

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YAPILARIN MODAL PARAMETRELERİNİN YÜKSEK HIZLI KAMERA
TABANLI YER DEĞİŞTİRME ÖLÇÜMLERİ İLE ELDE EDİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aysu YILDIRIM

EKİM 2024
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YAPILARIN MODAL PARAMETRELERİNİN YÜKSEK HIZLI KAMERA
TABANLI YER DEĞİŞTİRME ÖLÇÜMLERİ İLE ELDE EDİLMESİ**

Aysu YILDIRIM

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 / 09/ 2024

Tezin Savunma Tarihi : 22/ 10 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kemal HACİEFENDİOĞLU

Trabzon 2024

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Aysu YILDIRIM Tarafından Hazırlanan**

**YAPILARIN MODAL PARAMETRELERİNİN
YÜKSEK HIZLI KAMERA TABANLI YER DEĞİŞTİRME
ÖLÇÜMLERİ İLE ELDE EDİLMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 26 / 09 / 2024 gün ve 2070 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Korhan ÖZGAN

Üye : Prof. Dr. Kemal HACİEFENDİOĞLU

Üye : Doç. Dr. Mehmet Fatih YILMAZ

**Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü**

ÖNSÖZ

“Yapıların Modal Parametrelerinin Yüksek Hızlı Kamera Tabanlı Yer Değiştirme Ölçümleri ile Elde Edilmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Yüksek lisansım boyunca benden hiçbir desteğini esirgemeyen, bu alanda çalışma yapmam için beni yönlendiren, öğrenmeye teşvik eden, kıymetli bilgi ve tecrübeleriyle yanımda olan danışmanım Sayın Prof. Dr. Kemal HACİEFENDİOĞLU’na teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmamın deneysel kısmında büyük katkıları bulunan hocam Sayın Prof. Dr. Volkan KAHYA’ya, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fatih Yesevi OKUR’a, Sayın Arş. Gör. Yunus Emrahan AKBULUT’a ve İnşaat Mühendisliği Bölümünde bana emeği geçen tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Tez çalışması süresince hiçbir yardımı ve desteği esirgemeyen arkadaşlarım İnş. Müh. Selenay PEMBEOĞLU’na, İnş. Müh. Leman Dilara SEPİL’e, Arş. Gör. Yılmaz YILMAZ’a, İnş. Müh. Muhammed Cihat ŞAHİN’e ve diğer tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, her kararında arkamda duran, maddi ve manevi desteklerini bir gün olsun esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan aileme teşekkür ederim.

Aysu YILDIRIM

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yapıların Modal Parametrelerinin Yüksek Hızlı Kamera Tabanlı Yer Değiştirme Ölçümleri ile Elde Edilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Kemal HACİEFENDİOĞLU’nun 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. 22/10/2024

Aysu YILDIRIM

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	2
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği.....	5
1.4. Video Kamera Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Yönteminin Ölçüm Sistemi ve Yazılımı.....	7
1.4.1. Görüntü Elde Etme ve İşleme	7
1.4.2. Koordinat Dönüşümü ve Ölçeklendirme Faktörü.....	7
1.4.3. Lucas-Kanade Optik Akış Algoritması ile Hedef Takibi.....	8
1.4.4. ARMA Modeli ile Frekans Analizi.....	10
1.4.5. Gelişmiş Frekans Alanı Ayırıştırma Yöntemi.....	12
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	13
2.1. Tek Katlı Düzlem Çelik Çerçeve Modeli.....	16
2.1.1. Tek Katlı Düzlem Çelik Çerçeve Modelinin Sonlu Eleman Yöntemi ile Modal Analizi	16
2.1.2. Tek Katlı Düzlem Çelik Çerçeve Modelinin Video Kamera Tabanlı Deneysel Modal Analizi.....	18
2.1.3. Tek Katlı Düzlem Çelik Çerçeve Modelinin İvmeölçer Tabanlı Deneysel Modal Analizi	20
2.2. Tek Katlı Uzay Kayma Çerçevesi Modeli	22
2.2.1. Tek Katlı Uzay Kayma Çerçevesi Modelinin Sonlu Eleman Yöntemi ile Modal Analizi	23
2.2.1. Tek Katlı Uzay Kayma Çerçevesi Modelinin Video Kamera Tabanlı Deneysel Modal Analizi.....	25

2.2.2. Tek Katlı Uzay Kayma Çerçevesi Modelinin İvmeölçer Tabanlı Deneysel Modal Analizi	28
2.3. Çelik Yaya Üst Geçidi.....	29
2.3.1. Çelik Yaya Üst Geçidinin Sonlu Eleman Yöntemi ile Modal Analizi	30
2.3.2. Çelik Yaya Üst Geçidinin Video Kamera Tabanlı Operasyonel Modal Analizi	34
2.3.3. Çelik Yaya Üst Geçidinin İvmeölçer Tabanlı Operasyonel Modal Analizi	38
3. SONUÇLAR.....	42
4. ÖNERİLER.....	44
5. KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

YAPILARIN MODAL PARAMETRELERİNİN YÜKSEK HIZLI KAMERA TABANLI YER DEĞİŞTİRME ÖLÇÜMLERİ İLE ELDE EDİLMESİ

Aysu YILDIRIM

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Kemal HACİEFENDİOĞLU
2024, 47 Sayfa

Bu tez çalışması kapsamında, iki farklı küçük ölçekli çelik yapı modeli ve çelik yaya üst geçidinin video kamera tabanlı modal analiz testleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan tez çalışması dört bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, konuyla ilgili yapılmış olan geçmiş çalışmalardan ve tezde kullanılan yöntemlerden bahsedilmiştir. İkinci bölüm, iki farklı küçük ölçekli çelik yapı modeli ve çelik yaya üst geçidi üzerinde gerçekleştirilen sonlu eleman yöntemi ile modal analiz, video kamera tabanlı modal analiz ve ivmeölçer tabanlı modal analiz çalışmalarını içermektedir. İki farklı küçük ölçekli çelik yapı modelinin ivmeölçer tabanlı modal analizinde kullanılan ivme verileri iDynamics adlı telefon uygulaması ile elde edilmiştir. Video kamera tabanlı modal analizi ile modal parametrelerin elde edilebilmesi için, Lucas-Kanade Optik Akış Algoritması ve ARMA Modeli'ni temel alan Python dilinde geliştirilmiş kodlar kullanılmıştır. Üçüncü bölümde, deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlara yer verilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Son bölümde ise öneriler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Video kamera tabanlı modal analiz, Titreşim, Optik akış, İvmeölçer, Sonlu eleman modeli

Master. Thesis

SUMMARY

OBTAINING THE MODAL PARAMETERS OF STRUCTURES USING HIGH-SPEED CAMERA-BASED DISPLACEMENT MEASUREMENTS

Aysu YILDIRIM

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Kemal HACİEFENDİOĞLU
2024, 47 Pages

Within the scope of this thesis, studies were carried out on video camera based modal analysis tests of two different small-scale steel structure models and steel pedestrian overpass. The thesis study consists of four sections. In the first section, previous studies on the subject and the methods used in the thesis are mentioned. The second section includes finite element model and modal analysis, video camera based modal analysis and accelerometer based modal analysis studies carried out on two different small-scale steel structure models and steel pedestrian overpass. The acceleration data used in the accelerometer based modal analysis of two different small-scale steel structure models were obtained with the phone application called iDynamics. In order to obtain modal parameters with video camera based modal analysis, codes developed in Python language based on Lucas-Kanade Optical Flow Algorithm and ARMA Model were used. In the third section, the results obtained as a result of experimental studies are given and the results are compared. In the last section, recommendations are given.

Key Words: Video camera-based modal analysis, Vibration, Optical flow, Accelerometer, Finite element model

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Tek katlı düzlem çelik çerçeve modeli	16
Şekil 2. Tek katlı düzlem çelik çerçeve modelinin ilk üç mod şekli	17
Şekil 3. Tek katlı düzlem çelik çerçeve modelinin video çekim düzeneği.....	19
Şekil 4. Video kamera tabanlı deneysel modal analiz sonucunda elde edilen a) yer değiştirme-zaman grafiği b) frekans grafiği	20
Şekil 5. iDynamics Uygulaması yüklü mobil telefonun kirişe bağlanması.....	20
Şekil 6. Modele uygulanan titreşimin iDynamics Uygulaması'nda görülen ivme kaydı	21
Şekil 7. iDynamics Uygulaması ile elde edilen ivme kayıtlarının a) ivme-zaman grafiği b) frekans grafiği.....	21
Şekil 8. Tek katlı uzay kayma çerçevesi modeli.....	23
Şekil 9. Tek katlı uzay kayma çerçevesi modelinin ilk üç mod şekli.....	24
Şekil 10. Kameranin yerleştirilmesi	25
Şekil 11. Tek katlı uzay kayma çerçevesi modelinin video çekim düzeneği	26
Şekil 12. Video kamera tabanlı deneysel modal analiz sonucunda elde edilen (a) x-yönündeki yer değiştirme-zaman grafikleri ve (c) x-yönündeki frekans grafiği; (b) y-yönündeki yer değiştirme-zaman grafikleri ve (d) y-yönündeki frekans grafiği.....	27
Şekil 13. iDynamics Uygulaması ile elde edilen ivme kayıtlarının (a) x-yönündeki ivme-zaman grafiği ve (c) x-yönündeki frekans grafiği; (b) y-yönündeki ivme-zaman grafiği ve (d) y-yönündeki frekans grafiği.....	28
Şekil 14. Çelik yaya üst geçidinin uzaktan görüntüsü	29
Şekil 15. Çelik yaya üst geçidinin AutoCAD kesiti ve ölçüleri	30
Şekil 16. ANSYS Workbench modal analiz seçimi	31
Şekil 17. ANSYS Workbench çelik yaya üst geçidi modelinin malzeme özelliklerinin girilmesi.....	31
Şekil 18. AutoCAD çizimleri esas alınarak ANSYS SpaceClaim'de çizilen çelik yaya üst geçidi modelinin geometrisi.....	32
Şekil 19. Çelik yaya üst geçidinin 1. mod şekli (Ölçek: 4.0e+002)	33
Şekil 20. Çelik yaya üst geçidinin 4. mod şekli (Ölçek: 4.2e+002)	33
Şekil 21. Çelik yaya üst geçidinin 9. mod şekli (Ölçek: 3.9e+002)	34
Şekil 22. Kameranin yerleşimi	36
Şekil 23. CoreView yazılımıyla elde edilen video kaydı	36

Şekil 24. Video kamera tabanlı operasyonel modal analiz sonucunda elde edilen (a) x-yönündeki yer değiştirme-zaman grafiği ve (c) x-yönündeki frekans grafiği; (b) y-yönündeki yer değiştirme-zaman grafiği ve (d) y-yönündeki frekans grafiği	37
Şekil 25. İvmeölçerlerin yerleştirilmesi.....	39
Şekil 26. İvmeölçer tabanlı operasyonel modal analiz ile verilerin elde edilmesi	39
Şekil 27. Spektral yoğunlukların tekil değerleri	40
Şekil 28. İvmeölçer tabanlı operasyonel modal analizden elde edilen (a) düzlem içi eğilme, (b) düzlem dışı eğilme ve (c) burulma modu.....	41



TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Video kamera tabanlı ölçüm sistemi için çalışmalarda kullanılan ekipmanlar	14
Tablo 2. Tek katlı çelik düzlem çerçeve modelinin modal analiz sonucunda elde edilen ilk üç frekansı.....	17
Tablo 3. Kullanılan ekipmanlar ve teknik özellikler	18
Tablo 4. Modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	22
Tablo 5. Tek katlı uzay kayma çerçevesi modelinin ilk üç frekansı.....	24
Tablo 6. Modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	29
Tablo 7. Çelik yaya üst geçidinin yapımında kullanılan elemanların çelik sınıfları	30
Tablo 8. ANSYS SpaceClaim kütüphanesinden seçilen profiller	32
Tablo 9. ANSYS SpaceClaim'de manuel olarak oluşturulan profiller	32
Tablo 10. Çelik yaya üst geçidi modelinin modal analizi sonucunda elde edilen seçili modlarının frekansları.....	34
Tablo 11. Kullanılan ekipmanlar ve teknik özellikler	35
Tablo 12. Video kamera tabanlı modal analiz ile elde edilen frekanslar.....	37
Tablo 13. Kullanılan ekipmanlar ve ekipmanların teknik özellikleri	38
Tablo 14. İvmeölçer tabanlı operasyonel modal analiz sonucunda elde edilen frekans değerleri.....	40
Tablo 15. Modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	41
Tablo 16. Çalışmalardan elde edilen frekans değerleri.....	42

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

U_i^H	: Kompleks eşlenik transpoze matrisi
$G_{xx}(j\omega)$	: Etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluğu Fonksiyonu
$G_{yy}(j\omega)$	: Tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluğu Fonksiyonu
$I_t(x, t)$	: Zamana ilişkin kısmi türev
$I_{bilinen}$	: Piksel uzunluğu
S_i	: Diyagonal matris
U_i	: Tekil vektör
X_t	: Zaman serisinin mevcut değeri
$d_{bilinen}$	: Nesne yüzeyinin bilinen fiziksel uzunluğu
$d_{bilinen}^i$	: Görüntü düzlemine karşılık gelen fiziksel uzunluk
d_{piksel}	: Piksel boyutu
g_{i-1}	: Bir önceki seviyeden gelen optik akış
θ_q	: Hareketli ortalama parametresi
v_i	: Mevcut seviyedeki optik akış
ϵ_t	: Hata terimi
ϕ_p	: Otoregresif parametre
$*$	: Kompleks eşleniği
μ	: Seri ortalaması
c	: Sabit terim
D	: Kamera ile nesne arasındaki mesafe
$H(j\omega)$	: Frekans Tepki Fonksiyonu
$I(x, t)$	: Görüntü yoğunluğu
L	: En düşük seviye
T	: Transpoze
f	: Kameranın odak uzaklığı
i	: Mevcut seviye
p	: AR bileşeninin derecesi
q	: MA bileşeninin derecesi
u	: İki boyutlu optik akış vektörü

$\nabla I(x, t)$	: Görüntü yoğunluğunun iki yöndeki türevi
DMA	: Deneysel Modal Analiz
FAAY	: Frekans Alanı Ayırıştırma Yöntemi
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
FPS	: Saniyedeki kare sayısı
GFAAY	: Gelişmiş Frekans Alanı Ayırıştırma Yöntemi
Hz	: Frekans birimi
OMA	: Operasyonel Modal Analiz
$\bar{O}F$	: Ölçek faktörü
ROI	: İlgi alanı
TDA	: Tekil Değer Ayırıştırması

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Yapılar, planlanan hizmet ömrü süresince, insanların barınma, yol, su gibi ihtiyaçlarını güvenli bir şekilde karşılayabilmesi amacıyla yüksek maliyetlerle inşa edilmektedir. Bu yapılar, projeden inşa edilme sürecine geçtikleri andan itibaren çeşitli çevre koşullarına, deprem ve rüzgâr gibi dış yüklere maruz kalmaktadır. Çevre koşulları ve dış yükler, yapıda ve yapıyı oluşturan malzemelerde hasar oluşturarak yapının planlanan hizmet ömrünü kısaltabilmekte ve can ile mal kaybına sebep olabilmektedir (Ekinci, 2020).

Yapıların düzenli olarak izlenmesi, bakımlarının yapılması, hasar olması durumunda hasar analizlerinin gerçekleştirilerek hasar bölgelerinin tespit edilip önlemler alınması, planlanan hizmet ömürlerini güvenli bir şekilde tamamlamalarını sağlamaktadır. Bu amaçla, yapı sağlığı izleme yöntemleri geliştirilmiştir.

Yapı sağlığı izleme, mühendislik yapılarının mevcut durumlarının saptanması ve hasar tespiti yapmak amacıyla yapıların sürekli ya da belirli zaman aralıklarıyla izlenmesidir (Chen & Ni, 2018). Yapı sağlığı izleme süreci, algılama ağı, veri işleme ve analizi, hasar değerlendirmesi ve karar verme gibi birçok önemli birleşenden oluşmaktadır (Feng & Feng, 2020). Yapı sağlığı izleme yöntemlerini Frangopol ve Messerve (2009) küresel ve yerel olarak iki gruba ayırmıştır. İzleme yönteminin seçilmesi, büyük ölçüde ilgili yapıya, analiz türüne veya her ikisine de bağlıdır. Küresel izleme yöntemleri, genel olarak yapıda hasar oluşup oluşmadığını kontrol etmek için kullanılırken; yerel izleme yöntemleri, hasarın yerini ve boyutunu belirlemek için kullanılmaktadır.

Yapı sağlığı izlemede kullanılan yaygın yöntemlerden biri, titreşime dayalı hasar tespitidir. Titreşime dayalı hasar tespiti, yapıdaki hasarla ilişkilendirilen yapının ivmesi, yer değiştirmesi gibi titreşim ölçümlerine dayanmaktadır (Montalvão vd., 2006). Bu titreşim verileri ile modal analiz gerçekleştirilerek modal parametreler belirlenip, yapının inşa edildiği zamanki modal parametreleri ile kıyaslanarak hasar tespiti yapılabilmektedir.

Titreşime dayalı hasar tespitinde titreşim verileri, doğrusal diferansiyel transformatör (LVDT), ivmeölçerler, gerilimölçerler ve fiber optik sensörler gibi temaslı; GPS, lazer vibrometreler, video kameralar gibi temassız yöntemler ile elde edilebilmektedir.

Bu tez çalışması, iki farklı küçük ölçekli çelik yapı modeli ile bir çelik yaya üst geçidi yapısının modal parametrelerinin, titreşime dayalı video kamera tabanlı yer değiştirme ölçümleriyle elde edilmesi üzerine oluşturulmuştur. Elde edilen bu modal parametreler, titreşime dayalı ivmeölçer tabanlı modal analizler sonucu elde edilen modal parametreler ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır. İvmeölçer tabanlı modal analizlerden elde edilen modal parametreler temel alınarak, modal parametreleri doğru yorumlamak için, yapıların sonlu eleman yöntemi ile modal analizleri gerçekleştirilmiş ve karşılaştırılmıştır.

1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Yapı sağlığı izlemesi ile ilgili çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar yapı sağlığı izleme yöntemlerini çeşitlendirmekle kalmayıp yöntemleri farklı yapı türlerinde uygulayarak alternatif çözümler sunmuştur.

Son yıllarda yapı sağlığı izlemesi için maliyetin daha düşük ve kurulumunun daha kolay olduğu, fazla ekipman gerektirmeyen ve kısa sürede sonuç alınabilen video kamera tabanlı ölçüm yöntemine odaklanılmıştır. Bu yöntemle, titreşim altındaki yapının video görüntüsü bilgisayarda işlenerek, yapının yer değiştirme verileri, frekansları, mod şekilleri gibi dinamik karakteristikleri elde edilebilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, konu ile ilgili yapılan geçmiş çalışmalar bu kısımda verilmiştir.

Zhu vd. (2022), yaptıkları çalışmada yapısal titreşim tanımlama sistemi üzerine odaklanmışlardır. Sistem, yüksek kaliteli yapısal titreşim sinyalleri elde edilmesini, (i) görsel bölümlendirme ölçümü ve görüntü iyileştirme tekniklerini içeren yeni bir görüntü ön işleme kurulması; (ii) 2-B Gabor dalgacıkları kullanarak görüntünün bağımsız faz bilgisini çıkaran faz tabanlı optik akış tahmini (POFE) ile yapısal titreşimlerin başlangıç tanımlamasının yapılması ve yapının yüzeyindeki doğal doku hedeflerinin izlenmesi; (iii) kamera titreşimi ve diğer gürültülerin neden olduğu karmaşık ortamı ortadan kaldırmak için mod ayrıştırma yöntemiyle yapının gerçek titreşim bilgisinin çıkarılması; (iv) küçük titreşim sinyallerini büyütmek için faz tabanlı hareket büyütme (PMM) tekniklerinin uygulanması ve ardından yapının titreşim zaman aralığındaki tüm bilgilerin tanımlanması şeklinde sağlamıştır. Üç farklı durumda gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri ve saha testlerinin araştırma sonuçları, sistemin karmaşık ortamlarda yapısal titreşimleri tanıyabildiğini ortaya koymuştur.

Nie vd. (2022), yaptıkları çalışmada, hedefin özellikle büyük bir yer değiştirme hareketine sahip olduğu durumlarda hedef takip doğruluğunu artırmak amacıyla, seyrek optik akış tekniğine dayanan yeni bir hedef takip yöntemi önermişlerdir. Önerilen yöntem, FAST (Hızlandırılmış Segment Testi) adlı bir özellik tespit edici ve BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features) adlı bir ikili tanımlayıcıya dayanan Oriented FAST ve Rotated BRIEF (ORB) tekniğini kullanmıştır. ORB, çeşitli anahtar noktaları korumakta ve çok düzeyli bir stratejiyi optik akış algoritmasıyla birleştirerek büyük hareket vektörlerine sahip anahtar noktalarını takip etmek için arama yapmaktadır. Daha sonra, hata oranını minimize etmek için Hamming mesafesi ve çeyrekler arası aralık (IQR) skoruna dayanan bir aykırı değer kaldırma yöntemi sunulmuştur. Önerilen hedef takip yöntemi, çeşitli harmonik uyarılara maruz bırakılan üç katlı bir kesme yapı üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneyinde doğrulanmıştır. Bu yöntem, mevcut seyrek optik akış tabanlı hedef takip yöntemleri ve özellik eşleştirme, yoğun optik akış ve şablon eşleştirme gibi üç farklı teknik türüne dayanan hedef takip yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, çok düzeyli stratejinin ve önerilen aykırı değer kaldırma yönteminin kullanılmasıyla hedef takibinin performansının büyük ölçüde iyileştiğini göstermiştir. Önerilen seyrek optik akış tabanlı hedef takip yönteminin, diğer mevcut hedef takip yöntemlerine kıyasla en iyi doğruluğu sağladığı görülmüştür.

Bocian vd. (2023), Polonya'daki en büyük tek direkli kablolu köprü'nün (Rędziński Köprüsü'nün) dinamik performansını, tüketici sınıfı bir dijital kamera ve açık erişimli görüntü işleme algoritmalarından elde edilen verilere dayanarak incelemişlerdir. Bu verilerin kalitesi, geleneksel kablolu ivmeölçerlerden ve üst düzey ticari bir optik hareket yakalama sisteminden elde edilen verilerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Yapı sağlığı göstergesi olarak kullanılma potansiyeline sahip modal sönüm oranlarını çıkarmak için operasyonel modal analiz gerçekleştirilmiştir. Köprü'nün dinamik özellikleri, açılmadan önce gerçekleştirilen yükleme deneyi sonuçlarıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, tüketici sınıfı bir dijital kameraya dayanan bir titreşim izleme sisteminin, büyük ölçekli köprülerin karmaşık ve zamanla değişen dinamik davranışlarını izlemek için ekonomik olarak uygulanabilir bir alternatif sunabileceği gösterilmiştir.

Kamera tabanlı titreşim izleme sistemlerinin deneysel ve operasyonel modal analizlerinde modal sönümlenme ve modal kütle gibi kritik bilgiler nadiren rapor edilmiştir. Oysa bu bilgiler, yapısal davranışın farklı yükleme türleri altında değerlendirilmesi, yapıların sayısal modellerinin kalibrasyonu ve yapısal sağlık izleme süreçlerinde büyük

önem taşımaktadır. Bu bilgi eksikliğini gidermek amacıyla, Kalybek (2022)'in yaptığı bu tez araştırması, açık kaynak erişimli görüntü işleme algoritmaları ve tüketici sınıfı kameralar kullanılarak geliştirilen titreşim izleme sistemlerinin uygulanabilirliğine dair ilk kanıtlardan bazılarını sunmuştur. Araştırma, (i) laboratuvar ortamında bir çekiç ve elektromekanik sarsıcı kullanılarak giriş-çıkış modal tanımlamasına dayalı deneysel modal analiz, (ii) büyük ölçekli bir köprüden sahada toplanan verilerle yalnızca çıkışa dayalı modal tanımlama ile yapılan operasyonel modal analiz ve (iii) sonlu eleman modeli güncellenmesini içeren üç temel alan üzerinde durulmuştur. Tüm durumlarda, incelenen kamera tabanlı titreşim izleme sistemlerinin performansı, geleneksel kablolu ivmeölçerler, lazer Doppler hızölçerler veya ticari kamera tabanlı titreşim izleme sistemlerine kıyasla değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, bu sistemlerin modal analiz ve sonlu eleman modeli analizi için yüksek doğrulukta veriler sağlayabildiği görülmüştür. Bununla birlikte, bu sistemlerin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi, hassasiyet, uyarıcı kuvvetin niteliği ve sinyal ile görüntü işleme süreçlerine ilişkin bazı kritik hususların dikkate alınmasını gerektirmektedir. Çalışmadan elde edilen bulgular doğrultusunda, mühendislik uygulamalarında kamera tabanlı titreşim izleme sistemlerinin daha yaygın kullanılabilmesi için çeşitli öneriler sunulmuştur.

Zhang vd. (2023), elektrik iletim kuleleri üzerinde çalışma yapmışlardır. Zaman alıcı ve zahmetli temaslı sensörler yerine ROI (ilgi alanı) bilgisayarlı görü yöntemi önermişlerdir. Ancak, iletim kuleleri genellikle dış ortamda bulunduğu ve arka planları karmaşık olduğundan, titreşim verilerinin elde edilmesi için kullanılan ROI anahtar noktası yöntemi, çeşitli gürültü türleriyle karşı karşıya kalmaktadır. Bu nedenle, çalışmadaki temel nokta, gürültünün giderilmesi ve gürültünün yöntemin doğruluğu üzerindeki etkisinin azaltılmasıdır. Piksel kümeleri üzerinde yapılan araştırmalarla küçük hataların tespiti için alt piksel köşe yöntemi kullanılmıştır. Genişletme-aşındırma yöntemi, görüntü gürültüsünü azaltabilmektedir. Varyansı 0.05 olan beyaz gürültü altında, genişletme-aşındırma yöntemi, ortalama hata (E_{mae}) ve ortalama kare hata (E_{mse}) oranlarını sırasıyla %27 ve %23 oranında azaltmış; 5 mm'den küçük mutlak hataya sahip verilerin toplam veri içindeki yüzdesini (σ_5) %8 ve 10 mm'den küçük mutlak hataya sahip verilerin yüzdesini (σ_{10}) %4.3 oranında artırmıştır. Bu değerler medyan filtre-keskinleştirme yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Histogram eşitleme yöntemi, arka plan aydınlatma koşullarını dengelemek ve homojen olmayan aydınlatmadan kaynaklanan tespit hatalarını azaltmak amacıyla kullanılmıştır. Histogram eşitleme yöntemi, E_{mae} ve E_{mse}

oranlarını sırasıyla %92 ve %99 oranında azaltmış; % σ 5 ve % σ 10 oranlarını sırasıyla 5 ve 3 kat artırmış, ayrıca tespit süresini %62 oranında kısaltmıştır. Varyansı 0.15 veya daha düşük olan beyaz gürültü altında, bu üç yöntemin birleştirilmesi Emae, Emse, % σ 5 ve % σ 10 oranlarının sayısal kararlılığını artırmış; bu da üç yöntemin bir kombinasyonunun, iletim kulesi yer değiştirme tespitine yönelik ROI bilgisayarlı görüntüleme yönteminin gürültüye karşı dayanıklılığını, sağlamlığını ve tespit doğruluğunu artırabileceğini göstermiştir.

Du vd. (2022), farklı ROI boyutlarının hesaplama sonuçlarına etkilerini incelemiş ve ideal bir boyut önermişlerdir. Ayrıca şablon eşleştirme ve özellik algılama yöntemlerini birleştiren görüntü tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir. Çalışmada, şablon eşleştirme yöntemi, hedefin konumunu ve ROI parametrelerini belirlemek için kullanılırken; özellik algılama yöntemi, yer değiştirme verilerinin çıkarılmasına odaklanmıştır. Önerilen yöntemin doğruluğu ve tutarlılığı laboratuvar modelleri, yüksek hızlı tren köprüleri ve kablo destekli köprü deneyler üzerinde test edilmiştir. Ayrıca, kısa mesafe ve uzun mesafe izleme cihazları ile milimetre düzeyinde yer değiştirme ölçümünün başarılabileceği gösterilmiştir.

Mevcut yer değiştirme tespit yöntemleri, aydınlatma koşulları, görüntü çözünürlüğü ve çekim hızı gibi etkenlerden etkilenmekte ve bu durum mühendislik uygulamalarını kısıtlamaktadır. Xiu vd. (2023), tarafından hazırlanan bu makalede, temaslı ivme izleme ile temassız yer değiştirme tanımlamasını birleştiren bir veri füzyonu yöntemi sunulmuş ve geleneksel temaslı ivme sensörlerinin yüksek dinamik örnekleme hızından yararlanılmıştır. Dinamik deformasyon durumlarını doğru bir şekilde tahmin eden bir yöntem geliştirilmiş ve doğrulanmıştır. Yapısal yer değiştirme, geliştirilmiş KLT algoritması ve asenkron çoklu hızda Kalman filtreleme yöntemiyle elde edilmiştir. Sonuçlar, önerilen yöntemin sadece görsel ölçüm tekniğine kıyasla yer değiştirme örnekleme hızını artırabileceğini ve yüksek frekanslı titreşim bilgilerini toplayabileceğini göstermiştir.

1.3. Tezin Amacı ve İçeriği

Çelik yapılarda korozyon, metal yorgunluğu, aşırı yüklerden kaynaklanan deformasyon, aşırı sıcaklık, aşınma, elemanlar arası bağlantıların gevşemesi ve çarpma gibi etkenler hasara neden olabilmektedir (Erdal, 2005). Bu etkenler, yapının planlanan hizmet ömrü süresince güvenli hizmet vermesini engelleyebilmekte ve can ile mal kaybına

sebepe olabilmektedir. Bunun önüne geçebilmek amacıyla yapıların düzenli olarak gözlemlenmesi ve bakımlarının aksatılmadan yapılması gereklidir. Ancak, özellikle köprü gibi yayalar ve taşıtlar tarafından sürekli kullanılan yapılardan düzenli aralıklarla ölçüm alınmasında zorluklar yaşanmaktadır. Bu zorlukların, temassız ölçüm yöntemleri kullanılarak aşılabileceği açıktır.

Tez çalışması kapsamında, laboratuvarında iki farklı küçük ölçekli çelik yapı modeli ve sahada çelik yaya üst geçidi yapısı üzerinde, temassız ölçüm yöntemlerinden biri olan video kamera tabanlı ölçüm yöntemi kullanılarak modal analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen modal parametreler (frekans ve mod şekilleri), ivmeölçer tabanlı modal analizler sonucunda elde edilen modal parametrelerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, modal parametreleri doğru yorumlayabilmek amacıyla ivmeölçer tabanlı modal parametreler temel alınarak yapıların sonlu eleman yöntemiyle modal analizleri gerçekleştirilmiş ve modal parametreleri karşılaştırılmıştır.

Video kamera tabanlı modal analizleri gerçekleştirebilmek için Lucas-Kanade Optik Akış Algoritması ve ARMA Modeli temel alınarak Python yazılımı ile oluşturulmuş kodlar kullanılmıştır. Video kamera tabanlı ölçüm sistemi ile elde edilen video kayıtları bu kodlara aktararak yer değiştirme verileri ve frekans değerleri elde edilmiştir.

Yapılan bu çalışmalar, video kamera tabanlı ölçüm yöntemlerine farklı bir bakış kazandırmayı, ivmeölçer tabanlı modal analizle karşılaştırarak yöntemin doğruluğunu ve kullanılabilirliğini test etmeyi; tutarsızlık varsa bunun sebebini ve nasıl üstesinden gelinebileceğini göstermeyi; ayrıca gelecekteki çalışmalara katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Tezin ilk bölümünde, konuyla ilgili yapılmış olan çeşitli çalışmalardan bahsedilmiştir. Bu çalışmalar yapı sağlığı izlemede kullanılan farklı yöntemlerle, yöntemlerin performansıyla ve yapılarda uygulanabilirliğiyle ilgili bilgiler içermektedir. Devamında, bu tez çalışmasında kullanılan video kamera tabanlı yapı sağlığı izleme yöntemi hakkında bilgiler verilmiştir. Tezin ikinci bölümünde, tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar hakkında bilgiler yer almaktadır. İki farklı küçük ölçekli çelik yapı modeli ve çelik yaya üst geçidi üzerinde gerçekleştirilen video kamera tabanlı ve ivmeölçer tabanlı modal analizlerinin yanında bu sonuçları destekleyen sonlu eleman yöntemi ile modal analizleri de yer almaktadır. Tezin üçüncü kısmında, deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Tezin dördüncü kısmında, bu konuda

Çalışma yapmak isteyenler için oneriler verilmiştir. Tezin son kısmında ise çalışmada kullanılan kaynaklar yer almaktadır.

1.4. Video Kamera Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Yönteminin Ölçüm Sistemi ve Yazılımı

Video kamera tabanlı yapı sağlığı izleme yönteminin temelini oluşturan ölçüm sistemi, genel olarak bir veya birden fazla kamera ile bir bilgisayardan oluşmaktadır. Kamera ve bilgisayar, kablo aracılığıyla birbirine bağlanmaktadır. Bu sayede kamerayla çekilen video kaydı, anlık olarak bilgisayar ekranında görüntülenebilmekte ve yazılımda kullanılmak üzere kaydedilebilmektedir. Video kayıtları ne kadar kaliteli elde edilebilirse, analiz sonucunda elde edilen veriler de o kadar tutarlı olmaktadır.

Ölçüm yazılımı ise görüntü elde etmeyi, elde edilen görüntülerin işlenmesini ve kalibre edilmesini; hedef takip algoritmaları ile görüntüdeki hareketi tespit ederek yer değiştirme verilerini bulmayı ve bu verilerle modal parametrelere ulaşmayı sağlamaktadır.

1.4.1. Görüntü Elde Etme ve İşleme

Görüntü işleme, dijital forma çevrilen görüntüler üzerinde matematiksel ve algoritmik düzenlemeler yaparak görüntüden bilgi edinme, görüntüyü istenen forma dönüştürme veya görüntüyü iyileştirme işlemidir (Aktaş, 2015).

1.4.2. Koordinat Dönüşümü ve Ölçeklendirme Faktörü

Bir nesnenin yer değiştirmesinin video görüntülerinden ölçülebilmesi için, piksel cinsinden ifade edilen görüntü koordinatları ile milimetre cinsinden ifade edilen fiziksel koordinatlar arasındaki ilişkinin belirlenmesi ve bu ilişkiye dayanarak uygun bir ölçekleme faktörünün hesaplanması gerekmektedir. Yaygın koordinat dönüşüm yöntemleri arasında tam projeksiyon matrisi, düzlemsel homografi matrisi ve ölçek faktörü bulunmaktadır (Zhuang vd., 2022).

Feng ve Feng (2020) tarafından geliştirilen ölçek faktörü, basit ve pratik bir kalibrasyon yöntemidir. Kameranın optik eksenini nesnenin yüzeyine dik olduğunda, ölçek faktörü (ÖF), kameranın içsel (odak uzaklığı, ana nokta gibi) ve dışsal (konum ve yönelim)

parametreleri ile kameranın nesneye olan uzaklığı dikkate alınarak, Denklem 1'deki formül ile hesaplanmıştır.

$$\text{ÖF} = \frac{d_{bilinen}}{I_{bilinen}} \text{ veya } \text{ÖF} = \frac{d_{bilinen}}{d_{bilinen}^i} d_{piksel} = \frac{D}{f} d_{piksel} \quad (1)$$

Burada $d_{bilinen}$ nesne yüzeyinin bilinen fiziksel uzunluğudur. $d_{bilinen}^i$ ve $I_{bilinen}$ ise sırasıyla görüntü düzlemine karşılık gelen fiziksel uzunluk ve piksel uzunluğudur. d_{piksel} , piksel boyutudur. D kamera ile nesne arasındaki mesafe, f ise kameranın odak uzaklığıdır.

Kameranın optik eksenini nesnenin yüzeyine dik olmadığında ise, nesne ile kamera arasında oluşan açı formüle dahil edilerek ölçek faktörü Denklem 2'deki formül ile hesaplanmıştır (Luo vd., 2023).

$$SF = \frac{d_{bilinen}}{d_{bilinen}^i \cos^2 \theta} d_{piksel} = \frac{D}{f \cos^2 \theta} d_{piksel} \quad (2)$$

1.4.3. Lucas-Kanade Optik Akış Algoritması ile Hedef Takibi

Yakalanan video görüntüsünden seçilen hareketli bir nesnenin hareketinin sürekli veya belli aralıklarla izlenmesi olayına hedef takibi denilmektedir. Hedef takibi için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu tekniklerden en çok kullanılanları şablon eşleştirme yöntemleri ve optik akış yöntemleridir.

Optik akış, bir dizi ardışık görüntüdeki piksel yoğunluklarındaki değişimleri analiz ederek, nesnelerin hareketini ve yönünü hareket vektörleriyle ifade eden bir yöntemdir (Elmas & Alkan, 2022). Optik akışı hesaplamak için birçok farklı yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlere, Horn ve Schunk (1981) tarafından geliştirilen genel bir fark yöntemi, Farnebäck (2003) tarafından geliştirilen yoğunluk tabanlı yöntem, Black ve Anandan (1996) tarafından geliştirilen eşleştirme yöntemi, Fleet ve Jepson (1990) tarafından geliştirilen faz tabanlı yöntem, Lucas ve Kanade (1981) tarafından geliştirilen yerel bir fark yöntemi örnek verilebilir. Bu tez çalışmasında Bruce D. Lucas ve Takeo Kanade tarafından 1981 yılında geliştirilen Lucas-Kanade Optik Akış Algoritması kullanılmıştır.

Lucas-Kanade Optik Akış Algoritması, bir görüntüdeki piksel yoğunluklarının zaman içindeki değişimini modelleyerek, her pikselin hareketini tahmin etmeye

çalışmaktadır. Bu algoritma, görüntüler arasında hareket eden bir nesnenin parlaklığının zaman içinde değişmediğini, hareketin küçük ve sürekli olduğunu, küçük bir komşuluk bölgesindeki tüm piksellerin aynı hareket vektörüne sahip olduğunu varsaymaktadır.

Lucas-Kanade yöntemi, düşük geçişli bir filtre kullanarak görüntü yoğunluğu ve görüntünün uzaysal ve zamansal türevlerinden hareket hızını Denklem 3'te verilen formül ile hesaplayabilmektedir (Al-Qudah & Yang, 2023).

$$I(x, t) = I(x + \delta x, t + \delta t) \quad (3)$$

Burada $I(x, t)$, görüntü yoğunluğunu temsil etmektedir. Görüntü yoğunluğunun korunduğu varsayımından hareketle Denklem 4 şu şekilde verilmiştir:

$$\nabla I(x, t) \cdot u + I_t(x, t) = 0 \quad (4)$$

Bu denklemde $\nabla I(x, t)$, görüntü yoğunluğunun iki yöndeki türevini; $I_t(x, t)$, zamana ilişkin kısmi türevini ve u ise iki boyutlu optik akış vektörünü ifade etmektedir. Denklem 3'teki iki bilinmeyenli denklemin çözülebilmesi için bir çerçeve içindeki piksellerin aynı hızla hareket ettiği varsayımı gerçekleştirilmiş ve en küçük kareler yöntemi kullanılarak yer değiştirme vektörü Denklem 5 ile hesaplanmıştır.

$$E(u) = \sum [\nabla I(x, t) \cdot u + I_t(x, t)]^2 \quad (5)$$

Lucas-Kanade algoritmasının büyük hareketleri tespit edebilmesi için, görüntülerin farklı ölçeklerde analiz edilmesi gerekmektedir (Bouguet, 2000). Bu yöntemde görüntü çözünürlükleri üç veya dört kat azaltılmaktadır. Aynı seviyedeki görüntüler arasındaki akış klasik yöntemle hesaplanırken, seviyeler arasındaki akış Denklem 6 veya Denklem 7 kullanılarak hesaplanmıştır (Al-Qudah & Yang, 2023).

$$g_i = (2v_i), i = L \quad (6)$$

$$g_i = (2v_i + g_{i-1}), i < L \quad (7)$$

Bu denklemde, L , en düşük seviyeyi; i , mevcut seviyeyi; v_i mevcut seviyedeki optik akışı; g_{i-1} ise bir önceki seviyeden gelen optik akışı temsil etmektedir. Görüntü çözünürlüğü arttıkça yer değiştirme azalmaktadır. Bulunan her seviyedeki optik akış birleştirilerek daha büyük yer değiştirmeler tespit edilebilmektedir.

1.4.4. ARMA Modeli ile Frekans Analizi

ARMA Modeli, frekans analizi, sinyal işleme ve zaman serisi analizinde kullanılan gelişmiş bir yöntemdir. ARMA Modeli, Otoregresif (AR) ve Hareketli Ortalama (MA) modellerinin bir kombinasyonu olarak formüle edilmekte ve genellikle ARMA (p, q) olarak ifade gösterilmektedir. Burada p ve q , sırasıyla AR ve MA bileşenlerinin derecelerini belirtmektedir (Box vd., 2015; Owen vd., 2001).

a) Otoregresif (AR) Bileşeni

AR bileşeni, serinin mevcut değerinin, önceki değerlerinin lineer bir kombinasyonu ve bir hata terimi ile ifade edilebileceği fikrine dayanmaktadır. Bu model, verilerdeki momentumu ve eğilimleri modellemekte, geçmişin etkilerinin sürekliliğini yakalamaktadır. p dereceli AR bileşeninde, zaman serisinin mevcut değeri X_t , önceki p değerinin lineer bir kombinasyonu ve beyaz gürültü serisi olan bir hata terimi ϵ_t ile ifade edilmektedir. AR bileşeni Denklem 8'de verilmiştir.

$$X_t = c + \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_p X_{t-p} + \epsilon_t \quad (8)$$

Burada X_t , serinin t anındaki değerini; c , sabit bir terimi; $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$, modelin otoregresif parametrelerini ve ϵ_t , ise t anındaki hata terimini temsil etmektedir.

b) Hareketli Ortalama (MA) Bileşeni

MA bileşeni, seriyi geçmiş hata terimlerinin lineer bir kombinasyonu olarak temsil etmekte ve rastgele şokların serinin mevcut değerini etkileyebileceği fikrini yansıtmaktadır. q dereceli MA bileşeninde serinin mevcut değeri, mevcut ve önceki q hata terimlerinin lineer bir kombinasyonu olarak ifade edilmektedir. MA kısmı Denklem 9'da verilmiştir.

$$X_t = \mu + \epsilon_t + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \theta_2 \epsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \epsilon_{t-q} \quad (9)$$

Burada, μ , serinin ortalamasını; $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$, modelin parametrelerini; $\epsilon_t, \epsilon_{t-1}, \dots, \epsilon_{t-q}$, hata terimlerini ifade etmektedir.

c) ARMA Modelinin Birleşimi

ARMA (p, q) Modeli bu iki bileşeni birleştirmekte ve hem geçmiş değerler hem de geçmiş hata terimlerini kullanarak şimdiki değeri tahmin etmektedir:

$$X_t = c + \phi_1 X_{t-1} + \dots + \phi_p X_{t-p} + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \epsilon_{t-q} + \epsilon_t \quad (10)$$

d) Parametre Tahmini

$c, \phi_1, \dots, \phi_p, \theta_1, \dots, \theta_q$ parametreleri genellikle Maksimum Olabilirlik Tahmini (MLE) veya Yule-Walker denklemleri gibi yöntemler kullanılarak tahmin edilmektedir. Bu yöntemler, modelin altında verilen verileri gözlemleme olasılığını maksimize eden parametrelerin çözülmesini içermektedir.

e) ARMA Modeli

ARMA Modeli hem momentum hem de zaman serisi verilerindeki rastgele dalgalanmaları ustaca yakalayabilmektedir. Parametreleri (AR ve MA bileşenleri) ayarlanarak, periyodik salınımlar veya rastgele titreşimler gibi yer değiştirme verilerinde gözlemlenen geniş bir frekans davranışını modelleyebilmektedir.

ARMA Modeli, bir zaman serisinin spektral yoğunluğunun tahmin edilmesini kolaylaştırmaktadır. Bu, bir sinyalin gücünün farklı frekans bileşenlerine nasıl dağıtıldığını anlama açısından çok önemlidir. Spektral yoğunluk analiz edilerek, belirli frekanslar tanımlanabilmektedir.

f) Yule-Walker Yöntemi

Yule-Walker Yöntemi (Box vd., 2015), ARMA Modeli'nin AR kısmının parametrelerini tahmin etmek için kullanılan bir yöntemdir. Otokorelasyon katsayılarını kullanmaktadır ve AR parametrelerini tahmin etmek için bir dizi lineer denklemi çözmektedir. Frekans analizinde, parametrelerin doğru tahmin edilmesi, zaman serisinin temel özelliklerini anlamak için önemlidir. Yule-Walker Yöntemi, bu parametrelerin güvenilir bir şekilde tahmin edilmesini sağlayarak, daha doğru bir spektral analize katkıda bulunmaktadır.

1.4.5. Gelişmiş Frekans Alanı Ayırıştırma Yöntemi

Gelişmiş Frekans Alanı Ayırıştırma Yöntemi (GFAAY), Frekans Alanı Ayırıştırma Yöntemi (FAAY)'nin geliştirilmiş halidir. Brincker vd. (2000) tarafından geliştirilmiş bu yöntem, operasyonel modal analiz (OMA) kapsamında kullanılmaktadır. OMA, bir yapının çevresel veya işletim koşullarına verdiği tepkilere dayanarak doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları gibi modal parametrelerin çıkarılmasını içeren yapısal dinamikler alanıdır. Gelişmiş Frekans Alanı Ayırıştırma, tanımlanamayan bir etki kuvveti ile iyi tanımlanmış bir davranış fonksiyonu arasındaki bağlantıyı ifade etmektedir. Bu bağlantı Denklem 11'de verilmiştir.

$$G_{yy}(j\omega) = H(j\omega)^* G_{xx}(j\omega) H(j\omega)^T \quad (11)$$

Burada $G_{xx}(j\omega)$, etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluğu Fonksiyonu'nu; $G_{yy}(j\omega)$, tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluğu Fonksiyonu'nu; $H(j\omega)$, Frekans Tepki Fonksiyonu'nu; *, kompleks eşleniğini ve T ise transpozeyi ifade etmektedir.

Her frekans adımı için $G_{yy}(j\omega)$ matrisine Tekil Değer Ayırıştırması (TDA) uygulanarak Denklem 12 elde edilmiştir.

$$G_{yy}(jw_i) = U_i S_i U_i^H \quad (12)$$

Burada U_i , tekil vektörleri; S_i , tekil değerlerden oluşan diyagonal matrisini; U_i^H ise kompleks eşlenik transpoze matrisini ifade etmektedir.

Denklem 12'deki Tekil Değer Ayırıştırması sonucunda, S_i diyagonal matrisindeki en büyük tekil değerler, yapının doğal frekanslarına karşılık gelmektedir. Bu doğal frekanslar, spektral yoğunluk fonksiyonunun tepe noktalarına karşılık gelmektedir. Aynı zamanda, bu frekanslardaki U_i tekil vektörleri, söz konusu frekansa ait mod şekillerini temsil etmektedir (Bendat vd., 2004).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Laboratuvar ortamında iki farklı küçük ölçekli çelik yapı modeli ve sahada çelik yaya üst geçidi yapısı üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Her bir yapı için üç farklı analiz gerçekleştirilmiştir: sonlu eleman yöntemi ile modal analiz, video kamera tabanlı modal analiz ve ivmeölçer tabanlı modal analiz. Video kamera tabanlı modal analiz sonucunda elde edilen modal parametreler, referans kabul edilen ivmeölçer tabanlı modal analiz sonucunda elde edilen modal parametrelerle karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. İvmeölçer tabanlı modal analiz sonucunda elde edilen frekans değerleri referans alınarak oluşturulan sonlu eleman yöntemiyle modal analiz, diğer analizlerden elde edilen frekans değerlerinin hangi modlara karşılık geldiğini tespit etmek ve mod şekillerini görerek doğru yorumlayabilmek amacıyla kullanılmıştır.

Sonlu eleman yöntemi ile modal analiz ANSYS yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. Yapıların gerçek ölçülerine ve malzeme özelliklerine uyularak modellemeler oluşturulmuş ve analizler gerçekleştirilmiştir.

Video kamera tabanlı modal analiz için laboratuvar koşulları ve saha koşulları göz önüne alınarak iki farklı ölçüm sistemi kurulmuştur. Laboratuvar modeli ölçüm sisteminde, kameranın yalnızca modele odaklanmasını ve parlama olmamasını sağlamak için modellerin arkasına bir fon perde yerleştirilmiştir. Ayrıca, titreşimleri net yakalamak ve kamera kalibrasyonunu kolaylaştırmak için modellere karekod şeklinde yapay hedefler yapıştırılmıştır. Sistem, ELP marka, kendinden lensli bir USB video kamera, bir tripod ve Bandicam (7.0.2) yazılımı yüklü bir bilgisayardan oluşmaktadır. Saha çalışması için kurulan sistem ise, bir adet Victorem™ CoaXPress serisi endüstriyel kamera, kamera için endüstriyel optik lens, kamera görüntülerinin kaydedilmesi için bir adet dijital video kaydedici, kaydedicinin bağlanması ve görüntülerin alınması için CoreView yazılımı yüklü bir bilgisayar ile video kaydedici ve bilgisayara güç sağlaması için bir adet taşınabilir güç kaynağından oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan tüm ekipmanlar ve teknik özellikleri Tablo 1’de listelenmiştir.

Tablo 1. Video kamera tabanlı ölçüm sistemi için çalışmalarda kullanılan ekipmanlar

Ekipman Resmi	Ekipman İsmi	Model	Teknik Özellikler
	Video Kamera	ELP-USBFHD08S-MFV (2.8-12mm)	Maksimum Çözünürlük: 1920×1080 piksel Kare hızı: 120 FPS Sensör tipi: OV4689 Piksel boyutu: 2.0×2.0 μm^2
	Endüstriyel Video Kamera	IO Industries CoaxPress VICTOREM 16B276MCX	Maksimum çözünürlük: 1456×1088 piksel Kare hızı: 276 FPS Sensör tipi: CMOS Piksel boyutu: 3,45 x 3,45 μm^2
	Endüstriyel Lens	Kowa LM75JC1MS 2/3" 75mm 2MP C-Mount Lens	Sensör boyutu: 2/3" Odak uzaklığı: 75 mm Piksel boyutu (μm): 5 Diyafraam aralığı: 2,5-22
	Dijital Video Kaydedici (DVR)	DVR Express Core 2 CoaXPress (CORE2CX)	Desteklenen maksimum veri hızı: 1620 Mb/s Veri depolama kapasitesi: 30 TB Kayıt formatı: Sıkıştırılmış kayıt
	Taşınabilir Güç Kaynağı	EcoFlow RIVER 2 Pro	Kapassite: 768 Wh AC Giriş: 220-240V~50Hz/60Hz, 940W Maks. DC Çıkış: 12,6V, 10A/3A/3A, 126W Maks.
	Bilgisayar (Laboratuvar)	Lenovo Ideapad L340-15IRH Gaming	Intel® Core™ i5-9300H CPU @ 2.40 GHz, 8 GB RAM, 250 SSD
	Bilgisayar (Saha)	HP Victus 16-D1006NT	Intel® Core™ i5-12500H 2.50 Ghz RAM: 16 GB SSD: 512 GB

Ölçüm sistemi kullanılarak laboratuvar modellerinde Bandicam, saha çalışmalarında ise CoreView yazılımı ile video kameranın görüntüleri eş zamanlı olarak bilgisayarda izlenmiş ve kaydedilmiştir.

Video kamera tabanlı modal analiz ile modal parametreleri elde edebilmek için Python programlama dilinde bir yazılım geliştirilmiştir. İlk olarak ölçüm sistemi ile elde edilen video görüntüleri yazılıma yüklenmiştir. Bu görüntüler işlenerek gri tonlamalı

görüntüye çevrilmiştir. Sonra ölçek faktörü uygulanmış, görüntünün piksel koordinatları ile fiziksel koordinatları arasında ilişki kurulmuştur. Daha sonra videonun ilk karesinde Shi-Tomasi (1994) köşe algılama yöntemi kullanılarak takip edilecek ilgi noktaları belirlenmiştir. Bu noktalar, laboratuvar modellerinde oluşturulan yapay hedeflerin (karekodların), saha çalışmasında ise yapının ölçüleri bilinen bir profil elemanı üzerinde bulunmaktadır. Ardışık karelerde bu ilgi noktalarının konumları Lucas-Kanade Optik Akış Algoritması aracılığıyla izlenmiş ve her bir noktadaki yer değiştirme miktarları hesaplanmıştır. Python'daki OpenCV kütüphanesi kullanılarak, bu yer değiştirmeler doğrusal optik akış vektörleri şeklinde elde edilmiştir. Hesaplanan bu vektörler, her bir kare için yapının titreşim altındaki yer değiştirmelerini zamana bağlı olarak ortaya koymuştur. Daha sonra bu yer değiştirme verileri kullanılarak Otoregresif Hareketli Ortalama (ARMA) Modeli ile frekans analizi yapılmıştır.

ARMA Modeli, özellikle odak noktası gelecekteki davranışı tahmin etmek veya kontrollü koşullar altında sistemin zamansal yapısını anlamak olduğunda, zaman serisi verilerini analiz etme ve modellemedeki gücü nedeniyle laboratuvar testlerinde sıkça kullanılmaktadır. Sistemin genellikle iyi tanımlanmış ve kontrollü olduğu laboratuvar ortamlarında, ARMA Modeli titreşim sinyallerinin altta yatan dinamiklerini yakalayıp tahmin amaçlı modelleyebildiği için avantajlıdır. Laboratuvar testleri genellikle kontrollü girdiler veya tepkiler içermekte olduğundan ARMA Modeli bu tür verilerin istatistiksel modellemesi için oldukça uygundur. Tam ölçekli modellerde de video kamera tabanlı ölçümleri daha hassas elde edebilmek için ARMA Modeli kullanılmıştır.

İvmeölçer tabanlı modal analiz, laboratuvar modellerinde iDynamics Uygulaması yüklü bir telefon, sahada ise piezoelektrik ivmeölçer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Telefonla elde edilen ivme kayıtlarından frekans analizi ARMA Modeli ile, piezoelektrik ivmeölçerden elde edilen ivme kayıtlarından frekans analizi ise Gelişmiş Frekans Alanı Ayırıştırma Yöntemi (GFAAY) ile gerçekleştirilmiştir.

GFAAY, giriş kuvvetlerinin ölçülmediği ve tepkinin frekans alanında analiz edildiği Operasyonel Modal Analiz (OMA) için özel olarak tasarlanmıştır. Bu, GFAAY'i gerçek dünya senaryolarında ivme verilerinden modal özellikleri (örneğin doğal frekanslar ve mod şekilleri) çıkarmak için ideal hale getirmektedir. Tam ölçekli testlerde amaç, genellikle bilinmeyen veya ortam uyarımı içerebilen operasyonel koşullar altında ilgili yapının doğal dinamik davranışını yakalamaktır. Bu nedenle, ivmeölçer tabanlı ölçümlerde Gelişmiş Frekans Alanı Ayırıştırma Yöntemi (GFAAY) daha uygundur.

2.1. Tek Katlı Düzlem Çelik Çerçeve Modeli

Çalışmaların temelini oluşturması amacıyla ilk model, Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Deprem ve Yapı Sağlığı Laboratuvarında bulunan tabla üzerine sabitlenecek şekilde, basit bir çerçeve modeli seçilmiştir. Modelin açıklığı 50 cm, yüksekliği ise 65 cm'dir. Şekil 1'de görülen modelde, kiriş için 50×40 mm, kolonlar için ise 50×6 mm boyutlarına sahip S235 kalite haddelenmiş ve içi dolu çelik kullanılmıştır. Kolonlar 28×28 cm boyutlarında plakalara ankastre mesnetlenerek tabla üzerine sabitlenmiştir.



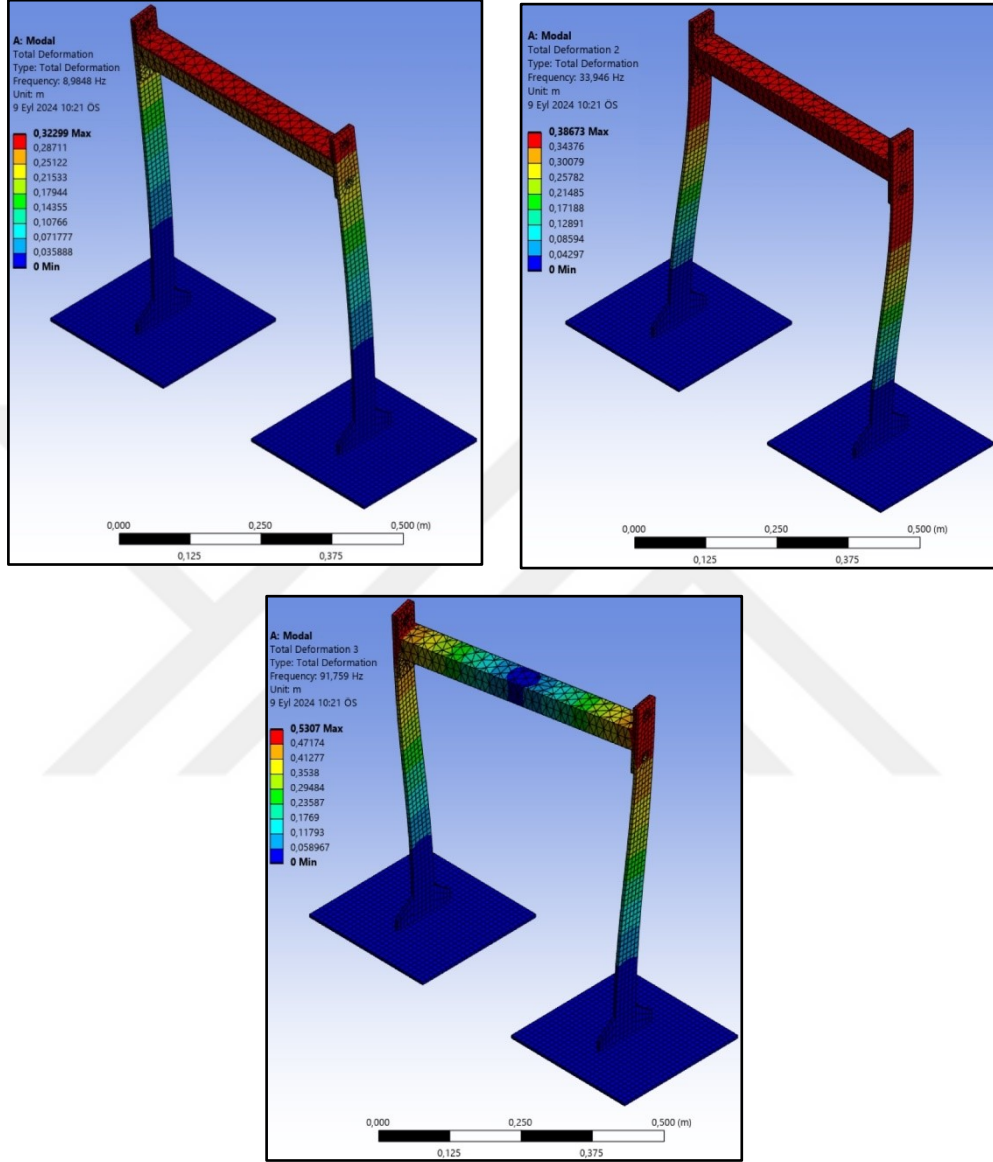
Şekil 1. Tek katlı düzlem çelik çerçeve modeli

2.1.1. Tek Katlı Düzlem Çelik Çerçeve Modelinin Sonlu Eleman Yöntemi ile Modal Analizi

Sonlu eleman yöntemi ile modal analizi için, bilgisayar destekli mühendislik programlarının başında gelen ve mühendislik çalışmaları için simülasyon ve analiz etme imkânı sunan, ASYS Inc. tarafından geliştirilen, ANSYS SpaceClaim, ANSYS Workbench, ANSYS Mechanical yazılımları kullanılmıştır.

Tek katlı çelik düzlem çerçeve modelinin, ANSYS SpaceClaim'de sonlu eleman modeli oluşturulduktan sonra ANSYS Mechanical yazılımı ile modal analizi

gerçekleştirilmiştir. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 2’de gösterilmiştir. Frekans değerleri ise Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Tek katlı düzlem çelik çerçeve modelinin ilk üç mod şekli

Tablo 2. Tek katlı çelik düzlem çerçeve modelinin modal analiz sonucunda elde edilen ilk üç frekansı

Mod	Frekans (Hz)
1	8.9848
2	33.946
3	91.759

2.1.2. Tek Katlı Düzlem Çelik Çerçeve Modelinin Video Kamera Tabanlı Deneysel Modal Analizi

Video kamera tabanlı deneysel modal analiz (DMA) için kullanılan ekipmanlar ve ekipmanların teknik özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Kullanılan ekipmanlar ve teknik özellikler

Ekipman Resmi	Ekipman İsmi	Model	Teknik Özellikler
	Video Kamera	ELP-USBFHD08S-MFV (2.8-12mm)	Maksimum çözünürlük: 1920 × 1080 Kare hızı: 120 FPS Sensör tipi: OV4689 Piksel boyutu: 2.0 x 2.0 µm ²
	Bilgisayar	Lenovo Ideapad L340-15IRH Gaming	Intel® Core™ i5-9300H 2.40 Ghz RAM: 8 GB SSD: 250 GB
	Mobil Telefon	iPhone 8 Plus	Hafıza: 64 GB RAM: 4 GB Yazılım: IOS 16.4.1

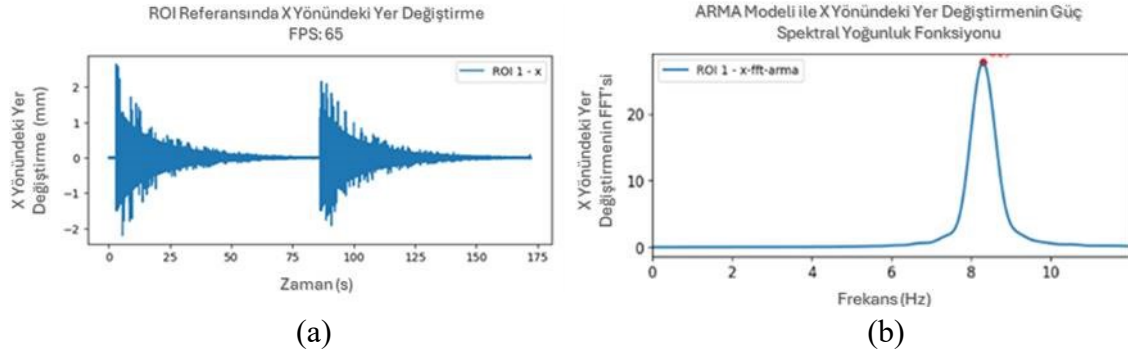
Video kamera ile görüntü alma işlemine başlamadan önce çekilecek görüntüden yüksek verim alabilmek amacıyla model, ortam ve kamerada birtakım düzenlemeler gerçekleştirilmiştir. Modelin titreşim hareketini net olarak görüntüleyebilmek ve kamera kalibrasyonu sırasında kolaylık sağlaması amacıyla modelin kolon ve kiriş birleşim yerlerine karekodlar yapıştırılmıştır. Modelin üzerine titreşim esnasında kamera ile aynı anda kayıt alabilmesi için iDynamics Uygulaması yüklü mobil telefon, ekranı kirişin üstünde kalacak şekilde kirişe bağlanmıştır. Kameranin sadece modele odaklanması, arkadaki nesneleri görmemesi, pencerelerden gelen ışıkların etkisiyle parlama yapmaması için modelin arkasına beyaz bir fon perde yerleştirilmiştir. Kamera, modelin bütün olarak görüntülenebileceği uygun bir mesafeye tripod yardımıyla konumlandırılmıştır. Kameranin saniye başına alınan kare sayısı (FPS değeri) 120 FPS olarak ayarlanmıştır. Bilgisayar tabla üzerine yerleştirilmiştir. Görüntünün anlık aktarılması için video kamera, USB kablo aracılığıyla bilgisayara bağlanmıştır. Yapılan tüm düzenlemeler Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Tek katlı düzlem çelik çerçeve modelinin video çekim düzeneği

Video kamera görüntüsünün kaydı için bilgisayara Bandicam (7.0.2) yazılımı yüklenmiştir. Bandicam yazılımı ile USB kablo aracılığıyla bilgisayara bağlanan kameranın çektiği görüntü anlık olarak bilgisayar ekranında görüntülenmiş ve kaydedilmiştir.

Tek katlı düzlem çelik çerçeve modelinin titreşim verilerinin video kaydı ile elde edilebilmesi için kayıt esnasında modele tek doğrultuda, düzenli aralıklarla tokmak ile iki kez vurulmuştur. Modelin titreşim hareketi tamamlandıktan sonra video kaydı durdurulmuştur. Video kaydı Python yazılımı ile oluşturulmuş koda aktarılarak ilk olarak modelin görüntü koordinatları (piksel) ile fiziksel koordinatları (mm) arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla kamera kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Modelin titreşim etkisiyle oluşan x doğrultusundaki yer değiştirmelerini bulmak için Lucas-Kanade Optik Akış Algoritması uygulanmıştır. ARMA Modeli kullanılarak yer değiştirme verilerinden frekans analizi gerçekleştirilmiştir. Modelin x-yönündeki frekansı 8.29 Hz olarak elde edilmiştir. Video kamera tabanlı deneysel modal analiz sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Video kamera tabanlı deneysel modal analiz sonucunda elde edilen a) yer değiştirme-zaman grafiği b) frekans grafiği

2.1.3. Tek Katlı Düzlem Çelik Çerçeve Modelinin İvmeölçer Tabanlı Deneysel Modal Analizi

Tek katlı düzlem çelik çerçeve modelinin üzerine titreşim esnasında kamera ile aynı anda kayıt alabilmesi için iDynamics Uygulaması yüklü mobil telefon, Şekil 5'te görüldüğü üzere telefon ekranı kirişin üstünde kalacak şekilde kirişe bağlanmıştır.



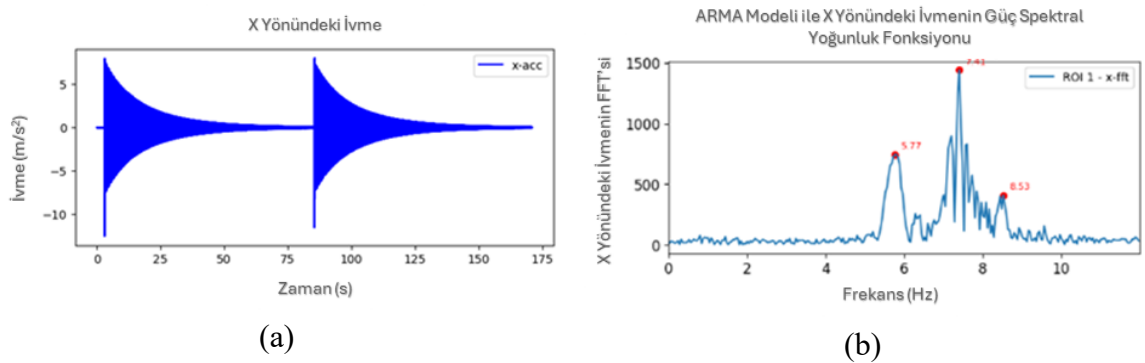
Şekil 5. iDynamics Uygulaması yüklü mobil telefonun kirişe bağlanması

iDynamics Uygulaması sayesinde telefon, ivmeölçer görevi görmektedir. İvme kayıtlarına uygulamadan ulaşılabilmekte ve kayıtlar dışarıya aktarılabilir. Modele uygulanan titreşim sırasında oluşan ivme kaydı Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Modele uygulanan titreşimin iDynamics Uygulaması'nda görülen ivme kaydı

Dışarıya aktarılan ivme kayıtları .txt formatına dönüştürülmüştür. Elde edilen kayıtlar ARMA modelini kullanacak şekilde Python yazılımı ile düzenlenmiş ve frekans analizleri gerçekleştirilmiştir. Modelin frekansı x doğrultusunda 8.53 Hz olarak bulunmuştur. iDynamics Uygulaması'ndan elde edilen ivme kayıtlarının grafiği ve modal analizi ile elde edilen frekans grafiği Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. iDynamics Uygulaması ile elde edilen ivme kayıtlarının a) ivme-zaman grafiği b) frekans grafiği

Tek katlı düzlem çelik çerçeve modelinin video kamera tabanlı modal analizi ve ANSYS sonlu eleman yöntemiyle modal analizi sonucunda elde edilen frekans değerleri, ivmeölçer tabanlı modal analiz sonucunda elde edilen frekans değerleriyle Tablo 4'te karşılaştırılmıştır. Tabloda fark sütunundaki ilk değer ivmeölçerle ANSYS sonlu eleman yöntemiyle arasındaki, ikinci değer ise ivmeölçerle video kamera tabanlı yöntem arasındaki yüzde hatayı göstermektedir. Bu karşılaştırmada ivmeölçerin temel alınmasının nedeni, uzun yıllardır üzerinde yapılan çalışmalarla modal analizdeki güvenilirliğinin kanıtlanmış olmasıdır. Frekans değerleri arasındaki küçük tutarsızlıklar, ölçüm yöntemleri arasındaki farklılıkları ve yöntemlerin hassasiyetlerini göstermektedir. Video kamera tabanlı modal analizin sadece ilk modu yakalayabilmiş olması, kameranın FPS değerinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 4. Modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Model	Frekans (Hz)			Fark (%)
	ANSYS	Video Kamera	İvmeölçer	
Tek Katlı Düzlem Çelik Çerçeve	8.9848	8.29	8.53	5.33/2.81
	33.946	-	-	-
	91.759*	-	-	-
* Burulma modu				

2.2. Tek Katlı Uzak Kayma Çerçevesi Modeli

Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Deprem ve Yapı Sağlığı Laboratuvarında yapılan çalışmada kullanılan ikinci model, tek katlı uzak kayma çerçevesidir. Şekil 8'de verilen model alt levha, üst levha ve dört adet kolondan oluşmaktadır. Alt levhanın boyutları 300×300×10 mm, üst levhanın boyutları 600×600×5 mm'dir. 1000×50×5 mm boyutlarında dört adet levha, kaynakla alt ve üst levhalarla birleştirilmiştir. Alt levha üzerine konulan ağırlıklar yardımıyla zemine mesnetlenmiştir. Modelin çelik sınıfı S235'tir.

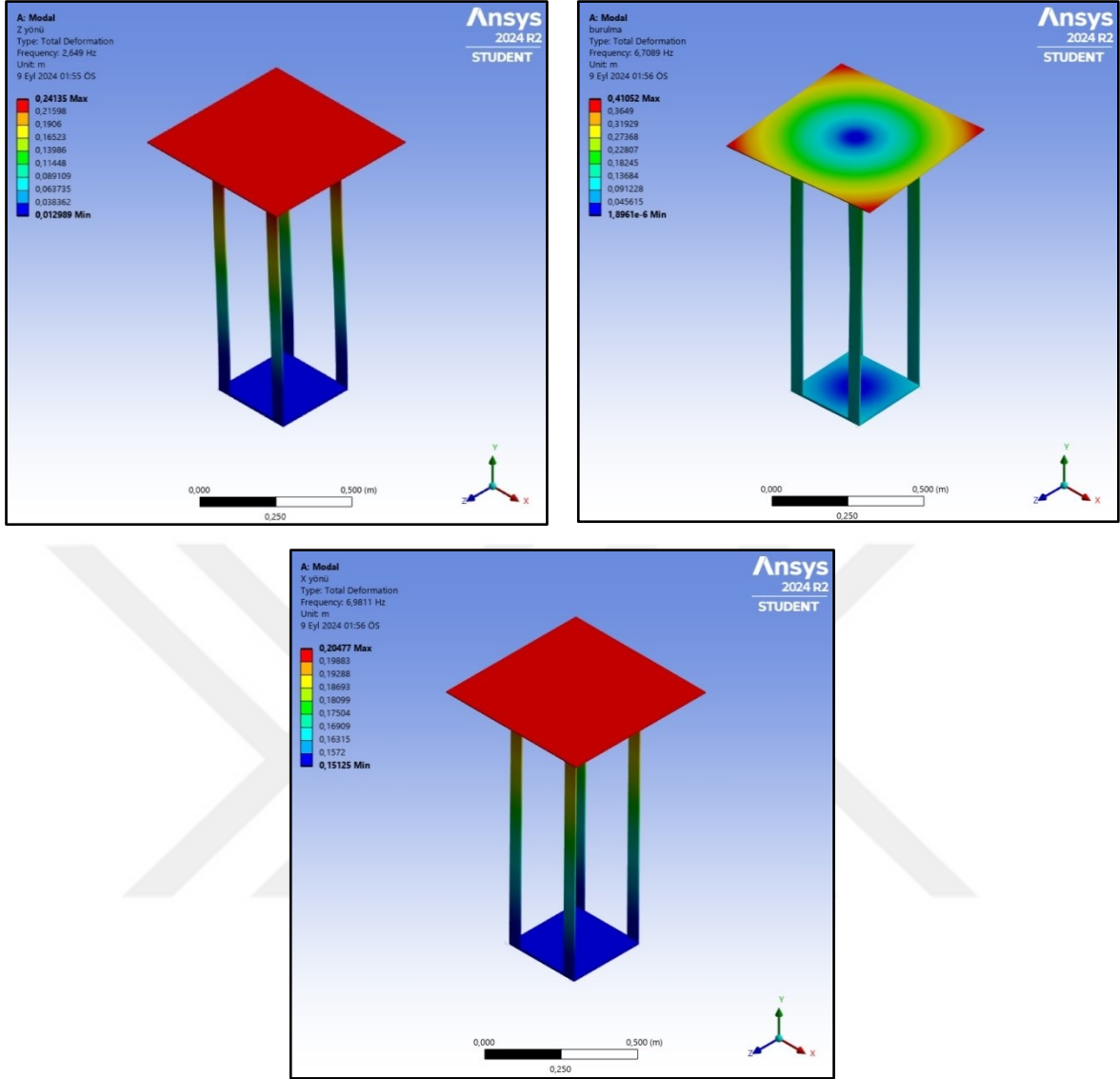


Şekil 8. Tek katlı uzay kayma çerçevesi modeli

2.2.1. Tek Katlı Uzay Kayma Çerçevesi Modelinin Sonlu Eleman Yöntemi ile Modal Analizi

Tek katlı uzay kayma çerçevesi modelinin sonlu eleman yöntemi ile modal analizi, bir önceki tek katlı düzlem çelik çerçeve modelinde olduğu gibi ANSYS yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

Tek katlı uzay kayma çerçevesi modelinin, modal analiz sonucunda elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 9’da gösterilmiştir. Frekans değerleri Tablo 5’te verilmiştir.



Şekil 9. Tek katlı uzay kayma çerçevesi modelinin ilk üç mod şekli

Tablo 5. Tek katlı uzay kayma çerçevesi modelinin ilk üç frekansı

Mod	Frekans (Hz)
1	2.649
2	6.7089
3	6.9811

2.2.1. Tek Katlı Uzay Kayma Çerçevesi Modelinin Video Kamera Tabanlı Deneyisel Modal Analizi

Video kamera tabanlı deneyisel modal analiz (DMA) için kullanılan ekipmanlar ve ekipmanların teknik özellikleri Tablo 3'te verilmiştir. Video kamera ile görüntü alma işlemi öncesinde bir önceki tek katlı düzlem çelik çerçeve modelinde gerçekleştirilen birtakım düzenlemeler, tek katlı uzay kayma çerçevesi modeli için de gerçekleştirilmiştir. Modelin titreşim hareketini net olarak görüntüleyebilmek ve kamera kalibrasyonu sırasında kolaylık sağlaması amacıyla modelin üst levhasının köşelerine ve ortasına karekodlar yapıştırılmıştır. Modelin üst levhasına, titreşim esnasında kamera ile aynı anda kayıt alabilmesi için iDynamics Uygulaması yüklü mobil telefon yerleştirilmiştir. Kameranin sadece modele odaklanması, arkadaki nesneleri görmemesi, pencerelerden gelen ışıkların etkisiyle parlama yapmaması için modelin arkasına kahverengi bir fon perde kullanılmıştır. Kamera, modelin bütün olarak görüntülenebileceği 120 cm yüksekliğe Şekil 10'da gösterilen düzenek yardımıyla konumlandırılmıştır. Kameranin saniye başına alınan kare sayısı (FPS değeri) 120 FPS olarak ayarlanmıştır. Bilgisayar laboratuvarındaki bir makinenin üzerine yerleştirilmiştir. Görüntünün anlık aktarılması için video kamera USB kablo aracılığıyla bilgisayara bağlanmıştır. Yapılan bu düzenlemeler Şekil 11'de gösterilmiştir.

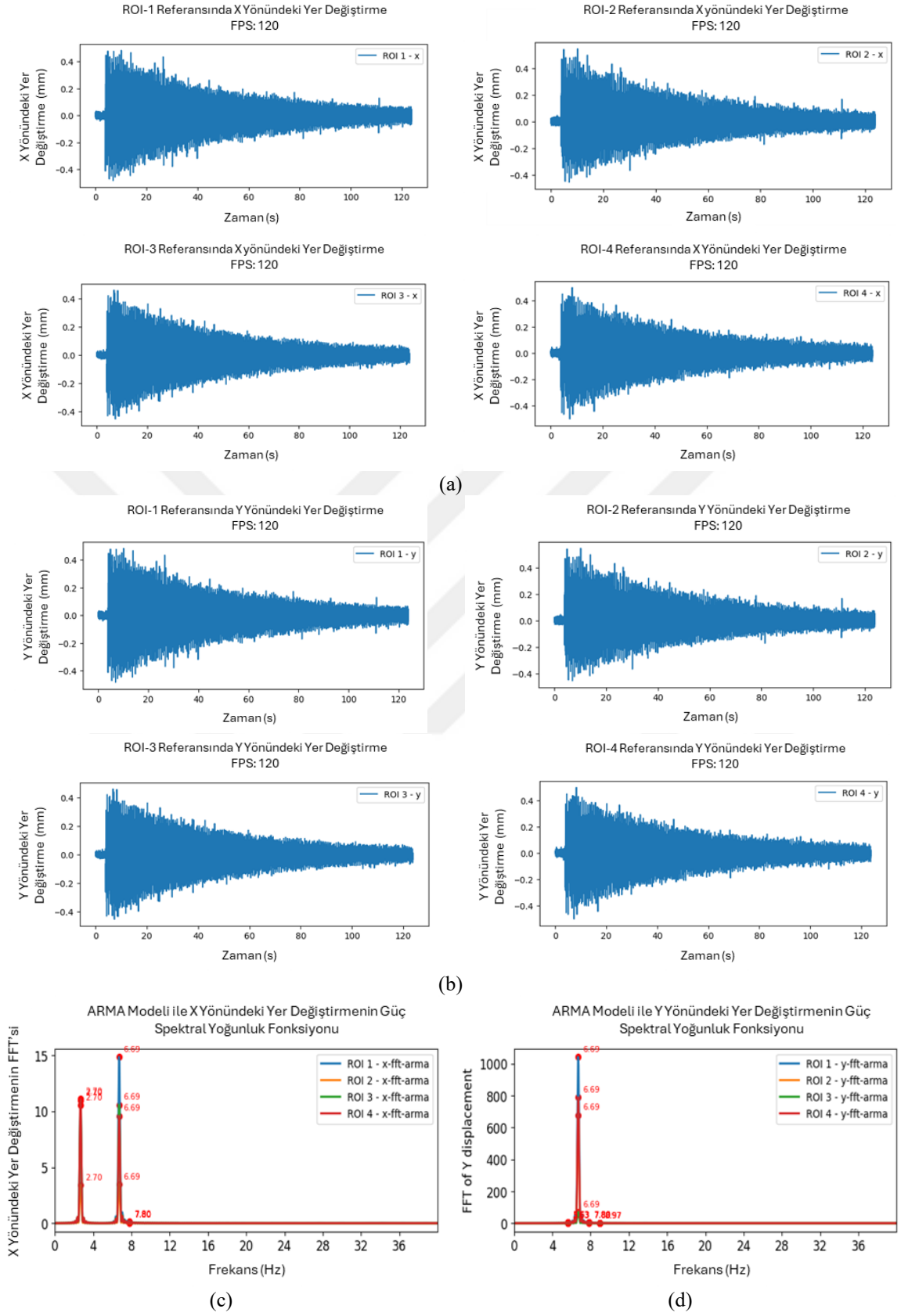


Şekil 10. Kameranin yerleştirilmesi



Şekil 11. Tek katlı uzay kayma çerçevesi modelinin video çekim düzeneği

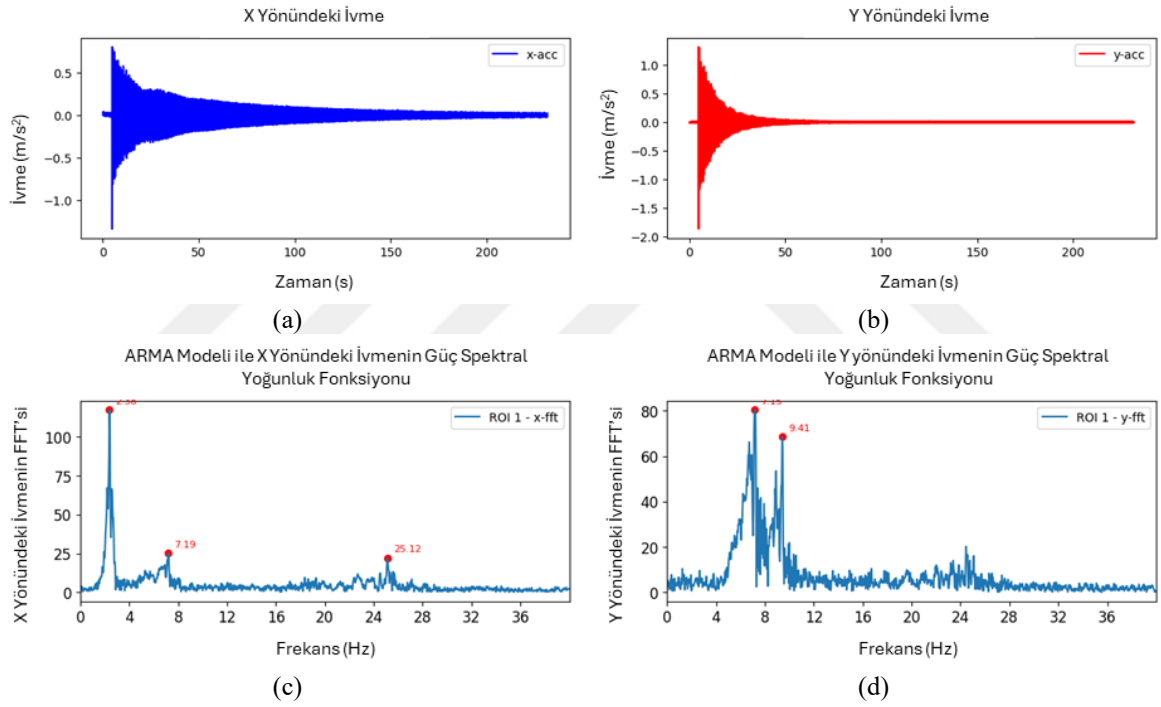
Video kamera görüntüsünün kaydı için Bandicam yazılımı kullanılmıştır. Tek katlı uzay kayma çerçevesi modelinin titreşim verilerinin video kaydı ile elde edilebilmesi için kayıt esnasında modele üst levhanın ortası doğrultusunda, bir kez vurulmuştur. Modelin titreşim hareketi tamamlandıktan sonra video kaydı durdurulmuştur. Video kaydı Python yazılımı ile oluşturulmuş koda aktarılarak ilk olarak modelin görüntü koordinatları (piksel) ile fiziksel koordinatları (mm) arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla kamera kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Modelin titreşim etkisiyle oluşan x ve y doğrultularındaki yer değiştirmelerini bulmak için Lucas-Kanade Optik Akış Algoritması uygulanmıştır. ARMA Modeli kullanılarak yer değiştirme verilerinden frekans analizleri gerçekleştirilmiştir. Modelin x-yönündeki frekansları 2.70 Hz ve 6.69 Hz; y-yönündeki frekansı 6.69 Hz olarak elde edilmiştir. Video kamera tabanlı deneysel modal analiz sonucunda elde edilen grafikler Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. Video kamera tabanlı deneysel modal analiz sonucunda elde edilen (a) x-yönündeki yer değiştirme-zaman grafikleri ve (c) x-yönündeki frekans grafiği; (b) y-yönündeki yer değiştirme-zaman grafikleri ve (d) y-yönündeki frekans grafiği

2.2.2. Tek Katlı Uzay Kayma Çerçevesi Modelinin İvmeölçer Tabanlı Deneysel Modal Analizi

Modelin titreşimi esnasında kamera ile aynı anda kayıt alabilmesi için iDynamics Uygulaması'nı kullanan mobil telefon üst levhanın ortasına yerleştirilmiş ve x ile y doğrultularındaki ivme kayıtları elde edilmiştir. Bu kayıtlar kullanılarak Python kodlaması ile frekans analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda, modelin frekansı x-yönünde 2.38 Hz, 7.19 Hz ve 25.12 Hz; y-yönünde 7.15 Hz ve 9.41 Hz olarak bulunmuştur. iDynamics Uygulaması'ndan elde edilen x ve y yönlü ivme-zaman grafikleri ve modal analizi ile elde edilen frekans grafikleri Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 13. iDynamics Uygulaması ile elde edilen ivme kayıtlarının (a) x-yönündeki ivme-zaman grafiği ve (c) x-yönündeki frekans grafiği; (b) y-yönündeki ivme-zaman grafiği ve (d) y-yönündeki frekans grafiği

Tablo 6'da tek katlı uzay kayma çerçevesi modelinin video kamera tabanlı modal analizi ve ANSYS sonlu eleman yöntemiyle modal analizi sonucunda elde edilen frekans değerleri, ivmeölçer tabanlı modal analiz sonucunda elde edilen frekans değerleriyle karşılaştırılmıştır.

Tablo 6. Modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Model	Frekans (Hz)			Fark (%)
	ANSYS	Video Kamera	İvmeölçer	
Tek Katlı Uzay Kayma Çerçevesi	2.649	2.70	2.38	11.30/13.45
	6.9811	6.69	7.15	2.36/6.43
	6.7089*	6.69*	7.19*	6.69/6.95
* Burulma modu				

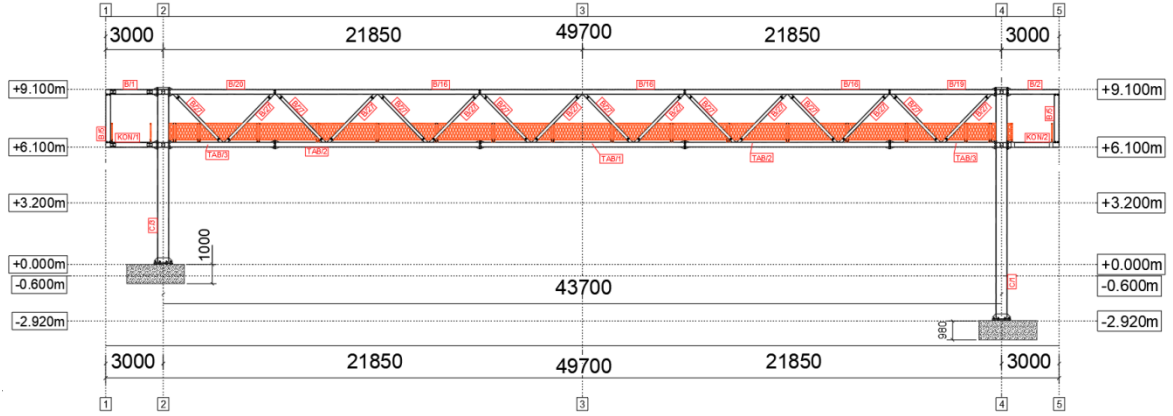
2.3. Çelik Yaya Üst Geçidi

Bu tez çalışmasında gerçek bir yapı modeli olarak Trabzon-Rize sahil yolu üzerinde, Karadeniz Teknik Üniversitesi C Kapısı ile Trabzon Havalimanı arasındaki bağlantıyı sağlayan Şekil 14’te gösterilen üst geçit tercih edilmiştir. Bu üst geçit 2021 yılında inşa edilmiştir.



Şekil 14. Çelik yaya üst geçidinin uzaktan görüntüsü

Çelik yaya üst geçidinin toplam uzunluğu 49.7 metre, ana açıklık uzunluğu ise 43.7 metredir. Zemin seviyesinden 9.1 metre yükseklikte yer alan üst geçidin tabliye yüksekliği ise 6.1 metredir. Üst geçidin, Varol Proje Ofisi (2021) tarafından AutoCAD ortamında detaylı bir projesi hazırlanmıştır. Şekil 15’te projeden alınan üst geçidin detaylı ölçüleri gösterilmiştir.



Şekil 15. Çelik yaya üst geçidinin AutoCAD kesiti ve ölçüleri

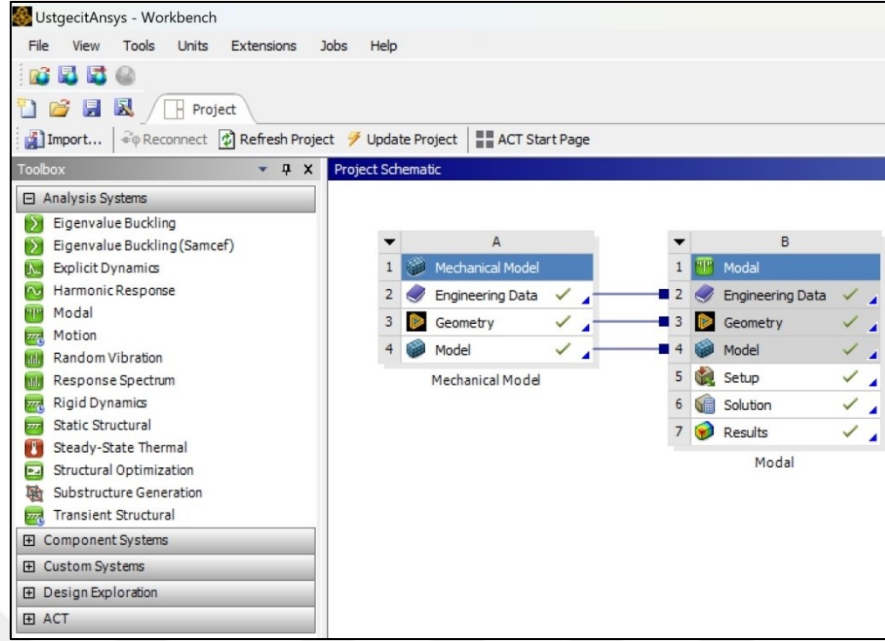
Çelik yaya üst geçidi, projesi sırasında yürürlükte olan, TS EN 1090-2 +A1: 2012-12 Ek B (2018) standardına uygun olarak inşa edilmiş olup uygulama sınıfı EXC 2'dir. Çelik yaya üst geçidinin yapımında kullanılan elemanların çelik sınıfları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Çelik yaya üst geçidinin yapımında kullanılan elemanların çelik sınıfları

Eleman	Sınıf
Plakalar	S235JR (St37)
Boru ve kutu profilleri	S235JR (St37)
HEA ve IPE profilleri	S275JR (St44)
NPI ve NPU profilleri	S235JR (St37)

2.3.1. Çelik Yaya Üst Geçidinin Sonlu Eleman Yöntemi ile Modal Analizi

Sonlu eleman modellemesi ve modal analizi için, laboratuvar modellerinde de olduğu gibi, ANSYS yazılımı kullanılmıştır. Modal analiz için Şekil 16'da verilen Workbench programındaki "Toolbox" tan "Modal" seçilmiştir. Açılan sekmede sıralanan analiz için gerekli olan adımlar, sırasıyla tamamlanmıştır.



Şekil 16. ANSYS Workbench modal analiz seçimi

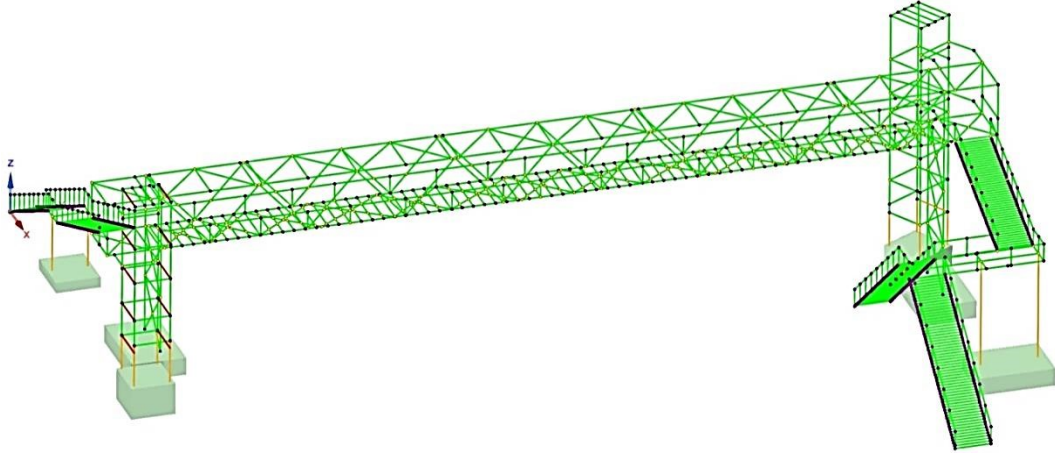
İlk olarak çelik yaya üst geçidi inşasında kullanılan malzemelerin özellikleri açılan sekmede yer alan “Engineering Data” dan girilmiş olup Şekil 17’de gösterilmiştir. Malzeme özellikleri girildikten sonra çelik yaya üst geçidi modelinin geometrisi, AutoCAD proje çizimleri esas alınarak Şekil 18’de görüldüğü gibi ANSYS SpaceClaim’de çizilmiştir.

Outline of Schematic A2, B2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data			Source
2	Material			Description
3	Concrete			
4	Structural Steel			
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 3: Concrete				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2300	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio		
8	Young's Modulus	3E+10	Pa	
9	Poisson's Ratio	0,18		
10	Bulk Modulus	1,5625E+10	Pa	
11	Shear Modulus	1,2712E+10	Pa	

Properties of Outline Row 4: Structural Steel				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio		
8	Young's Modulus	2E+11	Pa	
9	Poisson's Ratio	0,3		
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	

Şekil 17. ANSYS Workbench çelik yaya üst geçidi modelinin malzeme özelliklerinin girilmesi



Şekil 18. AutoCAD çizimleri esas alınarak ANSYS SpaceClaim'de çizilen çelik yaya üst geçidi modelinin geometrisi

Çelik yaya üst geçidinin modellenmesinde kullanılan profiller, gerçek profillerle eşleşecek şekilde ANSYS SpaceClaim kütüphanesinden hazır olarak seçilmiştir. Seçilen profiller Tablo 8'de listelenmiştir. Kütüphanede bulunmayan profiller ise elle girilmiş olup Tablo 9'da listelenmiştir.

Tablo 8. ANSYS SpaceClaim kütüphanesinden seçilen profiller

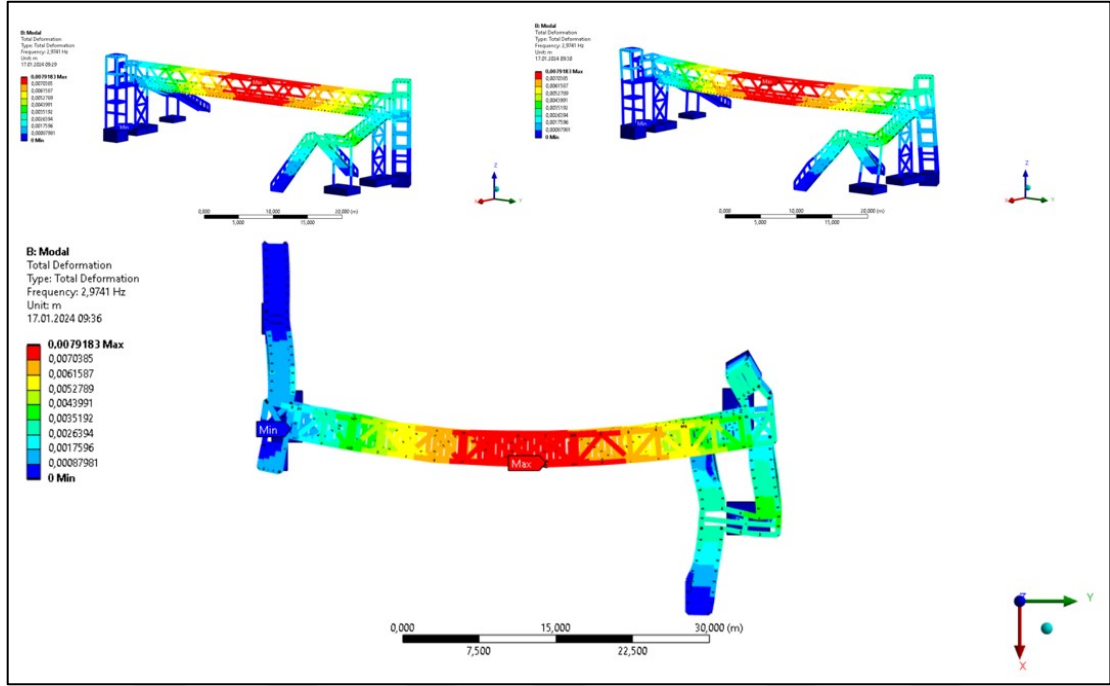
ANSYS SpaceClaim kütüphanesinden seçilen profiller	HE600B
	HE260B
	HE300B
	HE160B
	UPN260
	IPN120

Tablo 9. ANSYS SpaceClaim'de manuel olarak oluşturulan profiller

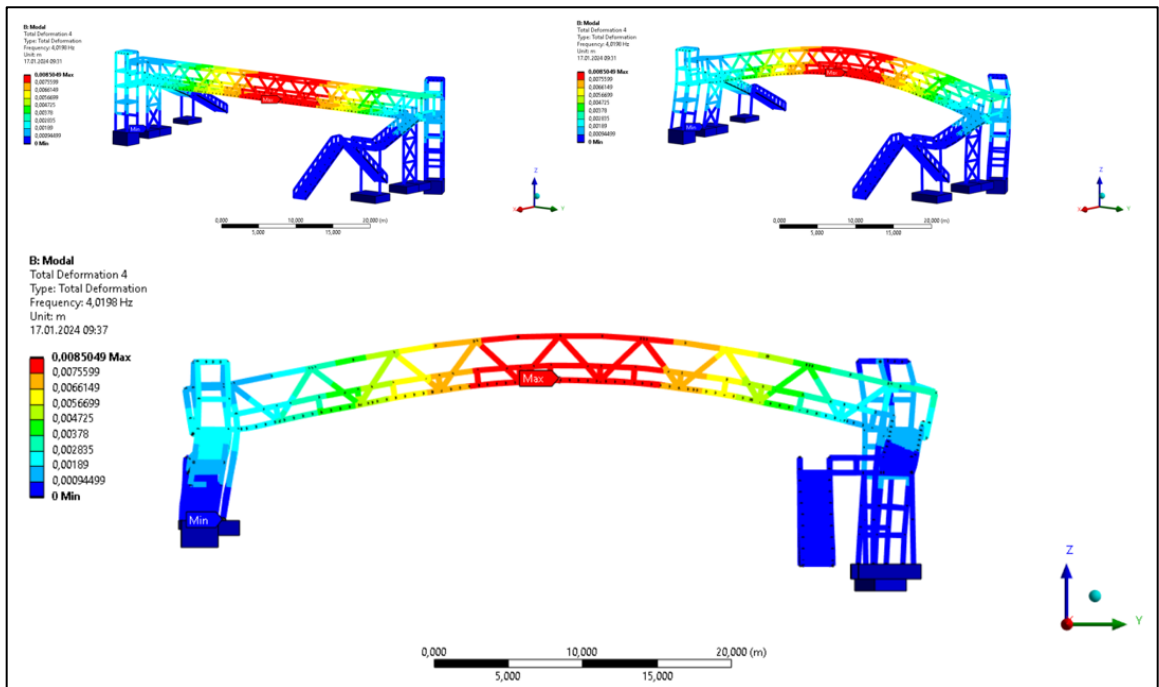
Ansys® SpaceClaim'de manuel olarak oluşturulan profiller	L70*70
	SHS50*3
	RHS150*6

Geometri çiziminde sonra ANSYS Mechanical yazılımına geçilmiştir. Sonlu eleman modeli üzerinde gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra modal analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda 30 tane mod şekli ve frekans değerleri elde edilmiştir. Bu mod şekilleri incelendiğinde tekrarlayan modlar arasından x-yönündeki mod şeklinin 1. modda, y-yönündeki mod şeklinin 4. modda ve burulma mod şeklinin 9. modda yakalandığı görülmüştür.

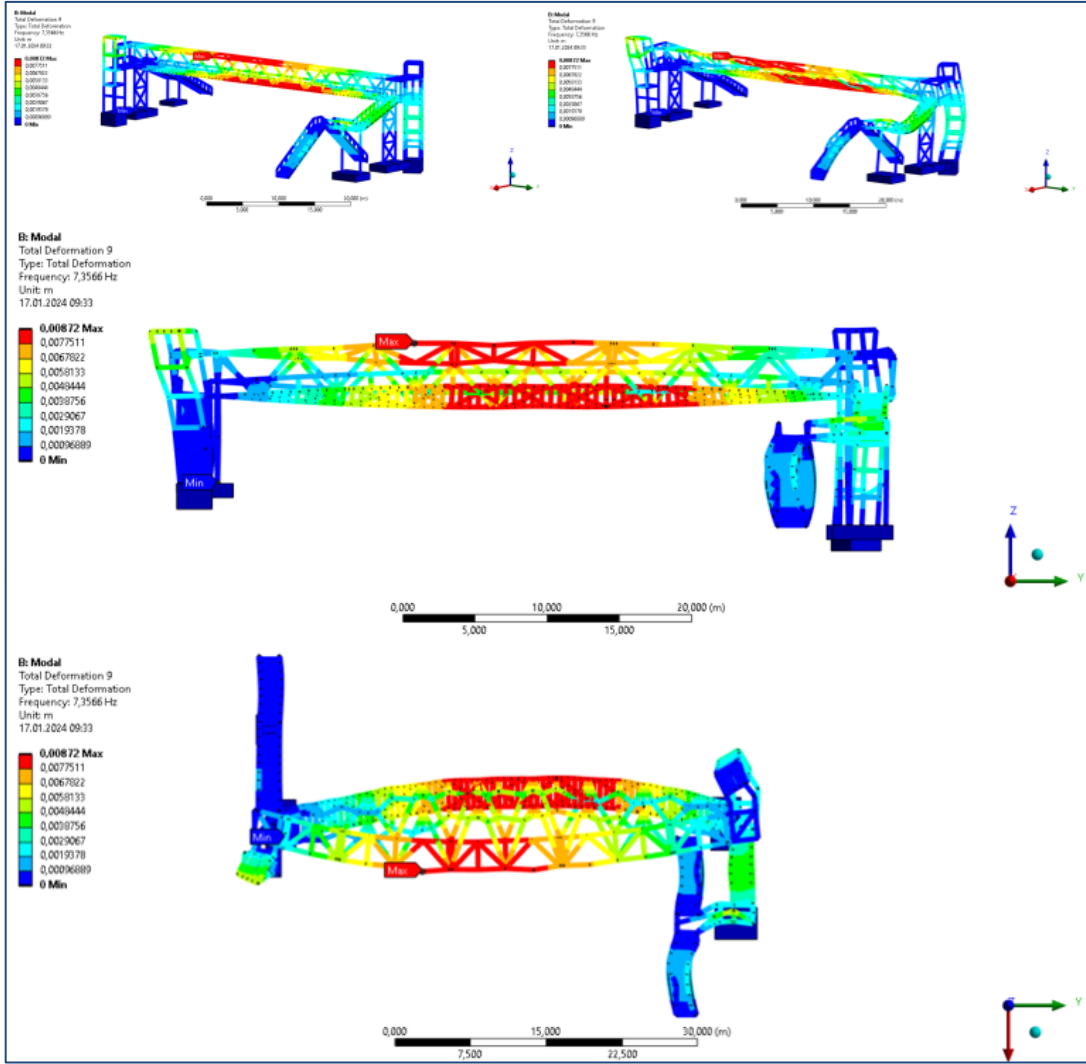
Çelik yaya üst geçidi modelinin, modal analizi sonucunda elde edilen 1., 4. ve 9. mod şekilleri sırasıyla Şekil 19, 20 ve 21’de gösterilmiştir. Frekans değerleri Tablo 10’da verilmiştir.



Şekil 19. Çelik yaya üst geçidinin 1. mod şekli (Ölçek: 4.0e+002)



Şekil 20. Çelik yaya üst geçidinin 4. mod şekli (Ölçek: 4.2e+002)



Şekil 21. Çelik yaya üst geçidinin 9. mod şekli (Ölçek: 3.9e+002)

Tablo 10. Çelik yaya üst geçidi modelinin modal analizi sonucunda elde edilen seçili modların frekansları

Mod	Frekans (Hz)
1	2.9741
4	4.0198
9	7.3566

2.3.2. Çelik Yaya Üst Geçidinin Video Kamera Tabanlı Operasyonel Modal Analizi

Video kamera tabanlı operasyonel modal analiz (OMA) için kullanılan ekipmanlar ve ekipmanların teknik özellikleri Tablo 11’de verilmiştir. Video kamera ile görüntü alma işlemine, çekilecek görüntüden yüksek verim alabilmek amacıyla, havanın açık ve

rüzgârsız olduğu bir günde, sabah trafiğinin nispeten azalmış olduğu 10.00 saatinde başlanmıştır. Lens takılı endüstriyel video kamera, üst geçidin elemanlarının net olarak görülebileceği, üst geçitten yaklaşık 100 metre mesafeye tripod yardımıyla Şekil 22’de görüldüğü gibi konumlandırılmıştır. Kameranin saniye başına alınan kare sayısı (FPS değeri), dış ortam koşullarının etkisini azaltmak amacıyla, 276 FPS olarak ayarlanmıştır. Görüntünün kaydedilebilmesi için, endüstriyel video kamera kablo aracılığıyla dijital video kaydediciye bağlanmıştır. Görüntünün bilgisayara aktarılması ve yansıtılması için dijital video kaydedici, düz bir zemine yerleştirilmiş olan bilgisayara HDMI kablosu ile bağlanmıştır. Bilgisayarın ve dijital video kaydedicinin gücü, taşınabilir güç kaynağı ile sağlanmıştır.

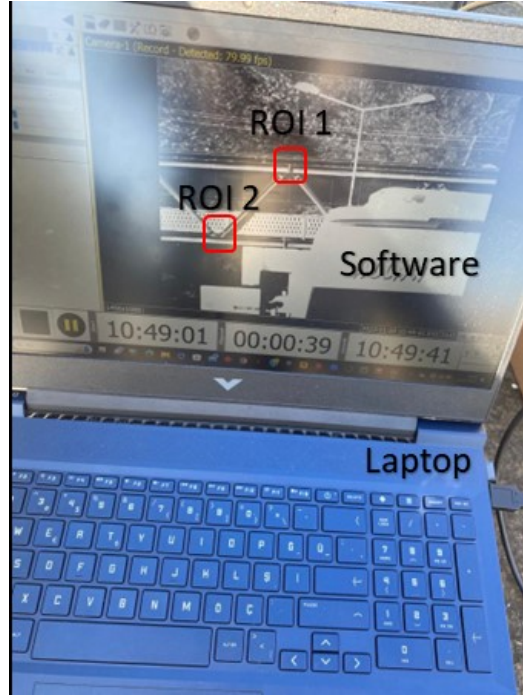
Tablo 11. Kullanılan ekipmanlar ve teknik özellikler

Ekipman Resmi	Ekipman İsmi	Model	Teknik Özellikler
	Endüstriyel Video Kamera	IO Industries CoaxPress VICTOREM 16B276MCX	Maksimum çözünürlük: 1456×1088 Kare hızı: 276 FPS Sensör tipi: CMOS Piksel boyutu: 3.45 x 3.45 μm^2
	Endüstriyel Lens	Kowa LM75JC1MS 2/3" 75mm 2MP C-Mount Lens	Sensör boyutu: 2/3" Odak uzaklığı: 75 mm Piksel boyutu (μm): 5 Diyafram aralığı: 2.5-22
	Dijital Video Kaydedici (DVR)	DVR Express Core 2 CoaXPress (CORE2CX)	Desteklenen maksimum veri hızı: 1620 Mb/s Veri depolama kapasitesi: 30 TB Kayıt formatı: Sıkıştırılmış kayıt
	Taşınabilir Güç Kaynağı	EcoFlow RIVER 2 Pro	Kapasite: 768 Wh AC Giriş: 220-240V~50Hz/60Hz, 940W Maks. DC Çıkış: 12.6V, 10A/3A/3A, 126W Maks.
	Bilgisayar	HP Victus 16-D1006NT	Intel® Core™ i5-12500H 2.50 Ghz RAM: 16 GB SSD: 512 GB



Şekil 22. Kameranın yerleşimi

Bilgisayara bağlanan dijital video kaydedicinin çalışabilmesi için bilgisayara CoreView DVR yazılımı yüklenmiştir. Bu yazılım ile kameranın çektiği görüntü anlık olarak bilgisayar ekranında görüntülenmiş ve kaydedilmiştir. Çelik yaya üst geçidinin doğal titreşim verilerinin video kaydı ile elde edilebilmesi için yaklaşık birer dakikalık çekimler gerçekleştirilmiştir. Çekimlerden elde edilen kayıtlardan biri, Şekil 23'teki bilgisayar ekranında görülmektedir.

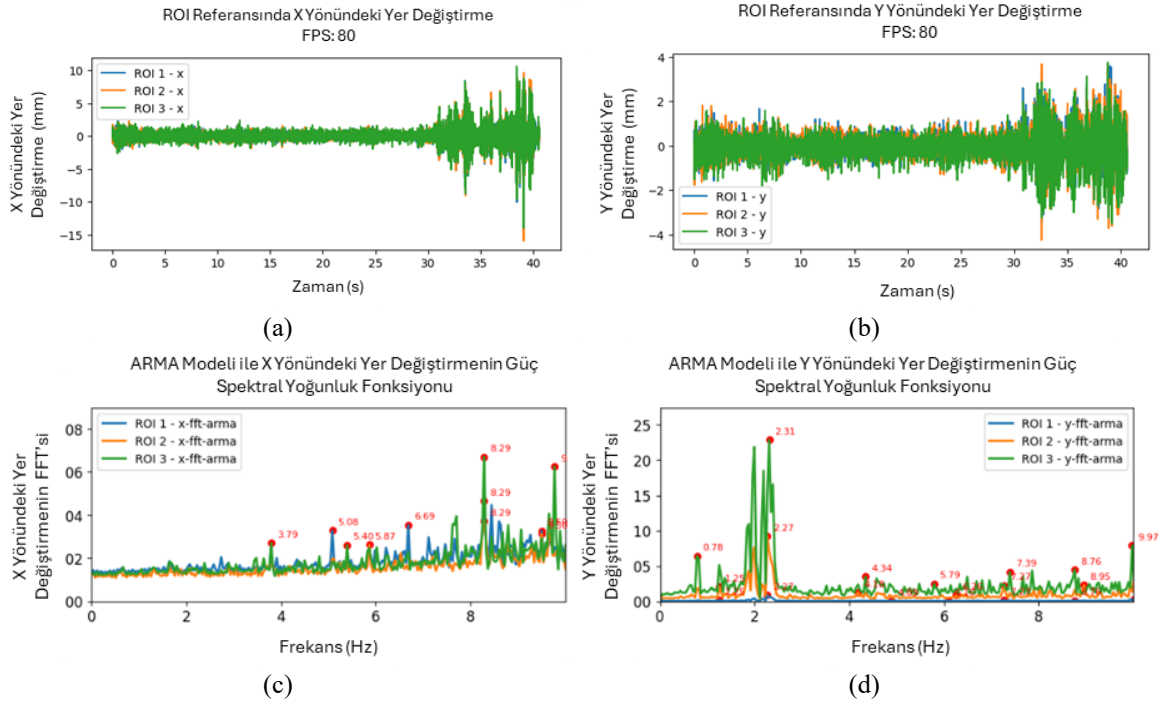


Şekil 23. CoreView yazılımıyla elde edilen video kaydı

Video kaydı Python yazılımı ile oluşturulmuş koda aktarılarak ilk olarak üst geçidin görüntü koordinatları (piksel) ile fiziksel koordinatları (mm) arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla kamera kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Kamera kalibrasyonu için, üst geçidin ölçüleri bilinen çelik profillerinden biri doğal hedef olarak seçilmiştir. Daha sonra üst geçidin titreşim etkisiyle oluşan x ve y doğrultularındaki yer değiştirmelerini bulmak için Lucas-Kanade Optik Akış Algoritması uygulanmıştır. ARMA Modeli kullanılarak yer değiştirme verilerinden frekans analizleri gerçekleştirilmiştir. Frekansların 2.31-7.39 Hz aralığında olduğu belirlenmiştir. Seçilen frekans değerleri Tablo 12’de listelenmiştir. Video kamera tabanlı operasyonel modal analiz sonucunda elde edilen x ve y-yönündeki grafikler Şekil 24’te verilmiştir.

Tablo 12. Video kamera tabanlı modal analiz ile elde edilen frekanslar

Mod	Frekans (Hz)
1	2.31
2	4.18
3	7.39



Şekil 24. Video kamera tabanlı operasyonel modal analiz sonucunda elde edilen (a) x-yönündeki yer değiştirme-zaman grafiği ve (c) x-yönündeki frekans grafiği; (b) y-yönündeki yer değiştirme-zaman grafiği ve (d) y-yönündeki frekans grafiği

2.3.3. Çelik Yaya Üst Geçidinin İvmeölçer Tabanlı Operasyonel Modal Analizi

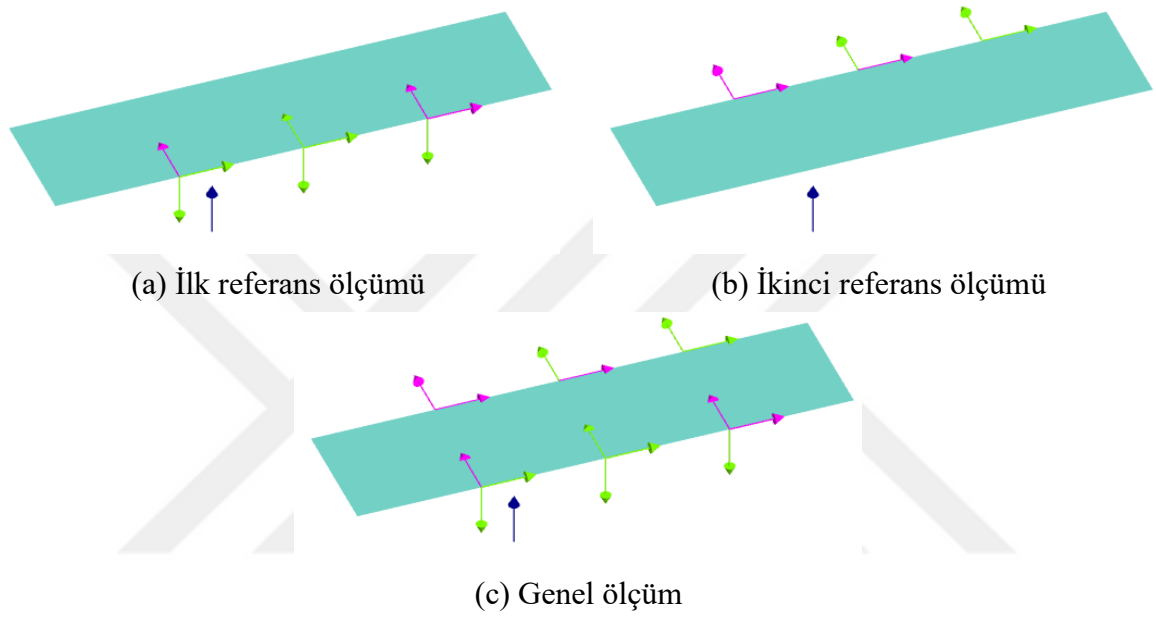
İvmeölçer tabanlı operasyonel modal analiz için kullanılan ekipmanlar ve ekipmanların teknik özellikleri Tablo 13'te verilmiştir.

Tablo 13. Kullanılan ekipmanlar ve ekipmanların teknik özellikleri

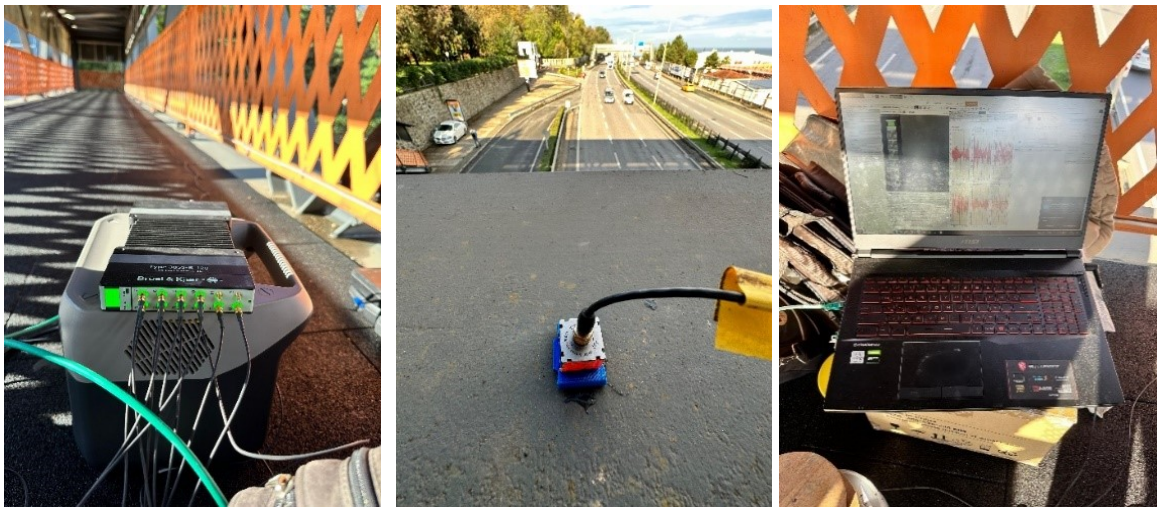
Ekipman Resmi	Ekipman İsmi	Model	Teknik Özellikler
	İvmeölçer	Type 4507-B Piezoelectric CCLD Accelerometer	Frekans Aralığı: 0,3-6000 Hz Rezonans Frekansı: 18 kHz
	Veri Toplama Sistemi	12-channel Input Module Type 3053-B-120	Giriş Kanalları: 12 Frekans Aralığı: 0-25,6 kHz
	Taşınabilir Güç Kaynağı	EcoFlow RIVER 2 Pro	Kapasite: 768 Wh AC Giriş: 220-240V~50Hz/60Hz, 940W Maks. DC Çıkış: 12,6V, 10A/3A/3A, 126W Maks.
	Bilgisayar	HP Victus 16-D1006NT	Intel® Core™ i5-12500H 2.50 Ghz RAM: 16 GB SSD: 512 GB

İvmeölçer tabanlı operasyonel modal analizde üç adet ivmeölçer kullanılmıştır. Bu ivmeölçerler, üst geçidi dört eşit parçaya bölecek şekilde yerleştirilmiştir. İvmeölçerlerin her biri sinyal kabloları ile veri toplama sistemine bağlanmıştır. Bu sistem, ivmeölçerlerden gelen sinyalleri toplamak ve analiz edilmek üzere dijital formata çevirmekle görevlidir. Veri toplama sistemi HDMI kablo ile bilgisayara bağlanmıştır. Bilgisayara bağlanan veri toplama sistemi, sensörlerden gelen verileri anında bilgisayara aktararak gerçek zamanlı izleme ve analiz imkânı sunmuştur. Bilgisayar üzerindeki BK Connect ve Pulse (2023) analiz yazılımları ile bu veriler işlenmiş ve analiz edilmiştir.

Çelik yaya üst geçidinin iki farklı noktasından referans ölçümler alınarak ölçüm sonuçları elde edilmiş ve bu referans ölçümler daha sonra genel ölçüm verileriyle bütünleştirilmiştir. İvmeölçerlerin konumları Şekil 25'te gösterilmiştir. Her bir referans ölçümünde, ivmeölçerlerin 0-100 Hz frekans aralığında olması dikkate alınarak, 15 dakikalık aralıklarla ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 26'da ölçümlerin alınışı gösterilmiştir.

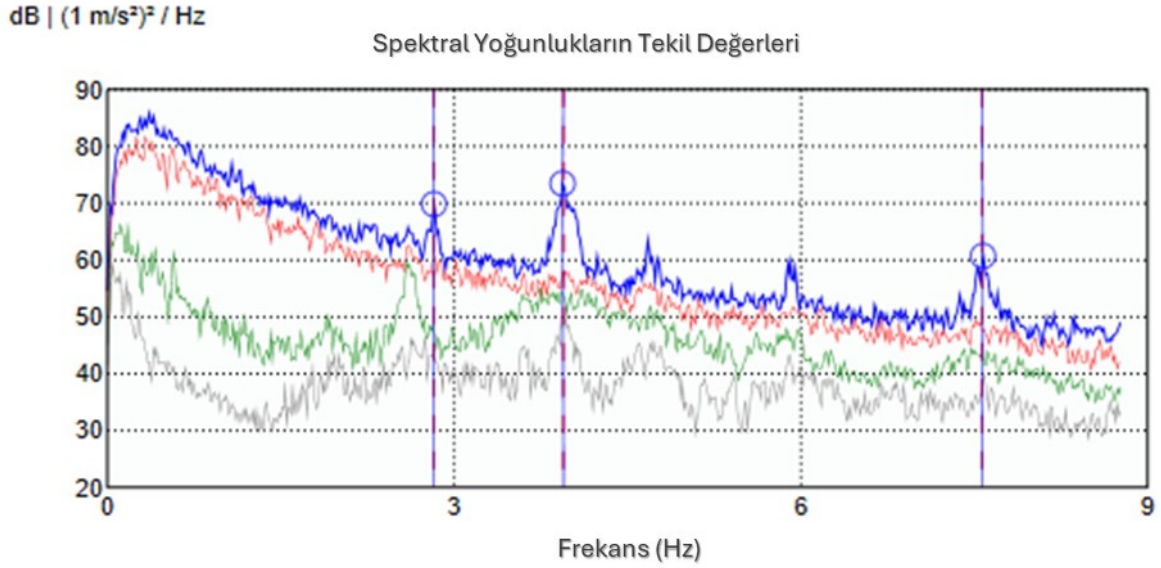


Şekil 25. İvmeölçerlerin yerleştirilmesi



Şekil 26. İvmeölçer tabanlı operasyonel modal analiz ile verilerin elde edilmesi

İvmeölçerlerden elde edilen veriler kullanılarak yapının titreşimlerini temsil eden spektral yoğunluk matrisi hesaplanmıştır. Spektral yoğunluk matrisine Tekil Değer Ayırıştırması (TDA) uygulanmış, frekans spektrumunun baskın modları bulunmuştur. Spektral yoğunlukların tekil değerleri Şekil 27’de gösterilmiştir.

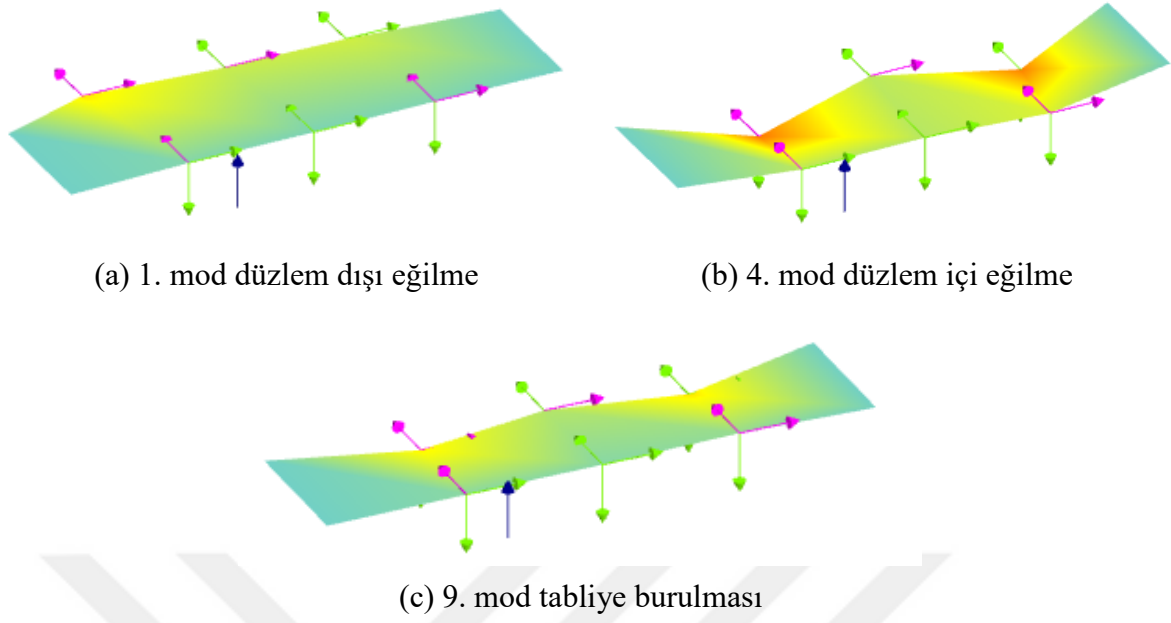


Şekil 27. Spektral yoğunlukların tekil değerleri

Tekil değerler hesaplandıktan sonra, Gelişmiş Frekans Alanı Ayırıştırma Yöntemi (GFAAY) ile bu değerler kullanılarak modal parametreler belirlenmiş ve frekans sonuçlarının 2.83-7.57 Hz aralığında olduğu bulunmuştur. Seçilen 1., 4., ve 9. modların frekans değerleri Tablo 14’te verilmiştir. Seçilen her bir moda karşılık gelen mod şekilleri Şekil 28’de gösterilmiştir.

Tablo 14. İvmeölçer tabanlı operasyonel modal analiz sonucunda elde edilen frekans değerleri

Mod	Frekans (Hz)
1	2.83
4	3.95
9	7.57



Şekil 28. İvmeölçer tabanlı operasyonel modal analizden elde edilen (a) düzlem içi eğilme, (b) düzlem dışı eğilme ve (c) burulma modu

Çelik yaya üst geçidinin operasyonel modal analizi için önerilen video kamera tabanlı modal analiz yöntemi ve ANSYS sonlu eleman yöntemiyle modal analizi sonucunda elde edilen frekans değerleri, ivmeölçer tabanlı modal analizi sonucunda elde edilen frekans değerleriyle Tablo 15'te karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde video kamera tabanlı operasyonel modal analizin ilk frekansı yakalamada başarısız olduğu görülmektedir. Bunun başlıca sebebi video kameranın açısının yapı doğrultusunda bulunmasından dolayı ilk modun hareketini yakalayamamasıdır.

Tablo 15. Modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Model	Frekans (Hz)			Fark (%)
	ANSYS	Video Kamera	İvmeölçer	
Çelik Yaya Üst Geçidi	2.9741	2.31	2.83	5.09/18.37
	4.0198	4.18	3.95	1.76/5.82
	7.3566*	7.39*	7.57*	2.82/2.38
* Burulma modu				

3. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, üç farklı yapının video kamera tabanlı modal analiz testleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu yapıların ikisi küçük ölçekli çelik yapı modeli olup analiz işlemleri Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Deprem ve Yapı Sağlığı Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Gerçek yapı, Trabzon-Rize sahil yolu üzerinde, Karadeniz Teknik Üniversitesi C Kapısı ile Trabzon Havalimanı arasındaki bağlantıyı sağlayan çelik yaya üst geçididir. Çelik yaya üst geçidi, laboratuvar çalışmalarında başarılı sonuçlar veren video kamera tabanlı yöntemin saha koşullarında nasıl sonuçlar verdiğini gözlemlemek amacıyla seçilmiştir. Çalışmalardan elde edilen frekans değerleri Tablo 16'da listelenmiştir. Tablo 16'daki fark sütunundaki değerler, sırasıyla ivmeölçer tabanlı modal analiz ile ANSYS sonlu elemanlar yöntemiyle modal analizden elde edilen frekanslar ve ivmeölçer tabanlı modal analiz ile video kamera tabanlı modal analizden elde edilen frekanslar arasındaki yüzde farkını ifade etmektedir.

Tablo 16. Çalışmalardan elde edilen frekans değerleri

Model	Frekans (Hz)			Fark (%)
	ANSYS	Video kamera	İvmeölçer	
Tek Katlı Düzlem Çelik Çerçeve	8.9848	8.29	8.53	5.33/2.81
	33.946	-	-	-
	91.759*	-	-	-
Tek Katlı Uzay Kayma Çerçevesi	2.649	2.70	2.38	11.30/13.45
	6.9811	6.69	7.15	2.36/6.43
	6.7089*	6.69*	7.19*	6.69/6.95
Çelik Yaya Üst Geçidi	2.9741	2.31	2.83	5.09/18.37
	4.0198	4.18	3.95	1.76/5.82
	7.3566*	7.39*	7.57*	2.82/2.38
* Burulma modu				

Tek katlı düzlem çelik çerçeve modelinin modal analiz sonuçları incelendiğinde video kamera tabanlı modal analiz, ivmeölçer tabanlı modal analize yakın sonuç verdiği görülmektedir. Diğer iki mod değerinin video kamera tabanlı modal analiz sonucunda elde edilememesinin sebebi kameranın FPS değerinin bu frekansları yakalamak için yeterli yükseklikte olamamasıdır.

Tek katlı uzay kayma çerçevesi modelinin modal analiz sonuçları incelendiğinde, video kamera tabanlı modal analizin 1. modda, ANSYS sonlu elemanlar yöntemiyle modal analizde olduğu gibi, ivmeölçer tabanlı modal analiz sonucundan uzaklaştığı; diğer modlarda yaklaştığı görülmektedir. Bu tutarsızlık yöntemlerin kendi içlerindeki farklılıklarını ve hassasiyetlerini vurgulamaktadır.

Çelik yaya üst geçidi yapısının modal analiz sonuçları incelendiğinde, ANSYS sonlu eleman yöntemiyle yapılan modal analiz sonuçlarının ivmeölçer tabanlı modal analiz sonuçlarına yaklaştığı; video kamera tabanlı modal analizin ise ilk modu yakalamada başarısız, ancak diğer modları yakalamada başarılı olduğu görülmektedir. İlk modu yakalamadaki başarısızlığın temel sebebi, kamera açısının ilk moddaki hareketi görmeyi engellemesidir. Diğer modlardaki küçük farklılıklar, çevre koşullarından ve kamera hassasiyetinden kaynaklanmaktadır.

Tüm yapılardaki ANSYS sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan modal analiz sonuçları, mümkün olduğunca ivmeölçer tabanlı modal analiz sonuçlarına yaklaştırılmıştır. Bu yöntemin kullanılmasındaki amaç, diğer yöntemlerden elde edilen frekans değerlerinin hangi modlara karşılık geldiğini tespit etmek ve mod şekillerini görerek doğru yorumlar yapabilmektir.

Sonuç olarak, bu çalışma, yapısal dinamiklerin kapsamlı bir şekilde anlaşılabilmesi için farklı ölçüm ve analiz yöntemlerinin bir arada kullanılmasının önemini vurgulamaktadır. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki uyum, kullanılan yöntemlerin doğruluğunu kanıtlamakla kalmayıp, gelecekteki yapısal analiz ve tasarım çalışmalarına da önemli katkılar sunmaktadır. Araştırma, farklı yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarını ortaya koyarak yapısal dinamik analizlerinde daha doğru ve etkili yaklaşımların geliştirilmesine olanak sağlamaktadır.

4. ÖNERİLER

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmanın sonucunda birtakım veriler elde edilmiş ve bu veriler ışığında gelecek çalışmalar için aşağıdaki önerilere yer verilmiştir.

- Gelecek çalışmalarda, saha koşullarında video kamera tabanlı yöntemlerin, büyük ve karmaşık yapılar üzerindeki etkinliğini arttıracak yeni yazılımlar geliştirilmelidir.
- Birden fazla kamera farklı açılarda kullanılarak yapıların modları daha doğru ve kapsamlı bir şekilde yakalanabilir.
- Farklı yöntemlerin karşılaştırılması yerine; analiz kısmında kullanılan optik akış yöntemleri çeşitlendirilerek, optik akış yöntemlerinin ölçüm sonuçlarına etkileri karşılaştırılabilir.
- Çelik yapılar yerine betonarme yapılar üzerinde analizler gerçekleştirilebilir ve yöntemlerin tutarlılığı test edilebilir.
- Özellikle saha çalışmalarında kameranın çevresel faktörlerden daha az etkilenmesini sağlayacak önlemler bulunabilir ve görüntü kalitesini artıracak yazılımlar geliştirilebilir.

5. KAYNAKLAR

- Aktaş, H. (2015). *Şablon Eşleştirme Yöntemi ile Nesne Takibi ve Yüksek Hızlı FPGA Gerçeklemesi*. Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Antalya.
- Al-Qudah, S., & Yang, M. (2023). Large Displacement Detection Using Improved Lucas–Kanade Optical Flow. *Sensors*, 23, 3152.
- ANSYS, Workbench. (2013). User’s manual, Ansys Incorporation., Canonsburg, PA: Ansys, Inc.
- Bandicam Software. (2022). Bandicam Screen Recorder. Version 7.0.2., California, USA: Bandicam Company.
- Bendat, J.S., & Piersol, A. G. (2004). *Random Data: Analysis and Measurement Procedures (4th ed.)*. New Jersey, John Wiley and Sons.
- BK Connect. (2023). Modular Analysis Software. Germany: Hottinger Brüel & Kjær.
- Pulse. (2023). Operational Modal Analysis. Germany: Hottinger Brüel & Kjær.
- Black, M. J., & Anandan, P. (1996). The Robust Estimation of Multiple Motions: Parametric and Piecewise-Smooth Flow Fields. *Computer Vision and Image Understanding*, 63(1), 75–104.
- Bocian, M., Nikitas, N., Kalybek, M., Kuźawa M., Hawryszków P., Bień J., & Biliszczyk J. (2023). Dynamic performance verification of the Rędziński Bridge using portable camera-based vibration monitoring systems. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 23(1), 40.
- Bouguet, J. Y. (2000). Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker Description of the algorithm. *Intel Corporation Microprocessor Research Labs*.
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung G. M. (2015). *Time Series Analysis: Forecasting and Control, 5th ed.* New Jersey: John Wiley & Sons.
- Brincker, R., Zhang, L., & Andersen, P. (2000). Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. *Smart Materials and Structures*, 10(3), 441–445.
- Chen, H.-P., & Ni, Y.-Q. (2018). *Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures*. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons.
- Du, W., Lei, D., Hang, Z., Ling, Y., Bai, P., & Zhu, F. (2022). Short-distance and long-distance bridge displacement measurement based on template matching and feature detection methods. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 13, 1-18.

- Ekinci, C. E. (2020). *Bordo Kitap: Mimar ve Mühendisin El Kitabı*. Ankara: Data Yayınları
- Elmas, E. E., & Alkan, M. (2022). İnsansız Hava Araçlarıyla Hareketli Nesnelerin Tespit ve Takibi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 10(4), 1111-1126.
- Erdal, H. İ. (2005). *Köprülerde Kontrol ve Bakım*. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Farnebäck, G. (2003). Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion. *Scandinavian Conference on Image Analysis*, 2749, 363-370.
- Feng, D., & Feng, M.Q. (2020). *Computer Vision for Structural Dynamics and Health Monitoring*. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, Inc.
- Fleet, D.J., & Jepson, A.D. (1990). Computation of component image velocity from local phase information. *International Journal of Computer Vision*, 5(1), 77–104.
- Frangopol, D. M., & Messervey, T. B. (2009). Maintenance Principles for Civil Structures. *Encyclopaedia of Structural Health Monitoring*, Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Horn, B. K. P., & Schunck, B. G. (1981) Determining Optical Flow. *Artificial Intelligence*, 17, 185-203.
- iDynamics Application. (2021). Structural Analysis and Dynamics. Version 1.5, TU Kaiserslautern.
- Kalybek, M. (2022). *Modal analysis and finite element model updating of civil engineering structures using camera-based vibration monitoring systems*. University of Leicester, Doktora Tezi, Leicester.
- Lucas, B. D., & Kanade, T. (1981). An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision (IJCAI). *Proceedings of the 7th Joint Conference on Artificial Intelligence* içinde, s. 674-679. Vancouver.
- Luo, K., Kong, X., Zhang, J., Hu, J., Li, J., & Tang, H. (2023). Computer Vision-Based Bridge Inspection and Monitoring: A Review. *Sensors*, 23(18), 7863.
- Montalvão, D., Maia, N.M.M., & Ribeiro, A. M. R. (2006). A review of vibration based structural health monitoring with special emphasis on composite materials. *The Shock and Vibration Digest*, 38 (4), 1–30.
- Nie, G.-Y., Bodda, S.S., Sandhu, H.K., Han, K., & Gupta, A. (2022). Computer-Vision-Based Vibration Tracking Using a Digital Camera: A Sparse-Optical-Flow-Based Target Tracking Method. *Sensors*, 22, 6869.
- Owen, J., Eccles, B. J., Choo, B. S., & Woodings, M. A. (2001). The application of auto-regressive time series modelling for the time-frequency analysis of civil engineering structures. *Engineering Structures*, 23, 521-536.

- Shi, J., & Tomasi C. (1994). Good Features to Track. 9th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. *Springer*, 593–600.
- T.S.E. (2018). Çelik ve Alüminyum Yapı Uygulamaları- Bölüm 2: Çelik Yapılar için Teknik Gerekler. *TS EN 1090–2 +A1: 2012–12 Ek B*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- Xiu, C., Weng, Y., & Shi, W. (2023). Vision and Vibration Data Fusion-Based Structural Dynamic Displacement Measurement with Test Validation. *Sensors*, 23, 4547.
- Zhang, K., Liu, J., Li, Y., Sun, C., & Zhang, L. (2023). Research on Improving Denoising Performance of ROI Computer Vision Method for Transmission Tower Displacement Identification. *Energies*, 16(1), 539.
- Zhu, Q., Cui, D., Zhang, Q., & Du, Y. (2022). A robust structural vibration recognition system based on computer vision. *Journal of Sound and Vibration*, 541, 117321.
- Zhuang, Y., Chen, W., Jin, T., Chen, B., Zhang, H., & Zhang, W. (2022). A Review of Computer Vision-Based Structural Deformation Monitoring in Field Environments. *Sensors*, 22, 3789.

ÖZGEÇMİŞ

Aysu YILDIRIM, ilköğrenimini Şeker İlköğretim Okulunda (2003-2005, Malatya), Mehmet Akif Ersoy İlköğretim Okulunda (2005-2007, Malatya), Fatoş Büyükkuşoğlu İlköğretim Okulunda (2007-2008, Kayseri) ve Besime Özderici İlköğretim Okulunda (2008-2011, Kayseri) tamamladı. Lise öğrenimini 2011-2015 yılları arasında Nuh Mehmet Baldöktü Anadolu Lisesinde tamamladı. 2016 yılında Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı. 2019-2020 güz döneminde Vilnius Gediminas Technical University’de Erasmus yaptı. 2021 yılında bu bölümden mezun oldu. Aynı yıl, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında tezli yüksek lisans programına başladı. Danışmanı Prof. Dr. Kemal Hacıfendioğlu’nun TÜBİTAK 1001-Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında desteklenen 222M140 numaralı projesinde bir süreliğine bursiyer olarak görev aldı. Konya Teknik Üniversitesinde düzenlenmiş olan 23. Ulusal Mekanik Kongresi’ne, hocaları ve çalışma arkadaşı ile hazırlamış olduğu “Küçük Ölçekli Çelik Yapı Modelleri için Video Kamera Tabanlı Deneysel Modal Analiz Testleri” makalesi ile katılarak sunum yaptı.

Hacıfendioğlu, K., Kahya, V., Limongelli, M. G., Okur, F. Y., Altunışık, A. C., Aslan, T., Pembeoğlu, S., Duman C., Bostan A., & Aleit, H. (2024). Applications of optical flow methods and computer vision in structural health monitoring for enhanced modal identification. *Structures*, 69.

Yıldırım A., Pembeoğlu S., Hacıfendioğlu K., & Kahya, V. (2023). Küçük Ölçekli Çelik Yapı Modelleri için Video Kamera Tabanlı Deneysel Modal Analiz Testleri. 23. Ulusal Mekanik Kongresi, Bildiriler Kitabı, s. 392-400. Konya.