

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :
ORCID : - - -

Trabzon

ÖNSÖZ

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

“Tarihi Yığma Minarelerin Video Kamera Tabanlı Yapı Sağlığı İzlenmesi” isimli bu tezi bana öneren ve çalışma süreci boyunca desteğini benden hiç esirgemeyen, tüm bili ve tecrübesiyle yanımda olan danışmanım Sayın Prof. Dr. Kemal HACİEFENDİOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın deneysel kısmının bir parçası olan laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fatih Yesevi OKUR'a, Arş. Gör. Dr. Ali Fuat GENÇ'e, Arş. Gör. Dr. Ali KAYA'ya ve İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki emeği geçen tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen İnş. Yük. Müh. Cemile DUMAN'a, Ayşecan BOSTAN'a ve diğer tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Öğrenim hayatımın başında itibaren bana olan desteklerini bir gün dahi esirgemeyen ve yanımda olan aileme teşekkür eder, bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Bu çalışma, TÜBİTAK 1001-Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında desteklenen ‘Tarihi Yığma Minarelerin Video Kamera Tabanlı Yapı Sağlığı İzlemesi ve Derin Öğrenme Yöntemine Dayalı Uzun Vadeli Karar Verme Modelinin Geliştirilmesi’ başlıklı araştırma projesinin bir ürünüdür (Proje numarası: 222M140).

Desteklerinden dolayı Vakıflar Genel Müdürlüğü ve Vakıflar Bölge Müdürlüğüne teşekkürlerimi sunarım.

Tunahan ASLAN

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Tarihi Yığma Minarelerin Video Kamera Tabanlı Yapı Sağlığı İzlenmesi” 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. 07/06/2023

Tunahan ASLAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	2
1.2.1. Yapı Sağlığı İzlenmesi ile İlgili Yapılan Çalışmalar	2
1.2.2. Görüntü İşleme Teknikleri ve Analizleri ile İlgili Yapılan Çalışmalar	6
1.2.3. Tarihi Yığma Minareler ile İlgili Yapılan Çalışmalar	11
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği.....	12
1.4. Video Kamera Tabanlı İzleme Sistemi	13
1.4.1. Video Kamera Tabanlı İzleme Sisteminin Tanıtımı ve Sistemin Çalışma Algoritması	13
1.4.2. Video Kamera Donanım Sistemi	14
1.4.3. Kamera Kalibrasyonu	17
1.4.4. Hedef Takip Yöntemleri	19
1.4.5. Optik Akış Yöntemi	20
1.4.6. Büyük Yer Değiştirmelerin İzlenmesi için Piramit Optik Akış Yöntemi.....	21
1.4.7. Lucas-Kanade Optik Akış Yönteminin İşleyişi	21
1.4.8. Gelişmiş Frekans Tanım Alanı Ayrışımı (GFTAA)	22
1.5. Spektrum Analizi.....	23
1.6. Blender Bullet Constraints Builder Eklentisi	25
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	29
2.1. Minyatür Minare Modeli	29

2.1.1.	Minyatür Minare Modeli Sonlu Eleman Modeli.....	30
2.1.2.	Minyatür Minare Modeli Modal Analizi	32
2.2.	Video Kamera Tabanlı İzleme Sistemi: Minyatür Minare Modeli	36
2.3.	Fatih Büyük Cami	42
2.3.1.	Fatih Büyük Cami Hakkında Bilgiler	42
2.3.2.	Fatih Büyük Cami Minaresi için Video Kamera Tabanlı İzleme Sistemi.....	44
2.3.3.	Fatih Büyük Cami Minaresi ANSYS® Sonlu Eleman Modeli.....	50
2.3.4.	Fatih Büyük Cami Minaresi Modal Analizi.....	52
2.3.5.	Fatih Büyük Cami Minaresi Spektrum Analizi.....	55
2.3.6.	Blender® Programında Fatih Büyük Cami Minaresinin Üç Boyutlu Modellenmesi.....	57
2.3.7.	Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi ve Atanması	59
2.3.8.	Deprem Kaydının Belirlenmesi ve Sisteme Yüklenmesi.....	60
2.3.9.	Deprem Simülasyonu ve Sonuçları.....	62
3.	SONUÇLAR.....	65
4.	ÖNERİLER.....	67
5.	KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

TARİHİ YIĞMA MİNARELERİN VIDEO KAMERA TABANLI YAPI SAĞLIĞI İZLENMESİ

Tunahan ASLAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Kemal HACİEFENDİOĞLU
2024, 71 Sayfa

Bu tez çalışması kapsamında, tarihi yığma minarelerin video kamera tabanlı yapı sağlığı izlenmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Yapılan tez çalışması dört ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, yapılan geçmiş çalışmalara yer verilmektedir. İkinci bölüm, laboratuvar ortamında yapılan ivmeölçer tabanlı operasyonel modal analiz kısımlarını, sahada yapılan video kamera tabanlı operasyonel modal analiz çalışmalarını ve deprem simülasyon çalışmalarını içermektedir. Laboratuvar ortamında yapılan minyatür minare modelinin sonlu eleman yöntemiyle ANSYS® modeli oluşturularak modal analizler yaptırılmış, endüstriyel kameralarla oluşturulmuş bir sistemle görüntüler alınmış ve modal parametreleri elde etmek için Python dilinde geliştirilmiş bir kodlama ile analizler yaptırılmıştır. İvmeölçerler kullanılarak yapının frekans değerleri bulunmuş ve değerler doğrulanmıştır. Saha çalışmaları kapsamında belirlenen Fatih Büyük Cami minaresi üzerinden video görüntüleri alınmış ve analizler gerçekleştirilmiştir. ANSYS® sonlu eleman yöntemi ile elde edilen gerilme yığılmalarının maksimum olduğu yerler belirlenmiş ve deprem simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Üçüncü bölümde tez çalışmasından elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Son bölümde ise öneriler kısmı yer almaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yapı Sağlığı, Tarihi Yığma Minareler, Video Kamera Tabanlı Analiz

Master Thesis

SUMMARY

VIDEO CAMERA-BASED STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF HISTORICAL MASONRY MINARETS

Tunahan ASLAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Kemal HACIEFENDİOĞLU
2024, 71 Pages

Within the scope of this thesis, studies have been conducted on the video camera-based monitoring of historical masonry minarets' structural health. The thesis consists of four main sections. The first section includes a review of previous studies. The second section encompasses accelerometer-based operational modal analysis sections conducted in the laboratory environment, field-based video camera operational modal analysis studies, and earthquake simulation studies. In the laboratory environment, modal analyses were performed by creating an ANSYS® finite element model of a miniature minaret model, and images were captured using an industrial camera system to obtain modal parameters, followed by analysis conducted using Python programming language. The frequency values of the structure were determined using accelerometers, and the values were verified. Video footage was captured from the Fatih Büyük Mosque minaret as part of field studies, and analyses were conducted. Locations where stress accumulations were maximum, as determined by the ANSYS® finite element method, were identified, and earthquake simulations were performed. The third section presents the results obtained from the thesis study. The final section includes recommendations.

Key Words: Structural Health, Historical Masonry Minarets, Video Camera-Based Analysis

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Görüntü sensörünün uygulanma süreci	14
Şekil 2. Video kamera tabanlı izleme sistemi; donanım bağlantı şeması	17
Şekil 3. Ölçeklendirme faktörünün gösterimi	18
Şekil 4. Beton eleman için farklı sınırlandırılmaların gösterimi.....	26
Şekil 5. BCB eklentisinde bulunan farklı bağlantı tiplerinden üçünün gösterimi	27
Şekil 6. BCB eklentisinde bulunan bağlantı tipi 16'nın sınırlandırma türleri	28
Şekil 7. BCB eklentisi rijit gövdelerin temas alanları ve sınırlandırma bölgesi.....	28
Şekil 8. Minyatür minare modeli; AutoCAD® çizimi ve ölçülendirmeleri	29
Şekil 9. Minyatür minare modelinin yapım aşamaları ve son haline ait görüntüler.....	30
Şekil 10. ANSYS® Workbench arayüzü; analiz türü seçimi	30
Şekil 11. ANSYS® Workbench malzeme seçim menüsü	31
Şekil 12. Minyatür minare modeli ANSYS® SpaceClaim çizimleri.....	31
Şekil 13. ANSYS® SpaceClaim araç çubuğu; model geometrisinin ANSYS® Mechanical kısmına aktarımı.....	32
Şekil 14. ANSYS® Mechanical proje alt menüsü; minyatür minare sonlu eleman model ve analiz içerikleri.....	32
Şekil 15. Minyatür minare ANSYS® sonlu eleman modeli; mesh ağı ve ankastre mesnetlerin gösterimi.....	33
Şekil 16. İvmeölçer sensörlerinin minyatür minare modeli üzerindeki yerleşimi	34
Şekil 17. İvmeölçer verileriyle oluşturulmuş ARTeMIS® ortamında GFTAA yöntemine dayalı analiz sonuçları	34
Şekil 18. İvmeölçer verileriyle elde edilen ilk iki mod şekli	35
Şekil 19. ANSYS® sonlu eleman modeli modal analiz sonucu minyatür minare modelinin ilk 2 mod şekli	36
Şekil 20. Video kamera tabanlı izleme sistemi; minyatür minare modeli için saha yerleşimi ve şablon düzeni.....	37
Şekil 21. Video kamera tabanlı elde edilen X doğrultusundaki zamana bağlı yer değiştirme değerleri a) 1. kamera b) 2. kamera c) 3. kamera d) 4. kamera	38
Şekil 22. Video kamera tabanlı elde edilen Y doğrultusundaki zamana bağlı yer değiştirme değerleri a) 1. kamera b) 2. kamera c) 3. kamera d) 4. kamera	39

Şekil 23.	Minyatür minare modeli için video kamera tabanlı izleme sistemi ile elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonu	41
Şekil 24.	Minyatür minare modeli için video kamera tabanlı izleme sistemi ile elde edilen 1. ve 2. mod şekli	41
Şekil 25.	Fatih Büyük Cami a) restorasyon öncesi ve b) restorasyon sonrası görüntüsü	42
Şekil 26.	Fatih Büyük Camii Kuzey Cephesi 1/50 ölçekli AutoCAD® çizimi.....	43
Şekil 27.	Fatih Büyük Cami minare şerefe kotundan alınan AutoCAD® kesit ve basamak yerleşimi	44
Şekil 28.	Fatih Büyük Cami minaresi ölçümü; kamera sistemi konumlandırılması ve ölçüm detayları.....	45
Şekil 29.	Fatih Büyük Cami minaresi kamera odak görüntüleri.....	46
Şekil 30.	Fatih Büyük Cami; video kamera tabanlı elde edilen X doğrultusundaki zamana bağlı yer değiştirme değerleri a) 1. kamera b) 2. kamera c) 3. kamera d) 4. kamera	47
Şekil 31.	Fatih Büyük Cami; video kamera tabanlı elde edilen Y doğrultusundaki zamana bağlı yer değiştirme değerleri a) 1. kamera b) 2. Kamera c) 3. Kamera d) 4. kamera.....	48
Şekil 32.	Fatih Büyük Cami için video kamera tabanlı izleme sistemi ile elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonu.....	49
Şekil 33.	Fatih Büyük Cami için elde edilen 1. ve 2. mod şekli.....	50
Şekil 34.	ANSYS® Workbench arayüzü.....	50
Şekil 35.	ANSYS® Workbench malzeme seçim menüsü	51
Şekil 36.	ANSYS® SpaceClaim ortamında oluşturulan Fatih Büyük Cami minare modeli	51
Şekil 37.	ANSYS® SpaceClaim araç çubuğu, Fatih Büyük Cami minare modelinin Mechanical kısmına aktarımı	52
Şekil 38.	ANSYS® Mechanical; Fatih Büyük Cami minare model ve analiz içerikleri.....	52
Şekil 39.	Fatih Büyük Cami minaresi ANSYS® sonlu eleman modeli; mesh ağı ve ankastre mesnetler.....	53
Şekil 40.	ANSYS® modal analiz sonuçlarının elde edilmesi.....	54
Şekil 41.	Fatih Büyük Cami minaresi ANSYS® sonlu eleman modeli modal analiz sonucu elde edilen ilk 3 mod şekli	55
Şekil 42.	06.02.2023 tarihli Gaziantep Nurdağı depremi X doğrultusu Spektral İvme-Frekans grafiği	56
Şekil 43.	06.02.2023 tarihli Gaziantep Nurdağı depremi Y doğrultusu Spektral İvme-Frekans grafiği	56
Şekil 44.	06.02.2023 tarihli Gaziantep Nurdağı depremi Z doğrultusu Spektral İvme-Frekans grafiği	56

Şekil 45.	Fatih Büyük Cami minaresi ANSYS® spektrum analizi sonucu oluşan toplam yer değiştirme ve eşdeğer gerilme	57
Şekil 46.	Fatih Büyük Cami Blender® üç boyutlu modeldeki taş blok türleri.....	58
Şekil 47.	Fatih Büyük Camii Blender® ortamında oluşturulan üç boyutlu minare modeline ait detaylar.....	59
Şekil 48.	2712 istasyon kodlu Gaziantep Nurdağı depremi X doğrultusu ivme-zaman grafiği	61
Şekil 49.	2712 istasyon kodlu Gaziantep Nurdağı depremi Y doğrultusu ivme-zaman grafiği	61
Şekil 50.	2712 istasyon kodlu Gaziantep Nurdağı depremi Z doğrultusu ivme-zaman grafiği	62
Şekil 51.	Fatih Büyük Cami minaresinin deprem simülasyonu sırasındaki davranışı.....	63
Şekil 52.	Fatih Büyük Cami minaresinde deprem simülasyonu sırasında ilk kırılmanın gerçekleştiği bölge	64
Şekil 53.	Fatih Büyük Cami minaresinde deprem simülasyonu sırasında ikinci kırılmanın gerçekleştiği bölge	64

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Video kamera tabanlı izleme sistemi; donanım bileşenleri	16
Tablo 2. Minyatür minare ANSYS® sonlu eleman modeli; malzeme özellikleri	33
Tablo 3. GFTAA yöntemine dayalı ivmeölçer verileriyle ve ANSYS® modal analiz sonucu elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması	35
Tablo 4. İvmeölçer verileri ve video kamera tabanlı izleme sistemi yer değiştirme verileri doğrultusunda ARTeMIS® analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	40
Tablo 5. Kamera odak yükseklikleri	46
Tablo 6. Fatih Büyük Cami ivmeölçer verileri ve video kamera tabanlı sistem verileri ile GFTAA yöntemine dayalı ARTeMIS® frekans sonuçlarının karşılaştırılması.....	49
Tablo 7. Fatih Büyük Cami ANSYS® sonlu eleman modeli malzeme özellikleri.....	53
Tablo 8. Fatih Büyük Cami ivmeölçer verileriyle GFTAA yöntemine dayalı ARTeMIS® analizi ve sonlu eleman modeli modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	54
Tablo 9. Fatih Büyük Cami: Minare bölümlerinin mekanik özellikleri	60

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Φ	: Model Parametresi
$\tilde{m}$	: Görüntü Koordinatları Matrisi
$A_{3 \times 3}$	: Kamera İçsel Matris
u	: Piksel Koordinatları
v	: Piksel Koordinatları
R	: Dönüş Matrisi
t	: Çeviri Vektörü
f	: Kamera Odak Uzunluğu
$d_{bilinen}$	: Nesne Gerçek Uzunluğu
d_{piksel}	: Piksel Yer Değiştirmesi
$I_{bilinen}$	: Piksel Uzunluğu
D	: Kamera Mesafesi
δt	: Zaman Aralığı
δx	: Hareket Miktarı
∇	: Kısmi Türev
g_i	: Optik Akış
v_i	: Mevcut Seviyedeki Akış
ϵ_t	: Hata Terimi
X_t	: Mevcut Seri Değeri
μ	: Seri Ortalaması
$G_{xx}(j\omega)$	: Etki Sinyalinin Spektral Yoğunluk Fonksiyonu
$G_{yy}(j\omega)$	: Tepki Sinyalinin Fonksiyonu
$H(j\omega)$	: Frekans Tepki Fonksiyonu
U_i	: Özvektör
S_i	: Tepe Değerleri Diyagonal Matrisi
ξ	: Sönüm Oranı
ω_n	: Açısal Doğal Hız
S_d	: Spektral Yer Değiştirme
BCB	: Bullet Constraints Builder

CSV	: Virgülle Ayrılmış Değerler
ERA	: Öz-sistem Realizasyon Algoritması
GFTAA	: Gelişmiş Frekans Tanım Alanı Ayrışımı
GPS	: Küresel Konumlama Sistemi
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
FRVF	: Hızlı Gevşetilmiş Vektör Uyumu
FOA	: Frekans Ortamında Ayrıştırma
FPS	: Saniyedeki Kare Sayısı
LVDT	: Lineer Değişken Farklı Transformatör
MW	: Moment Büyüklüğü
OMA	: Operasyonel Modal Analiz
PDP	: Zahiri Yer Değiştirme Noktaları
PSA	: Zahiri Spektral İvme
RDT	: Rastgele Azalma Tekniği
ROI	: İlgi Alanı
SAB	: Stokastik Altalan Belirleme
SF	: Ölçeklendirme Faktörü
TADAS	: Türkiye İvme Veritabanı ve Analiz Sistemi
YSİ	: Yapı Sağlığı İzlenmesi

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Deprem kuşaklarında bulunan ülkeler tarihleri boyunca farklı yer hareketlerinden etkilenmişlerdir. Yer kabuğundaki hareketlerden kaynaklanan bu doğa olaylarının kesin yeri ve zamanı bilinemediğinden, bilimsel araştırma ve çalışmalardan elde edilen sonuçlarla beraber gerçekleşmesi muhtemel depremder hakkında tahminler yapılabilmektedir. Günümüzde, gerçekleşmiş depremlerin verileri ileri teknoloji sayesinde ayrıntılı bir şekilde elde edilebilmektedir. Bu veriler ışığında ilgili alanlarda sürmekte ve yapılacak olan mühendislik çalışmaları hız kazanmakta olup, doğru sonuçlara ulaşmak daha kolay hale gelmektedir. Yine bu veriler kullanılarak yapıların deprem etkisi altında nasıl davranış sergileyeceğini önceden görebilmek hem yapı sağlığı hem de depreme karşı tedbir almak için önemli bir adım olacaktır.

Geçmişten günümüze kadar inşa edilen birçok farklı türde mimari yapı bulunmaktadır. Bu yapılar inşa edildikleri dönemlere göre yapısal farklılıklar göstermektedirler. Her dönemin mimari olarak kendine özgü bir dili olduğu, farklı dönemlerde ortaya konulan eserlere bakılarak açıkça anlaşılmaktadır. Kullanılan malzemeler, yapım teknikleri, kullanım amaçları ve temsil ettikleri dönem özellikleri gibi sayısı arttırılabilecek parametreler göz önüne alındığında özellikle büyük kitlelere hitap eden yapılarda ortak bir amaç hedeflenmiştir. Bu amacın yapıların sağlıklı ve olabildiğince uzun bir süre ayakta kalabilmesi olduğu söylenebilir. Dönemsel şartlar ve ilkel inşa koşulları düşünüldüğünde yapım süreleri bugünden katbekat fazla olan yapıların ömürlerini uzun tutmak, her dönem için önemli bir hedeftir. Belirli bir süreden sonra tarihi değeri daha da artan ve toplumlar için sembol haline gelen yapıların, deprem, rüzgâr ve çeşitli çevresel faktörlere daha uzun süreli maruz kalması, bu yapıların yapısal açıdan daha dikkatli bir şekilde takip edilmesini gerektirirken yapı sağlığı izlenmesi kavramı da ortaya çıkmıştır.

Yapı sağlığı izlenmesi, yapıların mevcut veya gelebilecek yükler altında uygun davranış gösterip göstermeyeceğini ve yapı bütünlüğünün korunması için gerekli olan bilgilerin elde edilmesini sağlayan sistemlerin bir araya getirilmesidir (Bakht & Mufti, 2015). Yapı sağlığı izlenmesi için birçok farklı yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemler oluşturulan sistemler ve izlenilen yollar açısından birbirlerinden ayrılır. Yapılan çalışmalar

incelendiğinde oluşturulan her sistemin, kendinden önceki sistemlere kıyasla farklı ölçütlerde daha efektif olmayı amaçladığı gözlemlenmiştir. Kolay kullanım, hızlı çözüm, sistemlerin maliyeti ve daha doğru sonuçlar bahsedilen bu ölçütlerden bazılarıdır.

Bu çalışma tarihi yığma minarelerin yapı sağlığının izlenmesi üzerine oluşturulmuştur. Üzerinde çalışılacak olan yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek ve ortaya çıkarılan bu özellikleri doğru bir şekilde yorumlamak oldukça önemlidir. Dinamik parametreler, yapılan geçmiş çalışmalarda önemli bir yere sahip olmakla birlikte bu çalışmada da sonlu eleman modeli analizlerinde üzerinde durulacaktır.

1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Yapı sağlığının izlenmesiyle ilgili geçmişte birçok çalışma yapılmıştır. Her çalışma kendine farklı bir yöntem belirlemiştir. Bunlardan bazıları ivmeölçerler yardımıyla yapılardan ivme kayıtları alınarak yapılan çalışmalardır. Bu kayıtlar oluşturulan sonlu eleman modellerinden elde edilecek modal parametrelerle karşılaştırılıp sonuçlar doğrulanmaya çalışılmaktadır.

Farklı bir yöntem olarak görüntü üzerinden yapı sağlığı izlenmesi yöntemleri de mevcuttur. Bu görüntüler video kamera veya drone yardımıyla elde edilebilmektedir. Elde edilen görüntüler bilgisayar ortamında, farklı yazılımlar yardımıyla işlenerek yer değiştirme ve frekans gibi parametreler bulunabilmektedir. Teorik ve deneysel çalışma süreçleri sonucunda ulaşılan bilgilerin doğruluğu ve gerçek sonuçlara yakınlığı, yapılan ölçekli modeller üzerinde test edilebilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, konu ile ilgili yapılan geçmiş çalışmalar bu kısımda verilmiştir. Üç alt başlıkta incelenen çalışmaların ilki yapı sağlığı izlenmesi üzerinedir. İkinci kısımda görüntü işleme ve analiz konularına içermektedir. Son başlık ise tarihi yığma minarelerin dinamik davranışları hakkında yapılan çalışmaları konu almaktadır.

1.2.1. Yapı Sağlığı İzlenmesi ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Çelik (2021), yüksek lisans tezi kapsamında yüksek yapıların yapı sağlığının izlenmesi konusunda çalışmalar yapmıştır. İvmeölçerlerin kullanıldığı çalışmada, ivmeölçerlerin hangi katlara ve hangi konumda yerleştirileceği açıklanmıştır. Yapı Sağlığı İzleme Sistemi yönergesinde belirtilen koşullara göre ivmeölçerler seçilmiştir. Çalışmada izlenecek olan

parametreler yatay yöndeki öteleme modları, düşey eksen etrafındaki burulma modları, x ve y eksenlerindeki dönmeler ve kat deplasmanlarıdır. Bu çalışma süresince sürekli veri takibi ve olay bazlı takip olmak üzere iki farklı yöntem içermektedir. Sürekli veri takibinde önceki dönemlerde elde edilen veriler yardımıyla yapının gelecekteki davranışı öngörülmeyle çalışılmaktadır. Olay bazlı takipte ise münferit, tekrar etmeyen kuvvetler altında yapının dinamik karakteristiklerinde nasıl değişiklikler olduğu izlenmektedir. Ayrıca bilgisayar ortamında oluşturulan sayısal modelden çıkarılan frekans değerleri, model güncellemeyle birlikte saha ölçümlerinden elde edilen frekans değerlerine yaklaştırılmıştır.

Yılmaz (2021), yaptığı çalışmada farklı iki yapı için çevresel titreşim kaydı alarak yapıların güçlendirme işlemi öncesi ve sonrasında analizler yardımıyla yapıların dinamik karakteristiklerini elde etmeye çalışmıştır. Çalışma kapsamında yapı sağlığı izleme sistemleri kullanılmıştır. Kayıtlar, ivmeölçerler kullanılarak elde edilmiştir. Yapının tepki kayıtları iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Tüm ivmeölçerler ilk aşamada yapının en üst katına , ikinci aşamada ise her kata aynı yönde olmak üzere bir ivmeölçer yerleştirilmiştir. Bu işlem, güçlendirme işlemi öncesinde yapılmış olup, güçlendirme sonrasında da tekrar edilmiştir. Daha sonra bilgisayar ortamında SAP2000 programı ile yapının sonlu eleman modeli oluşturularak titreşim analizleri gerçekleştirilmiştir. İvmeölçerler ile yapılardan alınan kayıtlar ARTeMIS® yazılımı yardımıyla işlenmiştir. GFTAA ve SAB yöntemleri aracılığıyla yapıların modal parametreleri elde edilmiştir. Güçlendirme öncesi ve sonrasında elde edilen modal parametrelerin birbirleriyle büyük oranda uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Yapıya eklenen elemanlardan dolayı rijitliğin artması, analiz sonuçlarında birtakım farklılıklar ortaya çıkarmıştır. Sonuçların birbirlerine yaklaştırılması da sonlu eleman modelinde gerçekleştirilebilecek olan model güncelleme yöntemiyle mümkün olabilecektir.

Titreşim tabanlı yapı sağlığı izlenmesi konusu üzerine 54 metre yüksekliğinde bir rüzgâr türbininin yaklaşık bir yıl süreyle dinamik davranışı Hanbay (2019) tarafından gözlemlenmiştir. 12 farklı ivmeölçerle yapılan çalışmada modal parametreler elde edilmiştir. Uzun süreli yapılan bu çalışmada toplanan veriler ışığında modal parametrelerde belirli bir bant aralığı oluşturulmuştur. Rüzgâr türbinine gelecek olan dinamik yükler sonrasında izlenen parametrelerde, oluşan bant aralığı dışına çıkıldığında yapıda hasar oluşmuş olabileceği kanısına varılabileceği belirtilmiştir. Bahsedilen modal parametreler sönüm oranı, mod şekilleri ve frekans olup, frekans alanı çözümleme yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Sıcaklık, rüzgâr hızı ve rotor hızı gibi çevresel faktörler türbinde bulunan

Gözetim Kontrol ve Veri Toplama sistemi aracılığıyla dikkate alınmıştır. Bu çevresel faktörlerin yapı üzerindeki dinamik etkileri değerlendirilmiştir. İvmeölçerlerden alınan veriler bilgisayara bağlı olan bir kayıt cihazına kaydedilmiştir. Daha sonra bilgisayar ortamında yüksek güvenilirlikle yapıların frekanslarını ve mod şekillerini elde etmek için kullanılan otomatik operasyonel modal analiz yöntemlerinden biri olan GFTAA yöntemi yardımıyla MATLAB® yazılımında veriler analiz edilmiştir. Türbinin sonlu eleman modeli SAP2000® programında oluşturularak modal parametreler hesaplanmıştır ve deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca rüzgâr türbininin çalışır ve sabit durumlardaki davranışları da birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda çevresel faktörlerin modal analiz sonuçlarını etkilediği ve operasyonel modal analiz yönteminin hareketli cisimler için uygun olmadığı belirlenmiştir.

Tokuç (2015), yapı sağlığı izlenmesi yöntemlerini kullanarak bir betonarme fabrika bacasının dinamik yükler altındaki güvenilirlik değerlendirmesi üstünde çalışmıştır. Çalışmada dinamik yükleri temsil etmesi için deprem ve rüzgâr yükleri baz alınmıştır. Yaklaşık 100 metre uzunluğundaki fabrika bacasının modal parametrelerini elde etmek amacıyla titreşim kayıtları alınmıştır. Kullanılan yöntem, yapıya periyodik bir dizi kuvvet vererek bu kuvvetler sonucunda ortaya çıkan tepkileri ölçmeye dayanmaktadır. Elde edilmek istenen modal özellikler frekans tepki fonksiyonları işlenerek belirlenmiştir. Analizler için toplam 12 adet ivmeölçer sensörü kullanılmıştır. Bu sensörler en büyük modal parametreleri elde etmek için belirlenen kot seviyelerine, iki farklı doğrultuda yerleştirilmişlerdir. Sensörlerin farklı doğrultuda yerleştirilmesiyle yapının hem ötelenme hem de burkulma modlarının tespit edilmiştir. İvmeölçerlerden alınan veriler Frekans Ortamı Ayırıştırma (FOA) yöntemi kullanılarak işlenmiş ve modal özellikler elde edilmiştir. Yapının sönüm oranını belirlemek için ise fabrika bacasının en üst kısmından alınan yirmi dört saatlik titreşim verileri yardımıyla ilk iki modu tespit edilmiş ve Rastgele Azalma (RDT) tekniğiyle sönüm oranı belirlenmiştir. Elde edilen modal parametreleri karşılaştırmak için SAP2000® yazılımı kullanılarak fabrika bacasının sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Model temeli için yaylar atanmıştır. Deneysel sonuçlar ve sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçlar arasındaki farkı minimize etmek amacıyla sonlu eleman modeli ayrıca bir model güncelleme sürecinden geçirilmiştir. Belirlenen bir deprem senaryosu ve rüzgâr yüklemesi sonlu eleman modeline uygulanmış ve sonuçlar model güncelleme öncesi ve sonrasında karşılaştırılmıştır. Bu yüklemeler sonucunda fabrika bacası için model güncelleme öncesi ve sonrası için güvenilirlik tahminleri gerçekleştirilmiştir.

Sangirardi vd. (2022), yığma bir laboratuvar modeli üzerinde yapı sağlığı izlenmesi üzerinde çalışma gerçekleştirmişlerdir. Oluşturulan yığma model sarsma masası üzerinde verilen Beyaz Gürültü titreşim etkisi altında ve sarsma masası hareketsizken yalnızca çevresel titreşimler altında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilmek istenen deplasman verileri için ivmeölçerlerin maliyetli olması sebebiyle bilgisayar görüntü tabanlı bir ölçüm yöntemi geliştirilmiştir. Bu ölçüm yönteminde, video kameralarla alınan görüntüler bir hareket büyütme sürecinden geçirilmiş ve yapı hareketini temsil eden bir pikselin hareketi takip edilmiştir. Daha sonra toplanan veriler frekans değerlerini elde etmek için modal analizlerde kullanılmıştır. Beyaz Gürültü titreşimi altındaki testlerde 3D Vision® adlı hareket yakalama sistemiyle ayrıca model üzerinden frekans ölçümü gerçekleştirilmiş ve sonuçlar birbirleriyle uyumlu çıkmıştır. Çevresel titreşim altındaki ölçümlerde ise 3D Vision® sisteminin takip edemediği noktaları dahi bilgisayar görüntü tabanlı yöntemin takip edebildiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple, yöntemin gerçek ölçekli yapılarda da kullanılabileceği ve yüksek doğruluk oranlarına erişilebileceği öngörülmektedir.

Yığma köprü kirişlerinin yapı sağlığı izlenmesiyle ilgili çalışma Civera vd. (2021), tarafından yapılmıştır. Doğrusal olmayan yapıları, uzun yıllar boyunca görmüş oldukları tahribat ve malzeme karakteristiklerindeki kısmi düzensizlikler gibi olumsuzluklarda Hızlı Gevşetilmiş Vektör Uyumu (FRVF), güvenli bir titreşim tabanlı sistem tanımlama yaklaşımı olarak görülmektedir. Çalışma kapsamında geliştirilen yöntem öncelikle laboratuvar ortamında oluşturulan hasarlı bir kiriş üzerinde test edildikten sonra Öz-sistem Gerçekleştirme Algoritmasıyla (ERA) elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Daha sonra yine laboratuvar ortamında ölçekli bir yığma taş kemer köprü modellenmiş ve basınç ve çekme testleri ile köprünün yaklaşık mekanik özellikleri hesaplanmıştır. Analizler sonucu elde edilen modal parametrelerin Öz-sistem Gerçekleştirme Algoritmasından (ERA) alınan sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Geliştirilen yöntemin malzemenin düzensizliğine ve yapısal karmaşıklığa rağmen, klasik yöntemlere kıyasla daha hassas ve hızlı olması, yöntemin uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Barsocchi vd. (2021) tarafından kablosuz ağlar yardımıyla tarihi yığma yapıların sürekli yapı sağlığı izlenmesi hakkında bir çalışma yapılmıştır. Kablolu ölçüm cihazları ve sensörlerin yüksek maliyetinin yanı sıra, bunlar arasında oluşabilecek optimizasyon hatalarından kaynaklanabilecek yanlış sonuçlar gibi olumsuzlukların önüne geçmek için yürütülen bu çalışma mikro-elektro mekanik sensörler ve kablosuz ağı bir araya getirerek bir izleme sistemi oluşturulması üzerinde durulmuştur. Kablosuz sensör ağı uygulamasını

test etmek için önce ahşap bir laboratuvar modeli oluşturulmuştur. Sistem için oluşturulan sensörler ve ivmeölçerler ile gerçekleştirilen analizlerin birbirleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Tarihi yığma bir kule üzerine yerleştirilen ivmeölçer, nemölçer, termometre ve gerilme ölçerlerle oluşturulan sistemden kablosuz bir ağ aracılığıyla toplanan veriler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. MATLAB® programında işlenen veriler, ivmeölçerlerden alınan geçmiş kayıtlarla karşılaştırılmıştır. Son olarak, yığma kulenin sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve modal parametreler son olarak burada kontrol edilmiştir. Çalışmanın yapı sağlığı izlenmesi bakımından yüksek doğruluk oranında güvenilir sonuçlar verdiği, ancak çok fazla sensör kullanılması bakımından uygulama açısından yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir.

1.2.2. Görüntü İşleme Teknikleri ve Analizleri ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Video tabanlı saha ölçümlerinde karşılaşılan bazı sınırlandırmaları gidermek amacıyla Ghandil vd. (2021) tarafından, dinamik yapı sistem tanımlama uygulamaları için video tabanlı bir ölçüm işlemi geliştirilmiştir. Bu işlemin başlıca amacı, video kaydında istenmeyen görüntülerin silinmesini ve böylece frekans içeriğini daha rahat bir şekilde ortaya koymaktır. Frekans içeriğini filtrelemek için de bir büyütme yöntemi kullanılmıştır. Sanal görsel sensörleriyle tarihi yığma minareler üzerinde analizler yapılarak minarelerin dinamik özellikleri ortaya çıkarılmak istenmiştir. Çalışmada, alınan video kayıtlarındaki görüntülerin büyütme işleminden sonra görüntülerde meydana gelecek olan bozuklukların gürültüye ve dalgalanmalara yol açtığını, ancak uygulanan büyütme işlemi sayesinde elde edilen frekans içeriğinin daha net olduğu ve daha az dalgalanma olduğu ortaya konmuştur. MATLAB® yazılımında geliştirilen bir kodla Lucas-Kanade Optik Akış Algoritması kullanılarak görüntülerin izleme süreci gerçekleştirilmiştir. İzlenmesi yapılacak yapının hareketinin düşey ve yatay bileşenlerini etkileyen kameraların pozisyon ve eğim açıları, düzeltmeye tabi tutulmuştur. Minarelerden alınan video kamera kayıtlarından minare dışındaki unsurlar düzeltme süreciyle kaldırılmıştır. Elde edilen minare görüntüsünde ivmeölçerlerin de yerleştirildiği kısımlara yakın noktalardan pikseller seçilmiş ve analizler yapılmıştır. Ayrıca SAP2000® programında minarelerin basit sonlu eleman modelleri oluşturulup modal parametre sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışma sonunda, uygulanan sanal görsel sensör tabanlı yöntemin ivmeölçer verilerine çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Yapılan büyütme ve modifikasyon işlemlerinin hareket frekans spektrumları oluşturmak için

kullanışlı bir araç olduğu, uygulanan tüm prosedürün düşük kalitedeki görüntülerde başarılı sonuçlar verdiği ve analiz süresini de önemli ölçüde kısalttığı tespit edilmiştir.

Wu vd. (2021), ölçeklendirilmiş bir köprü modeli üzerinde drone yardımıyla görüntüler alarak titreşim ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Titreşim tabanlı ölçümlerin yapı sağlığı izlenmesindeki rolünün çok büyük olduğu belirtilen çalışmada temassız yöntemlerin de önemine vurgu yapılmıştır. İvmeölçer gibi sensörlerle yapılan temas gerektiren çalışmaların geniş alanlarda getireceği yüksek maliyet ve uygulama zorluğu, bu çalışmanın yapılmasındaki başlıca unsur olarak gösterilmiştir. Ayrıca ivmeölçer sensörlerinin düşük frekanslarda doğru sonuçtan uzaklaştığı belirtilmiştir. Oluşturulan köprü modelinden drone yardımıyla alınan görüntüler bir dijital görüntü korelasyon yöntemiyle analiz edilmiştir. Görüntü kaydı alındığı sırada drone hareketinden kaynaklı olarak deplasman sonuçlarında düzeltmeye ihtiyaç duyulmuştur. Köprü modeli üzerinde sabit referans noktaları belirlenerek kamera kalibrasyonu yapılmıştır. Aynı zamanda homografi dönüşüm yöntemine dayalı yöntem de uygulanmıştır. Dijital görüntü korelasyonu sonucunda alınan görüntüler bu yöntemde de kullanılmıştır. Belirlenen dört referans noktası yardımıyla homografi matrisi oluşturulmuştur. Homografi matrisiyle deplasman hatasını düzelterek gerçek deplasman bulunmaya çalışılmıştır. Her iki yöntemden elde edilen gerçek yer değiştirmeler, Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak analiz edilmiş ve bulunan modal parametreler birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda, referans ve hedef noktalarının ortak bir düzlemde olunca iyi bir sonuç elde edildiği gözlemlenmiştir. Ancak düzlemlerin farklı olması senaryosunda homografik dönüşüm tabanlı yöntemin kullanışsız olduğu sonucuna varılmıştır.

Matsuoka vd. (2021), görüntü işleme yöntemleriyle demiryolu köprülerinin yer değiştirme ölçümlerinin yapılması üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Video kamera görüntüleri üzerinden yürütülen çalışmada, alınan görüntülerde işaretleyicilerin bulunup bulunmaması faktörünün ölçüm sonuçlarını nasıl etkilediği tartışılmıştır. Ayrıca çalışmada ortam ışığı ve saha koşullarının ölçüm sonuçlarına etkilerine de değinilmiştir. Demiryolu köprüleri gibi fazla yüksek yapılarda, yapının bulunduğu ortamın çevresel koşulları da göz önüne alınırsa, temas gerektiren ölçüm yöntemlerinin kullanışsız kalması ve ölçüm zorlukları sebebiyle görüntü işleme yöntemleriyle ölçüm tekniklerinin uygulanabilirliği ortaya çıkmıştır. Maliyeti en az seviyede tutmak ve uygulama kolaylığı sağlamak amacıyla köprülere herhangi bir işaret koyulmadan yalnızca tek bir kamera kullanılmıştır. İki farklı özellikteki demiryolu köprüsü incelenmiştir. Daha sonra ölçüm yöntemini doğrulamak

amacıyla bir laboratuvar modeli oluşturulmuş ve sarsma masasında analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca saha ölçümleri yapılan köprülerde doğrulama amacıyla bir başka ölçüm yöntemi olan lazer doppler kullanılmıştır. Uzunluğu ve yüksekliği fazla olan betonarme köprünün ölçümleri sırasında dört farklı ölçüm yöntemi kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu yöntemlerin farklılığı kullanılan ekipmanlar ve mesafe gibi parametrelere göre değişmektedir. Çalışmada herhangi bir işaretleyici olmadan Dijital Görüntü Korelasyon yöntemiyle yer değiştirmeler hesaplanmıştır. Bu yöntemin belirli bir piksek boyutuna ve aşırı olmayan parlaklık altında daha iyi sonuçlar verebileceği gözlemlenmiştir. Açıklığı az olan çelik köprünün orta noktasından tren geçişi sırasında yer değiştirmenin bu yöntemle ölçülebileceği, en az diğer ölçüm yöntemleri kadar doğru sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Açıklığı yüksek olan betonarme köprüden alınan görüntünün mesafe nedeniyle çok net olmaması, bu yöntem için bir dezavantaj olarak görülmüş olup diğer ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırıldığında hata oranının yüksek olmasına neden olmuştur.

Frados vd. (2020), kameralar kullanarak ahşap bir yaya üstgeçidinin yatay deplasmanını ve frekanslarını elde etmeye çalışmışlardır. Seçilen bu üstgeçit düşey ekseninde rijitliği yüksek yatay ekseninde ise esnek bir yapıya sahiptir. Çalışmanın amacı, maliyeti düşük kameralarla yüksek doğruluk oranlarında ölçümler yapabilmektir. Sonuçların doğruluğunu etkileyen unsurlardan en önemlileri üstgeçitte belirlenen referans noktalarının video kamera görüntülerinde net bir şekilde görülmesi ve üstgeçidin yatay ve düşey elemanlarını kullanarak hesaplanacak olan ölçeğin doğruluğudur. Bahsedilen ölçek üstgeçidin elemanlarının gerçek uzunlukları ve video kamera görüntülerindeki piksel cinsinden uzunlukları kullanılarak formüle edilmiştir. İki yıllık süreç boyunca üstgeçitten GPS ve ivmeölçerler yardımıyla veriler alınmıştır. Bu sayede kullanılacak yeni yöntemin sonuçları kontrol edilmiştir. Zorlanmış ve serbest durumda görüntüler alınan üstgeçidin yapılan modal analiz sonucunda frekansları hesaplanmıştır. Bu sayede ayrıca sönüm oranı da belirlenebilmiştir. Yöntemin ilk adımında DLTdvDigitizing® Tool isimli yazılımda görüntüler analiz edilmiştir. Bu analizlerden elde edilen piksellerin deplasmanı, bulunan ölçek kullanılarak metrik deplasmanları tanımlayan bir matrise dönüştürülmüştür. Daha sonra iki eksen boyunca kamera ve üstgeçidin konumlarına bağlı olarak dönme açıları hesaplanmıştır. Son olarak üstgeçit için eğilme matrisleri oluşturulmuştur. Kullanılan yöntemde herhangi bir korelasyon analizi yapılmadan nitelikli sonuçların bulunması yöntemin önemli özellikleri arasında gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlar ivmeölçerlerden

alınan sonuçlarla karşılaştırıldığında hata oranının çok az seviyede olduğu saptanmış ve yöntemin esnek yapılar için kullanılabileceğini göstermiştir.

Hsu & Kuo (2020) tarafından bina güvenliği değerlendirme için video kamera tabanlı bir sistem geliştirilmiştir. Sistem, çoklu kamera sistemlerinin maliyetini ve bu kameralardan elde edilecek videoların manuel olarak işlenmelerinin getireceği iş yükünü azaltmak için oluşturulmuştur. Birkaç bilgisayar bileşeni, iki adet ivmeölçer ve bir kamerayla oluşturulan bu basit sistem yapay sinir ağları destekli bir yazılımla hızlı sonuç almaya odaklı bir çalışmayı hedeflemiştir. Deprem sonrası binalardaki ara kat kaymalarını hesaplamak için tasarlanan bu sistemde Zahirî Yer Değiştirme Noktaları (PDP) yöntemi, yapay sinir ağları ve sinyal işleme algoritmaları kullanılarak akıllı kameraya entegre edilmiştir. Video kamera ölçümleri sırasında kameranın hareketinden kaynaklanabilecek ölçüm hataları bu yöntem sayesinde minimum seviyede tutulmuştur. Sistemi test etmek için altı katlı ve ölçekli bir çelik yapı modeli üzerinde deneysel bir çalışma yapılmıştır. Model, sarsma masasında bir dizi teste tabii tutulmuştur. Bu sırada akıllı kamera sistemiyle deplasman ölçümleri yapılmıştır. Lineer Değişken Farklı Transformatörler (LVDT) ayrıca modele yerleştirilmiş ve akıllı kamera sisteminden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ölçümlerde kullanılan referans noktalarının manuel olarak seçilmesi ve deprem sırasında oluşabilecek ışık değişimleri, oluşturulan sistemin geliştirilmesi gereken kısımları olarak belirtilmektedir. PDP yönteminin kamera hareketinden kaynaklı hataları azalttığı gözlemlenmiştir. İvmeölçerlerden alınan verilerin kameradan alınan verilerle birleştirildiğinde hata oranının daha da azaldığı görülmektedir. Sonuçların deprem sonrası bina güvenliği için kayda değer bir başarı elde ettiği görülmektedir.

Shariati vd. (2015), yapıların doğal frekanslarını tahmin etmek için Euler tabanlı bir sanal görsel sensörü üzerinde çalışmışlardır. Sensörün çalışma yöntemi video kamera kayıtlarındaki piksel yoğunluğu üzerinden bir tahmin yapmak üzerinedir. Çalışmanın sonucunda sanal görüntü sensörleri yardımıyla kaydedilen görüntülerin sinyal gürültü oranını artırarak yapıların daha yüksek seviyedeki doğal frekanslarını tespit etmek amaçlanmıştır. Bir laboratuvar modeli ve bir gerçek yapı üzerinde yürütülen çalışmada belirli desendeki hedefler kullanarak görüntü işleme teknikleriyle sonuçlar elde edilmiştir. Laboratuvar modeline başlangıç kuvveti uygulayarak yapılan kamera ölçümleri sırasında hassas ivmeölçerler de kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yalnızca görüş hattına dik olan titreşimlerden elde edilebilen frekansların, ivmeölçerlerden alınan sonuçlarla arasındaki hata payının minimum seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada desenli hedef

noktalarının kullanımının hem standart kameralar hem de yüksek hızlı endüstriyel kameralar için yüksek frekans değerlerini bulmayı kolaylaştırdığı tespit edilmiştir.

Bina cephelerindeki çatlak ve enerji kayıplarını temassız bir şekilde tespit etmek amacıyla Oh vd. (2021) tarafından drone yardımıyla görüntü işleme teknikleri kullanılarak bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Sobel, Laplacian ve Canny algoritmaları kullanılarak video görüntüleri işlenmiş ve çatlakları tespit etmek için kullanılan bir cihazla sonuçlar doğrulanmıştır. Drone kullanılarak alınan video görüntüleri bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Görüntüler bir ön işleme adımından geçer ve 0,3 mm'den büyük kontürler çatlak olarak tanımlanmıştır. C++[®] yazılımında oluşturulan kodlarda görüntü işleme adımları uygulanmış ve her çatlak için deplasman hesabı yapılmıştır. Binaların deprem sonrası durumunu düşük maliyet ve hızlı bir şekilde tespit etmek için geliştirilen bu çalışmada, bina yüzeyinin pürüzlü olmasının üç farklı algoritmada da farklı sonuçlar verdiği tespit edilmiş olup çalışmanın bütününde çatlakların doğru bir şekilde tespit edildiği gözlemlenmiştir.

Cataldo vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada, yapıların hasar değerlendirmesi için geliştirilen yöntemlerde sarsma masası testlerinin kullanımı yapılara gelebilecek dinamik yüklerin tasviri için kullanışlı bir yöntem olduğu vurgulanmıştır. Video tabanlı bir yöntem kullanılan çalışmada, düşük maliyetli bir kamera ile yapılardaki deformasyonu tahmin etmeye çalışmışlardır. İki katlı betonarme bir model üzerinde zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Yöntem bir video kameranın görüntü almasıyla başlamaktadır. Daha sonra alından görüntüler bir büyütme işleminden geçirilmiştir. Görüntülerden bir ilgi alanı seçilerek devam eden süreçte yazılım yardımıyla yapının modal parametreleri elde edilmiştir. Video kaydı alınırken modelin üzerinde belirli noktalara referans noktası olarak işaretçiler yerleştirilmiştir. Sonuçları doğrulamak için yapının sonlu eleman modeli MidasGen[®] programında oluşturulmuş ve modal analiz gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ivmeölçerler ve lazer tarayıcılar kullanılarak sistemin doğruluğu test edilmiştir. Sarsma masasında yapıya dinamik yük olarak deprem yükü ve Beyaz Gürültü ivme kaydı verilmiştir. Beyaz Gürültü ivme kaydı çevresel titreşimleri baz alarak yapay olarak üretilen bir dinamik yükü temsil etmektedir. Bu da rutin hareketlerden kaynaklanan yüklerin yapıda ne gibi değişiklikler oluşturduğunu görmek için faydalı bir yöntemdir. Yüksek hızlı ve pahalı kameralardan alınan görüntülerle daha düşük bütçeli kameralardan alınan görüntüler ile yapılan analizlerin sonuçlarının birbirleriyle çok yakın olduğu belirlenmiştir. Analizler

sonucunda bulunan modal parametreler arasındaki hata payının makul bir seviyede olduğu gözlemlenmiştir.

1.2.3. Tarihi Yığma Minareler ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Yanık vd. (2022), tarihi yığma minarelerin dinamik karakteristiklerini titreşim testleriyle beraber incelemişlerdir. Belirlenen iki farklı minareten, geliştirilen bir sistem aracılığıyla titreşim verileri alınmıştır. Bu veriler minarelerin restorasyon öncesi ve sonrasında ayrı ayrı alınmış olup sonuçlar iki farklı bilgisayar programında karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılmıştır. Geliştirilen Civil Engineering Vibration System (CEVS) yardımıyla minarelerden ivmeölçerlerle toplanan veriler MATLAB® programında geliştirilen CEVA yazılımında işlenmiştir. Minarelerden alınan ölçümler iki adet üç eksenli ivmeölçer ile gerçekleştirilmiştir. Frekans değerleri göz önüne alındığında restorasyon öncesi ve sonrası ölçümlerde ivmeölçerlerin konumlarının aynı olmasına dikkat edilmiştir. Toplanan veriler ayrıca ARTeMIS® yazılımında da Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, iki farklı programda yapılan analizler sonuçlarının birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Farklı sıcaklık ve nem koşullarına bağlı olarak yapıların modal parametrelerinde değişiklik olabileceği, farklı zamanlarda elde edilen frekans değerlerindeki değişimin trafik, inşaat çalışmaları gibi çevresel etmenlerden kaynaklandığı da düşünülmüştür.

Işık & Antep (2018) tarafından tarihi yığma bir minarenin yapısal analizi üzerinde çalışılmıştır. Çalışmada ele alınan minarenin ilk olarak sonlu eleman modeli SAP2000 programı yardımıyla makro modelleme yöntemiyle oluşturulmuştur. Bu yöntemde minarede kullanılan kesme taşlarla kullanılan harç birbirinden ayrı tutulmamaktadır. Böylece tüm yapı elemanları tek bir malzeme özelliği baz alınarak oluşturulmuştur. Oluşturulan sonlu eleman modeline iki farklı yükleme verilmiştir. Modal analizler yapılarak yapının dinamik özellikleri belirlenmiştir. Farklı deprem yük kombinasyonlarıyla yapıda oluşan gerilme yığılmaları elde edilmiştir. Bu gerilmelerin maksimum olduğu yerler minarenin geçiş bölgeleri olduğu tespit edilmiştir. Geçiş bölgelerinin kesitlerinin daralması ve en büyük gerilmelerin bu kısımlarda meydana gelmesi sebebiyle, gelecek büyük bir dinamik yük altında hasarın bu bölgelerde bekleneceği belirtilmiştir.

Tarihi yığma yapıların yapısal davranışları üzerine bir başka çalışma Kocaman vd. (2018) tarafından gerçekleştirilmiştir. Tarihi Erzurum Yakutiye Medresesini örnek olarak alan çalışma kapsamında, yapının malzeme özellikleri belirlenerek dinamik yüklemeler altındaki performansı hakkında bilgi edinilmiştir. Yapıda kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri hakkında veri bulunmamasından dolayı bu özellikler Schmidt sertlik çekici yöntemiyle elde edilmiştir. Yapısal analizleri gerçekleştirmek için SolidWorks® bilgisayar programında yapının üç boyutlu bir modeli oluşturulmuş ve sonlu eleman analizi yaptırılmak üzere ANSYS® programına aktarılmıştır. Statik ve modal analizler sonucunda yapının yer değiştirme ve doğal titreşim periyotları bulunmuştur. Dinamik analizler için üç farklı deprem kaydı kullanılmıştır. Tüm bu analizler sonucunda yapının statik olarak yeterli olduğu görülmüştür. Dinamik analizler sonucunda en büyük gerilme yığılmalarının minarelerin duvarlara geçiş kısmında olduğu görülmüştür. Aynı şekilde dinamik analizlerde kullanılan deprem kayıtları dikkate alındığında, yapının benzer büyüklükteki depremlere karşı yeterli dayanımı gösteremeyeceği ancak medresenin bulunduğu konumun jeolojik geçmişi göz önünde bulundurulduğunda böyle bir ihtimalin düşük olduğu tahmin edilmiştir.

1.3. Tezin Amacı ve İçeriği

Tarihi yığma minarelerin hem yapıları hem de ayakta kaldıkları süreler göz önüne alındığında depremlere karşı sergileyecekleri davranış önemli bir konu olarak görülmektedir. Minarelerin sergileyecekleri davranış minarenin yapısı ve kullanılan malzemeler gibi parametrelere göre değişebilmektedir. Bunun yanı sıra her bir minarenin kendine özgü salınım hareketi vardır. Bu salınım hareketleri belirli periyotlarla izlenerek elde edilen sonuçlarla birtakım analizler yapılarak minarenin belirli dinamik yükler altında göstereceği performans hakkında sonuçlar çıkarılabilir.

Tez çalışması kapsamında laboratuvar ortamında inşa edilen minyatür minare modeli üzerinde analizler yapılacaktır. Video kamera tabanlı olarak oluşturulan ölçüm sistemiyle birlikte minare modelinden alınan görüntüler bilgisayar ortamında analiz edilerek modal parametreler elde edilecektir. Bu parametreler yapılacak olan sonlu eleman analizleri ve ivmeölçer ölçümleriyle beraber doğrulanacaktır. Daha sonra saha çalışmaları kapsamında belirlenen tarihi yığma bir minareden video kayıtları alınarak aynı analizler gerçekleştirilecektir. Benzer şekilde sonlu eleman modeli oluşturulacak olan minare modelinde frekans değerleri doğrulanacaktır. Yapılan bu çalışmalarla yapı sağlığı izlenmesi

üzerine yeni yöntemler geliştirilmesi hedeflenmektedir. Son olarak, sonlu eleman modeli üzerinde gerçekleştirilecek olan spektrum analizlerine göre gerilme yığılmalarının olduğu bölgeler tespit edilip, deprem simülasyonu bu sonuçlar karşılaştırılacaktır.

Tezin ilk bölümünde, geçmişte konuyla ilgili gerçekleştirilen çeşitli çalışmalardan bahsedilmiştir. Bu çalışmalar, hem tarihi yığma minarelerin özellikleri ve performanslarıyla ilgili hem de görüntü tabanlı analizle ilgili farklı yapılar hakkında bilgiler içermektedir. Bu da oluşturulan video kamera tabanlı sistemin tarihi yığma minarelerin yanında farklı yapı türleri özelinde de çalışmaya olanak sağlayabileceğini göstermektedir.

Tezin ikinci kısmında, deneysel çalışmalar hakkında bilgiler yer almaktadır. Laboratuvar ortamında yapılan minyatür minare modeli üzerinde gerçekleştirilen ölçümler ve analizlerin yanında, görüntü ölçümlerinden elde edilen sonuçları doğrulayan sonlu eleman analizleri de yer almaktadır. Saha çalışmaları kapsamında belirlenen tarihi yığma minare üzerinde gerçekleştirilen ölçüm ve çalışmalara yer verilmektedir. Spektrum analiz sonuçları ve deprem simülasyonu da bu kısımda gösterilmektedir.

Tezin üçüncü kısmında, yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Yapılan tüm çalışmalar sonucunda verilmek istenen öneriler kısmı dördüncü kısımda bulunmaktadır. Son kısım, çalışmada kullanılan referansları göstermektedir.

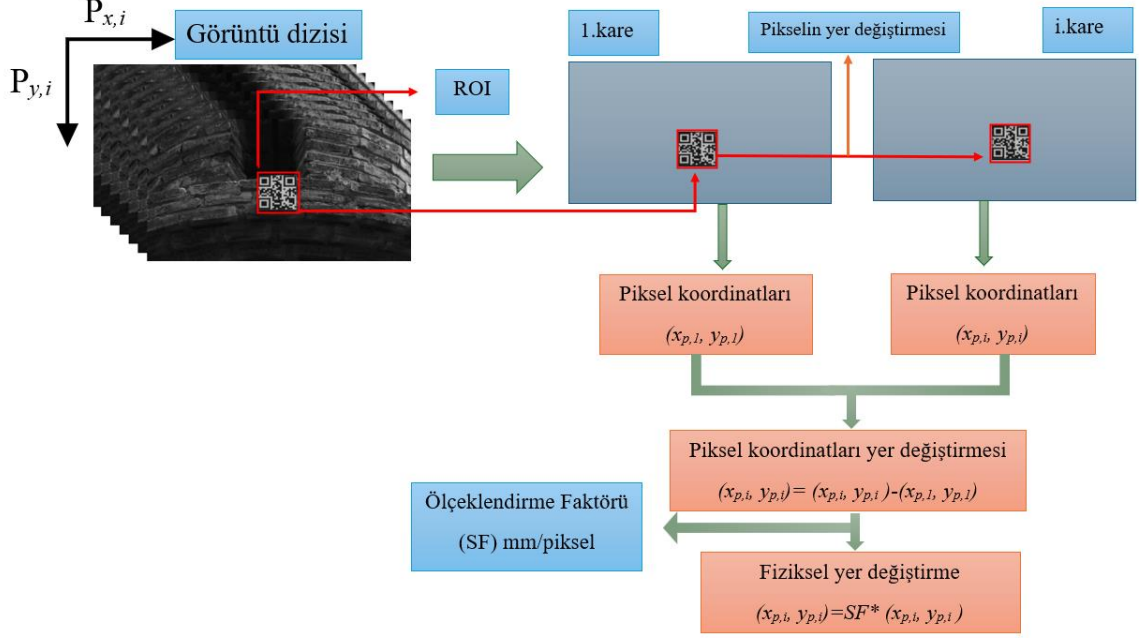
1.4. Video Kamera Tabanlı İzleme Sistemi

1.4.1. Video Kamera Tabanlı İzleme Sisteminin Tanıtımı ve Sistemin Çalışma Algoritması

Nesnelerin video kamera tabanlı izlenmeleri için şablon eşleme temelli yer değiştirme sensörleri kullanılan bir sistem kullanılmıştır. Bu sistem karekod gibi belirli şablonları kullanarak laboratuvar ortamında oluşturulan minyatür minare modeli üzerinde test edilmiştir. Tarihi yığma minareler için yapılacak olan saha ölçümlerinde bu şablonların yerini minarelerin üzerlerinde seçilen ilgi alanları (ROI) almıştır (Dawoud vd., 2011). Bahsedilen bu ilgi alanlarından başlangıç kareleri sisteme tanımlanmakta ve videolar süresince son karelerdeki konumlar belirlenerek nesneler takip edilmektedir.

Sistemin yüksek hızlı endüstriyel kameralar kullanmasıyla, geleneksel yöntemlere nazaran daha iyi sonuçlar elde edilmesi hedeflenmektedir. Çalışmanın öncelikli hedefinde ise kameralar ve açık kaynak kodlu algoritmalarla oluşturulmuş sistemler arasında, bu sistemin yapısal titreşim yakalamadaki performansını görebilmektir. Şekil 1’de görüldüğü

gibi piksel koordinatlarını kullanarak ölçekleme faktörüyle beraber yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil 1. Görüntü sensörünün uygulanma süreci

Endüstriyel kameralar kullanılarak oluşturulan sistem, çeşitli görüntü işleme yöntemlerine bir taban hazırlamaktadır. Kurulan sistemle beraber elde edilen video verileri bahsi geçen görüntü işleme yöntemleriyle kullanılarak daha güvenilir veriye ulaşmak hedeflenmektedir. Oluşturulan görüntü izleme sistemi için hangi görüntü işleme tekniğinin kullanılacağına karar vermek çalışmanın önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Endüstriyel kameralara ve sistemin geri kalanında kullanılan cihazlara uygun bilgisayar programlarıyla uyumlu çalışabilecek yöntemlerin kullanımı tercih edilmektedir. Bu yöntemler şablon kullanımını zorunlu kılan durumlarda veya saha ölçümleri esnasındaki hedeflerin parlaklığı gibi unsurlara göre çeşitlilik göstermektedir.

1.4.2. Video Kamera Donanım Sistemi

Video kamera tabanlı izleme sisteminin en önemli noktası video kamera kaydı alabilmek için oluşturulan donanım sistemidir. Kurulan bu sistemle hem laboratuvar ortamında hem de dış mekanlarda video kayıtları alınabilmektedir. Sistem dört adet endüstriyel kamera, bu kameraların her biri için birer kamera lensi, görüntülerin kayıt altına alınması

için bir adet kayıt cihazı, dört adet tripod, dış mekân çekimleri için bir adet güç ünitesi, CoaExpress kayıt cihazının bağlanması ve CoreView yazılımı için bir adet bilgisayar ve kablolardan oluşmaktadır. Donanım sisteminin her bir bileşeninin teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir .

Victorem™ CoaXPress serisi, yüksek performanslı Sony CMOS görüntü sensörleri ve yüksek bant genişliğine sahip CoaXPress video çıkışı içeren geniş bir kompakt endüstriyel video kamera yelpazesidir. Her uygulama için doğru Victorem kameranın seçilebilmesini sağlayacak şekilde, aralarından seçim yapılabilecek çeşitli sensörlere sahip çeşitli modeller mevcuttur. 0,4 MP'den 26,2 MP'ye kadar değişen çözünürlükler ve saniyede yüzlerce kareye varan kare hızlarıyla bu güçlü kameralar, hacimsel video yakalama, makine görüşü ve otomatik optik inceleme gibi performans odaklı uygulamalar için idealdir.

Sensörlerin saniyede yüzlerce hatta binlerce Megabayt video verisi üretmesi durumunda, Victorem™ CoaXPress serisi kameraları kullanan sistemlerin bu bilgi akışına erişme yollarına ihtiyacı vardır. CoaXPress video arayüzü, bu sensörlerin bant genişliğiyle ideal bir eşleşmedir ve her sensörün tam çözünürlükte, tam bit derinliği hızını kısıtlama olmaksızın destekleyebilmektedir. GigE Vision veya USB3 Vision gibi diğer arayüzler, CoaXPress'ten daha düşük bant genişliği sunmaktadır. Bu nedenle daha az kare/saniye veya daha düşük bir bit derinliği kullanılmalıdır. CoaXPress protokolü standartlaştırılmış ve geniş ölçüde benimsenmiştir. Düşük maliyetli esnek koaksiyel kabloların uzun mesafelerde 100m'den fazla kullanılmasına izin vermektedir.

Victorem™ CoaXPress kameralarda kullanılan CMOS sensörler, yüksek çözünürlük, düşük gürültü, mükemmel dinamik aralık ve renk doğruluğu gibi son teknoloji özelliklere sahiptir. Kameralar, gamma veya kontrast iyileştirmesi için görüntü düzeltme tabloları ile ayarlanabilir pozlama özelliklerine sahiptir. Manuel veya otomatik olarak kullanılabilirler. Bazı lenslerin gölgelenme etkilerini düzeltmek için bir kamera içi düzeltme algoritması düz alan homojenliği için ayarlanabilir. Hızlı hareket eden nesneler için, ayarlanabilir pencere ayarları, sensörün daha küçük bölgelerinin daha yüksek kare hızlarında çıkış almasına olanak tanımaktadır (URL-1, 2024).

Tablo 1. Video kamera tabanlı izleme sistemi; donanım bileşenleri

Bileşenler	Model	Teknik Özellikler
Video Kamera-1	2 Adet IO Industries CoaxPress VICTOREM 16B276MCX	Maksimum Çözünürlük: 1456×1088 Kare Sayısı: 276 FPS Renk: Mono Pixel size: 3,45×3,45 µm ²
Video Kamera-2	2 Adet IO Industries CoaxPress VICTOREM 32B216MCX	Maksimum Çözünürlük: 2064 x 1544 Kare Sayısı: 216 FPS Renk: Mono Pixel size: 3,45×3,45 µm ²
Optik Lens	4 Adet Kowa LM75JC1MS 2/3" 75 mm 2MP C-Mount Lens	Odak uzaklığı: 75 mm Maksimum diyafram açıklığı: F2.5 İris aralığı (F-Stop): 2,5-22
Video kayıt cihazı	IO Industries DVR Express Core 2 CoaXPress (CORE2CX)	CoaXPress Single-Link, (2) CoaXPress Dual-Link, (2) CoaXPress Single-Link ve (1) CoaXPress Dual-Link. CoaXPress v1.1 ve GenICam Rev. 2.4 uyumludur. Video Formatı: 8/10/12/14/16-bit Monochrome 8/10/12-bit Bayer Color 24-bit RGB
Güç ünitesi	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 16d1006nt	12th Gen Intel(R) Core (TM) i5-12500H 2.50 GHz 16 GB RAM 512 GB SSD x64 Tabanlı İşlemci

Sistemin bileşenleri arasındaki bağlantı Şekil 2’de gösterilmektedir. Kameralar DVR Express Core kayıt cihazında her birine bir adet olacak şekilde bağlanmaktadır. Tek bir kablo yardımıyla hem görüntü aktarımı hem de güç aktarımı yapılabilmektedir. Kameraların her biri dört adet tripod üzerine yerleştirilmiştir. Tripodlar, üzerlerinde bulunan su terazisi yardımıyla dengeye alınabilmektedir. DVR Express Core kayıt cihazı bir HDMI kablosu yardımıyla bilgisayara bağlanmaktadır. Bu sayede kameralardan alınan görüntüler eş zamanlı olarak bilgisayarda yüklü durumda bulunan CoreView yazılımında görüntülenebilmektedir. Yazılım, aynı zamanda video ayarlarının yapıldığı yerdir. Alınan görüntülerin harici bir disk veya bilgisayar ortamına aktarımında istenilen FPS aralığında alınabilmektedir. Kayıt cihazı güç adaptörü ve kablosuyla beraber şarjlı bir güç ünitesine bağlanarak sistem çalışır duruma getirilir.

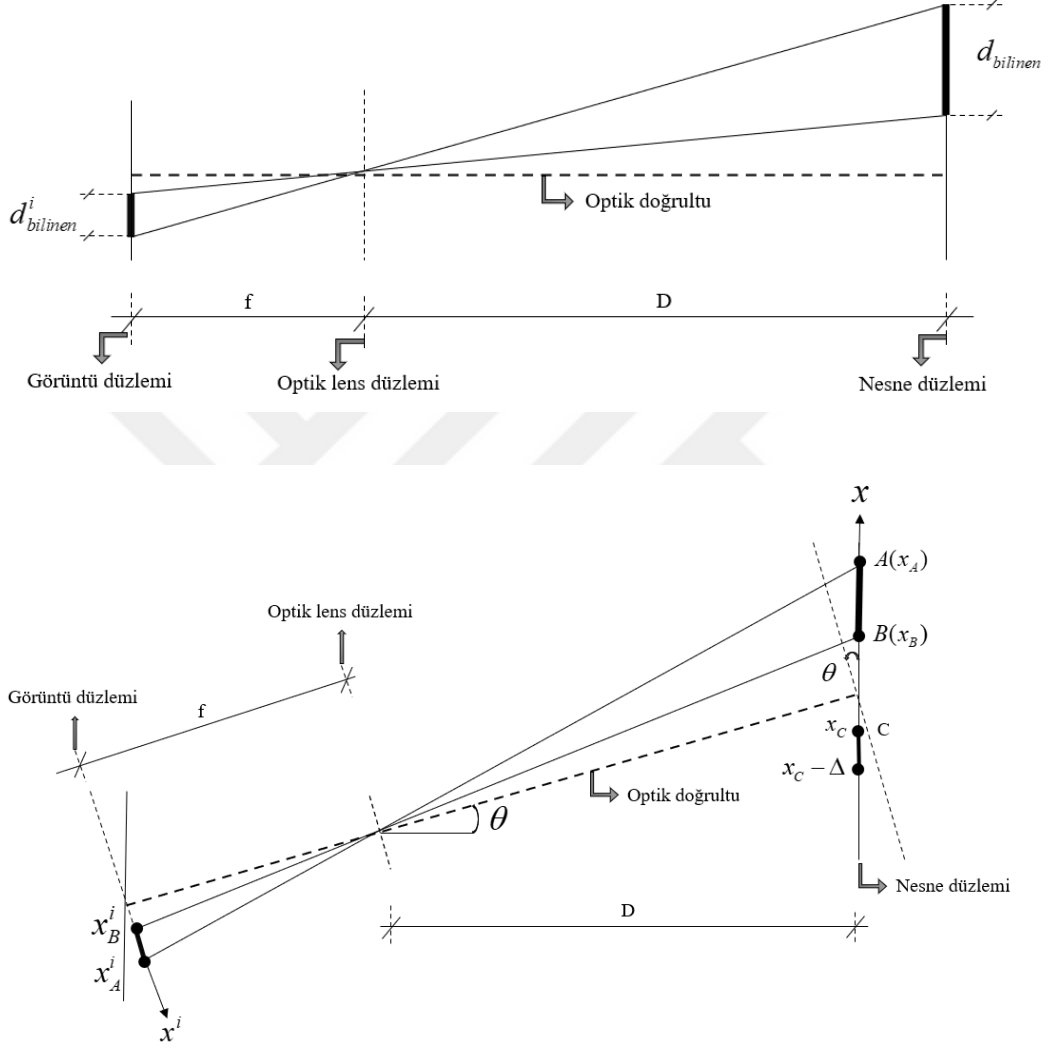


Şekil 2. Video kamera tabanlı izleme sistemi; donanım bağlantı şeması

1.4.3. Kamera Kalibrasyonu

Video görüntülerinden seçilen bölümlerin ölçüleri piksel koordinatları bazında belirlenmektedir. Bu koordinatlarla belirlenen uzunluklar ve gerçek boyutlar kullanılarak bir dönüşüm matrisi oluşturulur. Kamera kalibrasyonunun içeriği bu zemin üzerine hazırlanmıştır. Kalibrasyon süreci, tam projeksiyon matrisi, düzlem homografi matrisi ve ölçek faktörü olmak üzere üç ana türe ayrılır (Haciefendioğlu vd., 2023). Şekil 3, kamera

kalibrasyonunda ölçeklendirme faktörünün nasıl elde edildiğini göstermektedir. Alınan görüntülerden yapılan ölçümlerde anlamlı sonuçlar almak için bu süreçteki her bir adım önemlidir.



Şekil 3. Ölçeklendirme faktörünün gösterimi

Denklem 1, kamera kalibrasyonun bozuklukların nasıl düzeltileceğiyle ilişkilidir. Bir kontrol şablonunun çok sayıda fotoğraflanmasının ardından gerçek görüntü düzlemine dönüşümünü tanımlamak için delikli kamera modeli kullanmaktadır. Denklem 1 bunun matematiksel modelidir.

$$\tilde{m} = A_{3 \times 3} \begin{bmatrix} R \\ t \end{bmatrix} \tilde{M} \quad (1)$$

Verilen denklemde, $\tilde{m} = [u, v, 1]^T$ görüntü koordinatlarını temsil etmektedir. Burada u ve v piksel koordinatlarını ifade eder. $A_{3 \times 3}$ kamera içsel matrisi temsil eder, bu da kameranın odak uzunluğu, piksel boyutları ve optik merkezi ile ilgili parametreleri içerir. $[R|t]$ matrisi, kameranın dünya koordinat sistemindeki konumunu ve yönelimini tanımlayan dönüş matrisi R ve çeviri vektörü t içerir. $\tilde{M} = [X, Y, Z, 1]^T$ bir noktanın dünya koordinatlarını temsil eder, burada X, Y ve Z uzamsal koordinatları ve 1 homojen bir koordinattır. Kamerayı kalibre etmek ve görüntü koordinatlarını gerçek dünya koordinatlarına dönüştürmek için ölçek faktörü yöntemi kullanılmaktadır.

Ölçeklendirme faktörü basit bir projeksiyon yöntemidir. Video dizilerinden elde edilen piksel koordinatları ve gerçek uzunluklar arasında bir bağlantı oluşturmaktadır. Denklem 2 bu bağlantıyı göstermektedir.

$$SF = \frac{d_{bilinen}}{I_{bilinen}}, SF = \frac{d_{bilinen}}{I_{piksel}} = \frac{D}{f \cdot d_{piksel}} \quad (2)$$

Verilen denklemde $d_{bilinen}$ ölçüm yapılan nesnenin gerçek uzunluğunu, d_{piksel} görüntülerdeki piksel yer değiştirmesini, $I_{bilinen}$ görüntülerdeki piksellerin uzunluğunu, D kameranın ölçümü yapılan nesneye olan mesafesini ve f ise kameranın odak uzunluğunu temsil etmektedir. Mühendislikte yaygın olarak kullanılan bu yöntem, yapısal izleme için hassas ölçümler yapılabilmesini sağlamaktadır. Ancak kameranın optik ekseninin ölçüm düzlemine dik olmasının gerekliliği, yöntemin negatif yönünü göstermektedir.

1.4.4. Hedef Takip Yöntemleri

Hedef takip yöntemleri, belirli bir video dizisinde seçilen bir nesnenin video içindeki konumunu sürekli veya belirli bir süre izlemeyi amaçlayan tekniklerdir. Bu yönüyle birçok alanda kullanılmaktadırlar. Tez çalışması kapsamında, belirli piksellerin hareketini izlemeyi hedefleyen Optik Akış yöntemi kullanılmıştır. Özellikle video görüntülerindeki yer değiştirmeleri hesaplamak ve analiz etmek için ideal bir yöntemdir.

1.4.5. Optik Akış Yöntemi

Bilgisayar görüş tekniklerinde şekil veya renk algılanmasına karşın nesne hareketinin takibini baz alan optik akış yöntemi bu yönüyle diğer tekniklerden ayrılmaktadır. Video görüntülerindeki yer değiştirmeleri tespit etmek için geleneksel yöntemlere nazaran daha etkili olan bu yöntem videolardaki görüntü dizilerini kullanmaktadır. Bu görüntü dizilerinde belirlenen bir nesnenin hareketini takip edebilmekte ve yer değiştirmeleri hesaplayabilmektedir.

Optik akışı hesaplamak için çeşitli yöntemler geliştirilmiş olsa da bu çalışmada yapı sağlığı izlenmesi açısından önemli bir yere sahip olan Lucas-Kanade yöntemi göz önüne alınmıştır (Lucas & Kanade, 1981). Yöntem, Bruce D. Lucas ve Takeo Kanade tarafından 1981 yılında geliştirilmiştir. Ardışık görüntü kareleri arasında piksel yoğunluğunun çok fazla değişmediğini varsaymaktadır. Piksellerin yer değiştirmesini her nokta için bir lineer denklem sistemi çözerek tahmin etmeye çalışır.

Lucas-Kanade Optik Akış algoritması yer değiştirmelerin yüksek olduğu yapıların tahminlerinde daha küçük yer değiştirmelere göre başarısız sonuçlar verebilmektedir. Aynı zamanda parlaklığın çok değişkenlik gösterdiği mekanlarda da algoritmanın performansı düşük kalabilmektedir. Bu sınırlamaları ele almak için, Piramidal Lucas-Kanade Optik Akış tekniği geliştirilmiştir. Lucas-Kanade yöntemi, görüntü yoğunluğunun mekânsal ve zamansal türevlerini veya düşük geçirgenlikli bir filtre uygulayarak görüntünün filtrelenmiş sürümlerini kullanarak hızı Denklem 3'te görüldüğü gibi hesaplayabilmektedir.

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

Bu denklemde, parlaklığın sabit olduğunu kabul eden optik akış yönteminde belirli bir pikselin x konumundaki ve t zamanındaki yoğunluğu I için, küçük bir zaman aralığı δt sonrasında küçük bir miktar δx hareket etse bile sabit kalacağını belirtir. Denklem 4, görüntü yoğunluğunun korunduğunu varsayarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

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

$\nabla I(x, t)$, $I(x, t)$ 'ye göre resim boyutu boyunca kısmi türevi temsil ederken, $I_t(x, t)$, $I(x, t)$ 'ye göre zaman boyunca kısmi türevi ifade eder. Ayrıca u iki boyutlu optik akış vektörünü temsil etmektedir. Yöntem, belirli bir çerçeve içindeki piksellerin düzgün hızları olduğunu

söylemekte ve yer değiştirme vektörünü belirlemek için Denklem 5'te görülen en küçük kareler yaklaşımını kullanmaktadır.

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

1.4.6. Büyük Yer Değiştirmelerin İzlenmesi için Piramit Optik Akış Yöntemi

Piramit Optik Akış Yöntemi görüntü boyutunu küçülterek büyük hareketlerin takibini yapabilmek için geliştirilen bir yöntemdir. Geleneksel yöntemden farkı çözünürlüğü düşürerek görüntü işlemeyi gerçekleştirmesidir. Akış, aynı seviyede standart optik akış yöntemleri kullanılarak hesaplanırken, farklı seviyeler arasındaki akış, Denklem 6 veya Denklem 7 ile belirlenmiştir. L ile gösterilen en yüksek çözünürlük seviyesi için, optik akış g_i , Denklem 6'da gösterildiği gibi, mevcut seviyedeki akış v_i 'nin iki katı olarak hesaplanmaktadır.

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

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

L 'den daha düşük çözünürlükteki diğer seviyeler için, akış g_i , Denklem 7'de belirtildiği gibi, mevcut seviyenin optik akışı v_i ile önceki daha ince seviyeden gelen akış g_{i-1} 'in toplamının iki katı olarak hesaplanmaktadır.

1.4.7. Lucas-Kanade Optik Akış Yönteminin İşleyişi

Tez kapsamında gerçekleştirilen bir yazılımda bir videodaki hareketleri izlemek için bir görüntü işleme yöntemi kullanılmıştır. Yer değiştirmeleri hesaplamak için Lucas-Kanade Optik Akış yönteminden yararlanılmış ve görselleştirme için Python ve Matplotlib kütüphanesi kullanılmıştır.

Bu optik akış sisteminde video görüntülerinden alınan ilk karede ilgi alanları olarak belirtilen noktaların seçilmesiyle ölçümler başlatılmaktadır. Seçilen noktalar ölçümler boyunca referans olarak alınmaktadır. İlk görüntü ve sonraki görüntü daha sonra "calcOpticalFlowPyrLK" fonksiyonundan geçirilmiştir. Bu fonksiyon, Piramidal Lucas-

Kanade Optik Akış yöntemini kullanan, büyük deplasmanları ve karmaşık hareket şablonlarını ele alabilen sistemin önemli bir bölümüdür (Bouguet, 2024). Her bir video karesinde sistem ilgi alanları içindeki noktaların konumunu hesaplar ve bir önceki karedeki pikselin konumuna göre bir hesaplama gerçekleştirir. Bu da, parlaklık değişimi gibi durumlarda daha iyi sonuç alınmasını sağlamaktadır. Video işleme süreci içerisinde tanımlı noktaların sistem tarafından tanınmaması ve kaybolması durumunda noktalar yeniden tanımlanmaz. Böylece akışta bir sapma meydana gelmez ve düzensizliklerden kaçınılmış olunur.

1.4.8. Gelişmiş Frekans Tanım Alanı Ayırışımı (GFTAA)

Operasyonel Modal Analiz (OMA) alanında kullanılan bir teknik olan Gelişmiş Frekans Tanım Alanı Ayırışımı (GFTAA) tekniği, Frekans Ortamında Ayırıştırma (FOA) yönteminin güncelleştirilmiş bir versiyonudur. Geleneksel yöntemde modlar, sistem tepkilerinin spektral yoğunluk spektrumlarından üretilen tekil değer ayırıştırma grafiklerindeki pik noktaları bulmak amacıyla tanımlanmaktadır. FOA, Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) analizinden elde edilen tek bir frekans çizgisine dayanırken, tahmin edilen doğal frekansların doğruluğu FFT çözünürlüğüne bağlıdır ve modal sönüm hesaplanmaz (Jacobsen vd., 2006). Gelişmiş Frekans Tanım Alanı Ayırıştırma yöntemi ise mod şekilleri ve doğal frekanslarının tahminini kolaylaştırmakta ve geliştirmektedir. Modal sönümü daha kapsamlı hesaplayarak dinamik davranış daha iyi bir şekilde modellenmektedir. GFTAA yöntemi, bir tanımlanmamış kuvvet ile iyi tanımlanmış bir davranışsal fonksiyon arasındaki ilişkiyi ifade eden Denklem 8'e dayanmaktadır (Bendat & Piersol, 2004).

$$G_{yy}(j\omega) = H(j\omega)G_{xx}(j\omega)H(j\omega)^T \quad (8)$$

Etki sinyalinin spektral yoğunluk fonksiyonun $G_{xx}(j\omega)$ temsil etmektedir. $G_{yy}(j\omega)$ ise tepki sinyalinin bir fonksiyonudur. $H(j\omega)$ frekans tepki fonksiyonunu göstermektedir. Tepki sinyalinin güç yoğunluk matrisinin özdeğer ayırıştırma yöntemi kullanılarak bir ifade oluşturulmuştur ve Denklem 9'da verilmiştir.

$$G_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^H \quad (9)$$

Burada, U_i özvektörleri temsil eder, S_i , tepe değerlerini içeren diyagonal matrisi temsil etmektedir. Pik değerlere sahip noktalar doğal frekanslara karşılık gelir ve bu noktaları oluşturan özvektörler, Denklem 9'da bulunan skaler özdeğerler tarafından belirlenen mod şekillerine karşılık gelmektedir.

1.5. Spektrum Analizi

Yapıya etki eden çeşitli yüklerin zamana bağlı değişimi, yapı tasarımlarında önemli bir parametredir. Bu yüklerin maksimum değerleri tasarımlarda göz önüne alınmaktadır. Spektrumların ortaya çıkışı ve kullanım amacı bu yöndedir. Deprem gibi dinamik yüklerin karmaşıklığı, dinamik çözümleme için bir sayısal yöntem ihtiyacı duymaktadır. Konvolüsyon integraliyle bu spektrumların değerleri bulunabilmektedir (Celep, 2017).

$$u(t) = \int_0^t \ddot{u}g(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad (10)$$

$$u(t) = -\frac{1}{\omega D} \int_0^t \ddot{u}g(\tau)e^{-\xi\omega n(t-\tau)} \sin[\omega D(t-\tau)]d\tau \quad (11)$$

Türevi alınan denklem, Denklem 12'deki şeklini alır.

$$\dot{u}(t) = -\xi\omega n u(t) - \int_0^t \ddot{u}g(\tau)e^{-\xi\omega n(t-\tau)} \cos[\omega D(t-\tau)]d\tau \quad (12)$$

İkinci kez türevi alınan denklem herhangi bir sayısal çözümleme yöntemiyle çözülmüşse zamana bağlı değişen yer ivmesi altında oluşacak yer değiştirme, sabit bir sonum oranı için bulunabilir (Darılmaz, 2019).

$$\ddot{u}(t) = -\omega_n^2 u(t) - 2\xi\omega_n \dot{u}(t) \quad (13)$$

Analiz süresince tek serbestlik dereceli sistemlerdeki davranışların zaman içindeki seyrini belirlemek ayrıntılı olarak fazla çaba gerektiren bir yaklaşımdır. Her bir periyoda denk gelen en yüksek değerleri hesaplamak için hız, yer değiştirme ve ivme spektrumlarını çizmek, belirli bir yer hareketi etkisinde yapılabilir. Farklı periyodlar için hesap yapılmasının sebebi, periyodun yapının kütlesi ve rijitliğine bağlı bir parametre olmasıdır. Farklı periyodlara sahip tek serbestlik dereceli sistemleri göz önüne almak, rijitlikleri ve kütleleri

farklı tek serbestlik dereceli sistemler için hesap yapmayı sağlamaktadır. Bu yaklaşım sonuca gitmek için daha pratik ve kolaydır. Ortaya çıkan tepe değerlerinin maksimumu, tek serbestlik dereceli sistemlerin doğal periyodu ve sönümleme oranıyla ilişkilidir (Kadiroğlu, 2019).

Sabit bir sönüm oranı için 14 denklemi farklı tek serbestlik dereceli sistemler için çözülür. Yer değiştiririnin en büyük olduğu değerler periyotlara göre düzenlenir ve yer değiştirme spektrumu elde edilir. Bu spektrumlardan periyoda bağlı yer değiştirmeye spektral yer değiştirme denir.

$$F = kU_{\max} = k.(S_d) \quad (14)$$

15 denklemi yardımıyla sistemde oluşan iç kuvvetler hesaplanabilmektedir. Hesaplanacak olan iç kuvvetler, yer hareketi etkisinde oluşan en büyük iç kuvvetler olarak kabul edilerek tasarımda kullanılabilir. Rijitlik değeri kütle ve açısal momentum cinsinden bu denkleme entegre edilirse;

$$F = m\omega_n^2 U_{\max} = m\omega_n^2 (S_d) \quad (15)$$

denklemi elde edilir. Denklemden $\omega_n^2 (S_d)$ kısmı ivmeyi temsil etmektedir. Buna göre yer ivmesi ve yapının ivmesinin toplamı;

$$\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t) = -2\omega_n \xi \dot{u}(t) - \omega_n^2 u(t) \quad (16)$$

denklemi yardımıyla bulunabilir. Yer değiştiririnin maksimum değerindeki anı $t=t_i$ olarak kabul edilirse;

$$\ddot{u}(t_i) + \ddot{u}_g(t_i) = -2\omega_n \xi \dot{u}(t_i) - \omega_n^2 u(t_i) = -2\omega_n \xi \dot{u}(t_i) - \omega_n^2 (S_d) \quad (17)$$

denklemi elde edilebilir. Hızın sıfıra eşit olduğu ve aynı zamanda yer değiştiririnin maksimum olduğu anda,

$$\ddot{u}(t_i) + \ddot{u}_g(t_i) = -\omega_n^2 (S_d) \quad (18)$$

denklemini yazılabilir. Hız sıfırdan farklı ise bulunan ivme yer değıştirmenin maksimum değeriine ulaştığı anki ivmedir.

Spektrumlar, belirli bir yer hareketi etkisinde sabit bir sönüm oranı için periyotları farklı tek serbestlik dereceli sistemlerin o yer hareketine vereceğı tepkinin en büyük değeriini gösterirler. İvme spektrumları için aynı mantık çerçevesinde farklı periyoda sahip tek serbestlik dereceli sistemlerin, maruz kalacakları yer hareketi etkisinde toplam ivmenin en büyük değeriinin göstereceğı kanısına varılabilir. Fakat yapıdaki iç kuvvetler de göz önüne alındığında kullanılacak olan ivme, yer değıştirmenin maksimum olduğu andaki ivmedir. Bu ivmeye de sözde veya zahiri (Pseudo) ivme denir. Bahsedilen ivme değeriilerinden elde edilen spektrumlara Zahiri İvme Spektrumu (Pseudo Acceleration Spectra) adı verilir. Yer değıştirme spektrumu oluşturulmasının ardından, her bir periyod değeri için ivme değeri hesaplanır ve zahiri ivme davranış spektrumu elde edilir. Bu spektrumdan belirli bir periyod için okunacak ivme değeri de Zahiri Spektral İvme (Pseudo Spectral Acceleration) olarak adlandırılır. Zahiri spektral ivmeyle spektral yer değıştirme arasındaki ilişki,

$$PSA = \omega_n^2 S_d \quad (19)$$

denkleminle verilebilir.

1.6. Blender Bullet Constraints Builder Eklentisi

Blender® programı için özel olarak geliştirilen bu eklenti, yapılan modelleme çalışmalarına dinamik yüklemeler yaparak bu yüklemelerin yapı üzerindeki yıkıcı etkilerini simüle etmek amacıyla geliştirilmiştir. Eklentinin geliştirilme amaçlarından birisi herhangi bir yapı deprem etkisi altında çöktükten sonra yapıda hangi kısımların sağlam kaldığını, güvenli alanların neresi olabileceğini öngörebilmektir. Bununla birlikte yapıların farklı yüklemeler altında davranışları da belirlenebilmektedir.

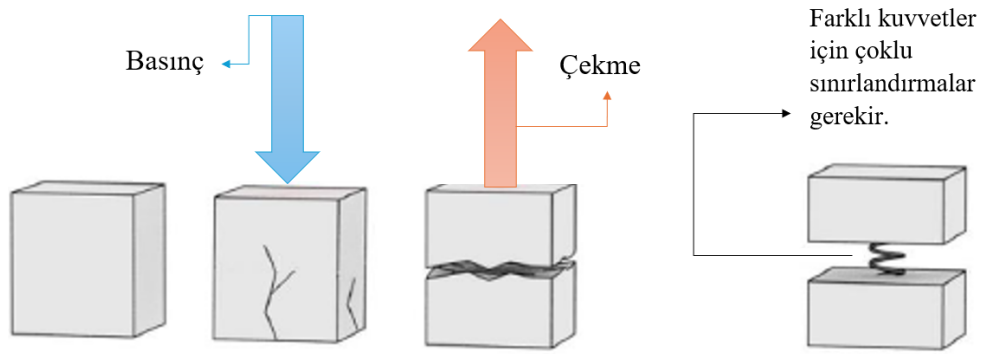
Yazılım geliştirme süresince Ayırık Eleman Yöntemi ele alınmıştır (Walter & Kostack, 2024). Bu yaklaşımla beraber her eleman için karmaşık bir malzeme davranışının hesaplandığı sürekli yaklaşımlara kıyasla birçok avantaj sağlanmıştır. Yalnızca rijit cisimler dikkate alındığından genel sorunu tanımlamaya ve çözmeye yönelik uğraş nispeten daha azdır. Bu sebeple bu yöntem gerçek zamanlı senaryolarda çok hızlı bir yöntem olduğu için kullanılmaktadır. Ancak cisimlerin içinde sürekli deformasyonların hesaplanamaması bir

dezavantaj olarak görülmektedir. Bu tür detayların dikkate alınmaması yöntemin doğruluğu azaltmaktadır. Bu da yöntemin olumsuz tarafını göstermektedir.

Malzemenin dayanım özelliklerini modellemenin yanı sıra modellenen parçaların arasındaki bağlantıları doğru bir şekilde yapmak yazılımın geliştirilmesinde önemli bir konudur. Bu yüzden birincil amaç, elemanları oluşturan malzemenin mekanik özelliklerini göz önünde bulundurarak elemanların bağlantı özelliklerini doğru temsil edebilmektir. Bu Bullet Constraints Builder tarafından otomatik olarak gerçekleştirilir ve kullanıcının fazla zaman harcamasının da önüne geçmiş olunur.

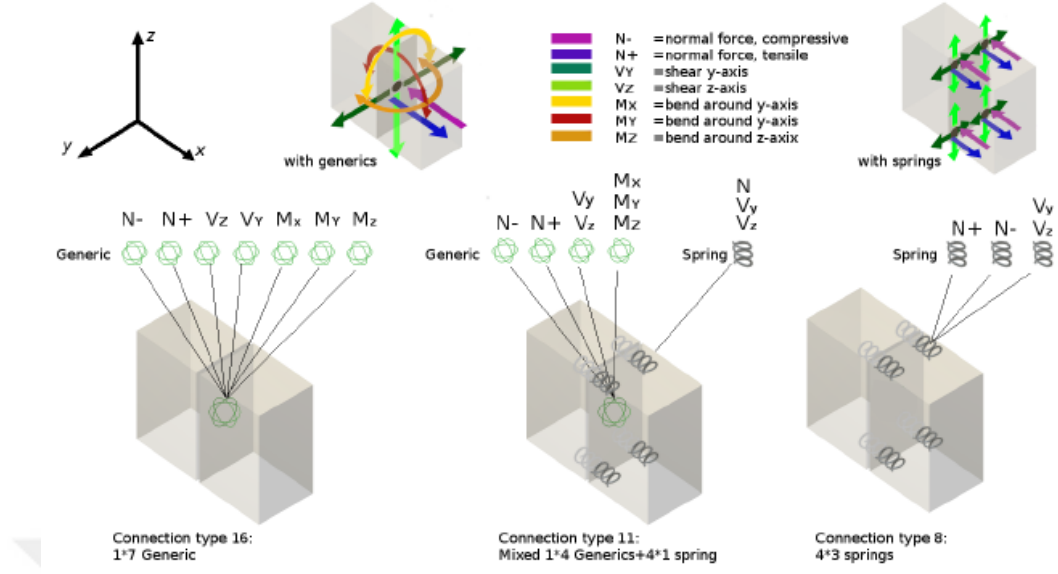
Modelleme yapılırken iki rijit cisim arasında otomatik bir bağ oluşturulur ve malzeme özelliklerine bağlı olarak bir kırılma eşiği değeri ortaya çıkar. Sisteme verilen dinamik yükün yapıda meydana getireceği kuvvet veya momentler, sistem tarafından oluşturulan eşik değerine ulaştığında bu bağ devre dışı kalır ve yükün türü ve yönüne göre kırılmalar veya kopmalar başlar.

Şekil 4, basit bir beton elemanın çoklu sınırlandırmalara olan ihtiyacını göstermektedir. Beton basınç gerilmelerine karşı yüksek, çekme dayanımına karşı daha düşük bir dayanıma sahiptir. Bu yüzden çekme dayanımı için kırılma eşiğine kadar olan yüklemde birden fazla sınırlandırmaya gerek yokmuş gibi görülebilir. Ancak basınç dayanımı da göz önünde bulundurulduğunda her bir bağlantı için birden fazla sınırlandırma gerekmektedir.



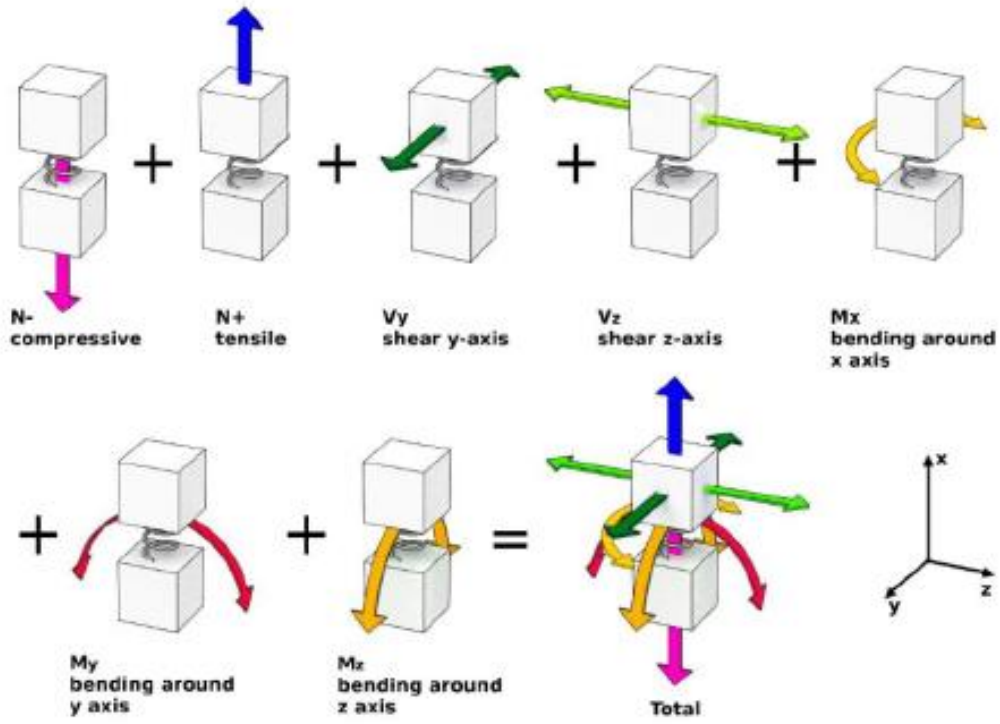
Şekil 4. Beton eleman için farklı sınırlandırmaların gösterimi

Bullet Constraints Builder eklentisine tanıtılmış toplam 23 farklı bağlantı tipi vardır. Bunların içinde basit bağlantılardan yay bağlantılarına kadar birçok farklı kombinasyon bulunmaktadır (Walter & Kostack, 2024). Şekil 5'te bunlardan bazıları gösterilmiştir.



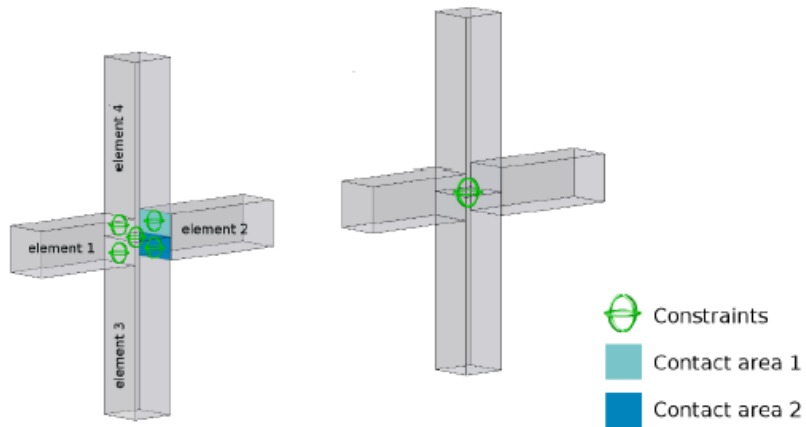
Şekil 5. BCB eklentisinde bulunan farklı bağlantı tiplerinden üçünün gösterimi

Eklentinin çalışma prensibi Şekil 6’da örnek bir bağlantı tipinde gösterilmiştir. Bu bağlantı tipinde sistem bir serbestlik derecesini sınırlandırmaya izin verir ve geri kalan serbestlik derecelerini sınırlandırmaz. Daha sonra sınırlandırılan serbestlik derecesi hesaplanan bir kırılma eşiği değerine tanımlanmaktadır. Program bunu tüm serbestlik dereceleri için ayrı ayrı gerçekleştirilir ve simülasyon süresince bu eşiklerden herhangi biri aşıldığında sistem, hesaplanan tüm diğer eşikleri kaldırmaktadır. Yapının ilk kırılması da bu eşiğe göre belirlenmektedir.



Şekil 6. BCB eklentisinde bulunan bağlantı tipi 16'nın sınırlandırma türleri

Bullet Constraints Builder, sınırlandırmaları iki komşu rijit gövdenin birleşim bölgelerinin merkezine yerleştirmektedir. Her iki ayrı eleman için ayrı yerleştirilen bu sınırlandırmalar BCB tarafından otomatik olarak tek bir sınırlandırma olarak hesaplanmakta ve modele atanmaktadır. Şekil 7'de farklı katı modellerin temas yüzeylerinin doğru bir şekilde bir araya getirildiğinde oluşturulan sınırlandırma görülmektedir.

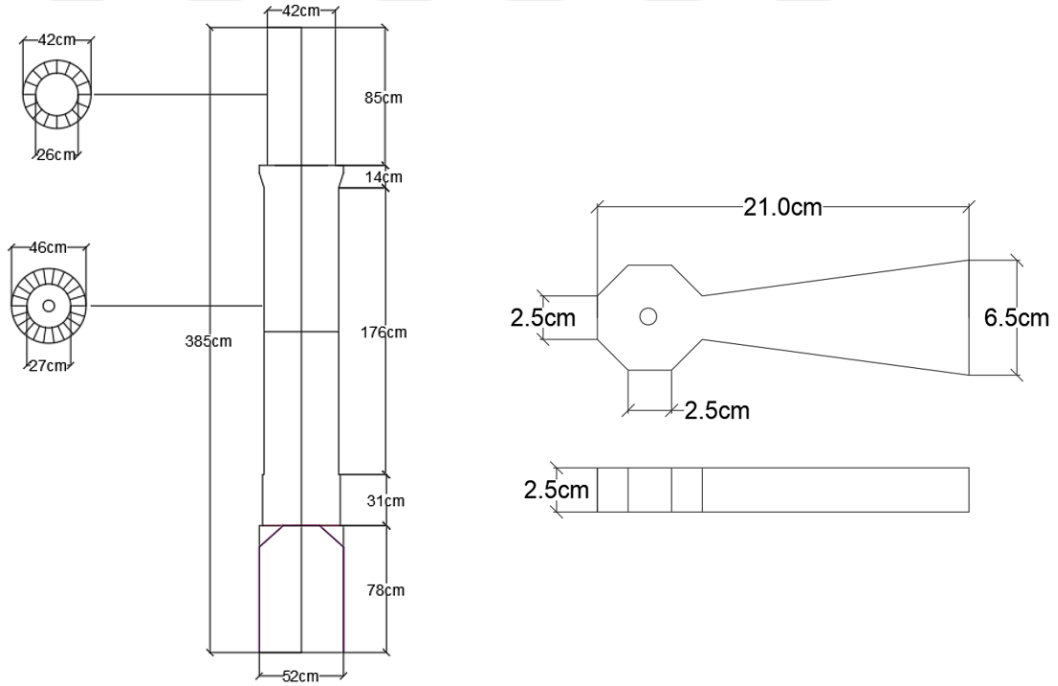


Şekil 7. BCB eklentisi rijit gövdelerin temas alanları ve sınırlandırma bölgesi

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

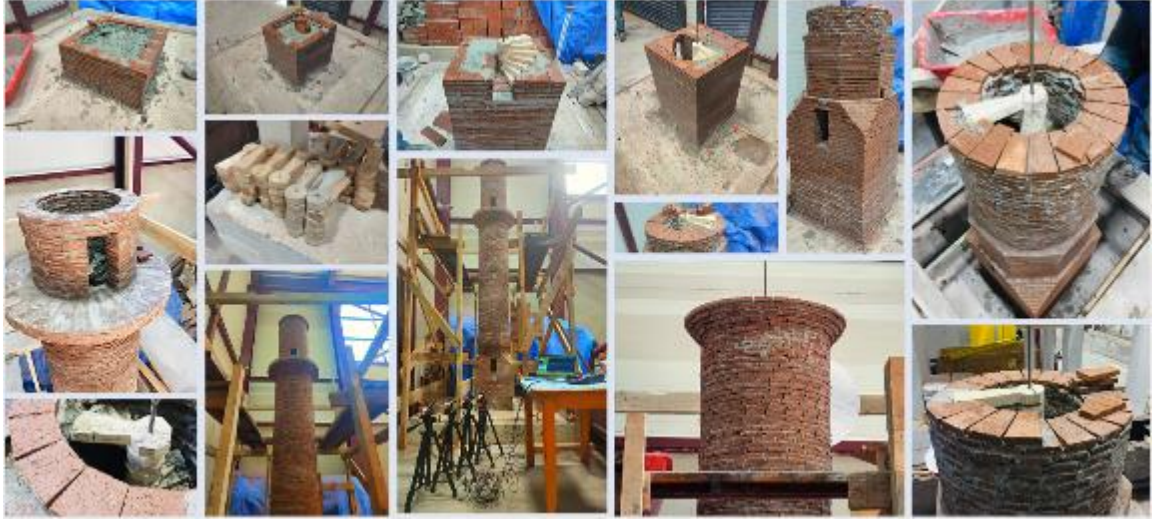
2.1. Minyatür Minare Modeli

Tübitak 1001 projesi kapsamında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Deprem ve Yapı Sağlığı Laboratuvarı ortamında ölçekli bir minyatür minare modeli inşa edilmiştir. Minare modelinin ölçüleri AutoCAD® ortamında belirlenmiş ve Şekil 8’de gösterilmiştir. Ölçüleri 21.5x6.5 cm olan ve 1.5 cm kalınlığındaki klinker tuğla minarenin yapımında kullanılmıştır. Tuğlalar minarenin bölümlerine göre farklı şekillerde kesilerek kullanılmıştır.



Şekil 8. Minyatür minare modeli; AutoCAD® çizimi ve ölçülendirmeleri

Şekil 8’de ölçüleri görülen, kürsü kısmında bulunan kapı hizasından başlayıp şerefe çıkışına kadar uzanan merdiven ahşap basamaklardan oluşmaktadır. Bu basamaklar minarenin tuğla kısımlarına sabitlenerek yerleştirilmiştir. Basamaklar merkezden matkap yardımıyla delinmiştir ve minareye yerleştirilen demir parçasına geçirilmiştir. Her bir basamağın yüksekliği 2.5 cm olmakla beraber toplamda 94 adet ahşap basamak kullanılmıştır. Minyatür minare modeline ait görüntüler Şekil 9’da gösterilmektedir.

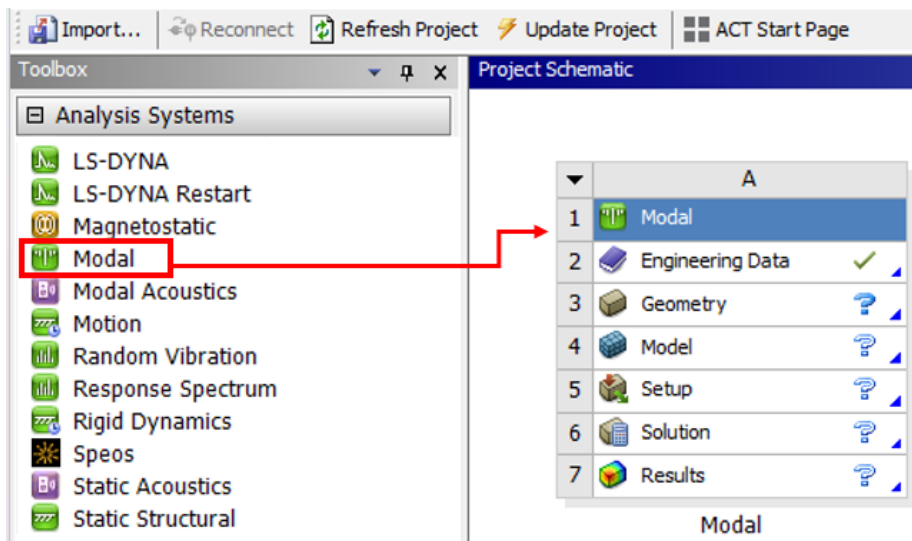


Şekil 9. Minyatür minare modelinin yapım aşamaları ve son haline ait görüntüler

2.1.1. Minyatür Minare Modeli Sonlu Eleman Modeli

ANSYS®, mühendisliğin birçok dalında çeşitli analizlerin yapılmasını mümkün kılan ve ANSYS Inc. tarafından geliştirilen bir mühendislik programıdır (ANSYS, 2013). ANSYS® Workbench yazılımı sayesinde sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmektedir.

Workbench arayüzünden Şekil 10'da görüldüğü gibi modal analiz sekmesi seçilmiş ve akabinde Şekil 11'de görülen menüden malzeme özellikleri girilerek yeni bir malzeme listesi oluşturulmuştur.



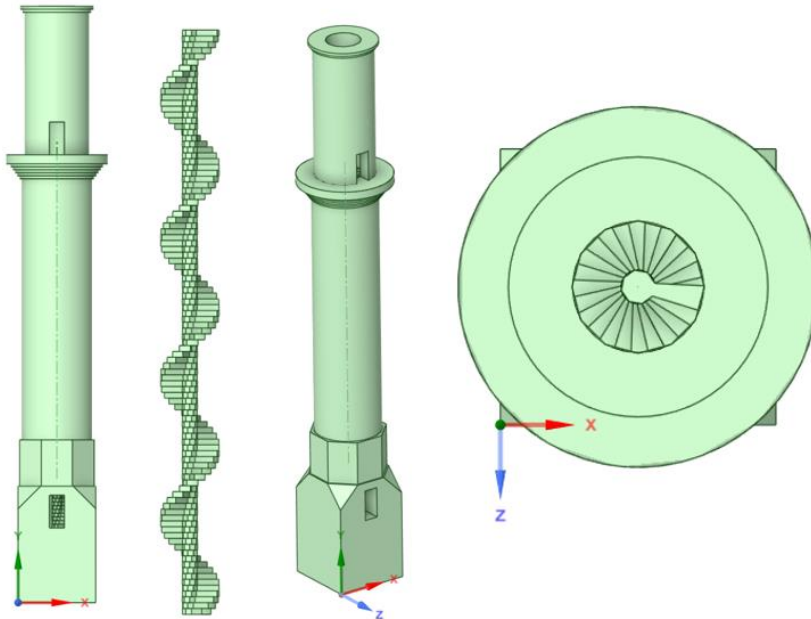
Şekil 10. ANSYS® Workbench arayüzü; analiz türü seçimi

Outline of Schematic A2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data			Source
2	Material			Description
3	Geçiş		General_Materials.xml	
4	Gövde		General_Materials.xml	
5	Kürsü		General_Materials.xml	
6	Ahşap Basamak		Fluid_Materials.xml	

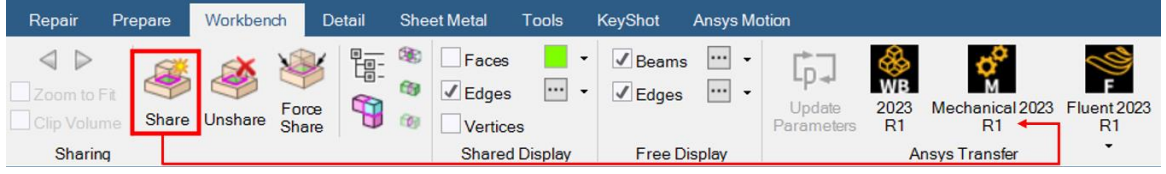
Properties of Outline Row 4: Gövde				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2,396	g cm ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
8	Young's Modulus	4,9E+09	Pa	
9	Poisson's Ratio	0,25		
10	Bulk Modulus	3,2667E+09	Pa	
11	Shear Modulus	1,96E+09	Pa	

Şekil 11. ANSYS® Workbench malzeme seçim menüsü

Malzeme listesi tamamlandıktan sonra ANSYS® Workbench yazılımı olan SpaceClaim yazılımında minyatür minare modelinin geometrisi oluşturulmuştur. Model geometrisi kürsü kısmından başlamak üzere geçiş gövde ve petek bölgesi olarak adlandırılan üst gövde olarak oluşturulmuştur. Daha sonra ölçüleri bilinen ahşap basamaklar modellenmiş ve uygun şekilde modele yerleştirilmiştir. Tamamlanan katı model Şekil 12’de gösterilmektedir. Model, analiz adımına geçmek için Şekil 13’de gösterilen araç çubuğundaki sekme yardımıyla ANSYS® Mechanical yazılımına aktarılmıştır.

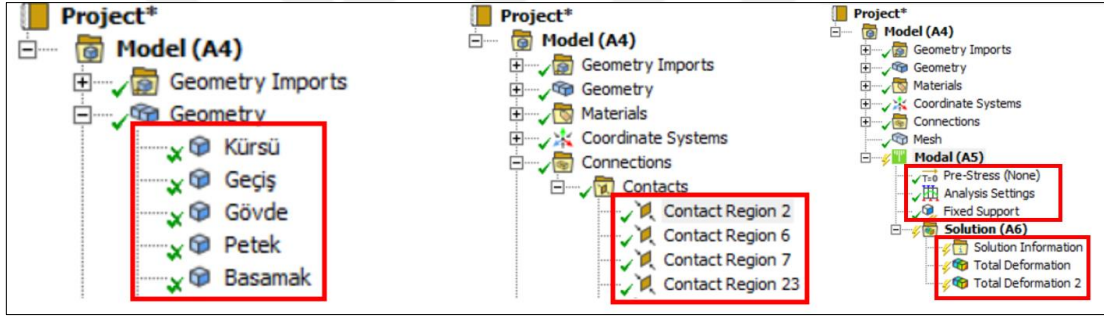


Şekil 12. Minyatür minare modeli ANSYS® SpaceClaim çizimleri



Şekil 13. ANSYS® SpaceClaim araç çubuğu; model geometrisinin ANSYS® Mechanical kısmına aktarımı

Model, ANSYS® Mechanical yazılımına aktarıldıktan sonra Şekil 14’de gösterilen menülerden malzeme atamaları yapılmıştır. Aynı şekilde görülen sekmelerden modelin mesh ağıyla ilgili bilgiler görülebilmektedir. Sonlu eleman modelinin bileşenleri arasında otomatik olarak oluşturulan bağlantılar da “Connections” sekmesinin altında verilmektedir. “Modal analiz” sekmesinde ise analiz ayarları ve modele atanan mesnetler gösterilmektedir. Gerçekleştirilen analiz sonucunda istenen mod şekilleri “Solution” menüsünden eklenebilir.



Şekil 14. ANSYS® Mechanical proje alt menüsü; minyatür minare sonlu eleman model ve analiz içerikleri

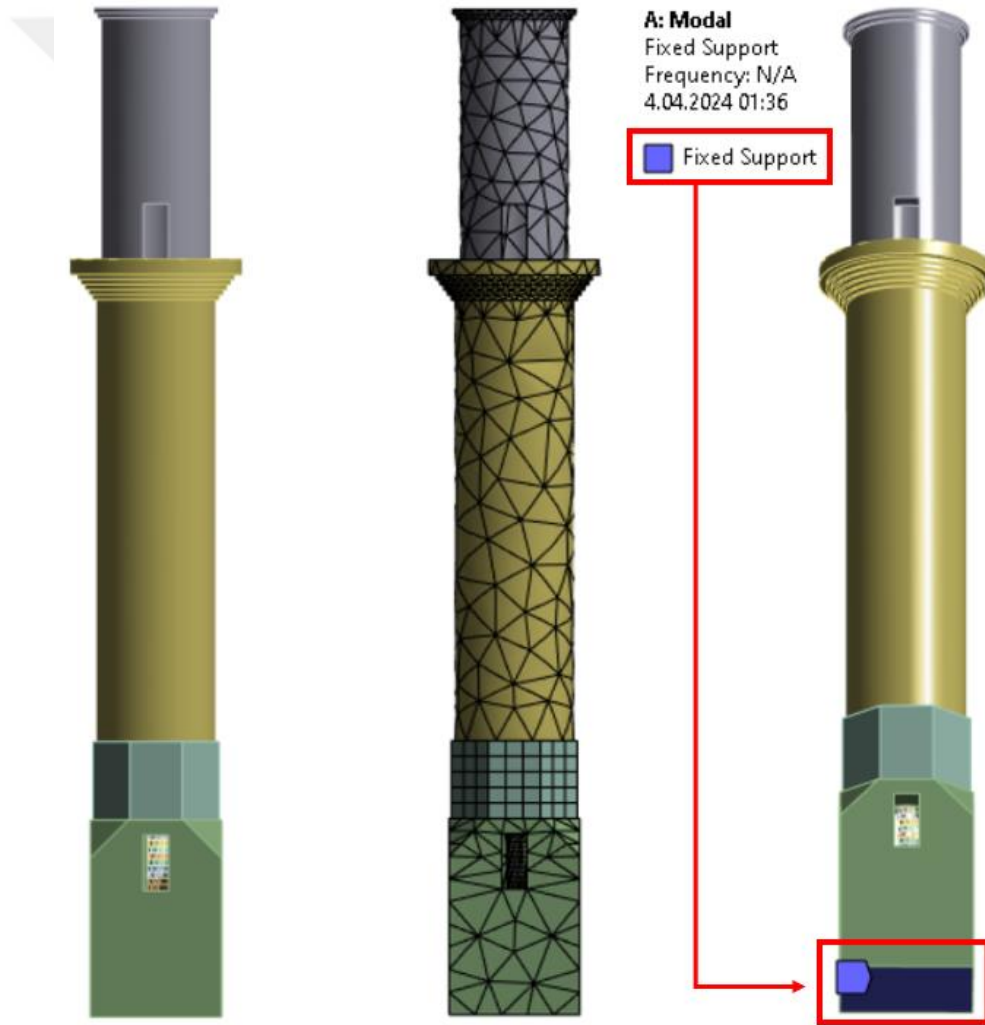
2.1.2. Minyatür Minare Modeli Modal Analizi

Analiz koşturulmadan önce basamaklar ve dört ana kısımdan oluşan sonlu eleman modeline Tablo 2’de verilen malzeme özellikleri tanımlanmıştır.

Şekil 15’te sonlu eleman modelinin mesh ağı ve modele atanan ankastre mesnetin konumu gösterilmektedir. Mod sayısı, analiz ayarları sekmesinden ayarlanmaktadır. Bu modelde ilk iki mod hesaplanmıştır.

Tablo 2. Minyatür minare ANSYS® sonlu eleman modeli; malzeme özellikleri

Minare Bölümleri	Young Modülü (GPa)	Yoğunluk (g/cm ³)	Poisson Oranı
Kürsü	8.03	2.651	0.25
Geçiş	1.97	2.302	0.25
Gövde	2.90	2.396	0.25
Petek	2.90	2.396	0.25
Ahşap Basamak	6.00	0.600	0.33



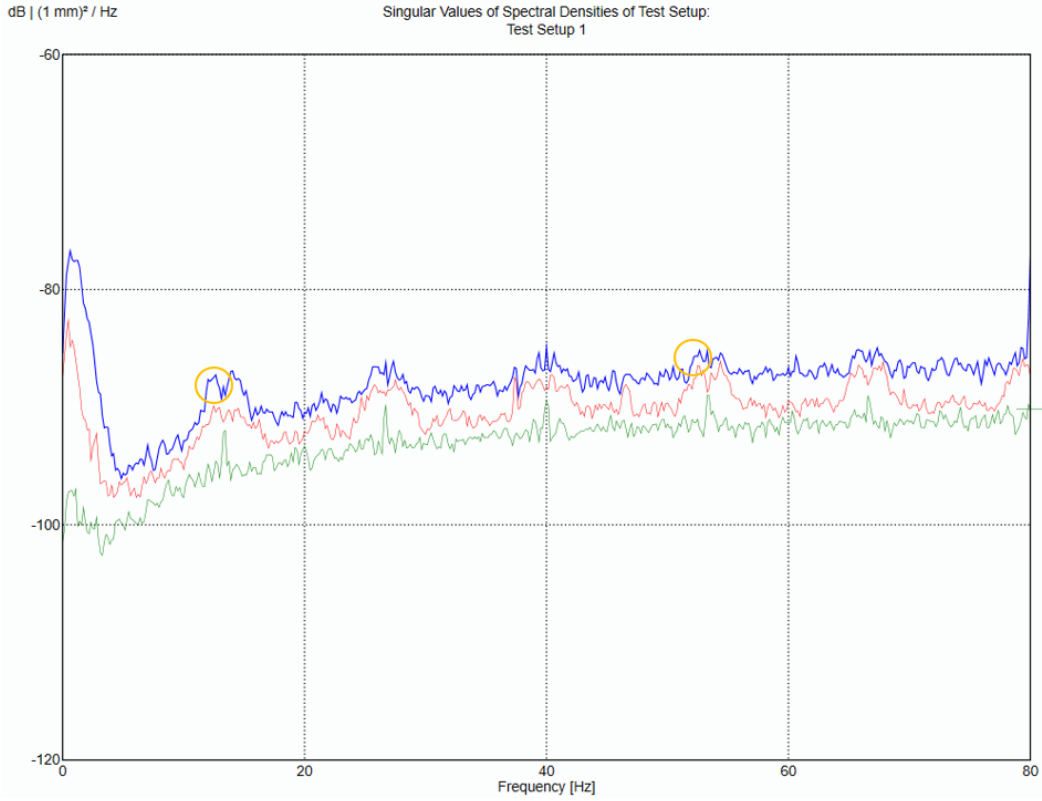
Şekil 15. Minyatür minare ANSYS® sonlu eleman modeli; mesh ağı ve ankastre mesnetlerin gösterimi

Tüm ayarlar sonrasında analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen frekansların mod şekilleri oluşturulmuş ve bu mod şekilleri “Solution” sekmesinin altında gösterilmiştir.

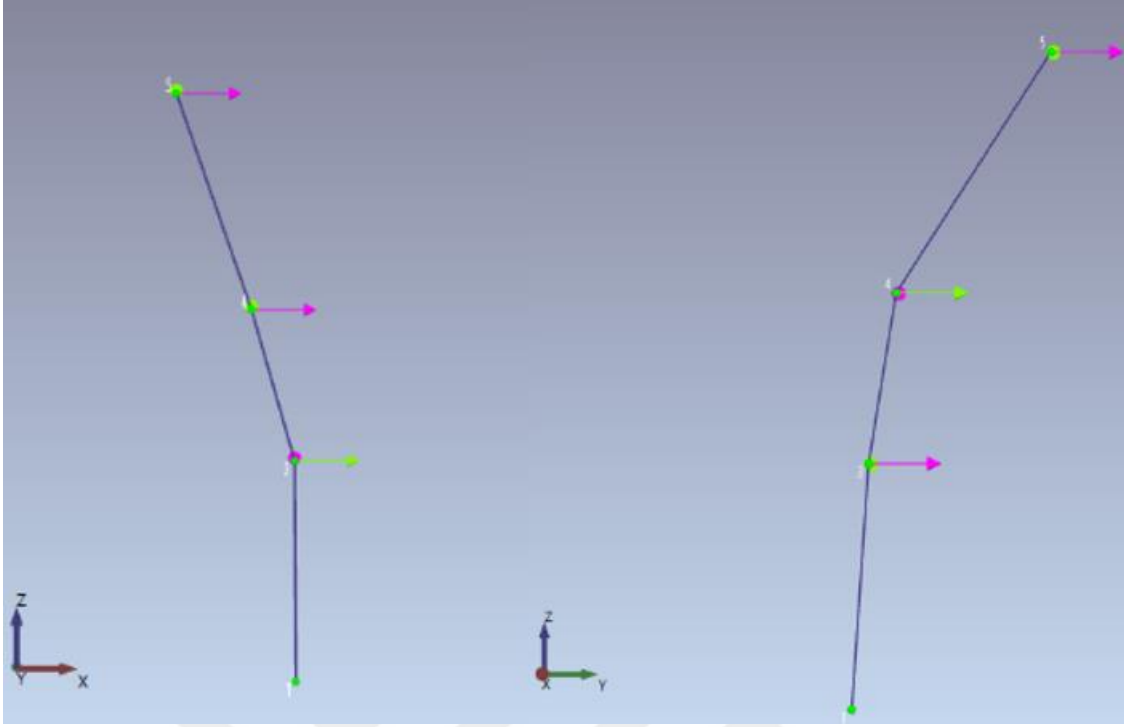
Minare modeli üzerinde toplam altı adet ivmeölçer kullanılmış ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. ARTeMIS® yazılımında, ivmeölçerlerden alınan veriler işlenerek frekanslar elde edilmiştir (SVS, 2011). Üç farklı yükseklikten birbirine dik iki doğrultuda alınan ivme ölçümlerine ait görüntüler Şekil 16’da gösterilmektedir. Şekil 17’de ARTeMIS®’te gerçekleştirilen analiz sonuçları ve Şekil 18’de ilk iki mod şekli görülmektedir.



Şekil 16. İvmeölçer sensörlerinin minyatür minare modeli üzerindeki yerleşimi



Şekil 17. İvmeölçer verileriyle oluşturulmuş ARTeMIS® ortamında GFTAA yöntemine dayalı analiz sonuçları



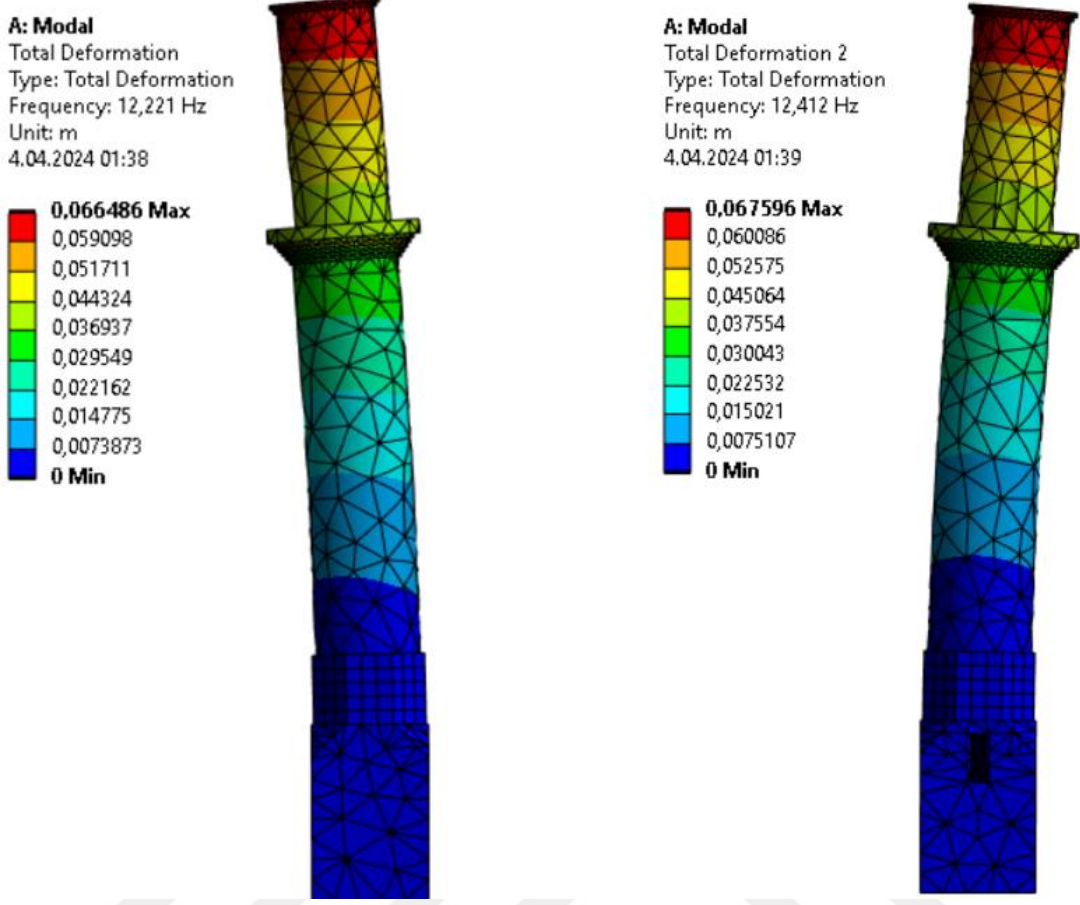
Şekil 18. İvmeölçer verileriyle elde edilen ilk iki mod şekli

İvmeölçerler ve sonlu eleman modeli ile elde edilen frekans değerleri Tablo 3'te verilmiştir. İki farklı yöntemle elde edilen sonuçlar arasındaki farkın %5 oranının altında ve kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür.

Tablo 3. GFTAA yöntemine dayalı ivmeölçer verileriyle ve ANSYS® modal analiz sonucu elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması

Mod	İvmeölçer Frekans; GFTAA (Hz)	Frekans; ANSYS® (Hz)	Fark (%)
1	12.275	12.221	0.45
2	12.744	12.412	2.67
3	48.350	50.652	4.76
4	51.782	54.125	4.52

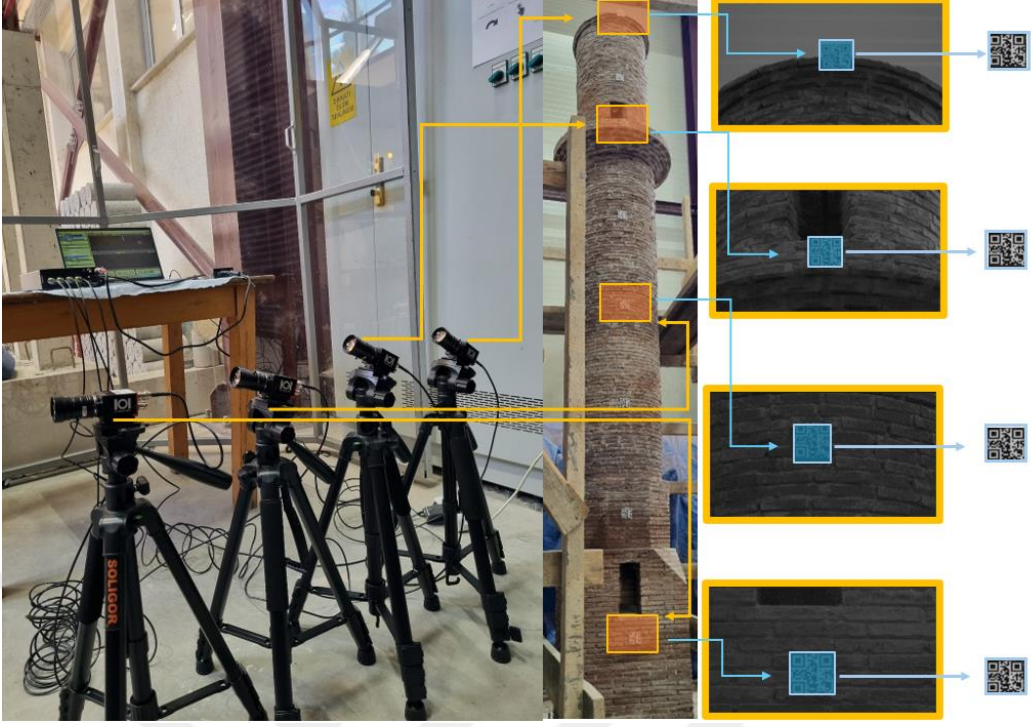
Modal analiz sonucunda elde edilen ilk iki frekansa ait mod şekilleri Şekil 19'da verilmiştir. Gösterilen ilk iki mod şekli birbirlerine dik doğrultudadırlar.



Şekil 19. ANSYS® sonlu eleman modeli modal analiz sonucu minyatür minare modelinin ilk 2 mod şekli

2.2. Video Kamera Tabanlı İzleme Sistemi: Minyatür Minare Modeli

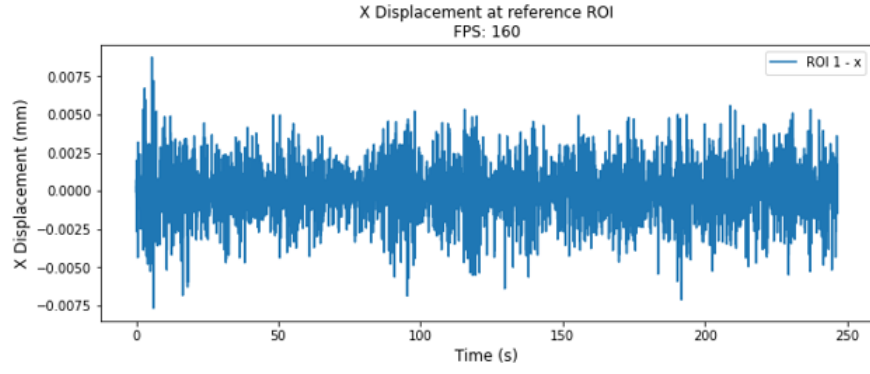
Yüksek hızlı endüstriyel kameralar kullanılarak oluşturulan sistem, laboratuvar ortamında oluşturulan minyatür minare modeli üzerinde ölçümler yapmak üzere minareye ortalama 4.5 metre mesafeye konumlandırılmıştır. Kapalı ortamda inşa edilmesi sebebiyle çevresel koşullardan minimum seviyede etkilenen minare modeli ölçümleri sırasında, kamera ölçümlerinde yüksek seviyede önem arz eden parlaklık koşulu sabit tutulmaya çalışılmıştır. Her bir kamera arasında 25 cm mesafe vardır. Şekil 20’de kameraların yerleşimi ve minyatür minare modeli üzerindeki şablonların konumlandırılması gösterilmektedir. İvmeölçerlerin yerleştirildiği kotlara konumlandırılan şablonlardan kameralarla video kayıtları alınmıştır. Gri tonlamalı olarak alınan bu kayıtlar CoreView isimli yazılımda işlem görerek görüntü işlenmesi için hazır hale getirilmiştir.



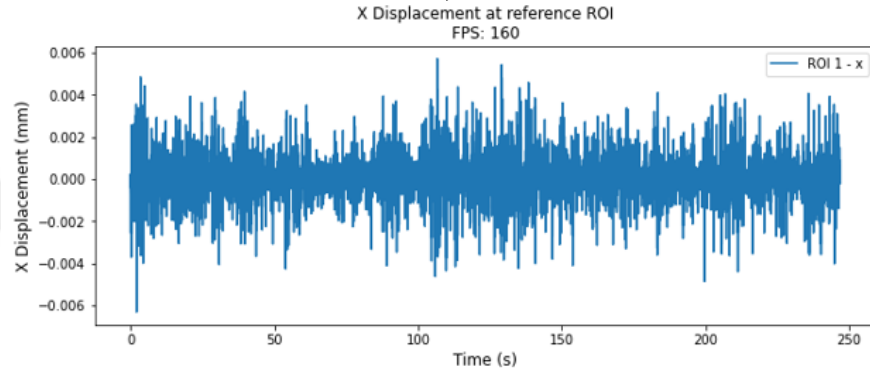
Şekil 20. Video kamera tabanlı izleme sistemi; minyatür minare modeli için saha yerleşimi ve şablon düzeni

Şekil 20’de gösterilen dört kameranın daha uzak mesafedeki ikisi daha yüksek çözünürlükte kayıt alabilmektedir. Kayıt cihazının yazılım kurulumundan kaynaklanan aşırı yüksek hafızı kullanımı problemiyle karşılaşmamak için tüm kameraların çözünürlük değerleri 1456x800 olarak eşit seviyelere getirilmiş ve bu ölçüm özelinde saniye başına alınan kare sayıları yani FPS değerleri 160 olarak ayarlanmıştır. Aynı anda kayıt alan kamera sayısı arttıkça bu değerlerin de orantılı bir şekilde düşürülmesi gerekmektedir.

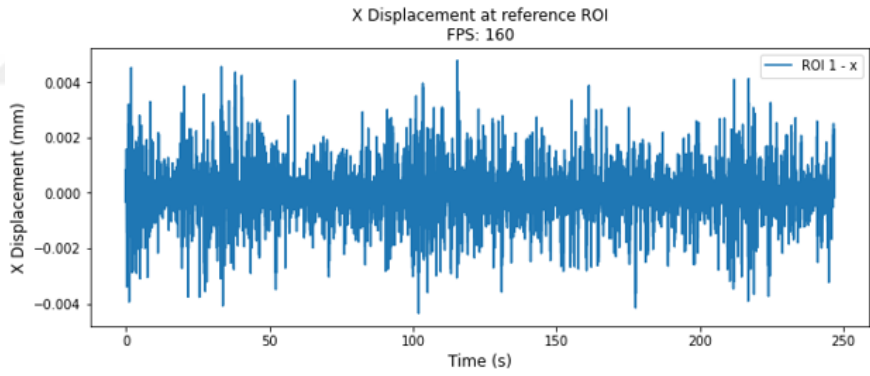
Minyatür minare modeli üzerine yerleştirilen dört farklı seviyedeki karekod şablonlar hedeflenerek video kayıtları alınmıştır. Bu video kayıtları Optik Akış algoritmasına dayanan bir Python kodunda işlenerek her bir video kaydından minyatür minare modelinin yer değiştirme verileri elde edilmiştir. Karekod şablonların hedef alındığı görüntülerden yatay ve düşey yer değiştirme değerleri tespit edilebilmektedir. Her biri dört dakika olarak kaydedilen görüntülerden elde edilen yer değiştirme grafiklerinin yatay bileşeni olan X doğrultusu Şekil 21’de, düşey bileşen olan Y doğrultusunun grafikleri ise Şekil 22’de verilmektedir. Bu yer değiştirme grafiklerine ait txt dosyaları ayrıca elde edilmiştir. ARTeMIS® yazılımında yapılacak olan modal analiz için bu txt dosyaları gereklidir. Modal analiz sonucu programda çizilen minyatür minare modeline ait çizimden mod şekilleri elde edilmiş ve frekans değerleri bulunmuştur.



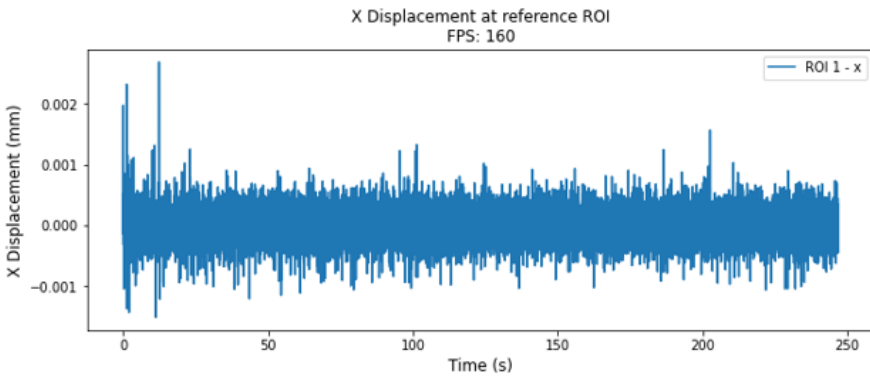
a)



b)

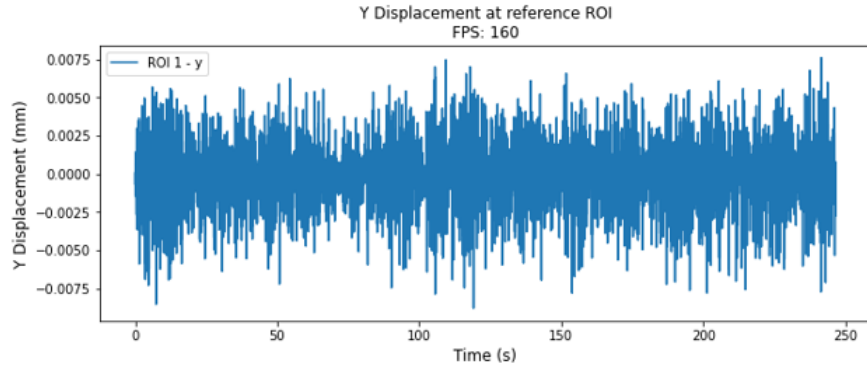


c)

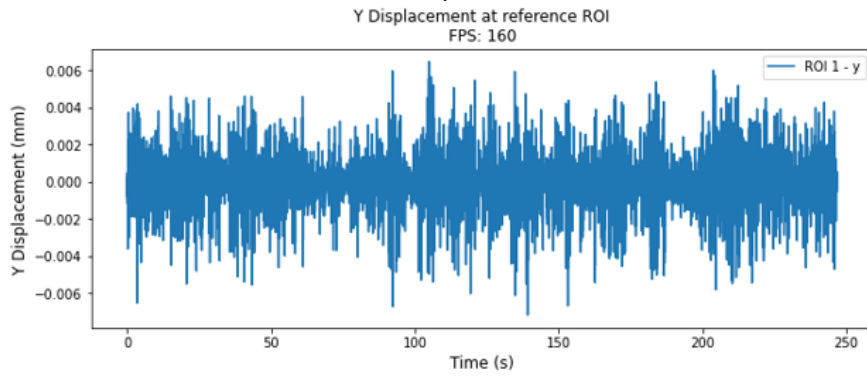


d)

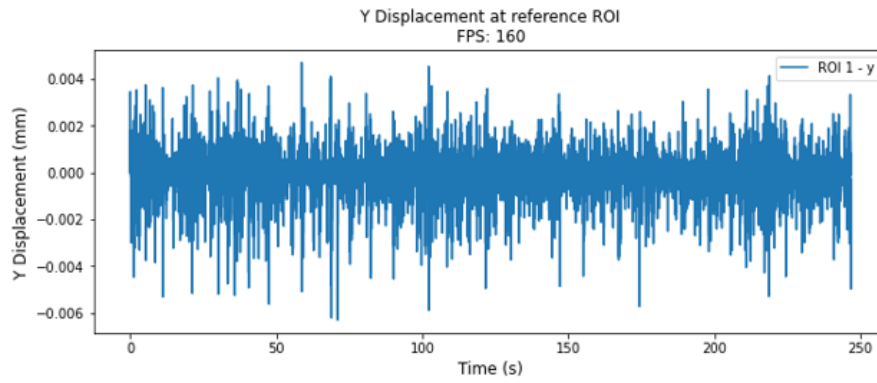
Şekil 21. Video kamera tabanlı elde edilen X doğrultusundaki zamana bağlı yer değiştirme değerleri a) 1. kamera b) 2. kamera c) 3. kamera d) 4. kamera



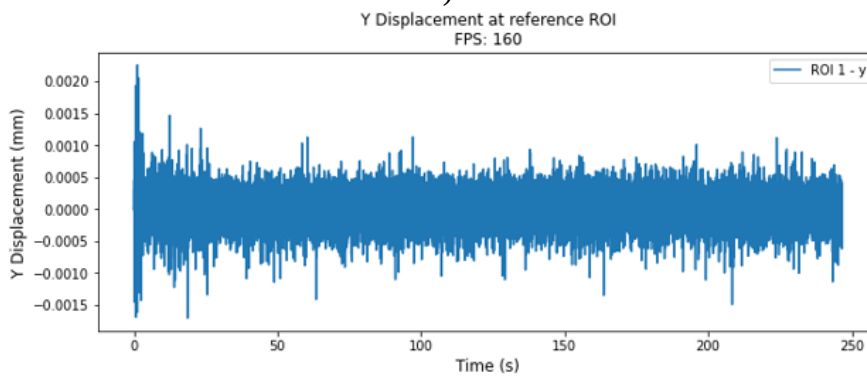
a)



b)



c)



d)

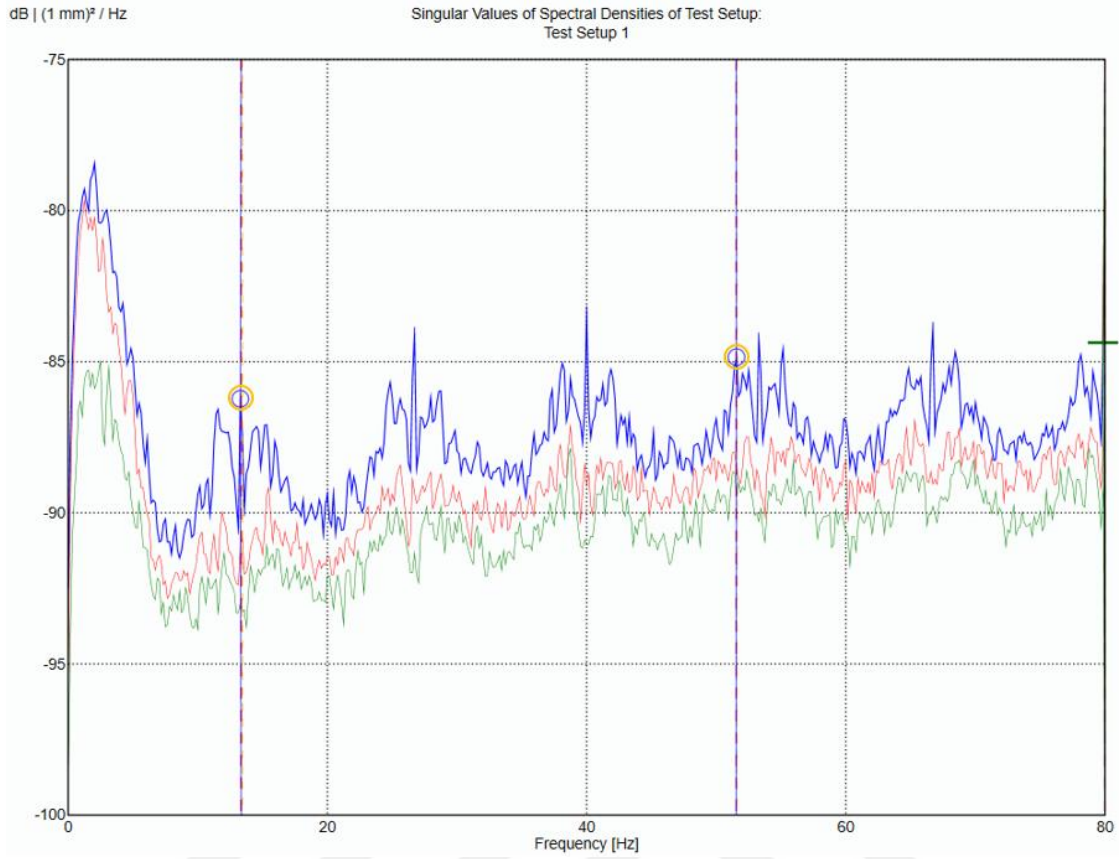
Şekil 22. Video kamera tabanlı elde edilen Y doğrultusundaki zamana bağlı yer değiştirme değerleri a) 1. kamera b) 2. kamera c) 3. kamera d) 4. kamera

ARTEMIS® yazılımında öncelikle karekod şablonların yerleşim kotları baz alınarak çizgisel bir model oluşturulmuştur. Bu kotlarda belirlenen noktalara noktasal atamalar yapılmıştır. Her bir noktaya da Python ortamında elde edilen yer değiştirme verileri yüklenmiştir. Daha sonra video kayıtlarının FPS değerlerine göre frekans aralığı seçilmiştir. Bu çalışmada, 0-80 Hz aralığı seçilmiştir. GFTAA analizi yapıldıktan sonra frekans değerleri elde edilmiş ve Tablo 4'te verilmiştir.

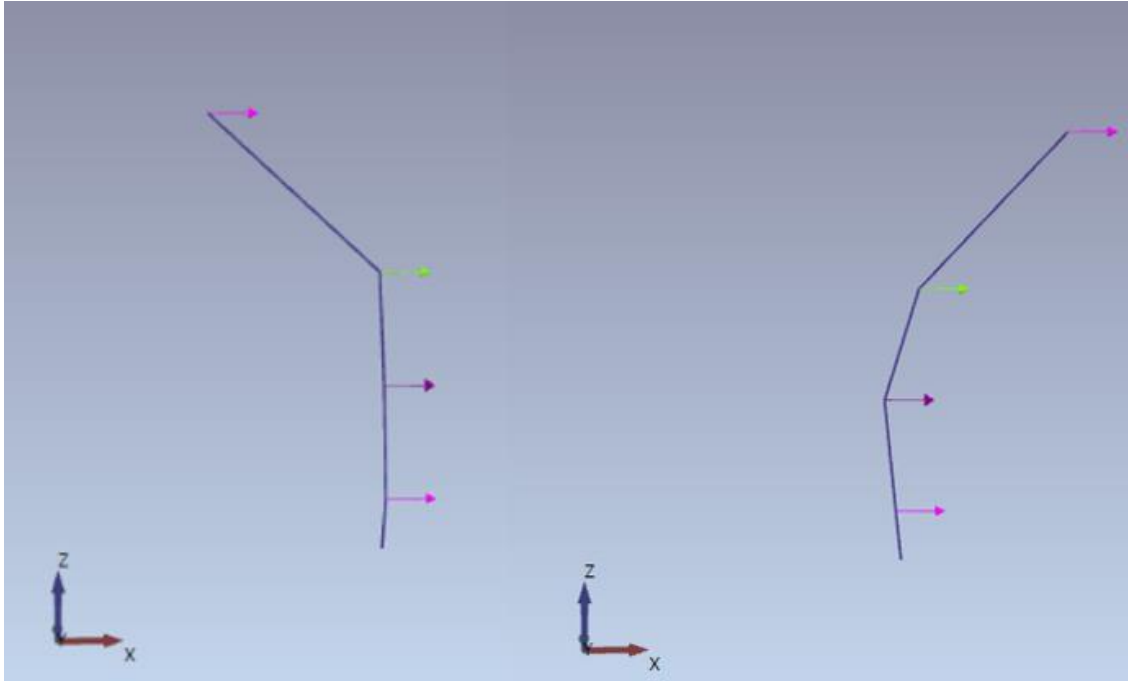
Tablo 4. İvmeölçer verileri ve video kamera tabanlı izleme sistemi yer değiştirme verileri doğrultusunda ARTEMIS® analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Mod	Frekans: İvmeölçer (Hz)	Frekans: Video kamera (Hz)	Fark (%)
1	12.275	12.564	2.35
2	12.744	-	-
3	48.350	-	-
4	51.782	52.655	1.68

İki doğrultuda kayıt alan ivmeölçer ve üç boyutlu ortamda analizi gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinde yapının birbirine dik doğrultuda olan mod şekilleri görülebilmektedir. Kamera sistemiyle alınan görüntüler tek bir düzlemde alınmıştır. Dolayısıyla görüntülerden elde edilen yer değiştirme verileriyle yapılan analiz sonuçlarında 1. moda dik doğrultuda olan 2. ve 3. mod şekli bulunamamaktadır. Yapılan modal analizler sonucunda Tablo 4'te frekans değerleri verilen minyatür minare modelinin ARTEMIS® ortamında gerçekleştirilen analize ait grafik Şekil 23'te verilmiştir. Minareye modeline ait mod şekilleri ise Şekil 24'te verilmiştir.



Şekil 23. Minyatür minare modeli için video kamera tabanlı izleme sistemi ile elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonu



Şekil 24. Minyatür minare modeli için video kamera tabanlı izleme sistemi ile elde edilen 1. ve 2. mod şekli

2.3. Fatih Büyük Cami

2.3.1. Fatih Büyük Cami Hakkında Bilgiler

Trabzon ili, Ortahisar ilçesinde bulunan Fatih Büyük Cami kesin tarihi bilinmese de tahminen 914 yılında kilise olarak inşa ettirilmiştir ve dönüştürülmeden önce şehrin en büyük kilisesidir. 1461 yılında Trabzon'un fethinden sonra camiye dönüştürülmüştür. İlk kapsamlı onarımını 1877 yılında görmüştür (Özen vd., 2010). Yapının kuzeyinde yer alan camii minaresinde kullanılan malzeme kesme taş ve harçtır (Çalık, 2017). Çokgen kaideli, yığma taş külahlı ve silindirik gövdeli olarak inşa edilen minare 35,78 metre yüksekliğe sahiptir. Gösterilen taş işçiliği üst seviyededir. Yapı Vakıflar Bölge Müdürlüğü tarafından 2015-2017 arasında kapsamlı bir restorasyon geçirmiştir (Çalık vd., 2017). Yapının restorasyondan önceki ve son hali Şekil 25'te görülmektedir.



a)



b)

Şekil 25. Fatih Büyük Cami a) restorasyon öncesi ve b) restorasyon sonrası görüntüsü

Trabzon Vakıflar Bölge Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilen restorasyon çalışması kapsamında caminin AutoCAD® ortamında detaylı bir projesi hazırlanmıştır. Minarenin her bir kısmının kot değerleri Şekil 26'da görüldüğü gibi 1/50 ölçekli projede verilmektedir. Aynı zamanda kullanılan taş blokların yaklaşık yükseklikleri de projeden görülebilmektedir.



Şekil 26. Fatih Büyük Camii Kuzey Cephesi 1/50 ölçekli AutoCAD® çizimi

Çalışmanın odak noktası minare olduğu için bu kısmın her bir detayı analizler için önem arz etmektedir. Kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin yanı sıra minarede kullanılan taş basamakların ölçüleri, sayısı ve yerleştirilme düzenleri de göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 27’de, minarenin basamaklarının geometrisi ve sayıları net bir şekilde görülmektedir. Sonlu eleman modelinde de kullanılan bu ölçüler Blender®’da oluşturulan üç boyutlu modele de referans olarak alınmıştır.

Toplam basamak sayısı 95 olarak alınmıştır ve 30 derecelik açılarla üst üste yerleştirilmiştir. Geçiş segmentinin kot yüksekliği 5.0 metredir. Geçiş segmenti ve gövdenin birleştiği noktada bu değer 7.75 metredir. Kesme taştan oluşan bu kısımdan şerefe zeminine geçişte kot değeri 21.66 metredir. 1.1 metre yüksekliğindeki taş korkuluklar şerefeyi çevrelemektedir. Petek kısmı 27.83 metre kotunda sonlanmakta ve yerini tamamen taştan oluşan külaha bırakmaktadır. 6 metreye yüksekliğe ulaşan külah, alemle tamamlanmıştır.

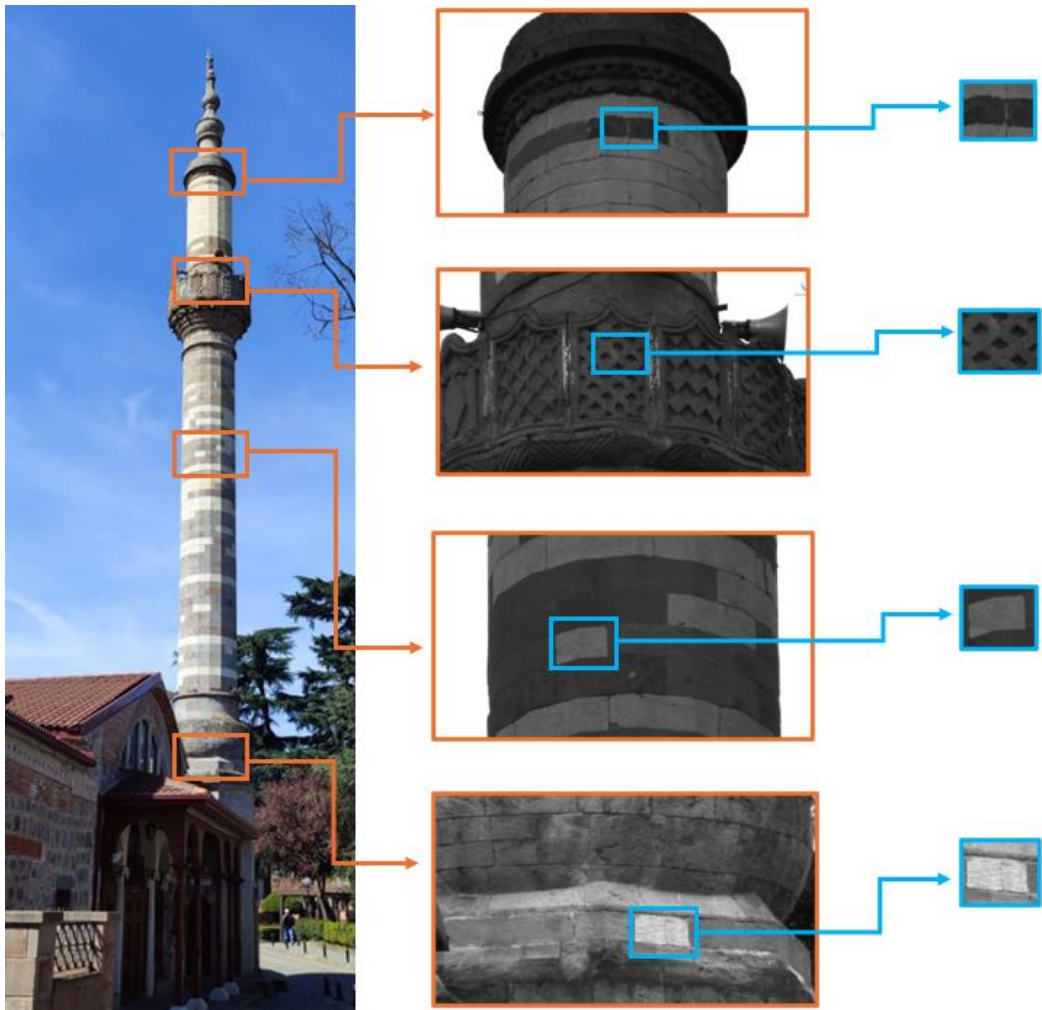


Şekil 28. Fatih Büyük Cami minaresi ölçümü; kamera sistemi konumlandırılması ve ölçüm detayları

Kameralar, kayıt cihazı, bilgisayar ve güç ünitesi arasındaki tüm bağlantılar yapıldıktan sonra sistem çalıştırılmıştır. CoreView uygulamasında tüm kameraların çözünürlük ve FPS değerleri eşit konuma getirilmiştir. Daha sonra minare üzerinde farklı yüksekliklerden dört farklı konum belirlenmiştir. Saha çalışmalarında laboratuvar modeli üzerindeki gibi her zaman şablon kullanılması mümkün olmamıştır. Bu sebeple, minare üzerinde belirgin bir deseni olan taş blok veya havalandırma boşluğu gibi kısımlara odaklanılmıştır. Bu kısımların ölçeklendirilmede kullanılacak olan ölçüleri Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden alınan restorasyon projelerinde ve yerinde yapılan ölçümlerle belirlenmiştir. Tablo 5'te kameraların odaklandığı yükseklikler verilmiştir. Kameraların en uzak mesafeden başlamak üzere birden dörde kadar sıralanmıştır. Minareden alınan görüntüler Şekil 29'da gösterilmiştir.

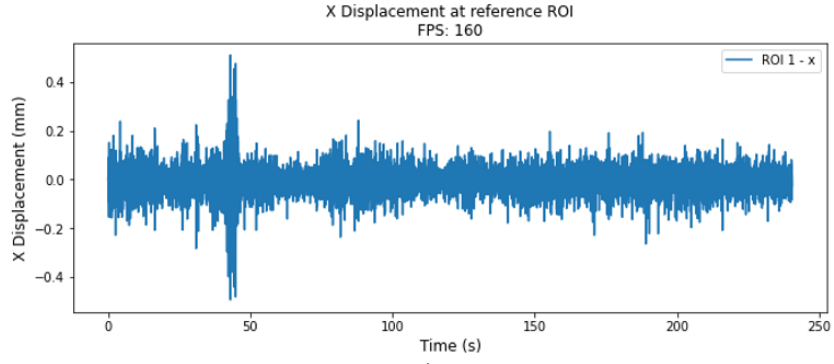
Tablo 5. Kamera odak yükseklikleri

Kameralar	Yükseklikler (m)
Kamera-1	5.5
Kamera-2	17.5
Kamera-3	22.0
Kamera-4	32.5

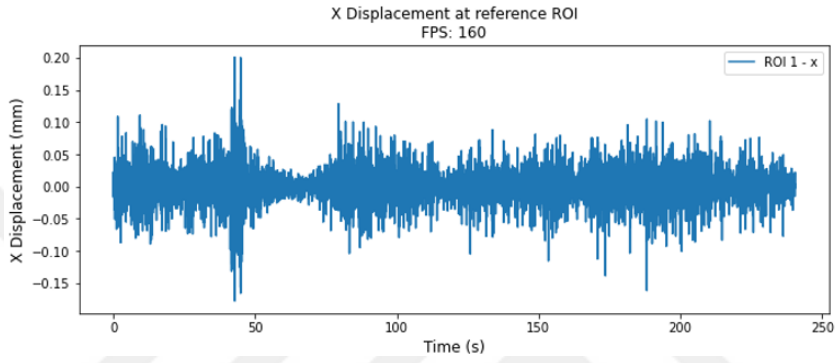


Şekil 29. Fatih Büyük Cami minaresi kamera odak görüntüleri

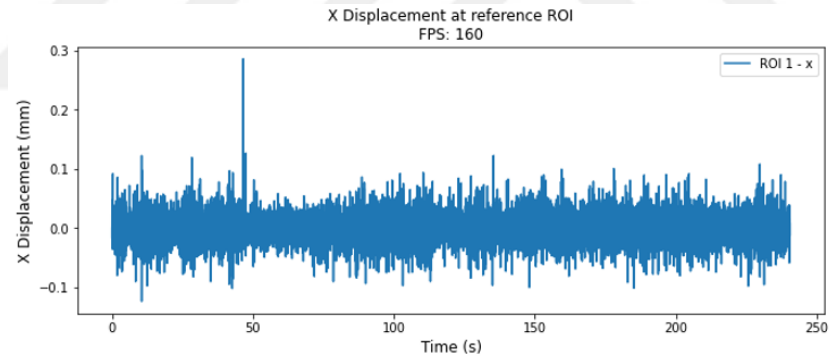
Optik akış algoritmasına dayalı geliştirilen Python kodlaması ile analiz edilen görüntüler sonucunda minarenin hedeflenen noktalarında yer değiştirmeler elde edilmiştir. Yatay doğrultuda (X doğrultusunda) elde edilen yer değiştirme verilerine ait grafikler Şekil 30'da, düşey doğrultuda (Y doğrultusunda) elde edilen yer değiştirme grafikleri Şekil 31'de verilmiştir.



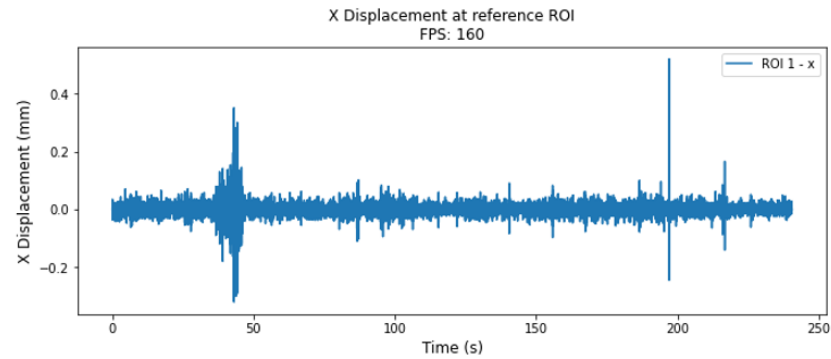
a)



b)

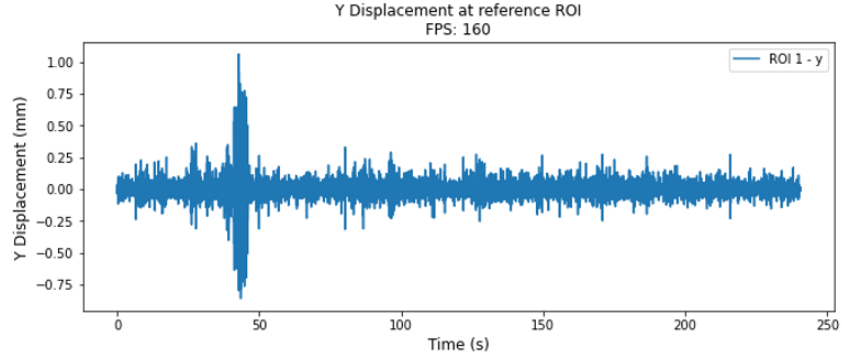


c)

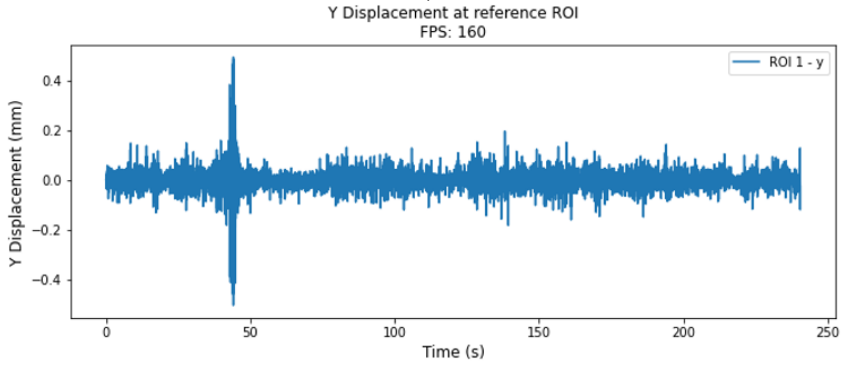


d)

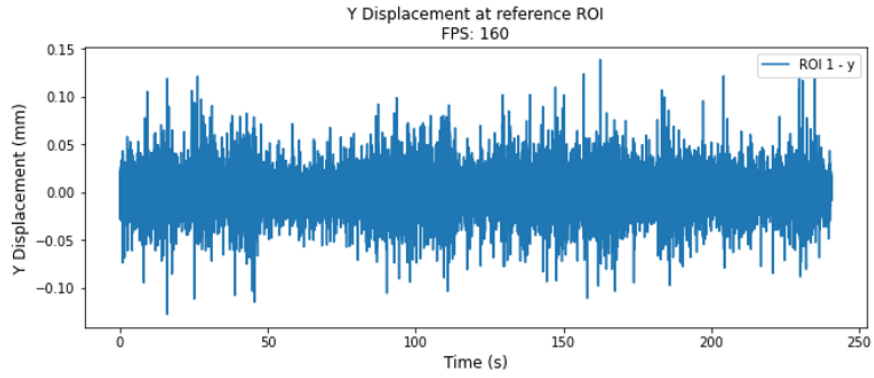
Şekil 30. Fatih Büyük Cami; video kamera tabanlı elde edilen X doğrultusundaki zamana bağlı yer değiştirme değerleri a) 1. kamera b) 2. kamera c) 3. kamera d) 4. kamera



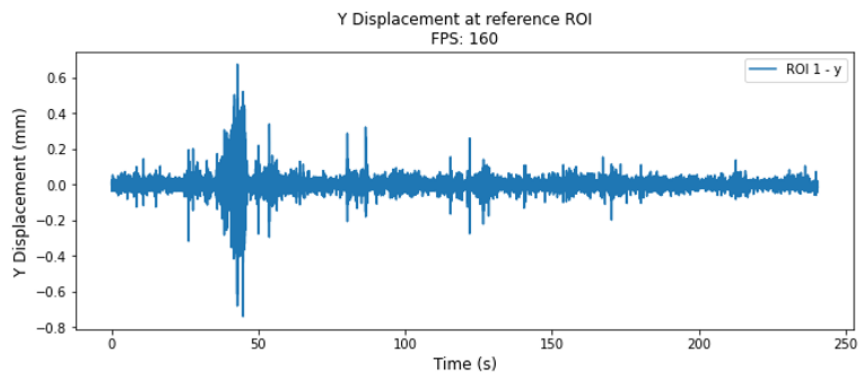
a)



b)



c)



d)

Şekil 31. Fatih Büyük Cami; video kamera tabanlı elde edilen Y doğrultusundaki zamana bağlı yer değiştirme değerleri a) 1. kamera b) 2. Kamera c) 3. Kamera d) 4. kamera

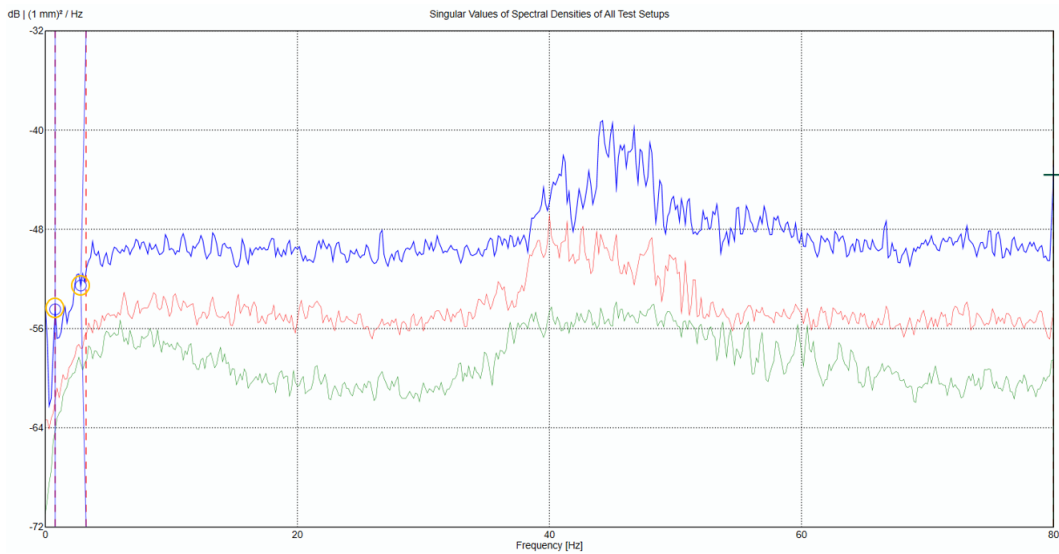
Dörder dakikalık video kayıtlarından ulaşılan bu yer değiştirme değerleri ile txt dosya formatına dönüştürülmüştür. Bu dosyalar frekans ve mod şekillerinin hesap edilmesinde yararlanılan ARTeMIS® kullanılmaktadır.

ARTeMIS® yazılımında Fatih Büyük Cami minaresi çizgisel olarak modellenmiş ve ölçüm alınan noktalar model üzerinde belirlenmiştir. Bu noktalara Python kodundan elde edilen yer değiştirme değerleri txt formatında atanmıştır. Yapılan modal analiz sonucunda elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 32’de, frekans değerleri Tablo 6’da verilmiştir. Frekans değerlerine karşılık gelen mod şekilleri ise Şekil 33’te gösterilmektedir.

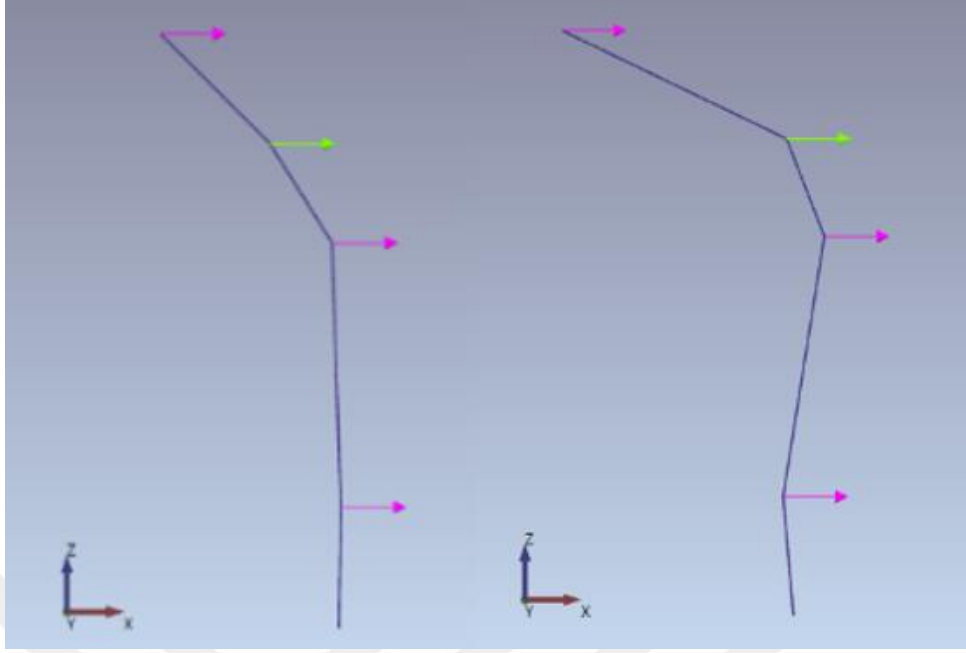
Tablo 6. Fatih Büyük Cami ivmeölçer verileri ve video kamera tabanlı sistem verileri ile GFTAA yöntemine dayalı ARTeMIS® frekans sonuçlarının karşılaştırılması

Mod	Frekans: İvmeölçer (Hz)	Frekans: Video kamera (Hz)	Fark (%)
1	0.738	0.781	5.82
2	0.740	-	-
3	3.207	3.231	0,75

Video görüntüleri yalnızca tek bir düzlemde alındığı ve analizlerde düzleme dik herhangi bir veri kullanılmadığı için 1. moda dik oluşan 0.74 frekans değerine karşılık gelen mod şekli elde edilememiştir.



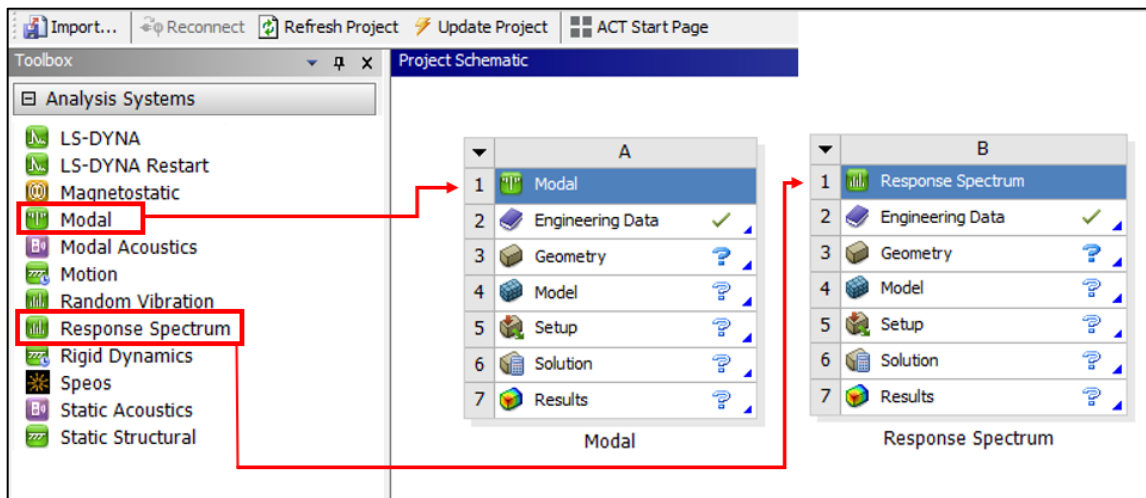
Şekil 32. Fatih Büyük Cami için video kamera tabanlı izleme sistemi ile elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonu



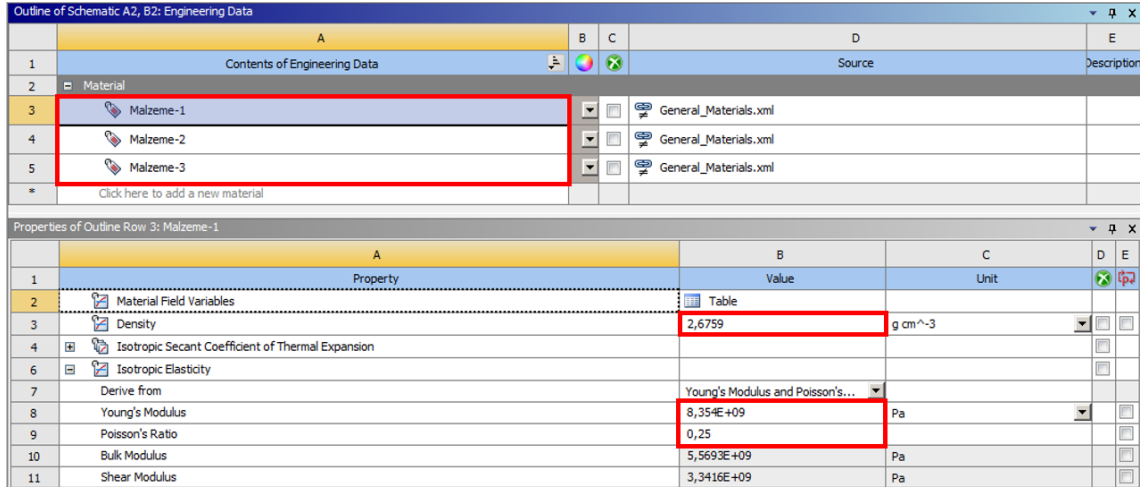
Şekil 33. Fatih Büyük Cami için elde edilen 1. ve 2. mod şekli

2.3.3. Fatih Büyük Cami Minaresi ANSYS® Sonlu Eleman Modeli

Analizler için ilk olarak ANSYS® Workbench arayüzü açılmıştır. Şekil 34’te gösterildiği gibi ekranın solunda bulunan menüden istenilen analiz türü seçilmiştir. Daha sonra “Engineering Data” alt menüsünden Şekil 35’teki gibi modelde kullanılacak olan malzeme türleri sisteme girilmiştir.

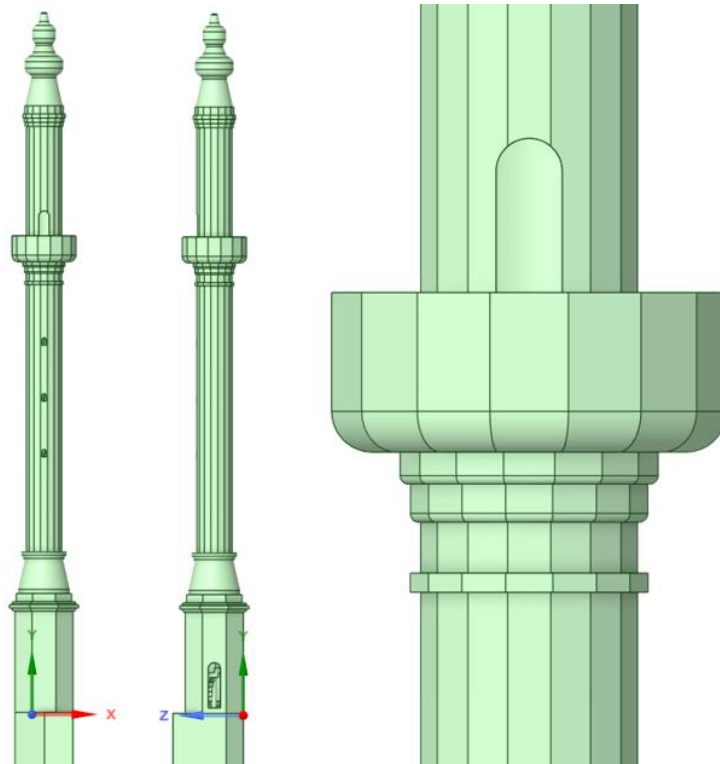


Şekil 34. ANSYS® Workbench arayüzü



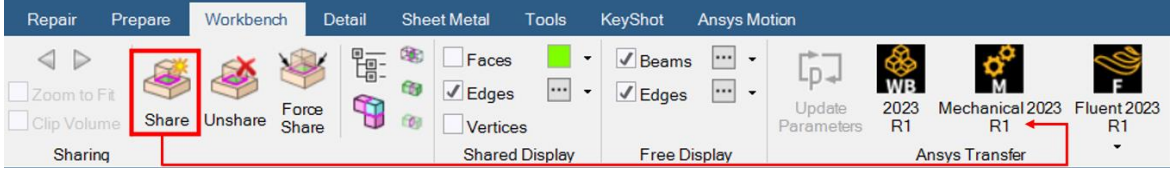
Şekil 35. ANSYS® Workbench malzeme seçim menüsü

Sonlu eleman modelinin çizimi için Workbench' de bulunan SpaceClaim yazılımı kullanılmıştır. “Geometry” menüsüne giriş yapılarak SpaceClaim kısmı seçilmiştir. Daha sonra AutoCAD® projesindeki ölçüler baz alınarak model çizimi yapılmıştır. Bu projede belirtildiği gibi minare modelinde de 95 adet basamak 30 derecelik açılarla yerleştirilerek çizim tamamlanmıştır. SpaceClaim ortamında yapılan minare modelinin detayları Şekil 36’da gösterilmektedir.



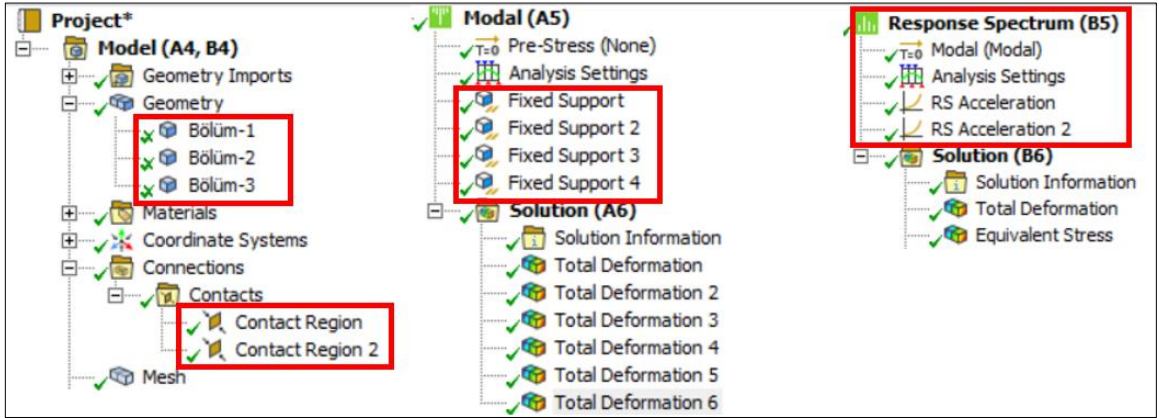
Şekil 36. ANSYS® SpaceClaim ortamında oluşturulan Fatih Büyük Cami minare modeli

Tamamlanan model SpaceClaim üst menüsündeki Workbench sekmesi yardımıyla ANSYS® Mechanical yazılımına aktarılmıştır. Şekil 37’de görülen araç çubuğundaki paylaşım sekmesiyle beraber modelin tüm temas yüzeyleri ve bağlantı noktaları tespit edilmiştir ve sonlu eleman analizi için bir sonraki aşamaya geçilebilmektedir.



Şekil 37. ANSYS® SpaceClaim araç çubuğu, Fatih Büyük Cami minare modelinin Mechanical kısmına aktarımı

ANSYS® Mechanical kısıma aktarılan model, malzeme özelliklerinin farklılaştığı kısımlara göre üç parçaya ayrılmıştır. Bu sayede sisteme girilen üç farklı malzeme de Şekil 38’de görülen menüden kolay bir şekilde sonlu eleman modeline aktarılmıştır. Aynı şekilde modele yaptırılacak olan modal analiz ve spektrum analizinin detayları görülmektedir. Bu menüde ayrıca minare modelinin kısımları arasında oluşturulan bağlantı bölgeleri, modele atanan mesnetler ve analiz sonucunda istenen parametrelerde görülebilmektedir.



Şekil 38. ANSYS® Mechanical; Fatih Büyük Cami minare model ve analiz içerikleri

2.3.4. Fatih Büyük Cami Minaresi Modal Analizi

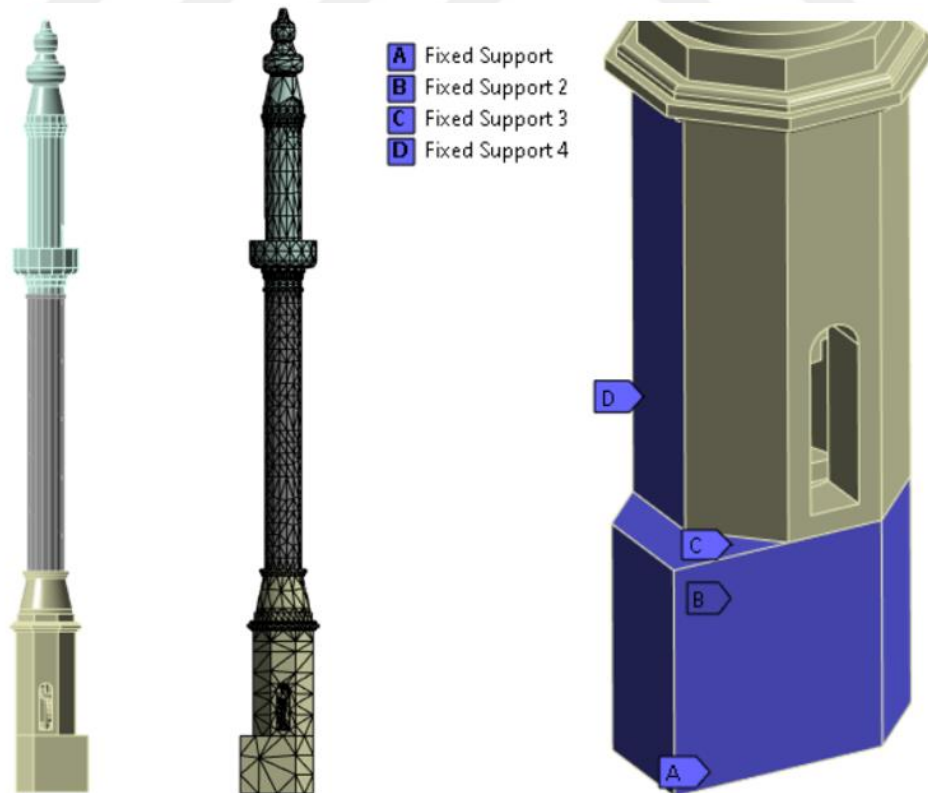
Tablo 7’de görülen malzeme özellikleri sonlu eleman modelinin üç farklı kısmına atanmıştır. Bu özelliklerden elastite (Young) modülü, yoğunluk ve Poisson oranları manuel

olarak sisteme girilmiştir. Mesh ağı program tarafından otomatik olarak oluşturulan modelin modal analiz ayarları yapılmıştır.

Tablo 7. Fatih Büyük Cami ANSYS® sonlu eleman modeli malzeme özellikleri

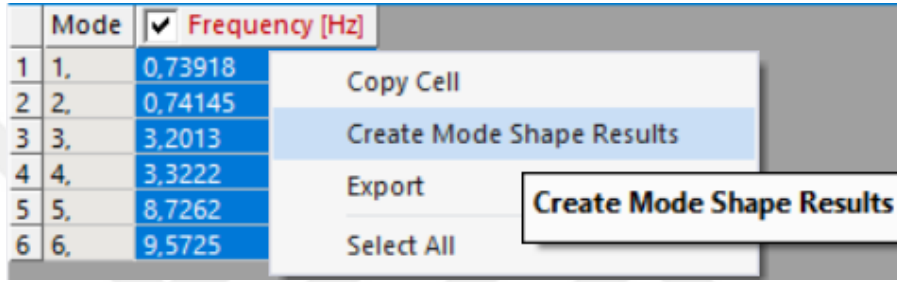
Minare Bölümleri	Young Modülü (GPa)	Yoğunluk (g/cm ³)	Poisson Oranı
Bölüm-1	8.520	2.5575	0.25
Bölüm-2	8.354	2.6759	0.25
Bölüm-3	2.679	1.5277	0.25

Modal analiz için minare sonlu eleman modeline Şekil 39’da görülen ankastre mesnetler atanmıştır. Bu mesnetlerin konumları AutoCAD® projesinde ve yerinde yapılan gözlemlerle belirlenmiştir. Sistem varsayılan ayarlarında modelin ilk 6 modunun frekans değerleri bulunmaktadır. Ancak bu çalışma için sistemin ilk 3 modu istenilen değerleri karşılamaktadır.



Şekil 39. Fatih Büyük Cami minaresi ANSYS® sonlu eleman modeli; mesh ağı ve ankastre mesnetler

Modal analiz için ön ayarlar tamamlandıktan sonra analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonunda elde edilen frekans değerlerinden Şekil 40'ta görülen işlem yapılmış ve mod şekilleri elde edilmiştir. Sonuçlar ANSYS® Mechanical arayüzünde, ekranın solunda “Solution” sekmesinin altında gösterilmektedir. Minarenin GFTAA yöntemine dayalı analizi ve sonlu eleman modelinin modal analizinden bulunan frekans verileri Tablo 8’de verilmiştir. Minarenden alınan sinyaller birbirlerine dik yerleştirilmiş 2 adet sismik ivmeölçer kullanılarak alınmış ve alınan sinyaller GFTAA yöntemiyle analiz edilmiştir. (Çalık vd., 2017).



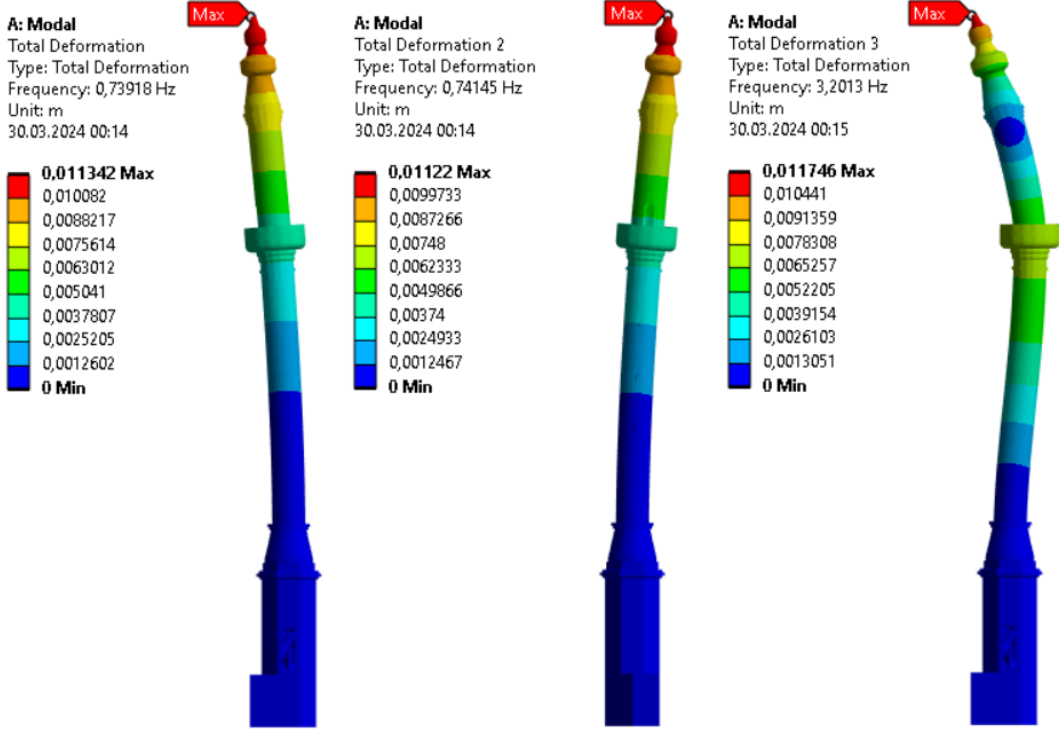
	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	0.73918
2	2.	0.74145
3	3.	3.2013
4	4.	3.3222
5	5.	8.7262
6	6.	9.5725

Şekil 40. ANSYS® modal analiz sonuçlarının elde edilmesi

Tablo 8. Fatih Büyük Cami ivmeölçer verileriyle GFTAA yöntemine dayalı ARTeMIS® analizi ve sonlu eleman modeli modal analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Mod	Frekans: İvmeölçer (Hz)	Frekans; ANSYS® (Hz)	Fark (%)
1	0.7380	0.73918	0.16
2	0.7400	0.74145	0.20
3	3.2070	3.20130	0.18

Modal analiz sonucunda minare modelinin ilk 3 mod şekli ve yer değiştirme değerleri Şekil 41’de verilmiştir. Birinci ve üçüncü mod şeklinin hareket yönü aynı olmakla beraber ikinci mod şekli bunlara diktir.

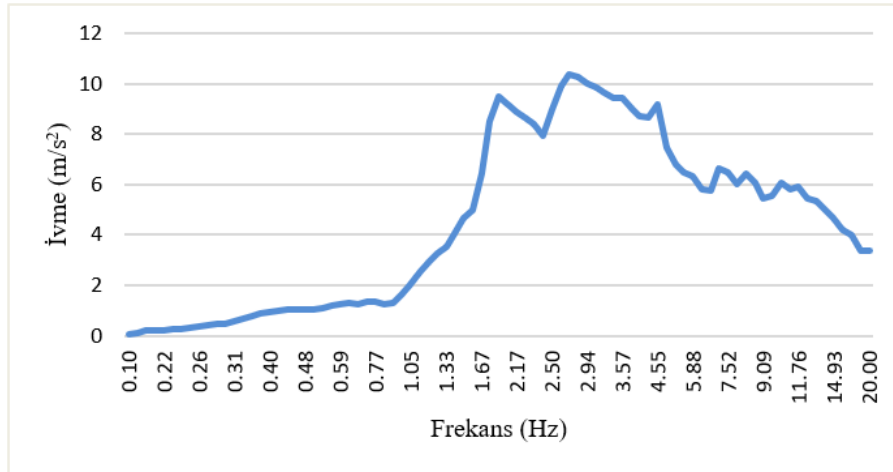


Şekil 41. Fatih Büyük Cami minaresi ANSYS® sonlu eleman modeli modal analiz sonucu elde edilen ilk 3 mod şekli

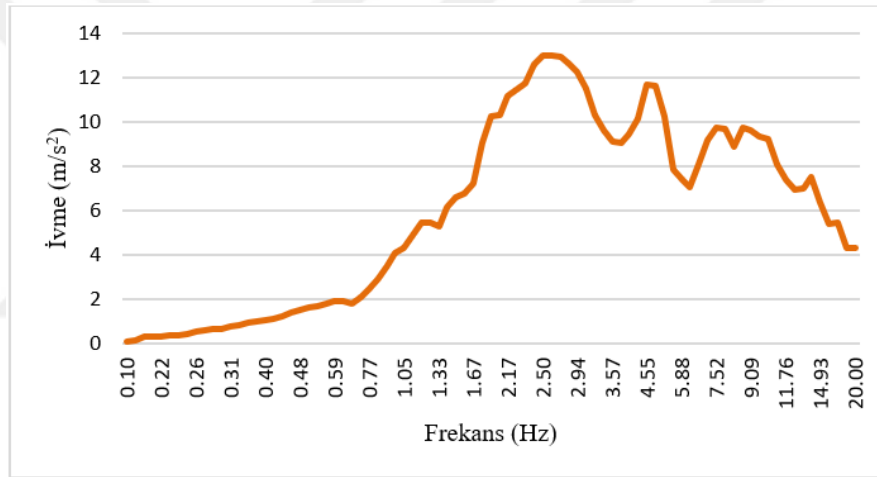
Modal analiz tamamlandıktan sonra spektrum analizi gerçekleştirilmiştir. Spektrum analizi için öncesinde modal analiz yapılması programın ön koşuludur. Modal analiz için oluşturulan tüm geometriler, atanan malzemeler ve mesnet koşulları, spektrum analizi için de aynen geçerli olmaktadır.

2.3.5. Fatih Büyük Cami Minaresi Spektrum Analizi

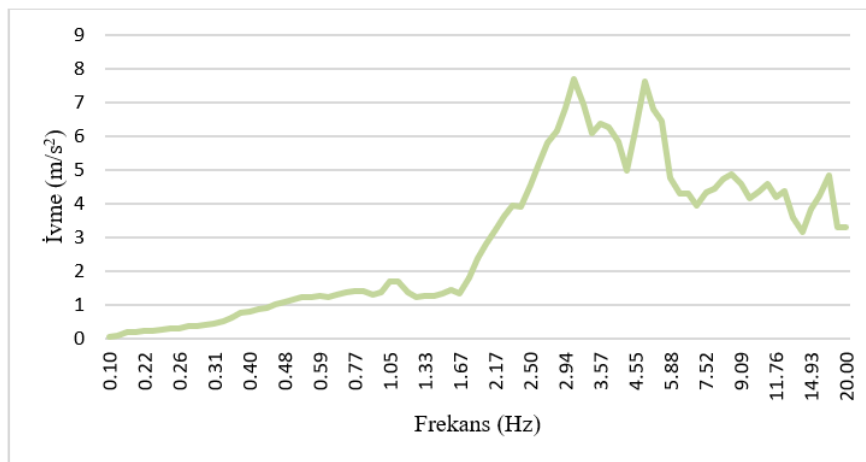
ANSYS® Mechanical 'da üç farklı spektrum analizi mevcuttur. Bunlar ivme, hız ve yer değiştirme spektrumlarıdır. Tez çalışması kapsamında bunlardan ivme spektrumu analizi kullanılacaktır. Arayüzde bulunan “Response Spectrum” sekmesinden “RS Acceleration” butonu seçilerek sisteme ivme spektrumu baz halinde eklenir. Daha sonra Türkiye İvme Veri Tabanı ve Analiz Sistemi'nden elde edilen ivme spektrumu ANSYS® programına aktarımı sağlanacak şekilde işlenir (URL-2, 2024). Ham veriler periyot-ivme şeklindedir ve bu veriler frekans-periyot formatına getirilmiştir. Şekil 42, Şekil 43 ve Şekil 44'te ivme spektrumları görülmektedir. Bu spektrumlar üç farklı doğrultuda elde edilen grafiklerdir.



Şekil 42. 06.02.2023 tarihli Gaziantep Nurdağı depremi X doğrultusu Spektral İvme-Frekans grafiği

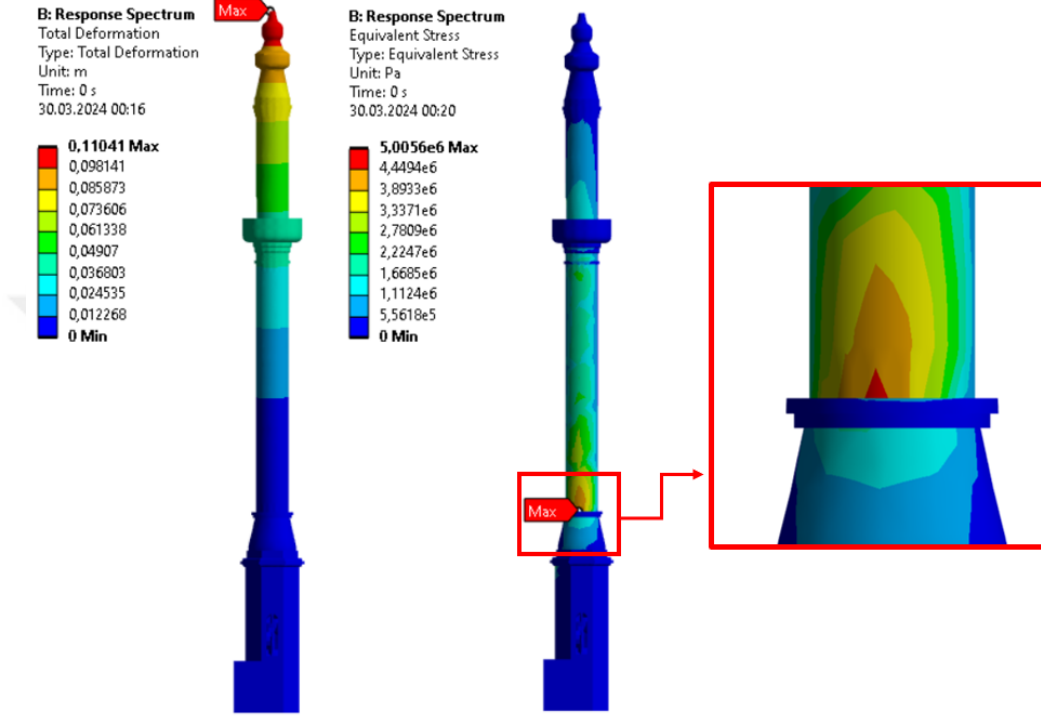


Şekil 43. 06.02.2023 tarihli Gaziantep Nurdağı depremi Y doğrultusu Spektral İvme-Frekans grafiği



Şekil 44. 06.02.2023 tarihli Gaziantep Nurdağı depremi Z doğrultusu Spektral İvme-Frekans grafiği

Veriler sisteme girildikten sonra sonlu eleman modelinin toplam yer değiştirmesini ve gerilme yığılmalarının olduğu yerleri tespit edebilmek için “Solution” kısmına “Total Deformation” ve “Equivalent Stress” butonları eklenmiştir. Daha sonra spektrumu analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar şekil 45’te gösterilmektedir.



şekil 45. Fatih Büyük Cami minaresi ANSYS® spektrum analizi sonucu oluşan toplam yer değiştirme ve eşdeğer gerilme

şekil 45’te görüldüğü üzere modeldeki yaklaşık değeri 0.11 metre olan maksimum yer değiştirme minarenin en st noktasında elde edilmiştir. Gerilme yığılmaları geçiş bölgesi ve gövde arasındaki alanlarda maksimum değerine ulaşmıştır. şerefeden petek kısmına geçişte bu kadar yüksek değerde olmasa da yine de bu bölgede gerilme yığılmalarının yoğun olduğu görülmektedir. Sisteme verilen dinamik yüklemelere karşı yapıda oluşabilecek muhtemel hasarların ilk olarak bu bölgelerde ve bu bölgelere yakın yerlerde oluşması beklenmektedir.

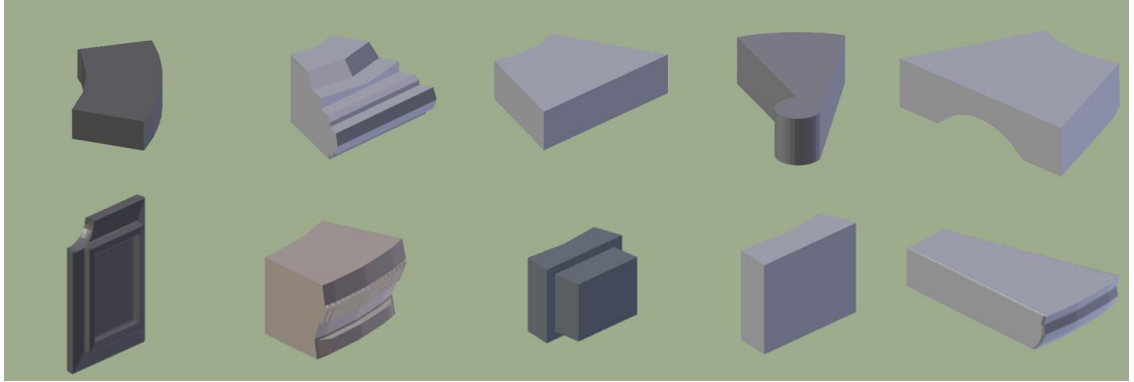
2.3.6. Blender® Programında Fatih Büyük Cami Minaresinin  Boyutlu Modellenmesi

Blender®, üç boyutlu modelleme ve animasyon uygulaması olarak geliştirilmiş açık kaynak kodlu bir bilgisayar programıdır. Program yardımıyla canlandırma, sanal gerçeklik ve görsel efekt uygulamaları elde edilebilmektedir. Yazılım ve oyun geliştiricilerinin

çoğunluk kullanımında olan, aynı zamanda ücretsiz olarak sunulan program PYTHON® Uygulama Programlama Birimini kullanmaktadır (URL-3, 2024).

Bu tez çalışmasının üç boyutlu modelleme kısmında kullanılacak olan bu program, Bullet Constraints Builder adlı ücretsiz eklenti sayesinde deprem simülasyonu yapılmasına da olanak sağlamaktadır (URL-4, 2024). Blender® programının sürekli güncellenen versiyonları olmasına karşın, Bullet Constraints Builder eklentisinin Blender® 2.79 sürümü için yayımlanmış olduğundan çalışma süresince bu versiyon kullanılmıştır. (URL-5, 2024).

Vakıflar Bölge Müdürlüğünden temin edilen AutoCAD® proje çizimleri yardımıyla Fatih Büyük Camii minaresinin üç boyutlu modeli Blender® programında oluşturulmuştur. Projede yer alan kot değerleri göz önüne alınarak oluşturulan modelde her bir bileşen tek tek ve farklı özelliklerde modellenmiştir. Şekil 46'da gösterildiği gibi minarenin farklı bölgelerinde kullanılan taş bloklar, AutoCAD® projesi ve yerinde yapılan incelemeler dikkate alınarak oluşturulmuştur.



Şekil 46. Fatih Büyük Cami Blender® üç boyutlu modeldeki taş blok türleri

Birebir aynı ölçekte olan bu taş bloklar minarenin bölge isimlerine göre gruplara ayrılmıştır. Üç boyutlu modelde kullanılan temel ve anakaya da dahil olmak üzere tüm bileşenler aynı şekilde gruplara ayrılmak zorundadırlar. Bu işlemin model oluşturma adımlarında sağladığı kolaylığın yanı sıra, deprem simülasyonu hazırlığında malzeme atamaları için bir zorunluluk olduğu da unutulmamalıdır. Simülasyonun hatasız ve doğru bir şekilde çalışması için en önemli nokta oluşturulan bileşenlerin yalnızca yüzeylerinin birbirine temas etmesidir. Katı modellerin herhangi bir şekilde kesişmesi durumunda doğru sonuçlar elde edilemeyecektir (Walter & Kostack, 2024).

İlk olarak açılan yeni Blender® dosyasında minarenin üzerinde konumlandırılacağı ve deprem ivme kaydının verileceği zemini temsil eden 100*100 metre boyutlarında bir yüzey

oluşturulmuştur. Bu yüzey Anakaya isimli gruba atanmaktadır. Daha sonra materyal, renk ve doku gibi özellikler oluşturulmuştur. Bu işlemler bundan sonra oluşturulacak her bir bileşen için gerçekleştirilecektir. Şekil 47’de tamamlanan üç boyutlu minare modelinin detayları gösterilmektedir. Kürsü, geçiş bölgesi, gövde, şerefe, petek ve külah olarak altı ana parçaya ayrılan minarede basamaklar ayrı modellenmiş ve temas yüzeylerinden ilgili alanlara bağlanmıştır. Simülasyonun gerçek davranışa yakın olması için her bir kısımdaki taş blokların gerçek boyutlara yakın ve ayrı modellenmesi gerekmektedir (Hacıfendioğlu vd. 2023). Aksi halde kırılma ve kopmalar düzgün gerçekleşmeyecektir.



Şekil 47. Fatih Büyük Camii Blender® ortamında oluşturulan üç boyutlu minare modeline ait detaylar

Üç boyutlu modelleme aşaması tamamlandıktan sonra malzeme atamaları ve deprem ivme kaydını sisteme tanımlamak için Blender®’a özel geliştirilen Bullet Constraints Builder eklentisi kullanılmaktadır.

2.3.7. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi ve Atanması

Blender® programında üç boyutlu model oluşturulurken aynı özellikteki bileşenler aynı gruplara atanmıştır. Modeldeki parçalara malzeme ataması bu gruplar aracılığıyla yapılmaktadır. ANSYS® sonlu eleman yazılımı ile gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda minarede kullanılan malzemelerin elastite modülü ve yoğunluk değerleri hesaplanmıştır (Hacıfendioğlu & Duman, 2023). Malzemelerin mekanik özellikleri interpolasyon

yardımıyla hesaplanmış ve Tablo 9’da gösterildiği gibi sisteme atanmıştır (Yurdakul vd., 2021). Malzeme seçim menüsünden yığma taş kısmı seçilmiş ve tüm minarede bu malzeme özellikleri kullanılmıştır. Kullanılan malzemede farklı denemeler neticesinde en iyi sonucu veren 15 numaralı bağlantı türü tercih edilmiştir. Basınç dayanımı, çekme dayanımı, moment ve kırılma eşiklerini temsil eden parametreleri kullanan bir bağlantı türüdür.

Tablo 9. Fatih Büyük Cami: Minare bölümlerinin mekanik özellikleri

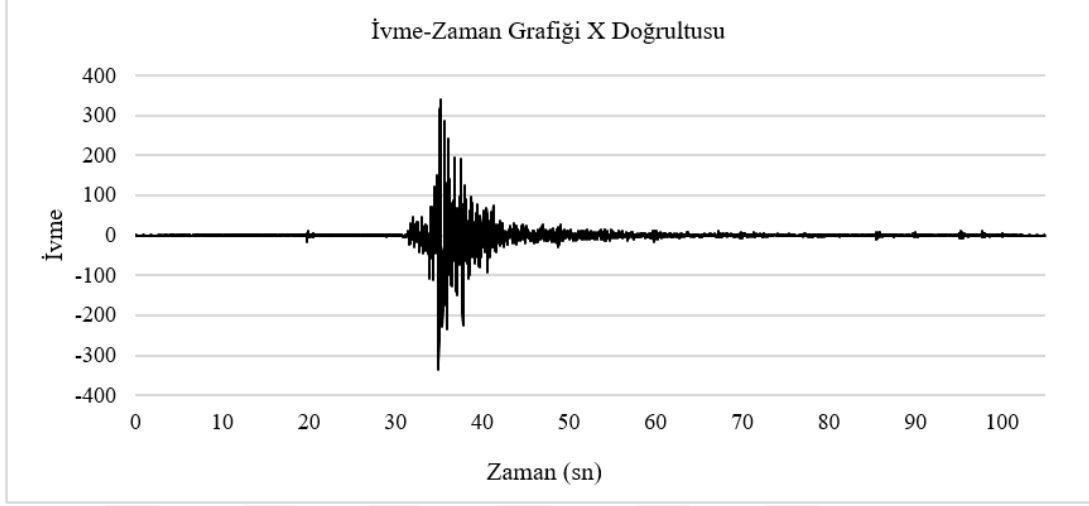
Minare Bölümleri	Yoğunluk (g/cm ³)	Basınç Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)
Kürsü	2.675	42.0	4.0
Geçiş	2.675	42.0	4.0
Gövde	2.557	45.5	4.2
Şerefe	1.527	13.0	2.0
Petek	1.527	13.0	2.0
Külâh	1.527	13.0	2.0

Anakayayı temsil eden zemine atanan malzemenin sürtünme değerinin yüksek seçilmesi gerekmektedir. Bu sayede zemine verilen dinamik yük minare modeline daha iyi aktarılmış ve simülasyonun daha iyi sonuç vermiştir.

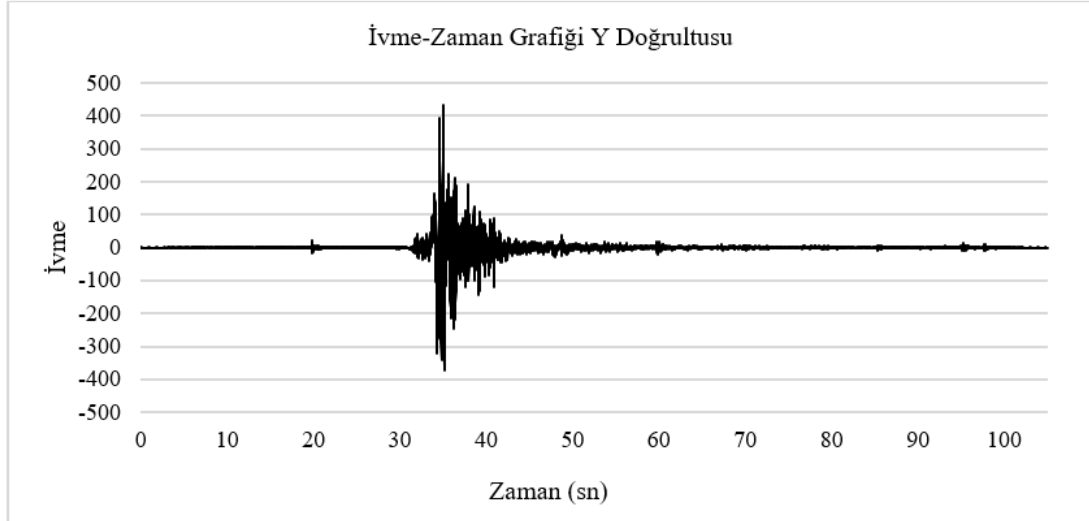
2.3.8. Deprem Kaydının Belirlenmesi ve Sisteme Yüklmesi

Deprem simülasyonu için sisteme etki ettirilecek dinamik yük iki farklı şekilde seçilebilmektedir. Bullet Constraints Builder eklentisinde yapay bir deprem oluşturulabildiği gibi gerçek deprem verileri kullanılarak oluşturulan CSV dosyası da sisteme yüklenilebilmektedir (Walter & Kostack, 2024). İstenilen CSV dosyalarını oluşturabilmek için deprem kayıtlarından üç eksenindeki ivme değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Daha önceden de belirtildiği gibi deprem verisinin seçim kriteri, aynı depremin ivme spektrumlarının da mevcut olmasına bağlıdır. Bunun nedeni ivme-zaman verilerinin simülasyonda, ivme spektrumu verilerinin sonlu eleman analizinde kullanılıyor olmasıdır. Bu sebeple TADAS internet sayfasında 06.02.2023 tarihli, 2712 istasyon kodlu 6.6 MW

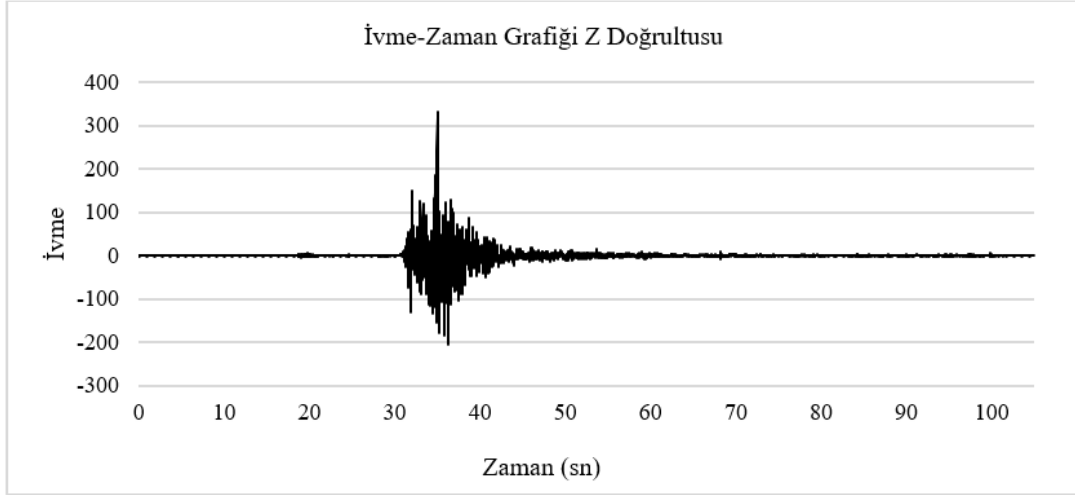
büyükluğindeki Nurdağı deprem kaydı seğilmiştir (URL-6, 2024). şekil 48, şekil 49 ve şekil 50’de kullanılan depremin üç eksenindeki ivme zaman grafikleri gösterilmiştir.



şekil 48. 2712 istasyon kodlu Gaziantep Nurdağı depremi X doğrultusu ivme-zaman grafiği



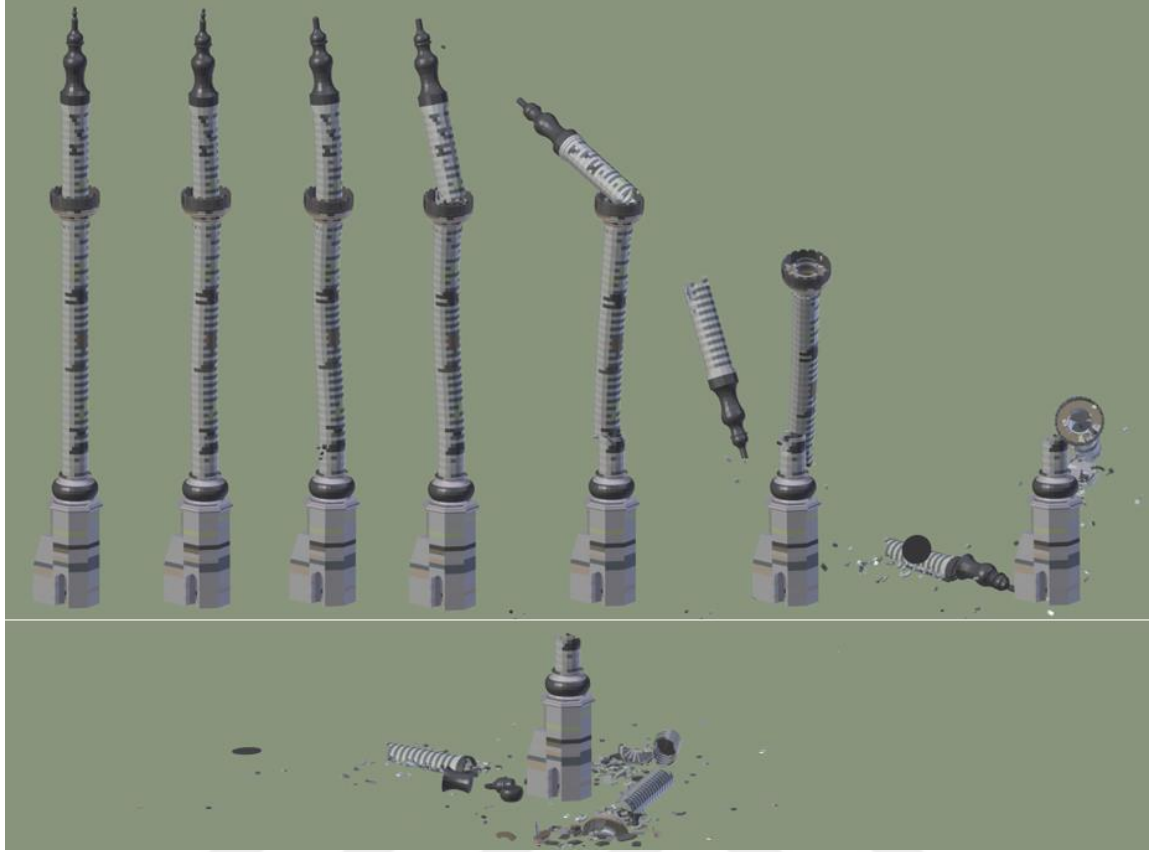
şekil 49. 2712 istasyon kodlu Gaziantep Nurdağı depremi Y doğrultusu ivme-zaman grafiği



Şekil 50. 2712 istasyon kodlu Gaziantep Nurdağı depremi Z doğrultusu ivme-zaman grafiği

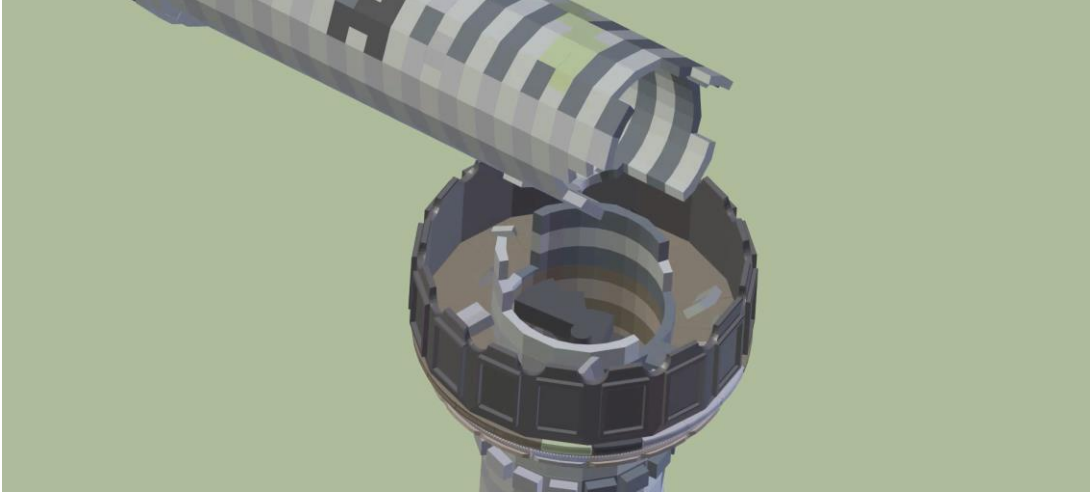
2.3.9. Deprem Simülasyonu ve Sonuçları

Simülasyon için programda gerekli ayarlamalar gerçekleştirildikten sonra deprem verisinin süresine göre video kare sayısı tespit edilmiştir. Bu tez çalışmasında, 700 video kare sayısı uygun görülmüştür. Simülasyon tamamlandıktan sonra render görüntüleri istenilen çözünürlük ve video formatında indirilebilmektedir. Şekil 51’de minarenin, seçilen deprem yükü karşısındaki davranışı görülmektedir.



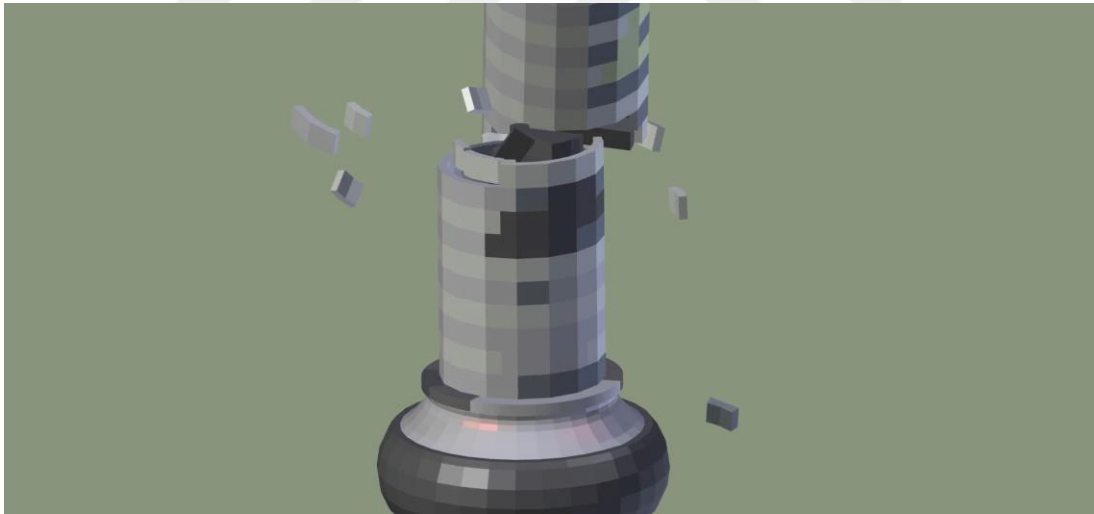
Şekil 51. Fatih Büyük Cami minaresinin deprem simülasyonu sırasındaki davranışı

Deprem 3. saniyesinden itibaren minarenin hafif salınımlar yapmaya başladığı gözlemlenmektedir. Taşların düşmesi 7. saniyeden itibaren görülmektedir. Gözle görülen ilk kopma şerefeden peteğe geçiş kısmında oluşmuştur ve Şekil 52’de yakından görülebilmektedir. Minarenin basamakları yapım aşamasında gövdeye ankrajlar yardımıyla yerleştirilmektedir ve minarenin rijitliğinde büyük önem taşımaktadır. Minarenin şerefe kısmına kadar yapılan bu basamaklar petek kısmında mevcut değildir. Bu sebeple salınım dinamik yük etkisinde yapılan salınım hareketinden bu kısım yüksek seviyede etkilenmektedir. İlk kırılmanın burada gerçekleşmesinin de bu sebeptendir. 10. saniyede gerçekleşen bu kopmadan hemen 1 saniye sonra geçiş bölgesinden gövdeye uzanan kısımda büyük bir kırılma oluşmuştur. Bu kısım, sonlu eleman modelinde yapılan spektrum analizinde de maksimum gerilmenin olduğu kısma çok yakındır.



Şekil 52. Fatih Büyük Cami minaresinde deprem simülasyonu sırasında ilk kırılmanın gerçekleştiği bölge

Şekil 53'te petek kısmından sonra ikinci kırılmanın olduğu gövdenin alt kısmının kırılmasıyla beraber minare tamamen göçmüştür. Ayakta kalan kısım kürsü ve geçiş bölgesidir.



Şekil 53. Fatih Büyük Cami minaresinde deprem simülasyonu sırasında ikinci kırılmanın gerçekleştiği bölge

3. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, tarihi yığma minarelerin video kamera tabanlı yapı sağlığı izlenmesi konusu üzerinde durulmuştur. Bu kapsamda ilk olarak Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Deprem ve Yapı Sağlığı Laboratuvarı'nda bir minyatür minare modeli inşa edilmiştir. Yapımı 12 gün süren minyatür minare modelinin inşası bittikten sonra yüksek hızlı endüstriyel kameralarla oluşturulan izleme sistemiyle video kayıtları alınmaya başlanmıştır. Dört farklı kamera kullanılarak alınan video kayıtları Optik Akış algoritması tabanlı bir Python kodu yardımıyla analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda yapının dört farklı noktasının yer değiştirmeleri hesaplanmıştır. İki farklı doğrultuda elde edilen yer değiştirme sonuçları daha sonra ARTEMIS® adlı yazılımda modal analiz kısmında kullanılmıştır. GFTAA yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucunda minyatür minare modeline ait iki frekans ve mod şekilleri elde edilebilmiştir.

Minyatür minare modelinin ANSYS® yazılımında sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Daha sonra sonlu eleman modeli üzerinde modal analizler gerçekleştirilmiş ve ilk iki mod için mod şekli ve frekans değerleri bulunmuştur. Minyatür minare modelinin priz alma süresi beklendikten sonra yapıya birbirine dik doğrultuda üç farklı yükseklikte toplam altı adet ivmeölçer sensörü yerleştirilmiştir. ANSYS® sonlu eleman modeli ile modal analiz sonucu, ivmeölçer tabanlı ve video kamera tabanlı verilerle elde edilen frekans değerleri birbirlerini doğrular niteliktedir. Video kamera tabanlı modal analizde alınan görüntüler tek bir düzlemde olduğu için yapının birbirine dik doğrultudaki ikinci mod şekli elde edilememektedir. Ancak sonlu eleman ve ivmeölçerlerle bulunan değerlerde böyle bir şey söz konusu değildir.

Tez çalışmasının saha çalışmaları kapsamında Fatih Büyük Cami minaresi hedef olarak belirlenmiştir. Kamera sisteminin konumlandırılması için öncesinde keşif yapılmış ve uygun konum ve saat belirlenmiştir. Ölçümler için yaya ve araç trafiği en az seviyede olduğu sabah erken saatler tercih edilmiştir. Video kameralarla alınan görüntülerde parlaklık parametresi çok önemli olduğu için minare bu saatlerde minare güneş ışığından olumsuz etkilenmemiştir. Dört adet kamera aynı doğrultuda hizalandıktan sonra minarenin dört farklı kotundan eş zamanlı dört dakikalık görüntüler alınmıştır. CoreView yazılımı aracılığıyla

alınan görüntüler kayıt cihazında toplanmıştır. Bu görüntüler daha sonra harici bir harddiskte depolanmış ve analizler gerçekleştirilmiştir.

Optik Akış algoritmasını temel alan Python kodunda işlenen görüntüler sonucu yatay ve düşey doğrultularda yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. ARTeMIS® yazılımında yapılacak olan analiz için bu değerler kullanılmıştır. Yapılan analiz sonucunda yapı için iki frekans ve mod şekilleri elde edilmiştir. Daha önceki çalışmalarda ivmeölçerler yardımıyla bulunan frekans değerleri mevcuttur ve bu değerler ARTeMIS® yazılımında gerçekleştirilen analizler sonucunda bulunan değerlerle uyushmaktadır.

Fatih Büyük Cami minaresinin ANSYS® yazılımı ile sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Daha önceki çalışmalarda, optimizasyon sonucunda bulunan malzeme özellikleri doğrultusunda modal analizler gerçekleştirilmiştir. Model güncelleme sonrasında yapının frekans değerleri, ivmeölçer tabanlı ve video kamera tabanlı elde edilen frekans değerleriyle uyumlu hale getirilmiştir. Daha sonra gerçek deprem verileri kullanılarak yapıda ortaya çıkacak gerilme yığılmalarının nerelerde olacağı tespit edilmiştir. 6.6 MW büyüklüğündeki Nurdağı deprem verileri kullanılarak yapılan spektrum analizleri sonucunda, geçiş bölgesiyle gövdenin birleşim noktasına yakın kısımlarda gerilme değerlerinin maksimum olduğu görülmüştür. Fatih Büyük Cami minaresinin Blender® programında üç boyutlu modeli oluşturulmuş ve ardından malzeme atamaları yapılarak aynı deprem etkisi altında deprem simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonucunda yapıda kırılmaların gerçekleştiği bölgelerin sonlu eleman modelinin spektrum analizinde maksimum gerilmelerin meydana geldiği bölgeler olduğu görülmüştür.

Laboratuvar ortamında yapılan minyatür minare modeli, endüstriyel kameralarla oluşturulan izleme sisteminin doğrulanması için kullanılmıştır. İvmeölçerlerle yapılan ölçümler sonucunda video kamera tabanlı izleme sisteminin sonuçları doğrulanmıştır. Bu gelişmelerden kamera sisteminin saha çalışmalarında kullanılabileceği kanısına varılmıştır. Saha çalışmaları için belirlenen yapının, sonuçların doğrulanması için gerçek verilere sahip olması çalışmanın doğrulunu bir kez daha ortaya koymuştur.

4. ÖNERİLER

‘Tarihi Yığma Minarelerin Video Kamera Tabanlı Yapı Sağlığı İzlenmesi’ başlıklı yüksek lisans tez çalışması sonucunda birtakım veriler elde edilmiş ve bu veriler ışığında aşağıdaki önerilere yer verilmiştir.

- Minyatür minare modelinin video kamera sistemiyle yapılan ölçümleri sırasında kullanılan karekod şablonlar sayesinde analiz yapmak çok daha pratik ve hızlı bir hale gelmiştir. Yapı sağlığı izlenmesi için ardışık ölçümlerin alındığı durumlarda şablon kullanımı sonuçların doğrulunu da arttırmaktadır.
- Saha ölçümleri sırasında minarelerin her bölümüne şablon uygulaması yapılamayacağı için minare üzerinde boyutları bilinen ve hatları belirgin noktalara odaklanması sonuçların güvenilirliğini bir o kadar daha arttıracaktır.
- Minyatür minare modelinin video kameralarla alınan görüntülerinde kapalı ortam olması sebebiyle parlaklık parametresi ölçümleri önemli derecede etkilememiştir. Ancak sahada yapılacak olan minare ölçümleri sırasında yüksek derecede sıcaklık, tozlu ortam ve aşırı parlaklık gibi durumlarda görüntü almak zorlaşacak ve doğru sonuçlardan uzaklaşılacaktır.
- Saha ölçümleri sırasında yaya ve araç trafiğinin minimum seviyede tutulması çevresel titreşimlerin ölçüm sonuçlarını en az seviyede etkilemesini sağlayacaktır.
- Yapı sağlığı izlenmesi için başlangıç seviyesinde görünen bu tez çalışmasında kullanılan yöntem ve sistemler, uzun soluklu ve belirli periyotlu çalışmalar için kullanılabilir.

5. KAYNAKLAR

ANSYS (2013). Swanson Analysis System. ABD.

Bakht, B., Mufti, A. (2015). Structural Health Monitoring. *Bridges*, 307–354.

Barsocchi, P., Bartoli, G., Betti, M., Girardi, M., Mammolito, S., Pellegrini, D., & Zini, G. (2021). Wireless Sensor Networks for Continuous Structural Health Monitoring of Historic Masonry Towers. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(1), 22–44.

Bendat, J. S. & Piersol, A. G. (2004). *Random Data: Analysis and Measurement Procedures (3rd ed.)*. New Jersey: John Wiley and Sons.

Bouguet, J. Y. (2024, Nisan 15). *Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker Description of the algorithm*. http://robots.stanford.edu/cs223b04/algo_tracking.pdf adresinden alınmıştır.

Cataldo, A., Roselli, I., Fioriti, V., Saitta, F., Colucci, A., Tati, A., Ponzo, F. C., Ditommaso, R., Mennuti, C., & Marzani, A. (2023). Advanced Video-Based Processing for Low-Cost Damage Assessment of Buildings Under Seismic Loading in Shaking Table Tests. *Sensors*, 23(11).

Celep, Z. (2017). *Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı (5.b)*. İstanbul: Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş.

Civera, M., Calamai, G., & Zanotti Fragonara, L. (2021). System identification via Fast Relaxed Vector Fitting for the Structural Health Monitoring of Masonry Bridges. *Structures*, 30, 277–293.

Çalık, İ. (2017). *Tarihi Cami ve Minarelerin DeneySEL Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi ve Restorasyon Etkilerinin Değerlendirilmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.

Çalık, İ., Bayraktar, A., Türker, T., Hökelekli, E., & Ayan, A. O. (2017). Trabzon Ortahisar Fatih Camii Restorasyonuna Yönelik Onarım ve Güçlendirme Çalışmaları. 6. *Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu*, s. 69–78. Trabzon

Çelik, M. (2021). *Farklı Dinamik Özelliklere Sahip Yüksek Yapının Yapı Sağlığı İzlenmesi*. Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.

Darılmaz, K. (2019). *Depreme Dayanıklı Binaların Tasarımına Giriş*, İstanbul: Birsan Yayınevi.

Dawoud, N. N., Samir, B. B., & Janier, J. (2011). Fast Template Matching Method Based Optimized Sum of Absolute Difference Algorithm for Face Localization. *International Journal of Computer Applications*, 18(8), 30–34.

- Fradelos, Y., Thalla, O., Biliani, I., & Stiros, S. (2020). Study of Lateral Displacements and The Natural Frequency of A Pedestrian Bridge Using Low-Cost Cameras. *Sensors*, 20(11), 1–13.
- Ghandil, M., Dabanli, Ö., & Tajmir Riahi, H. (2021). An Enhanced Indirect Video-Based Measurement Procedure for Dynamic Structural System Identification Applications. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 182. 109759
- Hacıfendioğlu, K., Duman, C. (2023). Calibration of Material Properties of Historical Masonry Minaret by Using Operational Modal Test with Response Surface Method, 3rd *International Civil Engineering and Architecture Congress*. Proceeding Book I: Civil Engineering, p. 986-994. Trabzon
- Hacıfendioğlu, K., Aslan, T., Başağa, H. B., & Duman, C. (2023). Earthquake Simulation on Historic Masonry Minaret. 3rd *International Civil Engineering and Architecture Congress*. Proceeding Book I: Civil Engineering, p. 1798-1806. Trabzon
- Hanbay, S. (2019). *Vibration-Based Structural Health Monitoring of A Wind Turbine Incorporating Environmental and Operational Conditions*. Boğaziçi University, Institute for Graduate Studies in Science and Engineering, Master Thesis, İstanbul.
- Hsu, T. Y., & Kuo, X. J. (2020). A Stand-Alone Smart Camera System for Online Post-Earthquake Building Safety Assessment. *Sensors*, 20(12), 1–17.
- Işık, E., Antep, B. (2018). Ahlat İlçesinde Yer Alan Tarihi Yığma Minarenin Yapısal Analizi. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 46–56.
- Jacobsen, N.J., Andersen, P. & Brincker, R. (2006). Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as A Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis. *Proceedings of ISMA2006: International Conference on Noise & Vibration Engineering*. p. 1-13. Heverlee.
- Kadiroğlu, E. (2019). *Deprem Tepki Spektrumlarının Elde Edilmesi*. Maltepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Kocaman, İ., Kazaz, İ., & Okuyucu, D. (2018). Tarihi Erzurum Yakutiye Medresesi'nin Yapısal Davranışının İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20.
- 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*, p. 674–679. Vancouver.
- Matsuoka, K., Uehan, F., Kusaka, H., & Tomonaga, H. (2021). Experimental Validation of Non-Marker Simple Image Displacement Measurements for Railway Bridges. *Applied Sciences*, 11(15).
- Oh, S., Ham, S., & Lee, S. (2021). Drone-Assisted Image Processing Scheme Using Frame-Based Location Identification for Crack and Energy Loss Detection in Building Envelopes. *Energies*, 14(19).

- Özen, H., Tuluk, Ö. İ., Engin, H. E., Düzenli, H. İ., Sümerkan, M. R., Tutkun, M., Üstün Demirkaya, F., & Keleş, S. (2010). *Trabzon Kent İçi Kültür Varlık Envanteri*. Trabzon: Trabzon Valiliği Yayınları.
- Sangirardi, M., Altomare, V., De Santis, S., & de Felice, G. (2022). Detecting Damage Evolution of Masonry Structures through Computer-Vision-Based Monitoring Methods. *Buildings*, 12(6), 831.
- Shariati, A., Schumacher, T., & Ramanna, N. (2015). Eulerian-Based Virtual Visual Sensors to Detect Natural Frequencies of Structures. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 5(4), 457–468.
- SVS (2011). ARTeMIS 1.5, Swanson Analysis System. Denmark.
- Tokuç, M. O. (2015). *Reliability Assessment of A Reinforced Concrete Chimney Under Seismic and Wind Loading by Using Structural Health Monitoring*. Boğaziçi University, Institute for Graduate Studies in Science and Engineering, PhD Thesis, İstanbul.
- URL-1. (2024, Nisan 15). Endüstriyel Kamera Teknik Özellikleri: <https://www.ioindustries.com/victorem-features> adresinden alınmıştır.
- URL-2. (2024, Nisan 15). Türkiye İvme Veri Tabanı ve Analiz Sistemi: <https://tadas.afad.gov.tr/> adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2024, Nisan 15). Blender Software: <https://www.blender.org/about/> adresinden alınmıştır.
- URL-4. (2024, Nisan 15). Bullet Constraints Builder: <https://github.com/KaiKostack/bullet-constraints-builder> adresinden alınmıştır.
- URL-5. (2024, Nisan 15). Blender Deprem Simülasyonu ve Araştırmaları: <https://inachuslaurea.wordpress.com/> adresinden alınmıştır.
- URL-6. (2024, Nisan 15). TADAS Gaziantep Nurdağı Deprem İvme Kaydı: <https://tadas.afad.gov.tr/event-detail/17980> adresinden alınmıştır.
- Walter, O., Kostack, K. (2024, Nisan 15). Simulation Tool for Structural Damage Analysis and Casualty Estimation: <https://inachuslaurea.wordpress.com/wp-content/uploads/2019/08/report-on-model-enhancement-and-validation-cases-extract.pdf> adresinden alınmıştır.
- Walter, O., Kostack, K. (2024, Nisan 15). Bullet Constraints Builder: User Manual: <https://usermanual.wiki/Document/User20Manual.118066134.pdf> adresinden alınmıştır.
- Wu, Z., Chen, G., Ding, Q., Yuan, B., & Yang, X. (2021). Three-Dimensional Reconstruction-Based Vibration Measurement of Bridge Model Using UAVs. *Applied Sciences*, 11(11), 5111.

- Yanık, Y., Türker, T., Çalık, I., & Yıldırım, Ö. (2022). Investigation Of Environmental and Time Depended Effects on Historical Masonry Minarets by Vibration Test. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(2), 799–813.
- Yılmaz, H. Ç. (2021). *Yapı Sağlığı İzleme Sistemleri ile Yapıların Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi*. İskenderun Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Hatay.
- Yurdakul, M., Yılmaz, F., Artar, M., Can, Ö., Öner, E., & Daloğlu, A. T. (2021). Investigation of Time-History Response of A Historical Masonry Minaret Under Seismic Loads. *Structures*, 30, 265–276.



ÖZGEÇMİŞ

Tunahan ASLAN, İlköğrenimini Temel Yaşar ÇORUH İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2017 yılında Akçaabat Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2017-2018 öğretim yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2018-2019 öğretim yılında yatay geçişle Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine devam etti. 2021 yılında bu bölümden İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. Bir yıl İngilizce hazırlık sınıfı okuduktan sonra Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. Orta derece İngilizce bilmektedir.