi temsil edecek ve matematiksel olarak daha kolay hesaplama yapılacak analitik modeli oluşturularak analiz yapılan bir yöntemdir. Sistemin analitik modelini oluşturulması aşamasında iki temel modellemeden bahsedilebilir (Güneş, 2017). Bu modeller sonsuz serbestlik dereceli sürekli model ve sonlu sayıda serbestlik derecesine sahip ayrık-parametrelidir. Düğüm noktalarının uzaydaki hareket edebilme kabiliyetlerine serbestlik derecesi olarak adlandırılmaktadır. Bir düğüm noktasının uzayda altı adet hareket edebilme kabiliyeti vardır. Bunlardan üç tanesi doğrusal üç tanesi açısaldır. Ayrık-parametrelidir modeller tek serbestlik dereceli ve çok serbestlik dereceli sistemler olarak ikiye ayrılmaktadır.

##### 3.1.1. Tek serbestlik dereceli sistemler

Bir serbestlik derecesine sahip en basit sistemlere Tek Serbestlik Dereceli Sistemler (TSDS) denir. Modal analizler daha kolay anlaşılabilir olması için basit bir kütle-yay modeli ile incelenebilmektedir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 (a) Tek serbestlik dereceli sistem kütle-yay modeli, (b) serbest cisim diyagramı

Kütle-yay modeli üzerinden serbest cisim diyagramına baktığımızda (Şekil 3.1) m kütleli yapı üzerinde dört farklı kuvvet mevcut olduğu görülmektedir. Kuvvetler arasında denge denklemi yazıldığında sırasıyla Eş. 3.1 ve Eş. 3.2 elde edilmektedir. Burada TSDS için genel hareket denklemi Eş. 3.2 olarak elde edilir.

$$F_a + F_s + F_y = F(t) \quad (3.1)$$

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (3.2)$$

Eş. 3.2'de  $F(t)$  cisim üzerine etki eden dinamik dış yükleme,  $F_a$  atalet kuvveti,  $F_s$  sönüm kuvveti,  $F_y$  yay kuvveti,  $m$  yapının kütleini,  $c$  sönüm katsayısı,  $k$  yay katsayısı,  $x(t)$  kütlelin yaptığı yer değiştirme,  $\dot{x}(t)$  kütlelin hızını ve  $\ddot{x}(t)$  kütlelin ivmesidir. Sistemin statik dengesi herhangi bir dış yük etkisinde olmadan ( $F(t)=0$ ) bozulması durumunda sistemde oluşan titreşim, serbest titreşim olarak adlandırılmaktadır.  $F(t)=0$  yazılarak Eş. 3.2 düzenlenirse, elde edilen denklem sönümlü serbest titreşim denklemi adını alır ve aşağıdaki gibidir (Eş. 3.3).

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx = 0 \quad (3.3)$$

Klasik sönümlü sistemler ile sönümsüz sistemlerin ( $c = 0$ ) genel denklemleri çözüldüğünde çoğu yapıda olduğu gibi sönüm oranı % 20'yi geçmiyorsa frekans ve periyot değerleri fazla değişmemektedir (Chopra, 2006). Bu nedenle Eş. 3.3'te sönüm katsayısı ( $c$ ) 0 kabul edilerek denklem sönümsüz serbest titreşim denklemi elde edilir (Eş. 3.4).

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

Başlangıç şartlarının bilinmesi, yani yapı kütlelinin  $x(t)$  yer değiştirme ve  $\dot{x}(t)$  hız değerlerinin  $t = 0$  alınması durumunda diferansiyel denklem çözümü Eş. 3.5 kullanılarak elde edilmektedir.

$$x(t) = Ae^{\lambda t} \quad (3.5)$$

Eş. 3.5'te  $x(t)$  ifadesinin ikinci türevi alınıp Eş.3.4'te yerine yazılırsa Eş. 3.7 denklemi elde edilir.

$$x(t) = Ae^{\lambda t} \quad (3.6a)$$

$$\dot{x}(t) = A\lambda e^{\lambda t} \quad (3.6b)$$

$$\ddot{x}(t) = A\lambda^2 e^{\lambda t} \quad (3.6c)$$

$$Ae^{\lambda t}(m\lambda^2 + k) = 0 \quad (3.7)$$

Çözümün elde edilebilmesi için Eş. 3.7'nin parantez içi sıfır ve mutlak tanımlı olmalıdır (Eş. 3.8). Bu durumda genel halde Eş.3.8'den elde edilen çözüm Eş. 3.9'daki gibi ifade edilir.

$$(m\lambda^2 + k) = 0 \quad (3.8)$$

$$\lambda_{1,2} = \pm i\sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.9)$$

$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$  tanımlansı yapılarak çözüme devam edildiğinde sistem çözümünü veren denklem ise Eş. 3.10 ve Eş. 3.11'deki gibi elde edilir.

$$x_1(t) = A_1 e^{\lambda_1 t} = A_1 e^{iw_n t} \quad (3.10)$$

$$x_2(t) = A_2 e^{\lambda_2 t} = A_2 e^{-iw_n t} \quad (3.11)$$

Burada  $A_1, A_2$  keyfi katsayıları  $w_n$  sönümsüz doğal açısal titreşim frekansını temsil etmektedir. Yapının yer değiştirmesi elde edilen Eş. 3.10 ve Eş. 3.11'in toplamına eşittir (Eş. 3.12).

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) = A_1 e^{iw_n t} + A_2 e^{-iw_n t} \quad (3.12)$$

Eş. 3.12'ye Euler formülasyonu uygulaması yapıлып düzenlendiği takdirde yapının yer değiştirmesi Eş. 3.13'teki gibi elde edilir.

$$x(t) = (A_1 + A_2) \cos(w_n t) + i(A_1 - A_2) \sin(w_n t) \quad (3.13)$$



Eş. 3.13'te görüldüğü üzere  $\cos(w_n t)$  ve  $\sin(w_n t)$  harmonik kuvvetler olup serbest titreşim hareketi temelde harmonik titreşim hareketidir.  $A_1$  ve  $A_2$  keyfi sabitleri aşağıdaki tanımlanabilir (Eş. 3.14).

$$B = A_1 + A_2 \quad (3.14a)$$

$$C = i(A_1 - A_2) \quad (3.14b)$$

Eş. 3.13, Eş. 3.14a ve Eş.3.14b tanımlamalarının kullanılması ile Eş. 3.15'teki halini alır.

$$x(t) = B \cos(w_n t) + C \sin(w_n t) \quad (3.15)$$

$x(0) = x_0$  ve  $\dot{x}(0) = \dot{x}_0$  yazılarak Eş. 3.15 tekrar düzenlenirse Eş. 3.16 denklemi elde edilir.

$$x(t) = x_0 \cos(w_n t) + \frac{\dot{x}_0}{w_n} \sin(w_n t) \quad (3.16)$$

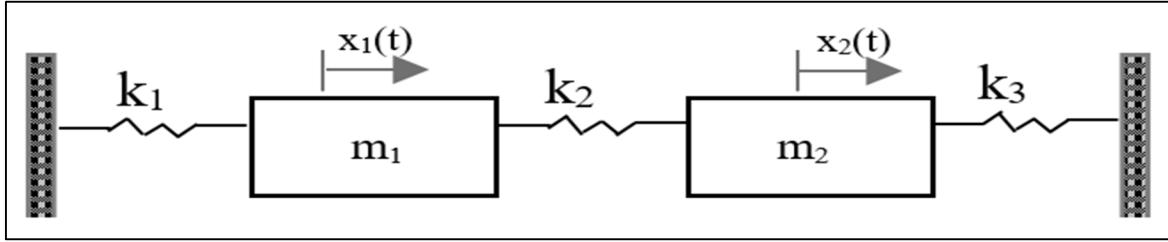
### 3.1.2. Çok serbestlik dereceli sistemler

Gerçek hayatta mevcut sistemlerin çoğu çok serbestlik dereceli sistemlerdir. Çok Serbestlik Dereceli Sistemlerde (ÇSDS) her serbestlik derecesi bir hareket denklemi ve bir doğal frekansa karşılık gelmektedir. Bu nedenle TSDS'deki elde edilen titreşim değerleri skaler bir büyüklük iken ÇSDS'de elde edilen titreşim değerleri vektör ve matris büyüklükleri olarak karşımıza çıkar.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = 0 \quad (3.17)$$

Eş. 3.17 ÇSDS'lerin serbest titreşimini veren genel eşitliktir. Burada  $\mathbf{M}$  yapının kütle matrisini,  $\mathbf{C}$  yapının sönüm matrisini,  $\mathbf{K}$  yapının rijitlik matrisini,  $\mathbf{x}(t)$  kütlelin yaptığı yer değiştirme vektörünü,  $\dot{\mathbf{x}}(t)$  kütlelin hız vektörünü ve  $\ddot{\mathbf{x}}(t)$  kütlelin sahip olduğu ivme vektörünü temsil eder. Sistemin sönümsüz olması durumunda titreşim genel hareket denklemi Eş. 3.18'deki hali alır (Şekil 3.2).

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{0} \quad (3.18)$$



Şekil 3.2 Çok serbestlik dereceli sistem kütle-yay modeli

Eş. 3.10'un çözümünde harmonik hareket dikkate alınıp gerekli düzenlemeler yapıldığında denklem Eş. 3.11'deki hali alır.

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{G} = \{0\} \quad (3.19)$$

Eş. 3.19'da  $\mathbf{G}$  zamana bağlı olmayan genlik vektörü olarak adlandırılmaktadır. Denklem çözümü için Eş. 3.19 ile kütle matrisinin tersi ( $\mathbf{M}^{-1}$ ) ile çarpılırsa Eş. 3.20 elde edilir.

$$(\mathbf{P} - \lambda \mathbf{I})\mathbf{G} = \{0\} \quad (3.20a)$$

$$\mathbf{P} = (\mathbf{M}^{-1}) \mathbf{K} \quad (3.20a)$$

Eş. 3.12'de  $\lambda = \omega^2$  öz değerleri (açısal frekansların karesi)  $\mathbf{I}$  birim matrisi temsil etmektedir. Elde edilen bu denkleme cebirsel öz değer denklemi denir. Eş.3.19'un çözümü esnasında  $\mathbf{G} = 0$  kabul edildiği takdirde hareketsizliği ifade eden sonuç bulunmuş olur. Fakat hareketli sonuç arandığı için,

$$|\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}| = 0 \quad (3.21)$$

determinant çözümü ile hareketli sonuca ulaşmak mümkündür. Çözümünden  $n$  serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal açısal frekans elde edilir.

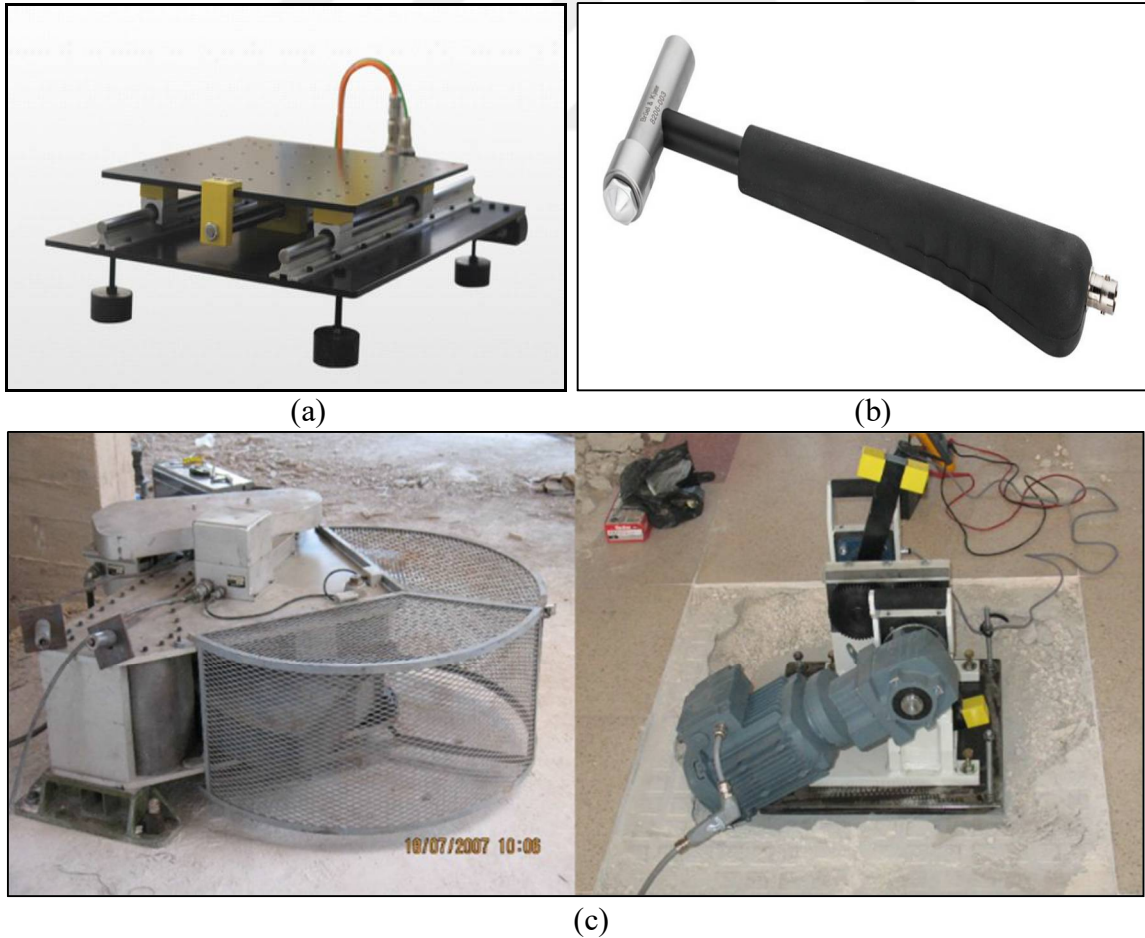
### 3.2. Deneysel Modal Analiz

Yapının dinamik davranış parametrelerinin tespitinde titreşim esasına dayanan deneysel çalışmalara Deneysel Modal Analiz (DMA) denilmektedir. DMA çalışmaları 1940'lı yıllara

dayanmaktadır. Uzay ve astronomi bilimleri, havacılık, otomotiv, makine ve 1980'li yıllardan itibaren de inşaat mühendisliği yapıları üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. DMA yöntemini oluşturan titreşimin kaynağının çeşidine göre ikiye ayırmak mümkündür. Oluşan titreşim kuvvet fonksiyonu belirli bir kaynak tarafından oluşturuluyorsa yani yapıya etkileyen titreşimin genliği ve zamanla değişimi biliniyorsa Geleneksel Deneysel Modal Analiz (GDMA) (Şekil 3.3), oluşan titreşimin kaynağı çevresel dış etkilerse (rüzgar, taşıt trafiği vb.) yani titreşimin genliği ve zamanla değişimi bilinmiyorsa Operasyonel Modal Analiz (OMA) olarak ikiye ayrılmaktadır.

### 3.2.1. Geleneksel deneysel modal analiz

GDMA yönteminde yapı dış etki ile tahrik edilir ve sonucunda yapıdan elde edilen ivme yani yapının tepkisi ölçülür. Yapıyı dış kuvvetler ile etkilemek için darbe çekici, sarsma tablaları, yapay titreşim üretici cihazlar vb. gibi araçlar kullanılmaktadır (Şekil 3.3)



Şekil 3.3 Geleneksel deneysel modal analiz titreşim üretici cihazlar a) sarsma tablası b) darbe çekici c) yapay titreşim üretici (Teknik Destek Grubu; Ataç, 2009)

Sarsma tablaları, geçmiş deprem kayıtlarının ya da yapay deprem kayıtlarının incelenen deney elemanına uygulandığı deney cihazlarıdır (Şekil 3.3a). Başlık ve uç kısımdan oluşan darbe çekiçleri etki-tepki ilkesine göre çalışan küçük ve orta ölçekli laboratuvar çalışmalarında daha çok kullanılan cihazlardır (Şekil 3.3b). Yapay titreşim üreticiler gerçek boyutlardaki yapıları test etmek için uygun harmonik hareketin kaynağını sağlayan cihazlardır (Şekil 3.3c).

Yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek için titreşim tepki kayıtları Şekil 3.4'te görülen ivmeölçer yardımıyla alınmaktadır.



Şekil 3.4 İvmeölçer örnekleri (Teknik Destek Grubu; Yetkin, Erkek ve Calayır, 2016)

GDMA yöntemi uygulanırken sırasıyla aşağıdaki aşamalar uygulanmaktadır.

Bunlar;

- Yapı üzerinde belirlenen noktalara ivmeölçer yerleştirilmesi,
- İncelenen yapıya kuvvet fonksiyonu belirli dış yük yüklenmesi,
- Dış etki sonrası yapının gösterdiği titreşim tepki kayıtlarının veri toplama ünitesine aktarılması,
- Kayıt altına alınan titreşim sinyallerinin dış kuvvet ile oranlanarak yapıya ait frekans tepki fonksiyonunun elde edilmesi,
- Frekans tepki fonksiyonu analizi ile yapıya ait dinamik karakteristiklerin elde edilmesi şeklinde sıralanmaktadır.

Orta ve küçük ölçekli yapı sistemlerinde geleneksel deneysel modal analiz yöntemi kullanılabilmesine karşın sistemler büyüdükçe ve karmaşık hale geldikçe yapıya bilinen bir kuvvetinin verilmesi hem zor hem de maliyetli olmaktadır. Ayrıca kültürümüz için ayrı bir

önem taşıyan tarihi yapılara bu yöntemin uygulanması tarihi yapının hasar alması durumuna karşı risk taşımaktadır.

### 3.2.2. Operasyonel modal analiz

OMA yöntemi yapının dinamik karakteristikleri belirlenirken herhangi bir yapay girdi kuvvetine ihtiyaç duymadan sadece çıktı verilerini kullanması nedeniyle günümüzde hızla artarak kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. Hem kolay uygulanabilirliği hem de tahribatsız bir yöntem olması sebebiyle özellikle tarihi yapıların titreşim analiz çalışmalarına hız kazanmıştır. Ayrıca çevresel etkilerin yapı üzerinde oluşturduğu tepki kayıtlarını kullanarak analiz yapılmasından dolayı çok büyük ölçekli/hacimli yapıların dinamik karakteristiklerinin elde edilebilmesi için kullanılabilir. Tepki kayıtlarının değerlendirilmesi ve analizi için literatürde yer alan birçok yöntem vardır. Yöntemlerin matematiksel tabanları aynıdır fakat farklı algoritmalar kullanarak çözüm yapmaktadırlar. Bu yöntemler arasındaki temel fark değişkenin tanımlandığı alandan kaynaklanmaktadır. Değişken frekans alanında tanımlı ise Frekans Tanım Alanı (FTA) yöntemleri, zaman tanım alanında tanımlı ise Zaman Tanım Alanı (ZTA) yöntemleri olarak adlandırılmaktadır.

FTA yöntemleri, her bir noktada ölçülen titreşim sinyallerinin analizine ve titreşim sinyalleri arasındaki korelasyona dayanmaktadır. FTA yöntemleri parametrik olmayan yöntemlerdir. ZTA yöntemleri ise her bir noktada titreşim sinyalinin zamanla değişimine veya korelasyon fonksiyonlarıyla model uydurmaya dayanmaktadır (Ramos, 2007).

FTA'daki yöntemler; Basit Frekans Alanı (BSA) diğer adıyla Piklerin Seçilmesi (PS), Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (FTAA), Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA), Polimax gibi yöntemleridir (Brincker, Zhang ve Anderson, 2000; Gade, Møller, Herlufsen ve Konstantin-Hansen, 2005; Verboven, 2002).

ZTA'daki yöntemler; Doğal Uyarım Tekniği (DUT), Özsistem Realizasyonu Algoritması (ÖRA), Otoregresif Hareketli Ortalamalar (OHO), Vektör Otoregresif Hareketli Ortalamalar (VOHO), Stokastik Altalan Belirleme (SAB) gibi yöntemlerdir (James, Crane ve Laufer, 1995; Andersen, 1997; Petsounis ve Fassois, 2001; Arun ve Kung, 1990; Overschee ve Moor, 1996).

OMA yöntemi uygulanırken sırasıyla aşağıda gösterilen aşamalar uygulanmaktadır.

Bunlar;

- Çevrel titreşim etkisinde bulunan yapının üzerinde belirlenen noktalara ivmeölçer sensörlerin yerleştirilmesi,
- Çevrel titreşimler sonucu yapının gösterdiği titreşim tepki kayıtlarının veri toplama ünitesine aktarılması,
- Veri toplama ünitesine aktarılan titreşim sinyallerinin belirlenen yazılım ile bilgisayar yardımıyla analiz edilmesi ve yapıya ait dinamik karakteristiklerin elde edilmesi

şeklinde sıralanmaktadır.

Bu tez çalışmasında tepki kayıtlarının analizi için FTA yönteminden olan GFTAA yöntemi ve ZTA yönteminden olan SAB yöntemi seçilmiştir.

#### *Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) Yöntemi*

GFTAA yöntemi frekans tanım alanı yöntemlerinden birisidir. GFTAA yöntemi kullanımı kolay ve basit bir yöntem olan FTAA yönteminden türetilmiş, geliştirilmiş bir yöntemdir. FTAA yönteminde, Tepkilerin Spektral Yoğunluk Spektrumu (TSYS) ile hesaplanan Tekil Değer Ayırıştırma (TDA) grafiklerindeki pik noktaların seçilmesiyle modlar belirlenmektedir. FTAA yöntemi, Hızlı Fourier Dönüşümü'nden (HFD) tekil frekans çizgisinin kullanımına dayalı bir yöntemdir. Bu yöntemle belirlenen doğal frekansların kesinliği HFD'nin çözünürlüğüne bağlıdır ve bu yöntem ile modal sönüm hesaplanamaz. GFTAA ve FTAA yöntemi karşılaştırıldığında, GFTAA yöntemi ile belirlenen doğal frekans ve mod şekillerinin kesinliği artmakta ayrıca modal sönüm bu yöntemle hesaplanabilmektedir (Jacobsen, Andersen ve Brincker, 2006).

GFTAA yönteminde, titreşimin en yüksek değeri etrafında belirlenen Tek Serbestlik Dereceli (TSD) Güç Spektral Yoğunluk (GSY) fonksiyonu, Ters Ayrık Fourier Dönüşümü (TAFD) kullanılarak ZTA'ya geri dönüştürülebilme özelliğindedir. Doğal frekans, zamana bağlı sıfır geçiş sayısının belirlenmesiyle, sönüm ise tek serbestlik dereceli normalize oto korelasyon fonksiyonun logaritmik azalışıyla belirlenebilmektedir (Jacobsen, Andersen ve Brincker, 2006). Ek olarak bu yöntemle mod şekilleri hesaplanamamakta bunun yerine operasyonel deformasyon şekilleri elde edilmektedir. Avantajları yanında GFTAA yönteminde sadece orantılı sönümlü yapıların gerçek modlarının bulunabilmesi ve mod şekilleri yerine

operasyonel deformasyon şekillerinin elde edilmesi bu yöntemin dezavantajları olarak sayılabilmektedir.

GFTAA yönteminde ölçülmeyen etki ve ölçülen tepki davranış fonksiyonu arasındaki bağıntı Eş. 3.22’de verilmektedir (Bendat ve Piersol, 2010: 177).

$$[G_{yy}(j\omega)] = [H(j\omega)]^* [G_{xx}(j\omega)] [H(j\omega)]^T \quad (3.22)$$

Burada;  $[G_{yy}(j\omega)]$  tepki sinyalinin GSY fonksiyonunu,  $[G_{xx}(j\omega)]$  etki sinyalinin GSY fonksiyonunu ve  $[H(j\omega)]$  FTF’yi ifade etmektedir. Eş. 3.22’de kullanılan üst simgelerde  $*$  ve  $T$  sırasıyla kompleks eşlenik ve transpoze’yi ifade etmektedir.

FTF matrisini  $\lambda_k$  kutup fonksiyonu (Eş. 3.23) ve  $R_k$  artık değer fonksiyonu (Eş. 3.24) ile kısmi kesir formunda göstermek mümkündür (Eş. 3.25).

$$\lambda_k = -\sigma_k + j\omega_{dk} \quad (3.23)$$

$$[R_k] = \{\emptyset\}_k \{\gamma\}_k^T \quad (3.24)$$

$$[H(j\omega)] = \sum_{k=1}^n \frac{[R_k]}{j\omega - \lambda_k} + \frac{[R_k]^*}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (3.25)$$

(Brincker, Zhang ve Andersen, 2000; Rainieri, 2008) Burada;  $\sigma_k$  modal sönümü,  $\omega_{dk}$  sönümlü doğal frekansı,  $n$  mod sayısını,  $\{\emptyset\}_k$  mod şekil vektörünü,  $\{\gamma\}_k^T$  modal katılım vektörünü ifade etmektedir. Eş. 3.25 denklemi üzerinde gerekli düzenlemeler yapılırsa denklem Eş. 3.26 elde edilmektedir.

$$[G_{yy}(j\omega)] = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[ \frac{[R_k]}{j\omega - \lambda_k} + \frac{[R_k]^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] [G_{xx}(j\omega)] \left[ \frac{[R_s]}{j\omega - \lambda_s} + \frac{[R_s]^*}{j\omega - \lambda_s^*} \right]^H \quad (3.26)$$

(Brincker, Zhang ve Andersen, 2000; Rainieri, 2008) Burada;  $s$  tekil değerleri,  $\bar{H}$  kompleks eşleniği ve transpozeyi ifade etmektedir. Eş. 3.26 denklemi üzerinde Heaviside kısmi kesir teorimi kullanılarak gerekli düzenlemeler yapılırsa denklem Eş. 3.27’deki hali almaktadır.

$$[G_{yy}(jw)] = \sum_{k=1}^n \frac{[A_k]}{jw - \lambda_k} + \frac{[A_k]^*}{jw - \lambda_k^*} + \frac{[B_k]}{-jw - \lambda_k^*} + \frac{[B_k]^*}{-jw - \lambda_k^*} \quad (3.27)$$

(Brincker, Zhang ve Andersen, 2000; Rainieri, 2008) Burada;  $[A_k]$  tepki sinyalinin GSY fonksiyonuna ait k. artık değer matrisini ifade etmektedir. GFTAA yönteminde ilk olarak GSY matrisi tahmini yapılmaktadır. Tepki sinyalinin GSY fonksiyonu ( $[G_{yy}(jw)]$ )'nun tahmini ayırık frekanslarda  $w = w_i$  olarak bilinmekte ve tekil değer ayrışım matrisi alınarak ayrıştırılmaktadır (Brincker, Zhang ve Andersen, 2000). Bu ifadeye göre Eş. 3.27, Eş. 3.28 şeklinde ifade edilmektedir.

$$[G_{yy}(jw)] = [U_i][S_i][U_i^H] \quad (3.28)$$

Burada;  $[U_i]$  matrisi,  $\{u_{ij}\}$  tekil vektörlerini içeren bütün (unitary) matrisi ve  $[S_i]$  matrisi,  $\{s_{ij}\}$  skaler tekil değerleri içeren diyagonal matrisi temsil etmektedir. Eş. 3.28'de verilen GSY fonksiyonundaki pik değerler doğal frekanslara ve pik değerleri oluşturan tekil vektörlerde doğal mod şekillerine karşılık gelmektedir.

#### Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi

SAB yöntemi doğrudan zaman ortamında kayıt edilmiş verilerin analizi ile dinamik karakteristiklerin elde edilmesini sağlayan zaman tanım alanına dayalı bir yöntemdir. SAB yöntemi korelasyon veya spektruma ihtiyaç duymayan bir yöntemdir. Gürültü kaynaklı meydana gelen olumsuzluklara bu yöntem ile müdahale edilebilmektedir. Bu sayede yöntemin modal parametreleri belirlemek amacıyla kullanılması uygun hale gelmektedir (Overschee ve Moor, 1996; Peeters ve Roeck, 2000, Yu ve Ren, 2005). SAB yönteminde incelenecek yapı sisteminin dinamik davranışı doğrusal, sabit katsayılı ikinci dereceden diferansiyel denklem olarak kabul edilmiştir (Eş. 3.29).

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}(t) = \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (3.29a)$$

$$\mathbf{F}(t) = \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (3.29b)$$



Burada;  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  ve  $\mathbf{K}$  sırasıyla yapı sisteminin kütle, sönüm ve rijitlik matrisini,  $\mathbf{F}(t)$  titreşim kuvveti vektörünü,  $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ ,  $\dot{\mathbf{u}}(t)$  ve  $\mathbf{u}(t)$  sırasıyla zamana bağlı ivme, hız ve yer değiştirme vektörlerini ifade etmektedir.  $\mathbf{F}(t)$  titreşim kuvveti vektörü, ortamdaki verileri ifade eden  $\mathbf{B}$  matrisi ve  $\mathbf{u}(t)$  vektörü cinsinden yazılabilmektedir. Eş. 3.30 titreşen yapı sisteminin dinamik davranışını temsil etmektedir, fakat bu haliyle SAB yönteminin kullanılması için uygun değildir. SAB yönteminin uygulanması için Eş. 3.30 daha uygun bir form olan Ayırık-Zaman Stokastik Durum-Uzayı modeline dönüştürülmektedir. Bu model inşaat mühendisliğinde viskoz sönümlü yapıların dinamik karakteristiklerini hesaplamak için kullanılmaktadır (Altunışık, 2010).

$$\mathbf{x}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{u}(t) \\ \dot{\mathbf{u}}(t) \end{pmatrix} \quad (3.30a)$$

$$[\mathbf{A}] = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_{n_z} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix} \quad (3.30b)$$

$$[\mathbf{B}] = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B} \end{pmatrix} \quad (3.30c)$$

Eş. 3.30'daki tanımlar yardımıyla Eş. 3.29 Eş. 3.31 şeklinde yazılabilmektedir.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (3.31)$$

Burada;  $\mathbf{A}$  durum matrisini,  $\mathbf{B}$  veri matrisini ve  $\mathbf{x}(t)$  durum vektörünü ifade etmektedir. Durum-uzay vektörünün eleman sayısı, sistemin durumunu tanımlayan bağımsız değişken sayısına eşittir. Eş. 3.32'de gözlem denklemi verilmektedir. Eş. 3.32'de  $\mathbf{C}$  sistem davranış matrisini ve  $\mathbf{D}$  doğrudan iletim matrisini ifade etmektedir.

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \quad (3.32)$$

Eş. 3.31 ve Eş. 3.32 sürekli-zaman belirli durum-uzay modelini oluşturmaktadır. Ancak ölçümler ayırık zamanlarda gerçekleştirilmektedir ( $k\Delta t$ ,  $k \in \mathbb{N}$ ). Örnekleme süresi ve ortamdaki gürültüler verileri etkilemektedir. Örneklemeden sonra durum-uzay modeli Eş. 3.33'deki gibi ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005).

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k \quad (3.33a)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{D}\mathbf{u}_k \quad (3.33b)$$

Eş. 3.33'te  $\mathbf{x}_k$  ayırık-zaman durum vektörünü ve  $\mathbf{u}_k$  belirgin etki sinyal vektörünü ifade etmektedir. Gerçek koşullarda alınan ölçümler yapıdaki ve ortamdaki gürültü sinyallerini içermektedir. Bu yüzden Eş. 3.33'teki denklemlere stokastik gürültü bileşenlerinin eklenerek Eş. 3.34 elde edilir.

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \quad (3.34a)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{D}\mathbf{u}_k + \mathbf{v}_k \quad (3.34b)$$

Burada;  $\mathbf{w}_k$  işlem kaynaklı modelleme hataları ile ilgili gürültü sinyallerini ve  $\mathbf{v}_k$  ölçümlerdeki sensör hataları ile ilgili gürültü sinyallerini ifade etmektedir. İki gürültü vektörü de ölçülemeyen sinyallerden oluşmaktadır. Sıfır ortalamalı beyaz gürültü ve kovaryans matrisini ile ifade edilen bu gürültüler Eş. 3.35'te gösterilmektedir.

$$E \left[ \begin{pmatrix} w_p \\ v_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_q^T & v_q^T \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad (3.35)$$

Burada;  $E$  beklenen değer operatörü ve  $\delta_{pq}$  Kronecker deltasını ifade etmektedir. Yapı sağlığı izlemesi genellikle yapının bazı ölçülemeyen titreşim verileri ile uyarılmasına verdiği tepki ile gerçekleştirilir. Etki verileri hakkındaki bilgi eksikliği yüzünden belirgin etki sinyali vektörü olan  $\mathbf{u}_k$ 'yı gürültü sinyali vektörleri olan  $\mathbf{w}_k$  ve  $\mathbf{v}_k$ 'dan ayırmak imkansız hale gelmektedir. Eğer belirgin gürültü sinyali vektörü  $\mathbf{u}_k$ ,  $\mathbf{w}_k$  ve  $\mathbf{v}_k$  cinsinden modellenirse yapının ayırık-zaman stokastik durum-uzay modeli Eş. 3.36'daki gibi elde edilmiş olur.

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \quad (3.36a)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (3.36b)$$

Eş. 3.36 çevrel titreşim etkilerinden dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için ZTA yöntemlerinin temelini oluşturmaktadır.

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

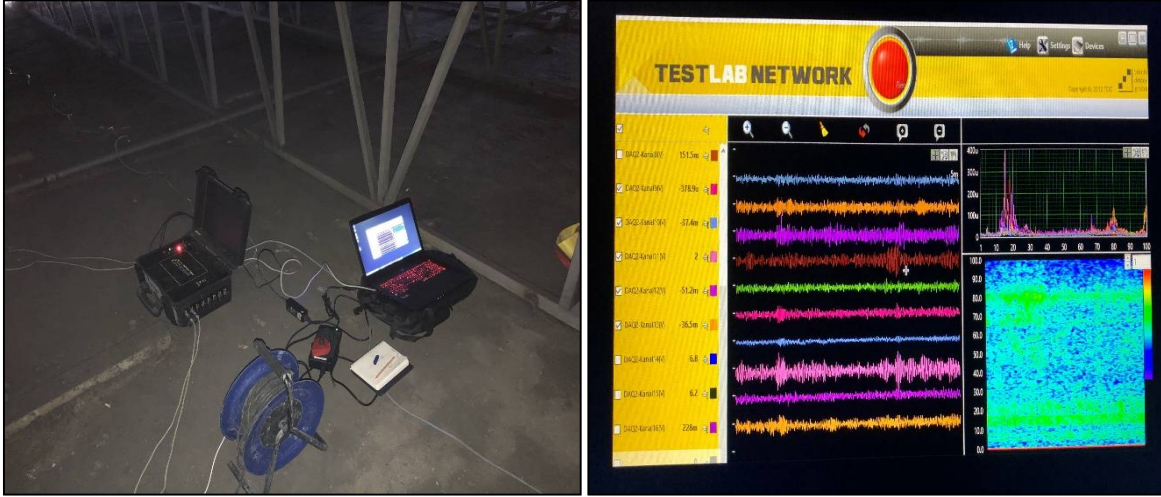
### 4.1. Materyal

Bu yüksek lisans tezi kapsamında; çevrel titreşim etkisinde yapıların tepki kayıtlarını ölçebilmek için İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü bünyesinde mevcut olan 3 eksen doğrultusunda ve 1 eksen doğrultusunda kayıt yapma özelliğine sahip maksimum ivme ölçüm aralığı  $\pm 3g$  ve  $\pm 2g$  ( $\pm 3g$  üç eksen doğrultulu ve  $\pm 2g$  tek eksen doğrultulu) olan, frekans aralığı 0-400 Hz olan düşük gürültülü yüksek hassasiyete sahip ivmeölçer kullanılmıştır. Sensörler Teknik Destek Grubu (TDG Türkiye) firması tarafından üretilen SENSEBOX 70x3 ve SENSEBOX 7001 modelleridir. Bütün sensörler TESTBOX2010 saha tipi 24 bit 16 kanallı veri toplama ünitesi ile senkronize bir şekilde çalıştırılmaktadır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Sensörler ve Veri toplama ünitesi

Kayıtlar bilgisayar yardımıyla kaydedilerek saklanmaktadır. Kayıtlar alınırken TESTLAB Network yazılımı arayüzü yardımıyla titreşim verileri deney süresince takip edilebilmektedir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Verilerin bilgisayar yardımıyla kayıt edilmesi ve yazılım arayüzü

#### 4.1.1. İncelenen yapılar hakkında bilgiler

Deneysel çalışmalar kapsamında iki farklı okul binası üzerinde çevrel titreşim ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her bir okul binasının dinamik karakteristikleri elde edilmiştir.

##### Payas Mesleki ve Teknik Lisesi

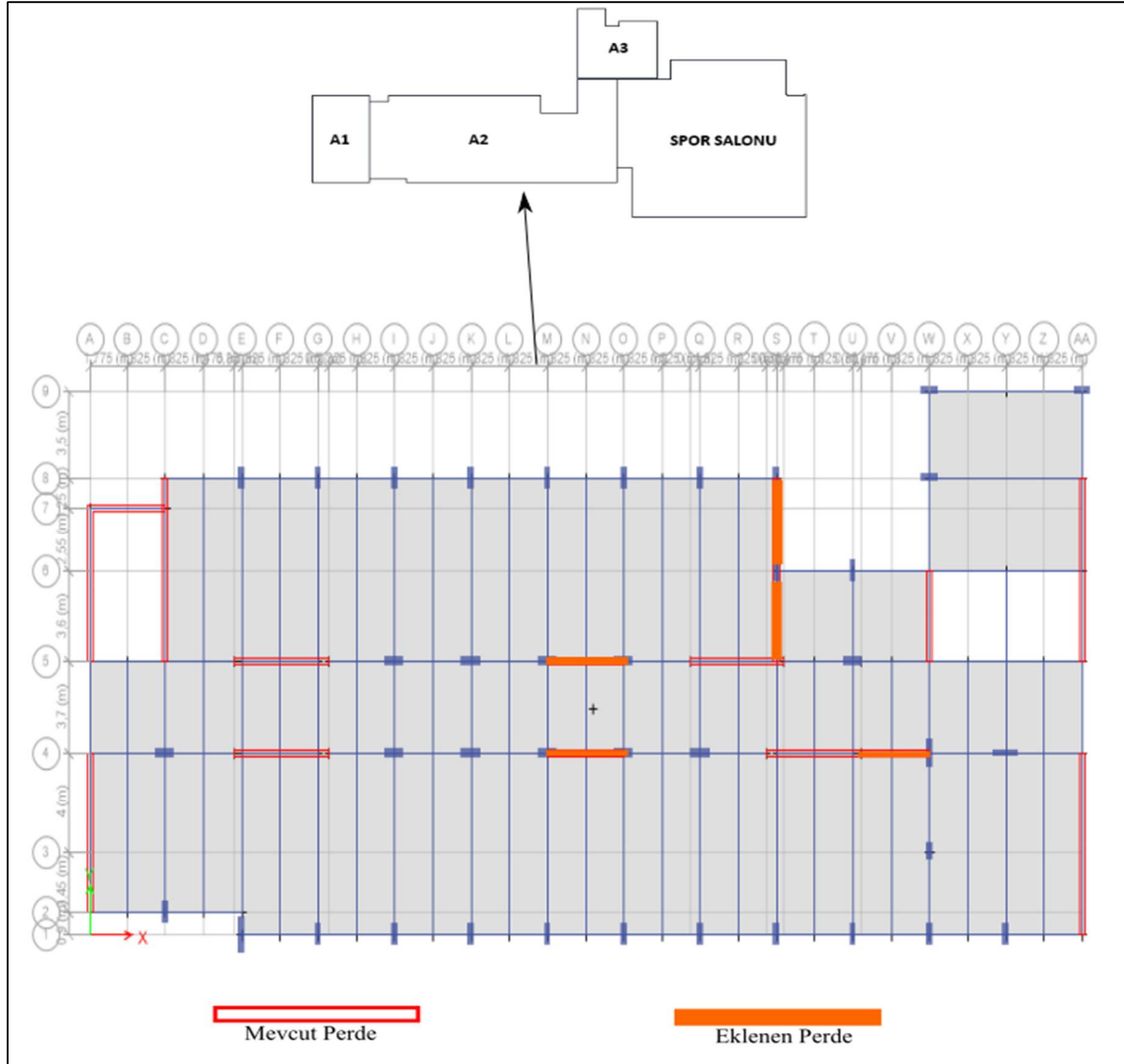
Hatay ili Payas ilçesinde bulunan okul binası (Şekil 4.3) betonarme taşıyıcı sisteme sahip dilatasyon ile birbirinden ayrılmış 3 blok ve bir spor salonundan oluşmaktadır.



Şekil 4.3. Okul binası görünüşü

Dört katlı betonarme okul toplamda 2411.85 m<sup>2</sup> taban alanına sahiptir. Okul binası her katı 3.25 m yüksekliğinde olup toplam 4 kattır. Okul binasının mevcut durumunun deprem performansının belirlenmesi için uzmanlar tarafından kapsamlı analizler ve yapı malzeme

bilgisi çalışmaları yapılmış okul binasının deprem perdeleri ile güçlendirilmesine karar verilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında çevrel titreşim analizleri A2 bloğunda gerçekleştirilmiştir. İncelenen okul binasına ait tipik kat planı Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Okul binası güçlendirme öncesi ve sonrası tipik kat planı

Yapı malzeme bilgisi çalışmaları ile okul binası A2 bloğunu oluşturan beton basınç dayanımı ve kullanılan donatı (etriye dahil) akma dayanımı sırasıyla 10.83 MPa ve 220 MPa olarak ölçülmüştür. Güçlendirme çalışmaları sonrası okul binasının A2 bloğuna bina yüksekliği boyunca 5 (kısa doğrultuda 2 ve uzun doğrultuda 3) adet beton basınç dayanımı ve donatı akma dayanımı sırasıyla 30 MPa ve 420 MPa olan perde duvarları eklenmiştir. Perde duvar uygulaması yapılırken kolon ve kirişler arasındaki dolgu duvar malzemeleri yıkılarak temizlenmiş daha sonra kolon ve kiriş donatı filizleri çakılmış ve perde donatıları yerleştirilerek beton dökülmüştür (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Perde duvar uygulaması aşamaları

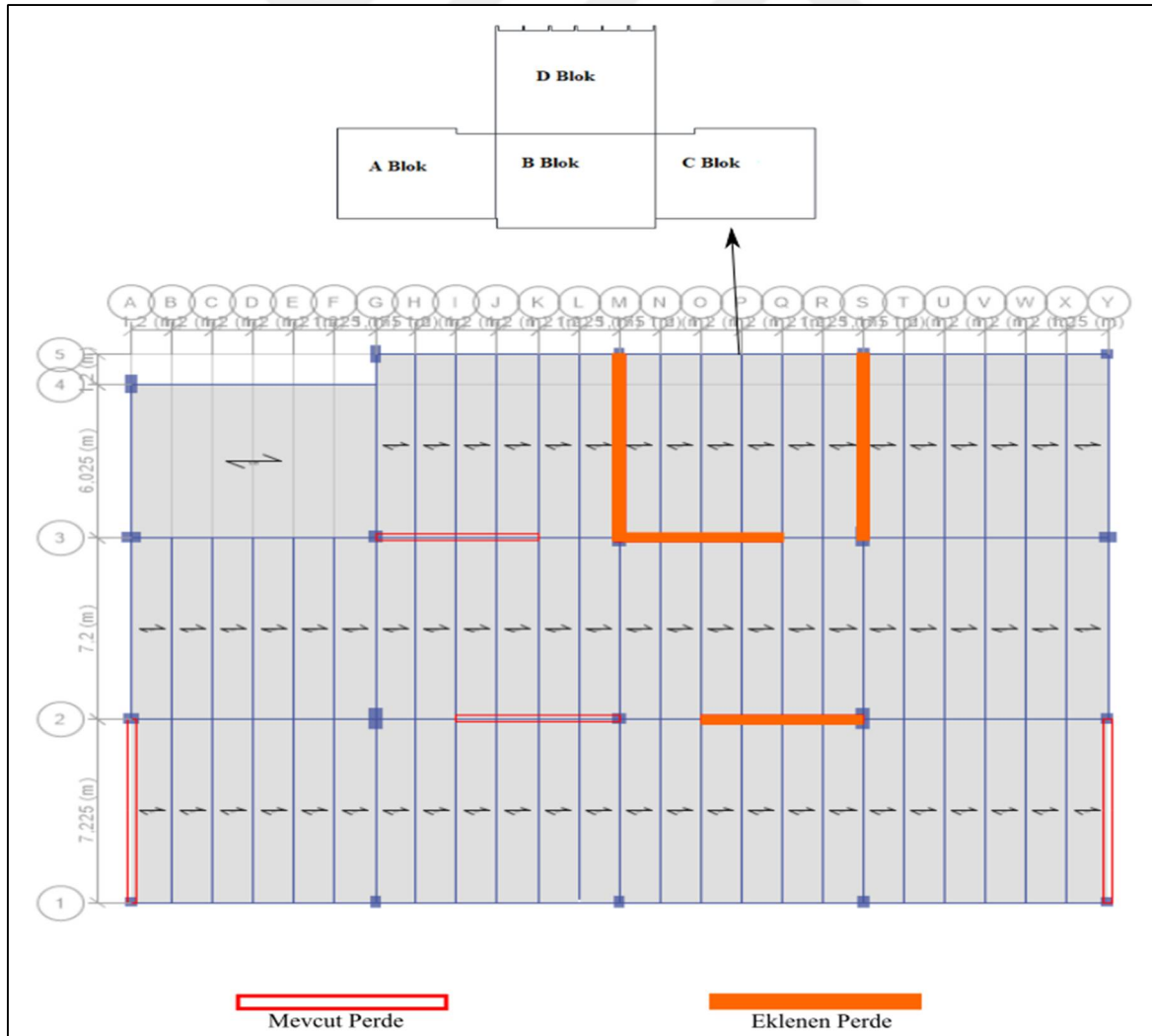
*Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi*

Hatay İli İskenderun ilçesinde bulunan okul binası betonarme taşıyıcı sisteme sahip olup dilatasyon ile birbirinden ayrılmış 4 bloktan oluşmaktadır. Şekil 4.6’da okul binası ön görünüşü gösterilmektedir.

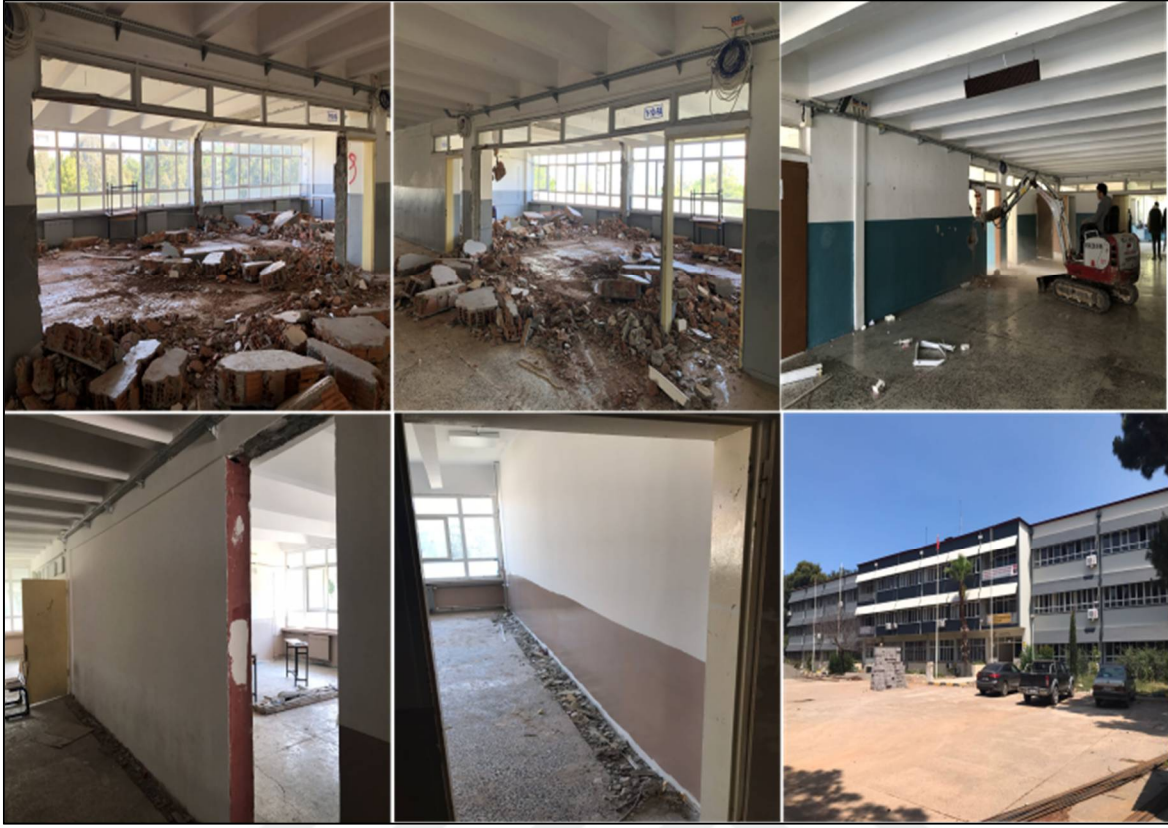


Şekil 4.6. Okul binası görünüşü

Üç katlı betonarme okul toplamda 2426 m<sup>2</sup> taban alanına sahiptir. Okul binası her katı 3.60 m yüksekliğe sahip olup toplam 3 kattır. Okul binasının mevcut durumunun deprem performansının belirlenmesi için uzmanlar tarafinsan kapsamlı analizler ve yapı malzeme bilgisi çalışmaları yapılmış okul binasının deprem perdeleri ile güçlendirilmesine karar verilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında çevrel titreşim analizleri C bloğunda gerçekleştirilmiştir. İncelenen okul binasına ait tipik kat planı Şekil 4.7’de gösterilmektedir. Yapı malzeme bilgisi çalışmaları ile okul binası C bloğunu oluşturan beton basınç dayanımı ve kullanılan donatı (etriye dahil) akma dayanımı sırasıyla 19.76 MPa ve 220 MPa olarak ölçülmüştür. Güçlendirme çalışmaları sonrası okul binasının C bloğuna bina yüksekliği boyunca 4 adet beton basınç dayanımı ve donatı akma dayanımı sırasıyla 30 MPa ve 420 MPa olan perde duvarları eklenmiştir. Perde duvar uygulaması yapılırken kolon ve kirişler arasındaki dolgu duvar malzemeleri yıkılarak temizlenmiş daha sonra kolon ve kiriş donatı filizleri çakılmış ve perde donatıları yerleştirilerek beton dökülmüştür (Şekil 4.8).



Şekil 4.7. Okul binası güçlendirme öncesi ve sonrası tipik kat planı



Şekil 4.8. Perde duvar uygulaması aşamaları

## 4.2. Yöntem

Bu yüksek lisans tezi kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda okul binalarından çevrel titreşim etkisinde bina tepki kayıtları alınmıştır.

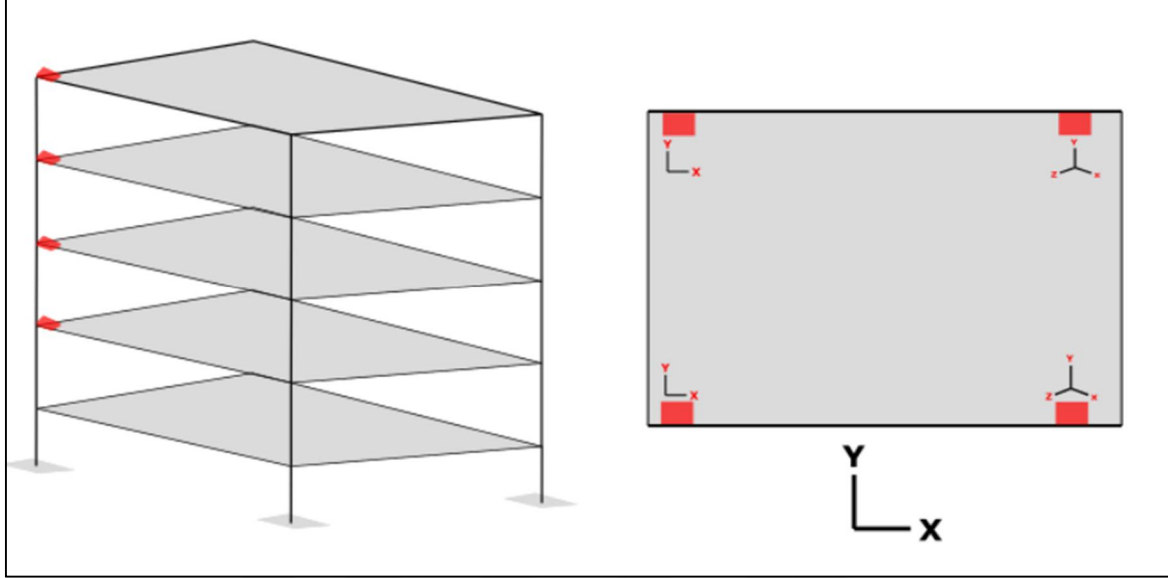
### 4.2.1. Titreşim kayıtlarının alınması

#### *Payas Mesleki ve Teknik Lisesi*

Güçlendirme çalışmaları başlamadan önce okul binasına yerleştirilen ivmeölçer sensörler yardımıyla bina tepki kayıtları alınmıştır. Okul binası tepki kayıtları iki farklı aşamada tamamlanmıştır. İlk aşamada binanın çatı katına toplam 6 adet ivmeölçer sensör aynı yönde olmak üzere yerleştirilerek yaklaşık 50 dk. boyunca 0.005 sn. örneklem aralığında bina tepkisi kayıt altına alınmıştır (Şekil 4.9). İkinci aşamada aynı eksen doğrultusunda binanın çatı katına, dördüncü kata, üçüncü kata ve ikinci kata toplamda 5 adet ivmeölçer sensör aynı yön ve aynı aks üzerine gelecek şekilde yerleştirilerek yaklaşık 40 dk. boyunca 0.005 sn. örneklem aralığında bina tepkisi kayıt altına alınmıştır (Şekil 4.10). Sensörlerin yerleşim



yerlerinin tespiti konusunda bazı ölçütler mevcuttur (Çelebi, 2002). Bu yapıda sensörler ölçütlere uygun olarak yerleştirilmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.9. Sırasıyla ilk ve ikinci aşama ivmeölçer sensör yerleşimi

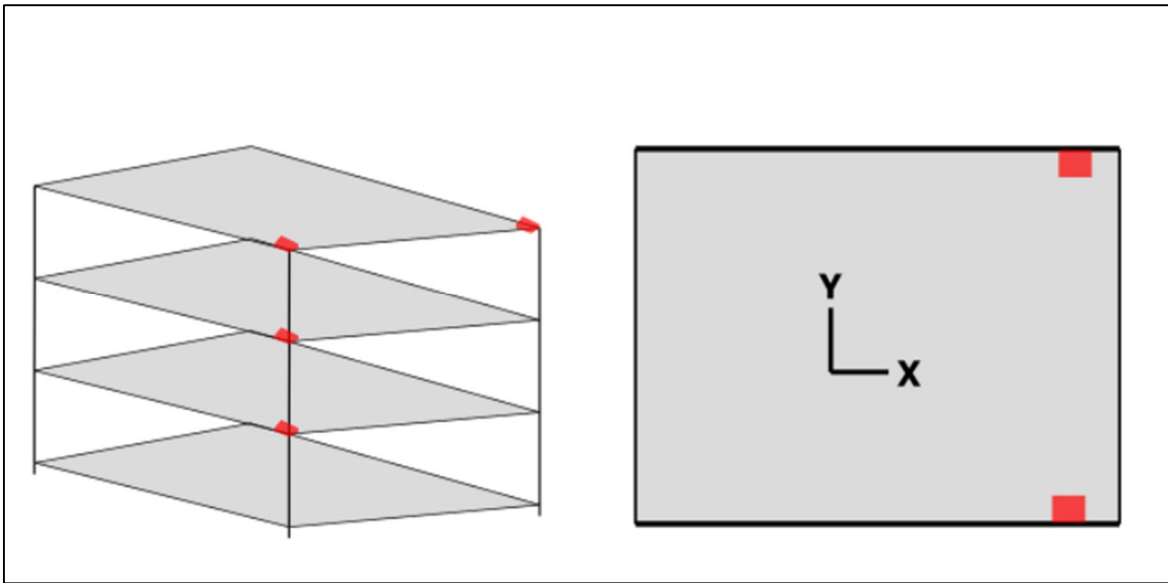


Şekil 4.10. Titreşim kayıtlarının alınması

Alınan tepki kayıtları bilgisayar yardımıyla depolanmıştır. Güçlendirme uygulamasının tamamlanmasından sonra deneysel çalışma tekrarlanmıştır. Güçlendirme sonrası çevrel titreşim testinde sensörler güçlendirme öncesi yapılan test ile aynı konumda yerleştirilmiş ve tepki kayıtları alınmıştır.

Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi

Güçlendirme çalışmaları başlamadan önce okul binasına yerleştirilen ivmeölçer sensörler yardımıyla bina ivme tepki kayıtları alınmıştır. Okul binası tepki kayıtları tek aşamada tamamlanmıştır. Okul binasının çatı katına toplam iki, ikinci kata bir ve birinci kata bir adet olmak üzere toplam 4 adet üç eksenli ivmeölçer sensör aynı yönde olmak üzere yerleştirilmiştir (Şekil 4.11). Binadan 50 dk. boyunca 0.005 sn. örneklem aralığında ve 30 dk. boyunca 0.01 sn. örneklem aralığında bina tepkisi kayıt altına alınmıştır (Şekil 4.12).

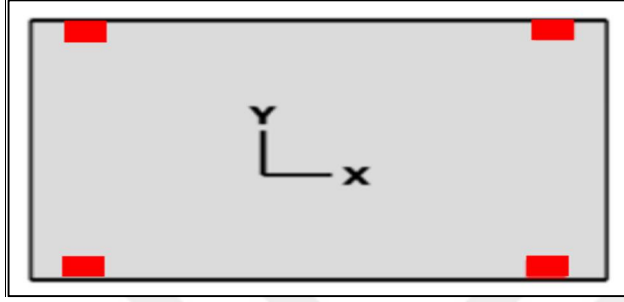


Şekil 4.11. İvmeölçer sensör yerleşimi



Şekil 4.12. Titreşim kayıtlarının alınması

Güçlendirme sonrası çevrel titreşim testinde sensörler yapısal nedenlerden dolayı güçlendirme öncesi yapılan test ile aynı konumda yerleştirilememiştir. Dört adet üç eksenli ivmeölçer sensör okul binasının çatı katına aynı doğrultu ve eksenlerde olacak şekilde yerleştirilmiş ve tepki kayıtları alınmıştır (Şekil 4.13). Güçlendirme sonrası deneysel çalışma sadece 0.005 sn. örnekleme aralığı ile 30 dk. boyunca yapılmıştır.



Şekil 4.13 Güçlendirme sonrası sensör yerleşimi

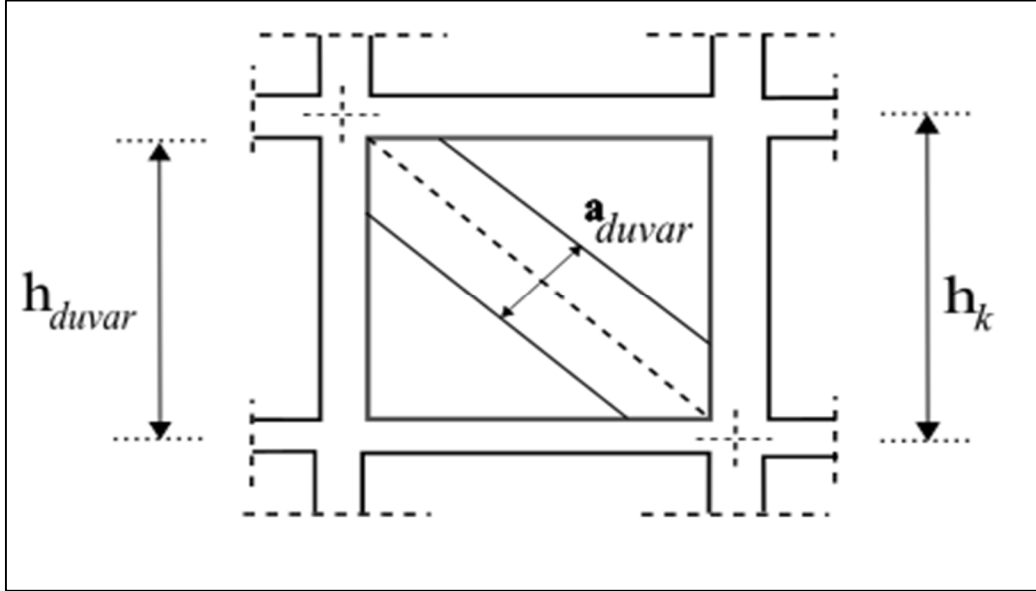
#### 4.2.2. Yapısal analiz yazılımı ile modelleme ve analiz

Dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için yapılar modellendikten sonra serbest titreşim analizi uygulanmalıdır. Titreşim tepki kayıtları alınan okul binaları deneysel ve sayısal çalışmaların kıyaslanabilmesi amacıyla yapısal analiz yazılımı ile sonlu eleman modeli oluşturularak serbest titreşim analizi uygulanmıştır. Okul binalarının sonlu eleman modeli çok kapsamlı bir mühendislik yazılımı olan Structural Analysis Program (SAP200 CSI, 2018) programı ile yapılmıştır. İnşaat mühendisliği alanında her türlü yapı sisteminin tasarımı ve analizi için kullanılan bu program basit ya da karmaşık geometrik şekillere sahip yapıların iki ya da üç boyutlu modellenmesini ve analizini yapabilmektedir. Okul binalarının yazılım ile modellenmesinde ve analizinde sırasıyla aşağıdaki adımlar izlenmiştir.

- Malzemeye ait özelliklerin tanımlanması
- Kesit özelliklerinin tanımlanması
- Taşıyıcı sistem modelinin oluşturulması
- Okul binasının modal analizinin yapılması

Betonarme okul yapılarının modelleri oluşturulurken sistemdeki kolon ve kirişler çubuk (frame) elemanlarla, perdeler ve döşemeler kabuk (shell) elemanlarla modellenmiştir. Modelde kat hizalarında rijit diyafram olduğu kabul edilmiştir. Modellerde bölme duvarlar eşdeğer diyagonal basınç çubuğu yaklaşımı kullanılarak modellenmiştir (Şekil 4.14). Eşdeğer diyagonal basınç çubuklarının modellenmesi ile ilgili kabuller ve formüller Türkiye

Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) ve Federal Emergency Management Agency (FEMA)' de tanımlandığı üzere aşağıda verilmektedir (TBDY, 2018; FEMA-306, 1998).



Şekil 4.14. Duvarı temsil eden eşdeğer diyagonal basınç çubuğu (TBDY, 2018; FEMA-306, 1998)

$$a_{duvar} = 0,175(\lambda_{duvar} \times h_k)^{0,4} \times r_{duvar} \quad (4.1)$$

$$\lambda_{duvar} = \left[ \frac{E_{duvar} \times t_{duvar} \times \sin 2\theta}{4E_c \times I_k \times h_{duvar}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4.2)$$

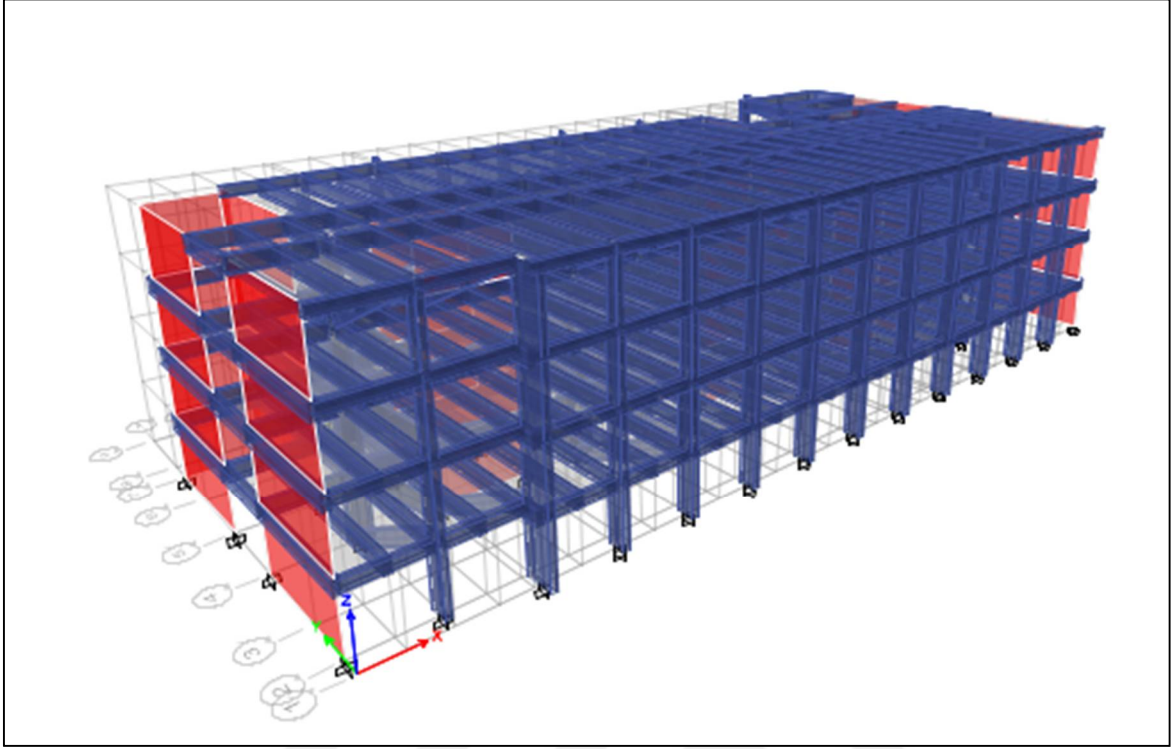
Eş. 4.1'de  $a_{duvar}$  çubuk genişliğini mm cinsinden,  $h_k$  kolun boyunu mm cinsinden,  $r_{duvar}$  dolgu duvar köşegen boyunu mm cinsinden temsil etmektedir.  $\lambda_{duvar}$  katsayısı ise Eş. 4.2 ile belirlenmektedir. Eş. 4.2'de  $E_{duvar}$  ve  $E_c$  dolgu duvar ve çerçeve beton elastisite modüllerini,  $t_{duvar}$  ve  $h_{duvar}$  sırasıyla dolgu duvar kalınlığını ve yüksekliğini mm cinsinden,  $I_k$  kolon atalet momentini ve  $\theta$  ise ilgili köşegenin yatay ile yaptığı açığı göstermektedir.

Her iki okul binasının 3 boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulurken ve analizi yapılırken aynı adımlar takip edilmiştir.

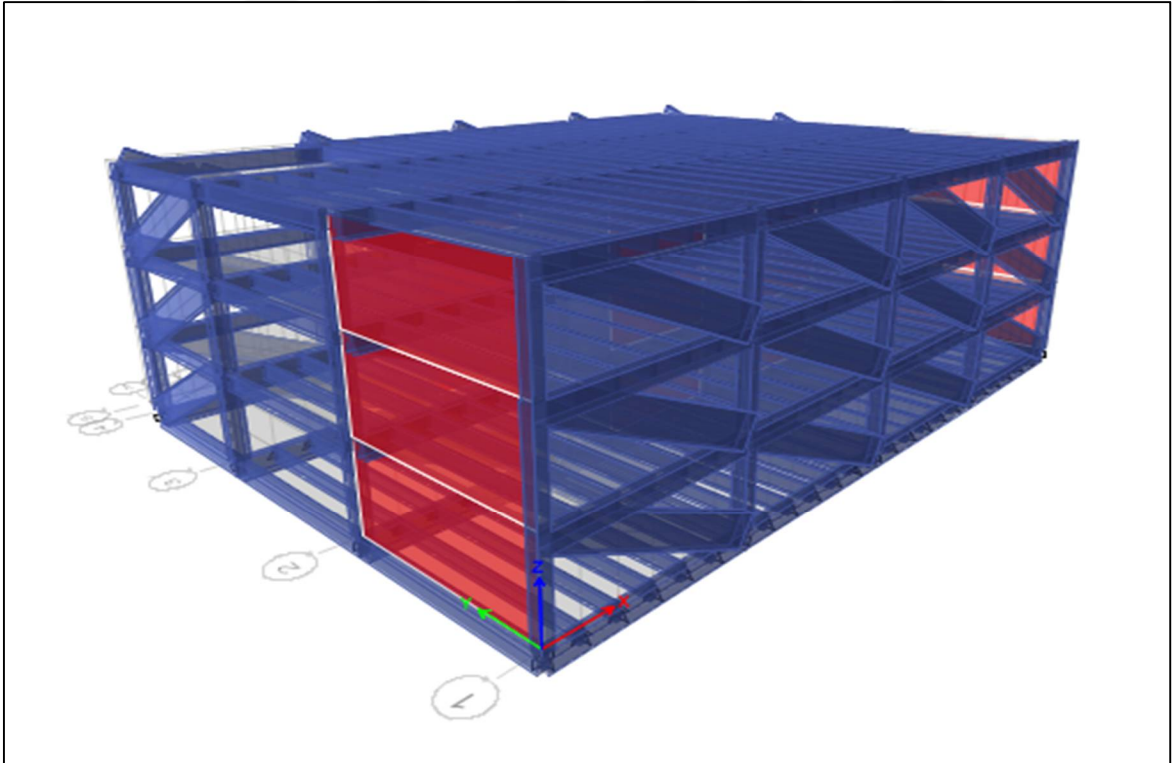
Bunlar;

- Okul binalarının x, y ve z eksen yönlerindeki grid bilgilerinin programa tanımlanması,
- Binalara ait malzeme özelliklerinin tanımlanması,
- Binalara ait kesit özelliklerinin tanımlanması,
- Tanımlanan malzeme özelliklerinin ilgili kesitlere atanması,
- Binaların modellerinin oluşturulması ve modal analiz yapılmasıdır.

Okul binalarına ait sonlu eleman modelleri Şekil 4.15’te gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.15 Okul bina sonlu eleman modelleri, a) Payas Mesleki ve Teknik Lisesi b) Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi

Okul binalarının sonlu eleman modelleri oluşturulurken kullanılan beton elastisite modülü dört ayrı yöntemlik ve standart formülü kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Amerikan Beton Enstitüsü (ABE) (Eş. 4.3), Avrupa Standartlar Komitesi (ASK) (Eş. 4.4), Türk Standartları (TS) (Eş. 4.5), Hindistan Standartları (HS) (Eş. 4.6).

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \text{ (MPa) (ACI 318-14, 2014)} \quad (4.3)$$

$$E_{cm} = 22000[0,1 \times f_{cm}]^{0,3} \text{ (MPa) (EC, 2004)} \quad (4.4)$$

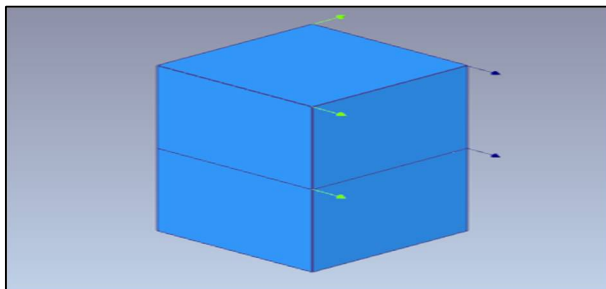
$$E_{cj} = 4250\sqrt{f_{ckj}} + 14000 \text{ (MPa) (TS-500, 2000)} \quad (4.5)$$

$$E_c = 5000\sqrt{f'_c} \text{ (MPa) (IS-546, 2000)} \quad (4.6)$$

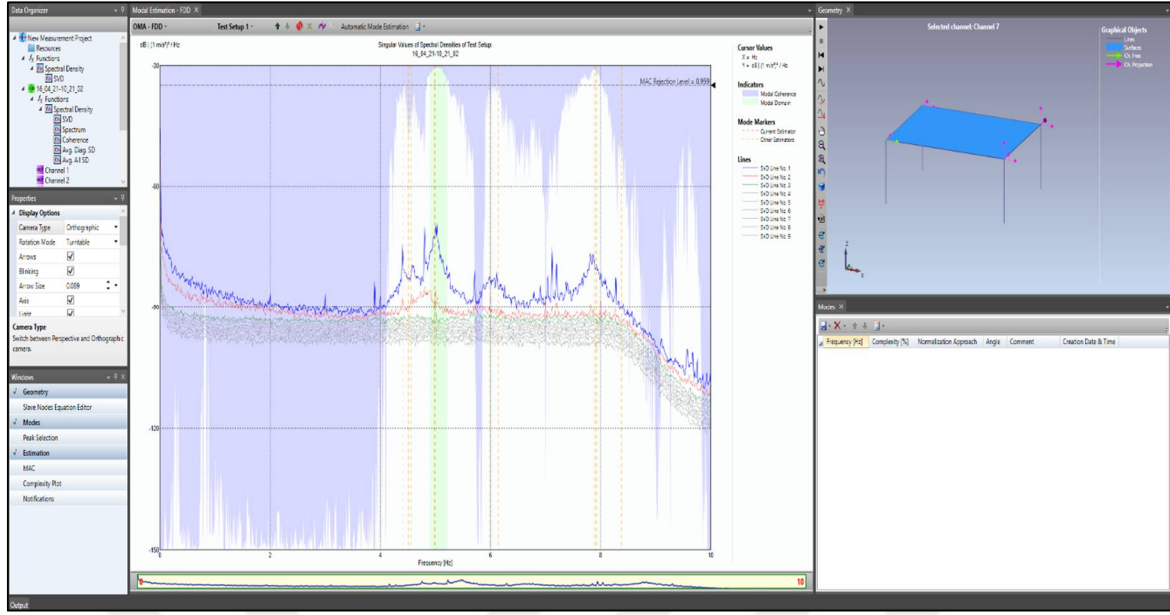
Burada  $E_c$  beton elastisite modülünü,  $E_{cm}$  ortalama beton elastisite modülünü,  $E_{cj}$  j günlük betonun elastisite modülünü,  $f'_c$  beton basınç dayanımını,  $f_{cm}$  28 günlük beton basınç dayanımını ve  $f_{ckj}$  j günlük beton karakteristik basınç dayanımını ifade etmektedir.

#### 4.2.3. ARTEMIS yazılımı ile modelleme ve analiz

Deneysel çalışma ile kayıt altına alınan okul bina ivme tepkilerinin analizinde ve temsili modelinin oluşturulmasında ilk olarak 1999 yılında Aalborg Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü tarafından geliştirilmiş olan Ambient Response Testing and Modal Identification Software (ARTEMIS) yazılımı kullanılmıştır. ARTEMIS yazılımı köprüler, barajlar, binalar, demiryolları ve tarihi yapılar gibi inşaat mühendisliğinin hemen hemen her alanında kullanılmıştır (Uçak, 2012; Altunışık, 2010; Aldırmaz, 2020). Yazılım ile modal deneysel testler ve modal analizler yapılabilmektedir. Ayrıca kullanıcı dostu arayüzüne sahip olması, YSİ yöntemi için ayrı eklenti modüllerinin bulunması ve incelenen yapının basit modelinin oluşturulmasına imkan sağlaması yazılımın bu çalışmada tercih edilmesi sebepleri arasındadır. Şekil 4.16'da yazılım ile oluşturulan örnek model ve Şekil 4.17'de yazılım arayüzü gösterilmektedir (Svibs, 2015).



Şekil 4.16 Artemis yazılımı ile oluşturulan örnek model ve sensör yerleşimi



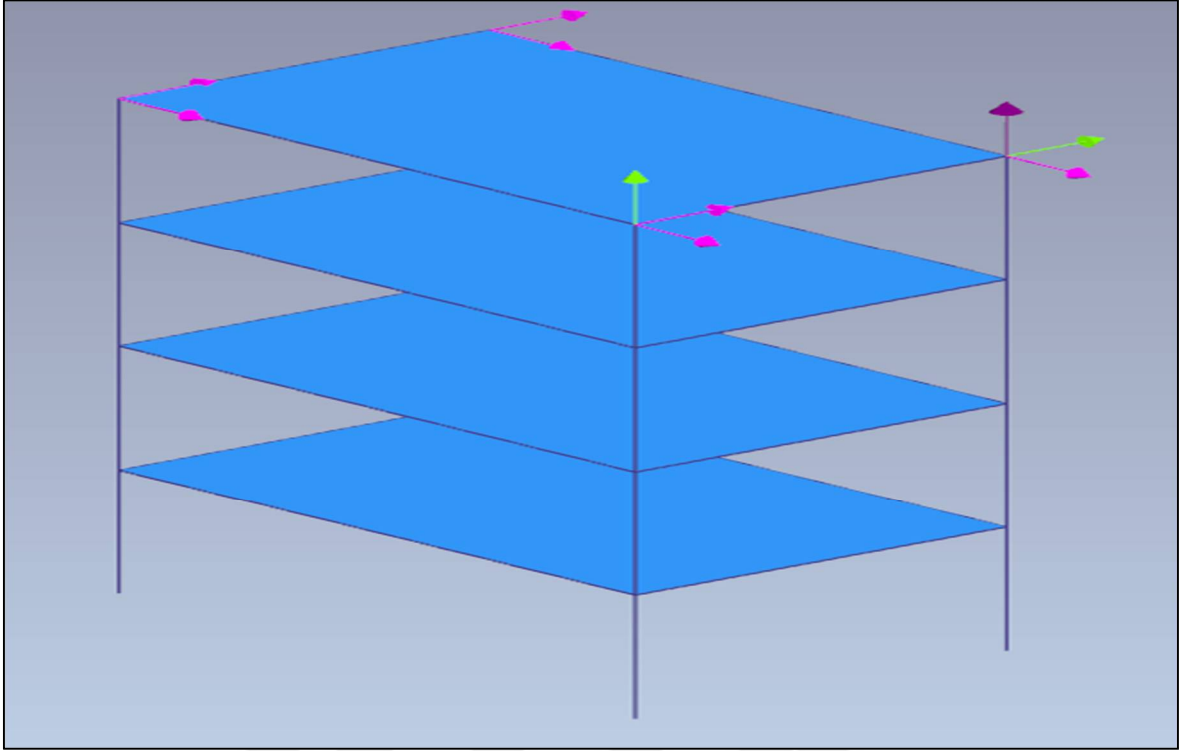
Şekil 4.17 ARTEMIS yazılımı arayüzü

Yapılardan alınan titreşim tepki kayıtlarının değerlendirilmesi için yazılım içerisinde yedi farklı analiz tekniği mevcuttur. Çözüm olarak bu yedi farklı tekniğin paralel analizine dayalı çözümler yapmaktadır. ARTEMIS yazılımının kullanım avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

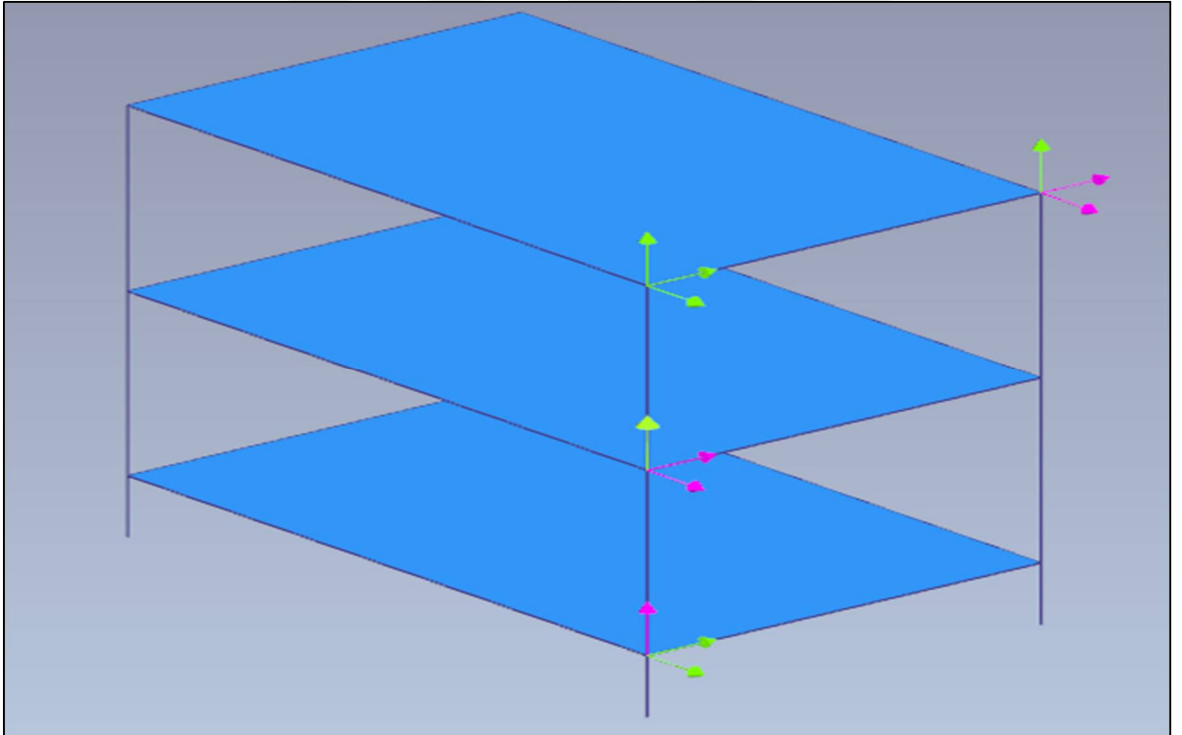
Bunlar;

- Kullanıcı dostu arayüzü ve kullanım kolaylığı,
- Elde edilen titreşim sinyallerinin hızlı ve kolay işlenmesi, bu sayede yapılara ait modal özelliklere kısa sürede ulaşılmasını sağlaması,
- Yapı sağlığı izleme yöntemi için ayrı eklentilerin bulunması (veri edinimi, sapma analizi vb.),
- Metin editör programlarıyla uyumlu olması ve rapor oluşturabilmesi,
- Yapıların kullanım koşullarında içerisinde test edilme imkanı sunması,
- Küçük, orta ve büyük ölçekli her türlü yapıda kullanılabilmesi,
- Uzun süreli titreşim kayıtlarının oluşturduğu büyük veri dosyalarını desteklemesidir.

Titreşim tepki kayıtlarının alındığı okul binalarının ARTEMIS yazılımı ile basit modelleri oluşturulmuş ve deney esnasında kullanılan ivmeölçerler gerçek konumlandırmalarını temsil edecek şekilde modeller üzerine eklenmiştir (Şekil 4.18).



(a)



(b)

Şekil 4.18 Okul binaları basit modelleri ve sensör yerleşimleri a) Payas Mesleki ve Teknik Lisesi b) Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi

Modellerin oluşturulurken yazılımın Setup menüsü altındaki Prepare Geometri sekmesi yardımıyla modellerin geometrisi düzenlenmiştir. Düzenleme yapılırken kat döşemeleri kabuk eleman (shell), kolonlar çubuk eleman (frame) olarak kabul edilmiş. Kabuk ve çubuk



elemanların kat hizalarındaki bağlantıları düğüm noktaları (node) ile sağlanmıştır. Modellerde temel seviyesinde mesnet tipleri ankastre olarak tanımlanmıştır. İvme tepki kayıtlarının depolandığı dosya program içine aktarılarak maksimum frekans aralığı (100Hz ve 200Hz) ayarlanmış ve sensör kanal bilgileri atanmıştır. Daha sonra titreşim tepki kayıtlarını alırken kullanılan sensörlerin konum ve yönleri Setup menüsü altında bulunan Assign DOF information sekmesi yardımıyla ilgili modeller üzerine atanmıştır. Okul bina modelleri oluşturulduktan sonra Analysis menüsü geçilip sinyal işleme süreci başlatılmıştır. İşlenmiş verilerden elde edilen spektrogram grafikleri, GFTAA yöntemi ve SAB yöntemi ile çözümlenmiş okul binalarına ait dinamik karakteristikler elde edilmiştir.



## 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

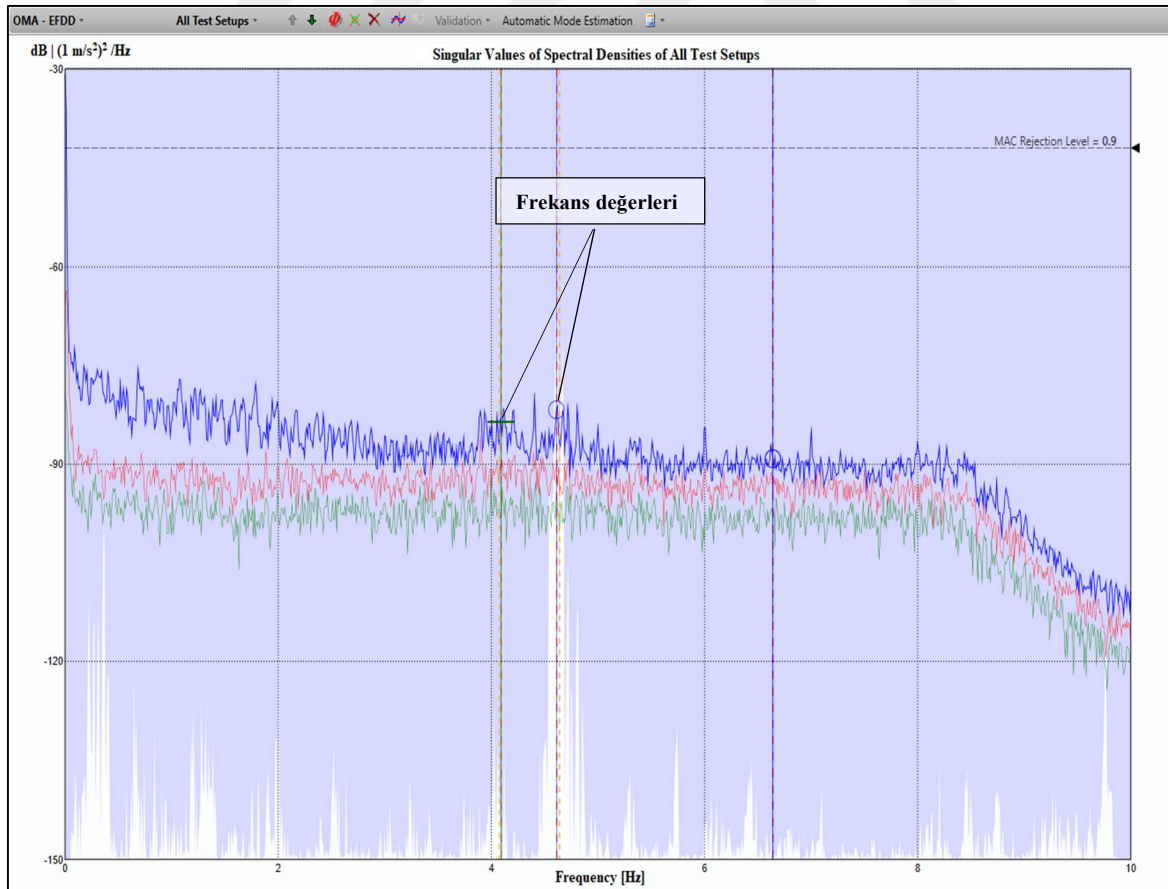
Bu bölümde güçlendirme öncesi ve sonrası deneysel ve teorik çalışma analiz sonucu elde edilen okul binalarına ait dinamik karakteristikler gösterilmiştir.

### 5.1. Deneysel ve Teorik Çalışma Analiz Sonuçları

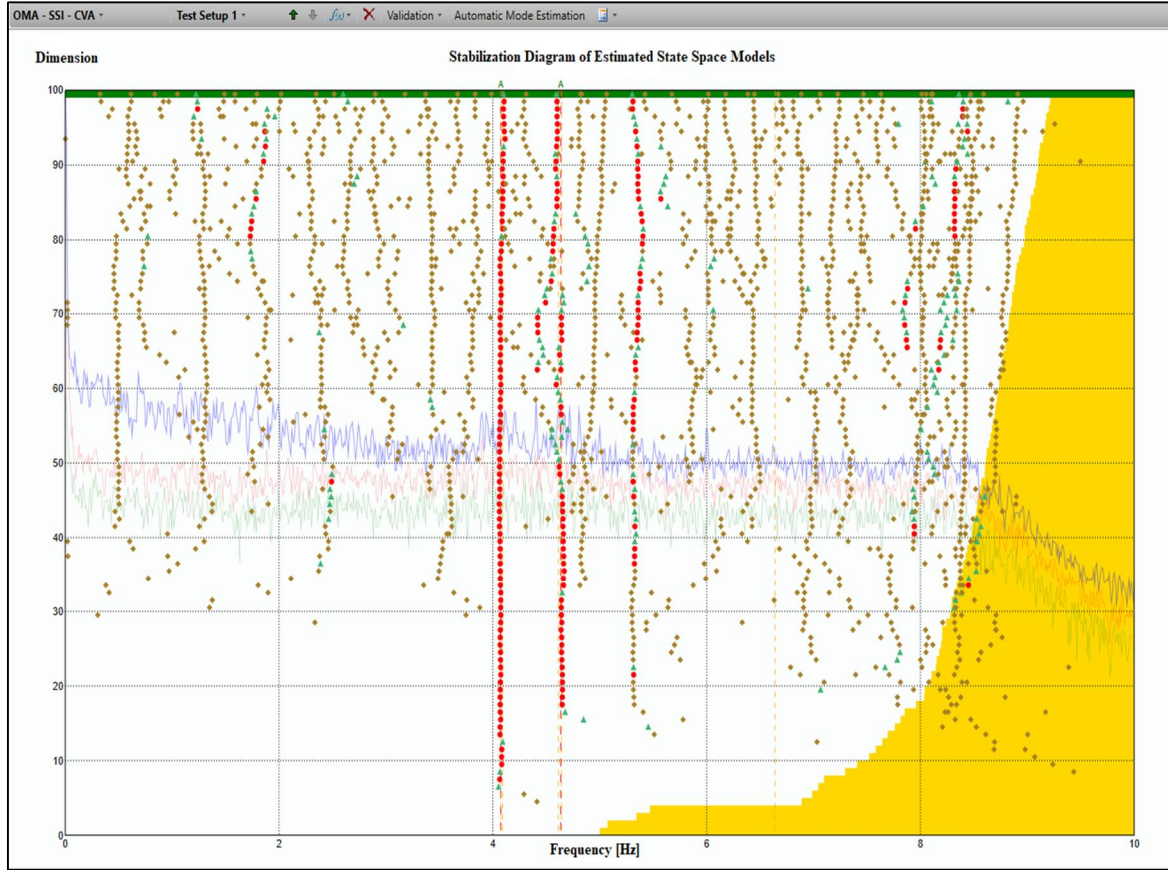
#### 5.1.1. Güçlendirme öncesi ve sonrası ARTEMIS yazılımı analiz sonuçları

##### *Payas Mesleki ve Teknik Lisesi Güçlendirme Öncesi Analiz Sonuçları*

Ölçümler sonucu elde edilen ivme tepkileri GFTAA ve SAB yöntemleri ile analiz edilmiştir. GFTAA yöntemi analiz sonuçları ile elde edilen tekil değerler Şekil 5.1’de, SAB yöntemi analiz sonuçları ile elde edilen kararlılık diyagramı Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Elde edilen periyot değerleri ve sönüm oranları Çizelge 5.1’de gösterilmektedir.



Şekil 5.1 Güçlendirme öncesi Payas Mesleki ve Teknik Lisesi spektral yoğunluk fonksiyonu



Şekil 5.2 Güçlendirme öncesi Payas Mesleki ve Teknik Lisesi kararlılık diyagramı

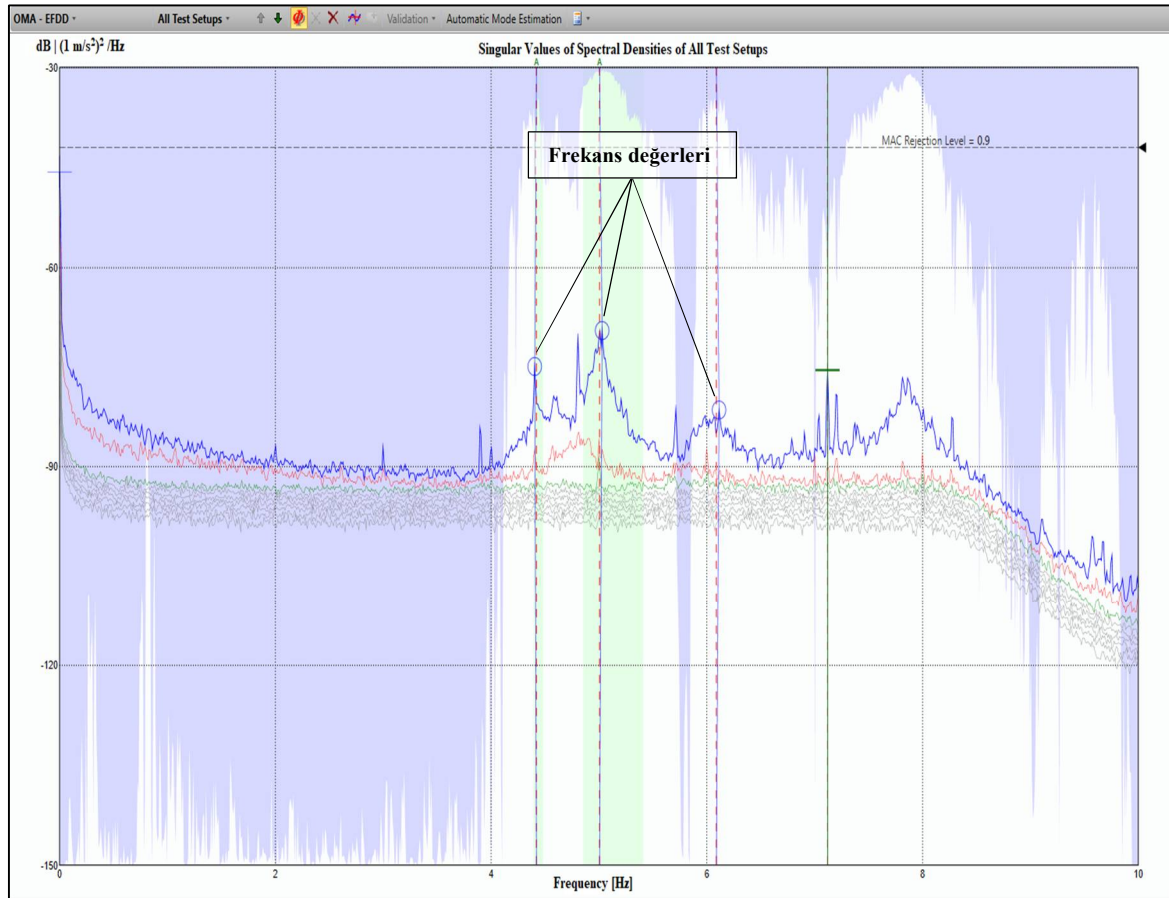
Çizelge 5.1 Güçlendirme Öncesi GFTAA ve SAB yöntemi analiz sonuçları

	Mod Numarası	Periyot (sn)	Sönüm (%)
GFTAA Yöntemi	1	0,245	-
	2	0,216	2,32
	3	-	-
SAB Yöntemi	1	0,244	3,22
	2	0,217	2,098
	3	0,184	-

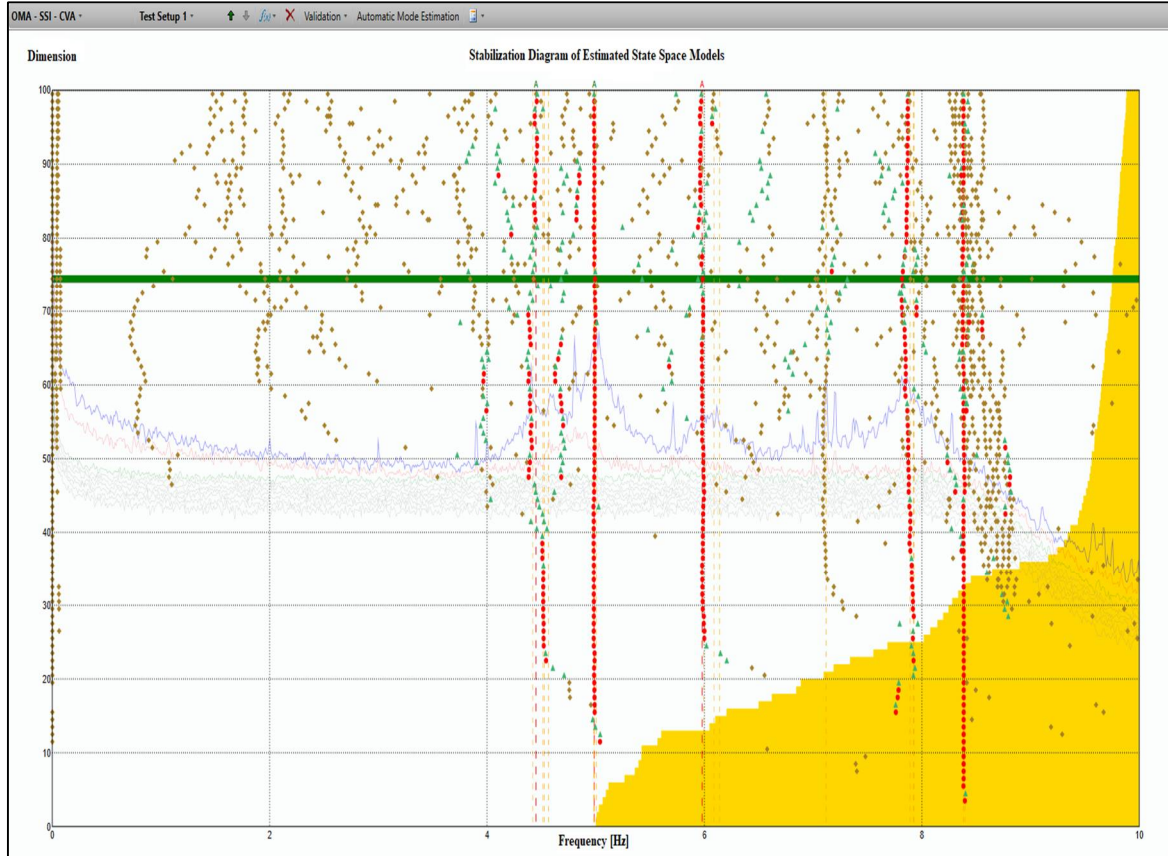
Çizelge 5.1 incelendiğinde okul binasının güçlendirme çalışmaları öncesi GFTAA ve SAB yöntemleri ile hesaplanan dinamik karakteristiklerinden periyoduna bakıldığında birinci ve ikinci periyotlar arasında uyum olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca ikinci periyotlara ait sönüm oranları arasında da uyum olduğu görülmektedir.

*Payas Mesleki ve Teknik Lisesi Güçlendirme Sonrası Analiz Sonuçları*

Güçlendirme çalışmalarının tamamlanmasından sonra kayıt altına alınan ivme tepkileri GFTAA ve SAB yöntemleri ile analiz edilmiştir. GFTAA yöntemi analiz sonuçları ile elde edilen tekil değerler grafiği Şekil 5.3'te, SAB yöntemi analiz sonuçları elde edilen kararlılık diyagramı Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Elde edilen periyot değerleri ve sönüm oranları Çizelge 5.2'de gösterilmektedir.



Şekil 5.3 Güçlendirme sonrası Payas Mesleki ve Teknik Lisesi spektral yoğunluk fonksiyonu



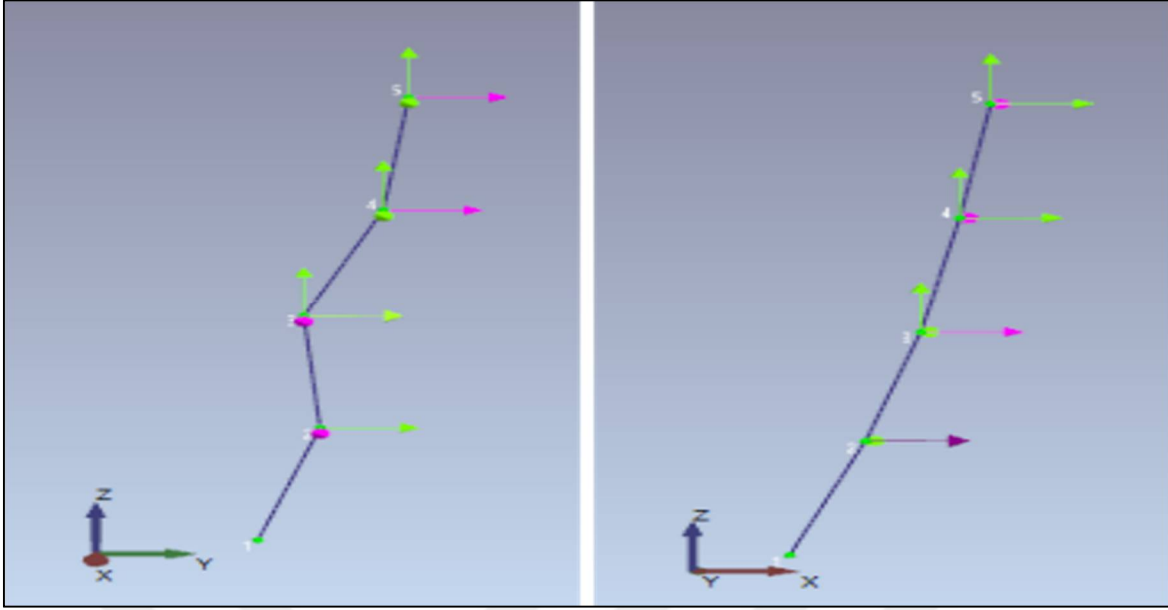
Şekil 5.4 Güçlendirme sonrası Payas Mesleki ve Teknik Lisesi kararlılık diyagramı

Çizelge 5.2 Güçlendirme sonrası GFTAA ve SAB yöntemi analiz sonuçları

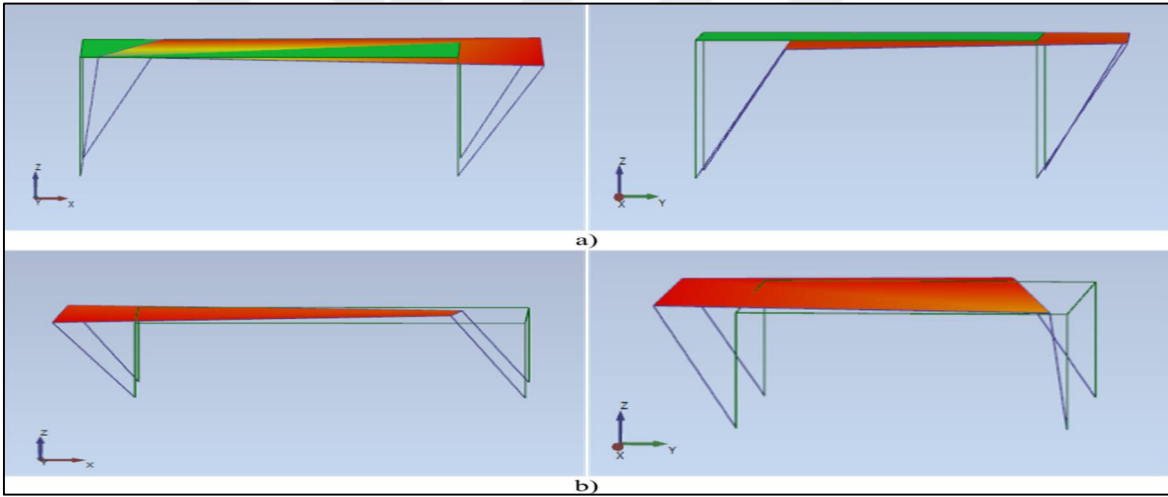
	Mod Numarası	Periyot (sn)	Sönüm (%)
GFTAA Yöntemi	1	0,225	1,053
	2	0,201	1,809
	3	0,167	1,011
SAB Yöntemi	1	0,226	2,932
	2	0,199	1,282
	3	0,164	2,089

Çizelge 5.2 incelendiğinde okul binasının güçlendirme çalışmaları sonrası GFTAA ve SAB yöntemleri ile hesaplanan dinamik karakteristiklerinden periyotlarına bakıldığında ilk üç periyot arasında uyum olduğu gözlemlenmektedir.

Okul binasının ilk iki moduna karşılık gelen deneysel mod şekilleri her iki yöntemde de birinci mod için  $-y$  eksenini doğrultusunda yanal ikinci mod için  $-x$  eksenini doğrultusunda yanal olarak elde edilmiştir (Şekil 5.5). Ayrıca çatı katına yerleştirilen sensörler yardımıyla ilk aşamada elde edilen çatı katı mod şekli Şekil 5.6'da verilmiştir.



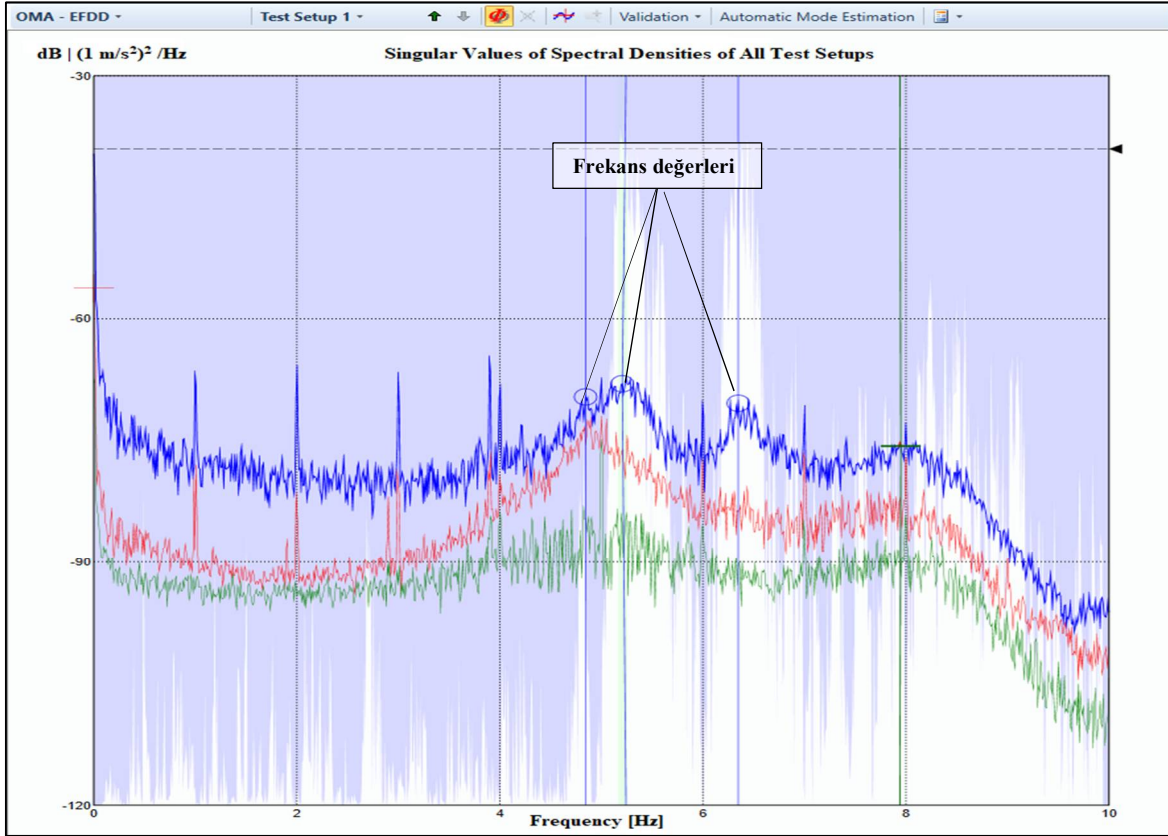
Şekil 5.6 Okul binasının güçlendirme öncesi y doğrultusu ve x doğrultusu mod şekilleri



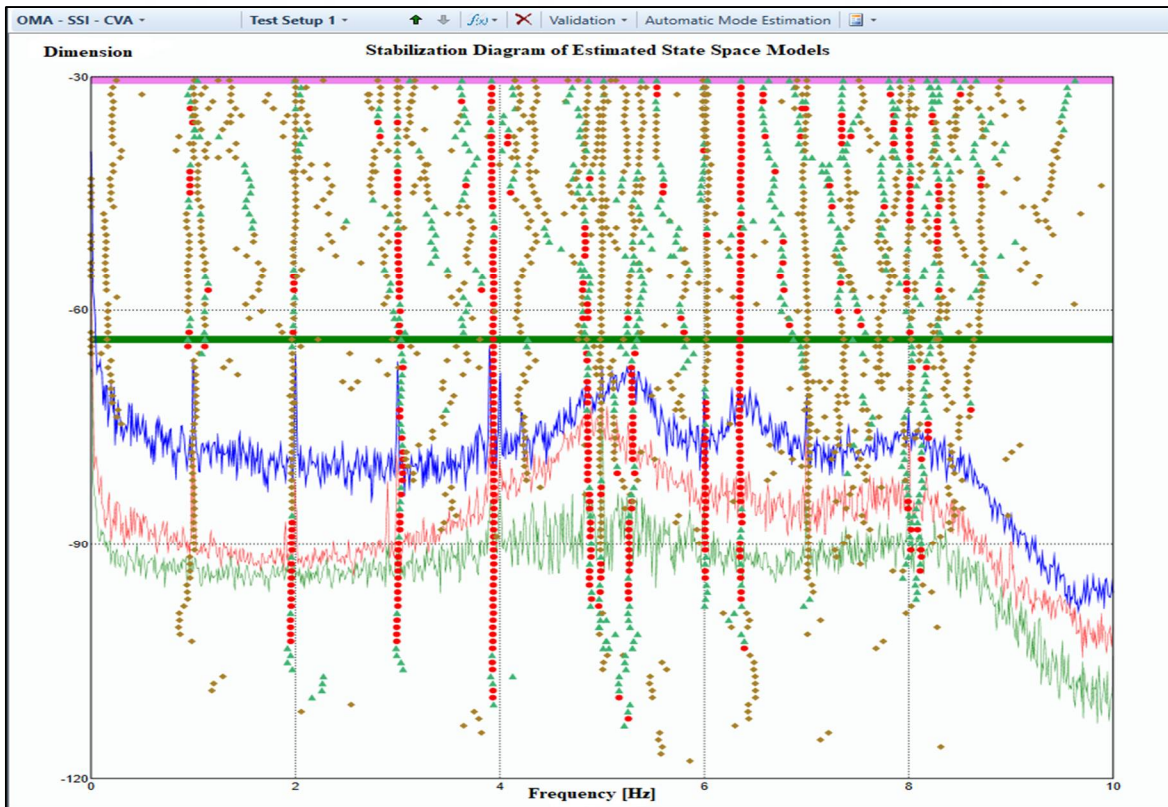
Şekil 5.6 a) güçlendirme öncesi y doğrultusu ve x doğrultusu mod şekilleri b) güçlendirme sonrası y doğrultusu ve x doğrultusu mod şekilleri

### Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Güçlendirme Öncesi Analiz Sonuçları

Ölçümler sonucu elde edilen bina tepki kayıtları GFTAA ve SAB yöntemleri ile analiz edilmiştir. GFTAA yöntemi analiz sonuçları ile elde edilen tekil değerler grafiği Şekil 5.7'de SAB yöntemi analiz sonuçları elde edilen kararlılık diyagramı Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Elde edilen periyot değerleri ve sönüm oranları Çizelge 5.3'de gösterilmektedir.



Şekil 5.7 Güçlendirme öncesi Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi spektral yoğunluk fonksiyonu



Şekil 5.8 Güçlendirme öncesi Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi kararlılık diyagramı

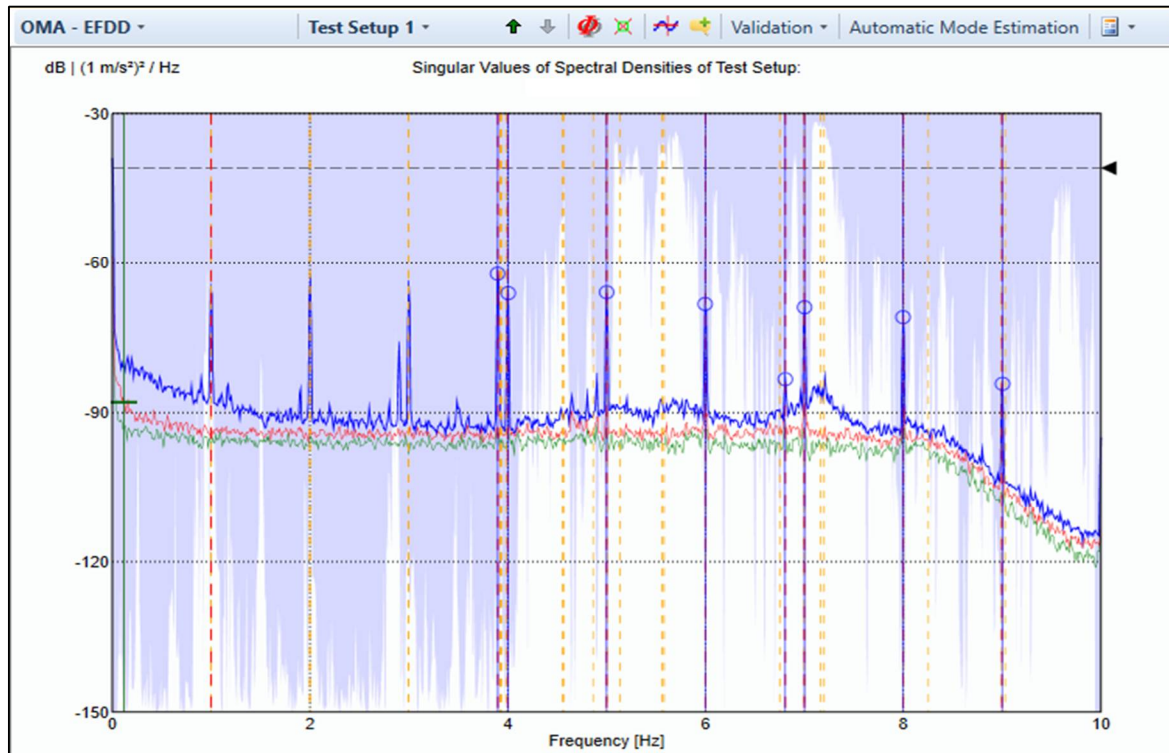
Çizelge 5.3 Güçlendirme Öncesi GFTAA ve SAB yöntemi analiz sonuçları

	Mod Numarası	Periyot (sn)	Sönüm (%)
GFTAA Yöntemi	1	0,206	-
	2	0,189	0,42
	3	0,157	-
SAB Yöntemi	1	0,203	3,126
	2	0,192	3,628
	3	-	-

Çizelge 5.3 incelendiğinde okul binasının güçlendirme çalışmaları öncesi GFTAA ve SAB yöntemleri ile hesaplanan dinamik karakteristiklerinden periyotlarına bakıldığında ilk iki periyotları arasında uyum olduğu gözlemlenmektedir.

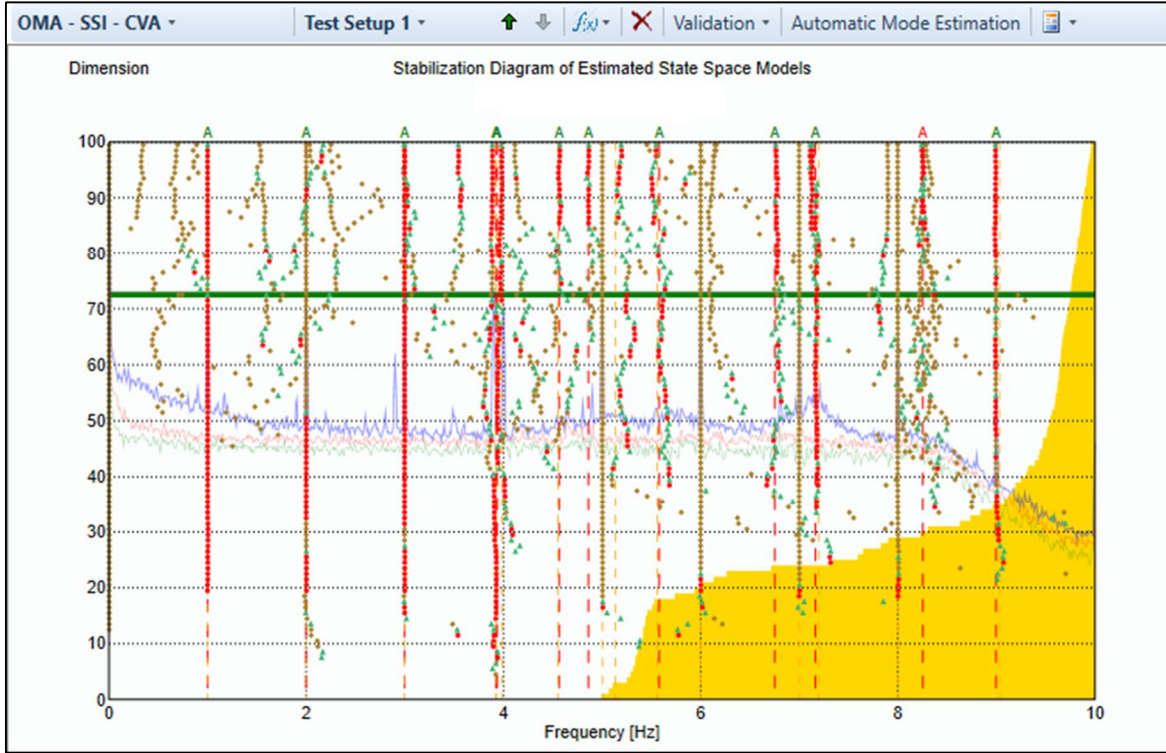
#### Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Güçlendirme Sonası Analiz Sonuçları

Güçlendirme çalışmalarının tamamlanmasından sonra kayıt altına alınan ivme tepkileri GFTAA ve SAB yöntemleri ile analiz edilmiştir. GFTAA yöntemi analiz sonuçları ile elde edilen tekil değerler grafiği Şekil 5.9'da, SAB yöntemi analiz sonuçları elde edilen kararlılık diyagramı Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Elde edilen periyot değerleri ve sönüm oranları Çizelge 5.4'te gösterilmektedir.



Şekil 5.9 Güçlendirme sonrası Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi spektral yoğunluk fonksiyonu





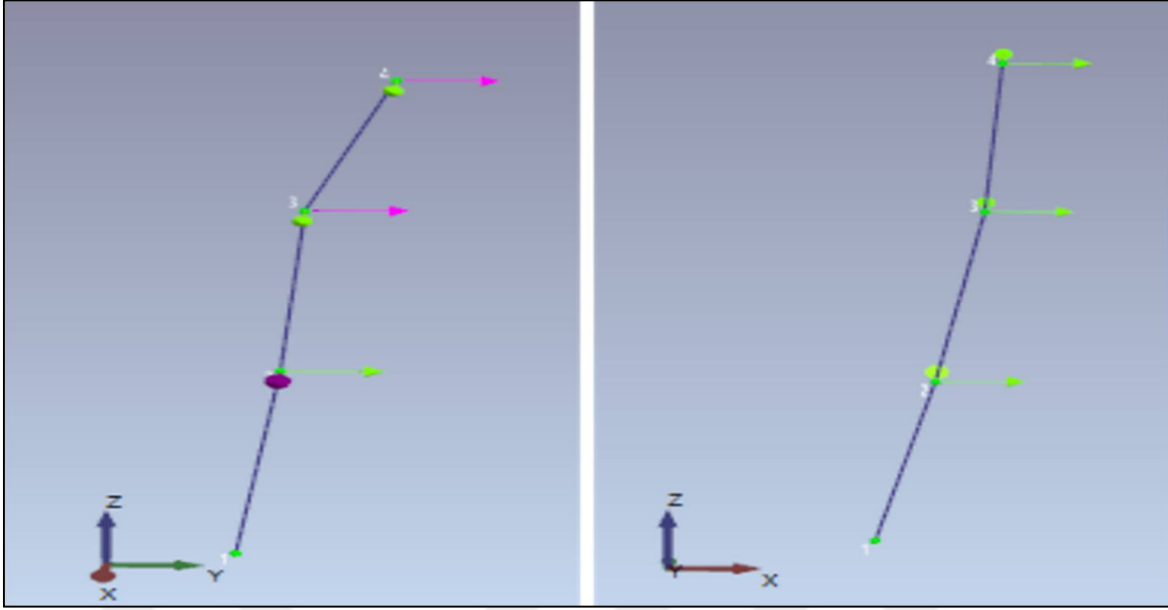
Şekil 5.10 Güçlendirme sonrası Denir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi kararlılık diyagramı

Çizelge 5.4 Güçlendirme sonrası GFTAA ve SAB yöntemi analiz sonuçları

	Mod Numarası	Periyot (sn)	Sönüm (%)
GFTAA Yöntemi	1	0,147	3
	2	-	-
	3	-	-
SAB Yöntemi	1	0,146	3,12
	2	0,139	1,69
	3	0,121	1,59

Çizelge 5.4 incelendiğinde okul binasının güçlendirme çalışmaları sonrası GFTAA ve SAB yöntemleri ile hesaplanan dinamik karakteristiklerinden periyoduna bakıldığında birinci periyotlar arasında uyum olduğu gözlemlenmektedir.

Okul binasının ilk iki moduna karşılık gelen deneysel mod şekilleri her iki yöntemde de birinci mod için  $-y$  eksenini doğrultusunda yanal ikinci mod için  $-x$  eksenini doğrultusunda yanal olarak elde edilmiştir (Şekil 5.11).



Şekil 5.11 Okul binasının güçlendirme öncesi y doğrultusu ve x doğrultusu mod şekilleri

Okul binasının güçlendirme çalışmaları sonrası çevrel titreşim tepki verisi sadece çatı katından alınmıştır.

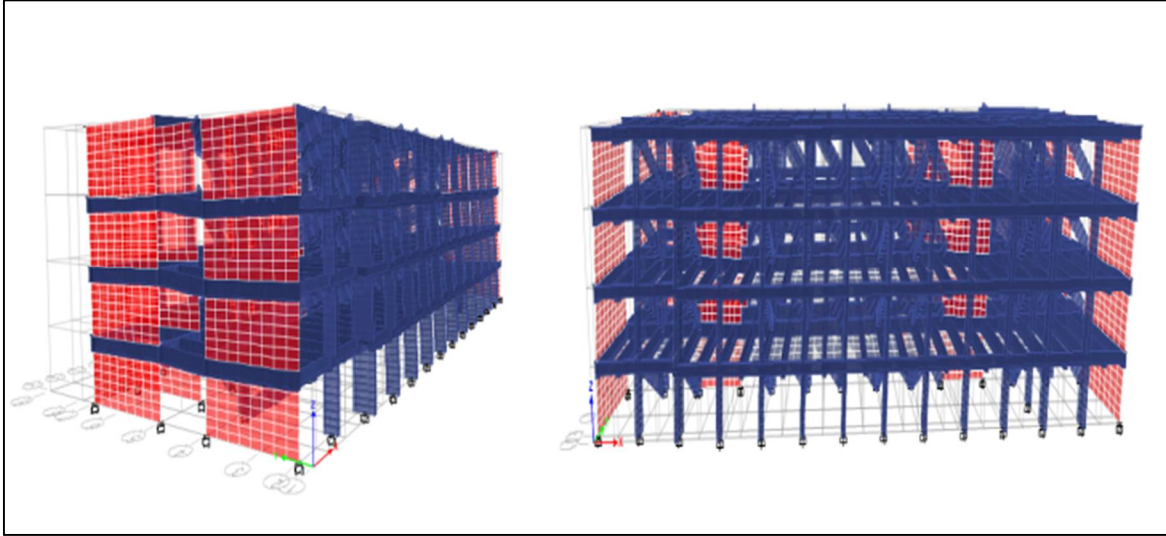
### 5.1.2. Güçlendirme öncesi ve sonrası yapısal analiz yazılımı analiz sonuçları

#### Payas Mesleki ve Teknik Lisesi Güçlendirme Öncesi ve Sonrası Analiz Sonuçları

Yapısal analiz programı ile sonlu eleman modeli oluşturulan okul binasının güçlendirme öncesi ilk üç moda ait periyotlar Çizelge 5.5'te, iki mod şekli Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Güçlendirme sonrası ilk üç moda ait periyotlar Çizelge 5.6'da, iki mod şekli Şekil 5.13'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 Güçlendirme öncesi okul binasının teorik analiz sonuçları

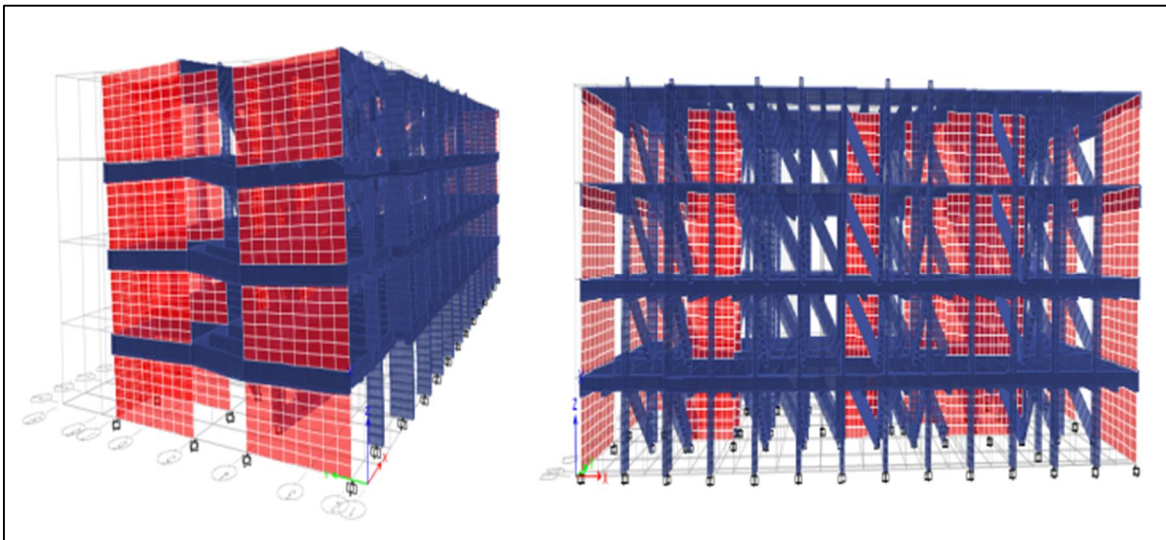
	Standartlar	Mod Numarası	Periyot (Sn)	Doğrultu
Yapısal Analiz Programı	ABE	1	0,254	y
		2	0,240	x
		3	0,169	burulma
	ASK	1	0,221	y
		2	0,212	x
		3	0,165	burulma
	TS-500	1	0,213	y
		2	0,204	x
		3	0,136	burulma
	HS	1	0,249	y
		2	0,236	x
		3	0,165	burulma



Şekil 5.12 Okul binasının güçlendirme öncesi sırasıyla ilk iki mod şekli

Çizelge 5.6 Güçlendirme sonrası okul binasının teorik analiz sonuçları

	Standartlar	Mod Numarası	Periyot (Sn)	Doğrultu
Yapısal Analiz Programı	ABE	1	0,205	y
		2	0,194	x
		3	0,161	burulma
	ASK	1	0,177	y
		2	0,172	x
		3	0,136	burulma
	TS-500	1	0,170	y
		2	0,167	x
		3	0,131	burulma
	HS	1	0,199	y
		2	0,190	x
		3	0,157	burulma



Şekil 5.13 Okul binasının güçlendirme sonrası sırasıyla ilk iki mod şekli

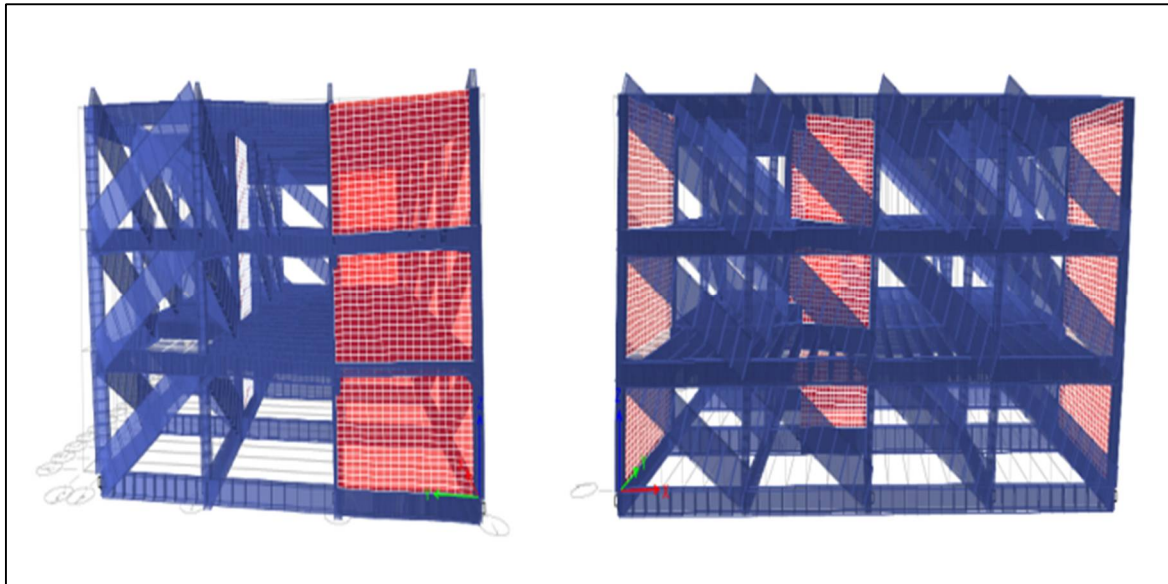
Yapısal analiz programı analiz sonuçlarında kullanılan farklı standart/yönetmeliklere ait okul bina davranışları benzer olduğu için örnek olarak sadece ABE standartlarına ait mod şekilleri gösterilmiştir.

Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Güçlendirme Öncesi ve Sonrası Analiz Sonuçları

Yapısal analiz programı ile sonlu eleman modeli oluşturulan okul binasının güçlendirme öncesi ilk üç moda ait periyotlar Çizelge 5.7’de, iki mod şekli Şekil 5.14’te gösterilmiştir. Güçlendirme sonrası ilk üç moda ait periyotlar Çizelge 5.8’da, iki mod şekli Şekil 5.15’te gösterilmiştir.

Çizelge 5.7 Güçlendirme öncesi okul binasının teorik analiz sonuçları

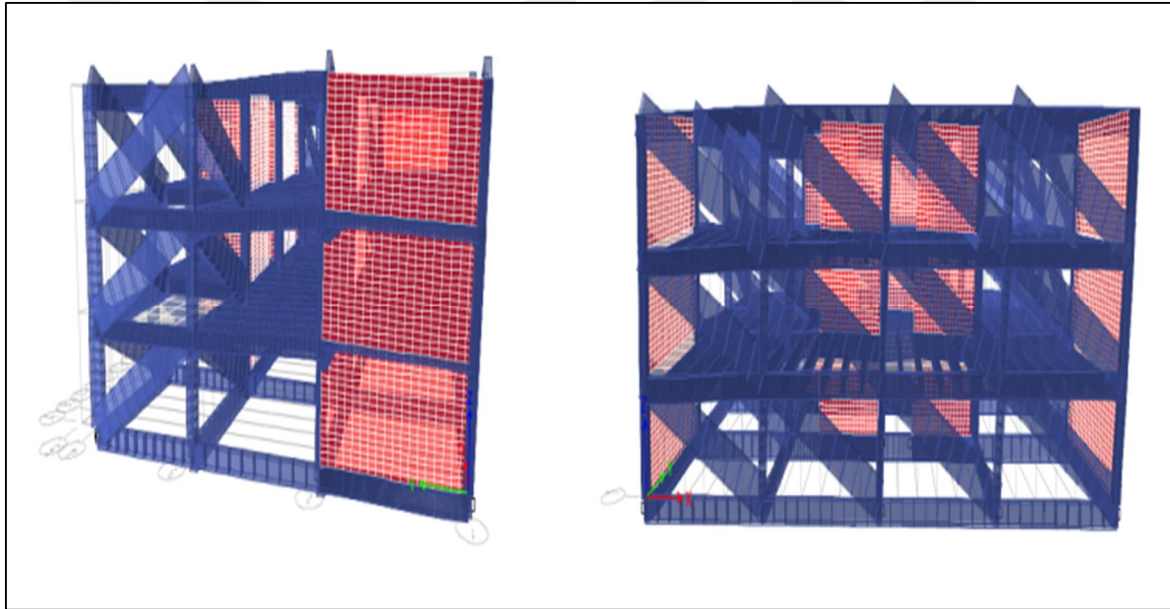
	Standartlar	Mod Numarası	Periyot (Sn)	Doğrultu
Yapısal Analiz Programı	ABE	1	0,212	y
		2	0,185	x
		3	0,145	burulma
	ASK	1	0,194	y
		2	0,166	x
		3	0,130	burulma
	TS-500	1	0,190	y
		2	0,162	x
		3	0,127	burulma
	HS	1	0,208	y
		2	0,181	x
		3	0,141	burulma



Şekil 5.14 Okul binasının güçlendirme öncesi sırasıyla ilk iki mod şekli

Çizelge 5.8 Güçlendirme sonrası okul binasının teorik analiz sonuçları

	Standartlar	Mod Numarası	Periyot (Sn)	Doğrultu
Yapısal Analiz Programı	ABE	1	0,154	y
		2	0,144	x
		3	0,120	burulma
	ASK	1	0,140	y
		2	0,130	x
		3	0,110	burulma
	TS-500	1	0,137	y
		2	0,127	x
		3	0,105	burulma
	HS	1	0,151	y
		2	0,140	x
		3	0,115	burulma



Şekil 5.15 Okul binasının güçlendirme sonrası sırasıyla ilk iki mod şekli

Yapısal analiz programı analiz sonuçlarında kullanılan farklı standart/yönetmeliklere ait okul bina davranışları benzer olduğu için örnek olarak sadece ABE standartlarına ait mod şekilleri gösterilmiştir.

Çalışma kapsamında OMA yöntemi ve teorik yöntem ile elde edilen okul binaları güçlendirme öncesi ve sonrası periyot değerleri Çizelge 5.9 ve Çizelge 5.10'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.9 Güçlendirme öncesi ve sonrası Payas Mesleki ve Teknik Lisesi OMA ve teorik analiz sonuçları

Periyot No.	Güçlendirme Öncesi Periyot Değerleri (sn)						Fark (%)							
	DeneySEL		Teorik				GFTAA				SAB			
	GFTAA	SAB	ABE	ASK	TS	HS	ABE	ASK	TS	HS	ABE	ASK	TS	HS
1	0,245	0,244	0,254	0,221	0,213	0,249	3,5	11,3	15,2	7,1	3,9	10,8	14,8	1,7
2	0,216	0,217	0,240	0,212	0,204	0,236	10,3	2	5,7	6,0	10	2,3	6	8,3
3	-	0,184	0,169	0,165	0,136	0,165	-	-	-	-	8,7	29,6	35,5	11,8
Periyot No.	Güçlendirme Sonrası Periyot Değerleri (sn)						Fark (%)							
	DeneySEL		Teorik				GFTAA				SAB			
	GFTAA	SAB	ABE	ASK	TS	HS	ABE	ASK	TS	HS	ABE	ASK	TS	HS
1	0,225	0,226	0,205	0,177	0,170	0,199	9,8	27,1	31,8	12,7	10,5	27,9	32,7	13,4
2	0,201	0,199	0,194	0,172	0,167	0,190	3,4	16,6	20,4	5,6	3	16,2	19,9	5,2
3	0,167	0,164	0,161	0,136	0,131	0,157	3,7	22,8	28,2	6,6	1,8	20,6	25,8	4,7

Çizelge 5.10 Güçlendirme öncesi ve sonrası Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi OMA ve teorik analiz sonuçları

Periyot No.	Güçlendirme Öncesi Periyot Değerleri (sn)						Fark (%)							
	DeneySEL		Teorik				GFTAA				SAB			
	GFTAA	SAB	ABE	ASK	TS	HS	ABE	ASK	TS	HS	ABE	ASK	TS	HS
1	0,206	0,203	0,212	0,194	0,190	0,208	2,9	6,3	8,3	0,8	4,2	4,9	6,9	2,1
2	0,189	0,192	0,185	0,166	0,162	0,181	2,1	13,9	16,5	4,8	3,6	15,6	18,2	6,37
3	0,157	-	0,145	0,130	0,127	0,141	8,4	21	23,8	11,3	-	-	-	-
Periyot No.	Güçlendirme Sonrası Periyot Değerleri (sn)						Fark (%)							
	DeneySEL		Teorik				GFTAA				SAB			
	GFTAA	SAB	ABE	ASK	TS	HS	ABE	ASK	TS	HS	ABE	ASK	TS	HS
1	0,147	0,146	0,154	0,140	0,137	0,151	5,3	4,64	6,88	2,8	5,5	4,5	6,7	2,9
2	-	0,139	0,144	0,130	0,127	0,140	-	-	-	-	3,3	8,1	10,6	0,6
3	-	0,121	0,120	0,110	0,105	0,115	-	-	-	-	2,3	13,3	15,7	5,2

Teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir:

- Payas Mesleki ve Teknik Lisesi üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmada güçlendirme öncesi çevrel titreşim tepki kayıtlarının GFTAA analizi ile okul binasına ait ilk iki periyot sırasıyla 0,245 sn ve 0,216 sn, SAB analizi ile ilk iki periyot sırasıyla 0,244 ve 0,217 olarak elde edilmiştir. Farklı yönetmelik ve standartlara göre oluşturulan güçlendirme öncesi analitik modelin teorik analizi ile elde edilen ilk iki periyot değerleri ABE'ye göre 0,254 sn, 0,240 sn, ASK'ya göre 0,221 sn, 0,212 sn, TS'ye göre 0,213 sn, 0,204 sn ve HS'ye göre 0,249 sn, 0,236 sn olarak elde edilmiştir.
- Payas Mesleki ve Teknik Lisesi güçlendirme öncesi deneysel ve teorik analiz sonuçlarının ortalamaları kıyaslandığında birinci periyotlar arasında % 4,5 'lik bir fark olduğu ikinci periyotlar arasında % 2,7 'lik bir fark olduğu gözlemlenmiştir.
- Payas Mesleki ve Teknik Lisesi üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmada güçlendirme sonrası çevrel titreşim tepki kayıtlarının GFTAA analizi ile okul binasına ait ilk iki periyot sırasıyla 0,225 sn ve 0,201 sn, SAB analizi ile ilk iki periyot sırasıyla 0,226 ve 0,199 olarak elde edilmiştir. Farklı yönetmelik ve standartlara göre oluşturulan güçlendirme öncesi analitik modelin teorik analizi ile elde edilen ilk iki periyot değerleri ABE'ye göre 0,205 sn, 0,194 sn, ASK'ya göre 0,177 sn, 0,172 sn, TS'ye göre 0,170 sn, 0,167 sn ve HS'ye göre 0,199 sn, 0,190 sn olarak elde edilmiştir.
- Payas Mesleki ve Teknik Lisesi güçlendirme öncesi deneysel ve teorik analiz sonuçlarının ortalamaları kıyaslandığında birinci periyotlar arasında % 18,4 'lük bir fark olduğu ikinci periyotlar arasında % 11,1 'lik bir fark olduğu gözlemlenmiştir.
- Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmada güçlendirme öncesi çevrel titreşim tepki kayıtlarının GFTAA analizi ile okul binasına ait ilk iki periyot sırasıyla 0,206 sn ve 0,189 sn, SAB analizi ile ilk iki periyot sırasıyla 0,203 sn ve 0,192 sn olarak elde edilmiştir. Farklı yönetmelik ve standartlara göre oluşturulan güçlendirme öncesi analitik modelin teorik analizi ile elde edilen ilk iki periyot değerleri ABE'ye göre 0,212 sn, 0,185 sn, ASK'ya göre 0,194 sn, 0,166 sn, TS'ye göre 0,190 sn, 0,162 sn ve HS'ye göre 0,208 sn, 0,181 sn olarak elde edilmiştir.
- Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi güçlendirme öncesi deneysel ve teorik analiz sonuçlarının ortalamaları kıyaslandığında birinci periyotlar arasında % 2'lik bir fark olduğu ikinci periyotlar arasında % 11,7 'lik bir fark olduğu gözlemlenmiştir.
- Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmada güçlendirme sonrası çevrel titreşim tepki kayıtlarının GFTAA analizi ile okul

binasına ait ilk periyot 0,147 sn, SAB analizi ile ilk iki periyot sırasıyla 0,146 ve 0,139 olarak elde edilmiştir. Farklı yönetmelik ve standartlara göre oluşturulan güçlendirme öncesi analitik modelin teorik analizi ile elde edilen ilk iki periyot değerleri ABE'ye göre 0,154 sn, 0,144 sn, ASK'ya göre 0,140 sn, 0,130 sn, TS'ye göre 0,137 sn, 0,127 sn ve HS'ye göre 0,151 sn, 0,140 sn olarak elde edilmiştir.

- Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi güçlendirme sonrası deneysel ve teorik analiz sonuçlarının ortalamaları kıyaslandığında birinci periyotlar arasında % 0,7'lik bir fark olduğu ikinci periyotlar arasında % 3 'lük bir fark olduğu gözlemlenmiştir.
- Tez çalışması kapsamında okul binalarına ait çevrel titreşim tepki kayıtları analizinde GFTAA ve SAB yöntemleri kullanılmıştır. İki analiz yöntemi kendi aralarında kıyaslanacak olursa, Payas Mesleki ve Teknik Lisesinin güçlendirme öncesi GFTAA yöntemi ile analizinde ilk iki periyodu, ilk iki periyoda karşılık gelen mod şekilleri ve 2. periyoda ait sönüm oranı, SAB yöntemi ile analizinde ilk üç periyodu, ilk iki periyoduna karşılık gelen mod şekli ve ilk iki periyoda ait sönüm oranları elde edilmiştir. Payas Mesleki ve Teknik Lisesinin güçlendirme sonrası GFTAA yöntemi ile analizinde ilk üç periyodu, ilk iki periyoda karşılık gelen mod şekilleri ve ilk üç periyoda ait sönüm oranı, SAB yöntemi ile analizinde ilk üç periyodu, ilk iki periyoduna karşılık gelen mod şekli ve ilk üç periyoda ait sönüm oranları elde edilmiştir.



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 6.1. Sonuç

Bu tez çalışmasında Hatay ili İskenderun ve Payas ilçelerinde yer alan okul binalarından güçlendirme öncesi ve güçlendirme sonrası çevrel titreşimler etkisi altında ölçümler yapılmış ve okul binalarına ait dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışma güçlendirme çalışmaları öncesinde ve sonrasında olmak üzere iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma dört katlı Payas Mesleki ve Teknik Lisesi ve üç katlı Demir Çelik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi okul binalarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarda yapılara ait periyot ve sönüm oranları hem güçlendirme öncesi durum hem de güçlendirme çalışmaları sonrası durum için elde edilmiştir. Okul binalarının sayısal modelleri, beton elastisite modülünün hesabında çeşitli yaklaşımlar ve formüller kullanan farklı standartlar ve yönetmeliklere göre oluşturulmuştur. Elde edilen deneysel çalışma sonuçları ile farklı yönetmelik ve standartlara göre yapısal analiz programı kullanılarak sayısal modelleri oluşturulan okul binalarının analiz sonuçları kıyaslanmıştır. Bu yönetmelik ve standartlarda farklı olan beton elastisite modüllerinin etkisi incelenmiştir.

- Okul binalarının güçlendirme çalışmaları öncesi ve sonrası doğal periyot değerleri karşılaştırıldığında hem deneysel hem de teorik analiz sonuçlarında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Periyot değerlerindeki azalmanın okul binalarına eklenen perde duvarlar sonucu yapının rijitliğinin artmasıyla gerçekleştiği gözlemlenmiştir.
- Deneysel ve teorik analiz sonuçları kıyaslandığında aralarında farklar olduğu gözlemlenmiştir. Bu farkların yapıya ait malzeme bilgisi ve sınır şartlarında kaynaklandığı düşünülmektedir. Farklılıkların giderilmesi ve okul binalarına ait periyot değerlerin yakınlaştırılması için sonlu eleman modeli üzerinde güncelleştirme çalışmalarının yapılarak yapıların gerçek davranışlarının sayısal model ile gösterilebileceği görülmüştür.
- Yapısal sağlık izleme sistemleri ile tahribatsız olarak hızlı bir şekilde yapıların dinamik karakteristik özellikleri belirlenebilmektedir. Sonuçlar yapısal analiz programları ile kıyaslandığında uyumlu olması uygulanabilirliğini desteklemektedir.

## 6.1. Öneriler

Tez çalışması sonuçları değerlendirildiğinde gelecekteki çalışmalara yol gösterebileceği düşünülen bazı tavsiyeler aşağıda verilmiştir.

- Bu çalışmada uygulanan yöntemler kullanılarak, ülkemizdeki hem karkas hem yığma yapıların durum değerlendirmesi yapılabilir. İlerleyen teknoloji ile kullanılacak olan yapı sağlığı izleme sistemlerine erişimin kolaylaşması mevcut yapıların 7/24 gerçek zamanlı takibi ile olası yıkıcı senaryoların önüne geçilebilir, gerekli tedbirler zamanında alınabilir.
- Güçlendirme çalışmalarında güçlendirme öncesi ve sonrası yapıların dinamik karakteristikleri elde edilip güçlendirme çalışmasının güvenilirliği hakkında yorum yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) (2019). Yapı Sağlığı İzleme Sistemi Uygulama Yönergesi, 76388967-15.20.1-11, Ankara
- ACI 318-14 (2014). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, *American Concrete Institute, USA, 2014*
- Aldırmaz, B. (2020). Investigation of structural health monitoring of a high rise building (*M.Sc. Thesis, Institute of Science And Technology*), Turkey.
- Altunışık, A.C. (2010). Karayolu köprülerinin yapısal davranışlarının analitik ve deneysel yöntemlerle belirlenmesi, Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Altunışık, A.C., Bayraktar, A., Sevim, B., and Özdemir, H., (2011). Experimental And Analytical System Identification of Eynel Arch Type Steel Highway Bridge, *Journal of Constructional Steel Research*, (67), 1912-1921.YN
- Andersen, P. (1997). Identification of Civil Engineering Structures using Vector ARMA Models. *Ph.D. Thesis, Aalborg University, Denmark*.
- Aoki, T., Komiyama, T., Sabia, D., & Rivella, D. (2004). Theoretical and experimental dynamic analysis of Rakanji stone arch bridge, Honyabakei, Oita, Japan. *In Proceedings of 7th International Conference on Motion and Vibration Control MOVIC* (Vol. 4, p. 9).
- Aras, F. (2019). Monitoring the dynamic properties of a nine-story reinforced concrete building during its demolition. *Struct Control Health Monit* ; 26:e2456. <https://doi.org/10.1002/stc.2456>
- Aras, F., & Karapınar, I. S. (2021). Dynamic properties of steel structures under different construction stages, ambient temperature and live load. *Revista de la construcción*, 20(1), 163-177.
- Arun, K., & Kung, S. (1990). Balanced Approximation of Stochastic Systems. *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, 11(1), 42–68.
- Atamtürktür, S., Asce, M. and Sevim, B. (2012). Seismic Performance assessment of masonry tile domes through nonlinear finite-element analysis. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 26(4), 410-423.A
- Aytulun, E , Soyöz, S . (2020). Deprem Öncesi, Sırası ve Sonrasında Bir Yüksek Binanın Yapı Sağlığının İzlenmesi . *Türk Deprem Araştırma Dergisi* , 2 (1) , 61-75 . DOI: 10.46464/tdad.735239
- Bağbancı, M. B., Bağbancı, Ö. K. (2018). The Dyanmic Properties of Historic Timber-Framed Masonry Structures in Bursa, Turkey, *Shock and Vibration*, <https://doi.org/10.1155/2018/3257434>

- Baptista M.A., Mendes P. & Oliveira S. (2005). Use of ambient vibration tests for structural identification: 3 case studies, *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference*, Copenhagen, Denmark.
- Baraccani, S., Palermo, M., Gasparini, G., & Trombetti, T. (2021). A time domain approach for data interpretation from long-term static monitoring of historical structures. *Structural Control and Health Monitoring*, 28(5), e2708.
- Bartoli, G., Betti, M., and Giordano, S., (2013). In Situ Static and Dynamic Investigations on the Torre Grossa Masonry Tower, *Engineering Structures*, 52, pp. 718-733.
- Bas, S., Apaydin, N. M., Ilki, A., & Catbas, F. N. (2018). Structural health monitoring system of the long-span bridges in Turkey. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(4), 425-444.
- Başpolat, E., Bayraktar, A., Başağa, H.B., ve Türker, T., (2013). Deriner Beton Kemer Barajının Deneysel Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi, 2. *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, ss.1-10, Hatay, Türkiye.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C., ve Türker, T., (2007). Tarihi Yığma Minarelerin Deprem Güvenliklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, *Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 1*, pp.415-428, Ankara, Türkiye.
- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C., Sevim B., Şahin A. ve Özcan M. (2010). Binaların dinamik parametrelerinin operasyonel modal analiz yöntemiyle belirlenmesi. *İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi*, 21(104), 5185-5205.
- Bendat, J. & Piersol, A. (2010). *Random Data: Analysis and Measurement Procedures: Fourth Edition*. 10.1002/9781118032428.
- Benedettini F., Alaggio R. & Manetta P. (2005). Arch bridges in Provincia di Teramo: tests, identification and numerical models, *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference*, Copenhagen, Denmark.
- Boru, E. & Kutanis M. (2015). Çevrel titreşim kayıtları kullanılarak yapı dinamik parametrelerinin belirlenmesi - *SAÜ Fen Bil Der* - Vol.19 - pp.59-66 - ISSN : 1301-4048 - DOI : <http://dx.doi.org/10.16984/saufenbilder.77072>
- Brencich, A. and Sabia, D. (2008). Experimental identification of a multi-span masonry bridge: The tanaro bridge. *Construction and Building Materials*, 22(10), 2087-2099.
- Brincker, R., Zhang, L., & Andersen, P. (2000). Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition. *In Proceedings of the 18th IMAC*. San Antonio, Texas.
- Brownjohn J.M.W. (1988). Assessment of structural integrity by dynamic measurements, PhD Thesis, University of Bristol, Bristol, England Gentile C. (2005). Operational Modal Analysis and assessment of historical structures, *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference*, Copenhagen, Denmark.

- Choi, S., Park, S., Hyun, C.H., Kim, M.S., and Choi, K.R. (2010). Modal Parameter Identification Of A Containment Using Ambient Vibration Measurements, *Nuclear Engineering and Design*, 240, pp.453-460.
- Chopra, A.K., 2006. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Third Edition, Prentice Hall, USA.
- Cunha A., Caetano E., and Moutinho C. (2000). Ambient Vibration Data Analysis Of Heritage Court Tower. Contribution Of University Of Porto To IMAC Benchmark, *IMAC XVIII - 18th International Modal Analysis Conference*, vol.52, pp.1075-1080.
- Cunha, A., Caetano, E., Brincker, R. and Andersen, P. (2004). Identification from the Natural Response of Vasco da Gama Bridge, *Proc. 22nd Int. Modal Analysis Conference*, Deaborn, USA.LAR
- Çalık, İ., Demirtaş, B., Bayraktar, A., ve Türker, T. (2012). Yığma Taş Minarelerin Analitik Ve Deneysel Yöntemlerle Güvenliğinin Belirlenmesi: Trabzon Muhittin Camii Minaresi Örneği, *Vakıflar Dergisi*, cilt.38, ss.121-139.
- De Stefano, A. (2007). Structural idefinctaition and health monitoring on the historical architectural heritage. *Key Engineering Materials*, 347, 37–54.
- Domaneschi, M., Casciati, S., Catbas, N., Cimellaro, G. P., Inaudi, D., & Marano, G. C. (2020). Structural health monitoring of in-service tunnels. *International Journal of Sustainable Materials and Structural Systems*, 4(2-4), 268-291.
- Durgun, Y.G., Aktaş, M. ve Kutaniş, M. (2013). Sarsma tablasına yerleştirilmiş 3 katlı hasarlı ve hasarsız çelik yapı modelinin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi. 2. *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Hatay.
- EN 1992-1-1. (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings. *European Committee for Standardization*.
- Fanning, P.J. and Boothby, T.E. (2001). Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges. *Computers and Structures*, 79(29-30), 2645-2662.
- Farrar, C.R. and Jauregui, D.A. (1998a). Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: *I. Experiment*. *Smart Materials and Structures*, 7(5), 704-719.
- Farrar, C.R. and Jauregui, D.A. (1998b). Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: *II. Numerical Study*. *Smart Materials and Structures*, 7(5), 720-731.
- FEMA 306 (1998). Federal Emergency Management Agency, Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings: Basic Procedures Manual, FEMA-306, Washington, DC.
- Gade, S., Møller, N. B., Herlufsen, H., & Konstantin-Hansen, H. (2005). Frequency domain techniques for operational modal analysis. *In Proceedings of the 1st IOMAC*.

Copenhagen, Denmark.

Güneş, S. (2017). Operasyonel Modal Analiz Tekniği ile Yığma Yapıların Dinamik Davranışının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

Güneş, Ş. ve Anıl Ö. (2017) Operasyonel model analiz tekniği ile yığma yapıların dinamik davranışının belirlenmesi, *4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı – Anadolu Üniversitesi – Eskişehir*.

Ibsen L.B. & Liingaard M. (2005). Output-only modal analysis used on new foundation concept for offshore wind turbine, *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference*, Copenhagen, Denmark.

Indian standard code for plain and reinforced concrete for general building constructions IS: 456-2000, *Bureau of Indian Standard*, New Delhi.

İnternet: Teknik Destek Grubu URL: <https://tdg.com.tr/tr/urunler/masaustu-sarsma-tablaları/tdg-shaketable>, Son Erişim Tarihi : 06.06.2021

İnternet: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Tehlike Haritası URL: <https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi>, Son Erişim Tarihi : 06.06.2021

İnternet: ARTeMIS. *Software for operational modal analysis* URL: <https://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.svibs.com%2F&date=2017-12-19>, Son Erişim Tarihi : 06.06.2021

Jacobsen, N-J., Andersen, P., & Brincker, R. (2006). Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis. *In Proceedings of ISMA2006: International Conference on Noise & Vibration Engineering Katholieke Universiteit*.

James, G. H., Crane, T. G., & Laufer, J. (1995). The natural excitation technique (NExT) for modal parameter extraction from operating structures. *The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, 10, 260–277.

Kaçın, S., Bıkçe, M., Geneş, M.C., Doğanay, Ela. ve Ünlüsoy, Ü. (2011). Güçlendirme uygulaması yapılan bir binanın güçlendirme öncesi ve sonrasında titreşim ölçümleri ile bazı dinamik parametrelerinin hesaplanması. *Yedinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi*.

Kaçın S., Soysal E. (2017) “Betonaarme Bir Yapının Çevrel Titreşim Kayıtları ile Sadece Taşıyıcı Sistemli ve İnşaatı Tamamlanmış Durumda Dinamik Parametrelerinin Belirlenmesi” *4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*

Kömür, M , Deneme, İ , Yerli, H . (2016). Düzlem Çelik Çerçeve Sistemlerin Operasyonel Modal Analizi . *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* , 30 (2) , 73-80 . DOI: 10.21605/cukurovaummfd.242765

Mohammed, M.A., Yu, H., Furtado, A., Barbosa, A.R., Moaveni, B., Varum, H., Rodrigues, H., Vila-Pouca, N. and Wood, R.L. (2017). Post-earthquake field measurement-based

- system identification and finite element modeling of an 18-story masonry-infilled RC building, *International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*, Springer, pp.746–757.
- Okuyucu, Dilek (2020). Tek Katlı Betonarme Bir Yapı Üzerinde Operasyonel Modal Analiz Uygulaması, *Dicle University Journal of Engineering*: Vol. 11 : Iss. 3 , Article 51. DOI: 10.24012/dumf.731668
- Osmancıklı, G. (2012). “Prefabrik yapıların dinamik davranışlarının analitik ve deneysel yöntemlerle belirlenmesi” , Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Overschee, P. van, & Moor, B. L. de. (1996). Subspace Identification for Linear Systems: Theory - Implementation - Applications. Dordrecht, Netherlands: *Kluwer Academic Publishers*.
- Ozcelik, O., Yormaz, D., Amaddeo, C., Girgin, O. and Kahraman, S. (2019). System identification of a six-span steel railway bridge using ambient vibration measurements at different temperature conditions, *J. Perform. Constr. Facil.* 33 (2): 04019001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001260](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001260).
- Peeters, B. and Roeck, G.D. (2000). Reference based stochastic subspace identification in civil engineering. *Inverse Problems in Civil Engineering*, 8, 47-74.
- Petsounis, K. A., & Fassois, S. D. (2001). Parametric time-domain methods for the identification of vibrating structures-a critical comparison and assessment, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15(6), 1031–1060.
- Rainieri, C. (2008). Operational Modal Analysis for seismic protection of structures. *University of Naples “FEDERICO II*.
- Ramos L., Marques L., Lourenco P., De Roeck G., Campos-Costa A. & Roque J. (2007). Monitoring historical masonry structures with operational modal analysis: two case studies, *Proceedings of the 2nd International Operational Modal Analysis Conference*, Copenhagen, Denmark.
- Ramos, J.L.F. (2007). Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, *PhD Dissertation, Minho University, Portugal*
- Ramos, L.F., De Roeck, G., Lourenço, P. B. ve Campos-Costa, A. (2009). Damage identification on masonry structures based on vibration signatures. *Engineering Structures*, 32, 146-162
- Ren, W.X., Zatar, W. and Harik, I.E. ( 2004). Ambient vibration-based seismic evaluation of a continuous girder bridge. *Engineering Structures*, 26(5), 631-640.
- Reynolds P., Mohanty P. & Pavic A. (2005). Use of Operational Modal Analysis on empty and occupied stadia structures, *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference*, Copenhagen, Denmark.

- SAP2000, C. S. I. (2018). v20 Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures. Computers and Structures Inc., Berkely, CA, USA.
- Savaş, G. K. (2020). Çok katlı Betonarme Yapıların Yapım Kalitesi Kontrolünün Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum
- Soyoz, S., Taciroglu, E., Orakcal, K., Nigbor, R., Skolnik, D., Lus, H., and Safak, E. (2013). Ambient and Forced Vibration Testing of a Reinforced Concrete Building before and after Its Seismic Retrofitting, *J. Struct. Eng.* 139, SPECIAL ISSUE: Real-World Applications for Structural Identification and Health Monitoring Methodologies, 1741–1752.
- Tamura Y., Yoshida A., Zhang L., Ito T., Nakata S. & Sato K. (2005). Examples of modal identification of structures in Japan by FDD and MRD techniques, *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference*, Copenhagen, Denmark.
- Tarpø, M, Georgakis, C, Brandt, A, Brincker, R. (2021). Experimental determination of structural damping of a full-scale building with and without tuned liquid dampers. *Struct Control Health Monit.*; 28:e2676. <https://doi.org/10.1002/stc.2676>
- TBDY 2018 (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, Türkiye.
- TS-500 (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Türker, T , Yanık, Y. (2020). İlyasbey Camisi'nin Yapısal Davranışının Çevresel Titreşim Testi ve Sonlu Eleman Yöntemleriyle İncelenmesi . *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi* , 8 (2) , 1431-1453 . DOI: 10.29130/d
- Türker, T. (2014). Ambient Vibration Test Of Building Base Slab For Different Ground Conditions, *Measurement*, vol.52, pp.77-84.
- Türker, T., and Bayraktar, A. (2014). Structural Safety Assessment Of Bowstring Type Rc Arch Bridges Using Ambient Vibration Testing And Finite Element Model Calibration, *Measurement*, vol.59, pp.33-45.
- Uçak, Ş. (2012). Tarihi yığma kubbelerin dinamik davranışlarının operasyonel modal analiz yöntemiyle belirlenmesi, Doctoral dissertation, *Karadeniz Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Ventura C.E. & Turek M. (2005). Fifteen years of ambient vibration testing in Western Canada, *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference*, Copenhagen, Denmark.
- Ventura, C., Brinker, R., Dascotte, E., and Anderson, P. (2001). FEM Updating of the Heritage Court Building Structure, *Proceedings of the 19th International Modal Analysis Conference*, pp. 324-330, Kissimmee.AK



- Ventura, C., Laverick, B., Brincker, R., and Andersen, P. (2003). Comparison of Dynamic Characteristics of Two Instrumented Tall Buildings, *In Proceedings of IMAC-21: A Conference on Structural Dynamics*, (pp. 236-242), The Hyatt Orlando, Kissimmee, Florida.
- Verboven, P. (2002). Frequency-domain system identification for modal analysis. *Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit Brussels*, Brussels.
- Vivo, A.D., Brutti, C., and Leofanti, J.L., 2013. Modal shape identification of large structure exposed to wind excitation by operational modal analysis technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, (39), pp. 195–206.
- Votsis, R.A., Kyriakides, N., Chrysostomou, C., Tantele, E., and Demetriou, T. (2012). Ambient vibration testing of two masonry monuments in Cyprus. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 43, pp. 58-68.
- Yanık, Y , Türker, T , Yıldırım, Ö , Dede, T . (2020). Identification Material Properties By Modal Calibration Method Based On Ambient Vibration Tests . *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 25 (1) , 573-590 . DOI: 10.17482/uumfd.643339
- Yetkin, M., Erkek, H., Calayır, Y.(2016). Çevresel Titreşim Verilerini Kullanarak Yapıların Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi ve Sonlu Eleman Modellerinin Güncelleştirilmesi, *Doğal Afet ve Afet Yönetimi Sempozyumu (DAAYS'16)*, 2-4 Mart, Karabük, Türkiye
- Yu, D.J. and Ren, W.X. (2005). EMD-Based stochastic subspace identification of structures from operational vibration measurements. *Engineering Structures*, 27, 1741-1751.
- Zapico, J.L., Gonzalez, M.P., Friswell, M.I., Taylor, C.A. and Crewe, A.J. (2003). Finite element model updating of a small scale bridge. *Journal of Sound and Vibration*, 268(5), 993-1012.
- Zhang, F-L, Yang, Y-P, Xiong, H-B, Yang, J-H, Yu, Z. (2019). Structural health monitoring of a 250-m super-tall building and operational modal analysis using the fast Bayesian FFT method. *Struct Control Health Monit* ; 26:e2383. <https://doi.org/10.1002/stc.2383>
- Zhou, Y., Zhou, Y., Yi, W., Chen, T., Tan, D. and Mi, S. (2017). Operational modal analysis and rational finite-element model selection for ten high-rise buildings based on on-site ambient vibration measurements, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31(5), 04017043.

## DİZİN

---

### **A**

analitik · 1, 6, 9, 10, 11, 12, 14,  
15, 17, 60, 61, 63, 67  
atalet kuvveti · 18

---

### **B**

basit frekans alanı · x, 25  
betonarme · 5, 9, 10, 11, 12, 15,  
32, 34, 35

---

### **Ç**

çok serbestlik dereceli · 17, 20

---

### **D**

deneysel modal analiz · iv, ix, x,  
2, 21, 22  
deplasman · 9, 19, 20, 28  
dinamik davranışı · 2, 28  
dinamik karakteristikler · i, 1  
doğal frekans · i, 1, 6, 11, 46, 48,  
53, 54, 60  
doğal uyarım tekniği · x, 12, 25

---

### **F**

frekans · 6, 10, 13, 14, 18, 21, 24,  
25, 26, 31, 40, 46, 47, 49, 51,  
53, 58  
frekans tanım alanı · x, 24  
frekans tanım alanında ayrıştırma  
· x, 10, 25

---

### **G**

geleneksel deneysel modal analiz  
· 22  
geliştirilmiş frekans tanım  
alanında ayrıştırma · ix, 6

---

### **H**

hasar düzeyi · 1

---

### **M**

mod · i, viii, ix, 1, 5, 6, 7, 8, 9,  
10, 11, 26, 27, 40, 50, 51, 54,  
55, 56, 57, 58  
mod şekillerini · 9, 11, 17  
mod şekli · i, viii, ix, 1, 8, 9, 40,  
50, 51, 55, 56, 57, 58  
modal analizler · 17  
model kalibrasyon yöntemimi ·  
15

---

### **O**

operasyonel modal analiz · 6, 64  
otoregresif hareketli ortalamalar ·  
x, 25

---

### **Ö**

özsistem realizasyonu algoritması  
· 25

---

### **P**

piklerin seçilmesi · x, 25  
polimax · 25

---

### **S**

sonlu elemanlar metodu · 2  
sönüm katsayısı · 18, 20  
sönüm kuvveti · 18  
sönüm oranlarını · 10, 17  
sönümsüz · 18, 19, 20, 21  
stokastik Altalan belirleme · 6

---

### **T**

tek serbestlik dereceli · 17, 26  
Tekil Değer Ayrıştırma · 25  
teorik modal analiz · 1, 17  
tepkilerin spektral yoğunluk  
spektrumu · 25

---

### **V**

vektör otoregresif hareketli  
ortalamalar · 25

---

### **Y**

yapı sağlığı izleme sistemleri · 2  
yay katsayısı · 18  
yay kuvveti · 18

---

### **Z**

zaman tanım alanı · x, 24



**TEKNOVERSITE**



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

