

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK BİNALARDA ÇEVRESEL TİTREŞİM VERİLERİNE DAYALI
YAPI SAĞLIĞI İZLEME

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Cihat ŞAHİN

EKİM 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

“Yüksek Binalarda Çevresel Titreşim Verilerine Dayalı Yapı Sağlığı İzleme” isimli tez çalışmasını bana öneren ve her aşamasında gerek bilgi ve tecrübelerini gerekse manevi desteğini benden esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Murat GÜNEYDİN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı yürüttüğüm süreç içerisinde desteklerini esirgemeyen ve çalışmamın her aşamasında değerli görüş ve bilgilerini benimle paylaşan, Sayın Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNİŞİK'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamı başından beri takip eden, inceleyen ve her aşamasında bana yardımcı olan, Sayın Öğr. Gör. Dr. Fezayil SUNCA'ya ve tez dönemim boyunca emeği geçen tüm hocalarıma çok teşekkür ederim.

Yürüttüğüm tez çalışmasında her zaman yanımda olan ve destekleriyle bu çalışmanın başarıya ulaşmasında büyük katkıları olan Öğr. Gör. Algihan Kaşif KARAHASAN'a, Dr. Öğr. Üyesi Fatih Yesevi OKUR'a, Dr. Öğr. Üyesi Ali Fuat GENÇ'e, Arş. Gör. Dr. Ali KAYA'ya, Dr. Ebru KALKAN OKUR'a, Arş. Gör. Alihan BALTACI'ya, Arş. Gör. Yunus Emrahan AKBULUT'a, teşekkür ederim.

Yürüttüğümüz akademik çalışmalarda birbirimize katkı sağladığımız çalışma arkadaşlarım İnş. Müh. Doğa ŞEN'e, İnş. Müh. Sinem ÖREN'e, Arş. Gör. Bedirhan KEÇECİ'ye ve tez sürecim boyunca benden hiçbir türlü desteğini esirgemeyen arkadaşım Damla Nur KOCAMAN'a teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca bana her türlü desteği veren ve yanımda olan babam Prof. Dr. Cemalettin ŞAHİN'e, annem Rayife ŞAHİN'e, ablam Büşra ŞAHİN'e ve kardeşim Dr. Fatih Enes ŞAHİN'e teşekkür eder ve bu çalışmanın, yeni çalışmalara rehberlik etmesini ve ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Muhammed Cihat ŞAHİN
Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yüksek Binalarda Çevresel Titreşim Verilerine Dayalı Yapı Sağlığı İzleme” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Murat GÜNAYDIN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 25/10/2024

Muhammed Cihat ŞAHİN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLOLAR DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Yapı Sağlığı İzlemesi	2
1.3. Yapı Sağlığı İzleme ile İlgili Yapılmış Çalışmalar.....	3
1.4. Yapı Sağlığı İzlemede Kullanılan Sensörler	11
1.4.1. İvmeölçerler	12
1.4.2. Fiber Optik Sensörler	13
1.4.3. Lineer Değişken Diferansiyel Transformatör	14
1.4.4.Lazer Doppler Vibrometresi	15
1.4.5.Tiltmetreler	15
1.4.6. Şekil Değiştirme Ölçerler.....	16
1.4.7.Sıcaklık Sensörleri	17
1.4.8.Yapı Sağlığı İzlemede Yeni Nesil Algılama Teknikler.....	17
1.4.9.Yapı Sağlığı İzlemede Veri Toplama Sistemi ve Sinyallerin İşlenmesi	19
1.5. Yapı Sağlığı İzlemede Kullanılan Yöntemler	21
1.5.1. Lokal Yöntemler	21
1.5.2. Global Yöntemler.....	21
1.6. Yapı Sağlığı İzleme Yönetmelik ve Yönergeleri	24
1.7. Tezin Amacı ve İçeriği.....	26
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	27
2.1. İncelenen Binalara Ait Geometrik Özellikler	28
2.2. Analitik Çalışmalar	30
2.2.1. Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması.....	30
2.2.2. Dinamik Karakteristiklerinin Sayısal Olarak Belirlenmesi	32
2.3. Deneysel Çalışmalar	34
2.3.1.ÇTY ile 26 Katlı Binanın Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	34
2.3.2. ÇTY ile 23 Katlı Binanın Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	38

2.3.3. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremlerinin Yapısal Davranış Üzerindeki Etkilerinin İrdelenmesi	45
3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	50
4. KAYNAKLAR.....	54
ÖZGEÇMİŞ	



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

YÜKSEK BİNALARDA ÇEVRESEL TİTREŞİM VERİLERİNE DAYALI YAPI SAĞLIĞI İZLEME

Muhammed Cihat ŞAHİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Murat GÜNAYDIN

2024, 59 Sayfa

Bu tez kapsamında, yüksek binaların çevresel titreşim yöntemleri (ÇTY) ile elde edilen dinamik karakteristikleri (doğal frekanslar, sönüm oranları ve mod şekilleri) üzerinden yapı sağlığının izlenmesini amaçlamıştır. 23 ve 26 katlı iki betonarme yapının dinamik karakteristikleri hem analitik hem de deneysel yöntemlerle elde edilmiştir. Bu amaçla 26 katlı binanın sonlu eleman modeli ETABS yapısal analiz programında oluşturulmuştur. Bu sonlu eleman modeli vasıtasıyla modal analizler gerçekleştirilmiş ve yapıya ait dinamik karakteristikler analitik olarak elde edilmiştir. Ayrıca, hem 26 katlı hem de 23 katlı binanın dinamik karakteristikleri ortam titreşim testleri vasıtasıyla deneysel olarak belirlenmiştir. 26 katlı binadan bir yıl ara ile iki ölçüm gerçekleştirilmiştir. 23 katlı binada ise bir yıl süre ile aralıksız olarak deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler ışığında incelenen binaların dinamik karakteristiklerinde bir değişimin olup olmadığı araştırılmıştır. Öte yandan, bu deneysel veriler ile analitik veriler karşılaştırmalı olarak da incelenmiştir. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen aralıksız ölçüm sırasında meydana gelen ve asrın felaketi olarak tanımlanan 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin incelenen yapıdaki yapısal tepkileri ne ölçüde artırdığı ve dinamik karakteristikler üzerindeki etkisi de irdelenmiştir. Elde edilen veriler, yapının dinamik karakteristiklerinin değişimleri üzerinden analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Yüksek Bina, Yapı Sağlığı İzleme

Master Thesis

SUMMARY

THE STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF HIGH-RISE BUILDINGS BASED ON AMBIENT VIBRATION TESTS DATA

Muhammed Cihat ŞAHİN

Karadeniz Technical University

The Graduate School of Natural and Applied Sciences

Civil Engineering Graduate Program

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Murat Günaydın

2024, 59 Page

This thesis aims to monitor the structural health of high-rise buildings based on dynamic characteristics (natural frequencies, damping ratios, and mode shapes) obtained through Ambient Vibration Tests (AVTs). The dynamic characteristics of two reinforced concrete buildings having 23 and 26 stories, were determined using both analytical and experimental methods. For this purpose, a finite element model (FEM) of the 26-story building was created using the ETABS structural analysis software. Modal analyses were conducted through this FEM, and dynamic characteristics of the building were obtained analytically. Additionally, the dynamic characteristics of both the 23-story and 26-story buildings were determined experimentally through AVTs. Two measurements were taken from the 26-story building with a one-year interval, while continuous experimental measurements were carried out over one year for the 23-story building. The obtained experimental data were used to investigate whether there were any changes in the dynamic characteristics of the buildings under study. Furthermore, the experimental data were compared with the analytical results. The effects of the February 6, 2023 Kahramanmaraş Earthquakes—described as the disaster of the century—on the structural responses of the selected buildings during the continuous measurement phase were also examined. The data obtained were analyzed through changes in the modal parameters of the structures.

Key Words : High-Rise Buildings, Structural Health Monitoring

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Piezoelektrik ivmeölçer (Hassani & Dackermann, 2023).....	12
Şekil 2. Lineer Değişken Diferansiyel Transdüktör (Fleming, 2013)	14
Şekil 3. Şekil değiştirme ölçere ait genel görsel (İrsel, 2021).....	16
Şekil 4. Tipik Wheatstone köprüsü (Ang, 2014).....	17
Şekil 5. Zorlanmış Titreşim Yöntemi'ne ait(a) Şematik gösterim (b) Frekans davranış	24
Şekil 6. İvmeölçer yerleşimi (YSİUY-2020).....	25
Şekil 7. Binaların bulunduğu konum.....	27
Şekil 8. İncelenen binalara ait görseller	27
Şekil 9. Binalara ait kat planları	29
Şekil 10. 26 katlı bina için sonlu eleman modelindeki kalıp planları	30
Şekil 11. 23 katlı bina için sonlu eleman modelindeki kalıp planları	31
Şekil 12. 26 katlı binaya ait üç boyutlu sonlu eleman modeli.....	31
Şekil 13. 23 katlı binaya ait üç boyutlu sonlu eleman modeli.....	32
Şekil 14. Modal analiz sonucunda elde edilen mod şekilleri	33
Şekil 15. Modal analiz sonucunda elde edilen mod şekilleri	34
Şekil 16. 26 katlı binanın ivmeölçer yerleşim planı.....	35
Şekil 17. Deneysel ölçümlerde kullanılan cihazlar (a. B&K 8340 tipi ivmeölçer, b. B&K 3053 tipi veri toplama cihazı)	35
Şekil 18. 26 katlı binanın deneysel ölçümlerine ait bazı fotoğraflar.....	36
Şekil 19. ÇTY ile elde edilen spektral yoğunluk matrisi tekil değerleri	37
Şekil 20. Deneysel ölçümler sonucu elde edilen mod şekilleri.....	38
Şekil 21. 23 katlı binanın ivmeölçer yerleşim planı.....	39
Şekil 22. Sara SLO6 tipi üç eksenli ivmeölçer.....	39
Şekil 23. 23 katlı binanın deneysel ölçümlerine ait bazı fotoğraflar.....	40
Şekil 24. WTYSP ait ana ekran görseli	41
Şekil 25. 15.09.2023 tarihli ölçüme ait spektral yoğunluk matrisi tekil değerleri	42
Şekil 26. 12.03.2024 tarihli ölçüme ait spektral yoğunluk matrisi tekil değerleri	42
Şekil 27. 12.03.2024 tarihli ölçüme ait spektral yoğunluk matrisi tekil değerleri	42
Şekil 28. Deneysel ölçümler sonucu elde edilen mod şekilleri.....	45
Şekil 29. 6 Şubat Kahramanmaraş depremleri öncesi ve sonrası için 23 katlı binanın mod şekillerinin karşılaştırılması	47

Şekil 30. İlk deprem esnasında binanın yapısal tepkilerinde meydana gelen artış	48
Şekil 31. İkinci deprem esnasında binanın yapısal tepkilerinde meydana gelen artış	48



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Minimum ivmeölçer sayısı (YSİUY-2020)	25
Tablo 2. İvmeölçer özellikleri (YSİUY-2020).....	25
Tablo 3. Sonlu eleman modelinde dikkate alınan malzeme özellikleri	31
Tablo 4. Sonlu eleman modelinde dikkate alınan malzeme özellikleri	31
Tablo 5. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk üç mod	32
Tablo 6. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk üç mod	33
Tablo 7. İvmeölçer özellikleri	35
Tablo 8. 26 katlı binanın deneysel ölçümler sonucu elde edilen dinamik karakteristikleri	37
Tablo 9. İvmeölçer özellikleri	39
Tablo 10. 15.09.2023 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler	43
Tablo 11. 25.10.2023 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler	43
Tablo 12. 12.11.2023 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler	43
Tablo 13. 12.12.2023 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler	43
Tablo 14. 22.01.2024 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler	43
Tablo 15. 22.02.2024 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler	44
Tablo 16. 12.03.2024 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler	44
Tablo 17. 13.04.2024 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler	44
Tablo 18. 12.05.2024 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler	44
Tablo 19. 13.06.2024 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler	44
Tablo 20. 12.07.2024 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler	45
Tablo 21. 12.08.2024 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler	45
Tablo 22. 6 Şubat Kahramanmaraş depremleri öncesi ve sonrası binanın dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması	46
Tablo 23. 6 Şubat Kahramanmaraş depremleri esnasında binaya etkiyen maksimum ivmeler	48
Tablo 24. 6 Şubat Kahramanmaraş depremleri esnasında binaya etkiyen ivmeler ile DD-2 deprem düzeyi için beklenen en büyük yer ivmesi değerinin karşılaştırılması	49

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a_0, a_n, b_0	: Fourier serisi katsayıları
ÇTY	: Çevresel Titreşim Yöntemi
GFTAA	: Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma
$G_{xx}(j\omega)$	: Etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk (GSY) fonksiyonu
$G_{yy}(j\omega)$	: Tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu
$H(j\omega)$	: Frekans davranış fonksiyonu
$\bar{H}$	: Kompleks eşlenik
$H_{ik}(i\omega)$	: Transfer Matrisi
HSZ	: Hidrostatik Sezon-Zamanı
KKS	: Küresel Konumlama Sistemi
s	: Tekil değerler
s_{ij}	: Skaler tekil değerler
u_{ij}	: Tekil vektörler
u_k	: Belirgin etki sinyal vektörü
ω_n	: Doğal açısal frekans
x_k	: Ayrık-zaman durum vektörü
$x(t)$	: Durum vektörü
$X_1(t)$	: Yapay bir kuvvet
YSİ	: Yapı Sağlığı İzleme
$Y_k(t)$	: Yapının etkiye göstermiş olduğu tepki

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

İnsanoğlu başta barınma olmak üzere çeşitli amaçlara ve ihtiyaçlara yönelik zamanın teknolojisinin el verdiği koşullarla birlikte mühendislik yapıları inşa etmiştir. Mühendislik yapılarının tarihsel gelişimi insanlığın tarımı keşfetmesi ve böylece yerleşik hayata geçmesiyle başladığı bilinmektedir. Taş, kerpiç ve ahşap gibi malzemelerle inşa edilen küçük evler antik çağda piramitlere ve su kemerlerine; orta çağda kale, katedral ve camilere dönüşmüştür. Sanayi devrimi ile birlikte beton ve çelik gibi yapı malzemelerinin kullanımı yaygınlaşmış ve bu malzemelerin sağladığı imkanlarla günümüz geniş açıklıklı köprüleri, yüksek barajları, çok katlı binaları ve gökdelenleri inşa edilebilmiştir. Gelişen malzeme ve yapım teknolojileriyle birlikte özellikle 20.yy. ortalarından sonra dünyada birçok uzun açıklı köprü, baraj ve yüksek bina inşa edilmiştir. Ülkemizde de son zamanlarda özellikle uzun açıklı köprü, baraj ve yüksek bina inşası hız kazanmış olup; 9871 adet köprü, 876 adet baraj ve 68 (150m ve üzeri) adet yüksek bina inşa edilmiştir (URL-1; URL-2).

Büyük ölçekli yapıların bulundukları bölgelerde milyonlarca insanın enerji, ulaşım, ticaret ve barınma gibi temel ihtiyaçlarını karşılamasının yanı sıra inşa edildikleri ülkelere sağladıkları prestij ile uluslararası alanda sağladıkları ekonomik katkı oldukça büyüktür. Bu yapılar kullanım ömürleri boyunca yapısal davranışlarını ve bütünlüklerini etkileyebilecek birçok etkiye maruz kalabilmektedir. Bu etkiler sonucu oluşabilecek hasarlar insan hayatını ve ülke ekonomisini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenlerden dolayı bu tip yapıların yapısal durumlarının düzenli olarak takip edilmesi büyük önem arz etmektedir. Günümüzde yapıların yapısal durumunun takip edilmesi yapı sağlığı izlenmesiyle mümkün kılınmıştır. Yapı sağlığı izleme (YSİ), binalar, köprüler, barajlar ve tarihi yapılar gibi çeşitli yapı sistemlerinin yapısal bütünlüğünün sürekli izlenmesi ve değerlendirilmesi olarak bilinmektedir. YSİ'nin ana hedefi, zamanla yapıların yapısal bütünlüğünde ortaya çıkabilecek herhangi bir değişikliği tespit etmek / değerlendirmek ve yapı güvenliğini tehdit edebilecek bir durum oluşmadan önce gerekli önlemleri almaktır. YSİ, yapısal güvenliği sağlamada ve değişen yüklere karşı gerçek zamanlı yapısal tepkileri yakalamada kritik bir öneme sahiptir.

Ayrıca yapısal sorunların erken teşhisini sağlayarak, hızlı bakım ve onarım ve/veya güçlendirme çalışmalarının yapılmasına mümkün kılmaktadır (Katam vd., 2023). Bu sayede gerçek zamanlı verilerin toplanıp analiz edilmesi yoluyla yapının güvenliği sağlanıp meydana gelebilecek olası hasar ve / veya göçme riski ortadan kaldırılabilir.

Büyükşehirler insanlara sağladıkları yaşam koşulları ve iş olanakları nedeniyle göç için her zaman tercih sebebi olmuştur. Bu göçün bir sonucu olarak, günümüzün büyükşehirleri sürekli büyüyen ekonomiler ve artan nüfuslarla öne çıkmaktadır. Sürekli artan nüfus, yeni yaşam alanlarına olan ihtiyacı da beraberinde getirmiş ve bu da inşaata uygun arazi fiyatlarının artmasına, yatay kentleşmenin sınırlarının zorlanmasına neden olmuştur. Artan arazi fiyatları ve geçmişe kıyasla aynı alanda daha fazla insanı barındırma ihtiyacı, büyükşehirlerde dikey kentleşmeyi başlatmış ve yüksek binaların inşa edilmesine yol açmıştır.

Yüksek binalar, kullanım ömürleri boyunca çeşitli dinamik kuvvetlere maruz kalabilirler. Ayrıca, bu binaların yapısal performansı zamanla malzeme bozulması, korozyon ve hasar gibi faktörlerden dolayı değişebilir. Bu dış kuvvetler ve bozulmalar, yüksek binaların yapısal bütünlüğünü etkileyerek hasara ve kısmi veya toptan göçmeye yol açabilir. Yüksek binaların yapısal durumunun etkin bir şekilde izlenip yönetilmemesi, önemli ekonomik kayıplara ve daha da önemlisi, kamu güvenliği açısından tehdit oluşturabilir. Bu tehdidi ve kayıpları ortadan kaldırmak yüksek binaların yapısal durumunu sürekli ve düzenli olarak izlenmesini zorunlu kılmaktadır. Bu amaçla dünya da ve Ülkemizde yüksek binaların sürekli izlenmesi YSİ sistemleri kullanılarak çeşitli yönergeler ile zorunlu tutulmuştur.

1.2. Yapı Sağlığı İzlemesi

Mühendislik yapılarının yapısal davranışlarının çeşitli sensörler aracılığıyla sürekli ya da belirli aralıklarla ölçülerek takip edilmesi YSİ olarak bilinmektedir. Mühendislik yapıları kullanım ömürleri boyunca deprem, rüzgar ve yangın gibi birçok etkiye maruz kalmaktadır. Bu etkilerden kaynaklı oluşacak hasarlar yapıların mevcut yapısal davranışını olumsuz etkileyerek yapı güvenliğini tehdit edebilir. Hasara bağlı yapının mevcut durumundaki değişimi, günümüzde YSİ yöntemleri ile belirlenebilmektedir.

YSİ yöntemlerinin uygulanması, mühendislik yapılarının hizmet ömrü boyunca yönetiminin çeşitli yönlerini iyileştirerek ve birçok fayda sağlayabilir;

- Yapı tasarımıyla ilgili varsayımlar ve parametrelerin doğrulanması: Yapıların tasarımında oluşturulan başlangıç sonlu eleman modellerinin yapıyı ne derecede yansıttığını ortaya koyar. Ayrıca model güncelleme çalışmaları için veri sağlar.
- Yapı değerlendirmesinin iyileştirilmesi: Yapısal değerlendirmelerin güvenilirliği ve doğruluğu, güncel yapısal tepki verilerine dayanarak artırılabilir.
- Çevresel izleme: Rüzgar ve sıcaklık gibi yerel çevresel koşullardan kaynaklanan yapısal durumdaki değişiklikler değerlendirilebilir.
- Aktif güvenlik izleme ve kontrol: Yapısal tepkilerde anormallikler meydana geldiğinde ve belirlenen sınırların aşıldığı durumlarda varlık yöneticilerini bilgilendirerek insan ve yapı güvenliğini sağlar.
- Bakım optimizasyonu: İzleme verilerinin gösterdiği üzere, “ihtiyaç duyulduğunda” en uygun denetim, bakım ve onarım programı belirlenebilir ve bu da maliyetlerin azaltılmasını sağlar.
- Gelecek performansın tahmin edilmesi: Geçmiş ve mevcut izleme verilerine dayalı olarak incelenen yapının gelecekteki performans tahmin edilebilir (Hassani & Dackermann, 2023).

1.3. Yapı Sağlığı İzleme ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Son otuz yılda YSİ alanında barajlar, köprüler ve yüksek yapılar gibi önemli mühendislik yapıları üzerine Ülkemizde ve dünyada birçok çalışma yapılmış ve bazıları bu bölümde özetlenmiştir. Okuma vd. (2008), yapımı 1963 yılında tamamlanan Hitotsuse kemer barajının sismik güvenliğini değerlendirmek için bir yıldan fazla bir süre boyunca çevresel titreşim testleri gerçekleştirmişlerdir. Çevresel titreşim testleri sonucu elde edilen veriler sonlu eleman modelinin için güncellenmesi ve yapı sağlığı izlemesi amacıyla temel verilerin toplanması için kullanılmıştır. Çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, barajın mod şekillerini elde etmek amacıyla yüksek yoğunluklu titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise doğal frekansların mevsimsel değişikliklerini incelemek amacıyla barajın uzun süreli titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar vasıtasıyla, su seviyesi ve sıcaklığa bağlı olarak doğal frekanslardaki değişikliklerin barajın yapısal durumunu ne ölçüde etkilediğini ortaya koymuşlardır. Çalışma sonucunda, su seviyesi arttıkça barajın doğal frekanslarında bir azalma olduğunu ifade etmişlerdir.

Ayrıca, sıcaklık değişikliklerinin de doğal frekanslar üzerinde etkili bir parametre olduğunu ortaya koymuşlardır.

Weng ve Loh (2010), Fei-Tsui kemer barajının yapı sağlığını, dinamik ölçümler ve sismik veriler kullanılarak incelemiştir. Barajın farklı su seviyelerindeki dinamik karakteristiklerini, 84 adet depremden elde edilen sismik veriler ve çevresel titreşim verileri kullanılarak belirlemişlerdir. Bu incelemeler, barajın doğal frekanslarının su seviyesi ile nasıl değiştiğini gösteren regresyon eğrileri oluşturulmasını sağlamıştır. Ayrıca yapının başlangıç ve bu etkiler sonrasındaki dinamik karakteristiklerini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada, barajın yapısal davranışının değerlendirmesi, su seviyesi ile modal frekanslar arasındaki ilişki göz önünde bulundurularak yapılmıştır.

Oliveira vd. (2012), Portekiz'deki Cabril Barajı'nda uzun süreli dinamik izleme sistemi kullanılarak barajın yapı sağlığını değerlendirmeyi amaçlamıştır. Dinamik karakteristikler, barajın farklı noktalarına yerleştirilen ivmeölçerler vasıtasıyla elde edilmiştir. Bu amaçla barajın 16 farklı noktasında ölçümler alınmıştır. Çalışmada, yapı-su etkileşimleri ve sönümlenme etkilerinin modellenmesi konusunda literatürdeki mevcut deneysel eksiklikleri giderilmesi amaçlanmıştır. Barajın su seviyesindeki değişikliklerin ve çevresel faktörlerin dinamik davranış üzerindeki etkileri analiz edilmiş ve sonuçlar, barajın yapısal sağlığını izlemek için önemli bulgular sunmuştur.

Pereira vd. (2018) tarafından yürütülen çalışmada, Portekiz'in kuzeydoğusunda bulunan 123m yüksekliğindeki çift eğrilikli Baixo Sabor kemer barajının izleme sistemine ve bu sistemle yapılan analizlere odaklanılmıştır. Çalışmada, barajın 20 adet tek eksenli ivmeölçer içeren bir izleme sistemine sahip olduğu ve bu sistem aracılığıyla internet bağlantısı üzerinden sahadan sürekli veri toplandığı ve bu verilerin işlendiği belirtilmiştir. Çalışmanın odak noktası, aşırı yağış sonrası dolu savak kapaklarının açılması gibi büyük olaylar sırasında oluşan ivme değişimlerinin incelenmesi ve barajın dinamik karakteristiklerinin nasıl değişim gösterdiğinin analiz edilmesidir. Çalışmada, elde edilen sonuçların zorlanmış titreşim testi sonuçları ve su etkisinin dikkate alındığı sayısal modellerle karşılaştırılması da yapılmıştır. Bu karşılaştırmalar, barajın dinamik davranışını ve su dolumu sırasında yapısal tepkilerini daha iyi anlamak için önemli veriler sunmaktadır.

Monteiro vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Baixo Sabor ve Feiticeiro barajlarının sismik izleme sistemleri ve bu sistemlerin sismik risk yönetimindeki etkileri incelenmiştir. Her iki barajın da Portekiz'in kuzeydoğusunda, büyük bir jeolojik fay hattına yakın bir konumda bulunduğu belirtilmiştir. Bu kapsamda barajların galerinde ve rezervuar

boyunca çeşitli noktalarında ölçüm alınmıştır. Bu sistemler aracılığıyla elde edilen deprem kayıtlarının verileri detaylı olarak analiz etmişlerdir. Çalışmada Portekiz baraj güvenliği mevzuatı, bölgenin jeolojik ve tektonik yapısının tanımı ve sismik izleme sistemlerinin temel özellikleri ayrıntılı olarak açıklamışlardır. Sismik ve dinamik yükler arasında doğrudan bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Elde edilen veriler hem boş hem de dolu rezervuar durumlarında gerçekleştirilen zorlanmış titreşim testlerinin sonuçlarıyla kalibre edilmiş sayısal modellerle karşılaştırılmıştır. Bu izleme sistemlerinin, deprem olayları sırasında barajın davranışını değerlendirmede, sayısal modellerin geliştirilmesinde ve özellikle yeni davranış modellerinin oluşturulmasında kritik bilgiler sağladığı vurgulanmıştır.

Sarkar vd. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, YSI'nin barajlar üzerindeki kritik rolü bir kemer baraj örneği üzerinden incelenmiştir. Bu baraj, hidro-meteorolojik, jeoteknik, jeodezik ve sismik izleme gibi çeşitli enstrümantasyon sistemleriyle donatılmıştır. Çalışmanın temel amacı, barajın yerdeğiştirmesini sonlu eleman analizleri ile karşılaştırarak bu sonlu eleman modellerin güvenilirliğini doğrulamak ve böylece sonlu eleman modelinin yapının gerçek durumunu yansıtmasını sağlamaktır. Bu doğrultuda, baraj-rezervuar-temel etkileşimli üç boyutlu analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, barajın gelecekteki yerdeğiştirmesini tahmin etmek amacıyla, sensörlerden elde edilen verilere dayalı olarak Hidrostatik Sezon-Zamanı (HSZ) modeli olarak adlandırılan bir istatistiksel model kullanılmıştır. Çalışma bulguları, enstrümantasyon verileri ile sonlu eleman analizlerinden elde edilen yerdeğiştirmeler arasında güçlü bir korelasyon olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, HSZ modelinin gözlemlenen verilerle uyumlu sonuçlar ürettiği ve gelecekteki baraj davranışlarını tahmin etmede etkili olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, YSI'nin barajların yönetimi ve bakımı açısından kritik öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır.

Scarella vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, asma köprülerin YSI süreçlerinde kabloların durumunu değerlendirmek için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Kabloların yük taşıma kapasitelerinde meydana gelen azalmaları tespit etmek amacıyla, köprü tabliyelerinde dağıtılmış gerilmelerin dinamik olarak izlenmesi sağlanmıştır. Çalışmada geliştirilen yöntem sayesinde, köprünün hizmet koşullarında gerilme dağılımları izlenerek, kablo kuvvetlerindeki değişimler tespit edilebilmektedir. Araştırma kapsamında, ölçeklendirilmiş bir asma köprü modeli üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve kablo kuvvetlerindeki değişimlerin köprü tabliyesinde yarattığı etkiler incelenmiştir.

Catbas vd. (2016), köprülerin YSI süreçlerinde elde edilen büyük miktardaki veriyi işlemek için makine öğrenmesi tabanlı bir algoritma geliştirmiştir. Özellikle, bu algoritma,

Sunrise Movable Bridge'den dört yıl boyunca toplanan titreşim verilerini analiz etmek için tasarlanmıştır. Araştırma, köprü mekanik bileşenlerinin durumu hakkında güvenilir ve zamanında değerlendirmeler yapmayı amaçlamaktadır. Çalışma, mekanik bileşenlerde oluşabilecek hasarları tespit etmek için regresyon analizi gibi istatistiksel teknikleri kullanarak verilerin işlenmesini içermektedir. Bu algoritmanın etkinliği, yağ eksikliği ve cıvata çıkarma gibi hasar senaryoları altında test edilmiştir ve algoritmanın hasar tespiti konusunda başarılı olduğunu ifade edilmiştir.

Kaloop ve Hu (2016), uzun açıklıklı bir köprü kulelerinin yapısal davranışını Küresel Konumlama Sistemi (KKS) izleme tekniğine dayalı olarak incelemiştir. Çalışmada, köprü kulelerinin yerdeğiştirme tepkilerini tahmin etmek için rastgele dekrement algoritması kullanılmış ve kulelerin dinamik karakteristiklerin elde etmek için üç farklı yöntem uygulamışlardır. Bu yöntemler, Least Squares Complex Exponential (LSCE) yöntemi, Hilbert envelope method (HEM) ve eigensystem realization algorithm (ERA)'dır. Sonuçlar, HEM ve LSCE yöntemlerinin kulelerin doğal frekansını ve mod şekillerini çıkarmada daha uygun olduğunu göstermektedir. Ayrıca, KKS ölçümlerinin dinamik özellikleri ve istatistiksel zaman serisi analizi, trafik yüklerinin yarı statik ve dinamik performanslar üzerinde yüksek bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Xu vd. (2016), yüksek performanslı fiber optik sensörler kullanılarak 1108 metrelik bir asma köprünün tam ölçekli gerilme dağılımı ele almıştır. Çalışma, köprünün tüm uzunluğu boyunca ölçülen gerilme dağılımlarını sunmuş ve ana kablolar ile çelik kiriş arasındaki etkileşimi irdelemiştir. Fiber optik izleme sistemlerinin, uzun mesafeli gerilme izleme için uygun olduğu, 0.05 m uzamsal çözünürlük ve 0.01 m/nokta örnekleme aralığı ile gösterilmiştir. Elde edilen verileri, köprü tasarımını değerlendirmek ve yapısal durumun değerlendirilmesi için kullanmışlardır. Bu saha çalışması, büyük ölçekli mühendislik yapılarında yüksek yoğunluklu gerilme ve sıcaklık ölçümünün uygulanabilirliğini göstermekte ve fiber optik sensörlerin entegrasyonu ile büyük ölçekli yapıların YSİ için önemli bir örnek teşkil etmektedir.

Carrion vd. (2017), Rio Papaloapan Köprüsü'nde YSİ sisteminin rolünü ve bu sistemin köprünün yapısal bütünlüğünü izleme sürecindeki önemini vurgulamıştır. Çalışmada YSİ sisteminin, köprüde meydana gelen çatlağı önceden tespit edemese de hasar sırasında ve sonrasında toplanan veriler, köprünün durumunu hızlı bir şekilde değerlendirme ve gerekli önlemleri alma açısından kritik bir rol oynadığını ifade etmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada, YSİ sistemlerinin yapısal sorunları tespit etme ve önleme konusundaki etkinliğine dikkat

çekilmiş ve bu sistemlerin özellikle sürekli izleme gerektiren kritik yapılar için etkili bir çözüm sunduğu belirtilmiştir.

Jiao vd. (2017), önerilmeli beton köprü köprülerdeki termal etkilerin YSİ süreçlerinde nasıl değerlendirilebileceğine dair yeni bir yöntem geliştirmiştir. Araştırmacılar, termal yüklerin köprülerdeki etkilerini hassas bir şekilde izlemek için burkulma temelli bir ölçüm cihazı geliştirmişlerdir. Bu cihaz, kirişlerin termal genleşme ve büzölmelerini elektrik sinyallerine dönüştürerek bu hareketleri algılamaktadır. Araştırmada, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan simülasyonlar, deneysel çalışmalar ve teorik modelleme birlikte kullanılarak bu cihazın doğruluğu ve etkinliği değerlendirilmiştir. Bu çalışma, özellikle köprülerde termal yüklerin neden olduğu hasarların erken tespitinde kullanılabilecek yenilikçi bir yöntem sunmaktadır.

Sun vd. (2020), köprülerin yapı sağlığı izleme süreçlerinde büyük veri (big data) ve yapay zeka tekniklerinin kritik rolünü ortaya koymaya çalışmışlardır. Ayrıca çalışma, YSİ'de kullanılan veri analizi ve bilgi işleme tekniklerinin mevcut durumu incelenmiş ve bu tekniklerin YSİ süreçlerine entegrasyonunun, köprülerde hasar tespiti ve durum değerlendirmesi gibi kritik alanlarda nasıl iyileştirmeler sağlayabileceği tartışılmıştır. Bu tekniklerin YSİ'ye daha güçlü bir şekilde entegre edilmesine odaklanması gerektiğini ifade etmişlerdir.

He vd. (2022), köprü mühendisliğinde entegre YSİ sistemlerinin ana teknikleri, teknolojik zorlukları ve gelecekteki eğilimleri üzerine kapsamlı bir inceleme sunmuştur. Çalışmada, YSİ'nin, köprülerin risk değerlendirmesi ve güvenlik tasarımı açısından büyük önem taşıdığı ve bu sürecin, veri izleme, veri iletimi, veri analizi ve erken uyarı sistemleri gibi dört ana bileşenin olduğu gösterilmektedir. Çalışmada, dört farklı algılama teknolojisi incelenmiş, kablosuz veri iletim yaklaşımları tartışılmış, yapay zeka tabanlı veri işleme yöntemleri tanıtılmış ve performans tahmini ile erken uyarı sistemleri özetlenmiştir. Bu çalışma ayrıca, mevcut köprü YSİ sistemlerinin karşı karşıya olduğu beş ana zorluğu (teknoloji, çevre, ekonomi, güvenlik ve emniyet) tartışmakta ve gelecekte bu zorlukların nasıl ele alınabileceğine dair araştırma önerileri sunmaktadır.

Deng vd. (2023), köprülerin YSİ süreçlerindeki gelişmeleri gözden geçirerek, bu alandaki temel teknikler, karşılaşılan teknolojik zorluklar ve gelecekteki eğilimleri ele almıştır. Köprü YSİ sistemleri, köprülerin güvenliğini sağlamak ve ömürlerini uzatmak amacıyla kritik bir rol oynamaktadır. Çalışmada sensör teknolojileri ve bilgisayarla görme tabanlı izleme teknolojileri gibi izleme yöntemleri detaylı olarak incelenmiştir. Ayrıca, veri

işleme yöntemleri, erken uyarı sistemleri, titreşim tabanlı ve tahribatsız test tabanlı hasar tespit yöntemleri üzerine yapılan son çalışmalar özetlenmiştir. Bu kapsamda, YSİ sistemlerinin çeşitli bileşenlerinin avantajları ve dezavantajları değerlendirilmiş ve gelecekteki araştırmalar için olası yönler belirlenmiştir. YSİ süreçlerinde kullanılan sensör teknolojileri, veri işleme yöntemleri ve erken uyarı sistemlerinin entegrasyonunun, köprülerin performans değerlendirmelerinde ve hasar tespitinde önemli iyileştirmeler sağlayacağı öngörülmektedir.

Yüksek binalar, kullanım ömürleri boyunca sismik olaylar da dahil olmak üzere çeşitli statik ve dinamik kuvvetlere maruz kalabilirler. Ayrıca, bu binaların yapısal performansı zamanla malzeme bozulması, korozyon ve hasar gibi faktörlerden dolayı değişebilir. Bu dış kuvvetler ve bozulmalar, yüksek binaların yapısal bütünlüğünü etkileyerek hasara ve kısmi veya toptan göçmeye yol açabilir. Yüksek binaların yapısal durumunun etkin bir şekilde izlenip yönetilmemesi, önemli ekonomik kayıplara ve daha da önemlisi, kamu güvenliği açısından tehdit oluşturabilir. Bu nedenle geçmiş yıllarda literatürde yüksek katlı yapıların yapısal durumlarının deneysel yöntemlerle incelendiği bazı çalışmalar bulunmaktadır.

Li vd. (2002), Çin’de bulunan 79 katlı Di-Wang Tower üzerinde gerçekleştirilen çalışma vasıtasıyla rüzgar etkileri ve yapısal tepkilerin değişimi ile ilgili saha ölçümlerinin sonuçlarını sunmuştur. Bu çalışmada temel olarak, yapıdaki sönüm oranlarının titreşim genliğinin büyüklüğüne bağlı olarak ne ölçüde değiştiğini ifade eden ampirik veriler elde edilmiştir. Bu sönüm oranlarının, özellikle yapı tasarımında kullanılan sabit sönüm oranlarıyla karşılaştırıldığında, dinamik tepkiler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Saha ölçümleri, özellikle büyük genlikli titreşimler sırasında sönüm oranının arttığını göstermiştir. Çalışmada ayrıca, bu tür yüksek binalarda kullanılan mevcut tasarım sönüm oranlarının genellikle yüksek olduğu ve dinamik tepkilerin doğru bir şekilde tahmin edilmesi için yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır.

Park vd. (2008), yüksek binalarda rüzgar kaynaklı tepkilerin izlenmesi amacıyla KKS kullanımı incelenmiştir. Çalışmada, KKS’in yüksek binalardaki rüzgar etkileri nedeniyle oluşan yatay yer değiştirmeler ve ivme kayıtlarını belirlemedeki etkinliği araştırılmıştır. KKS tabanlı izleme sistemi, geleneksel lazer yer değiştirme ölçerler ve ivmeölçerlerle karşılaştırılmış ve KKS’in, binanın tüm hareket geçmişini izleyebilme potansiyeline sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, 66 katlı bir binada KKS, lazer yer değiştirme ölçerler ve ivmeölçerler kullanılarak yapılan ölçümler karşılaştırılmış ve KKS'in yatay yer değiştirmeler ve ivmeleri doğru bir şekilde elde edebildiği gösterilmiştir.

Ni vd. (2009), Çin'in Guangzhou kentinde inşa edilen Guangzhou New TV Tower'da (GNTVT) entegre edilen YSİ sistemindeki ileri teknolojik yenilikleri kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. 610 metre yüksekliğindeki bu yüksek binada, yapı güvenliğini ve performansını izlemek amacıyla 600'den fazla sensör kullanılmıştır. Çalışmada, YSİ sisteminin modüler tasarımı, bu tasarımın sistemin farklı aşamalarında kolay entegrasyonunun nasıl sağladığı ve kablosuz veri toplama ile internet tabanlı uzaktan veri iletimi teknolojilerinin uygulanması ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ayrıca, uzun vadeli gerilme ve sıcaklık izlemeleri için kullanılan Fiber Bragg Grid (FBG) sensörlerinin sağladığı, yüksek hassasiyet ve elektromanyetik girişimlere karşı dayanıklılık gibi avantajlar vurgulanmıştır. Çalışma ayrıca, yapı üzerinde titreşim kontrol cihazlarının etkinliğinin YSİ sistemi aracılığıyla izlenmesi ve doğrulanması sürecini de ele alarak, bu cihazların rüzgar kaynaklı titreşimleri azaltmadaki başarısını ortaya koymaktadır.

Correa vd. (2013), Burj Khalifaya entegre edilen SmartSync teknolojisiyle birbirine bağlı modüler bir YSİ sistemini tanıtmaktadır. Makalede, sistemin üç farklı donanım modülünü, otomatik veri toplama, derleme ve arşivleme işlevlerini ele almıştır. Gerçek zamanlı ve isteğe bağlı hizmetler aracılığıyla sunulan veri madenciliği, son işlem ve sistem tanımlama yeteneklerinin kapsamını göstermek için çeşitli web tabanlı çevrimiçi modüller sunulmuştur. Ayrıca, yazılım tabanlı tetikleme çerçevesinin hem sismik hem de rüzgar olaylarını farklı ana modüllerden izleyebilme yeteneğini doğrulamak amacıyla iki kavram kanıtlama gösterimi yapılmıştır ve böylece Burj Khalifa'nın izlenmesi için çoklu tehlike platformu sunan bir çözüm olduğunu ortaya koymuşlardır.

Zhang vd (2015), Shanghai Tower'ın YSİ sürecini ve bu süreçte zamana bağlı etkilerin değerlendirilmesini ele almaktadır. Çalışmada, YSİ verileri ile detaylı bir sonlu elemanlar modeli (FEM) arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Sonuçlar, betonun sünme gibi zamana bağlı özelliklerinin yapısal tepki üzerindeki önemli etkilerini vurgulamaktadır.

Zhang vd. (2016), 632 metre yüksekliğindeki Shanghai Tower'ın çeşitli inşaat aşamalarında ve hizmete girmesi sonrasında yapılan YSİ süreçlerini ele almaktadır. Yapının dinamik karakteristiklerini değerlendirmek için geliştirilen hızlı bir Bayesian yönteminin kullanıldığı bu çalışma, yapının doğal frekanslarını, sönüm oranlarını ve mod şekillerini belirlemek amacıyla ortam titreşim testlerini içermektedir. Çalışma kapsamında 15 farklı alanda titreşim testi yapılmış ve inşaat süreci boyunca doğal frekansların yapı yüksekliği arttıkça azaldığı ifade edilmiştir. İnşaat tamamlandıktan sonra, yapının doğal frekanslarının stabil hale geldiği tespit edilmiştir. Sönüm oranları ise, yüksek belirsizliklerle birlikte

değişiklik gösterdiği, bunun da sönüm oranlarının çevresel faktörlere ve yapısal değişimlere daha duyarlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, çalışma kapsamında belirli bir kat üzerinde yapılan testler, yapının mod şekillerini ve yapının titreşim modları arasındaki farklılıkları incelenmiştir. Test sonuçları, Shanghai Tower gibi yenilikçi tasarıma sahip süper yüksek yapıların, dinamik özellikler açısından düzenli davranış sergilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca sıcaklık ve nem gibi çevresel değişkenlerin yapının doğal frekansları üzerindeki etkileri incelenmiş ve doğal frekansların sıcaklık arttıkça arttığı, nem arttıkça ise nispeten azaldığı ifade edilmiştir.

Li vd. (2018), 600 metre yüksekliğindeki Ping-An Finans Merkezi (PAFM) için entegre bir YSİ sisteminin tasarımı ve uygulamasını ele almıştır. YSİ sistemi, yapı performansını ve dış etkenleri hem inşaat hem de servis aşamalarında izlemek için 553 sensörden oluşan yedi alt sistemi içermektedir. Çalışmada, YSİ sisteminin modüler tasarımı, sistemin etkili bir şekilde çalışmasını sağladığı ve gelişen izleme ihtiyaçlarına kolayca uyum sağladığı vurgulanmaktadır. Ayrıca, sistemin inşaat aşamasındaki düşey deformasyonların izlenmesi, aktif ayarlı kütle sönümleyici sistemlerinin etkinliği ortaya koyulması ve hasar tespit yöntemlerinin doğrulanması gibi araştırma faaliyetlerine ait verileri sunulmaktadır. Öte yandan, ele alınan binanın kullanımı sırasında meydana gelen bir tayfunun neden olduğu yapısal değişimler çalışmada tartışılmıştır.

Li vd. (2018), Hong Kong'daki 420 metre yüksekliğindeki bir yüksek binanın 14 tropikal fırtına sırasında yapısal performansını izlemeye yönelik saha ölçümlerini gerçekleştirmiştir. Çalışmada, 2008 ile 2016 yılları arasında 360 saatlik kayıt süresine sahip rüzgar etkileri analiz edilmiştir. Araştırma, bu fırtınaların rüzgar özelliklerini istatistiksel olarak incelemekte ve binanın dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi için rastgele azalma tekniği ve Bayesian spektral yoğunluk yaklaşımı gibi yöntemleri kullanmaktadır. Ayrıca, ele alınan binanın bu şiddetli fırtınalar sırasında hizmet edilebilirliği üç farklı konfor kriterine göre değerlendirilmiştir. Rüzgar hızları ve yönü gibi özellikler değerlendirilmiş, bina performansı ise ivme ölçümleri, doğal frekanslar ve sönüm oranları gibi modal parametrelerle analiz edilmiştir. Sonuçlar, rüzgar hızının ve yönünün, yapının dinamik tepkileri üzerindeki etkilerini vurgulamakta ve yüksek binaların tasarımında dikkate alınması gereken önemli faktörler olarak değerlendirilmektedir.

Park ve Oh (2018), Kore'nin en yüksek binası olan Lotte World Tower (LWT) adlı inşa halindeki yüksek bir binanın YSİ üzerine araştırmalar gerçekleştirmiştir. Binanın mevcut durumunu ve güvenliğini değerlendirmek amacıyla, mod şekilleri ve sönüm oranları

görsel bir modal tanımlama yöntemi ile elde etmişlerdir. Yapım aşamasında olan bu binadan 2015 yılında bir ortam titreşim testi gerçekleştirmişlerdir. Test verilerini kullanarak incelenen binanın mod şekillerini ve sönüm oranlarını karmaşık hesaplamalara gerek kalmadan küçük varyasyonlarla görsel olarak tanımlamışlardır. Ayrıca yapının basit bir sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve bu model çevresel titreşim testleri sonucunda elde edilen deneysel veriler vasıtasıyla doğrulanmıştır.

Shan vd. (2020), yüksek katlı binaların YSİ ve saha testleri konusundaki son gelişmeleri kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Çalışmada, YSİ sistemlerinin kurulum ve uygulanma süreçleri, özellikle son yıllarda inşa edilen en yüksek binalar üzerinde yapılan uygulamalar üzerinden incelenmiştir. Elde edilen veriler, binaların modal özelliklerini belirlemek, rüzgar yükleri gibi çevresel etkileri değerlendirmek ve bu verilere dayanarak yapısal performans değerlendirmeleri yapmak için kullanılmıştır. Bununla birlikte, YSİ ve saha testlerinin uygulanmasında karşılaşılan zorluklar da ele alınmıştır. Veri kalitesi, modelleme belirsizlikleri ve pratik kısıtlamalar gibi sorunların, gelecekteki araştırmalar ve uygulamalar için çözülmesi gereken önemli alanlar olduğu vurgulanmıştır. Bu çalışma, yüksek katlı binaların güvenliğini sağlamak ve performanslarını optimize etmek için YSİ ve saha testlerinin önemini ortaya koymaktadır.

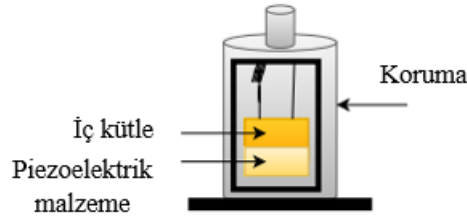
1.4. Yapı Sağlığı İzlemede Kullanılan Sensörler

Uygun bir sensör sistemi tasarımı, öncelikle temel gereksinimlerin tespiti ile başlar. YSİ sistemleri genellikle, farklı yapısal büyüklükleri ölçen bir sensör ağından oluşur. Bu sensörler vasıtasıyla yapının davranışı ve/veya çevresel koşullar gibi sensör ölçümlerini veya sistemin genel davranışını etkileyebilecek dış faktörleri izler. Sensörlerden elde edilen veriler, yapısal davranışın elde edilmesi, hasarın yerinin ve büyüklüğünün hassas bir şekilde elde edilmesi ve sistemin doğru bir şekilde tanımlanması için önemlidir. YSİ sistemlerinde yaygın olarak kullanılan sensörler arasında gerinim ölçerler, sıcaklık sensörleri, ivmeölçerler ve fiber optik sensörler bulunmakla beraber farklı fiziksel büyüklüklerinde ölçüldüğü birçok sensör tipi mevcuttur (Rocha vd., 2021).

1.4.1. İvmeölçerler

İvmeölçerler, nesnelerin üzerine etki eden ivme kuvvetlerini tespit eden ve bu sayede nesnelerin konumunu belirleyip hareketlerini izlemeye olanak sağlayan elektronik sensörlerdir. Mühendislik disiplininde ivme, bir nesnenin hızındaki değişimin oranı olarak tanımlanır. İvme kuvvetleri, sürekli olarak uygulanan statik kuvvetler ve farklı hızlarla uygulanan dinamik kuvvetler olarak ikiye ayrılır. Statik kuvvetler yerçekimi veya sürtünme gibi sürekli etki eden kuvvetlerken, dinamik kuvvetler hareket halinde ve değişken hızlarla uygulanır. İvmeölçerlerin, sistemlerin hem yerel hem de genel özelliklerini analiz etmede sağladığı güvenilir veriler ve bu özelliklerin iyi anlaşılmış olması, onları tercih edilen bir ölçüm aracı haline getirmektedir. YSI sistemlerinde yaygın olarak kullanılan ivmeölçer çeşitleri piezoelektrik ivmeölçerler, kuvvet-denge ivmeölçerler, kapasitif ivmeölçerler, MEMS (Mikro Elektro Mekanik Sistem) ivmeölçerler, piezorezistif ivmeölçerlerdir. Bu ivmeölçerlere ait açıklamalar aşağıdaki gibidir (Hassani & Dackermann, 2023).

- Piezoelektrik ivmeölçerler: İnşaat ve havacılık alanlarında en yaygın olarak kullanılan ivmeölçer türlerinden biridir. Bu sensörler, ivmeyi genellikle üç farklı modda ölçer: (i) kayma, (ii) eğilme ve (iii) basınç. Piezoelektrik malzemeler, üzerlerine uygulanan net kuvvetlere tepki olarak elektriksel yükler üretir. Bu malzemeler seramik, polimer ve kompozit olmak üzere sınıflandırılabilir. Elektrik-mekanik dönüşüm özellikleri sayesinde, piezoelektrik malzemeler hem aktüatör hem de sensör olarak işlev görebilir. İçlerinde hareketli parçaların bulunmaması, bu sensörlerin uzun ömürlü olmasını sağlar. Ayrıca geniş bir frekans aralığında kullanılabilirler, geniş bir dinamik aralıkta iyi bir doğrusal performans gösterirler ve çeşitli çevresel koşullara karşı dayanıklıdır. Ancak, minimum frekans gereksinimleri nedeniyle, bu sensörler kapasitif veya piezorezistif ivmeölçerlerin aksine, statik ivmeleri ölçme kabiliyetine sahip değildir (Şekil 1).



Şekil 1. Piezoelektrik ivmeölçer (Hassani & Dackermann, 2023)

- **Kuvvet-Denge İvmeölçerler:** Kuvvet-denge ivmeölçerler, bir kütlenin konumunu sabit tutmak amacıyla aktif geri besleme kontrol sistemlerini kullanır. Bu geri besleme mekanizması, kütlenin hareketini engelleyerek sistemin ivmesini hesaplamak için tasarlanmıştır. Sensör muhafazası ivmelenirken, kütle eylemsizlik referans çerçevesine göre sabit kalır ve bu nedenle nominal konumundan sapar. Bu sapmayı algılayan bir yer değiştirme sensörü kontrol sistemine bir hata sinyali gönderir. Sonuç olarak, kuvvet üreten elemana bir akım uygulanır ve bu akım, ivmenin neden olduğu kuvveti dengelemek için kullanılır. Kütle ve sistem özellikleri bilindiğinde, uygulanan akım ve kuvvet yardımıyla ivme hesaplanabilir. Kuvvet dengesi ivmeölçerler, düşük frekanslarda üstün çözünürlükleri, termal değişimlere karşı duyarsızlıkları ve doğrusal olmayan özellikleri nedeniyle genellikle yapı izleme sistemlerinde kullanılır. Ancak, bu sensörlerin dezavantajları arasında, diğer ivmeölçer türlerine kıyasla daha pahalı bir kontrol mekanizmasına sahip olmaları ve sınırlı bant genişlikleri yer alır.
- **MEMS ivmeölçerler:** MEMS ivmeölçerlerin temel tasarım ilkesi, geleneksel ivmeölçerlerdeki gibi bir doğrusal elastik mekanik bileşen (mikro işlenmiş kiriş, köprü veya membran) tarafından desteklenen bir ataletsel kütleyle dayanır. İvme, bu kütle üzerinde ataletsel kuvvetlerin oluşmasına yol açar ve bu kuvvetler kütlenin sıfır konumundan sapmasına neden olur. Bu sapma, bir algılayıcı tarafından elektrik sinyaline dönüştürülür ve daha sonra dahili bir entegre devre tarafından işlenerek sensör çıkışında görüntülenir. MEMS ivmeölçerlerde yaygın olarak kullanılan iki ana algılama türü, sismik kütlenin hareketini izleyen kapasitif ve piezorezistif algılayıcılardır. Bu bağlamda, kapasitif algılama teknolojisi, polikristalin silikondan yüzey mikro işlenmiş cihazlar ve tek kristalli mikro işlenmiş cihazlar gibi önemli cihaz türlerini kapsamaktadır (Meyer vd., 2009).

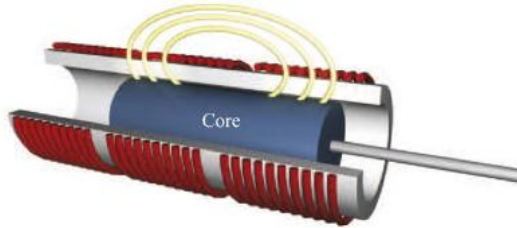
1.4.2. Fiber Optik Sensörler

Optik fiberler, silika cam veya polimer esaslı malzemelerden üretilmiş, silindirik yapıda dielektrik dalga kılavuzlarıdır. Bu kablolarda hem çekirdek hem de kaplama malzemeleri cam ya da plastikten oluşmakta, optik fiberin korunması amacıyla çevresel kaplamalar ise akrilat veya poliimid malzemelerinden imal edilmektedir. Optik fiberler, çekirdek çapı 50 ila 100 μm arasında değişen çok modlu ve çekirdek çapı 10 μm 'den küçük

olan tek modlu olmak üzere iki temel konfigürasyona sahiptir. Yapıların içerisine entegre edilen veya yüzeylerine monte edilen Fiber Optik Sensörler (FOS), yapının maruz kaldığı gerilmeler ve sıcaklık değişikliklerine bağlı olarak ufak ölçekte genişler veya büzülür. Fiber boyunca sensöre iletilen ışığın bir kısmı, sensörün uzunluğundaki bu değişimlere bağlı olarak modüle edilir. Sonrasında, sensör tarafından yansıtılan optik sinyal, yansıtılan ışığı sensörün uzunluğundaki değişimleri sayısal verilere dönüştüren bir analiz cihazına geri gönderilir. Elde edilen bu veriler, yapıda meydana gelen gerilmelerin miktarını ortaya koyar (Deng & Cai, 2007).

1.4.3. Lineer Değişken Diferansiyel Transformatör

Lineer Değişken Diferansiyel Transformatör (LVDT), doğrusal yer değiştirmeyi ölçmek için kullanılan gelişmiş elektromekanik sensörlerdir. Bu transformatörler, bir nesnenin doğrusal hareketini yüksek doğrulukla elektrik sinyallerine çevirir. LVDT'ler, manyetik özelliklere sahip bir şaft (çekirdek) ve bu çekirdeği çevreleyen bir bobin sisteminden meydana gelir (Şekil 2). Bu bobin sistemi, genellikle üç sargılı bir transformatör içerir: iki birincil sargı ve merkezi bir ikincil sargı. İkincil sargıların çıkışları, birbirine bağlanarak bir devre oluşturur. Birincil sargıya alternatif akım uygulandığında, manyetik iletken çekirdek, ikincil sargılardaki endüktans akımını etkiler. Çekirdek, ikincil sargılarla simetrik bir konumda olduğunda, ikincil çıkışlar voltajdan etkilenmez. Ancak, çekirdek hareket ettiğinde, ikincil sargılarda diferansiyel bir voltaj ortaya çıkar. Çekirdek merkezden uzaklaştıkça, çıkış voltajı doğrusal bir şekilde artış gösterir (Hassani & Dackermann, 2023).



Şekil 2. Lineer Değişken Diferansiyel Transdüksör (Fleming, 2013)

1.4.4.Lazer Doppler Vibrometresi

Lazer Doppler Vibrometresi (LDV), temas gerektirmeyen bir hız ve yer değiştirme sensörü olarak, büyük yapıların ve mikron boyutuna kadar uzanan küçük yapıların büyüklük ve frekans bileşenlerini ölçmek için kullanılır. LDV'ler, ölçülecek yapıya lazer ışını odaklayarak, yapıdan yansıyan veya dağılan ışığın Doppler frekans kaymasını veya faz kaymasını demodüle eder ve bu sayede lazer ışını eksenine paralel olan hız veya yer değiştirme bileşenini belirler. LDV'lerin temas gerektirmeyen yapısı, özellikle veri depolama bileşenleri için kritik olan yapının kütsel yüklenmesini engelleyerek, bileşenin doğal sertlik ve sönümlenme özelliklerinin korunmasını sağlar. Lazer Vibrometresi, nanometre altı hatta pikometre altı yer değiştirmeleri, neredeyse DC'den birkaç MHz'e kadar olan geniş bir frekans aralığında ölçebilen son derece hassas bir optik yöntemdir. LDV'lerin geniş dinamik aralığı, diğer sensörlerle karşılaştırılamayacak düzeyde olup, bu sayede diğer optik tekniklerin başaramadığı ölçümlerin gerçekleştirilmesine olanak tanır (Johansmann vd., 2005).

1.4.5.Tiltmetreler

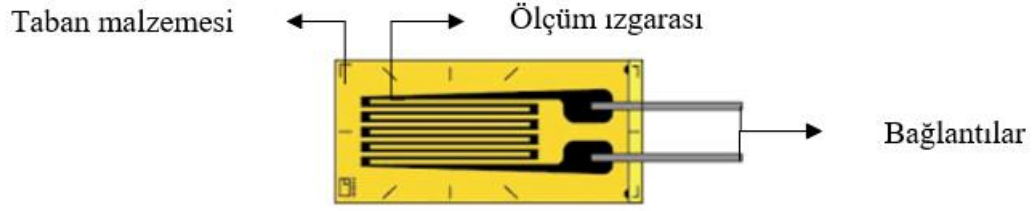
Tiltmetreler veya eğim sensörleri, en kararlı referans olan dikey yerçekimi vektörüne göre eğimleri ölçmek için kullanılan yüksek hassasiyetli cihazlardır. Bu sensörler, monte edildikleri yapıların açısal pozisyonlarını ve rotasyonel hareketlerini tespit etmek amacıyla kullanılır. Tiltmetrelerin temel çalışma prensibi, sıvı içinde yer alan bir kabarcığın her zaman yerçekimi vektörüne dik olarak hizalanması ilkesine dayanır. Bu kabarcık, sıvı dolu bir kap içinde bulunur ve üç elektrotla çevrilidir. İki uyarma elektrodu arasında uygulanan alternatif akım voltajı, merkezi alıcı elektrottaki alternatif akım çıkışının, eğim açısına bağlı olarak değişmesine neden olur. Alternatif akımın doğru akıma dönüştürülmesi, sinyal koşullandırma ünitesi adı verilen bir cihaz aracılığıyla gerçekleştirilir. Tiltmetrenin çalışma aralığı, cihazın çıkış kazancına bağlı olarak ± 70 miliradyan (mrad) veya ± 175 mrad arasında değişir (Berdugo vd., 1999). Günümüzde tiltmetrelerin kullanıldığı birçok uygulama vardır;

- İstinat duvarlarında dikey rotasyon, sapma ve deformasyonların izlenmesi,
- Demiryolu hatlarında farklı oturmaların izlenmesi,
- Heyelan bölgelerinde yapıların stabilitesinin değerlendirilmesi,
- Tünel hareketleri ve yakınsama davranışlarının izlenmesi,

- Köprüler ve destek yapılarının performansının değerlendirilmesi,
- Kazı veya tünel açma işlemlerinden etkilenen kritik yapıların ve altyapıların denetlenmesi,
- Barajlar, iskeleler ve kazıkların eğim ve rotasyon açısından incelenmesi (Hassani & Dackermann, 2023).

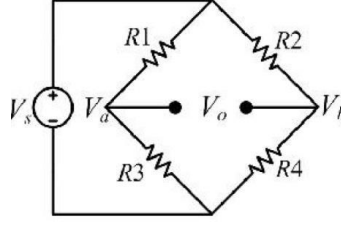
1.4.6. Şekil Değiştirme Ölçerler

Şekil değiştirme ölçerler, yapısal elemanlarda dış kuvvetlerin neden olduğu deformasyonları yüksek ölçüm hassasiyetiyle tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu cihazlar, ilk olarak Edward E. Simmons ve Arthur C. Ruge tarafından geliştirilmiştir (Hoffmann, 1989). Şekil değiştirme ölçerler, taban malzemesi, ölçüm ızgarası ve bağlantılar olmak üzere üç temel bileşenden oluşmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Şekil değiştirme ölçere ait genel görsel (İrsel, 2021)

Şekil değiştirme ölçer sensörleri, elektriksel sensörler olarak işlev görmektedir (İrsel, 2021). Bu sensörlerin ölçüm değerlerini belirlemek için Wheatstone köprüsü kullanılmaktadır. Wheatstone köprüsü, dört dirençten oluşan bir elektrik devresinde, bilinmeyen bir direnç değerini belirlemek amacıyla tasarlanmıştır. Şekil değiştirme ölçerin üzerindeki ölçüm ızgarası, sensörün elektriksel direncini oluşturan bileşendir. Sensörün monte edildiği yüzeyde meydana gelen şekil değiştirme, sensörün direncini değiştirerek bir voltaj farkı yaratır ve bu voltaj farkı, belirli matematiksel bağıntılar kullanılarak şekil değiştirme değerine dönüştürülür. Şekil 4'te tipik bir Wheatstone köprüsünün elektrik devre şeması verilmiş olup, şekil değiştirme ölçerlerde çeyrek, yarım ve tam Wheatstone köprüsü konfigürasyonları kullanılmaktadır.



Şekil 4. Tipik Wheatstone köprüsü (Ang, 2014)

1.4.7.Sıcaklık Sensörleri

Pek çok fiziksel uyarıcı, örneğin direnç, hacimsel genleşme, buhar basıncı ve spektral özellikler gibi parametreler, sıcaklığa bağlı olarak değişir. Bu sebeple, sıcaklığa bağlı bu fiziksel uyarıcılar, sıcaklık ölçüm sistemlerinin tasarımında ve geliştirilmesinde temel alınır. Elde edilen ölçüm sonucu, yani sıcaklık değeri, bir ölçüm ilkesine dayanan ölçüm modelinden türetilir. Bu model, ölçüm sırasında elde edilen veriler arasındaki matematiksel bir ilişkiye dayanır (Kuzubasoglu & Bahadır, 2020). Sıcaklık değişimleri, malzemelerin fiziksel özelliklerini etkileyebilir ve dolayısıyla mühendislik yapılarının YSİ için kullanılan parametrelerin karakteristiklerini değiştirebilir. Örneğin, sıcaklık artışı, yapısal dayanıklılığı artırabilir ve bu durum, bir yapının modal parametrelerini değiştirebilir (Mujica vd., 2020). Sıcaklık ölçümleri, yapıların iç durumlarına ilişkin önemli bilgiler sağlayabilir; bu durumlar arasında çatlak oluşumu, yorulma ve akma gibi yapısal sorunlar bulunmaktadır. Sıcaklığa duyarlı olan bazı sensörlerin varlığı nedeniyle, sıcaklığın doğru bir şekilde ölçülmesi ve gerekirse sıcaklık düzeltmelerinin yapılması hayati bir önem taşır. Bu amaçla çeşitli sensörler kullanılmaktadır; bu sensörler arasında termokupllar, direnç sıcaklık dedektörleri, termografi cihazları, biyomalzeme sıcaklık sensörleri, fiber optik sensörler, piroelektrik termometreler ve elektrik dirençli termometreler bulunmaktadır (Hassani & Dackermann, 2023).

1.4.8.Yapı Sağlığı İzlemede Yeni Nesil Algılama Teknikler

- İnsansız Hava Araçları (İHA'lar): Geleneksel temas tabanlı sensörler, yüzeyin erişilemediği veya çok sayıda sensörün kurulmasının gerektiği durumlarda ekonomik ve pratik zorluklar yaratmaktadır. Bu bağlamda, İnsansız Hava Araçları (İHA'lar), diğer adıyla dronlar, temassız ölçüm teknolojisi alanında taşınabilir bir alternatif

olarak dikkat çekmektedir. Kontrol teorileri, hesaplama teknolojileri, iletişim, robotik ve otomasyon alanlarındaki hızlı gelişmeler, İHA'ların YSİ alanındaki uygulamalarını yaygınlaştırmıştır. Hafif kameralar ile donatılan İHA'lar, yapının hem yerel hem de genel durumunu tespit etmek amacıyla görüntü yakalama işlevini başarıyla yerine getirmektedir. İHA'lar genellikle görsel servo destekli standart bir kamera (örneğin, kızılötesi kamera, optik sensör), navigasyon sistemi ve KKS içeren bir görüntüleme sistemi ile donatılmaktadır. Uçuş sırasında veri toplama ve uçuş sonrası görüntü işleme yeteneklerine sahip olan İHA'lar, yerden bir operatör tarafından uzaktan kumanda edilebilir. Son yıllarda, İHA'lar, boru hattı, köprü ve baraj gibi yapıların YSİ uygulamasında kullanılmaktadır. Ayrıca, İHA'ların sağladığı üç boyutlu yapı bilgisi, büyük ölçekli yapılar için değerli bir avantaj sunmaktadır (Sony vd., 2018).

- Akıllı Telefonlar: Günümüz akıllı telefonları, yapıların durum değerlendirmesi amacıyla kullanılabilecek ivmeölçerler, jiroskoplar ve KKS gibi sensörlerle donatılmıştır. 2010 yılından itibaren, düşük maliyetli akıllı telefonların yaygınlığı, taşınabilirlik özellikleri, geniş depolama kapasiteleri, yüksek hesaplama gücü ve yazılımlarının kolayca özelleştirilebilir olması nedeniyle, bu cihazların YSİ uygulamalarında kullanımı giderek artmaktadır. Android işletim sistemi öncesinde, dokunmatik ekranlı akıllı telefonların sınırlı sayıda olduğu dönemde, ilk araştırmalar insan hareketlerinin tespitine odaklanmıştır. Ancak, uygun fiyatlı akıllı telefonların yaygınlaşmasıyla birlikte, bu cihazların yapı izleme ve güçlendirme çalışmaları için kullanımı daha da yaygın hale gelmiştir. Akıllı telefonların sahip olduğu çeşitli avantajlar, bu cihazları büyük ölçekli yapıların YSİ uygulamalarında kullanılabilir hale getirmiştir (Sony vd., 2018).
- Kameralar: Görsel algılama teknolojilerinin düşük maliyetli versiyonlarında kayda değer bir artış gözlenmekte olup, bu teknolojiler sayesinde yapıların uzaktan yüksek kaliteli durum analizleri gerçekleştirilebilmektedir. Veri toplamak amacıyla oldukça gelişmiş yüksek hızlı kameralar kullanılmaktadır. Kameralar genellikle saniye başına kare sayısı, piksel çözünürlüğü, bant genişliği ve görüntü sabitleme gibi teknik parametrelerle tanımlanmaktadır. Mevcut kamera bazlı yöntemler arasında dijital görüntü korelasyonu ve hareket büyütme gibi çeşitli teknikler bulunmaktadır. Görsel tabanlı YSİ yaklaşımları genellikle dört temel aşamadan oluşmaktadır: kamera kalibrasyonu, görüntü elde etme ve düzeltme, yer değiştirme alanı ölçümü ve hasar

tespiti. Dijital görüntü korelasyonu yöntemi yaygın olarak kullanılsa da yüksek frekanslı titreşimlere bağlı olarak meydana gelen düşük hareket miktarları belirli zorluklara neden olmaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, yapıların operasyonel sapma şekillerini daha iyi anlamak amacıyla hareket büyütme adı verilen yeni bir araç geliştirilmiştir. Dijital görüntü korelasyonu ve hareket büyütme yöntemlerinin birleştirilmesi, yüksek frekanslı titreşimler altında düşük yer değiştirmeleri ölçme konusunda ortaya çıkan zorlukları belirli bir frekansa kadar aşmada etkili olabilmektedir (Sony vd., 2018; Molina-Viedma vd., 2018).

1.4.9.Yapı Sağlığı İzlemede Veri Toplama Sistemi ve Sinyallerin İşlenmesi

Veri toplama sistemi, temel olarak veri toplama ünitesi ve bilgisayardan oluşur. Veri toplama ünitesi, ivmeölçerlerden gelen sinyalleri toplar ve bunları ilgili bilgisayar programına iletmek amacıyla kullanılır. Bilgisayar programı ise bu sinyallerin işlenmesine yönelik bir arayüz sağlar. Sinyal toplama ve işleme süreci şu şekilde özetlenebilir: İvmeölçerlerden veri toplama ünitesine aktarılan sinyaller genellikle ham verilerdir ve yapı titreşimleri ile çevresel gürültülerden etkilenmektedir. Ham verilerin doğrudan kullanılması, yapı davranışını doğru bir şekilde analiz etmeyi zorlaştırabilir. Bu nedenle veri toplama sisteminin en temel görevlerinden biri, sinyal koşullamadır. Sinyal koşullama, ham verilerin istenen kalite düzeyine getirilmesi sürecidir. Bu süreç, düşük seviyeli sinyallerin iyileştirilmesi, gürültü kaynaklı sinyallerin etkisinin azaltılması, istenmeyen sinyallerin filtrelenmesi ve ivmeölçerlerin elektriksel güç ayarlarının düzenlenmesini içerir. Veri toplama sisteminde bulunan sinyal koşullandırıcılar, bu işlemlerin kesintisiz ve doğru bir şekilde yapılmasını sağlar. Süreçteki en kritik adım, seçilen frekans aralığının dışındaki sinyallerin filtrelenmesidir. Eğer sinyaller düşük hızda ölçülürse, yüksek frekanslı sinyallerin düşük frekanslı sinyaller olarak algılanması ölçüm hatalarına neden olabilir. Bu tür hataların önlenmesi için, ölçüm hızının en yüksek frekansın en az iki katı olması gerekmektedir (Heylen vd., 2007; Ramos, 2007).

Yapıların dinamik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, ivmeölçerlerden elde edilen verilerin veri toplama ünitesine aktarılmasının ardından bu sinyallerin işlenmesi gerekmektedir. Bu işlem, "sinyal işleme" olarak adlandırılmaktadır. Sinyal işleme süreci, sinyallerin veri toplama ünitesinde sinyal koşullama işlemleri tamamlandıktan sonra bilgisayar ortamına aktarılmasıyla başlar. Bilgisayar ortamında sinyallerin işlenmesi, bu

amaca yönelik özel olarak geliştirilmiş yazılımlar kullanılarak yapılır. Genellikle sinyaller, zaman tanım alanında bilgisayara aktarılmakla birlikte, pratik nedenler ve hesaplama kolaylığı nedeniyle frekans tanım alanı daha sık tercih edilir. Zaman tanım alanındaki sinyallerin frekans tanım alanına dönüştürülmesi işlemi Fourier serileri kullanılarak gerçekleştirilir. $x(t)$ ile gösterilen periyodik bir sinyal sonsuz Fourier serisine açıldığında,

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \right] \quad (1.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Ramos, 2007). Burada, a_0 , a_n , b_n sırasıyla aşağıdaki gibidir:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

Sonsuz Fourier serisine açılan sinyal, t_k ($k=1,2,3,\dots,N$) gibi sonlu bir zamana karşılık gelmektedir. Bu durumda sonlu sinyal Fourier serisine açıldığında,

$$x_k = x(t_k) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi k}{N} n\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi k}{N} n\right) \right], \quad k=1,2,\dots,N \quad (1.3)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, a_0 , a_n , b_n sırasıyla aşağıdaki gibidir:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x_k \\ a_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \cos \frac{2\pi nk}{N} \\ b_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \sin \frac{2\pi nk}{N} \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

Sinyal işleme sürecinde karşılaşılan en önemli problemlerden biri sızıntı hatasıdır. Bu hata, sinyalin periyodik olmamasından ve sinyal periyodunun tam katlı olmamasından kaynaklanır. Sızıntı hatasını azaltmak için ölçüm süresinin artırılması önerilmektedir. Alternatif olarak, pencereleme yöntemleri de bu sorunun çözümünde etkili bir rol oynar. Pencereleme teknikleri, sinyal periyodunu tam katlı hale getirerek sızıntı hatasını ortadan kaldırmayı amaçlar (Heylen vd., 2007; Ramos, 2007; Şahin, 2009; Sevim, 2010).

1.5. Yapı Sağlığı İzlemede Kullanılan Yöntemler

Yapı sağlığı izlemede mevcut durum değerlendirmesinde kullanılan yöntemler Lokal ve Global yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Doebeling vd., 1998).

1.5.1. Lokal Yöntemler

Lokal yöntemler, yapısal elemanlardaki bölgesel hasarın tespiti ve izlenmesi amacıyla kullanılmaktadır (Shih, 2009). Bu yöntemler arasında ultrasonik, eddy current, sıvı penetrant, radyografi, akustik emisyon ve görsel inceleme gibi teknikler yaygın olarak kullanılmaktadır. Lokal yöntemler, özellikle yapısal elemanların belirli bölgelerindeki çatlaklar veya delaminasyon gibi hasarların tespitinde etkilidir (Pawar & Ganguli, 2011). Ancak, bu yöntemler genellikle zaman alıcı ve maliyetli olup, yapının genel durumu hakkında kapsamlı bilgi sunmamaktadır. Bu sebeple, lokal yöntemler genellikle küçük ve karmaşık olmayan yapılar için tercih edilmektedir (Chang, 2003; Shih, 2009).

1.5.2. Global Yöntemler

Global yöntemler, yapının genel durumu hakkında kapsamlı bilgi sağlarken, aynı zamanda olası hasarların tespit edilmesinde de kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında optik inceleme, optoelektronik tarama, üç boyutlu lazer tarama ve titreşime dayalı yöntemler gibi çeşitli teknikler bulunmaktadır. Titreşime dayalı yöntemler, yapının karmaşıklığından bağımsız olarak, yapıda meydana gelen davranış farklılıklarından kaynaklanan değişimlere duyarlı oldukları için en yaygın kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır (Boscato,

2019). Bu nedenle, bu tez çalışmasında yapıların mevcut durumlarının ve uzun süreli yapısal performanslarının değerlendirilmesinde titreşime dayalı yöntemler tercih edilmiştir.

Titreşime dayalı yöntemler ÇTY ve Zorlanmış Titreşim Yöntemi olarak ikiye ayrılır. ÇTY mühendislik yapılarının çevresel etkiler altında doğal olarak titreştiğini varsayar ve bu titreşimlere karşı yapının verdiği tepkiyi ölçmeyi amaçlar. Bu yöntemde, yapıyı titreştiren çevresel kuvvetler doğrudan ölçülemediği için Etki Davranış Fonksiyonu belirlenemez. Bu nedenle, literatürde ÇTY, Operasyonel Modal Analiz veya Sadece Tepki Analizi olarak da adlandırılmaktadır (Brincker vd., 2003). ÇTY’de, yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla frekans ve zaman tanım alanında çeşitli algoritmalar kullanılmaktadır. Frekans tanım alanındaki yöntemler, etki ve tepki güç spektrum yoğunluğu arasındaki ilişkiye dayanırken, zaman tanım alanındaki yöntemler tepki zaman geçmişindeki korelasyon fonksiyon analizlerini esas alır (Bendat & Piersol, 2011). Frekans tanım alanında sıkça kullanılan yöntemler arasında Piklerin Seçilmesi, Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi ve Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi yer alır. Zaman tanım alanında ise En Büyük Olabilirlik Yöntemi, Rastgele Azalım Yöntemi, Rekürsif Teknikler ve Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemleri öne çıkmaktadır (Ramos, 2007). Bu tez çalışmasında, yapıların dinamik davranışlarını belirlemek amacıyla, frekans ortamında Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi (GFTAA) kullanılmıştır.

Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) yöntemi, Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (FTAA) yönteminin daha kapsamlı bir versiyonudur ve ÇTY’lerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Zahid vd., 2020). Bu yöntemde, güç spektral matrisinin tekil değer ayrıştırması yapılarak spektral yoğunluk fonksiyonu oluşturulur ve bu fonksiyondaki piklerin seçimiyle modlar belirlenir. FTAA yöntemi, doğal frekanslar ve mod şekillerini tespit etmede başarılı olsa da sönüm oranlarını belirleyemez. GFTAA yöntemi ise, doğal frekanslar ve mod şekillerini daha yüksek doğrulukla tahmin edebilmenin yanı sıra sönüm oranlarını da elde edebilme avantajına sahiptir (Jacobsen, 2006). Ancak, GFTAA yöntemiyle hesaplanan sönüm oranlarının ölçüm gürültüsünden etkilenmesi, bu yöntemin kesin sonuçlar üretmesini zorlaştırmaktadır ve bu alan hâlâ geliştirilme potansiyeline sahiptir (Hasan vd., 2018). GFTAA yönteminde bilinmeyen etki kuvveti ve bilinen davranış fonksiyonu arasındaki ilişki,

$$G_{yy}(j\omega) = H(j\omega)^* G_{xx}(j\omega) H(j\omega)^T \quad (1.5)$$

şeklinde ifade edilmektedir. (Bendat & Piersol, 2004). Burada $G_{xx}(j\omega)$ etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk (GSY) Fonksiyonunu, $G_{yy}(j\omega)$ tepki sinyalinin GSY Fonksiyonunu, $H(j\omega)$ frekans davranış fonksiyonunu, $*$ ifadesi kompleks eşleniğini ve T transpozisini göstermektedir. Her adım ($\omega = \omega_i$) için tepki sinyalinin güç yoğunluk matrisinin tekil değer ayrışım yöntemi kullanılmasıyla,

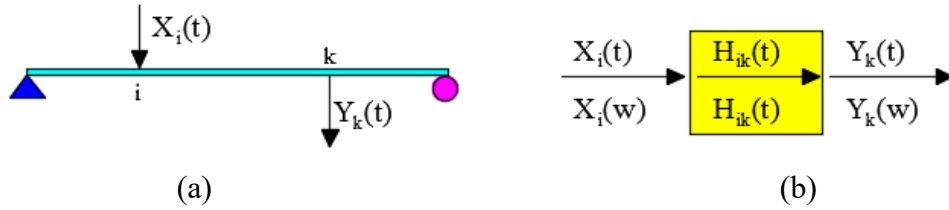
$$G_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^H \quad (1.6)$$

ifadesi elde edilmektedir (Rainieri & Fabbrocino, 2008; Brincker vd., 2000). Burada u_{ij} tekil vektörleri olmak üzere $U_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}]$ tekil vektörleri içeren bütün matrisi, s_{ij} skaler tekil değerleri ve $S_i = [s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im}]$ skaler tekil değerleri içeren diyagonal matrisi göstermektedir. Denklem (1.2)'de verilen GSY fonksiyonunda elde edilen skaler tekil değerlerden, pik değer yapan noktalar doğal frekanslara ve o noktaları oluşturan tekil vektörler mod şekillerine karşılık gelmektedir.

Bir diğer titreşime dayalı yöntem olan Zorlanmış Titreşim Yöntemi'nde, yapıya $X_i(t)$ gibi ölçülebilir bir etki uygulandığında, yapının bu etkiye verdiği tepki $Y_k(t)$ de aynı anda ölçülmektedir (Şekil 5a). Bu ölçülebilir etkiler, genellikle sarsıcılar veya darbe çekiçleri gibi cihazlar kullanılarak yapıya uygulanır. Ölçülen bu sinyaller, frekans tanım alanında Hızlı Fourier Dönüşümü kullanılarak, etki-tepki zaman sinyalleri arasındaki ilişkiyi ifade eden FDF- H_{ik} , Transfer Matrisi $H_{ik}(i\omega)$ olarak adlandırılan FDF matrisine dönüştürülür (Şekil 5b) (Schwarz ve Richardson, 1999). Zorlanmış Titreşim Yöntemi'nde, etki-tepki sinyalleri arasındaki ilişki,

$$H_{ik} = \frac{Y_k(\omega)}{X_i(\omega)} \quad (1.7)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; $H_{ik}(i\omega)$ Frekans Davranış Fonksiyonu' nu, $X_i(\omega)$ frekans tanım alanındaki tepki fonksiyonunu ve $Y_k(\omega)$ frekans tanım alanındaki etki fonksiyonunu göstermektedir. Farklı sayısal teknikler yardımıyla Frekans Davranış Fonksiyonu kullanılarak yapıya ait dinamik karakteristikler elde edilmektedir.



Şekil 5. Zorlanmış Titreşim Yöntemi'ne ait (a) Şematik gösterim (b) Frekans davranış fonksiyonunun belirlenmesi

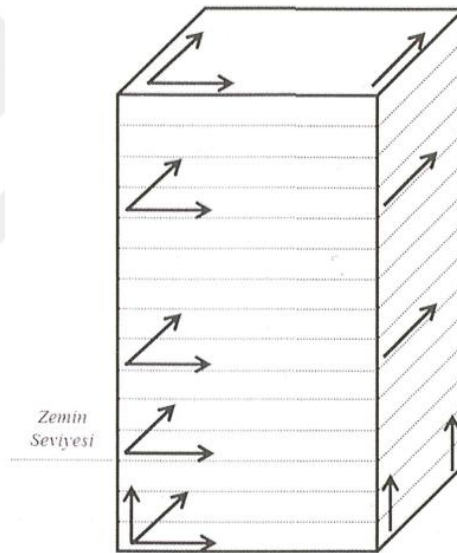
1.6. Yapı Sağlığı İzleme Yönetmelik ve Yönergeleri

YSİ, her ne kadar tüm yönetmeliklere tam anlamıyla entegre edilmemiş olsa da dünya genelinde bazı yönetmelik ve yönergelerde yer almakta ve uygulanma koşulları belirlenmektedir. Uniform Building Code (UBC-97), San Francisco Building Code (SFBC-2013) ve Earthquake Recording Instrumentation of the National Structural Code of the Phillipines (NSCP-2015) gibi yönetmelikler YSİ sistemlerinin inşaat mühendisliği yapılarına uygulanması için önemli kılavuzlardan bazılarıdır. UBC-97, 3. ve 4. sismik bölgelerde bulunan, toplam oturma alanı 5.574 m² veya daha fazla olan ve altı kattan yüksek binalarda ve oturma alanından bağımsız olarak on kattan yüksek binalarda, en az üç onaylı ivmeölçer ile donatılması gerektiğini ifade etmiştir. SFBC-2013'te ise UBC-97'de verilen koşullara benzer şekilde YSİ sistemlerinin kurulması önerilmiştir. UBC-97'den farklı olarak bu ivmeölçerlerin üç eksenli olması gerektiği ifade edilmiştir. NSCP-2015'e göre sismik bölge 4'te ve özellikle Tip A fay hattına 200 kilometre mesafede bulunan binaların deprem kayıt cihazlarıyla donatılması zorunludur. Ayrıca 50 metreden yüksek binalar, 50 yatak kapasitesine sahip hastaneler, en az 20 sınıfı olan okullar ve 1.000 kişilik kapasiteye sahip ticari ve endüstriyel binalar en az üç ivmeölçer ile donatılmalıdır. Bu cihazlar, binanın zemin katı veya bodrumu, orta katları ve çatı katına yerleştirilerek kapsamlı bir sismik izleme yapılmalıdır. Ayrıca, 200 kilometre mesafesi dışındaki binalar için yalnızca zemin kat veya bodrum katına bir ivmeölçer yerleştirilmesi yeterlidir.

Ülkemizde 2018 yılında yayımlanıp 1 Ocak 2019'dan itibaren yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018)'e göre, Deprem Tasarım Sınıfı (DTS) 1, 1a, 2, 2a sınıfı olan ve yüksekliği 105'm'den büyük olan binalarda YSİ sistemi kurulması zorunludur. YSİ sistemi ile elde edilen kayıtların gerçek zamanlı olarak Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) ve yapı sahibi tarafından tutulmasına imkân verecek şekilde, başkanlıkça yayımlanan yönergeye uygun bir YSİ sistemi kurulmalıdır. Ayrıca AFAD

tarafından hazırlanan 10 Ocak 2020 tarihli Yapı Sağlığı İzleme Sistemi Uygulama Yönergesi (YSİUY-2020) ile bu binalarda kurulacak YSİ sistemlerinin uygulama biçimleri ve özellikleri belirlenmiştir. Bu yönergede belirtilen minimum ivmeölçer sayısı Tablo 1’de, bu ivmeölçerlerin binadaki yerleşim planı Şekil 6’da, yerleştirilecek ivmeölçer özellikleri ise Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Minimum ivmeölçer sayısı (YSİUY-2020)	
Zemin Seviyesinin Üstündeki Bina Yüksekliği (m.)	Minimum Kanal Sayısı
105-155	16
156-205	24
>205	32



Şekil 6. İvmeölçer yerleşimi (YSİUY-2020)

Tablo 2. İvmeölçer özellikleri (YSİUY-2020)	
Dinamik aralık	>144 dB+
Frekans Aralığı	0.01 – 200 Hz
Gürültü Seviyesi	< 1µg RMS
Ölçüm aralığı	+/- 2g

1.7. Tezin Amacı ve İçeriği

Yüksek binalar, kullanım ömürleri boyunca maruz kaldıkları çevresel ve operasyonel etkiler altında yapısal bütünlüklerini korumak zorundadır. Bu bağlamda, YSİ sistemleri, bu tür yapıların performanslarının izlenmesinde ve olası hasarların erken tespitinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu tez çalışmasının amacı, ÇTY kullanılarak yüksek binaların dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi ve bu dinamik karakteristikler aracılığıyla yapı sağlıklarının izlenmesidir. Tez kapsamında, 26 ve 23 katlı iki betonarme yapının dinamik karakteristikleri hem analitik hem de deneysel yöntemlerle elde edilmiştir. Bu amaçla binaların sonlu eleman modelleri ETABS yapısal analiz programında oluşturulmuştur. Bu sonlu eleman modelleri vasıtasıyla modal analizler gerçekleştirilmiş ve yapıya ait dinamik karakteristikler sayısal olarak elde edilmiştir. Ayrıca, hem 26 katlı hem de 23 katlı binanın dinamik karakteristikleri ortam titreşim testleri vasıtasıyla deneysel olarak belirlenmiştir. 26 katlı binadan bir yıl ara ile iki ölçüm gerçekleştirilmiştir. 23 katlı binada ise bir yıl süre ile aralıksız (gerçek zamanlı) olarak deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler ışığında incelenen binaların dinamik karakteristiklerinde zamanla bir değişimin olup olmadığı araştırılmıştır. Öte yandan, bu deneysel veriler ile sayısal veriler karşılaştırmalı olarak da incelenmiştir. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen gerçek zamanlı ölçüm sırasında meydana gelen ve asrın felaketi olarak tanımlanan 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin incelenen yapıdaki yapısal tepkileri ne ölçüde artırdığı ve dinamik karakteristikler üzerindeki etkisi de irdelenmiştir. Elde edilen veriler, yapının dinamik karakteristiklerinin değişimleri üzerinden analiz edilmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

Bu tez çalışmasının amacı, ÇTY kullanılarak yüksek binaların dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi ve bu dinamik karakteristikler aracılığıyla yapı sağlıklarının izlenmesidir. Tez kapsamında, 26 ve 23 katlı iki betonarme yapının dinamik karakteristikleri hem analitik hem de deneysel yöntemlerle elde edilmiştir. İncelenen binalar Trabzon İli, Yomra İlçesinde bulunmaktadır. Binalara 40.961156 enlem ve 39.849733 boylamda bulunmaktadır (Şekil 7). Binaların tasarımı Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik (DBYBHY-2007) esasları dikkate alınmıştır. İncelenen binalara ait görseller Şekil 8’de sunulmuştur.



Şekil 7. Binaların bulunduğu konum



Şekil 8. İncelenen binalara ait görseller

2.1. İncelenen Binalara Ait Geometrik Özellikler

Tez kapsamında incelenen binalardan ilki Bodrum Kat + Zemin Kat + 24 Normal Kat olmak üzere toplam 26 kattan oluşmaktadır. Bu binanın oturum alanı 900m² olup binanın ± 0.00 kotu üstü yüksekliği 86.80m'dir. Bodrum Kat, Zemin Kat ve Normal Kat yükseklikleri sırasıyla 4.20m, 3.30m ve 3.30m'dir. Betonarme çerçeve + perde taşıyıcı sisteme sahip binanın döşeme sistemi asmolen döşemedir. Binanın taşıyıcı sistem elemanlarına ait kesit boyutları aşağıdaki gibidir:

Kolonlar: 40×150cm, 40×100cm, 40×130cm, 40×140cm, 40×85cm, 40×110cm, 40×190cm, 40×90cm, 45×140cm, 70×100cm, 80×40cm, 70×40cm, 45×165cm, 30×176cm, 205×30cm.

Perdeler: 30×325cm, 30×420cm, 30×380cm, 30×210cm, 40×280cm, 30×336cm, 30×260cm, 30×250cm.

Kirişler: 105×32cm, 90×32cm, 25×70cm, 30×70cm, 40×32cm, 65×32cm, 80×32cm, 30×60cm, 55×32cm, 85×32cm, 80×40cm, 70×40cm, 60×32cm, 100×32cm, 50×32cm.

Tez kapsamında incelenen binalardan ikincisi ise Bodrum Kat + Zemin Kat + 20 Normal Kat + Çatı Katı olmak üzere toplam 23 kattan oluşmaktadır. Binanın oturum alanı 1445m² olup binanın ± 0.00 kotu üstü yüksekliği 73.60m'dir. Bodrum Kat, Zemin Kat ve Normal Kat yükseklikleri sırasıyla 4.20m, 3.30m ve 3.30m'dir. Betonarme çerçeve + perde taşıyıcı sisteme sahip binanın döşeme sistemi asmolen döşemedir. Binanın taşıyıcı sistem elemanlarına ait kesit boyutları aşağıdaki gibidir:

Kolonlar: 50×80cm, 50×175cm, 40×130cm, 30×170cm, 40×100cm, 40×210cm, 30×135cm, 40×120cm, 80×40cm, 70×40cm, 40×170cm, 30×145cm, 50×175cm.

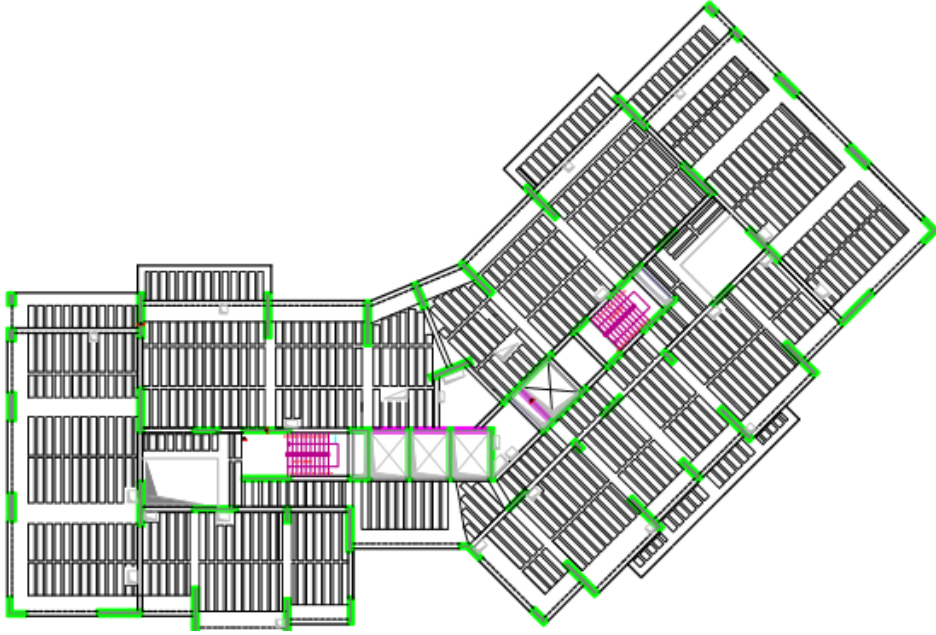
Perdeler: 30×305cm, 30×420cm, 30×405cm, 30×455cm, 30×330cm, 30×336cm, 30×260cm, 30×250cm.

Kirişler: 115×32cm, 100×32cm, 130×32cm, 120×32cm, 125×32cm, 30×70cm, 40×32cm, 65×32cm, 80×32cm, 55×32cm, 85×32cm, 60×32cm, 50×32cm.

Tez çalışması kapsamında incelenen binalara ait tipik kat planları Şekil 9'da verilmiştir.



(a) 26 Katlı Bina



(b) 23 Katlı Bina

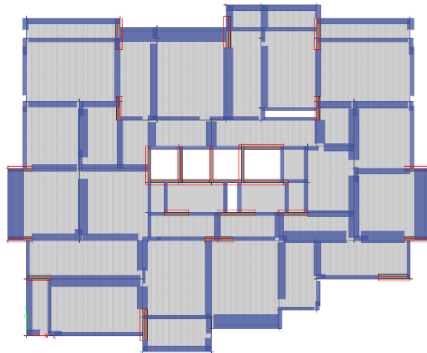
Şekil 9. Binalara ait kat planları

2.2. Analitik Çalışmalar

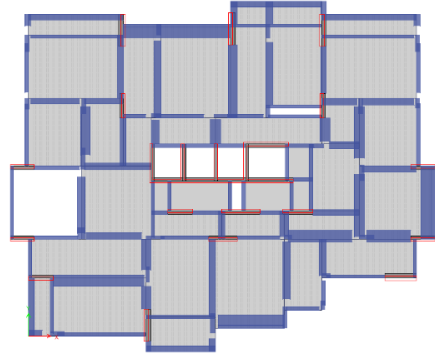
23 katlı ve 26 katlı betonarme binanın dinamik karakteristiklerinin sayısal olarak belirlenebilmesi amacıyla sonlu eleman modeli ETABS yapısal analiz programında oluşturulmuştur. Sonlu eleman modelinin oluşturulması sırasında taşıyıcı sistem boyutları ve özellikleri proje verilerinden dikkate alınmıştır.

2.2.1. Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

23 katlı ve 26 katlı binaya ait sonlu eleman modelleri oluşturulurken, kolonlar ve kirişler çubuk eleman olarak modellenmiştir. Perdelerin modellenmesinde ise kabuk elemanlar kullanılmıştır. Binaların döşeme sistemi asmolen döşeme olup sonlu eleman modelinde döşemeler oluşturulurken nervürlü döşeme tipi seçilmiştir. 26 katlı bina bodrum kat tavanı ve zemin kat tavanı olmak üzere iki adet farklı kalıp planına sahiptir. Bu katlara ait plan görünüşleri Şekil 10’da verilmiştir. 26 katlı binaya ait sonlu eleman modelinin oluşturulması sırasında dikkate alınan malzeme özellikleri ise Tablo 3’te sunulmuştur. 26 katlı binaya ait sonlu eleman modeli ise Şekil 12’de verilmiştir. 23 katlı bina bodrum kat tavanı ve zemin kat tavanı olmak üzere iki adet farklı kalıp planına sahiptir. Bu katlara ait plan görünüşleri Şekil 11’de verilmiştir. 23 katlı binaya ait sonlu eleman modelinin oluşturulması sırasında dikkate alınan malzeme özellikleri ise Tablo 4’te sunulmuştur. 26 katlı binaya ait üç boyutlu sonlu eleman modeli ise Şekil 13’te verilmiştir.

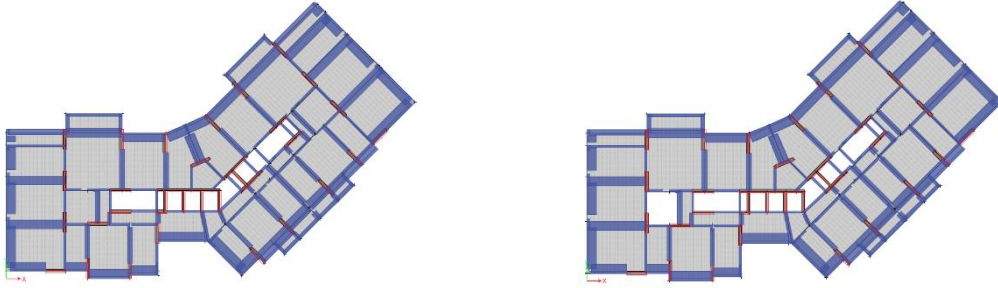


Bodrum kat kalıp planı



Zemin kat tavanı kalıp planı

Şekil 10. 26 katlı bina için sonlu eleman modelindeki kalıp planları



Zemin kat ve normal kat tavanı kalıp planı

Bodrum kat tavanı kalıp planı

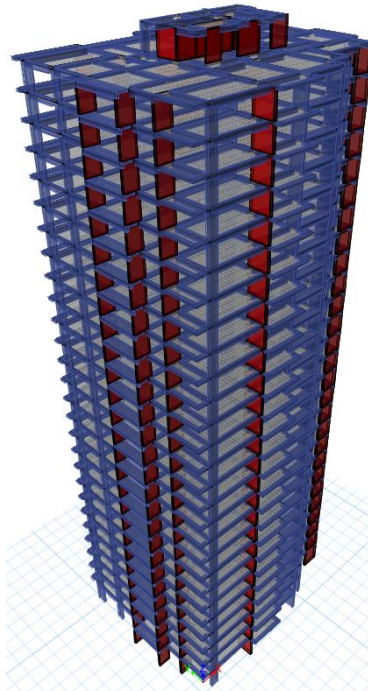
Şekil 11. 23 katlı bina için sonlu eleman modelindeki kalıp planları

Tablo 3. Sonlu eleman modelinde dikkate alınan malzeme özellikleri

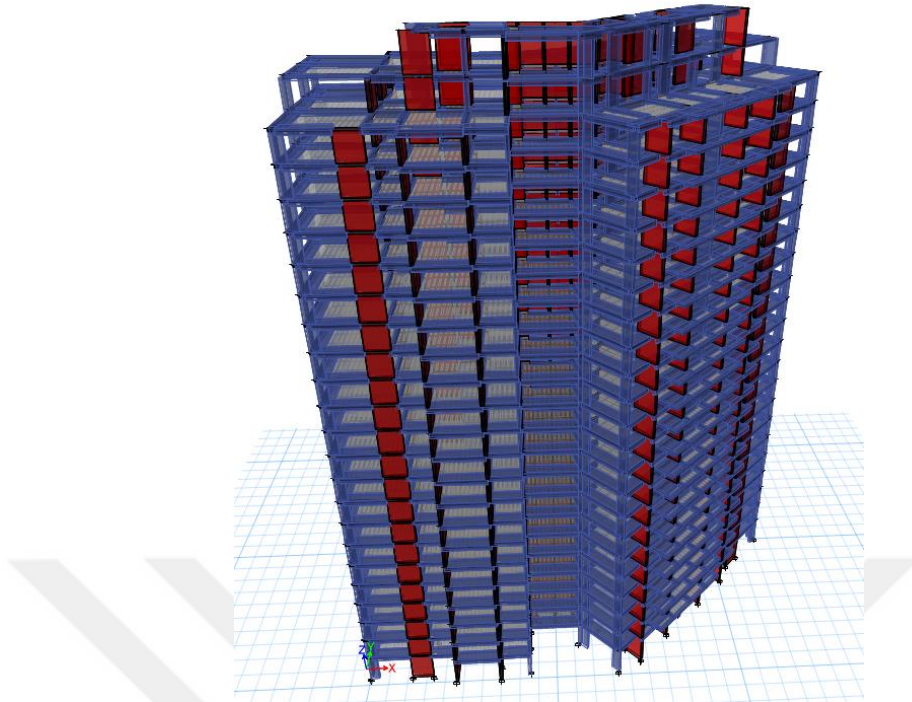
Malzeme	Malzeme Özellikleri		
	Elastisite Modülü (N/mm ²)	Poisson Oranı (-)	Yoğunluk (kN/m ³)
Beton	32000	0.20	25.00
Donatı	200000	-	76.97

Tablo 4. Sonlu eleman modelinde dikkate alınan malzeme özellikleri

Malzeme	Malzeme Özellikleri		
	Elastisite Modülü (N/mm ²)	Poisson Oranı (-)	Yoğunluk (kN/m ³)
Beton	32000	0.20	25.00
Donatı	200000	-	76.97



Şekil 12. 26 katlı binaya ait üç boyutlu sonlu eleman modeli



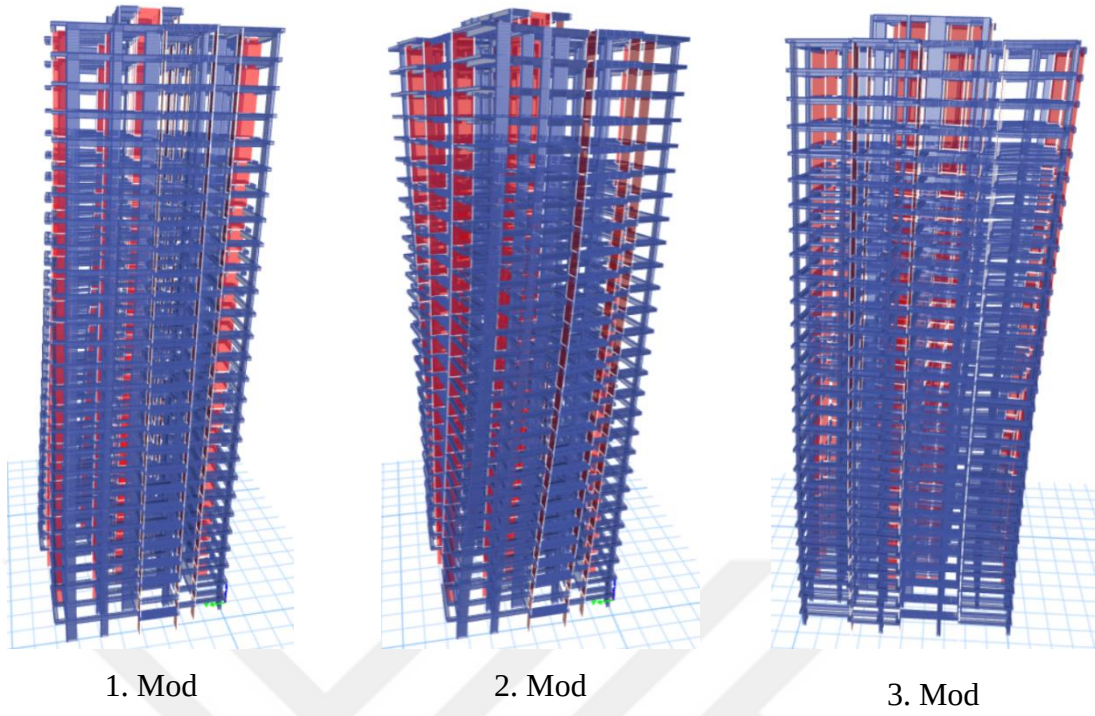
Şekil 13. 23 katlı binaya ait üç boyutlu sonlu eleman modeli

2.2.2. Dinamik Karakteristiklerinin Sayısal Olarak Belirlenmesi

26 katlı binanın dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla ETABS programında oluşturulan sonlu eleman modeli aracılığı ile modal analiz gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler neticesinde binanın ilk üç mod şekline ait frekans ve mod şekilleri elde edilmiştir. Frekans değerleri Tablo 5'te mod şekilleri ise Şekil 14'te sunulmuştur. Binanın ilk üç moduna ait frekans değerleri sırasıyla 0.545Hz, 0.585Hz ve 0.711Hz olarak elde edilmiştir. Şekil 12 incelendiğinde, 1.ve 3. modların öteleme, 2. modun ise burulma modu olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 5. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk üç mod

Mod No	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli
1	0.545	1.836	öteleme
2	0.585	1.709	burulma
3	0.711	1.407	öteleme

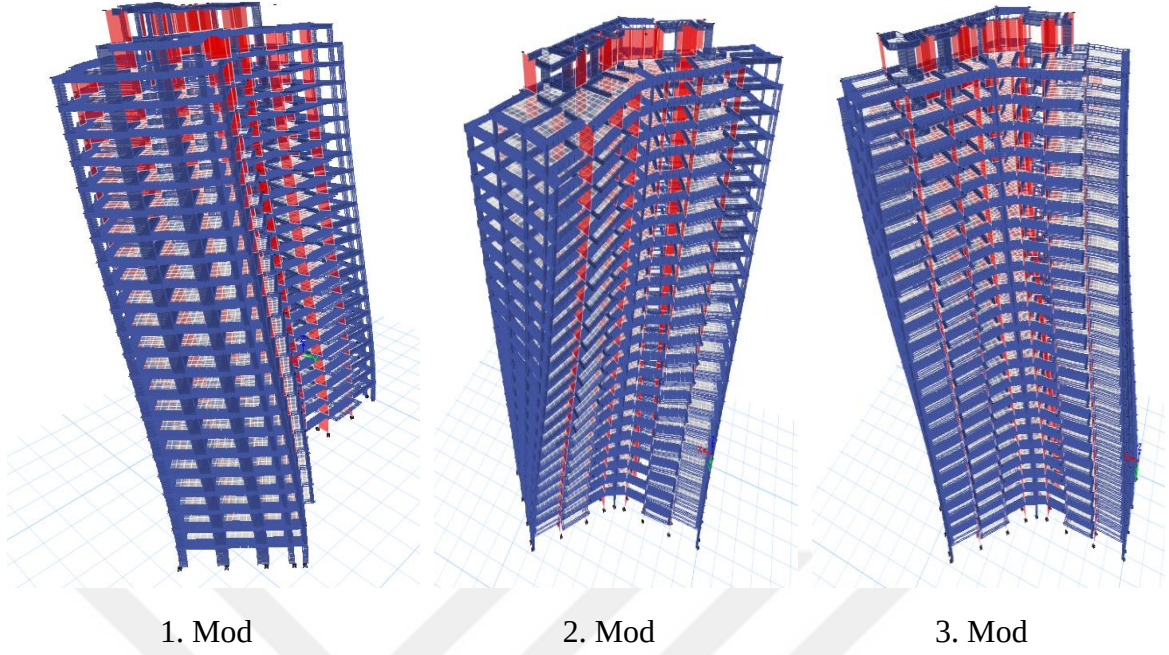


Şekil 14. Modal analiz sonucunda elde edilen mod şekilleri

23 katlı binanın dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla ETABS programında oluşturulan solu eleman modeli aracılığı ile modal analiz gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler neticesinde binanın ilk üç mod şekline ait frekans ve mod şekilleri elde edilmiştir. Frekans değerleri Tablo 6’da mod şekilleri ise Şekil 15’te sunulmuştur. Bina’nın ilk üç moduna ait frekans değerleri sırasıyla 0.545Hz, 0.585Hz ve 0.711Hz olarak elde edilmiştir. Şekil 15 incelendiğinde, 1.ve 3. modların öteleme, 2. modun ise burulma modu olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 6. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk üç mod

Mod No	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli
1	0.740	1.352	öteleme
2	0.793	1.263	burulma
3	0.988	1.012	öteleme



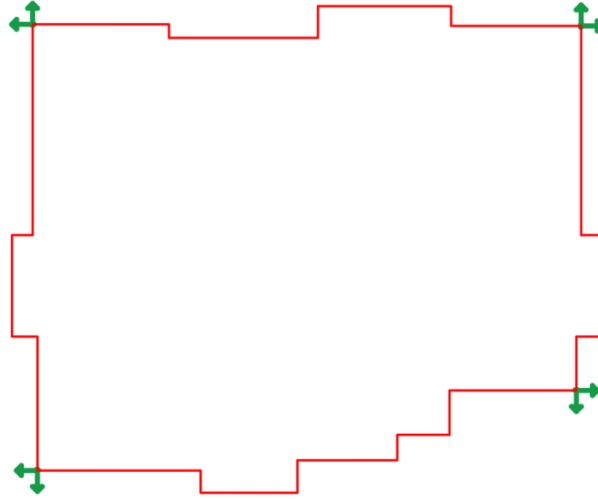
Şekil 15. Modal analiz sonucunda elde edilen mod şekilleri

2.3. Deneysel Çalışmalar

Tez çalışması kapsamında, hem 23 katlı hem de 26 katlı binanın dinamik karakteristikleri ortam titreşim testleri vasıtasıyla deneysel olarak belirlenmiştir. 26 katlı binadan bir yıl ara ile iki ölçüm gerçekleştirilmiştir. 23 katlı binada ise bir yıl süre ile aralıksız olarak deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler ışığında incelenen binaların dinamik karakteristiklerinde bir değişimin olup olmadığı araştırılmıştır. Öte yandan, bu deneysel veriler ile analitik veriler karşılaştırmalı olarak da incelenmiştir.

2.3.1.ÇTY ile 26 Katlı Binanın Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

26 katlı betonarme binanın dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemek amacıyla 28 Temmuz 2022 ve 10 Kasım 2023 tarihlerinde deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçümler, binanın 26. katına yerleştirilen 8 adet B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler ve 1 adet B&K 3053 tipi 12 kanallı veri toplama ünitesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sensör yerleşim planı Şekil 16'da sunulmuştur. B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerlere ait teknik özellikler ve görseller Tablo 7 ve Şekil 17'de verilmiştir. Ölçümler sırasında sahadan elde edilen görseller ise Şekil 18'de sunulmuştur.



Şekil 16. 26 katlı binanın ivmeölçer yerleşim planı



a



b

Şekil 17. Deneysel ölçümlerde kullanılan cihazlar (a. B&K 8340 tipi ivmeölçer, b. B&K 3053 tipi veri toplama cihazı)

Tablo 7. İvmeölçer özellikleri

Model	B&K 8340
Hassasiyet	10 V/g
Maksimum ivme	0.1-1500 Hz
Frekans Aralığı	± 0.5 g
Maksimum İvme	0-1500Hz
Çalışma sıcaklığı	-51/+74°C
Boyutlar	50.3 x 50.3 x 91.9 mm
Toplam Kütle	775 gram



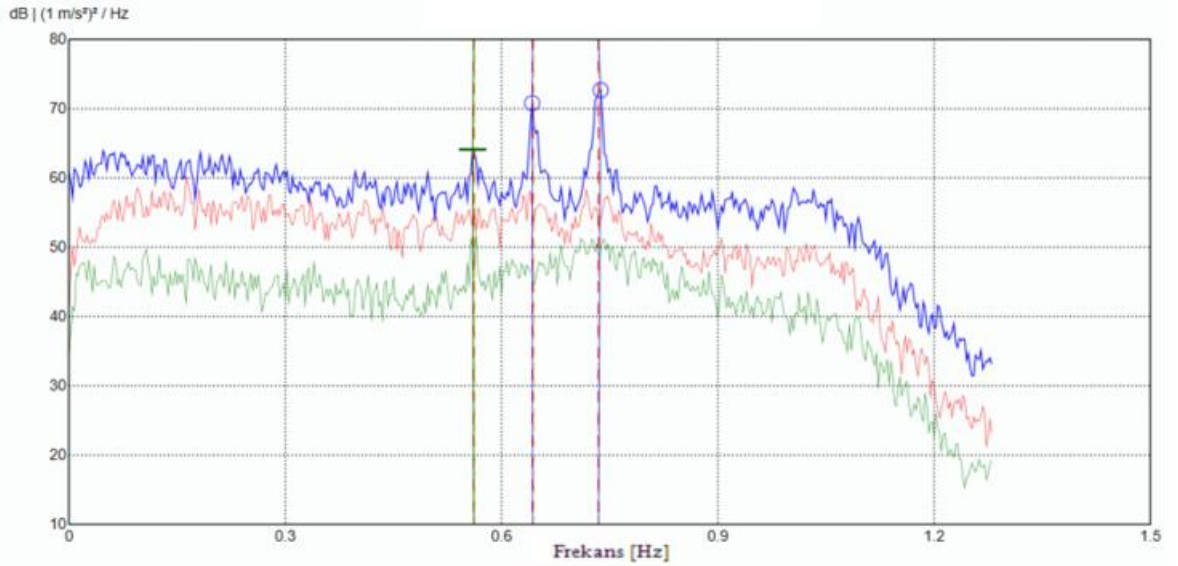
Şekil 18. 26 katlı binanın deneysel ölçümlerine ait bazı fotoğraflar

Ölçüm süreleri 15dk frekans aralığı 0-128 Hz olan deneysel ölçümler neticesinde ivmeölçerlerden alınan ham sinyaller veri toplama ünitesinde toplanmış ve PULSE yazılımına aktarılmıştır. Ardından, bu sinyaller OMA yazılımına transfer edilerek analiz edilmiş ve 26 katlı binanın doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilmiştir. Binada iki ayrı tarihte gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerinden elde edilen sinyallerin GFTAA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri benzer olduğundan sadece 28.07.2022 tarihli ölçüme ait grafik Şekil 19’da verilmiştir. Binanın ilk üç mod şekline ait frekans değerleri ve sönüm oranları Tablo 8’de verilmektedir. Bu ölçüm sonucu elde edilen mod şekilleri ise Şekil 20’de verilmiştir. 28.07.2022 tarihli ölçümde binanın ilk üç moduna ait frekans değerleri sırasıyla 0.561Hz, 0.643Hz ve 0.734Hz olarak elde edilmiştir. Şekil 20 incelendiğinde, 1.ve 3. modların öteleme, 2. modun ise burulma modu olduğu anlaşılmaktadır. Bu frekans ve mod şekilleri

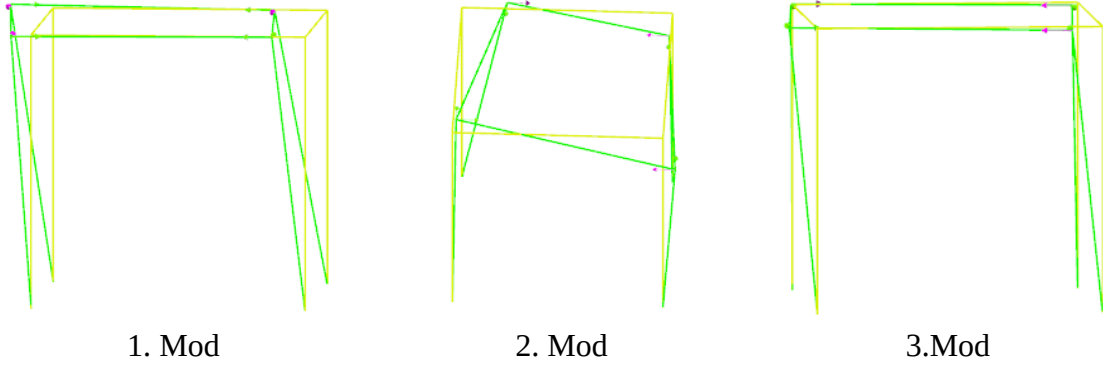
ikinci ölçüm ile tutarlıdır. Gerçekleştirilen her iki ölçüm sonucunda, binanın dinamik karakteristiklerinde önemli bir değişimin meydana gelmediği görülmüştür. Geçmiş yıllarda yapılan çalışmalar bir yapıda anormallikten söz edilebilmesi için frekans değerlerindeki değişimin %5'den daha fazla olması gerektiğini ifade etmişlerdir (Salawu, 1997). İlk ölçüm sonucunda sönüm oranı %0.535-%0.647 arasında elde edilirken, ikinci ölçümde %0.241-%0.295 arasında elde edilmiştir. Ayrıca Günaydın (2016), çevresel titreşim testleri esnasında binalarda oluşan farklı büyüklükteki titreşim sinyallerinin sönüm oranlarını etkileyebildiğini ve dolayısıyla sönüm oranında meydana gelen değişimlerin doğrudan hasar büyüklüğü ile ilişkilendirilemeyeceğini ifade etmiştir. Buna ek olarak mod şekillerinin de tutarlı olması yapının davranışında bir değişim meydana gelmediğini ortaya koymaktadır.

Tablo 8. 26 katlı binanın deneysel ölçümler sonucu elde edilen dinamik karakteristikleri

Ölçüm Tarihi	Mod	Frekans (Hz)	Sönüm	Mod Şekli
28.07.2022	1	0.561	0.535	Öteleme
	2	0.643	0.647	Burulma
	3	0.734	0.572	Öteleme
10.11.2023	1	0.548	0.241	Öteleme
	2	0.627	0.295	Burulma
	3	0.716	0.298	Öteleme



Şekil 19. ÇTY ile elde edilen spektral yoğunluk matrisi tekil değerleri

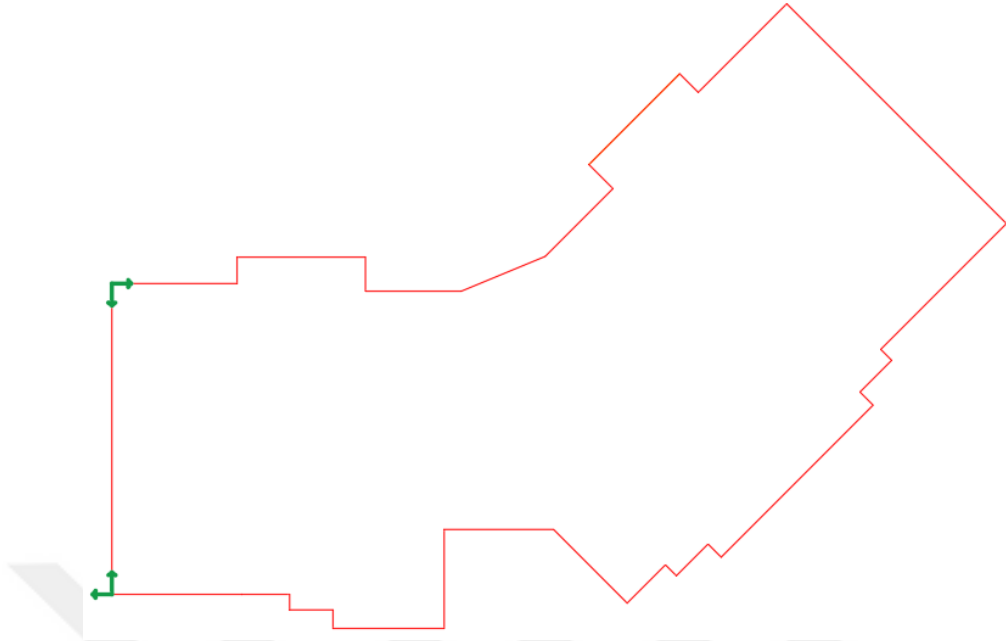


Şekil 20. Deneysel ölçümler sonucu elde edilen mod şekilleri

Sonlu eleman modeli ile gerçekleştirilen modal analiz sonuçları ve ÇTY ile elde edilen dinamik karakteristikler karşılaştırıldığında, doğal frekans değerleri arasındaki farkın yüzdesel olarak ilk üç mod için sırasıyla %2.82, %9.02 ve %3.13 olduğu belirlenmiştir. Literatürde deneysel ve sayısal doğal frekans değerleri arasındaki farkların %10 mertebelerinde olabileceği ve %5-%10 arasındaki farkların kabul edilebilir olduğu belirtilmektedir. Buradan yola çıkarak oluşturulan sonlu eleman modelinin herhangi bir model iyileştirme yapmadan binanın yapısal davranışını incelemek amacıyla yapılacak analizlerde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

2.3.2. ÇTY ile 23 Katlı Binanın Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

23 katlı betonarme binanın dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemek amacıyla 30 Ağustos 2023 - 12 Ağustos 2024 tarihleri arasında gerçekli zamanlı ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçümler, binanın çatı katına yerleştirilen 2 adet Sara SLO6 tipi üç eksenli ivmeölçerler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sensör yerleşim planı Şekil 21’de sunulmuştur. İvmeölçerlerden elde edilen ham titreşim sinyalleri Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformu (WTYSP) aracılığıyla toplanmıştır. Sara SLO6 tipi üç eksenli ivmeölçerlere ait teknik özellikler ve görseller Tablo 9 ve Şekil 22’de verilmiştir. Ölçümler sırasında sahadan elde edilen görseller ise Şekil 23’te sunulmuştur.



Şekil 21. 23 katlı binanın ivmeölçer yerleşim planı



Şekil 22. Sara SLO6 tipi üç eksenli ivmeölçer

Tablo 9. İvmeölçer özellikleri

Model	Sara SL06
Türü	Kuvvet-Denge
Maksimum ivme	$\pm 2g$
Dinamik aralığı	156dB
Frekans aralığı	0-1500Hz
Çalışma sıcaklığı	-20/+70°C
Boyutlar	210x170x100mm



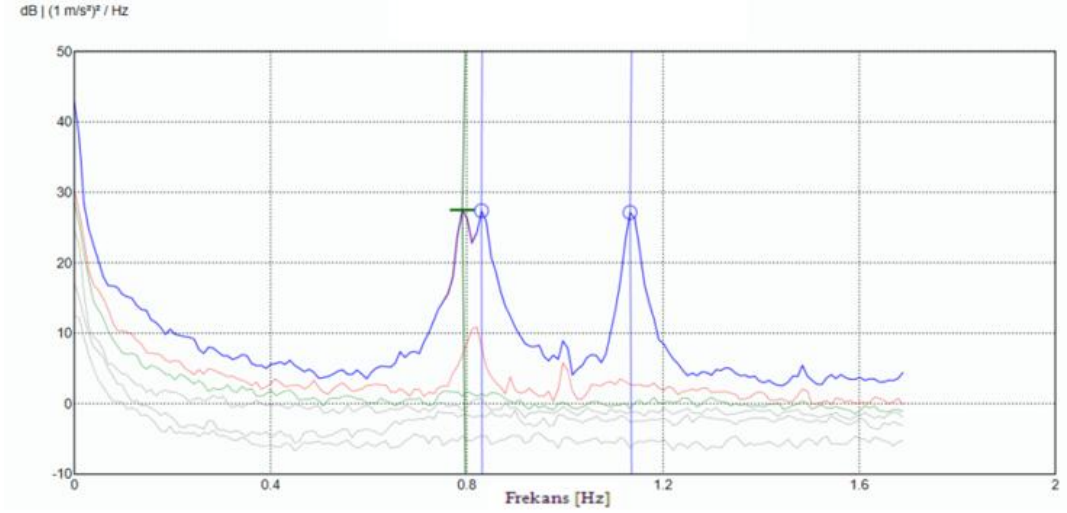
Şekil 23. 23 katlı binanın deneysel ölçümlerine ait bazı fotoğraflar

Sürekli ölçümler neticesinde ivmeölçerlerden alınan ham titreşim sinyalleri WTYSP’unda toplanmıştır. Bu sinyaller, OMA yazılımına transfer edilerek 23 katlı binanın ilk üç moduna ait doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilmiştir. Ham titreşim sinyallerinin aktarıldığı WTYSP’a ait görsel Şekil 24’te sunulmuştur. Okur (2023) tarafından tez kapsamında geliştirilen WTYSP uzun süreli yapı sağlığı izleme gerçekleştirilen yapıların tüm bilgilerini depolama, elde edilen ham sinyal verilerini işleme, bu verilerin yorumlanıp grafikleştirilmesi, anomali tespiti yapabilme gibi birçok özelliğe sahiptir. Platform Bayes Sinir Ağları aracılığıyla güven aralıkları belirleyip çevresel değişkenlerden kaynaklı belirsizlikleri yönetebilmektedir

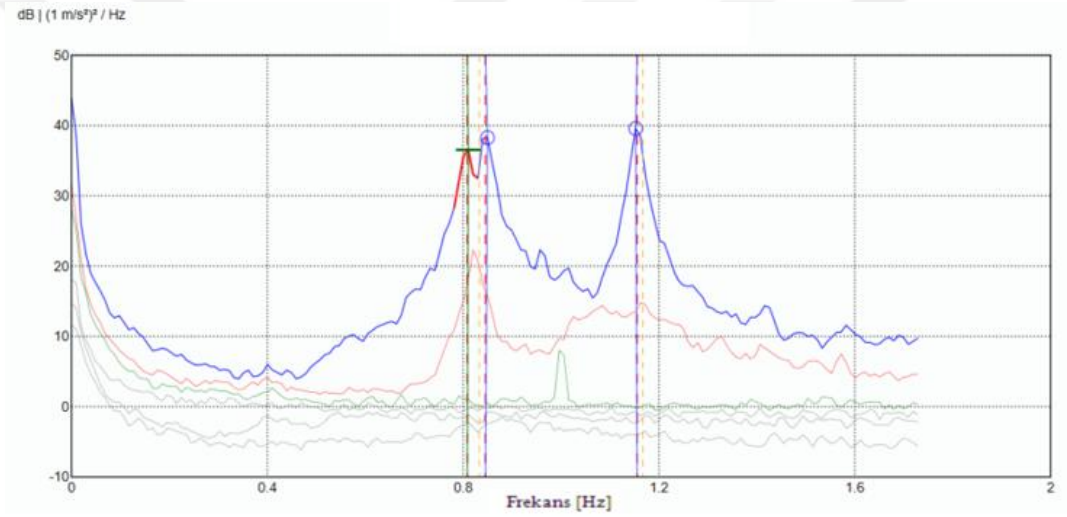


Şekil 24. WTYSP ait ana ekran görseli

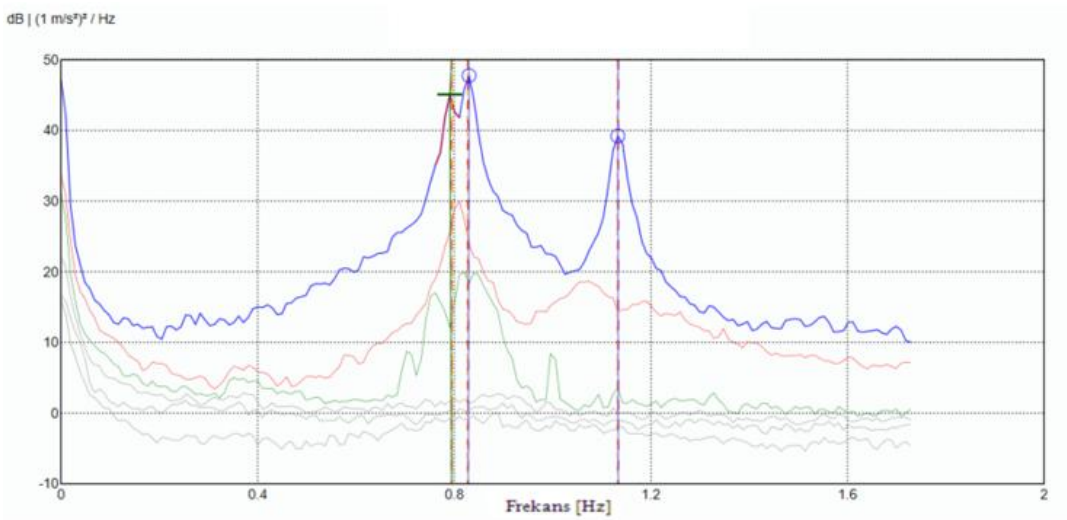
23 katlı binanın bir yıllık süre içerisinde gerçekleştirilen ölçümleri sonucu 12 ayı tarihe ait titreşim sinyalleri GFTAA yöntemi ile işlenmiş ve dinamik karakteristikler bu tarihler için ayrı ayrı elde edilmiştir. GFTAA yöntemi ile elde edilen spektral yoğunluk matrisleri tekil değerleri benzer oldukları için sadece 3 adet ölçüme ait değerler Şekil 25-27’de verilmiştir. GFTAA yöntemine göre elde edilen frekans değerleri, sönüm oranları ve mod şekilleri ise Tablo 10-21’de verilmektedir. 15.09.2023 tarihli ölçümde binanın ilk üç moduna ait frekans değerleri sırasıyla 0.797Hz, 0.831Hz ve 1.136Hz olarak elde edilmiştir. Tablo 10 incelendiğinde, 1.ve 3. modların öteleme, 2 modun ise burulma modu olduğu anlaşılmaktadır. Bu frekans ve mod şekilleri dikkate alınan 11 ayrı tarihe ait ölçüm verisi ile tutarlıdır. Gerçekleştirilen gerçek zamanlı ölçüm sonucunda, binanın dinamik karakteristiklerinde önemli bir değişimin meydana gelmediği görülmüştür. Daha önce de bahsedildiği üzere bir yapıda anormallikten söz edilebilmesi için frekans değerlerindeki değişimin %5’den daha fazla olması gerekmektedir. İlk ölçüm sonucunda sönüm oranları %1.738, %1.315, %0.795 olarak elde edilmiştir. Gerçek zamanlı izleme sonucunda 12 ayı tarih için veriler işlendiğinde sönüm oranlarında bazı farklılıkların olduğu görülmektedir. Günaydın (2016), çevresel titreşim testleri esnasında binalarda oluşan farklı büyüklükteki titreşim sinyallerinin sönüm oranlarını etkileyebildiğini ve dolayısıyla sönüm oranında meydana gelen değişimlerin doğrudan hasar büyüklüğü ile ilişkilendirilemeyeceğini ifade etmiştir. 23 katlı binada yapılan çevresel titreşim testlerinin sonucunda ulaşılan mod şekilleri birbiriyle benzerlik gösterdiği için sadece 13.04.2024 tarihli ölçüme ait mod şekilleri Şekil 28’de verilmiştir. Elde edilen doğal frekans, sönüm oranı ve mod şekilleri birlikte incelendiğinde binanın davranışında önemli bir değişimin meydana gelmediği tespit edilmiştir.



Şekil 25. 15.09.2023 tarihli ölçüme ait spektral yoğunluk matrisi tekil değerleri



Şekil 26. 12.03.2024 tarihli ölçüme ait spektral yoğunluk matrisi tekil değerleri



Şekil 27. 12.03.2024 tarihli ölçüme ait spektral yoğunluk matrisi tekil değerleri

Tablo 10. 15.09.2023 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler

Ölçüm Tarihi	Mod	Frekans (Hz)	Sönüm	Mod Şekli
15.09.2023	1	0.797	1.738	Öteleme
	2	0.831	1.315	Burulma
	3	1.136	0.795	Öteleme

Tablo 11. 25.10.2023 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler

Ölçüm Tarihi	Mod	Frekans (Hz)	Sönüm	Mod Şekli
25.10.2023	1	0.799	1.287	Öteleme
	2	0.836	1.332	Burulma
	3	1.142	0.763	Öteleme

Tablo 12. 12.11.2023 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler

Ölçüm Tarihi	Mod	Frekans (Hz)	Sönüm	Mod Şekli
12.11.2023	1	0.799	1.287	Öteleme
	2	0.836	1.332	Burulma
	3	1.142	0.763	Öteleme

Tablo 13. 12.12.2023 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler

Ölçüm Tarihi	Mod	Frekans (Hz)	Sönüm	Mod Şekli
12.12.2023	1	0.803	1.541	Öteleme
	2	0.840	1.441	Burulma
	3	1.152	0.788	Öteleme

Tablo 14. 22.01.2024 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler

Ölçüm Tarihi	Mod	Frekans (Hz)	Sönüm	Mod Şekli
22.01.2024	1	0.802	1.472	Öteleme
	2	0.841	1.450	Burulma
	3	1.153	0.821	Öteleme

Tablo 15. 22.02.2024 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler

Ölçüm Tarihi	Mod	Frekans (Hz)	Sönüm	Mod Şekli
22.02.2024	1	0.809	1.700	Öteleme
	2	0.845	1.510	Burulma
	3	1.153	0.796	Öteleme

Tablo 16. 12.03.2024 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler

Ölçüm Tarihi	Mod	Frekans (Hz)	Sönüm	Mod Şekli
12.03.2024	1	0.808	1.523	Öteleme
	2	0.846	1.426	Burulma
	3	1.155	0.740	Öteleme

Tablo 17. 13.04.2024 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler

Ölçüm Tarihi	Mod	Frekans (Hz)	Sönüm	Mod Şekli
13.04.2024	1	0.805	1.224	Öteleme
	2	0.840	1.886	Burulma
	3	1.142	0.819	Öteleme

Tablo 18. 12.05.2024 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler

Ölçüm Tarihi	Mod	Frekans (Hz)	Sönüm	Mod Şekli
12.05.2024	1	0.808	0.626	Öteleme
	2	0.848	1.251	Burulma
	3	1.152	0.735	Öteleme

Tablo 19. 13.06.2024 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler

Ölçüm Tarihi	Mod	Frekans (Hz)	Sönüm	Mod Şekli
13.06.2024	1	0.805	2.046	Öteleme
	2	0.836	1.194	Burulma
	3	1.151	0.759	Öteleme

Tablo 20. 12.07.2024 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler

Ölçüm Tarihi	Mod	Frekans (Hz)	Sönüm	Mod Şekli
12.07.2024	1	0.803	1.627	Öteleme
	2	0.833	1.372	Burulma
	3	1.149	0.799	Öteleme

Tablo 21. 12.08.2024 tarihli ölçümler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler

Ölçüm Tarihi	Mod	Frekans (Hz)	Sönüm	Mod Şekli
12.08.2024	1	0.795	1.447	Öteleme
	2	0.828	1.523	Burulma
	3	1.134	0.890	Öteleme



Şekil 28. Deneysel ölçümler sonucu elde edilen mod şekilleri

Sonlu eleman modeli ile gerçekleştirilen modal analiz sonuçları ve ÇTY ile elde edilen dinamik karakteristikler karşılaştırıldığında, doğal frekans değerleri arasındaki farkın yüzdesel olarak ilk üç mod için sırasıyla %6.91, %4.22 ve %9.8 olduğu belirlenmiştir. Buradan yola çıkarak oluşturulan sonlu eleman modelinin binanın yapısal davranışını incelemek amacıyla yapılacak analizlerde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

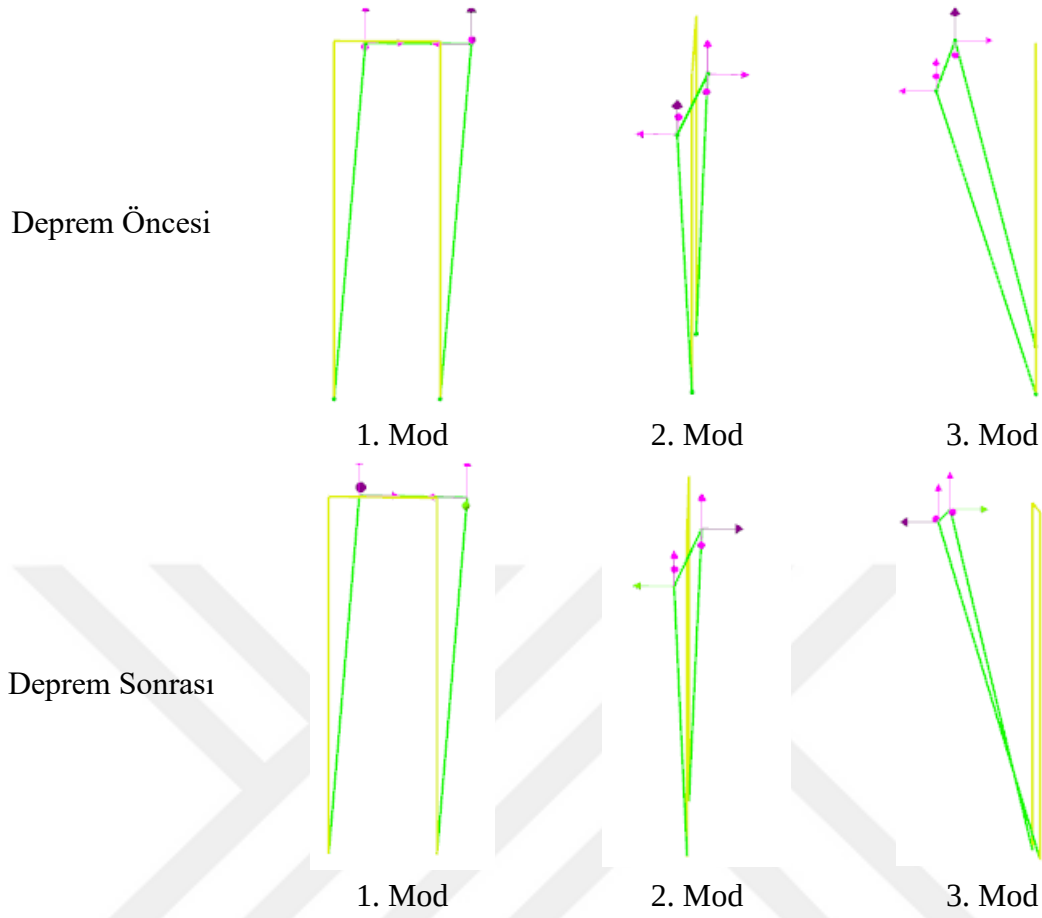
2.3.3. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremlerinin Yapısal Davranış Üzerindeki Etkilerinin İrdelenmesi

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen gerçek zamanlı ölçüm sırasında meydana gelen ve asrın felaketi olarak tanımlanan 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin incelenen yapıdaki yapısal tepkileri ne ölçüde artırdığı ve dinamik karakteristikler üzerindeki etkisi de ayrıca irdelenmiştir. Elde edilen veriler, yapının dinamik karakteristiklerinin değişimleri

üzerinden ve kat ivmelerinden analiz edilmiştir. Bu amaçla 23 katlı binadan alınan sürekli ölçüm verilerinden Kahramanmaraş depremlerinin gerçekleştiği saatler olan 04:17 ve 13:24'den bir saat önce ve sonra olacak şekilde veriler dikkate alınmıştır. Bu titreşim verilerinin OMA programı aracılığıyla işlenmesi sonucu elde edilen frekans değerleri Tablo 22'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Depremlerden hemen önce elde edilen ilk üç doğal frekans değerleri sırasıyla 0.808Hz, 0.848Hz ve 1.158Hz'dir. 6 Şubat 2023 Saat 13.24'te meydana gelen ikinci deprem sonrasında ise bu frekans değerleri sırasıyla 0.801Hz, 0.831Hz ve 1.145Hz olarak elde edilmiştir. Depremler öncesi ve sonrası elde edilen mod şekilleri ise Şekil 29'da sunulmuştur. Elde edilen doğal frekans ve mod şekilleri birlikte incelendiğinde binanın davranışında yapısal davranışı etkileyecek bir değişimin meydana gelmediği tespit edilmiştir. Nitekim daha sonraki bölümde sunulan ve binanın çatı katından depremler sırasında elde edilen ivme değerleri incelendiğinde, ivme değerlerinin yapıda DD2 deprem düzeyi için beklenen en büyük yer ivmesi olan 0.2 g değerinden oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 22. 6 Şubat Kahramanmaraş depremleri öncesi ve sonrası binanın dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması

Deprem Saati	Öncesi				Sonrası	
	Mod	Mod Şekli	Frekans (Hz)	Fark(%)	Frekans (Hz)	Mod Şekli
04:17	1	Öteleme	0.808	0.86	0.801	Öteleme
	2	Burulma	0.848	0.82	0.841	Burulma
	3	Öteleme	1.158	1.12	1.145	Öteleme
13:24	1	Öteleme	0.803	0.25	0.801	Öteleme
	2	Burulma	0.843	1.42	0.831	Burulma
	3	Öteleme	1.148	0.26	1.145	Öteleme

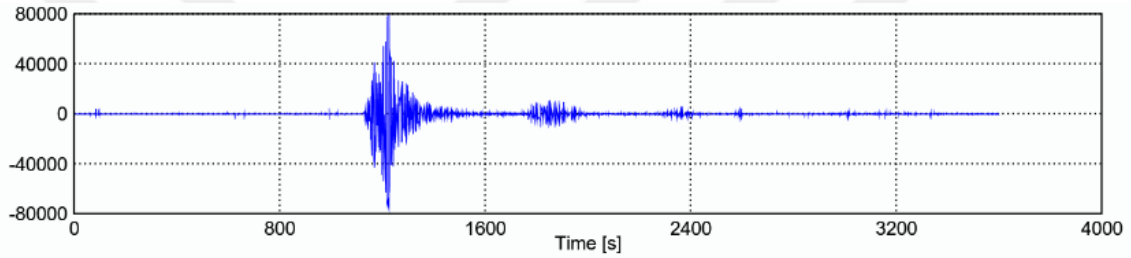


Şekil 29. 6 Şubat Kahramanmaraş depremleri öncesi ve sonrası için 23 katlı binanın mod şekillerinin karşılaştırılması

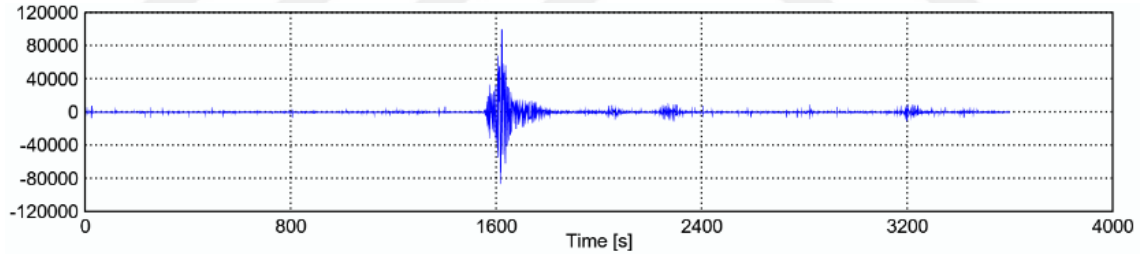
23 katlı binaya sürekli ölçüm için yerleştirilen 2 adet üç eksenli ivmeölçerler vasıtasıyla 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri esnasında çatı katında oluşan counts-zaman grafikleri elde edilmiştir. Bu grafiklerden alınan değerler bazı katsayılar ile dönüştürülerek ivme değerleri elde edilmiştir (Tablo 23). Depremler sırasında verilerde meydana gelen artış grafikleri Şekil 30 ve Şekil 31’de sunulmuştur.

Tablo 23. 6 Şubat Kahramanmaraş depremleri esnasında binaya etkiyen maksimum ivmeler

Deprem Saati	Yön	İvmeölçer 1	İvmeölçer 2
		Maksimum İvmeler (m/s ²)	Maksimum İvmeler (m/s ²)
4:17	Yatay Bileşen 1	0.014708	0.014594
	Yatay Bileşen 2	0.018356	0.018303
	Düşey Bileşen	0.005934	0.005782
13:24	Yatay Bileşen 1	0.021012	0.022321
	Yatay Bileşen 2	0.018117	0.018117
	Düşey Bileşen	0.004919	0.005634



Şekil 30. İlk deprem esnasında binanın yapısal tepkilerinde meydana gelen artış



Şekil 31. İkinci deprem esnasında binanın yapısal tepkilerinde meydana gelen artış

23 katlı binanın Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması üzerinden Sismik Tehlike Haritası Özet raporu oluşturulup binanın DD2 deprem düzeyi için beklenen en büyük yer ivmesi değeri belirlenmiştir. Binanın zemini hakkında herhangi bir bilgi bulunmadığından rapor, ZD zemin sınıfı seçilerek oluşturulmuştur. DD2 deprem düzeyi için beklenen en büyük yer ivmesi değeri ve depremler esnasında ivmeölçerler tarafından ölçülen maksimum ivmelerin karşılaştırılması Tablo 24'te verilmiştir. Binanın çatı katından deprem sırasında elde edilen ivme değerleri incelendiğinde, ivme değerlerinin DD2 deprem düzeyi için beklenen ve yapının tasarımında dikkate alınan en büyük ivme değerinden oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bu ivme değerlerinde binada herhangi bir hasar beklenmemektedir.

Tablo 24. 6 Şubat Kahramanmaraş depremleri esnasında binaya etkiyen ivmeler ile DD-2 deprem düzeyi için beklenen en büyük yer ivmesi değerinin karşılaştırılması

Deprem Saati	DD2 depremi için beklenen en büyük yer ivmesi (m/s ²)	Maksimum İvme (m/s ²)
4:17	2.01105	0.018356
13:24	2.01105	0.022321

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, yüksek binaların ÇTY ile elde edilen dinamik karakteristikleri (doğal frekanslar, sönüm oranları ve mod şekilleri) üzerinden yapı sağlığının izlenmesini amaçlamıştır. 26 ve 23 katlı iki betonarme yapının dinamik karakteristikleri hem analitik hem de deneysel yöntemlerle elde edilmiştir. Bu amaçla 26 katlı binanın sonlu eleman modeli ETABS yapısal analiz programında oluşturulmuştur. Bu sonlu eleman modeli vasıtasıyla modal analizler gerçekleştirilmiş ve yapıya ait dinamik karakteristikler analitik olarak elde edilmiştir. Ayrıca, hem 26 katlı hem de 23 katlı binanın dinamik karakteristikleri ortam titreşim testleri vasıtasıyla deneysel olarak belirlenmiştir. 26 katlı binadan bir yıl ara ile iki ölçüm gerçekleştirilmiştir. 23 katlı binada ise bir yıl süre ile aralıksız olarak deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler ışığında incelenen binaların dinamik karakteristiklerinde bir değişimin olup olmadığı araştırılmıştır. Öte yandan, bu deneysel veriler ile analitik veriler karşılaştırmalı olarak da incelenmiştir. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen gerçek zamanlı ölçüm sırasında meydana gelen ve asrın felaketi olarak tanımlanan 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin incelenen yapıdaki yapısal tepkileri ne ölçüde artırdığı ve dinamik karakteristikler üzerindeki etkisi de irdelenmiştir. Elde edilen veriler, yapının dinamik karakteristiklerinin değişimleri üzerinden analiz edilmiştir. ayrıca depremler esnasında binaya yerleştirilen ivmeölçerler tarafından ölçülen maksimum ivmeler DD2 deprem düzeyi için beklenen en büyük yer ivmesi değeri ile karşılaştırılmış ve binanın yapısal durumu değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Sonlu eleman modeli ile gerçekleştirilen analizler neticesinde 26 katlı betonarme binanın ilk üç moduna ait frekans değerleri sırasıyla 0.545Hz, 0.585Hz ve 0.711Hz olarak elde edilmiştir. Mod şekilleri incelendiğinde, 1.ve 3. modların öteleme, 2. modun ise burulma modu olduğu anlaşılmaktadır.
- 26 katlı betonarme binanın dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemek amacıyla 28 Temmuz 2022 ve 10 Kasım 2023 tarihlerinde deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. 28.07.2022 tarihli ilk ölçümde binanın ilk üç moduna ait frekans değerleri sırasıyla 0.561Hz, 0.643Hz ve 0.734Hz olarak elde edilmiştir. İkinci ölçümde ise bu değerler 0.548Hz-0.716Hz arasında elde edilmiştir. Her iki ölçüm

sonucunda da 1.ve 3. modların öteleme, 2. modun ise burulma modu olduğu anlaşılmaktadır.

- Gerçekleştirilen her iki ölçüm sonucunda, binanın dinamik karakteristiklerinde önemli yapısal davranışı etkileyecek bir değişimin meydana gelmediği görülmüştür.
- Sonlu eleman modeli ile gerçekleştirilen modal analiz sonuçları ve ÇTY ile elde edilen dinamik karakteristikler karşılaştırıldığında, doğal frekans değerleri arasındaki farkın yüzdesel olarak ilk üç mod için sırasıyla %2.82, %9.02 ve %3.13 olduğu belirlenmiştir. Buradan yola çıkarak oluşturulan sonlu eleman modelinin binanın yapısal davranışını incelemek amacıyla yapılacak analizlerde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.
- Sonlu eleman modeli ile gerçekleştirilen analizler neticesinde 23 katlı betonarme binanın ilk üç moduna ait frekans değerleri sırasıyla 0.740Hz, 0.793Hz ve 0.988Hz olarak elde edilmiştir. Mod şekilleri incelendiğinde, 1.ve 3. modların öteleme, 2. modun ise burulma modu olduğu anlaşılmaktadır.
- 23 katlı binanın sonlu eleman modeli ile gerçekleştirilen modal analiz sonuçları ve ÇTY ile elde edilen dinamik karakteristikler karşılaştırıldığında, doğal frekans değerleri arasındaki farkın yüzdesel olarak ilk üç mod için sırasıyla %6.91, %4.22 ve %9.8 olduğu belirlenmiştir. Buradan yola çıkarak oluşturulan sonlu eleman modelinin binanın yapısal davranışını incelemek amacıyla yapılacak analizlerde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.
- 23 katlı binanın bir yıllık süre içerisinde gerçekleştirilen sürekli ölçümleri sonucu 12 ayrı tarihe ait titreşim sinyalleri GFTAA yöntemi ile işlenmiş ve dinamik karakteristikler bu tarihler için ayrı ayrı olarak elde edilmiştir. 15.09.2023 tarihli ilk ölçümde binanın ilk üç moduna ait frekans değerleri sırasıyla 0.797Hz, 0.831Hz ve 1.136Hz olarak elde edilmiştir. 1.ve 3. modların öteleme, 2 modun ise burulma modu olduğu anlaşılmaktadır. Gerçekleştirilen sürekli ölçüm sonucunda, binanın dinamik karakteristiklerinde önemli bir değişimin meydana gelmediği görülmüştür.
- Sürekli izleme sonucunda 23 katlı binadan elde edilen 12 ayrı tarih için veriler işlendiğinde sönüm oranlarında bazı farklılıkların olduğu görülmektedir. Çevresel titreşim testleri esnasında binalarda oluşan farklı büyüklükteki titreşim sinyallerinin sönüm oranlarını etkileyebildiği ve dolayısıyla sönüm oranında meydana gelen değişimler doğrudan hasar ile ilişkilendirilememektedir.

- Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen aralıksız ölçüm sırasında meydana gelen ve asrın felaketi olarak tanımlanan 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin incelenen yapıdaki yapısal tepkileri ne ölçüde artırdığı ve dinamik karakteristikler üzerindeki etkisi de irdelenmiştir. Depremlerden hemen önce elde edilen ilk üç doğal frekans değerleri sırasıyla 0.808Hz, 0.848Hz ve 1.158Hz'dir. 6 Şubat 2023 Saat 13.24'de meydana gelen ikinci deprem sonrasında ise bu frekans değerleri sırasıyla 0.801Hz, 0.831Hz ve 1.145Hz olarak elde edilmiştir. Elde edilen doğal frekans ve mod şekilleri birlikte incelendiğinde binanın davranışında önemli bir değişimin meydana gelmediği tespit edilmiştir.
- Binanın çatı katından depremler sırasında elde edilen ivme değerleri incelendiğinde, ivme değerlerinin yapıda DD2 deprem düzeyi için beklenen en büyük yer ivmesi değerinden oldukça düşük olduğu görülmektedir.

İncelenen binalarda gerçekleştirilen ortam titreşim testleri ile dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Ancak mühendislik yapılarının değerlendirilmesinde dinamik karakteristiklerin yanı sıra yer değiştirmeler ve gerilmeler gibi büyüklüklerde kritik öneme sahiptir. Bu nedenle yüksek yapıların değerlendirilmesinde göreceli ötelemeleri ve gerilmeler gibi parametrelerin elde edilebilmesi amacıyla yapılara KKS gibi farklı ekipmanların teşkil edilmesi oldukça önemlidir. Öte yandan, 2023 Kahramanmaraş depremleri yüksek binaların hasar tespitlerinin gözlemsel yöntemlerle yapılmasının oldukça güç olduğunu göstermiştir. Bu tip binalarda yapılan yanlış değerlendirmeler hem bina hem de çevresindeki yapılar için oldukça yıkıcı sonuçların ortaya çıkmasına neden olabilir. Dolayısıyla bu tip binaların yapı sağlığının detaylı bir şekilde takip edilmesi önemlidir. Ayrıca bu tip yapılarda hasar tespitinin yapılmasının yanı sıra hasarın yerinin ve şiddetinin de belirlenebilmesi amacıyla farklı katlarda ve farklı bölgelerde sensör yardımıyla ölçümlerin gerçekleştirilmesi oldukça önemli bir husustur.

Ülkemizin sismik durumu göz önüne alındığında, YSİ sistemlerinin yüksek binalar ile birlikte hastane, okul ve stratejik açıdan önem taşıyan kamu binalarına, köprü baraj gibi önemli mühendislik yapılarına kurulması, meydana gelecek olası büyük depremden sonra yapısal davranışın ve kullanılabilirlik durumunun hızlıca tespit edilmesinde alınacak önlemlerde önemli yol oynayacaktır. Bu açıdan yüksek binalar gibi diğer yapılarda da YSİ sistemleri için uygulama esaslarını barındıran yönetmelik ve/veya yönerge ihtiyacı ülkemiz

için bulunmaktadır. Bu kapsamda gerçekleştirilen tez çalışmasının bu alanda gerçekleştirilecek çalışmalara katkı sağlanacağı dışunılmektedir.



4. KAYNAKLAR

- Ang, W.C., Kropelnicki, P., Tsai, J.M.L., Leong, K.C. ve Tan, C.S., (2014). Design, Simulation and Characterization of Wheatstone Bridge Structured Metal Thin Film Uncooled Microbolometer, *Procedia Engineering*, 94, 6-13.
- Bendat, J.S. ve Piersol, A.G., (2004). *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, 3th Edition, John Wiley and Sons, USA.
- Bendat, J.S. ve Piersol, A.G., (2011). *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, Wiley, Hoboken, 729 s.
- Berdugo, J., Burgos, C., Fernandez, M. G., Ferrando, A., Josa, M. I., Molinero, A., ... & Virto, A. L. (1999). First test of tiltmeters for the alignment system of CMS. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 431(3), 437-445.
- Boscato, G., Fragonara, L.Z., Cecchi, A., Reccia, E. ve Baraldi D., (2019). Structural Health Monitoring through Vibration-Based Approaches, *Shock and Vibration*, 2019 2380616.
- Brincker, R., Ventura, C.E. ve Andersen, P., (2003). Why Output-Only Modal Testing is a Desirable Tool for a Wide Range of Practical Applications, *Proceedings of 21st International Modal Analysis Conference on Structural Dynamics*, Kissimme, Orlando, USA, *Bildiriler Kitabı*: 265-272.
- Brincker, R., Zhang, L. ve Andersen, P., (2000). Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition, *18th International Modal Analysis Conference*, San Antonio, USA, 4062, 2, 625-630.
- Carrión, F. J., Quintana, J. A., ve Crespo, S. E. (2017). SHM of a stayed bridge during a structural failure, case study: the Rio Papaloapan Bridge. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 7(2), 139-151.
- Catbas, F. N., ve Malekzadeh, M. (2016). A machine learning-based algorithm for processing massive data collected from the mechanical components of movable bridges. *Automation in Construction*, 72, 269-278.
- Chang, P.C., Flatau, A. ve Liu, S., (2003). Review Paper: Health Monitoring of Civil Infrastructure, *Structural Health Monitoring*, 2, 3, 257–267.
- DBYBHY., 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, 159 s.
- Deng, L., ve Cai, C. S. (2007). Applications of fiber optic sensors in civil engineering. *Structural Engineering and Mechanics*, 25(5), 577-596.

- Deng, Z., Huang, M., Wan, N., ve Zhang, J. (2023). The current development of structural health monitoring for bridges: a review. *Buildings*, 13(6), 1360.
- Doebbling, S.W., Farrar, C.R. ve Prime, M.B., (1998). A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods, *Shock and Vibration*, 30, 2, 91–105.
- ETABS, 2021. Building Analysis and Design, USA.
- Fleming, A.J., (2013). A Review of Nanometer Resolution Position Sensors: Operation and Performance, *Sensors and Actuators: A Physical*, 190, 106–126.
- Günaydın, M., (2016). Onarılmış ve Lifli Polimer Kompozit Malzemelerle Güçlendirilmiş Betonarme Binaların Dinamik Davranışlarının Deneysel ve Analitik Yöntemlerle İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Hasan, A., Danial, M., Ahmad, Z., Leong M.S., Hee, L., (2018). Enhanced Frequency Domain Decomposition Algorithm: A Review of a Recent Development for Unbiased Damping Ratio Estimates, *Journal of Vibroengineering*, 20, 5, 1919–1936.
- Hassani, S., & Dackermann, U. (2023). A systematic review of advanced sensor technologies for non-destructive testing and structural health monitoring. *Sensors*, 23(4), 2204.
- He, Z., Li, W., Salehi, H., Zhang, H., Zhou, H., ve Jiao, P. (2022). Integrated structural health monitoring in bridge engineering. *Automation in construction*, 136, 104168.
- Heylen, W., Lammens, S. ve Sas, P., (2007). Modal Analysis Theory and Testing, Leuven Katholieke Universiteit, Department of Mechanical Engineering, Leuven, Belçika.
- Hoffmann, K., (1989). An Introduction to Measurements using Strain Gages, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Alsbach, 172 s.
- İrsel, G., (2021). Research on Electrical Strain Gages and Experimental Stress Analysis: Case Study for A Full Wheatstone Bridge, *DUJE (Dicle University Journal of Engineering)*, 12, 5, 783-792.
- Jacobsen, N.J., Andersen, P. ve Brincker, R., (2006). Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis, *Proceedings of ISMA2006, International Conference on Noise and Vibration Engineering*, Leuven, Belgium.
- Jiao, P., Borchani, W., Hasni, H., ve Lajnef, N. (2017). A new solution of measuring thermal response of prestressed concrete bridge girders for structural health monitoring. *Measurement Science and Technology*, 28(8), 085005.
- Johansmann, M., Siegmund, G., ve Pineda, M. (2005). Targeting the limits of laser Doppler vibrometry. *Proc. IDEMA*, 1-12.

- Kalooop, M. R., ve Hu, J. W. (2016). Dynamic performance analysis of the towers of a long-span bridge based on GPS monitoring technique. *Journal of Sensors*, 2016(1), 7494817.
- Katam, R., Pasupuleti, V. D. K., ve Kalapatapu, P. (2023). A review on structural health monitoring: past to present. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(9), 248.
- Kijewski-Correa, T., Kwon, D. K., Kareem, A., Bentz, A., Guo, Y., Bobby, S., ve Abdelrazaq, A. (2013). SmartSync: An integrated real-time structural health monitoring and structural identification system for tall buildings. *Journal of Structural Engineering*, 139(10), 1675-1687.
- Kuzubasoglu, B. A., & Bahadir, S. K. (2020). Flexible temperature sensors: A review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 315, 112282.
- Li, Q. S., Yang, K., Zhang, N., Wong, C. K., ve Jeary, A. P. (2002). Field measurements of amplitude-dependent damping in a 79-storey tall building and its effects on the structural dynamic responses. *The structural design of tall buildings*, 11(2), 129-153.
- Li, Q., He, Y., Zhou, K., Han, X., He, Y., ve Shu, Z. (2018). Structural health monitoring for a 600 m high skyscraper. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27(12), e1490.
- Meyer, J., Bischoff, R., ve Feltrin, G. (2009). Microelectromechanical systems (MEMS). *Encyclopedia of structural health monitoring*.
- Molina-Viedma, A. J., Felipe-Sesé, L., López-Alba, E., ve Díaz, F. (2018). High frequency mode shapes characterisation using Digital Image Correlation and phase-based motion magnification. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 102, 245-261.
- Monteiro, G. S., Neves, J. P., ve Gomes, J. P. (2020). Seismic monitoring system of baixo sabor and feiticeiro dams. *Civil Engineering Journal*, 6(11), 2072-2085.
- Mujica, L. E., Gharibnezhad, F., Rodellar, J., ve Todd, M. (2020). Considering temperature effect on robust principal component analysis orthogonal distance as a damage detector. *Structural Health Monitoring*, 19(3), 781-795.
- Ni, Y. Q., Xia, Y., Liao, W. Y., ve Ko, J. M. (2009). Technology innovation in developing the structural health monitoring system for Guangzhou New TV Tower. *Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures*, 16(1), 73-98.
- Okur, F. Y. (2023). Mühendislik Yapılarında Hasar Tespiti ve Uzun Süreli Yapı Sağlığı İzlemesi İçin Geliştirilen Mühendislik Yazılımları. Karadeniz teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon, Türkiye.

- Okuma, N., Etou, Y., Kanazawa, K. ve Hirata, K. (2008). Dynamic properties of a large arch dam after forty-four years of completion. Paper presented at the The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, Çin.
- Oliveira, S., Espada, M., ve Câmara, R. (2012, September). Long-term dynamic monitoring of arch dams. The case of Cabril dam, Portugal. In Proc. of the Fifteenth World Conf. on Earthquake Engineering (15 WCEE), Lisbon, Portugal (Vol. 25, pp. 19944-19953).
- OMA (2023). Operational Modal Analysis, Release 4.0. Structural Vibration Solution A/S, Denmark.
- Park, H. S., ve Oh, B. K. (2018). Real-time structural health monitoring of a supertall building under construction based on visual modal identification strategy. *Automation in Construction*, 85, 273-289.
- Park, H. S., Sohn, H. G., Kim, I. S., ve Park, J. H. (2008). Application of GPS to monitoring of wind-induced responses of high-rise buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 17(1), 117-132.
- Pawar, P.M. ve Ganguli, R., (2011). *Structural Health Monitoring using Genetic Fuzzy Systems*, Springer, Berlin, 140 s.
- Pereira, S., Magalhães, F., Gomes, J. P., Cunha, Á., & Lemos, J. V. (2018). Dynamic monitoring of a concrete arch dam during the first filling of the reservoir. *Engineering Structures*, 174, 548-560.
- Rainieri, C. ve Fabbrocino, G., (2008). *Operational Modal Analysis: Overview and Applications*, 2nd Meeting Workshop: Strategies for Reduction of The Seismic Risk, Italy, 29–44.
- Ramos, J.L.F.S., (2007). *Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures*, Doktora Tezi, University of Minho, Portugal.
- Ramos, J.L.F.S., (2007). *Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures*, Doktora Tezi, University of Minho, Portugal.
- Rocha, H., Semprinoschnig, C., ve Nunes, J. P. (2021). Sensors for process and structural health monitoring of aerospace composites: A review. *Engineering Structures*, 237, 112231.
- Salawu, O., S., (1997). Detection of Structural Damage through Changes in Frequency: A Review, *Engineering Structures*, 19, 9, 718-723.
- Sarkar, A., Patra, B., Ghodke, S. ve Bagchi, A. (2023). Monitoring the Deformation Pattern of an Instrumented Concrete Arch Dam. *Proceedings of the Fourteenth International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM)*, Open Acces, ss.3082.

- Scarella, A., Salamone, G., Babanajad, S. K., De Stefano, A., & Ansari, F. (2017). Dynamic Brillouin scattering-based condition assessment of cables in cable-stayed bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 22(3), 04016130.
- Schwarz, B.J. ve Richardson, M.H., (1999). *Experimental Modal Analysis*, CSI Reliability, 35, 1, 1-12.
- Sevim, B., (2010). *Kemer Barajların Dinamik Davranışlarının Sonlu Eleman ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi*, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Shih, H.W., (2009). *Damage Assessment in Structures Using Vibration Characteristics*, Doktora Tezi, Queensland University of Technology, Brisbane.
- Shih, H.W., Thambiratnam, D.P. ve Chan, T.H., (2009). Vibration Based Structural Damage Detection in Flexural Members using Multicriteria Approach, *Journal of Sound and Vibration*, 323, 3, 645–661.
- Sony, S., Laventure, S., ve Sadhu, A. (2019). A literature review of next-generation smart sensing technology in structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(3), e2321.
- Sun, L., Shang, Z., Xia, Y., Bhowmick, S., ve Nagarajaiah, S. (2020). Review of bridge structural health monitoring aided by big data and artificial intelligence: From condition assessment to damage detection. *Journal of Structural Engineering*, 146(5), 04020073.
- Şahin, A., (2009). *Yapıların Deneysel ve Operasyonel Modal Analizleri için Sayısal Sinyal İşleme, Dinamik Karakteristik Belirleme ve Sonlu Eleman İyileştirme Yazılımları: SignalCAD – ModalCAD – FemUP*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- TBDY., 2018. *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı*, Ankara, 416 s.
- URL-1. (2024, Eylül 18). Köprü Bilgileri: <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Projeler/KopruProjeleri.aspx>
- URL-2. (2024, Eylül 18). DSİ 10.Üst Yönetim Değerlendirme ve Eğitim Semineri Düzenlendi: <https://dsi.gov.tr/Haber/Detay/1451>
- Weng, J. H., & Loh, C. H. (2010). Structural health monitoring of arch dam from dynamic measurements. In *Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments* (pp. 2518-2534).
- Xu, J., Dong, Y., Zhang, Z., Li, S., He, S., ve Li, H. (2016). Full scale strain monitoring of a suspension bridge using high performance distributed fiber optic sensors. *Measurement Science and Technology*, 27(12), 124017.

- Zhang, F. L., Xiong, H. B., Shi, W. X., ve Ou, X. (2016). Structural health monitoring of Shanghai Tower during different stages using a Bayesian approach. *Structural Control and Health Monitoring*, 23(11), 1366-1384.
- Zhang, Q., Yang, B., Liu, T., Li, H., ve Lv, J. (2015). Structural health monitoring of Shanghai Tower considering time-dependent effects. *International journal of high-rise buildings*, 4(1), 39-44.



ÖZGEÇMİŞ

Muhammed Cihat ŞAHİN, ilköğretim eğitimini Trabzon Ayfer Karakullukçu İlköğretim Okulu'nda tamamladıktan sonra lise öğrenimini Trabzon Araklı Anadolu Lisesi'nde gördü.2011 yılında girdiği Yüksek Geçiş Sınavı ve Lisans Yerleştirme Sınavları sonucunda Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde “Lisans” eğitimi almaya hak kazandı. 2016 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu ve lisans eğitimini tamamladı. 2020 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda “Yüksek Lisans” eğitimine başladı.

