



**İSKENDERUN TEKNİK**  
ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

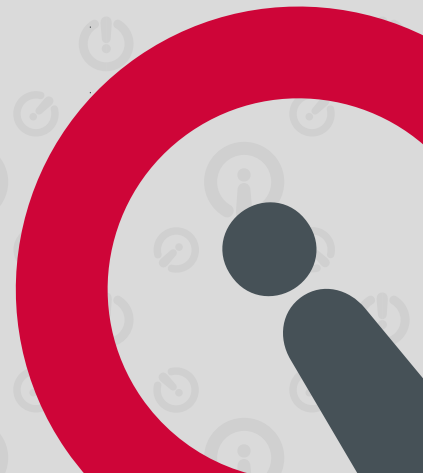
**YÜKSEK  
LİSANS  
TEZİ**

**OKUL BİNALARININ GÜÇLENDİRME  
ÖNCESİ VE SONRASINDA BAZI  
DİNAMİK PARAMETRELERİNİN  
ÇEVRESEL TİTREŞİM KAYITLARI  
İLE HESAPLANMASI**

**Cemil Velat ÇAĞLAR**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**AĞUSTOS 2022**





**OKUL BİNALARININ GÜÇLENDİRME ÖNCESİ VE SONRASINDA BAZI  
DİNAMİK PARAMETRELERİNİN ÇEVRESEL TİTREŞİM KAYITLARI  
İLE HESAPLANMASI**

**Cemil Velat ÇAĞLAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**AĞUSTOS 2022**

Cemil Velat ÇAĞLAR tarafından hazırlanan “OKUL BİNALARININ GÜÇLENDİRME ÖNCESİ VE SONRASINDA BAZI DİNAMİK PARAMETRELERİNİN ÇEVRESEL TİTREŞİM KAYITLARI İLE HESAPLANMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ 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:** Dr. Öğr. Üyesi Selçuk KAÇIN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

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

**Üye:** Prof. Dr. Murat BİKÇE

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

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

**Üye:** Doç. Dr. Tarık BARAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Korkut Ata Teknik Üniversitesi

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

Tez Savunma Tarihi: 31/08/2022

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 kayıplarımı kabullendiğimi beyan ederim.

Cemil Velat ÇAĞLAR

31/08/2022

OKUL BİNALARININ GÜÇLENDİRME ÖNCESİ VE SONRASINDA BAZI DİNAMİK  
PARAMETRELERİNİN ÇEVRESEL TİTREŞİM KAYITLARI İLE HESAPLANMASI  
(Yüksek Lisans Tezi)

Cemil Velat ÇAĞLAR

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2022

ÖZET

Yapıların dinamik yükler (deprem, rüzgâr, trafik yükü vb.) etkisindeki davranışları ve dinamik özelliklerinin belirlenmesi için Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) sistemleri son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yapının periyot, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik özellikleri YSİ sistemleri kullanılarak yapılara zarar vermeden gerçekçi bir şekilde belirlenebilmektedir. Yapıların dinamik özelliklerinin doğru belirlenmesi dinamik yük etkisi altındaki davranışın doğru bir şekilde belirlenmesi için oldukça önemlidir. Bu tez çalışmasında YSİ yöntemi ile Hatay iline bağlı Dörtöyöl ve İskenderun ilçelerinde bulunan güçlendirme kararı verilen iki okul binası ele alınmaktadır. Dörtöyöl ilçesinde bulunan okul binasında güçlendirme çalışması olarak bina yüksekliği boyunca 12 adet (kısa doğrultu 4 uzun doğrultu 8) beton basınç dayanımı 30 MPa ve donatı akma dayanımı 420 MPa olan perde duvarları eklenmektedir. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu için güçlendirme çalışması olarak kısa doğrultuda 3 adet, uzun doğrultuda 1 adet perde duvar eklenmiştir. Beton basınç dayanımı 30 MPa, donatı akma dayanımı 420 MPa olarak belirlenmiştir. Her iki okul binasından hem güçlendirme öncesi hem de güçlendirme sonrasında ortam titreşim etkisindeki tepki kayıtları alınmıştır. Alınan titreşim tepki kayıtlarının analizi ile binaların dinamik parametreleri belirlenmekte ve karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Güçlendirme öncesi ve güçlendirme sonrasında aynı noktalara sensörler yerleştirilerek ortam titreşim etkisi altında binaların tepki kayıtları toplanmıştır. Bu kayıtların analizleri ile güçlendirme çalışmalarının yapının dinamik özelliklerini nasıl değiştirdiği incelenmiştir. Ayrıca yapılan deneysel araştırmayı karşılaştırmak amacıyla yapı analiz programı kullanılarak binaların bir modeli oluşturulmaktadır. Hem teorik hem de deneysel olarak elde edilen değerler kıyaslanmaktadır.

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

Sayfa Adedi : 53

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Selçuk KAÇIN

CALCULATION OF SOME DYNAMIC PARAMETERS OF SCHOOL BUILDINGS  
BEFORE AND AFTER REINFORCEMENT WITH ENVIRONMENTAL VIBRATION  
RECORDS

(M. Sc. Thesis)

Cemil Velat ÇAĞLAR

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

August 2022

ABSTRACT

The behavior of structures under the influence of dynamic loads (earthquake, wind, traffic load, etc.) and the dynamic properties of the structure are determined by Structural Health Monitoring (SHM) systems. Dynamic properties of the structure such as natural frequency, mode shape and damping ratio can be obtained by using theoretical and experimental methods. In order to prevent the structures from being damaged under the influence of these dynamic loads, various precautions must be taken. Taking appropriate measures depends on a good knowledge of the dynamic behavior of existing structures. In this thesis, two school buildings in Dörtyol and Iskenderun districts of Hatay province, which were decided to be retrofitted, are discussed with the SHM method. As strengthening work for Dörtyol Anatolian High School, 12 (short direction 4 long direction 8) shear walls with concrete compressive strength of 30 MPa and strengthening yield strength of 420 MPa are added along the height of the building as a strengthening work. For the Iskenderun Chamber of Commerce and Industry Primary School, 3 shear walls in the short direction and 1 in the long direction were added as strengthening work. Concrete compressive strength was determined as 30 MPa and yield strength of strengthening was determined as 420 MPa. Both pre- and post- strengthening vibration tests are conducted for both school buildings. As a result of the experiments, the dynamic parameters of the buildings are determined and it is aimed to compare them. In order to determine the current situation before retrofitting, the vibration records of the buildings under the influence of ambient vibration are determined and transferred to the computer environment. The same experiments are carried out for post-reinforcement. The period values of the buildings are compared through the values obtained as a result of the analyzes made. Then, the change of dynamic parameters of the buildings after retrofitting is examined. In addition, a model of the buildings is created using the building analysis program in order to compare the experimental research. Both theoretical and experimental values are compared.

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

Page Number : 53

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. 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.

Yüksek lisans tezi boyunca iyi niyetlerini ve yardımlarını esirgemeyen Ar. Gör. Halil Çağrı YILMAZ'a ve Lisansüstü Eğitim Enstitüsü çalışanlarına teşekkür ederim.

Aileme eğitimin her aşamasında gösterdikleri ilgi ve destek için teşekkür ederim.

Anneme öğrencilik süreci boyunca verdiği destekler için teşekkür ederim.

Ve babama, hayatımın her aşamasında bulunduğum koşullar fark etmeksizin hep arkamda olduğunu hissettirdiği için minnettarım. Teşekkürler baba.

## 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. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. MATERYAL ve YÖNTEM .....	13
3.1. Teorik Modal Analiz.....	14
3.1.1. Tek serbestlik dereceli sistemler .....	14
3.1.2. Çok serbestlik dereceli sistemler.....	17
3.2. Deneysel Modal Analiz .....	19
3.2.1. Geleneksel deneysel modal analiz .....	20
3.2.2. Operasyonel modal analiz.....	21
3.3. İncelenen Yapılar Hakkında Bilgiler .....	26
3.3.1. Dörtüyl Anadolu lisesi .....	26
3.3.2. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu .....	28
3.4. Ortam Titreşimleri Altında Yapı Tepki Kayıtlarının Alınması.....	31
3.4.1. Dörtüyl Anadolu Lisesi için bina tepki kayıtlarının alınması .....	31
3.4.2. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu için bina tepki kayıtlarının alınması.....	33
3.5. Yapısal Analiz Programları ile Yapıların Modellemesi ve Analizi .....	34



	<b>Sayfa</b>
3.6. Deneysel Yöntemler ile Alınan Verilerin Analizi.....	37
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....</b>	<b>39</b>
4.1. Deneysel ve Teorik Çalışma Analiz Sonuçları .....	39
4.1.1. Dört Yol Anadolu Lisesi analiz sonuçları.....	39
4.1.2. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu analiz sonuçları.....	42
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>45</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>48</b>
<b>DİZİN.....</b>	<b>52</b>

**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4.1. Dört Yol Anadolu Lisesi güçlendirme öncesi MATLAB analiz sonuçları..	39
Çizelge 4.2. Dört Yol Anadolu Lisesi güçlendirme sonrası MATLAB analiz sonuçları .	40
Çizelge 4.3. Dört Yol Anadolu Lisesi güçlendirme öncesi SAP2000 analiz sonuçları ...	40
Çizelge 4.4. Dört Yol Anadolu Lisesi güçlendirme sonrası SAP2000 analiz sonuçları...	41
Çizelge 4.5. Güçlendirme öncesi ve sonrası MATLAB ve SAP2000 programı analiz sonuçları .....	41
Çizelge 4.6. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu güçlendirme öncesi MATLAB analiz sonuçları.....	42
Çizelge 4.7. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu güçlendirme sonrası MATLAB analiz sonuçları.....	43
Çizelge 4.8. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu güçlendirme öncesi ETABS analiz sonuçları .....	44
Çizelge 4.9. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu güçlendirme sonrası ETABS analiz sonuçları.....	44
Çizelge 4.10. Güçlendirme öncesi ve sonrası MATLAB ve ETABS programı analiz sonuçları .....	44

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 1.1 YSİ sisteminin çalışma şeması .....	2
Şekil 3.1. Sensörler ve veri toplama ünitesi.....	13
Şekil 3.2. Verilerin bilgisayar yardımıyla kayıt edilmesi ve yazılım arayüzü.....	14
Şekil 3.3. (a) TSDS kütle-yay modeli, (b) serbest cisim diyagramı .....	15
Şekil 3.4. ÇSDS kütle-yay modeli .....	18
Şekil 3.5. a) sarsma tablası b) darbe çekici c) yapay titreşim üretici.....	20
Şekil 3.6. İvmeölçer sensör örnekleri .....	21
Şekil 3.7. Sönüm oranı hesaplaması için bir örnek.....	26
Şekil 3.8. Dört yol Anadolu Lisesi okul binası görünüşü.....	27
Şekil 3.9. Dört yol Anadolu Lisesi güçlendirme öncesi (a) ve sonrası (b) kat planı .....	27
Şekil 3.10. Dört yol Anadolu Lisesi perde duvar uygulaması aşamaları .....	28
Şekil 3.11. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu okul binası görünüşü .....	29
Şekil 3.12. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu güçlendirme öncesi (a) ve sonrası (b) kat planı.....	30
Şekil 3.13. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu perde duvar uygulaması aşamaları .....	31
Şekil 3.14. Dört yol Anadolu Lisesi ilk ve ikinci aşama ivmeölçer sensör yerleşimi .....	32
Şekil 3.15. Dört yol Anadolu Lisesi titreşim kayıtlarının alınması .....	32
Şekil 3.16. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu ivmeölçer sensör yerleşimi...	33
Şekil 3.17. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu titreşim kayıtlarının alınması .....	34
Şekil 3.18. Duvarı temsil eden eşdeğer diyagonal basınç çubuğu.....	35
Şekil 3.19. Dört yol Anadolu Lisesi güçlendirme öncesi ve sonrası SAP2000 modeli.....	36
Şekil 3.20. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu ETABS modeli.....	36

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.21. MATLAB analiz sonrası oluşan bütün modların görünümü .....	38
Şekil 3.22. MATLAB analiz sonrası oluşan modların sadeleştirilmiş hali.....	38
Şekil 4.1. Dörtyol Anadolu Lisesi güçlendirme öncesi MATLAB stabilizasyon diyagramı ve kritik sönüm oranı-doğal salınım frekansı grafiği.....	39
Şekil 4.2. Dörtyol Anadolu Lisesi güçlendirme sonrası MATLAB stabilizasyon diyagramı ve kritik sönüm oranı-doğal salınım frekansı grafiği.....	40
Şekil 4.3. Dörtyol Anadolu Lisesi güçlendirme öncesi SAP2000 programı modeli .....	40
Şekil 4.4. Dörtyol Anadolu Lisesi güçlendirme sonrası SAP2000 programı modeli .....	41
Şekil 4.5. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu güçlendirme öncesi MATLAB stabilizasyon diyagramı ve kritik sönüm oranı-doğal salınım frekansı grafiği .....	42
Şekil 4.6. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu güçlendirme sonrası MATLAB stabilizasyon diyagramı ve kritik sönüm oranı-doğal salınım frekansı grafiği .....	43
Şekil 4.7. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu ETABS programı modeli .....	43

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

### Simgeler

**Cm**

Santimetre

**Dk**

Dakika

**Hz**

Hertz

**Mm**

Milimetre

**MPa**

Megapaskal

**Sn**

Saniye

### Kısaltmalar

**AMD**

Ampirik Mod Ayrıştırma

**BFA**

Basit Frekans Alanı

**ÇMİA**

Çok Mod İtme Analizi

**ÇSDS**

Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

**DMA**

Deneysel Modal Analiz

**DUT**

Doğal Uyarım Tekniği

**EDİA**

Eşdeğer Deprem İtme Analizi

**EHY**

Eşdeğer Hasar Yüğü

**FEMA**

Federal Emergency Management Agency

**FCF**

Frekans Cevap Fonksiyonu

**FTA**

Frekans Tanım Alanı

**FTAA**

Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma

**GDMA**

Geleneksel Deneysel Modal Analiz

**GFTAA**

Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma

**HT**

Hasar Tanımlama

**KMGÖ**

Koordinat Modal Güvence Ölçütü

**MGK**

Modal Güvence Kriteri

**OMA**

Operasyonel Modal Analiz

**OMO**

Otoregresif Hareketli Ortalamalar

**ÖRA**

Özsystem Realizasyonu Algoritması

**Kısaltmalar****SAB****TMİA****TSDS****TMA****TMGK****TS****TBDY****VOHO****YSİ****ZTA****Açıklamalar**

Stokastik Altalan Belirleme

Tek Mod İtme Analizi

Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

Teorik Modal Analiz

Ters Modal Güvence Kriteri

Türk Standartları

Türkiye Bina Depren Yönetmeliği

Vektör Otoresif Hareketli Ortalamalar

Yapı Sağlığı İzleme

Zaman Tanım Alanı

## 1. GİRİŞ

Türkiye coğrafi konumundan dolayı deprem bölgesinde yer almaktadır. Ülkemizdeki yapılar sürekli olarak küçük veya büyük ölçekli deprem kuvvetleri etkisi altında kalmaktadır. Bu durum mevcut yapılarda meydana gelen hasar seviyeleri değişkenlik göstermekte ve bu değişim yapıların hangi hasar seviyesine ve performans düzeyine geçtiği bilinmemektedir. Bu yüzden meydana gelebilecek büyük bir depremin yıkıcı etkisinin beklenenden daha kötü olacağı tahmin edilmektedir.

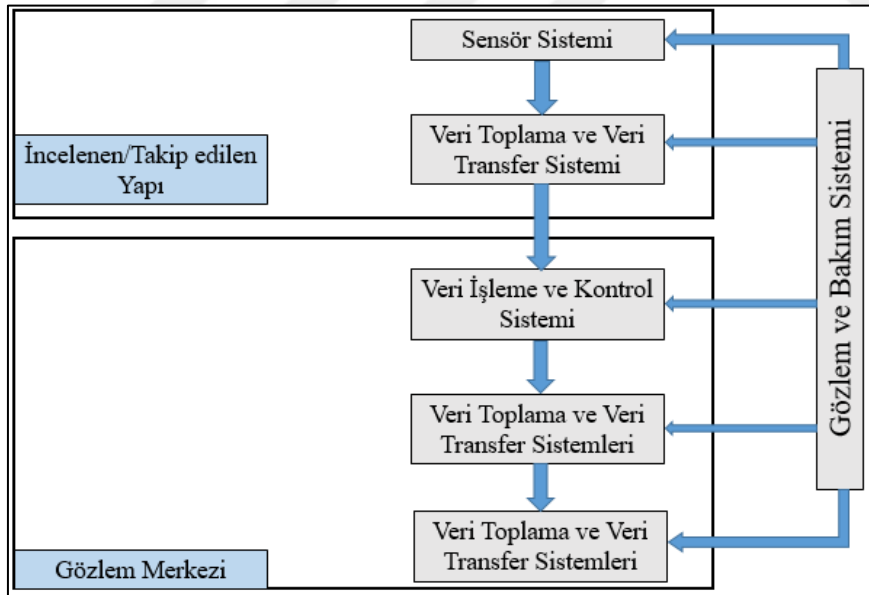
Ülkemizde bulunan yapılarda hasar düzeyinin değişkenlik göstermesi sadece deprem kuvvetleri etkisi altında değil aynı zamanda rüzgar kuvveti, yapıların etrafında inşa edilen tünel ve metro çalışmaları, yapılan derin kazılar ve zamanla yapıların yorulması gibi faktörlere göre değişmektedir. Bu sebeple mevcut yapıların kullanım ömrü boyunca hasar durum değerlendirmesi önem arz etmektedir. Yapıların dinamik yükler etkisindeki davranışlarını etkileyen parametrelerdeki belirsizlikler, yapıların dinamik davranışlarının gerçekçi bir şekilde belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Yapılara ait dinamik parametreler (mod şekli, doğal frekans, sönüm oranı gibi) yapının özelliklerini açıklayacak şekilde deneysel uygulamalar ile gerçekçi bir şekilde belirlenmesi, yapının dinamik hareketliliğini daha gerçekçi bir şekilde elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Yapıların dinamik parametreleri, analizlerde kullanılan analitik modellerin gerçekçiliğini ve yapıya etki eden deprem kuvvetinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Yapılarda titreşimler sonucu meydana gelen tepkilerin ölçülmesi ve ölçülen verilerden yapının dinamik karakteristikleri belirlenmesi için kullanılan metotlar deneysel modal analiz olarak adlandırılmaktadır. Bu metotlarda, yapılara titreşim kuvveti uygulanmakta ya da çevresel titreşimler dikkate alınarak ölçümler yapılmaktadır. Yapıların dinamik karakteristiklerin teorik ve deneysel modal analiz metotları kullanılarak belirlenmesi mümkündür.

Teorik modal analiz (TMA) yöntemleri ile yapıların dinamik karakteristikleri, numerik yaklaşımlar kullanılarak oluşturulan modeller veya yaklaşık yöntemler kullanılarak belirlenmektedir. Numerik yaklaşım çözümlerinde genel olarak sonlu elemanlar metodu tercih edilmektedir. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak oluşturulan analitik modellerde birçok kabul yapılarak elde edilmektedir. Yapılan kabullerden dolayı teorik modal analiz

yöntemi sonucu elde edilen değerler yapının gerçek dinamik davranış değerini vermemekte ancak yaklaşık sonuçlar elde edilmektedir.

Deneysel Modal Analiz (DMA) yöntemi ile yapıların titreşim etkisindeki tepkilerinin ölçülmesi ve bu ölçülen verilerden yapının dinamik karakteristikleri belirlenmektedir. DMA, TMA'daki gibi kabuller yapılmadan ölçümler direk yapıdan alındığından elde edilen dinamik karakteristikler daha güvenilir olarak kabul edilmektedir. Diğer yandan DMA ile teorik çalışmaların da doğruluğu sağlanabilmektedir. Mevcut yapıların matematiksel modelleri her zaman oluşturulmadığı için bu yapıların dinamik parametrelerini elde etmede DMA yöntemleri daha çok tercih edilmektedir. DMA yöntemi uygulanırken kullanılan araçlar (ivmeölçer sensör, hızölçer sensör vb.) teknolojiye gelişmeler ve erişim kolaylığından dolayı Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) sistemleri olarak yeni bir mühendislik disiplini oluşturmaktadır. YSİ mühendisliği; yapılara yerleştirilen sensörler yardımı ile düzenli veya aralıklı olarak alınan verilerin takip edilmesi, yapıdaki hasarların tespiti ve alınabilecek önlemler konusunda yardımcı olması gibi konuları ele alan mühendislik alanıdır. YSİ sisteminin çalışma şeması Şekil 1.1'de verilmektedir (Yılmaz, 2021).



Şekil 1.1 YSİ sisteminin çalışma şeması

Yapı güçlendirme, hasarlı veya onarılması gereken yapıların günümüzün koşullarında gerekli teknikler kullanılarak onarılması işlemidir. Güçlendirmenin amacı, yapıyı deprem ve her türlü dış etkene karşı yapıya ve içinde bulunan insanlara/malzemelere zarar verebilecek anlık hasara karşı daha dayanıklı hale getirmektir. Yapı güçlendirme teknikleri uygulanacak



yapıya göre şekillenmektedir. Bina güçlendirme teknikleri kullanılacak olan malzemeye göre değişkenlik göstermektedir. Bu malzemeler beton, çelik ve karbon fiberdir. Kullanılacak olan malzemeler güçlendirmenin uygulanacağı yapıya göre tespit edilmektedir. Beton dayanımı düşük olan, donatılarında ileri düzeyde paslanma bulunan veya taşıyıcı elemanlarında hasar meydana gelen yapılarda güçlendirme işlemi yapılarak dayanıklı hale getirilmektedir. Güçlendirme yöntemi belirlenirken yapının mevcut risk durumunun belirlenmesi gerekmektedir. Yapılan testler sonucunda uygulanması gereken güçlendirme yöntemine karar verilmektedir.

Bu tezde Hatay ili sınırlarında yer alan iki adet okul binasında uygulanan güçlendirme faaliyetlerinin yapıların dinamik parametrelerini nasıl değiştirdiği incelenmeye çalışılacaktır. Bu okullardan bir tanesi Dörtüol Anadolu Lisesi'nde yapılan güçlendirme çalışmasında bina yüksekliği boyunca kısa doğrultuda 4 adet uzun doğrultuda 8 adet perde duvar eklenmesi yapılmıştır. Bu perdelerde kullanılan betonun basınç dayanımı 30 MPa, donatının akma dayanımı ise 420 MPa olarak belirlenmiştir. Diğer okul binası İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu için güçlendirme çalışması olarak bina yüksekliği boyunca kısa doğrultuda 3 adet, uzun doğrultuda 1 adet perde duvar eklenmesi yapılmıştır. Beton basınç dayanımı 30 MPa, donatı akma dayanımı ise 420 MPa olarak belirlenmiştir. Okul binalarında perde duvar uygulaması yapılırken ilk aşama olarak kolon ve kirişler arasındaki dolgu duvar malzemeleri yıkılarak temizlenmiştir. Dolgu duvarlar yıkılırken sağlam bölgelerin darbelerden zarar görmemesine dikkat edilmiştir. Dökülecek olan yeni betonun eski beton ile aderansının sağlanması için gerekli işlemler yapılmıştır. Daha sonra kolon ve kiriş donatı filizlerin çakılacağı yerler belirlenmiştir. Belirlenen yerlere perde donatıları eklenmiştir. Donatılar yerleştirildikten sonra kalıp montajı yapılmıştır. Son olarak gerekli mukavemete sahip beton dökülerek işlem tamamlanmıştır.

Bu tez çalışmasında YSİ sistemleri kullanılarak Hatay iline bağlı Dörtüol ve İskenderun ilçelerinde bulunan iki okul binasının güçlendirme öncesi ve güçlendirme sonrası çevresel titreşim etkisi altında bina tepkileri kayıt altına alınmış ve analiz edilerek binanın dinamik karakteristikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Tezin giriş bölümünde genel bilgiler verilmiş ve tezin amacından bahsedilmiştir. Önceki çalışmalar kısmında konu ile alakalı literatürde yer alan araştırmalara yer verilmiştir. Materyal ve metot kısmında analizi yapılan okul binası, kullanılan teorik ve deneysel yöntemler ve çalışmada kullanılan materyaller hakkında bilgiler verilmiştir. Araştırma ve bulgular kısmında yapılan analizlerden bahsedilmiş ve elde

edilen sonuçlar yer almaktadır. Sonuç kısmında ise tezden genel olarak bahsedilmiş, elde edilen sonuçların genel değerlendirmesi yapılmış ve konu ile ilgili önerilerde bulunulmuştur.



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) ile yapıların mevcut durumunun tespit edilerek yapısal davranış özelliklerinin belirlenmesi ve aralıklı veya sürekli olarak izlemeye alınarak zaman içindeki davranışları incelenmektedir. Yapıların yaşlanması veya çeşitli nedenler ile yapıda oluşacak görünen/görünmeyen etkilerin önceden algılanarak erken uyarı üretilmesi amaçlanmaktadır. Bu bağlamda birçok farklı yapı üzerinde başarılı YSİ uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Geçmişten günümüze kadar birçok tarihi yapılarda, köprülerde, barajlarda, tünellerde, orta veya yüksek katlı binalarda vb. yapılarda araştırmacılar tarafından YSİ uygulamaları yapılmıştır.

Bayraktar, Türker ve Altunışık (2015) yaptıkları çalışmada, yığma kemer köprülerinin sönüm ve frekans oranlarının deneysel olarak belirlenmesini amaçlamışlardır. Analiz için farklı yıllara ait ve farklı açıklıkları olan sekiz adet tarihi taş kemer köprü belirlenmiştir. Kullanılacak köprüler için seçilen malzemeler taş ve Horasan harcıdır. Ortam titreşim testlerinde kablolu hassas sismik ivmeölçerler kullanılmıştır. Köprülerin dinamik parametreleri, Gelişmiş Frekans Alanı Ayırıştırma (GFAA) ve Stokastik Altuzay Tanımlama (SAT) Teknikleri kullanılarak elde edilmiştir. Çalışmanın sonunda tarihi yığma taş kemer köprüleri için birinci frekans, sönüm oranı değeri ve mod şekilleri için bir formül önerilmiştir.

Osmancıklı, Bayraktar, Türker, Uçak ve Mosallam (2015) yaptıkları çalışmada, prekast yapıların sonlu eleman model kalibrasyonu için ortam titreşim test sonuçlarını dikkate alarak incelemişlerdir. Çalışmada iki prekast yapı, bir üst geçit ve bir prekast üretim tesisi seçilmiştir. Analizde kullanılan yapıların sonlu eleman modelleri SAP2000 programı kullanılarak geliştirilmiş ve başlangıç dinamik karakteristik özellikleri belirlenmiştir. Analizler rüzgar ve trafik yükleri gibi ortam titreşimleri altında operasyonel model analizi yöntemi kullanılarak yapılmış ve dinamik özellikler deneysel olarak belirlenmiştir. Ortam titreşim testleri sırasında prekast yapıların farklı noktalarında yapısal tepkiler ölçülmüştür. Ön test araştırmaları ile ölçüm süresi, frekans aralığı ve etkin mod sayısı belirlenmiştir. Mod parametreleri, Gelişmiş Frekans Alanı Ayırıştırma ve Stokastik Altuzay Tanımlama teknikleri ile toplanan sinyallerden elde edilmiştir. Sonuç olarak, analitik ve deneysel dinamik karakteristikler birbirleri ile karşılaştırılmış ve bu yapıların başlangıç sonlu eleman modelleri, bağlantı noktalarının rijitlik katsayıları değiştirilerek güncellenmiştir.

Özçelik, Yormaz, Amaddeo, Girgin ve Kahraman (2019) yaptıkları çalışmada, ortam titreşim test verilerini kullanarak üç ayrı sıcaklık değerine bağlı olarak çelik bir demiryolu köprüsü için modal parametre tahminini yapmışlardır. Köprü, 19. yüzyılın sonunda inşa edilmiştir. Toplam altı açıklıktan oluşan ve her bir açıklığı 30 m olan bu köprü, yatay düzlemde hafif bir eğime sahiptir. Yarıçapı 300 m ve dikey eğimi ise %2.5'tir. Analiz için iki farklı salt çıktı sistem tanımlama yöntemleri kullanılmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarını üç ayrı sıcaklık için karşılaştırmışlardır. Analiz sonucunda elde edilen parametreleri eşleştirmek için deneme yanılma tabanlı bir model çalışması yapmışlardır.

Beyen (2017) yaptığı çalışmada, titreşim ölçümlerine uygulanan yapı tanımlama analiz yöntemlerini kullanarak yapısal hasarın sayısal değer olarak elde edilmesini hedeflemiştir. Analiz, MAC (Modal güvence Kriteri), COMAC (Koordinat Modal Güvence Ölçütü) ve IMAC (Ters Modal Güvence Kriteri) ölçütlerine bağlı olarak yapılmıştır. Hasar görülebilirlik, EDİA (eşdeğer deprem itme analizi), TMİA (tek mod itme analizi), ÇMİA (çok mod itme analizi) ve TMAA (zaman tanım alanında analiz) metotları kullanılarak şiddetli deprem için gözlemlenmiştir. TMİA'da yapının tamamında iyi sonuçlar verirken TMAA'da ise yapının zemin katına ait sonuçlar, EDİA ve ÇMİA yöntemlerine ait sonuçlar aynı kalmıştır. Ayrıca 1. normal kat kolonlarında ÇMİA ve TMAA sonuçları hasar rölövesiyle uygun halde olduğu görülmüştür. Uygulanan yöntemlerden TMİA ve EDİA'ya ait sonuçlar, yönetmelikte bulunan hedef deplasman değerine yakın yüklenerek hasar rölövesi tekrar üretilebilmiştir. Sonuç olarak yapının tasarlanmış ve bitmiş hali arasındaki farkları görmek için yapı iskânı verilmeden önce yapıya ait durum tespit projesi hazırlanması gerektiğini önermiştir.

Tuhta (2018) yaptığı çalışmada, ortam titreşimlerini kullanarak modal titreşimde sistem parametre matrisinin iyileştirilmesi ve düzeltilmesi için yeni bir yaklaşım üzerinde durmuştur. İlk olarak, yaklaşık sistem karakteristik matrislerini belirlemek için tepki bağıntı matrisinden elde edilen blok Hankel matrisinin tekil değer ayrışını kullanarak yapmıştır. İkinci olarak, sistem karakteristik matrislerini optimal hale getirmek için kara kutu modelleme yaklaşımı ile Kalman teorisini kullanarak sistemin girdi-çıkı ilişkisini oluşturmuştur. Yapılan modelde hatayı minimize etmek için iterasyonların tekrarını yapmıştır. Analizler sonucu belirlenen sistem karakteristik matrislerinden sistem modal parametrelerini elde etmiştir. Bu sistem, modal parametrelerin doğrudan ve iteratif yöntemlerle uygulandığı sistemin modal güncellemesi için kullanılır. Bu algorithmada kullanılan kod, sonlu elemanların kodları ile görselleştirilebilir.

Türker ve Yanık (2020) yaptıkları çalışmada, İlyasbey Camisi için çevresel titreşim testi ve üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturmuşlardır. Modelde yapıya ait sabit yük, rüzgâr yükü ve deprem yükü etkileri altında yapı analiz edilmiştir. Modelin dinamik ölçümleri çevresel titreşim testi yöntemiyle yapılmış sayısal analizler ise sonlu eleman yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Yapıya ait başlangıç sonlu eleman modeli, yapıya uygulanan çevresel titreşim testi sonuçlarına göre düzenlenmiş ve buna bağlı olarak hem statik hem de deprem yükleri etkisindeki analizleri incelenmiştir. Bu camii için seçilen yükler altında minarede oluşan yer değiştirmeler ile çekme, basınç ve kayma gerilmelerinin dağılımları elde edilmiştir.

Özçelik, Girgin ve Amaddeo (2018) yaptıkları çalışmada, Uşak il sınırında bulunan Basmane-Dumlupınar hattının 199. kilometresi üzerindeki çelik demiryolu köprüsü için yerinde deneylerle modal parametre tahmin çalışmaları ve geliştirilmiş bir referans sayısal model üzerinde durmuşlardır. Köprünün dinamik tepkisini, dört farklı test düzeneğinde, iki farklı sıcaklık durumunda ve ortam titreşim koşulları altında ölçmüşlerdir. Köprünün modal parametrelerini, sadece çıktı tabanlı olan İyileştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma ve Veri Tabanlı Stokastik Altalan Tanımlama yöntemlerini kullanarak tahmin etmeye çalışmışlardır. Sıcaklık değişimi etkilerinin değerlendirilmesinde farklı sıcaklık koşulları altında elde edilen tanımlama sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Matlab tabanlı FEDEASLab yazılımı kullanılarak köprünün üç boyutlu sonlu eleman modelini elde etmiş ve deneme yanılma yöntemi ile ölçümlemesini gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak mevcut durumu temsil eden köprünün referans sayısal modelini elde etmişlerdir. Bu model, hassasiyete dayalı sonlu elemanlar modelleme güncelleme yöntemi kullanılarak gelecekte hasar tespiti amacıyla kullanılabilir.

Güneş ve Anıl (2017) yaptıkları çalışmada, yığma bir yapının dinamik karakteristiklerini teorik analiz ve deneysel metotlar ile belirlemeye çalışmışlardır. Yapıya ait dinamik karakteristik değerleri için sonlu elemanlar yöntemi, deneysel çalışmalarda ise operasyonel modal analiz yöntemini kullanmışlardır. Çevresel etkilerin yapıda oluşturduğu titreşimleri kaydetmek için yapıya ivmeölçer sensörler yerleştirmiş ve alınan kayıtları bilgisayar ortamına aktarmışlardır. Ölçülen sinyaller, frekans ve zaman ortamında analiz edilerek yapıya ait dinamik parametreleri (doğal frekans, mod şekilleri ve sönüm oranı) elde etmişlerdir. Analiz için FTA'ya ait yöntemlerden GFTAA ve ZTA'ya ait yöntemlerden SAB yöntemini kullanmışlardır. Teorik çalışma için yapının başlangıç sonlu eleman modeli

SAP2000 programı kullanılarak oluşturulup, dinamik analizi yapılmıştır. Teorik analiz sonucu elde edilen değerler deneysel çalışma sonucu bulunan değerler ile kıyaslanmıştır. Deneysel ve teorik çalışmalarla elde edilen değerler arasında farklılıklar olduğunu tespit etmişlerdir. Buna bağlı olarak deneysel sonuçlar dikkate alınarak yapının başlangıç sonlu eleman modelinde gerekli düzeltmeler yapılmıştır.

Aras ve Karapınar (2021) yaptıkları çalışmada, çelik bir yapının inşaat sırasında ve sonrasında dinamik davranışlarını araştırmak için operasyonel modal analiz yöntemi kullanılmıştır. İnşaatın tamamlanmasıyla birlikte, sıcaklık ve hizmet yüklerine göre yapının modal özelliklerindeki değişiklikleri gözlemek için farklı zamanlarda dinamik testler uygulamışlardır. Daha sonra yapının analitik modelini elde etmiş ve yapının dinamik özelliklerini belirlemişlerdir. Deneysel olarak elde edilen dinamik özellikler ile sayısal analizden elde edilen değerleri karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, inşaat aşamalarında bina davranışının oluşumu için döşeme inşa sürecinin önemine değinmişlerdir. Ayrıca çelik yapıların dinamik özellikleri üzerinde ortam sıcaklığı ve servis yükünün etkileri olduğunu gözlemlemişlerdir. Son olarak, deneysel ve sayısal olarak elde edilen dinamik özellikler arasındaki farklılıkların ana nedeninin sayısal modelde bölme duvarlarının modellenmemesi olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Bağbancı ve Bağbancı (2018) yaptıkları çalışmada, Bursa ilinde 19. yüzyıla ait iki katlı, ahşap çerçeveli altı tarihi yapı için, laboratuvar ve yerinde yapısal sağlık izleme testlerini kullanarak analiz yapmışlardır. Evlerin yapım teknikleri aynı olmakla birlikte, ahşap karkasların içlerinde farklı yığma dolgu (taş, kerpiç ve tuğla) malzemeleri kullanılmıştır. Bu yapılarda bağlayıcı malzeme olarak çamur ve kireç harçları kullanılmıştır. Çamur harcı taş ve kerpiç malzemelerle, kireç harcı tuğla malzeme ile kullanılmıştır. Analizi yapılan bu yapıların yoğunluk, özgül ağırlık, gözeneklilik, elastik modül, frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları gibi fiziksel, mekanik ve dinamik parametreleri gözlemlenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Farklı dolgu malzemelerinin kullanılmasının bu yapıların dinamik davranışlarını etkilediği gözlemlenmiştir.

Yetkin, Calayır ve Erkek (2018) yaptıkları çalışmada, Fırat Üniversitesi Mühendislik Yerleşke Camii minaresinin analitik ve deneysel analizlerini yapmışlardır. Minarenin dinamik parametreleri Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemini kullanarak belirlemiş ve bu minarenin analitik modelini güncellemişlerdir. Analitik model çözümü SAP2000

programı kullanılarak elde etmişlerdir. Analitik modelin ilk üç frekans değerlerini 2.30-8.77 Hz aralığında elde etmişlerdir. Deneysel ölçümler için OROS-OR36 Çok Kanallı Gürültü ve Titreşim Analiz Cihazını kullanmışlardır. Bu ölçümlerde ilk üç frekans 2,15-9,56 Hz aralığında ve bu frekanslara ilişkin sönüm oranları %2,89-4,09 aralığında bulmuşlardır.

Hasan, Ahmad, Salman Leong ve Hee (2018) yaptıkları çalışmada, modal parametre tanımlaması, özellikle modal sönümleme oranına en iyi uygulama kriterlerini bulmak için bir literatür taraması yapmışlardır. Bu gözden geçirme, güvenilir bir tahmin için modal sönümleme hakkında ilgili temel bilgileri sağlamayı, belirsizlikleri azaltmayı ve hata sınırlarını tanımlamayı amaçlamaktadır.

Xiao (2016) yaptığı çalışmada, Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) sistemini kullanarak yapı davranışını belirlemeyi ve sağlık durumunu değerlendirmeyi amaçlamıştır. Bu bağlamda ilk olarak, iki açıklıklı bir kafes köprü ve bir beş açıklıklı çelik kirişli köprü için iki fiber optik YSİ sistemi kurmuştur. İkinci olarak, uzun bir çelik kirişli köprü için taşınabilir ivmeölçer sistemi kullanılarak ampirik mod ayrıştırma (EMD) yönteminin uygulaması incelenmiş ve köprü modal frekanslarını ve sönümünü kapsamlı bir şekilde kaydetmek için ivmeölçer sayısı gereksinimlerini tanımlamışlardır. Son olarak, statik ve dinamik ölçümleri kullanarak köprü modelini güncelleyebilen çok yönlü bir model güncelleme yöntemi geliştirmişlerdir. Sonuç olarak, optimal statik gerinim sensörü yerleşimi gözlemlenmiş ve model parametre tanımlaması ve hasar tespiti için yeni bir yöntem oluşturulmuştur.

Tarpø, Georgakis, Brandt ve Brincker (2021) yaptıkları çalışmada, Lüksemburg'daki Avrupa Adalet Mahkemesi'nin iki özdeş yüksek kulesinden birinin, birinci modun frekansına ayarlanmış sıvı sönümleyici ve bu ayarlanmış sıvı sönümleyicilerin etkinleştirilmesinden önce ve sonra dinamik özelliklerinin deneysel bir değerlendirmesi yapılmıştır. İki farklı tam ölçekli test yöntemi olan ortam titreşimlerini kullanan operasyonel mod analizi ve iki santrifüj kütle uyarıcısı kullanan harmonik zorlamalı titreşim testleri kullanılmıştır. Sönümlemeyi belirlemek için zorlanmış titreşimler devre dışı bırakılmış daha sonra hızlanma sinyallerinin serbest düşüşleri incelenmiştir. Ayarlı sıvı sönümleyicilerin etkinleştirilmesinden sonra sönümlemede açık ve net bir artış tespit edilmiştir.

Domaneschi, Casciati, Catbas, Cimellaro, Inaudi ve Marano (2020) yaptıkları çalışmada, servis içi tünellerin Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) sistemleri için günümüz teknolojilerinden

bazılarına genel bir gözlemlenme yapmışlardır. Ayrıca tüneller için bazı geleneksel izleme teknolojilerini kısaca gözden geçirmişlerdir. Alternatif çözümlerin belirlenmesi, trafik kesintilerinin sınırlandırılması veya önlenmesi amaçlanmıştır. Tipik olarak, geleneksel YSİ sistemleri, tünellerin sorunlu veya özel alanlarına kurulur, koşullar hakkında bilgi verir ve bakımın yönetilmesine yardımcı olur. Bununla birlikte, bu metodolojiler genellikle YSİ sistem kurulumu için trafiğin kesintiye uğramasını zorlama ve yalnızca seçilen bölümleri izleme dezavantajlarına sahiptir. Tünelin normal işletmede kalmasını ve tüm altyapı gelişiminin ardışık ve sürekli tarama aşamaları ile analiz edilmesini mümkün kılacak alternatif çözümlerin faydalı olacağını söylemişlerdir.

Günday (2018) yaptığı çalışmada, tek katlı bir betonarme yapının dinamik özelliklerini elde etmek için ortam titreşimleri kullanarak yapıyı test etmiştir. Bu yapının döşemeleri daha sonra CFRP kompozit kullanılarak güçlendirilmiş ve ardından ortam titreşimleriyle tekrar test edilmiştir. Ortam titreşimleri için EFDD, SSI gibi çeşitli operasyonel modal analiz (OMA) yöntemleri kullanılmıştır. CFRP kompozitinin etkileri hakkında daha fazla bilgi edinmek amacıyla ve dinamik davranışlarını değerlendirmek için her iki tipin operasyonel modal analizi yapılmıştır. Analizler sonucunda mod şekilleri, frekanslar ve sönüm oranları arasında makul bir korelasyon elde edilmiştir. CFRP kompozit uygulamasının bu binanın yapısal tepkileri üzerindeki etkilerini dinamik davranışlarını değiştirme açısından gösterilmiş ve belirlenmiştir. Mevcut ve yenilenen binaların frekansları arasında ortalama %18.844 fark tespit edilmiştir. Son olarak, güçlendirilmiş yapıların frekanslarını ve rijitliğini değerlendirmek için OMA yönteminin kullanılabileceği gösterilmiştir.

Baş, Apaydın, İlki ve Çatbaş (2018) yaptıkları çalışmada, Türkiye'deki uzun açıklıklı kablo destekli köprülerin yapı sağlığı izleme (YSİ) sistemlerini genel olarak incelemişlerdir. Köprülerin, İstanbul ulaşım ağlarındaki kritik işlevi nedeniyle, aşırı ve operasyonel yük durumlarında işleyişinin kesintiye uğramadan devam etmesi için yapı YSİ sistemleri en önemli ölçektir. Birinci ve İkinci Boğaz Köprüleri için YSİ sistemleri hâlihazırda mevcut ve kullanımda iken Yavuz Sultan Selim ve Osman Gazi Köprülerinde sadece ön YSİ sistemleri kurulmuştur. Köprülerin mevcut ve planlanan YSİ sistemlerinin genel tercihleri, izleme amaçları ve gereksinimlerine göre verilmiştir. YSİ sistemlerinden toplanan veriler de Birinci Boğaz Köprüsü'nün yapısal mod tanımlaması için bir örnek olarak sergilenmiştir. Mevcut YSİ sistemlerinden elde edilen deneyimlere dayanarak, yeni YSİ sisteminin etkin bir şekilde



tasarlanması ve mevcut olanların verimli bir şekilde güncellenmesi için gelecekteki çalışmalar ve planlamalar önerilmiştir.

Baraccani, Palermo, Gasparini ve Trombetti (2021) yaptıkları çalışmada, tarihi yağma yapıların uzun süreli statik izlenmesinden elde edilen büyük miktardaki verinin analizi ve yorumlanması için bir zaman tanımlı yaklaşımı üzerinde durmuşlardır. Kaydedilen sinyallerin iki ana bileşene ayrıştırılabileceğini varsaymışlardır. Bu iki bileşeni, esas olarak çevresel etkilerden kaynaklanan periyodik bir bileşen ve yapının koruma durumundaki potansiyel değişikliklerle ilgili periyodik olmayan bir bileşen olarak ele almışlardır. İki bileşenin analizi, istatistiksel değerlendirmeler aracılığıyla belirli tanımlayıcılar ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen yaklaşımı, İtalya Bologna şehrinin İki Kulesi'ne ait YSİ sisteminden gelen verileri analiz etmek için kullanmışlardır.

Yanık, Türker, Yıldırım ve Dede (2020) yaptıkları çalışmada, ortam titreşim testi verilerinden elde edilen dinamik özellikler kullanılarak yapı elemanlarının elastisite modülü Model Kalibrasyon Yöntemi ile belirlenmesi üzerine durmuşlardır. Kullanılan yöntem bir çelik yapı elemanına uygulanarak gözlemlenmiştir. İlk adım olarak, seçilen modele çevresel titreşim testi uygulanarak modele ait doğal frekanslar elde etmişlerdir. Deneysel ölçümleri elde etmeye yarayan sinyal toplama birimi olarak elektronik devreden meydana gelen bir ölçüm sistemi ve ivmeölçer yerleşimi tasarlanmıştır. Ölçüm sisteminden elde edilen değerler Matlab yazılımını kullanarak analizini yapmışlardır. SAP2000 yazılımını kullanarak teorik doğal frekans değerlerini sonlu elemanlar metodu ile bulmuşlardır. SAP2000 programında oluşturulan sonlu elemanlar modelinde elastisite modülü Matlab'ta oluşturulan yazılım ile değiştirilerek tekrarlanan analizler sonucunda deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki fark kalibre edilmeye çalışılmıştır.

Zahid Ong ve Khoo (2020) yaptıkları çalışmada, operasyonel modal analiz (OMA) teknikleri ve etki senkronize modal analiz (ISMA) yöntemlerinin, yıllar içindeki gelişimleri gözden geçirmiş, artıları ve eksileri tartışmışlardır. Yazarlara göre yapısal titreşim problemlerini daha iyi anlamak için bir yapının dinamik karakteristikleri belirlenmelidir. Modal analiz, doğal frekanslar, sönüm oranları ve mod şekilleri bir sistemin dinamik özelliklerini belirlemek için kullanılır. Modal analiz için kullanılan teknikler, deneysel modal analiz (DMA), operasyonel modal analiz (OMA) ve yeni bir gelişme olan etki senkronize modal

analiz (ISMA) olarak adlandırılan daha az bilinen bir tekniktir. DMA simüle edilmiş kontrollü ortamda gerçekleştirilir, OMA ve ISMA ise sistem çalışırken gerçekleştirilir.

Zhang, Yang, Xiong, Yang ve Yu (2019) yaptıkları çalışmada, Şanghay'da bulunan 250 m'lik bir binanın yapısal sağlık izleme tasarımı ve operasyonel modal analizi üzerine yapılan çalışmaları raporlamışlardır. Bina, çelik kompozit çerçeve-beton çekirdek boru sistemine sahip çelik-beton kompozit bir yapıdır. 21., 36. ve 38. katlarda bu yapıyı güçlendirmek için payanda makasları ve halka şeklindeki makaslar yerleştirilmiştir. Bu yapının yüksekliği fazla ve dikey yöndeki yanal rijitliği düzensiz olduğundan, yapısal durumu izlemek ve güvenliğini değerlendirmek için bir YSİ sistemi tasarlanmıştır. Sensörlerin yerleri, YSİ sisteminin en az miktarda sensör kullanılarak gerçekleştirilebilmesi için iyi düzenlenmiştir. Sistem bazında, modal parametreleri X ve Y yönlerinde araştırmak için tasarlanmış dört kurulum ile analizi gerçekleştirmek için bir ortam titreşim testi yapılmıştır. Operasyonel mod analizini gerçekleştirmek için Fast Bayesian FFT yöntemi kullanılmıştır. Fast Bayesian FFT yöntemiyle elde edilen modal parametreler gözlemlenmiş ve diğer yöntemlerle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, çalışmanın bu yüksek katlı binanın model güncellemesi, hasar tespiti ve YSİ sistemi için bir referans sağlaması düşünülmüştür.

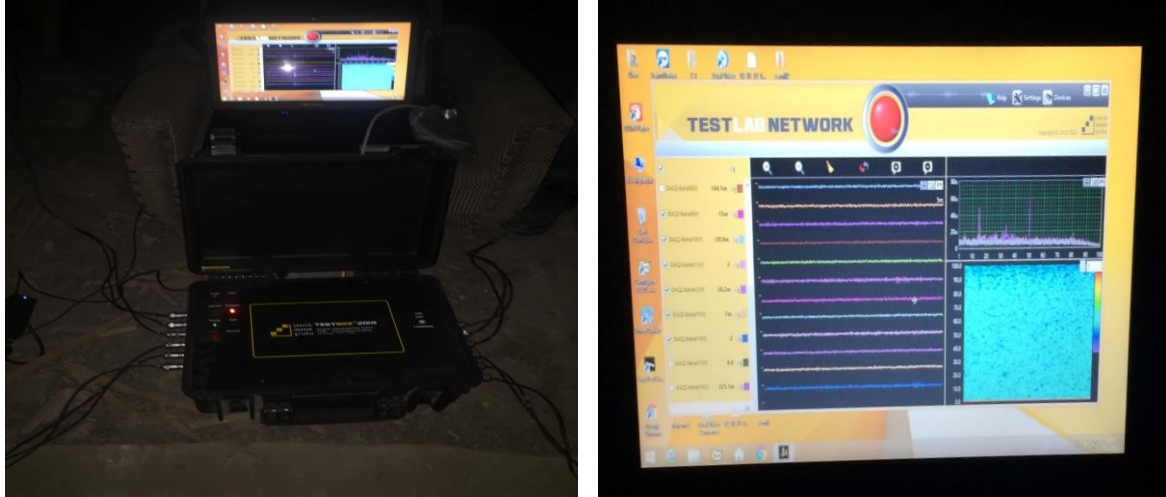
### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında; çevresel titreşim etkisinde yapıların tepki kayıtlarını ölçebilmek için İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü bünyesinde mevcut olan 3 eksenli ve tek eksenli kayıt yapma özelliğine sahip maksimum ivme ölçüm aralığı  $\pm 2$  g'den  $\pm 400$  g'ye, frekans aralığı 0-400 Hz olan düşük gürültülü yüksek hassasiyete sahip ivmeölçer sensörler kullanılmıştır. Sensörler Teknik Destek Grubu (TDG Türkiye) firması tarafından üretilen SENSEBOX 70\*3 ve SENSEBOX 7001 modelleridir. Bütün sensörler TESTBOX2010 saha tipi 24 bit 16 kanallı veri toplama ünitesi ile senkronize bir şekilde çalıştırılmaktadır. Şekil 3.1'de cihazlara ait görseller bulunmaktadır.



Şekil 3.1. Sensörler ve veri toplama ünitesi

Sensörler yardımı ile alınan kayıtlar bilgisayar ortamına aktarılarak saklanmaktadır. Kayıtlar alınırken TESTLAB Network yazılımı arayüzü kullanılarak titreşim verileri deney süresi boyunca takip edilebilmektedir. TESTLAB Network yazılımı arayüzü Şekil 3.2'de verilmektedir.



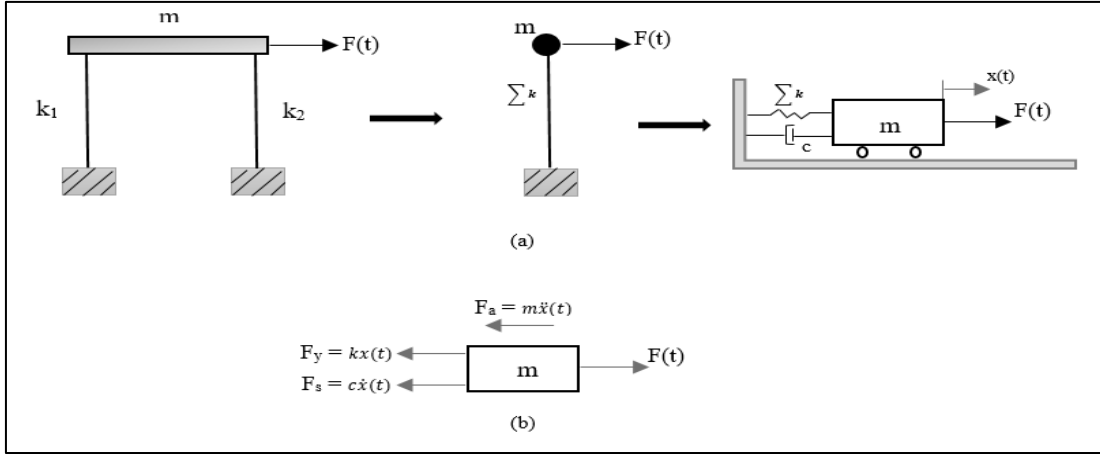
Şekil 3.2. Verilerin bilgisayar yardımıyla kayıt edilmesi ve yazılım arayüzü

### 3.1. Teorik Modal Analiz

Teorik modal analiz yöntemi, analizi yapılan yapı sistemini temsil eden ve matematiksel olarak pratik hesaplama yapacak analitik modeli oluşturarak analiz yapan bir yöntem türüdür. Oluşturulacak olan sistemin analitik modeli yapılırken iki modelleme türü göz önüne alınır (Güneş, 2017). Bunlar sonsuz serbestlik dereceli sürekli model ve sonlu sayıda serbestlik derecesine sahip ayırık-parametrelili modellerdir. Bu modellerdeki düğüm noktalarının uzay boşluğundaki hareket kabiliyetlerine serbestlik derecesi denilmektedir. Modellerdeki düğüm noktalarının uzay boşluğunda altı adet hareket kabiliyeti bulunmaktadır. Bunlardan üç tanesi doğrusal üç tanesi açısallı harekettir. Ayırık-parametrelili modeller ikiye ayrılmaktadır. Bunlar; tek serbestlik dereceli ve çok serbestlik dereceli sistemlerdir.

#### 3.1.1. Tek serbestlik dereceli sistemler

Kütlelerin ilk bulunduğu konuma göre rölatif deplasmanları belirlemek için ihtiyaç duyulan bağımsız yer değiştirme sayısı, dinamik analiz için serbestlik derecesi olarak adlandırılmaktadır. Buradan yola çıkarak bir serbestlik derecesine sahip sistemlere Tek Serbestlik Dereceli Sistemler (TSDS) denilebilir. TSDS’de kütlelerin tek bir noktada toplandığı matematiksel modelleme ile yapılabilmektedir. Yapılan modal analizleri basite indirgeyerek daha anlaşılabilir olması için bir kütle-yay modeli oluşturulmaktadır. Şekil 3.3’te basit bir kütle-yay modeli verilmektedir (Yılmaz, 2021).



Şekil 3.3. (a) TSDS kütle-yay modeli, (b) serbest cisim diyagramı

Şekil 3.3b'deki  $m$  kütleli yapı üzerinde dört adet kuvvet olduğu görülmektedir. Bu kuvvetler arasında denge denklemi yazılmaktadır. Elde edilen denklemler sırası ile Eş. 3.1 ve Eş. 3.2'dir. TSDS için genel hareket denklemi Eş. 3.2 olarak elde edilmektedir.

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

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

Eş. 3.2'de kullanılan parametreler;

$F(t)$ : cisim üzerine etki eden dış dinamik kuvvet,

$F_a$ : atalet kuvveti,

$F_s$ : sönüm kuvveti,

$F_y$ : yay kuvveti,

$m$ : yapının kütlesi,

$c$ : sönüm katsayısı,

$k$ : yay katsayısı,

$x(t)$ : kütlelin yaptığı deplasmanı,

$\dot{x}(t)$ : kütlelin hızı,

$\ddot{x}(t)$ : kütlelin sahip olduğu ivme,

Yer değiştirmelerin bulunması için Eş. 3.2 çözülerek  $x(t)$  belirlenir. Sistem üzerinde herhangi bir dış kuvvet olmaması durumunda yapıda meydana gelen titreşim, serbest titreşim olarak adlandırılmaktadır. Eş. 3.2'de  $F(t)=0$  olarak kabul edilirse Eş. 3.3 denklemi elde edilmiş olur.

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

Eş. 3.3 denklemi sönümlü serbest titreşim denklemi olarak ifade edilmektedir. Sönümlü sistemler ile sönümsüz sistemlerin ( $c=0$ ) genel denklemleri çözüldüğünde çoğu yapıda olduğu gibi sönüm oranı %20'nin altında kalıyor ise frekans ve periyot değerleri fazla değişkenlik göstermemektedir. (Chopra, 2006). Bu nedenle Eş. 3.3'teki dönüm katsayısı  $c=0$  olarak alındığında sönümsüz serbest titreşim denklemi elde edilmektedir. Elde edilen bu denklem Eş. 3.4'te verilmektedir.

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

Başlangıç şartlarının bilinmesi ( $t = 0$  da  $x(0)$ ) ve  $\dot{x}(t)=0$  olarak alınması durumunda diferansiyel denklem çözümü Eş. 3.5 kullanılarak yapılmaktadır.

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

Eş. 3.5 denkleminde  $x(t)$  ifadesinin ikinci türevi alınıp Eş. 3.4'te yerine yazılırsa,

$$x(t) = Ae^{\lambda t}, \dot{x}(t) = A\lambda e^{\lambda t}, \ddot{x}(t) = A\lambda^2 e^{\lambda t}$$

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

$A \neq 0$  ve  $e^{\lambda t} \neq 0$  olmalıdır,

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

$\lambda_{1,2} = \pm i\sqrt{\frac{k}{m}}$  çözümü elde edilir.

$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$  tanımlaması yapılarak çözüme devam edildiğinde Eş. 3.6 ve Eş. 3.7 denklemleri elde edilmektedir.

$$x_1(t) = A_1 e^{\lambda_1 t} = A_1 e^{i w_n t} \quad (3.6)$$

$$x_2(t) = A_2 e^{\lambda_2 t} = A_2 e^{-i w_n t} \quad (3.7)$$

Burada  $A_1, A_2$  rastgele katsayıları  $w_n$  sönümsüz doğal açısal frekansı temsil etmektedir. Yapının deplasmanı elde edilen  $x_1(t)$  ve  $x_2(t)$  denklemlerinin toplamına eşittir. Buna göre eşitlik yazıldığında Eş. 3.8 elde edilir.

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) = A_1 e^{i\omega_n t} + A_2 e^{-i\omega_n t} \quad (3.8)$$

Eş. 3.8'de Euler formülasyonu uygulaması yapılarak denklemin düzenlenmesi durumunda yapının yer değiştirme denklemi elde edilir. Elde edilen bu denklem Eş. 3.9'da verilmektedir.

$$x(t) = (A_1 + A_2) \cos(\omega_n t) + i(A_1 - A_2) \sin(\omega_n t) \quad (3.9)$$

Eş. 3.9 denkleminde görüldüğü üzere  $\cos(\omega_n t)$  ve  $\sin(\omega_n t)$  harmonik kuvvetler olup serbest titreşim hareketi de temelde harmonik titreşim hareketidir. Denkleminde bulunan  $A_1$  ve  $A_2$  rastgele katsayıları basite indirgemek için aşağıdaki tanımlamalar kullanılmaktadır.

$$B = A_1 + A_2$$

$$C = i(A_1 - A_2)$$

Yeni tanımlamalar Eş. 3.9'da yerine yazılarak Eş. 3.10 denklemi elde edilir.

$$x(t) = B \cos(\omega_n t) + C \sin(\omega_n t) \quad (3.10)$$

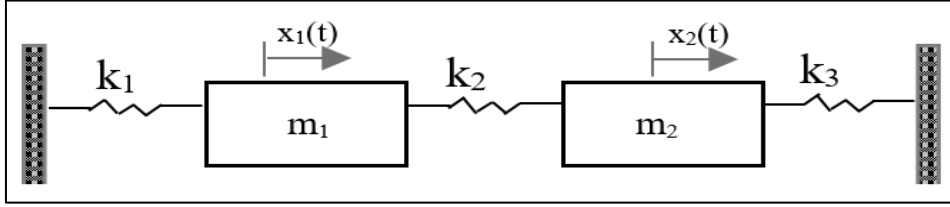
Eş. 3.10 denklemi üzerinde başlangıç şartı koşulları ( $t = 0$  da  $x(0) = x_0$  ve  $t = 0$  da  $\dot{x}(0) = \dot{x}_0$ ) ile tekrar düzenlenirse Eş. 3.11 denklemi elde edilir.

$$x(t) = x_0 \cos(\omega_n t) + \frac{\dot{x}_0}{\omega_n} \sin(\omega_n t) \quad (3.11)$$

### 3.1.2. Çok serbestlik dereceli sistemler

Mühendislik yapıların büyük çoğunluğu kullanım süreleri boyunca bir veya daha fazla dinamik yüklerin etkisi altında kalmaktadırlar. Hareket denklemi birden fazla serbestlik derecesi ile ifade edilen sistemlere çok serbestlik dereceli (ÇSDS) denir. ÇSDS'deki her bir serbestlik derecesi bir hareket denklemine ve bir doğal frekansa denk gelmektedir. Bu durumdan dolayı ÇSDS'de elde edilen titreşim değerleri skaler birer büyüklüktür ve frekanslara karşılık gelir. Çözümünden elde edilen yer değiştirmeler ise vektörel ve her bir frekansa karşılık gelen ve yapının deforme olmuş şeklini tarif eder. ÇSDS'ye ait kütle-yay

modeli Şekil 3.4'te verilmektedir (Yılmaz, 2021). ÇSDS genel denklemi Eş. 3.12'de verilmektedir.



Şekil 3.4. ÇSDS kütle-yay modeli

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = 0 \quad (3.12)$$

Eş. 3.12'de kullanılan parametreler;

$[M]$ : yapının kütle matrisi,

$[C]$ : yapının sönüm katsayısı matrisini,

$[K]$ : yapının rijitlik matrisini,

$\{x(t)\}$ : kütlelerin yaptığı deplasman vektörü,

$\{\dot{x}(t)\}$ : kütlelerin hız vektörü,

$\{\ddot{x}(t)\}$ : kütlelerin sahip olduğu ivme vektörünü temsil etmektedir.

ÇSDS'nin frekanslarını ve yer değiştirmelerini bulmak için Eş 3.12 çözülmelidir. ÇSDS'nin sönümsüz olması durumunda titreşim genel hareket denklemi Eş. 3.13 olarak elde edilir.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = 0 \quad (3.13)$$

Eş. 3.13 denklem çözümünde harmonik hareket dikkate alınıp gerekli düzenlemeler yapıldığında denklem Eş. 3.14 elde edilir.

$$[[K] - w^2[M]]\{G\} = \{0\} \quad (3.14)$$

Eş. 3.14 denkleminde  $\{G\}$  zamana bağlı olmayan genlik vektörü olarak adlandırılmaktadır. Denklem çözümü için Eş. 3.14 denklemini kütle matrisinin tersi ( $[M]^{-1}$ ) ile çarpılırsa Eş. 3.15 denklemini elde edilir.

$$[[P] - \lambda[I]]\{G\} = \{0\} \quad (3.15)$$



$[P] = [M]^{-1}[K]$  olarak alınır.

Eş. 3.15 denkleminde;

$\lambda = w^2$ : özdeğerleri,

$[I]$ : birim matrisi temsil etmektedir.

Eş. 3.15'te elde edilen denkleme cebirsel özdeğer denklemi denilmektedir. Eş.3.14 denkleminin çözümü esnasında  $\{G\} = 0$  olarak alındığı durumda hareketsizliği ifade eden sonuç bulunur. Fakat hareketli sonuç arandığı için, Eş 3.16'yı sıfır yapan  $w$  değerleri için çözülür. Çözüm sonucu  $n$  adet serbeslik dereceli bir yapı için  $n$  adet titreşim frekansı elde edilir.

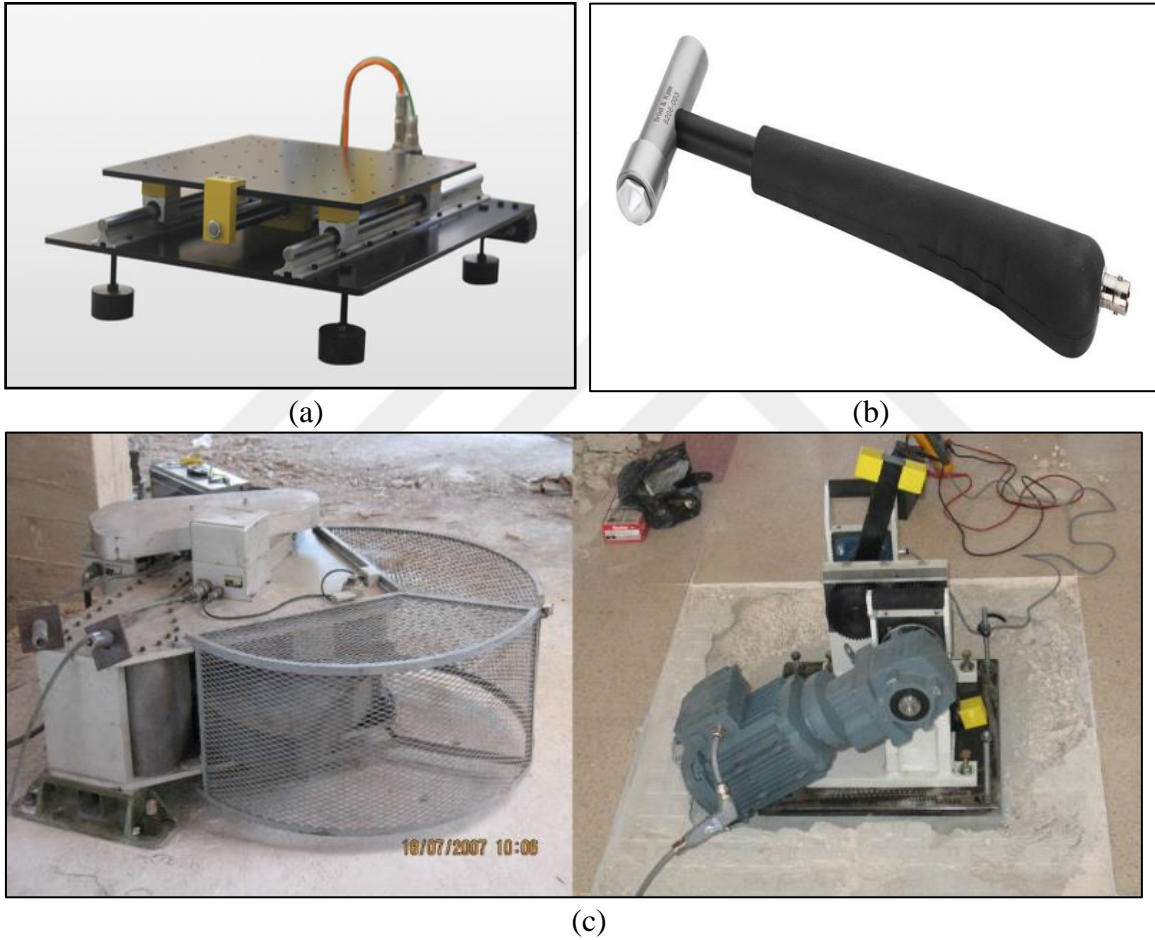
$$|[K] - w^2[M]| = 0 \quad (3.16)$$

### 3.2. Deneysel Modal Analiz

Yapılarda meydana gelen herhangi bir yapısal titreşim problemini daha iyi anlamak için, yapının modal parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu parametreleri belirlemek için yapıya titreşim kuvveti uygulanarak birçok noktadan frekans cevap fonksiyonu (FCF) toplanmaktadır. Uygulanan titreşim kuvvet girişi modal çekiç veya sarsıcıyla yapılırken, cevaplar ivmeölçerlerle toplanmaktadır. Elde edilen veriler bilgisayar ortamına aktarılarak incelenir ve yapının doğal frekanslarındaki titreşim biçimleri elde edilebilmektedir. Yapının dinamik davranış parametrelerinin tespitinde titreşim esasına dayanan bu deneysel çalışmalara Deneysel Modal Analiz (DMA) denilmektedir. DMA yöntemi, oluşan titreşimin kaynağına göre ikiye ayrılmaktadır. Bunlar meydana gelen titreşim kuvveti belirli bir kaynak tarafından oluşuyorsa yani yapıya uygulanan titreşimin genliği ve zamana bağlı değişimi biliniyorsa Geleneksel Deneysel Modal Analiz (GDMA), meydana gelen titreşimin kaynağı çevresel dış etkiler tarafından oluşuyorsa (rüzgar, taşıt trafiği vb.) yani yapıyı etkileyen titreşimin genliği ve zamana bağlı değişimi bilinmiyorsa Operasyonel Modal Analiz (OMA) olarak adlandırılmaktadır.

### 3.2.1. Geleneksel deneysel modal analiz

TEMA yönteminde yapıya bir dış titreşim kuvveti uygulanır ve işlem sonucunda yapıdan elde edilen ivme değerleri (yapının tepkisi) ivmeölçerler ile ölçülür. Yapıya uygulanan titreşim kuvvetleri darbe çekici, sarsma tablaları ve yapay titreşim üretici cihazlar (shaker) gibi araçlar kullanılarak yapılmaktadır. Kullanılabilen bu araçlar Şekil 3.5'te gösterilmektedir (Teknik Destek Grubu; Ataç, 2009).



Şekil 3.5. a) sarsma tablası b) darbe çekici c) yapay titreşim üretici

Sarsma tablaları, geçmiş deprem kayıtlarının ya da yapay deprem kayıtlarının incelenen deney materyaline uygulanmasını sağlayan deney cihazıdır (Bkz. Şekil 3.5a). Darbe çekiçleri, etki-tepki prensibine dayalı olarak çalışan daha çok küçük ve orta ölçekli laboratuvar çalışmalarında kullanılan cihazlardır (Bkz. Şekil 3.5b). Yapay titreşim üreticiler (shaker), gerçek boyutlardaki yapıları analiz etmek için uygun harmonik hareketin uygulanmasını sağlayan cihazlardır (Bkz. Şekil 3.5c). Yapının dinamik parametrelerini belirlemek için oluşturulan titreşim kuvvetleri sonucu elde edilen veriler ivmeölçer sensörler

yardımıyla alınmaktadır. İvmeölçer sensörlerin görselleri Şekil 3.6’da verilmektedir (Teknik Destek Grubu; Yetkin, Erkek ve Calayır, 2016).



Şekil 3.6. İvmeölçer sensör örnekleri

TEMA yöntemi uygulanırken sırasıyla takip edilen aşamalar;

- İncelenen yapıya genliği ve frekansı bilinen belirli bir titreşim uygulanması,
- Yapı üzerinde belirlenen noktalara ivmeölçer sensörlerin yerleştirilmesi,
- Uygulanan titreşim sonrası yapının gösterdiği titreşim tepki kayıtlarının veri toplama ünitesine aktarılması,
- Elde edilen titreşim sinyallerinin dış kuvvet ile oranlanarak yapıya ait frekans tepki fonksiyonunun elde edilmesi,
- Frekans tepki fonksiyonu analizi ile yapıya ait dinamik parametrelerin elde edilmesi.

Orta ve küçük ölçekli yapı sistemlerinde TEMA yöntemi kullanılabilmesine karşın büyük veya karmaşık yapı sistemlerinde, yapıya genliği ve frekansı bilinen yeterli büyüklükte bir dış kuvvetin uygulanması hem zor hem de maliyetli hale gelmektedir.

### 3.2.2. Operasyonel modal analiz

OMA yöntemi ile yapının dinamik parametreleri belirlenirken herhangi bir yapay girdi kuvveti olmadan sadece çıktı verilerini kullanarak analiz yapmak mümkündür. Günümüzde bu yöntem hem uygulaması kolay hem de tahribatsız olmasından kullanımı hızla artan bir yöntem haline gelmiştir. Bu özelliklerinden dolayı tarihi yapıların titreşim analiz çalışmalarında da rahatlıkla kullanılmaktadır. Ayrıca yapılar üzerinde meydana gelen çevresel etkilerin oluşturduğu tepki kayıtlarını kullanarak analiz yapması büyük ve karmaşık yapıların dinamik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Tepki kayıtlarının

incelenmesi ve analizinin yapılması için birçok yöntem bulunsa da prensip olarak matematiksel temelleri aynıdır. Bu yöntemler arasındaki farklar birbirinden farklı algoritmalar kullanmaları ve değişkenin tanımlandığı tanım alanından kaynaklanmaktadır. Değişken frekans alanında tanımlı ise Frekans Tanım Alanı (FTA) yöntemleri, zaman alanında tanımlı ise Zaman Tanım Alanı (ZTA) yöntemleri olarak adlandırılmaktadır.

FTA yöntemleri, her bir noktada ölçümü alınan titreşim sinyallerinin analizine ve titreşim sinyalleri arasındaki bağıntıya dayanmaktadır. FTA yöntemleri parametrik olmayan yöntemler olarak bilinmektedir. ZTA yöntemleri ise her bir noktada ölçümü yapılan titreşim sinyalinin zamana bağlı olarak değişimine veya bağıntı fonksiyonları ile model üretmeye çalışmaktadır (Ramos, 2007).

FTA'da bulunan yöntemler; Basit Frekans Alanı (BFA), Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (FTAA), Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) ve Polimax gibi yöntemlerdir. (Brincker, Zhang ve Andersen, 2000; Gade, Møller, Herlufsen ve Konstantin-Hansen, 2005; Verboven, 2002).

ZTA'da bulunan 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 takip edilen aşamalar;

- Çevresel titreşime maruz kalan yapının üzerinde önceden belirlenen noktalara ivmeölçer sensörlerin yerleştirilmesi,
- Titreşimler sonucu yapıdan alınan titreşim tepki kayıtlarının veri toplama ünitesine aktarılması,
- Veri toplama ünitesinde bulunan titreşim kayıtlarına bağlı olarak analizde kullanılan yöntemler ile yapıya ait dinamik parametrelerinin belirlenmesi şeklinde sıralanabilir.

SAB (Stokastik Altalan Belirleme) yöntemi, doğrudan zamana bağlı olarak kayıt altına alınmış verilerin analizi sonucu dinamik parametrelerin elde edilmesini sağlayan ZTA yöntemlerinden bir tanesidir. Bu yöntemin kullanılması, korelasyon veya spektruma ihtiyaç

duymaması ve gürültü kaynaklı oluşan olumsuzluklara müdahale edilebilmesi gibi özelliklerinden dolayı dinamik parametreleri belirlemede uygun hale gelmektedir (Overschee ve Moor, 1996; Peeters ve Roeck, 2000, Yu ve Ren, 2005). SAB yönteminde yapı sisteminin dinamik davranışını temsil eden denklem; doğrusal, sabit katsayılı ikinci dereceden bir denklem olarak kabul edilmiştir. Bu denklem Eş. 3.17’de verilmektedir.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{F(t)\} = [B]\{u(t)\} \quad (3.17)$$

Bu denklemde kullanılan parametreler;

$[M]$ : Kütle,

$[C]$ : Sönüm,

$[K]$ : Rijitlik matrisi,

$\{F(t)\}$ : titreşim kuvveti vektörü,

$\{\ddot{u}(t)\}$ : zamana bağlı ivme vektörü,

$\{\dot{u}(t)\}$ : zamana bağlı hız vektörü,

$\{u(t)\}$ : zamana bağlı yer değiştirme vektörünü ifade etmektedir.

Bu denklemde bulunan  $\{F(t)\}$  parametresi, ortamdaki verileri ifade eden  $[B]$  matrisi ve  $\{u(t)\}$  vektörü cinsinden yazılabilmektedir. Bu denklem SAB yönteminin kullanılması için uygun halde değildir. SAB yönteminin uygulanabilmesi için Eş. 3.17 denklemi Ayırık-Zaman Stokastik Durum-Uzayı modeline dönüştürülmektedir. Bu model inşaat mühendisliğinde viskoz sönümlü yapıların dinamik parametrelerin belirlenmesi için kullanılmaktadır (Altunışık, 2010). Eş. 3.18’de bazı parametreler verilmektedir. Bu parametreler Eş. 3.17’de yazılarak Eş. 3.19 denklemi elde edilmektedir.

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= \begin{pmatrix} u(t) \\ \dot{u}(t) \end{pmatrix} \\ [A] &= \begin{bmatrix} 0 & I_{n_2} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \\ [B] &= \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}B \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

$$\dot{x}(t) = [A]x(t) + [B]\{u(t)\} \quad (3.19)$$

Bu denklemdaki parametreler;

$[A]$ : durum matrisi,

$[B]$ : veri matrisi,

$x(t)$ : durum vektörünü ifade etmektedir.

Durum-uzay vektörünün eleman sayısı, sistemin durumunu tanımlayan bağımsız değişken sayısına eşittir. Eş. 3.20’de gözlem denklemi verilmektedir (Yu ve Ren, 2005).

$$y(t) = [C]x(t) + [D]\{u(t)\} \quad (3.20)$$

Bu denklemdaki parametreler;

$[C]$ : sistem davranış matrisi,

$[D]$ : doğrudan iletim matrisini ifade etmektedir.

Eş. 3.19 ve Eş. 3.20 denklemleri sürekli-zaman belirli durum-uzay modelini temsil etmektedirler. Ancak ölçümler ayrık zamanlarda gerçekleştirilmektedir ( $k\Delta t$ ,  $k \in \mathcal{N}$ ). Örnekleme süresi ve ortamdaki gürültüler verileri etkilemektedir. Örneklemeden sonra durum-uzay modeli Eş. 3.21’deki gibi ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005).

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= [A]x_k + [B]\{u_k\} \\ y_k &= [C]x_k + [D]\{u_k\} \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

$x_k$ : ayrık-zaman durum vektörü,

$\{u_k\}$ : belirgin etki sinyal vektörünü ifade etmektedir.

Gerçek koşullarda yapıdan alınan ölçümler yapıdaki ve ortamdaki gürültü sinyallerini de içermektedir. Bu yüzden Eş. 3.21’deki denklemlere stokastik gürültü bileşenlerinin eklenmesi gerekmektedir. Gürültü bileşenlerinin eklenmesi sonucu elde edilen denklem Eş. 3.22’de verilmektedir.

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= [A]x_k + [B]\{u_k\} + \{w_k\} \\ y_k &= [C]x_k + [D]\{u_k\} + \{v_k\} \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

Bu denklemde;

$w_k$ : işlem kaynaklı (modelleme hataları ile alakalı) gürültü sinyalleri,

$v_k$ : ölçümlerdeki (sensör hataları ile alakalı) gürültü sinyallerini ifade etmektedir.

İki gürültü vektörü de ölçülemeyen sinyallerden oluşmaktadır. Sıfır ortalamalı beyaz gürültü ve kovaryans matrisini ile ifade edilen bu gürültüler Eş. 3.23 denkleminde gösterilmektedir.

$$E \left[ \begin{pmatrix} w_p \\ v_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_q^T & v_q^T \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad (3.23)$$

Burada;

$E$ : beklenen değer operatörü,

$\delta_{pq}$ : Kronecker deltasını ifade etmektedir.

YSİ, genellikle yapının bazı ölçülemeyen titreşim verileri ile uyarılmasına verdiği tepki ile gerçekleştirilir. Etki verileri hakkındaki bilgi eksikliği yüzünden  $\{u_k\}$ 'yı  $w_k$  ve  $v_k$ 'dan ayırmak imkânsız hale gelmektedir. Eğer  $\{u_k\}$ ,  $w_k$  ve  $v_k$  cinsinden modellenirse yapının ayrık-zaman stokastik durum-uzay modeli elde edilmiş olur. Elde edilen bu model Eş. 3.24'te verilmektedir.

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= [A]x_k + \{w_k\} \\ y_k &= [C]x_k + \{v_k\} \end{aligned} \right\} \quad (3.24)$$

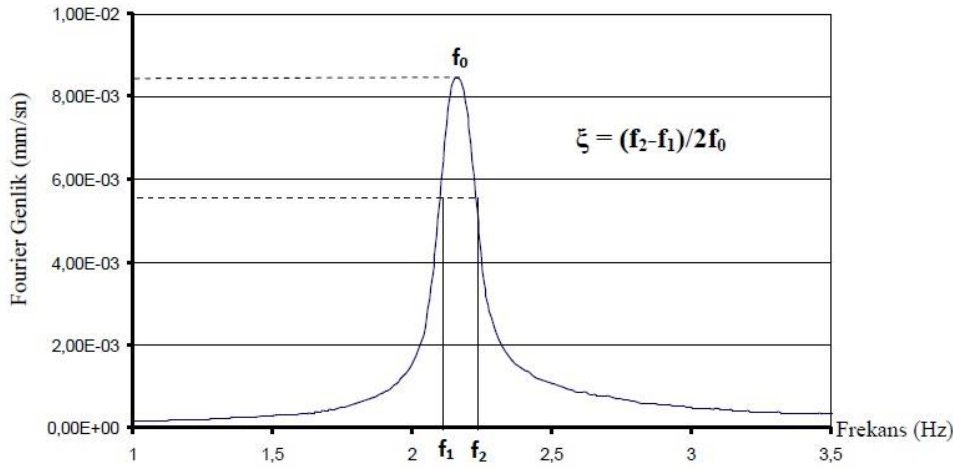
Eş. 3.24 denklemi, yapının çevresel titreşim etkilerinden dinamik parametrelerin belirlenmesi için ZTA yöntemlerinin temelini oluşturmaktadır.

YSİ sistemleri ile yapının sönüm oranı tespit edilebilmektedir. Sönüm oranı hesaplaması için Chopra 1995'de önerilen yöntem kullanılmıştır.

Bu yöntemi kullanarak yapılan bir örnek grafik Şekil 3.7’de verilmektedir. Sönüm oranı denklemi Eş. 3.25’te verilmektedir (Chopra, 1995).

$$\xi = (f_2 - f_1) / 2f_0 \quad (3.25)$$

Bu denklemde  $f_0$  ile ifade edilen frekans değeri Fourier dönüşüm grafiğinde genlik değerine karşılık gelmektedir.  $f_1$  ve  $f_2$  ile ifade edilen frekans değerleri ise genlik değerinin ( $\sqrt{2}$  oranında) altında olan değerlere karşılık gelmektedir.



Şekil 3.7. Sönüm oranı hesaplaması için bir örnek

### 3.3. İncelenen Yapılar Hakkında Bilgiler

#### 3.3.1. Dörtyol Anadolu Lisesi

Bu tez çalışması için deneysel çalışmalar kapsamında Dörtyol Anadolu Lisesi okul binası üzerinde çevresel titreşim etkisindeki bina tepki kayıtları ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu kayıtların uygun yöntemler ile analizleri ile okul binasına ait dinamik parametreler elde edilmeye çalışılmıştır. Okul binası betonarme taşıyıcı sisteme sahip iki bloktan oluşan bir yapıdır. Dörtyol Anadolu Lisesi okul binasının görseli Şekil 3.8’de verilmektedir.

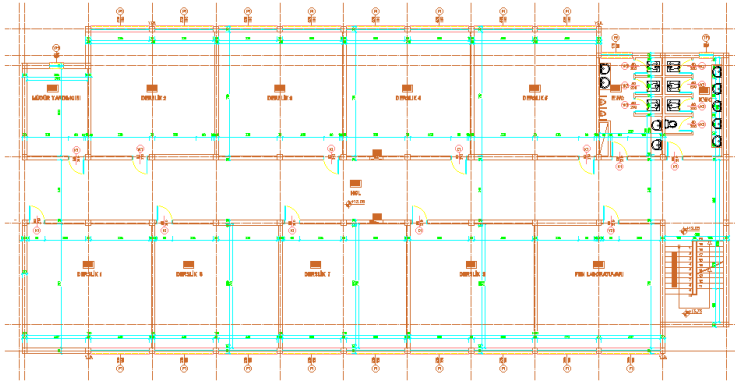




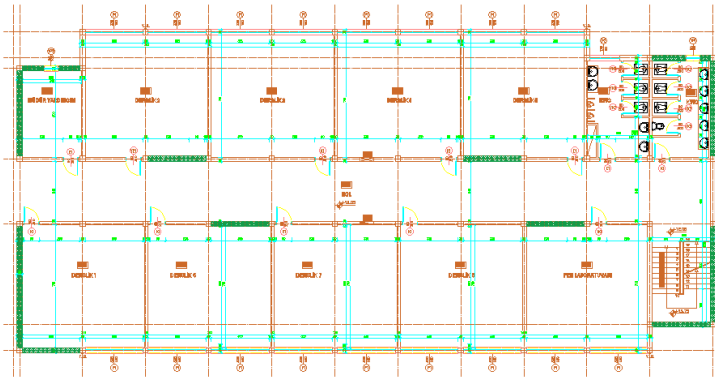
Şekil 3.8. Dört yol Anadolu Lisesi okul binası görünümü

Dört yol Anadolu Lisesi, kat yüksekliği 2.95 m olan dört normal kata sahiptir. Yapı genel olarak 15 cm kalınlığında döşeme, 25\*60 cm kesitli kirişler ve 25\*60 cm veya 35\*60 cm kesitli kolonlardan oluşmaktadır. Okul binasının yapımında kullanılan betonun basınç dayanımı ortalama 15,41 MPa olarak belirlenmiştir. Yüklenici firma tarafından kapsamlı çalışmalar sonucunda yapının mevcut durumu analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre binaya iki yönde perde duvar eklenmesine karar verilmiştir. Güçlendirme öncesi ve sonrası okul bina planı Şekil 3.9’da verilmektedir.

a)



b)



Şekil 3.9. Dört yol Anadolu Lisesi güçlendirme öncesi (a) ve sonrası (b) kat planı

Yüklenici firma tarafından gerçekleştirilen güçlendirme çalışmaları sonrası okul binasına bina yüksekliği boyunca 12 (kısa doğrultu 4 uzun doğrultu 8) adet perde duvar eklenmesine karar verilmiştir. Perde duvarlarda kullanılan malzemeler için beton basınç dayanımı 20 MPa ve donatı akma dayanımı 420 MPa olarak alınmıştır. Perde duvar uygulaması yapılırken ilk aşama olarak kolon ve kirişler arasındaki dolgu duvar malzemeleri yıkılarak temizlenmiştir. Daha sonra kolon ve kiriş donatı filizlerin çakılacağı yerler belirlenmiştir. Belirlenen yerlere perde donatıları eklenmiştir. Son olarak gerekli mukavemete sahip beton dökülerek işlem tamamlanmıştır. Perde duvar yapım aşamalarının görselleri Şekil 3.10'da verilmektedir.



Şekil 3.10. Dörtüol Anadolu lisesi perde duvar uygulaması aşamaları

### 3.3.2. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu

Bu çalışmada Hatay İli İskenderun ilçesinde yer alan Ticaret ve Sanayi Odası İlkokul binasında ölçümler yapılmış ve binaya ait dinamik parametreler elde edilmiştir. Binanın inşası 1968 Türkiye Deprem Yönetmeliği sonrası, 1973 yılında gerçekleştirilmiş ve

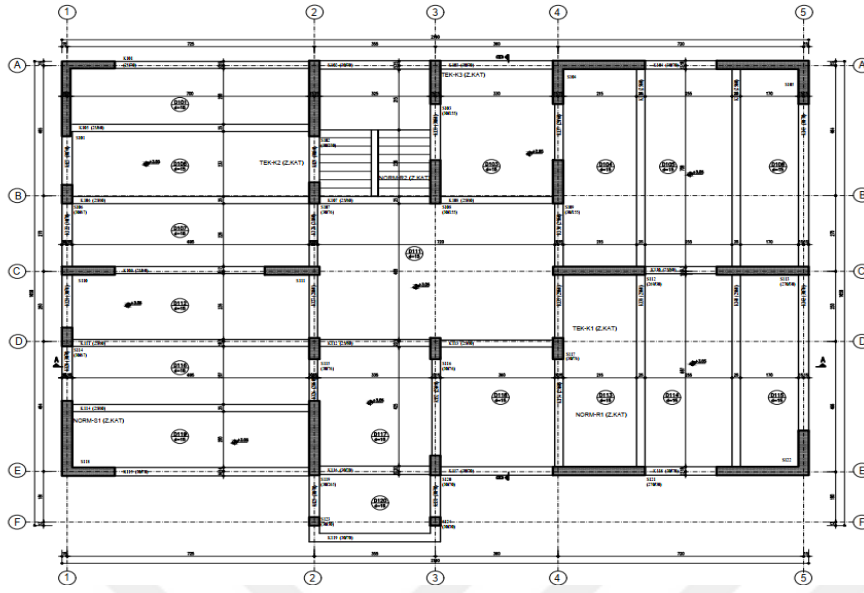
betonarme taşıyıcı sistemden oluşmaktadır. Şekil 3.11’de Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu binası gösterilmektedir.



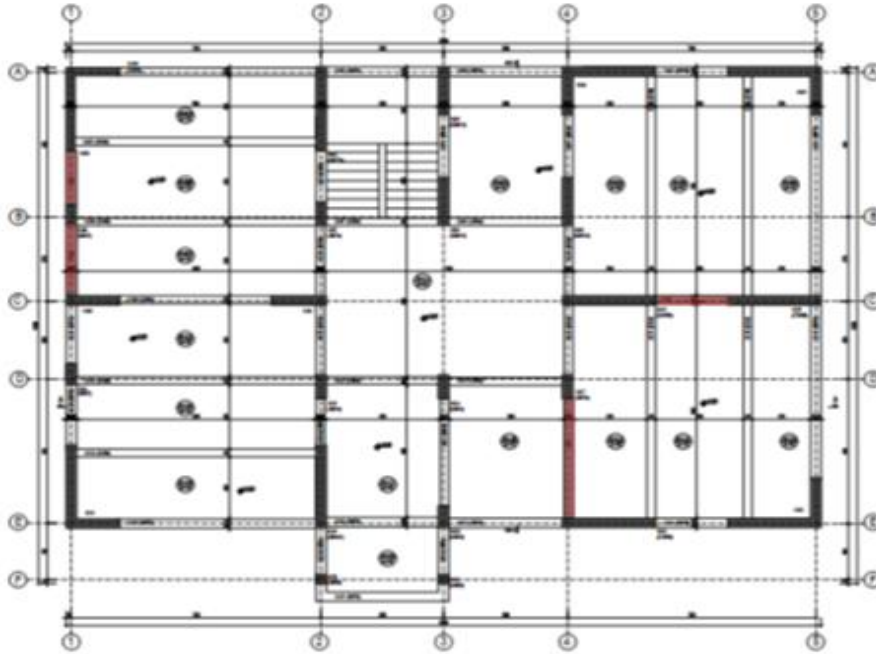
Şekil 3.11. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu binası görünüşü

İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu, kat yüksekliği 3.05 m olan 3 normal kattan oluşmaktadır. Binanın taşıyıcı elemanlarında meydana gelen hasarlar ve çatlaklar üzerine yüklenici firma tarafından öncelikle durum tespiti için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen veriler sonucunda binada güçlendirme uygulaması yapılmasına karar verilmiştir. Güçlendirme kararı verilen yapının planı Şekil 3.12’de verilmektedir.

a)



b)



Şekil 3.12. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu güçlendirme öncesi (a) ve sonrası (b) kat planı

Yüklenici firma tarafından gerçekleştirilen güçlendirme çalışması olarak İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu binasına bina yüksekliği boyunca kısa doğrultuda 3 adet, uzun doğrultuda ise 1 adet perde duvar uygulaması yapılmıştır. Beton basınç dayanımı 30 MPa ve donatı akma dayanımı 420 MPa olarak belirlenmiştir. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu'nda yapılan perde duvar uygulaması aşamaları aşağıda sıralanmıştır.

- Perde duvar uygulaması yapılırken ilk aşama olarak kolon ve kirişler arasındaki dolgu duvar malzemeleri yıkılarak temizlenmiştir.
- Kolon ve kiriş donatı filizlerin çakılacağı yerler belirlenmiştir.
- Belirlenen yerlere perde donatıları eklenmiştir.
- Son olarak gerekli mukavemete sahip beton dökülerek işlem tamamlanmıştır.

Perde duvar yapım aşamalarının görselleri Şekil 3.13'te verilmektedir.

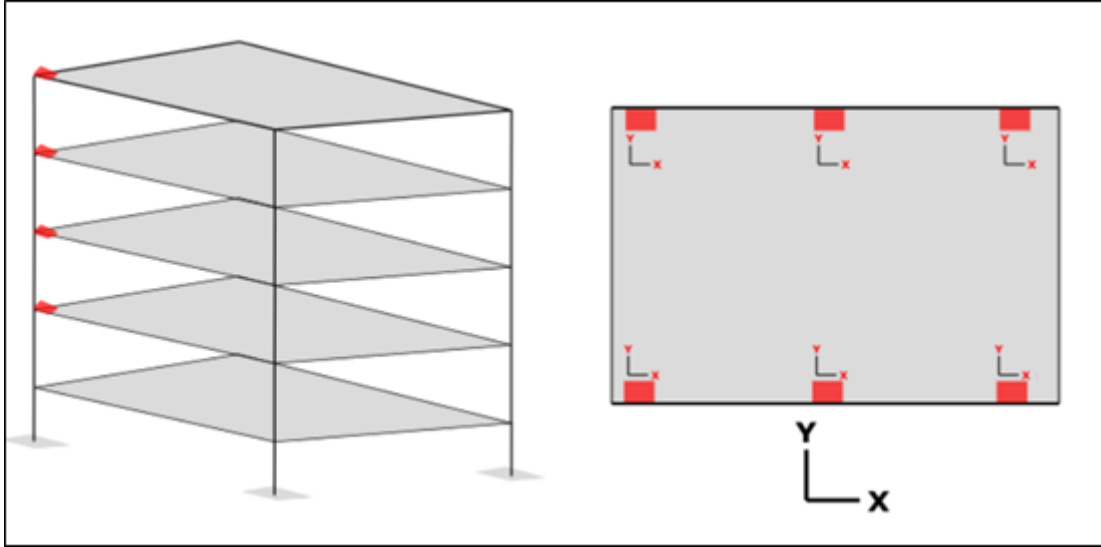


Şekil 3.13. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu perde duvar uygulaması aşamaları

### 3.4. Ortam Titreşimleri Altında Yapı Tepki Kayıtlarının Alınması

#### 3.4.1. Dörtüol Anadolu Lisesi için bina tepki kayıtlarının alınması

Güçlendirme çalışmaları başlamadan önce okul binasına yerleştirilen ivmeölçer sensörler yardımıyla binanın güçlendirme öncesi tepki kayıtları alınmıştır. Okul binasından alınan tepki kayıtları iki aşamadan oluşmaktadır. 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. 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. Sensörlerin şematik olarak yerleşim biçimi Şekil 3.14'te, bina üzerinde uygulanmış hali Şekil 3.15'te verilmektedir. Sensörlerin yerleşim yerlerinin tespiti için gerekli bazı ölçütler mevcuttur (Çelebi, 2002). Çalışmada incelenen yapıya sensörler yerleştirilirken bu ölçütlere uygun olarak yapılmaya gayret edilmiştir.



Şekil 3.14. Dört yol Anadolu Lisesi ilk ve ikinci aşama ivmeölçer sensör yerleşimi

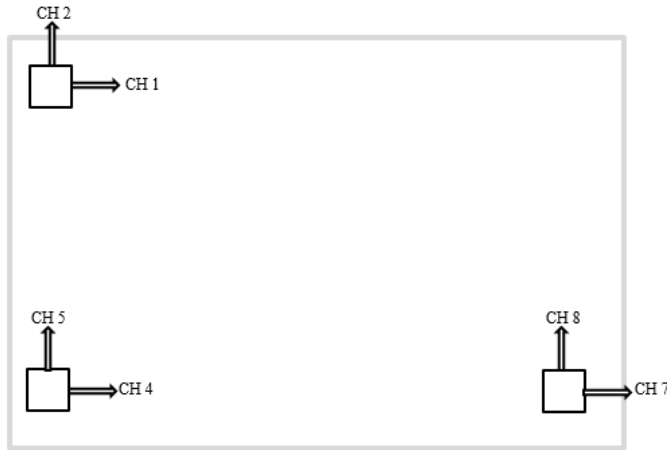


Şekil 3.15. Dört yol Anadolu Lisesi titreşim kayıtlarının alınması

Sensörlerden alınan tepki kayıtları bilgisayar ortamına aktarılarak kaydedilmiştir. Güçlendirme uygulamasının tamamlanmasından sonra güçlendirme öncesi yapılan işlemler tekrar edilerek binaya ait tepki kayıtları alınmıştır.

### 3.4.2. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu sensör kayıtlarının alınması

Okul binasında oluşan titreşimleri ölçmek amacıyla üç eksenli ivmeölçer sensörler kullanılmıştır. Kullanılan sensörler binanın çatı katı köşe noktalarında yer alacak şekilde yerleştirilmiştir. Sensörler kayıt alınan kat döşemesi yüzeylerine yerleştirildikten sonra kayıt ünitesine kablolar yardımıyla bağlanmıştır. Kayıt ünitesini de ağ kontrol merkezine (NCC) bir dönüştürücü ile bağlanmıştır. Sensörlerin yerleşimleri ve bağlantıları tamamlandıktan sonra kayıt alma işlemine başlanmıştır. Ortam titreşimleri etkisi altında binanın tepkileri 60 dakika boyunca ve örneklem aralığı 0.01 sn. olacak şekilde bina tepkisi kayıt altına alınmıştır. Ölçümler sırasında sensörlerden üç boyutlu olacak şekilde saniyede 100 kayıt alınmıştır. Sensörlerden elde edilen titreşim kayıtları bilgisayar ortamına aktarılarak kaydedilmiştir. Şekil 3.16'da sensörlerin yerleştirilme düzeni, Şekil 3.17'de ise bina üzerinde uygulanmış hali verilmektedir.



Şekil 3.16. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu ivmeölçer sensör yerleşimi



Şekil 3.17. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu titreşim kayıtlarının alınması

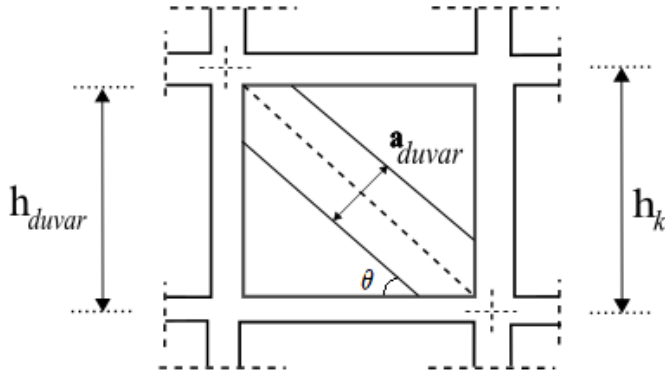
### 3.5. Yapısal Analiz Programları ile Yapıların Modellemesi ve Analizi

Yapılara ait dinamik parametrelerin (doğal frekans, sönüm oranı ve mod şekli) belirlenmesi için yapıların modelleri oluşturulduktan sonra serbest titreşim analizi uygulaması yapılmalıdır. Elde edilen titreşim tepki kayıtları deneysel ve numerik çalışmalarda kullanılmaktadır. Bu çalışmaları kıyaslayabilmek için yapısal analiz programları kullanılmıştır. Dörtüol Anadolu Lisesi için SAP2000, İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu için ETABS yapısal analiz programı kullanılmıştır. Kullanılan programlar ile okul binalarının modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modellere serbest titreşim analizi yapılmıştır. Okul binalar ait modellemeyi yaparken izlenen adımlar aşağıda sıralanmıştır.

- Sistem modelinin oluşturulması
- Malzemeye ait özelliklerin tanımlanması
- Kesit özelliklerinin tanımlanması
- Okul binalarının modal analizinin yapılması

ETABS ve SAP2000 programlarında binaların modellemesi yapılırken kolon ve kirişleri çubuk, perde ise perde duvar olarak sisteme dâhil edilmiştir. Döşemeler rijit diyafram olarak kabul edilmiştir. Oluşturulan modellerde bölme duvarlar eşdeğer diyagonal basınç çubuğu yaklaşımı kullanılarak eklenmiştir. Şekil 3.18’de bölme duvarlara ait görsel verilmektedir. Eşdeğer diyagonal basınç çubuklarının modellemesi ile ilgili kabuller ve formüller Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) ve Federal Emergency Management Agency (FEMA)’deki tanımlamalara uygun bir şekilde uygulanmıştır (TBDY, 2018; FEMA-306, 1998). Uygulanan denklemler Eş. 3.26 ve Eş. 3.27’de verilmektedir.





Şekil 3.18. Duvarı temsil eden eşdeğer diyagonal basınç çubuğu

$$a_{duvar} = 0,175(\lambda_{duvar} \times h_k)^{-0,4} \times r_{duvar} \quad (3.26)$$

$$\lambda_{duvar} = \left[ \frac{E_{duvar} \times t_{duvar} \times \sin 2\theta}{4E_c \times I_k \times h_{duvar}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.27)$$

Eş. 3.26'da bulunan parametreler;

$a_{duvar}$ : çubuk genişliği (mm),

$h_k$ : kolon boyu (mm),

$r_{duvar}$ : dolgu duvar köşegen boyunu (mm) temsil etmektedir.  $\lambda_{duvar}$  katsayısı ise Eş. 3.27 ile belirlenmektedir.

Eş. 3.27'de bulunan parametreler;

$E_{duvar}$ : dolgu duvar,

$E_c$ : çerçeve beton elastisite modülleri,

$t_{duvar}$ : dolgu duvar kalınlığı (mm)

$h_{duvar}$ : yüksekliği (mm),

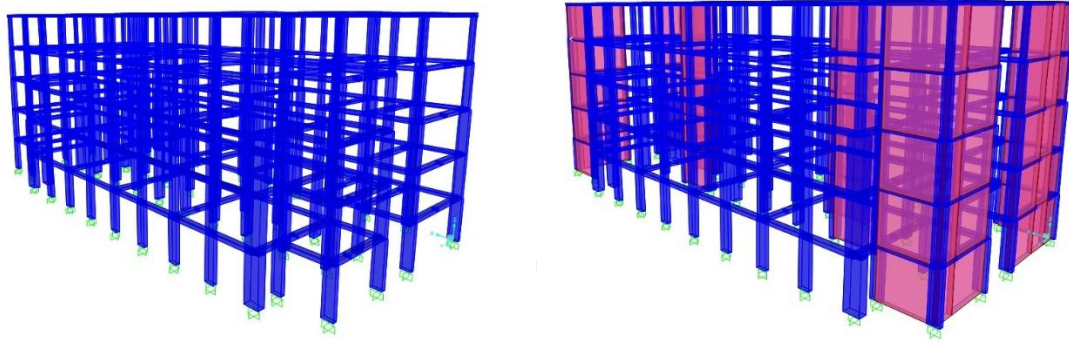
$I_k$ : kolon atalet momenti,

$\theta$ : ilgili köşegenin yatay ile yaptığı açığı göstermektedir.

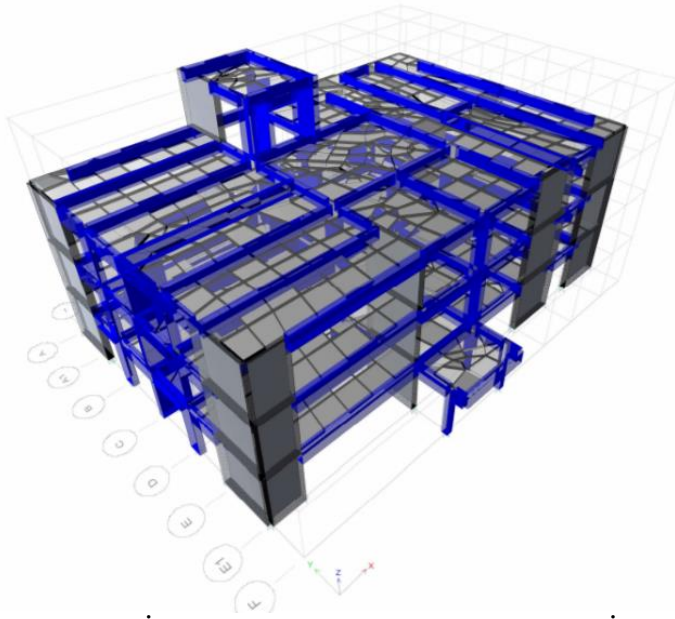
Okul binalarının 3 boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulurken takip edilen adımlar;

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

Dörtyol Anadolu Lisesi okul binasına ait SAP2000 programında oluşturulan güçlendirme öncesi ve güçlendirme sonrası modellerinin görseli Şekil 3.19’da verilmektedir. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu binasına ait ETABS programında model görseli Şekil 3.20’de verilmektedir.



Şekil 3.19. Dörtyol Anadolu Lisesi güçlendirme öncesi ve sonrası SAP2000 modeli



Şekil 3.20. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu ETABS modeli

Okul binasına ait beton elastisite modülü Türk Standartları (TS)’na ait yönetmelik ve standart formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Türk Standartları (TS)’na ait denklem Eş. 3.28’de verilmektedir.

$$E_{cj} = 4250\sqrt{f_{ckj}} + 14000 \text{ (MPa) (TS-500, 2000)} \quad (3.28)$$

Bu denklemde;

$E_{cj}$ : j günlük betonun elastisite modülünü,

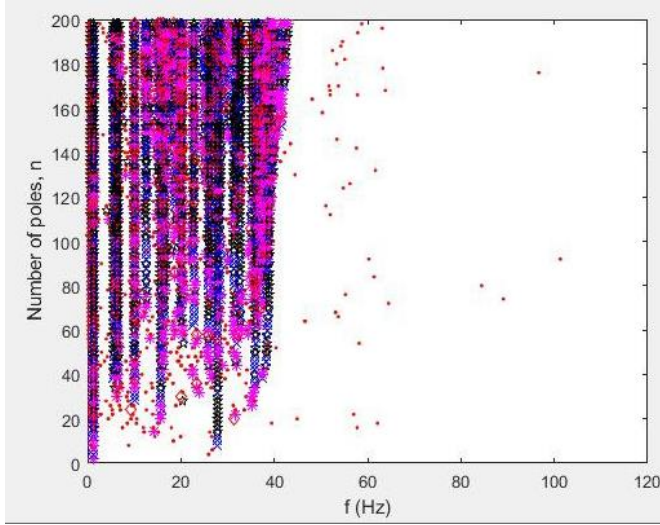
$f_{ckj}$ : j günlük beton karakteristik basınç dayanımını ifade etmektedir.

### 3.6. Deneysel Yöntemler ile Alınan Verilerin Analizi

Bu tez çalışmasında tepki kayıtlarının analizi için Zaman Tanım Alanı (ZTA) yöntemlerinden Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemi kullanılmıştır. 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 edilebilmesi dinamik parametreleri belirlemede uygun hale gelmektedir (Overschee ve Moor, 1996; Peeters ve Roeck, 2000, Yu ve Ren, 2005).

Bu çalışmada Dörtüol Anadolu Lisesi ve İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu binalarına ait titreşim kayıtlarını kullanarak dinamik parametreleri elde etmek için MATLAB yazılımı kullanılmaktadır. MATLAB yazılımında yapılan analiz işlemleri sırası ile aşağıda verilmektedir.

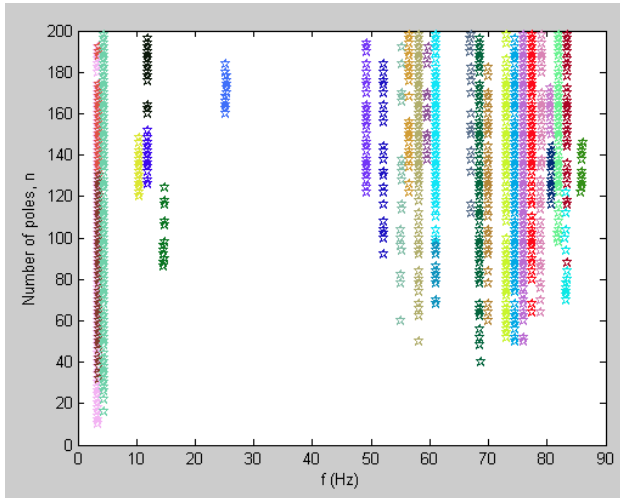
- Analizi yapılan okuldan alınan veriler Ms Excel programında düzenlenip MATLAB programına aktarılacak hale getirilmiştir.
- Düzenlenen veriler MATLAB programına aktarılıp analizi yapılmıştır.
- Analiz sonucu çıktı olarak bir grafik penceresi oluşmaktadır. Bu grafik literatürde stabilizasyon diyagramı olarak adlandırılmaktadır. Bu diyagramda x eksenini Hz cinsinden frekansları, y eksenini ise sistemlerin serbestlik derecelerini göstermektedir. Bu diyagramda, oluşturulan değişik mertebelerdeki modellerin modal parametreleri (frekans, sönüm oranı ve mod şekli) karşılaştırılır ve pek çok mertebede tutarlı bir biçimde ortaya çıkmış olan modlar işaretlenir. Oluşan diyagramın görünümü Şekil 3.21'de verilmektedir.



Şekil 3.21. MATLAB analiz sonrası oluşan bütün modların görünümü

Bu modlardan çok azı sistemle ilişkili olup ve geri kalanları da sadece veriye iyi bir eğri uydurmak için matematiksel bir sebepten ötürü bulunmaktadır. Sisteme ait modları diğerleri arasından ayıklayabilmek için bu stabilizasyon diyagramlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu diyagramdaki her bir rengin karşılık geldiği bir parametre vardır. Diyagramda önemli olan siyah renkte olan modlardır. Siyah renkle gösterilen modlar, verilen tolerans değerlerini (frekans, sönüm oranı ve mod şekli için) sağlamış olan modlardır. MATLAB programı ile yapılan analiz sonucunda elde edilen stabilizasyon diyagram görünümü Şekil 3.22’de verilmektedir.



Şekil 3.22. MATLAB analiz sonrası oluşan modların sadeleştirilmiş hali

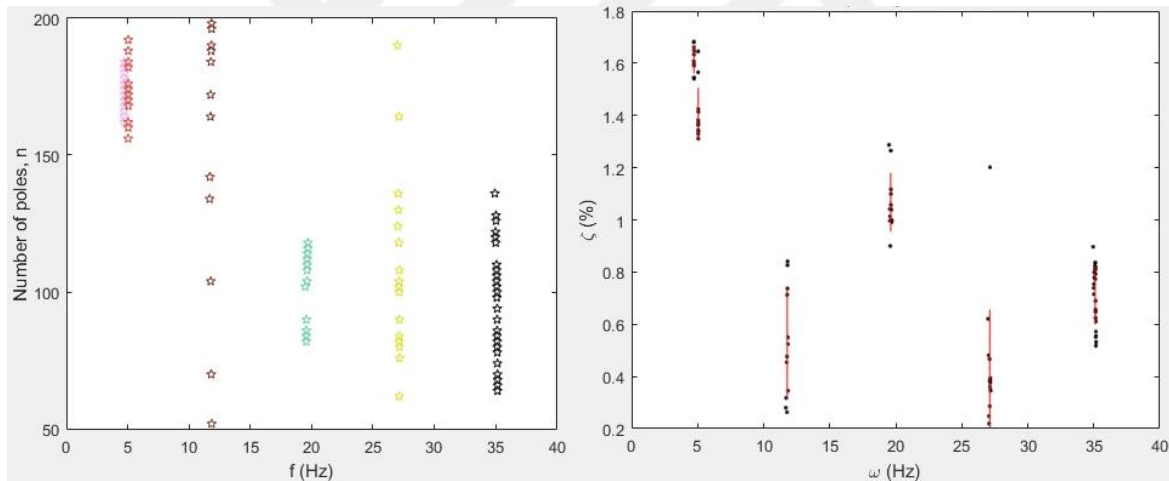
## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde güçlendirme öncesi ve sonrası deneysel ve teorik çalışma analiz sonucu elde edilen okul binalarına ait periyot değerlerinin hesaplanması üzerine durulmuştur.

### 4.1. Deneysel ve Teorik Çalışma Analiz Sonuçları

#### 4.1.1. Dört Yol Anadolu Lisesi analiz sonuçları

Çalışmada kullanılan binanın ölçümler sonucu elde edilen tepki kayıtları MATLAB yazılımı ile analiz edilmiştir. Analizler sonucu elde edilen stabilizasyon diyagramı ve kritik sönüm oranı-doğal salınım frekansı grafiği Şekil 4.1’de verilmektedir. Elde edilen periyot ve sönüm oranları değerleri Çizelge 4.1’de gösterilmektedir.

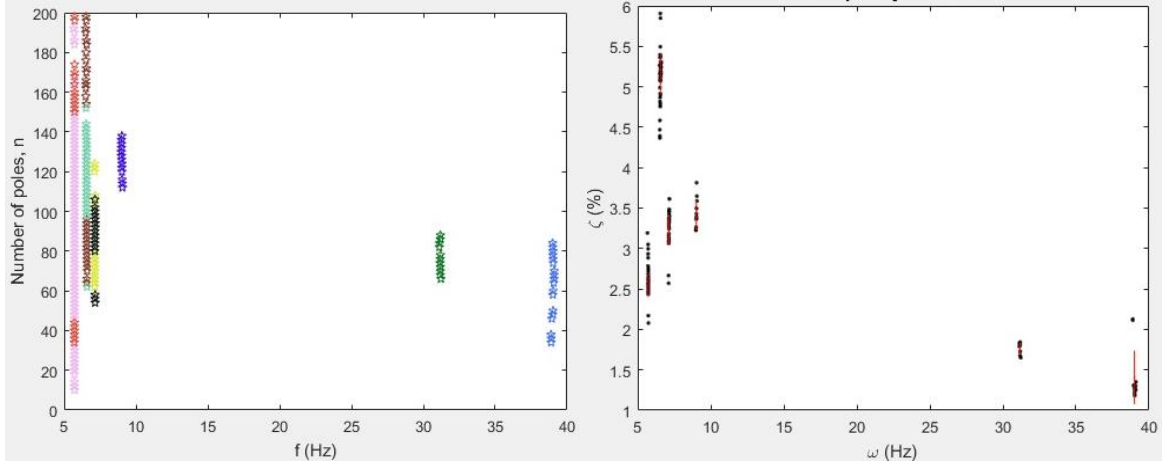


Şekil 4.1. Dört Yol Anadolu Lisesi güçlendirme öncesi MATLAB stabilizasyon diyagramı ve kritik sönüm oranı-doğal salınım frekansı grafiği

Çizelge 4.1. Dört Yol Anadolu Lisesi güçlendirme öncesi MATLAB analiz sonuçları

	Periyot No	Periyot (sn)	Sönüm Oranı (%)
Güçlendirme Öncesi	1	0.21	1.6149
	2	0.19	1.4046

Güçlendirme çalışmalarının tamamlanmasından sonra kayıt altına alınan okul binası tepki kayıtları tekrar MATLAB yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Analizler sonucu elde edilen stabilizasyon diyagramı ve kritik sönüm oranı-doğal salınım frekansı grafiği Şekil 4.2’de verilmektedir. Elde edilen periyot ve sönüm oranı değerleri Çizelge 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Dört Yol Anadolu Lisesi güçlendirme sonrası MATLAB stabilizasyon diyagramı ve kritik sönüm oranı-doğal salınım frekansı grafiği

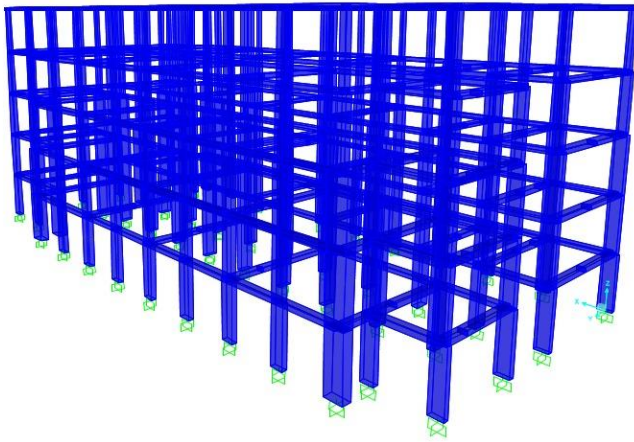
Çizelge 4.2. Dört Yol Anadolu Lisesi güçlendirme sonrası MATLAB analiz sonuçları

	Periyot No	Periyot (sn)	Sönüm Oranı (%)
Güçlendirme Sonrası	1	0.17	2.5532
	2	0.15	5.1546

Yapısal analiz programı ile sonlu eleman modeli oluşturulan okul binasının güçlendirme öncesi ve sonrası modal analiz sonuçları ve model görünümü sırasıyla Çizelge 4.3, Şekil 4.3, Çizelge 4.4 ve Şekil 4.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Dört Yol Anadolu Lisesi güçlendirme öncesi SAP2000 analiz sonuçları

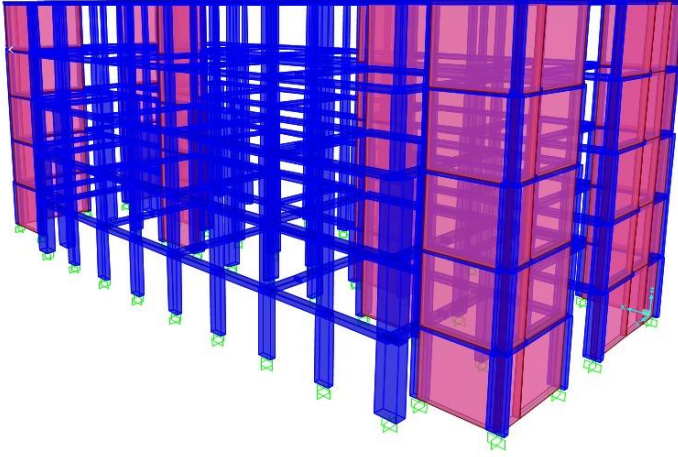
	Periyot No	Periyot (sn)
Güçlendirme öncesi	1.	0.29
	2.	0.21



Şekil 4.3. Dört Yol Anadolu Lisesi güçlendirme öncesi SAP2000 programı modeli

Çizelge 4.4. Dörtyol Anadolu Lisesi güçlendirme sonrası SAP2000 analiz sonuçları

	Periyot No	Periyot (sn)
Güçlendirme sonrası	1.	0.16
	2.	0.13



Şekil 4.4. Dörtyol Anadolu Lisesi güçlendirme sonrası SAP2000 programı modeli

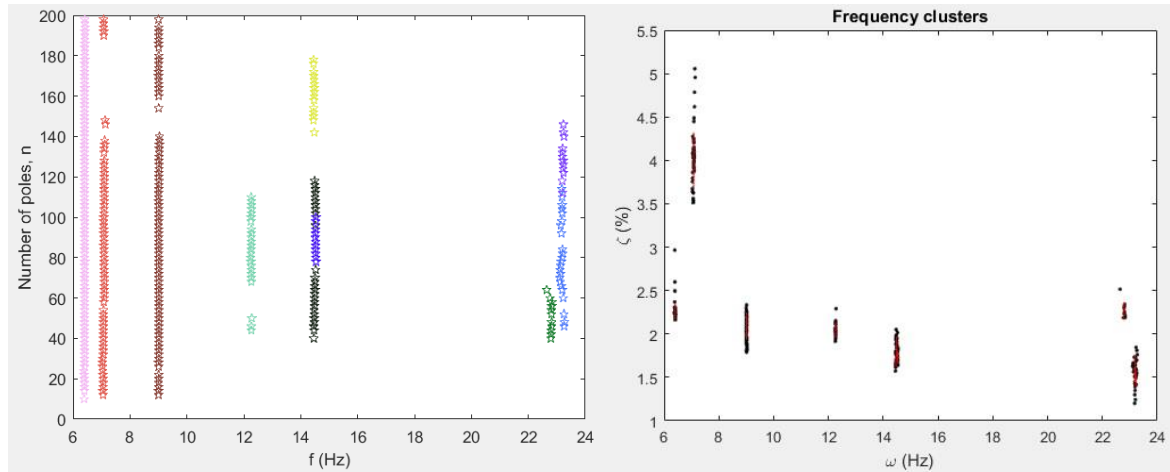
Çalışma kapsamında MATLAB ve SAP2000 yazılımları kullanılarak elde edilen okul binasının güçlendirme öncesi ve sonrası periyot ile sönüm oranları değerleri Çizelge 4.5'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Yapının MATLAB yazılım analizi sonucunda güçlendirme öncesi ve sonrası 1. periyot değerinde %19, 2. periyot değerinde ise %19 oranında değişim görülmektedir. Yapısal analiz programı ile elde edilen 1. periyot değerinde %45, 2. periyot değerinde ise %38 oranında değişim görülmektedir. YSİ sistemleri ile elde edilen sönüm oranlarındaki değişimler ise sırasıyla %36.7 ve %72.7 olarak elde edilmiştir. Güçlendirme çalışmalarının yapının rijitliğini arttıracığından periyot değerlerinde azalma beklenmekteydi. Bu çalışmaların yapının dinamik parametrelerine etkisinin olumlu yönde olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.5 Güçlendirme öncesi ve sonrası MATLAB ve SAP2000 programı analiz sonuçları

	Güçlendirme Öncesi Periyot Değerleri (sn)			Fark (%)
Periyot No.	MATLAB		SAP2000	
	Periyot (Sn)	Sönüm Oranı (%)	Periyot (Sn)	
1	0.21	1.6149	0.29	27.59
2	0.19	1.4046	0.21	9.52
	Güçlendirme Sonrası Periyot Değerleri (sn)			Fark (%)
Periyot No.	MATLAB		SAP2000	
	Periyot (Sn)	Sönüm Oranı (%)	Periyot (Sn)	
1	0.17	2.5532	0.16	6,25
2	0.15	5.1546	0.13	7.69

#### 4.1.2. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu analiz sonuçları

Okul binasına ait ölçümler sonucu alınan tepki kayıtları MATLAB yazılımı ile analiz edilmiştir. Analizler sonucu elde edilen stabilizasyon diyagramı Şekil 4.5'te verilmektedir. Elde edilen periyot ve sönüm oranı değerleri Çizelge 4.6'da gösterilmektedir.



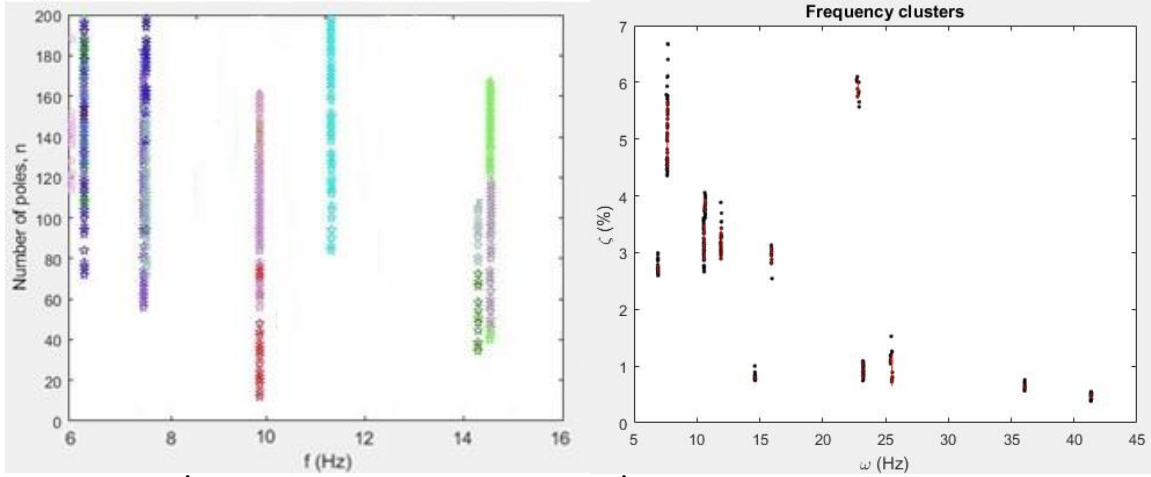
Şekil 4.5. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu güçlendirme öncesi MATLAB stabilizasyon diyagramı ve kritik sönüm oranı-doğal salınım frekansı grafiği

Çizelge 4.6. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu güçlendirme öncesi MATLAB analiz sonuçları

	Periyot No	Periyot (sn)	Sönüm Oranı (%)
Güçlendirme Öncesi	1	0.156	2.6018
	2	0.157	2.0299

Binada güçlendirme çalışmalarının tamamlanmasından sonra alınan titreşim tepki kayıtları tekrar MATLAB yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Analizler sonucu elde edilen stabilizasyon diyagramı Şekil 4.6'da verilmektedir. Elde edilen periyot ve sönüm oranı değerleri Çizelge 4.7'de gösterilmektedir.



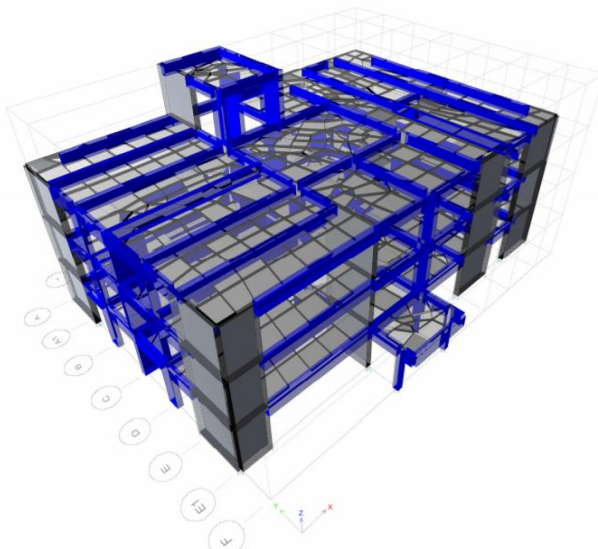


Şekil 4.6. İskenderun Ticaret ve Sanayi İlkokulu güçlendirme sonrası MATLAB stabilizasyon diyagramı ve kritik sönüm oranı-doğal salınım frekansı grafiği

Çizelge 4.7. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu güçlendirme sonrası MATLAB analiz sonuçları

	Periyot No	Periyot (sn)	Sönüm Oranı (%)
Güçlendirme Sonrası	1	0,145	2.6715
	2	0,144	2.7070

Elde edilen deneysel verileri karşılaştırmak amacıyla bina ETABS Programı ile modellenmiştir. Yapısal analiz programı ile sonlu eleman modeli oluşturulan okul binasının güçlendirme öncesi periyot değerleri Çizelge 4.8’de, güçlendirme sonrası elde edilen periyot değerleri ise Çizelge 4.9’da verilmektedir. Binaya ait ETABS modeli Şekil 4.7’de verilmektedir.



Şekil 4.7. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu ETABS programı modeli

Çizelge 4.8. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu güçlendirme öncesi ETABS analiz sonuçları

	Periyot No	Periyot (sn)
Güçlendirme öncesi	1.	0.140
	2.	0.116

Çizelge 4.9. İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu güçlendirme sonrası ETABS analiz sonuçları

	Periyot No	Periyot (sn)
Güçlendirme sonrası	1.	0.111
	2.	0.106

Çalışma kapsamında MATLAB ve ETABS yazılımları kullanılarak elde edilen okul binasının güçlendirme öncesi ve sonrası periyot ve sönüm oranları değerleri Çizelge 4.10'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Yapının MATLAB güçlendirme öncesi ve güçlendirme sonrası 1. periyot değerinde %7, 2. periyot değerinde ise %8 oranında değişim görülmektedir. Yapısal analiz programı ile elde edilen 1. periyot değerinde %21, 2. periyot değerinde ise %8 oranında değişim görülmektedir. Yapı sağlığı izleme sistemleri ile elde edilen sönüm oranlarındaki değişimler ise sırasıyla %3 ve %25 olarak elde edilmiştir. Güçlendirme çalışmalarının sonucunda periyot değerlerinde azalma beklenmekteydi. Bu çalışmaların yapının dinamik parametrelerine olumlu etkisi gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.10. Güçlendirme öncesi ve sonrası MATLAB ve ETABS programı analiz sonuçları

	Güçlendirme Öncesi Periyot Değerleri (sn)			Fark (%)
Periyot No.	MATLAB		ETABS	
	Periyot (Sn)	Sönüm Oranı (%)	Periyot (Sn)	
1	0,156	2.6018	0.140	11,43
2	0,157	2.0299	0.116	35,45
	Güçlendirme Sonrası Periyot Değerleri (sn)			Fark (%)
Periyot No.	MATLAB		ETABS	
	Periyot (Sn)	Sönüm Oranı (%)	Periyot (Sn)	
1	0,145	2.6715	0.111	30,63
2	0,144	2.7070	0.106	35,85

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Hatay ili Dörtöyl ve İskenderun ilçelerine bağlı iki okul binasına ait güçlendirme öncesi ve güçlendirme sonrası çevresel titreşimler etkisi altındaki ölçüm değerleri alınarak binaya ait dinamik parametrelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışma dört katlı bir bina olan Dörtöyl Anadolu Lisesi'nde ve 3 katlı İskenderun Ticaret ve Sanayi Odası İlkokulu'nda gerçekleşmiştir. Binalarda sensörler yardımı ile titreşim kayıtları alınmıştır. Alınan bu kayıtlar ile binalara ait doğal periyot ve sönüm oranı değerleri hem güçlendirme öncesi hem de güçlendirme sonrası için elde edilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda yapısal analiz programı kullanılarak analitik modelleri oluşturulmuştur. Daha sonra kıyaslama amacıyla elde edilen veriler MATLAB programı kullanılarak binalara ait dinamik parametreleri hesaplanmıştır.

Dörtöyl Anadolu Lisesi'nde yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen güçlendirme öncesi titreşim tepki verileri MATLAB programı ile işlenmiştir. Analiz sonucu elde edilen okul binasına ait ilk iki periyot değeri sırasıyla 0.21 sn. ve 0.19 sn'dir. Sönüm oranı değerleri ise sırasıyla %1.6149 ve %1.4046 olarak belirlenmiştir. Teorik yapısal analiz programı olan SAP2000 yazılımı kullanılarak yapılan analiz sonucu elde edilen ilk iki periyot değeri sırasıyla 0.29 sn. ve 0.21 sn. olarak elde edilmiştir. Dörtöyl Anadolu Lisesi'ne ait güçlendirme öncesi deneysel ve teorik analiz sonuçlarının ortalamalarına bakıldığında birinci periyotlar arasında %27,59'luk bir fark olduğu, ikinci periyotlar arasında ise %9,52'lik bir fark olduğu gözlemlenmiştir.

Güçlendirme sonrası binadan alınan titreşim kayıtları ışığında MATLAB programı ile yapılan analiz sonucu elde edilen okul binasına ait ilk iki periyot değeri sırasıyla 0.17 sn. ve 0.15 sn. olarak elde edilmiştir. Sönüm oranı değerleri ise sırasıyla %2.5532 ve %5.1546 olarak belirlenmiştir. Yapısal analiz programı olan SAP2000 yazılımı kullanılarak yapılan analiz sonucu elde edilen ilk iki periyot değeri sırasıyla 0.16 sn. ve 0.13 sn. olarak elde edilmiştir. Dörtöyl Anadolu Lisesi'ne ait güçlendirme öncesi deneysel ve teorik analiz sonuçlarının ortalamalarına bakıldığında birinci periyotlar arasında %6,25'lik bir fark olduğu, ikinci periyotlar arasında ise %7,69'luk bir fark olduğu gözlemlenmiştir.

İskenderun Sanayi ve Ticaret Odası İlkokulu için yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen güçlendirme öncesi titreşim tepki verileri MATLAB programı ile işlenmiştir. Analiz

sonucu okul binasına ait ilk iki periyot değeri sırasıyla 0.156 sn. ve 0.157 sn'dir. Sönüm oranı değerleri ise sırasıyla %2.6018 ve %2.0299 olarak belirlenmiştir. Yapısal analiz programı olan ETABS yazılımı kullanılarak yapılan analiz sonucu elde edilen ilk iki periyot değeri sırasıyla 0.140 sn. ve 0.116 sn. olarak elde edilmiştir. İskenderun Sanayi ve Ticaret Odası İlkokulu'na ait güçlendirme öncesi deneysel ve teorik analiz sonuçlarının ortalamalarına bakıldığında birinci periyotlar arasında %11,43'lük bir fark olduğu, ikinci periyotlar arasında ise %35,45'lik bir fark olduğu gözlemlenmiştir.

Güçlendirme sonrası binadan alınan titreşim kayıtları ışığında MATLAB programı ile yapılan analiz sonucu elde edilen okul binasına ait ilk iki periyot değeri sırasıyla 0.145 sn. ve 0.144 sn. olarak elde edilmiştir. Sönüm oranı değerleri ise sırasıyla %2.6715 ve %2.7070 olarak belirlenmiştir. Yapısal analiz programı olan ETABS yazılımı kullanılarak yapılan analiz sonucu elde edilen ilk iki periyot değeri sırasıyla 0,111 sn. ve 0,106 sn. olarak elde edilmiştir. İskenderun Sanayi ve Ticaret Odası İlkokulu'na ait güçlendirme öncesi deneysel ve teorik analiz sonuçlarının ortalamalarına bakıldığında birinci periyotlar arasında %30,63'lük bir fark olduğu, ikinci periyotlar arasında ise %35,85'lik bir fark olduğu gözlemlenmiştir.

Okul binalarına ait güçlendirme öncesi ve sonrası hesaplanan dinamik parametreler kıyaslandığında hem deneysel hem de teorik analiz sonuçlarında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Periyot değerlerindeki azalmanın okul binalarına uygulanan güçlendirme işleminin, binanın rijitliğinin artması olarak düşünülebilir.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ışığında gelecekteki çalışmalara yol gösterebileceği düşünülen bazı tavsiyeler aşağıda verilmiştir.

- YSİ sistemleri kullanılarak yapılara zarar vermeden ve hızlı bir şekilde yapılara ait dinamik parametreler belirlenebilmektedir. Deneysel yöntemler ile yapısal analiz programları sonucu elde edilen değerler karşılaştırıldığında değerlerin uyumlu olması YSİ sistemlerinin uygulanabilirliğini göstermektedir.
- Bu çalışmada kullanılan yöntemler ile ülkemizdeki yapıların durum değerlendirmesi yapılabilir. Sürekli olarak gelişen teknoloji ile YSİ sistemlerine erişimin kolaylaşması mevcut yapıların 7/24 gerçek zamanlı takip edilmesi ve elde edilen veriler doğrultusunda oluşabilecek sorunların önüne geçilebilir.

- Yapılarda uygulanan güçlendirme çalışmalarında yapının güçlendirme öncesi ve sonrası dinamik parametreleri elde edilip güçlendirme uygulamalarının sonucu hakkında bilgi alınabilir.



## KAYNAKLAR

- A Hasan, M. D., Ahmad, Z. A. B., Salman Leong, M. and Hee, L. M. (2018). Enhanced frequency domain decomposition algorithm: a review of a recent development for unbiased damping ratio estimates. *Journal of Vibroengineering*, 20(5), 1919-1936.
- Altunışık, A.C. (2010). Karayolu köprülerinin yapısal davranışlarının analitik ve deneysel yöntemlerle belirlenmesi, Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Andersen, P. (1997). Identification of Civil Engineering Structures using Vector ARMA Models. *Ph.D. Thesis, Aalborg University, Denmark*.
- Aras, F., and 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., and Kung, S. (1990). Balanced Approximation of Stochastic Systems. *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, 11(1), 42–68.
- Bağbancı, M. B., and Bağbancı, Ö. K. (2018). The dynamic properties of historic timber-framed masonry structures in Bursa, Turkey. *Shock and Vibration*, 2018.
- Baraccani, S., Palermo, M., Gasparini, G., and 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.
- Bas, S., Apaydin, N. M., Ilki, A., and Catbas, F. N. (2018). Structural health monitoring system of the long-span bridges in Turkey. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(4), 425-444.
- Bayraktar, A., Türker, T., and Altunışık, A. C. (2015). Experimental frequencies and damping ratios for historical masonry arch bridges. *Construction and Building Materials*, 75, 234-241.
- Beyen, K. (2017). Titreşim verisiyle güncellenmiş sonlu eleman modeliyle hasar simülasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(2).
- Brincker, R., Zhang, L., and Andersen, P. (2000). Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition. *In Proceedings of the 18th IMAC*. San Antonio, Texas.
- Chopra, A. K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, 1995.
- Chopra, A.K., (2006). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Third Edition, Prentice Hall, USA.

- Domaneschi, M., Casciati, S., Catbas, N., Cimellaro, G. P., Inaudi, D., and Marano, G. C. (2020). Structural health monitoring of in-service tunnels. *International Journal of Sustainable Materials and Structural Systems*, 4(2-4), 268-291.
- 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., and Konstantin-Hansen, H. (2005). Frequency domain techniques for operational modal analysis. *In Proceedings of the 1st IOMAC*. Copenhagen, Denmark.
- Günday, F. (2018). OMA of RC industrial building retrofitted with CFRP using SSI. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*.
- Güneş, S. (2017). Operasyonel Modal Analiz Tekniği ile Yığma Yapıların Dinamik Davranışının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Güneş, S., ve Aml, Ö. (2017). Operasyonel Modal Analiz Tekniği İle Yığma Yapıların Dinamik Davranışının Belirlenmesi. 4. *Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*
- İnternet: Teknik Destek Grubu URL: <https://tdg.com.tr/tr/urunler/masaustu-sarsma-tablaları/tdg-shaketable>, Son Erişim Tarihi : 06.06.2021
- James, G. H., Crane, T. G., and 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.
- Osmancikli, G., Bayraktar, A., Türker, T., Uçak, Ş., and Mosallam, A. (2015). Finite element model calibration of precast structures using ambient vibrations. *Construction and Building Materials*, 93, 10-21.
- Overschee, P. van, and 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. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 33(2), 04019001.
- Özçelik, Ö., Girgin, Ö., ve Amaddeo, C. (2018). 199+325 çelik demiryolu köprüsünün sistem tanımlama çalışmaları ve kalibre sonlu elemanlar modelinin oluşturulması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(6), 1051-1061.
- 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., and 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.
- Ramos, J.L.F. (2007). Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, *PhD Dissertation, Minho University, Portugal*
- Tarpø, M., Georgakis, C., Brandt, A., and Brincker, R. (2021). Experimental determination of structural damping of a full-scale building with and without tuned liquid dampers. *Structural Control and Health Monitoring*, 28(3), e2676.
- 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.
- Tuhta, S. (2018). Optimal Determination of Structural Dynamical Parameters Using Ambient Vibration. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(1), 55-65.
- Türker, T. ve 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
- Verboven, P. (2002). Frequency-domain system identification for modal analysis. Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit Brussels, Brussels.
- Xiao, F. (2016). *Structural health monitoring and bridge condition assessment*. University of Alaska Fairbanks.
- Yanık, Y., Türker, T., Yıldırım, Ö., and 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.
- Yetkin, M., Calayır, Y., and Erkek, H. (2018). Determining dynamic characteristics of reinforced concrete minarets and updating of their finite element models using environmental vibration data. *Turkish Journal of Science and Technology*, 13(1), 93-98.
- Yetkin, M., Erkek, H. ve 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
- Yılmaz, H. Ç. (2021). *Yapı sağlığı izleme sistemleri ile yapıların dinamik özelliklerinin belirlenmesi* (Master's thesis, İskenderun Teknik Üniversitesi/Lisansüstü Eğitim Enstitüsü/İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı).



- Yu, D.J. and Ren, W.X. (2005). EMD-Based stochastic subspace Identification of structures from operational vibration measurements. *Engineering Structures*, 27, 1741-1751.
- Zahid, F. B., Ong, Z. C., and Khoo, S. Y. (2020). A review of operational modal analysis techniques for in-service modal identification. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(8), 1-18.
- Zhang, F. L., Yang, Y. P., Xiong, H. B., Yang, J. H., and Yu, Z. (2019). Structural health monitoring of a 250-m super-tall building and operational modal analysis using the fast Bayesian FFT method. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(8), e2383.



## DİZİN

---

### **A**

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

---

### **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



# TEKNOVERSİTE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

