

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MÜHENDİSLİK YAPILARINDA HASAR TESPİTİ VE UZUN SÜRELİ YAPI SAĞLIĞI İZLEMESİ
İÇİN GELİŞTİRİLEN MÜHENDİSLİK YAZILIMLARI

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Fatih Yesevi OKUR

MART 2023
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MÜHENDİSLİK YAPILARINDA HASAR TESPİTİ VE UZUN SÜRELİ YAPI SAĞLIĞI
İZLEMESİ İÇİN GELİŞTİRİLEN MÜHENDİSLİK YAZILIMLARI**

İnş. Yük. Müh. Fatih Yesevi OKUR

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09 / 02 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 21 / 03 / 2023

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora tezi olarak hazırlanmıştır.

“Mühendislik Yapılarında Hasar Tespiti ve Uzun Süreli Yapı Sağlığı İzlemesi İçin Geliştirilen Mühendislik Yazılımları” isimli tez çalışmasının her aşamasında beni destekleyen ve her daim teşvik eden, öğrencisi olmaktan her zaman onur ve gurur duyacağım değerli Hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK'a destek ve emeklerini esirgemediği bu süreçte sabır ve anlayışından dolayı minnet ve şükranlarımı sunarım.

Akademik hayatım boyunca bilgi ve tecrübelerini esirgemeyip her konuda destek olan saygıdeğer Hocalarım Prof. Dr. Süleyman ADANUR, Prof. Dr. Şevket ATEŞ ve Doç. Dr. Murat GÜNAYDIN'a çok teşekkür ederim.

Yıllardır ortak çalışmalar yürüttüğümüz ekip arkadaşlarımdan başta Arş. Gör. Dr. Ali Fuat GENÇ, Arş. Gör. Dr. Fezayil SUNCA, Arş. Gör. Olguhan Şevket KARAHASAN, Arş. Gör. Yunus Emrahan AKBULUT olmak üzere isimlerini yazamadığım tüm çalışma arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Tez çalışması, “Doğu Karadeniz Bölgesindeki Stratejik Öneme Sahip Mühendislik Yapıları İçin Yapı Sağlığı İzleme Ağının Kurulması ve Yenilikçi Yöntemlerin Geliştirilmesi” başlıklı ve FAY-2021-9635 numaralı Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında desteklenmiştir. Gerekli desteği sağlayan Karadeniz Teknik Üniversitesi'ne çok teşekkür ederim.

Tez çalışmasının bir bölümü University of Central Florida'da gerçekleştirilmiştir. “TÜBİTAK 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Bursu” kapsamında “Mühendislik Yapılarında Yapı Sağlığı İzlemesi ve Dinamik Değerlendirme Üzerine Yenilikçi Yöntem Geliştirme” başlıklı ve 1059B141800930 numaralı proje ile desteklenmiştir. Araştırma desteği sağlayan TÜBİTAK-BİDEB'e çok teşekkür ederim.

Tez çalışması kapsamında arazi çalışmalarının yürütülmesi adına ilgili yapılarda gerekli izinleri sağlayan Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü'ne, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'ne ve Karayolları Genel Müdürlüğü'ne teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez kapsamında deneysel çalışmaların yürütülmesi hususunda her türlü desteklerini esirgemeyen Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü'nden İnş. Müh. Kadir GÜL'e, DSİ 26. Bölge Şube Müdürü Hasan Hüseyin ÖZTÜRK'e ve İnş. Tek. Mustafa ANAR'a teşekkür ederim.

Akademik hayatın bana kattığı en büyük değer şüphesiz eşimle tanışmamdı. Birlikte yürüttüğümüz bu yolda tüm güçlüklerle beraber göğüs gerip, her koşulda elimi tutan ve tüm zor zamanlarımda hep yanı başımda olan değerli hayat arkadaşım, eşim İnş. Yük. Müh. Ebru KALKAN OKUR'a varlığı ile hayatıma anlam kazandırdığı için çok teşekkür ederim.

Destekleri ile her zaman yanımda olan babam Hasan OKUR'a, annem Melahat OKUR'a, değerli abilerim Dr. Kürşat Tuğrul OKUR'a ve Makine Yük. Müh. Alperen OKUR'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez çalışması kapsamında Türk Patent Kurumu'na başvuru numarası 2023/004086 olan “Mühendislik Yapılarında Gerçek Zamanlı Dinamik Karakteristiklerin Otomatik Takip Yöntemi” başlıklı ve başvuru numarası 2023/004089 olan “Titreşime Dayalı Yapı Sağlığı İzlemesinde Derin Öğrenme Tabanlı Anormallik Tespit Sistemi” başlıklı metodolojiler için patent başvurusu yapılmıştır. Bu çalışmanın ülkemize faydalı olmasını dilerim.

Fatih Yesevi OKUR
Trabzon, 2023

TEZ ETİK BEYAANNAMESİ

Doktora tezi olarak sunduğum “Mühendislik Yapılarında Hasar Tespiti ve Uzun Süreli Yapı Sağlığı İzlemesi İçin Geliştirilen Mühendislik Yazılımları” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK’ın sorumluluğunda tamamladığımı verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 21/03/2023

Fatih Yesevi OKUR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	4
1.2.1. Yapı Sağlığı İzlemesi Konusunda Yapılmış Çalışmalar	4
1.2.2. Sonlu Eleman Model Güncellemesi Konusunda Yapılmış Çalışmalar	11
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	14
1.4. Yapı Sağlığı İzleme	17
1.4.1. Yapı Sağlığı İzlemesinde Kullanılan Sensörler	17
1.4.1.1. İvmeölçer	18
1.4.1.2. Şekil Değiştirme Ölçer	19
1.4.1.3. Yer Değiştirme Ölçer.....	20
1.4.1.4. Eğim Ölçer.....	21
1.4.1.5. Akustik Emisyon Sensör	21
1.4.1.6 Meteorolojik Veri Ölçer	22
1.4.2. Yapı Sağlığı İzlemesinde Kullanılan Yöntemler	23
1.4.2.1. Lokal Yöntemler	23
1.4.2.2. Global Yöntemler	23
1.4.2.2.1. Titreşime Dayalı Yöntemler	24
1.4.2.2.1.1. Çevresel Titreşim Yöntemi.....	24
1.4.2.2.1.1.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) Yöntemi	24
1.4.2.2.1.1.2. Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi	25

1.4.2.2.1.2.	Zorlanmış Titreşim Yöntemi	28
1.5.	Sonlu Eleman Yöntemi.....	29
1.5.1.	Sonlu Eleman Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi	30
1.6.	Dinamik Karakteristikler Arasında Karşılaştırma ve Korelasyon Teknikleri.....	31
1.6.1.	Doğal Frekansların Korelasyonu	31
1.6.2.	Mod Şekillerinin Korelasyonu.....	31
1.6.2.1.	Modal Güvence Kriteri	32
1.6.2.2.	Koordinat Modal Güvence Kriteri.....	32
1.7.	Sonlu Eleman Model Güncellemesi	33
1.7.1.	Belirsiz Parametrelerin Seçilmesi.....	33
1.7.2.	Duyarlılık Analizi	34
1.7.3.	Yakınsama Kriterlerinin Belirlenmesi.....	35
1.7.4.	Bayes Parametre Tahmin Yöntemi.....	36
1.8.	Derin Öğrenme	37
1.8.1.	Bayes Neural Network.....	41
1.8.2.	Otokodlayıcılar	42
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR BULGULAR VE İRDELEME	44
2.1.	Giriş	44
2.2.	Geliştirilen Mühendislik Yazılımları.....	45
2.2.1.	Dynamic Modal Yazılımı	45
2.2.1.1.	Sensör Verilerinin Sisteme Aktarılması	52
2.2.1.2.	Model Geometrisinin Programa Tanıtılması	55
2.2.1.3.	Modele Ait Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi	56
2.2.2.	Dynamic Update Yazılımı	59
2.2.2.1.	Sonlu Eleman ve Deneysel Modelin Sisteme Aktarılması.....	67
2.2.2.2.	Belirsiz Parametrelerin Seçilmesi ve Duyarlılık Analizinin Gerçekleştirilmesi	68
2.2.2.3.	Bayes Parametrik Tahmin Yöntemi ile Sonlu Eleman Model Güncelleme	73
2.2.3.	Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformu	76
2.2.3.1.	Gerçek Zamanlı İzleme	79
2.2.3.1.1.	Gerçek Zamanlı Frekans Takibi İçin Metodoloji Geliştirilmesi	79
2.2.3.1.2.	Derin Öğrenme ile Verilerde Anormallik Tespiti.....	83

2.2.3.1.2.1.	Değişen Çevre Koşullarından Kaynaklı Belirsizlikler Altında Bayes Sınır Ağları ile Güven Aralığının Belirlenmesi	84
2.2.3.1.2.2.	Anormallik Tespiti İçin Otokodlayıcı Tabanlı Metodoloji Geliştirilmesi..	84
2.3.	DeneySEL Çalışmalar	87
2.3.1.	Dynamic Modal Yazılımı için Yapılan Çalışmalar	88
2.3.1.1.	Laboratuvar Ortamında Üretilmiş Boru Kesitli Konsol Profil	88
2.3.1.1.1.	Model Geometrisi	88
2.3.1.1.2.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilerek Karşılaştırılması.....	89
2.3.1.2.	Trabzon Cephanelik Binası	92
2.3.1.2.1.	Model Geometrisi	92
2.3.1.2.2.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilerek Karşılaştırılması.....	93
2.3.1.3.	Tarihi Velipaşa Hanı.....	95
2.3.1.3.1.	Model Geometrisi	95
2.3.1.3.2.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilerek Karşılaştırılması.....	96
2.3.1.4.	Tarihi Ahşap Buzlupınar Köprüsü.....	99
2.3.1.4.1.	Model Geometrisi	99
2.3.1.4.2.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilerek Karşılaştırılması.....	100
2.3.1.5.	Eynel Köprüsü	103
2.3.1.5.1.	Model Geometrisi	103
2.3.1.5.2.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilerek Karşılaştırılması.....	104
2.3.2.	Dynamic Update Yazılımı İçin Yapılan Çalışmalar	107
2.3.2.1.	Laboratuvar Model Barajı	107
2.3.2.2.	Model Geometrisi	107
2.3.2.3.	Sonlu Eleman Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi	109
2.3.2.4.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle Hasarlı Modele Ait Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi	110
2.3.2.5.	Otomatik Sonlu Eleman Model Güncellemesi	112
2.3.3.	Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformu İçin Yapılan Çalışmalar	113
2.3.3.1.	Z24 Köprüsü	113
2.3.3.1.1.	Geometri Özellikleri	114

2.3.3.1.2.	Hasar Senaryoları	115
2.3.3.1.3.	Sensör Konfigürasyon Planı	116
2.3.3.1.4.	Geliştirilen Metodoloji Kapsamında Dinamik Karakteristiklerin Otomatik Olarak Belirlenmesi.....	117
2.3.3.1.5.	Uzun Süreli Yapı Sağlığı İzleme Verilerinde Anormallik Tespiti	122
2.3.3.1.5.1.	Dinamik Karakteristiklerin Bayes Sinir Ağları ile Güven Aralığının Belirlenmesi.....	122
2.3.3.1.5.2.	Geliştirilen Otokodlayıcı Tabanlı Metodoloji ile Anormallik Tespiti.....	125
2.3.3.2.	Trabzon Şehir Cami Minaresi.....	128
2.3.3.2.1.	Sensör Konfigürasyon Planı	128
2.3.3.2.2.	Geliştirilen Metodoloji Kapsamında Dinamik Karakteristiklerin Otomatik Olarak Belirlenmesi.....	130
2.3.3.2.3.	Dinamik Karakteristiklerin Bayes Sinir Ağları ile Güven Aralığının Belirlenmesi.....	134
2.3.3.3.	Çok Katlı Betonarme Bina	136
2.3.3.3.1.	Sensör Konfigürasyon Planı	137
2.3.3.3.2.	Geliştirilen Metodoloji Kapsamında Dinamik Karakteristiklerin Otomatik Olarak Belirlenmesi.....	138
2.3.3.3.3.	Dinamik Karakteristiklerin Bayes Sinir Ağları ile Güven Aralığının Belirlenmesi.....	143
2.3.3.4.	Tekkale Viyadüğü.....	145
2.3.3.4.1.	Sensör Konfigürasyon Planı	146
2.3.3.4.2.	Geliştirilen Metodoloji Kapsamında Dinamik Karakteristiklerin Otomatik Olarak Belirlenmesi.....	147
2.3.3.4.3.	Dinamik Karakteristiklerin Bayes Sinir Ağları ile Güven Aralığının Belirlenmesi.....	151
2.3.3.5.	Deriner Barajı	154
2.3.3.5.1.	Sensör Konfigürasyon Planı	154
2.3.3.5.2.	Geliştirilen Metodoloji Kapsamında Dinamik Karakteristiklerin Otomatik Olarak Belirlenmesi.....	156
2.3.3.5.3.	Dinamik Karakteristiklerin Bayes Sinir Ağları ile Güven Aralığının Belirlenmesi.....	160
2.3.3.6.	Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası	162
2.3.3.6.1.	Sensör Konfigürasyon Planı	163
2.3.3.6.2.	Geliştirilen Metodoloji Kapsamında Dinamik Karakteristiklerin Otomatik Olarak Belirlenmesi.....	164

2.3.3.6.3.	Dinamik Karakteristiklerin Bayes Sinir Ağları ile Güven Aralığının Belirlenmesi.....	168
2.3.3.7.	Rize-Artvin Havalimanı Terminal Binası.....	170
2.3.3.7.1.	Sensör Konfigürasyon Planı	171
2.3.3.7.2.	Şekil Değiştirme Ölçer Verilerin Bayes Sinir Ağları ile Güven Aralığının Belirlenmesi	173
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	176
4.	KAYNAKLAR.....	185

ÖZGEÇMİŞ



Doktora Tezi

ÖZET

MÜHENDİSLİK YAPILARINDA HASAR TESPİTİ VE UZUN SÜRELİ YAPI SAĞLIĞI İZLEMESİ İÇİN GELİŞTİRİLEN MÜHENDİSLİK YAZILIMLARI

Fatih Yesevi OKUR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNİŞİK
2023, 196 Sayfa

Bu tez çalışması kapsamında, mühendislik yapılarının mevcut durumlarının belirlenmesi, yapı sağlığının izlenmesi için birbirleriyle etkileşimli çalışabilecek mühendislik yazılımları ve yenilikçi metodolojilerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, mühendislik yapılarının dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla Dynamic Modal yazılımı, sonlu eleman model ile deneysel model arasındaki farkların minimuma indirgenmesi için otomatik sonlu eleman model güncelleme yapabilen Dynamic Update yazılımı ve uzun süreli Yapı Sağlığı İzleme amacıyla Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformu geliştirilmiştir. Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformu'nda gerçek zamanlı frekans takibi metodolojisi ve derin öğrenme tabanlı anormallik tespiti metodolojisi geliştirilmiştir. Ayrıca, çevresel faktörlerden kaynaklı yapıdan elde edilen belirsizliklerin Bayes Sinir Ağları kullanılarak güven aralığının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışma dört ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm, konu ile ilgili yapılan literatür araştırmasını, yapı sağlığı izleme ve sonlu eleman model güncellemesinde en sık kullanılan yöntemlere ait teorik formülasyonları içermektedir. İkinci bölümde, geliştirilen yazılımlar ve metodolojiler hakkında bilgiler verilmektedir. Ayrıca yazılımların ve metodolojilerin verimliliklerini doğrulamak amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda Dynamic Modal yazılımı için bir laboratuvar çalışması ve dört farklı mühendislik yapısında arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Dynamic Update yazılımı için ise laboratuvar ortamındaki üretilmiş baraj modeli üzerinde çalışma gerçekleştirilmiştir. Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformu'nda ise Z24 Köprüsü üzerinde doğrulama çalışmaları gerçekleştirilerek altı farklı mühendislik yapısı üzerinde arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmalardan elde edilen sonuçlar literatür ve ticari yazılımlar ile karşılaştırılarak irdelenmiştir. Çalışmanın son bölümünde elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak değerlendirilmekte ve bundan sonra yapılması düşünülen çalışmalar için öneriler sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yapı Sağlığı İzlemesi, Sonlu Eleman Model Güncellemesi, Otomatik Dinamik Karakteristik Belirleme, Anormallik Tespiti, Derin Öğrenme

PhD. Thesis

SUMMARY

DEVELOPMENT OF ENGINEERING SOFTWARES FOR DAMAGE DETECTION AND LONG-TERM STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF ENGINEERING STRUCTURES

Fatih Yesevi OKUR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK
2023, 196 Pages

In this thesis, it is aimed to develop engineering software and innovative methodologies that can work interactively with each other to determine the status of engineering structures and to monitor the health of the structures. For this purpose, Dynamic Modal software has been developed to determine the dynamic characteristics of engineering structures. Dynamic Update software that can automatically update the finite element model (FEM) to minimize the differences between the FEM and the experimental model. Also, Web Based Structural Health Monitoring Platform has been developed for long-term Structural Health Monitoring. Real-time frequency tracking methodology and deep learning-based anomaly detection methodology were developed in the Web Based Structural Health Monitoring Platform. In addition, it is aimed to determine the confidence interval of the uncertainties obtained from the structure caused by environmental factors by using Bayesian Neural Networks.

This study consists of four main parts. The first part includes the literature research on the subject, the theoretical formulations in structural health monitoring and FEM updating. In the second part, information about the developed software and methodologies is given. In addition, experimental studies were carried out to verify the efficiency of the software and methodologies. In experimental studies, a laboratory study in Dynamic Modal software and field studies in four different engineering structures were carried out. For the Dynamic Update software, a study was carried out on the dam model produced in the laboratory environment. On the Web-Based Structural Health Monitoring Platform, verification studies were carried out on the Z24 Bridge and field studies were carried out on six different engineering structures. The results obtained from the studies were examined by comparing them with the literature and commercial software. In the last part of the study, the results obtained are evaluated in detail and suggestions for future studies are presented.

Key Words: Structural Health Monitoring, Finite Element Model Updating, Automatic Dynamic Characteristics Tracking, Anomaly Detection, Deep Learning

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. İnsan vücudu ve YSİ karşılaştırması (Speckmann vd., 2004).....	5
Şekil 1.2. Yapı Sağlığı İzleme süreçlerine ait akış şeması	15
Şekil 1.3. Tez çalışması kapsamında kullanılan ivmeölçerlere ait görünüşler	18
Şekil 1.4. Şekil değiştirme ölçere ait genel görsel (İrsel, 2021).....	19
Şekil 1.5. Tipik Wheatstone köprüsü (Ang, 2014).....	19
Şekil 1.6. Yer değiştirme ölçer türlerine ait görsel resimler (Fleming, 2013).....	20
Şekil 1.7. Sensebox7003'e ait görsel.....	21
Şekil 1.8. Akustik emisyon sensör çalışmasına ait görsel (URL-1, 2022).....	21
Şekil 1.9. Meteorolojik veri ölçere ait görsel	22
Şekil 1.10. Zorlanmış Titreşim Yöntemi'ne ait a) şematik gösterim b) Frekans davranış fonksiyonunun belirlenmesi.....	28
Şekil 1.11. Bir, iki ve üç boyutlu sonlu eleman örnekleri	29
Şekil 1.12. Yapay sinir ağlarına ait görsel.....	37
Şekil 1.13. Nöron yapısına ait görsel (López-Monroy ve García-Salinas, 2022)	38
Şekil 1.14. Yapay sinir ağlarına öğrenme süreçlerine ait görsel (Fourati vd., 2021).....	40
Şekil 1.15. Standart yapay sinir ağları ve Bayes sinir ağları modelinin karşılaştırması (Pan ve Mishra, 2022).....	41
Şekil 1.16. Otokodlayıcı ağına ait görsel (Dutta vd., 2021)	42
Şekil 2.1. Geliştirilen mühendislik yazılımlarına ait akış şeması.....	44
Şekil 2.2. Dynamic Modal yazılımına ait akış şeması.....	45
Şekil 2.3. Dynamic Modal yazılım bölümlerine ait ekran görüntüleri.....	46
Şekil 2.4. Dynamic Modal yazılım menü butonlarına ait ekran görüntüleri	49
Şekil 2.5. Dynamic Modal yazılımında yeni proje dosyası oluşturma.....	53
Şekil 2.6. Dynamic Modal yazılımında yeni proje dosyasının kaydedilmesi	53
Şekil 2.7. Dynamic Modal yazılımında yeni proje dosyası oluşturma.....	54
Şekil 2.8. Dynamic Modal yazılımında yeni proje dosyası oluşturma.....	54
Şekil 2.9. Dynamic Modal yazılımında modelleme yapılabilecek eleman tiplerine ait görsel	55
Şekil 2.10. Dynamic Modal yazılımında sensör yönlerinin tanımlanmasına ait görsel	56

Şekil 2.11.	Dynamic Modal yazılımında GTFAA yönteminden elde edilen grafiğe ait görsel.....	57
Şekil 2.12.	Dynamic Modal yazılımında SAB yönteminden elde edilen stabilizasyon grafiğine ait görsel.....	57
Şekil 2.13.	Dynamic Modal yazılımında SAB yönteminden elde edilen stabilizasyon noktalarına ait mod grafiğine	58
Şekil 2.14.	Dynamic Modal yazılımında GFTAA ve SAB yöntemleri kullanılarak MAC ve COMAC yöntemlerinden elde edilen korelasyon grafiğine ait görsel	58
Şekil 2.15.	Dynamic Update yazılımına ait akış şeması	60
Şekil 2.16.	Dynamic Update yazılımına ait genel görünüş	60
Şekil 2.17.	Dynamic Update yazılımında çubuk eleman modeline ait görsel.....	61
Şekil 2.18.	Dynamic Update yazılımında ait alan eleman modeline ait görsel.....	61
Şekil 2.19.	Dynamic Update yazılımında katı eleman modeline ait görsel.....	62
Şekil 2.20.	Dynamic Update yazılımı üst menü butonlarına ait görsel	63
Şekil 2.21.	Dynamic Update yazılımında sonlu eleman ve deneysel modelinin sisteme aktarılmasına ait görsel.....	67
Şekil 2.22.	Dynamic Update yazılımında sonlu eleman ile deneysel modelin düğüm noktası eşleştirmesine ait görsel.....	68
Şekil 2.23.	Dynamic Update yazılımında belirsiz parametre seçilmesiyle ilgili pencereye ait görsel.....	69
Şekil 2.24.	Dynamic Update yazılımında belirsiz parametre oluşturulmasına ait görsel	70
Şekil 2.25.	Dynamic Update yazılımında bütünsel parametre listesine ait örnek görsel	70
Şekil 2.26.	Dynamic Update yazılımında yerel parametre listesine ait örnek görsel.....	71
Şekil 2.27.	Dynamic Update yazılımında elde edilen duyarlılık analizine ait görsel.....	72
Şekil 2.28.	Dynamic Update yazılımında belirsiz parametrelerin duyarlılık analizi sonucunda elde edilen değerlere ait görsel.....	73
Şekil 2.29.	Dynamic Update yazılımında otomatik model güncellemeye ait görsel.....	74
Şekil 2.30.	Dynamic Update yazılımında parametre değişimlerine ait görsel	74
Şekil 2.31.	Dynamic Update yazılımında parametre değişim listesine ait görsel	75
Şekil 2.32.	Dynamic Update yazılımında dinamik karakteristikler arasındaki korelasyona ait görsel.....	75
Şekil 2.33.	Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformuna ait akış şeması	76
Şekil 2.34.	Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformu giriş ekranına ait görsel	77

Şekil 2.35.	Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda izlenen yapılara ait görsel	78
Şekil 2.36.	Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda izlenen yapının ekran sayfasına ait görsel	78
Şekil 2.37.	Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda izlenen yapının gerçek zamanlı grafiklerine ait görsel	79
Şekil 2.38.	GFTAA yönteminde pik noktasına ait frekans hakim bölgesi ile ilgili görsel	81
Şekil 2.39.	Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda frekans takibi için geliştirilen metodolojiye ait akış şeması	83
Şekil 2.40.	Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda anormallik tespiti için geliştirilen Otokodlayıcı tabanlı metodolojiye ait akış şeması.....	87
Şekil 2.41.	Laboratuvar ortamında üretilmiş konsol boru profiline ait geometrik bilgiler ve görünürlere ait görsel (Okur, 2017).....	88
Şekil 2.42.	Laboratuvar ortamında üretilmiş konsol boru profiline ait ivmeölçerlerin yerleşim yerleri	89
Şekil 2.43.	Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarından elde edilen spektral yoğunluk matrisleri.....	89
Şekil 2.44.	Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarından elde edilen kararlılık diyagramı	90
Şekil 2.45.	Laboratuvar ortamında üretilmiş boru kesitli konsol profilinin deneysel ölçümlerden elde edilen mod şekilleri	91
Şekil 2.46.	Trabzon Cephanelik Binasına ait geometrik bilgiler ve görünüş	92
Şekil 2.47.	Trabzon Cephanelik Binasına ait ivmeölçer yerleşim planı.....	93
Şekil 2.48.	Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarından elde edilen spektral yoğunluk matrisleri.....	93
Şekil 2.49.	Trabzon Cephanelik Binasının deneysel ölçümlerden elde edilen mod şekilleri	94
Şekil 2.50.	Tarihi Velipaşa Hanı'na ait genel görseller.....	95
Şekil 2.51.	Tarihi Velipaşa Hanı'na ait geometrik bilgiler ve kat planları.....	96
Şekil 2.52.	Tarihi Velipaşa Hanı'na ait ivmeölçer yerleşim planı	97
Şekil 2.53.	Tarihi Velipaşa Hanı için Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarından elde edilen spektral yoğunluk matrisleri	98
Şekil 2.54.	Tarihi Velipaşa Hanı'na ait deneysel ölçümlerden elde edilen mod şekilleri	98
Şekil 2.55.	Tarihi Ahşap Buzlupınar Köprüsü'ne ait genel görseller.....	100
Şekil 2.56.	Tarihi Ahşap Buzlupınar Köprüsü'ne ait geometrik bilgiler	100
Şekil 2.57.	Tarihi Ahşap Buzlupınar Köprüsü'ne ait ivmeölçer yerleşim planı	101

Şekil 2.58.	Tarihi Ahşap Buzlupınar Köprüsü'ne ait Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarından elde edilen spektral yoğunluk matrisleri	101
Şekil 2.59.	Tarihi Ahşap Buzlupınar Köprüsü'ne ait Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarından elde edilen kararlılık diyagramı	102
Şekil 2.60.	Tarihi Buzlupınar Köprüsü'ne ait deneysel ölçümlerden elde edilen mod şekilleri	103
Şekil 2.61.	Eynel Köprüsü'ne ait genel görseller	104
Şekil 2.62.	Eynel Köprüsü'ne ait geometrik bilgiler	104
Şekil 2.63.	Eynel Köprüsü'ne ait ivmeölçer yerleşim planı	105
Şekil 2.64.	Eynel Köprüsü'ne ait Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarından elde edilen spektral yoğunluk matrisleri	105
Şekil 2.65.	Eynel Köprüsü'ne ait Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarından elde edilen kararlılık diyagramı	106
Şekil 2.66.	Eynel Köprüsü'ne ait deneysel ölçümlerden elde edilen mod şekilleri	106
Şekil 2.67.	Laboratuvar baraj modeline ait geometrik bilgiler (Sevim, 2010).....	108
Şekil 2.68.	Laboratuvar baraj modeline ait bazı fotoğraflar (Sevim, 2010).....	108
Şekil 2.69.	Dynamic Update yazılımına aktarılan laboratuvar baraj modeline ait görsel	109
Şekil 2.70.	Dynamic Update yazılımına aktarılan laboratuvar baraj modeline ait mod şekilleri	109
Şekil 2.71.	Hasarlı laboratuvar modeline ait genel görseller (Altunışık vd. 2014).....	111
Şekil 2.72.	Laboratuvar baraj modelinde belirsiz parametrelere ait Duyarlılık Analizi sonuçları	112
Şekil 2.73.	Laboratuvar baraj modelinde otomatik sonlu eleman model güncellemesi ile elde edilen elastisite modülündeki değişim dağılımları	113
Şekil 2.74.	Z24 Köprüsü'ne ait genel görünüşler (Kramer vd., 2003)	114
Şekil 2.75.	Z24 Köprüsü'ne ait kesit görünüşleri (Birimler metre dir) (Maech ve Roeck, 2003)	115
Şekil 2.76.	Z24 Köprüsü'ne ait ivmeölçer yerleşim planı (a) ve sıcaklık ölçer sensör yerleşimleri (b) (Kramer vd.,1999).....	116
Şekil 2.77.	Z24 Köprüsü'ne ait OMA (2023) yazılımından elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri	118
Şekil 2.78.	Z24 Köprüsü'nde 1.ölçüm (a), 2.ölçüm (b), 3.ölçüm (c), 4.ölçüm (d) ve 5.ölçümden (e) elde edilen frekans hakim aralıkları ve eşik sınırları	119
Şekil 2.79.	Geliştirilen metodoloji kapsamında Z24 Köprüsü'ne ait elde edilen frekansların zamana göre değişimleri	121
Şekil 2.80.	Z24 Köprüsü'ne ait Peeters ve Roeck (2001) tarafından elde edilen frekansların zamana bağlı değişimleri.....	121

Şekil 2.81.	Z24 Köprüsü'nde 1. Mod (a), 2.Mod (b), 3.Mod (c) ve 4.Mod (d) ait Bayes Sinir Ağı modeli ile elde edilen güven aralığının farklı hasar durumlarına ait grafik.....	123
Şekil 2.82.	Z24 Köprüsü'ne ait farklı gürültü oranlarına sahip (%0, %0,5, %1, %1,5) sinyallerin GFTAA yöntemi kullanılarak hesaplanan birinci tekil değerlerine ait grafik	125
Şekil 2.83.	Z24 Köprüsü'nde %0 (a), %0,5 (b), %1,0 (c), %1,5 (d), %2 (e) gürültü oranına sahip ham sinyaller kullanılarak elde edilen Otokodlayıcı modeli ile farklı hasar durumlarından elde edilen yeniden yapılandırma hatası grafiği	126
Şekil 2.84.	Trabzon Şehir Cami Minaresi'ne ait genel görseller	128
Şekil 2.85.	Trabzon Şehir Cami Minaresi'ne ait ivmeölçer sensör yerleşimi (a) ve sensör kurulumlarına (b) ait görsel.....	129
Şekil 2.86.	Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda Trabzon Şehir Cami Minaresi'ne ait ana sayfa görsel ekranı	129
Şekil 2.87.	Trabzon Şehir Cami Minaresi'ne ait OMA (2023) yazılımından elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri.....	130
Şekil 2.88.	Trabzon Şehir Cami Minaresi'ne ait OMA (2023) yazılımından GFTAA yöntemine göre elde edilen frekanslara ait mod şekilleri	131
Şekil 2.89.	Trabzon Şehir Cami Minaresi'ne ait 1.ölçüm (a), 2.ölçüm (b), 3.ölçüm (c), 4.ölçüm (d) ve 5.ölçümden (e) elde edilen frekans hakim aralıkları ve eşik sınırları	131
Şekil 2.90.	Geliştirilen metodoloji kapsamında Trabzon Şehir Cami Minaresi'ne ait elde edilen frekansların zamana göre değişimleri	134
Şekil 2.91.	Trabzon Şehir Cami Minaresi'nde 1. Mod (a), 2.Mod (b), 3.Mod (c) ve 4.Mod (d) ait Bayes Sinir Ağı modeli ile elde edilen frekans güven Aralığı.....	135
Şekil 2.92.	Trabzon İli Yomra İlçesinde yer alan Çok Katlı Betonarme Bina'ya ait görsel	137
Şekil 2.93.	Çok Katlı Betonarme Bina'ya ait ivmeölçer sensör yerleşimi (a) ve sensör kurulumlarına (b) ait görsel.....	137
Şekil 2.94.	Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda Çok Katlı Betonarme Bina'ya ait ana görsel ekranı	138
Şekil 2.95.	Çok Katlı Betonarme Bina'ya ait OMA (2023) yazılımından elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri	139
Şekil 2.96.	Çok Katlı Betonarme Bina'ya ait OMA (2023) yazılımından GFTAA yöntemine göre elde edilen frekanslara ait mod şekilleri.....	140
Şekil 2.97.	Çok Katlı Betonarme Bina'ya ait 1.ölçüm (a), 2.ölçüm (b), 3.ölçüm (c), 4.ölçüm (d) ve 5.ölçümden (e) elde edilen frekans hakim aralıkları ve eşik sınırları	140

Şekil 2.98.	Geliştirilen metodoloji kapsamında Çok Katlı Betonarme Bina'ya ait elde edilen frekansların zamana göre değişimleri	142
Şekil 2.99.	Çok Katlı Betonarme Bina'da 1. Mod (a), 2.Mod (b), 3.Mod (c), 4.Mod (d) ve 5.Mod (e) ait Bayes Sinir Ağı modeli ile elde edilen frekans güven aralığı	144
Şekil 2.100.	Tekkale Viyadüğü'ne ait görseller	146
Şekil 2.101.	Tekkale Viyadüğü'nde ivmeölçer sensör yerleşimine ait görsel	147
Şekil 2.102.	Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda Tekkale Viyadüğü'ne ait ana görsel ekranı.....	147
Şekil 2.103.	Tekkale Viyadüğü'ne ait OMA (2023) yazılımından elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri	148
Şekil 2.104.	Tekkale Viyadüğü'ne ait OMA (2023) yazılımından GFTAA yöntemine göre elde edilen frekanslara ait mod şekilleri.....	148
Şekil 2.105.	Tekkale Viyadüğü'ne ait 1.ölçüm (a), 2.ölçüm (b), 3.ölçüm (c), 4.ölçüm (d) ve 5.ölçümden (e) elde edilen frekans hakim aralıkları ve eşik sınırları	149
Şekil 2.106.	Geliştirilen metodoloji kapsamında Tekkale Viyadüğü'ne ait elde edilen frekansların zamana göre değişimleri	151
Şekil 2.107.	Tekkale Viyadüğü'nde 1. Mod (a), 2.Mod (b), 3.Mod (c), 4.Mod (d) ve 5.Mod (e) ait Bayes Sinir Ağı modeli ile elde edilen frekans güven aralığı.....	152
Şekil 2.108.	Deriner Barajı'na ait genel görseller	154
Şekil 2.109.	Deriner Barajı'na ait ivmeölçer sensör yerleşimi (a) ve sensör kurulumlarına (b) ait görsel.....	155
Şekil 2.110.	Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda Deriner Barajı'na ait ana görsel ekranı.....	155
Şekil 2.111.	Deriner Barajı'na ait OMA (2023) yazılımından elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri	156
Şekil 2.112.	Deriner Barajı'na ait OMA (2023) yazılımından GFTAA yöntemine göre elde edilen frekanslara ait mod şekilleri.....	157
Şekil 2.113.	Deriner Barajı'na ait 1.ölçüm (a), 2.ölçüm (b), 3.ölçüm (c), 4.ölçüm (d) ve 5.ölçümden (e) elde edilen frekans hakim aralıkları ve eşik sınırları.....	157
Şekil 2.114.	Geliştirilen metodoloji kapsamında Artvin Deriner Barajı'na ait elde edilen frekansların zamana göre değişimleri	159
Şekil 2.115.	Trabzon Şehir Cami Minaresi'nde 1. Mod (a), 2.Mod (b), 3.Mod (c) ve 4.Mod (d) ve 5.Mod (e) ait Bayes Sinir Ağı modeli ile elde edilen frekans güven aralığı	161
Şekil 2.116.	Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası'na ait genel görseller (URL-2, 2022; URL-3, 2023)	162

Şekil 2.117. Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası'na ait ivmeölçer sensör yerleşimi (a) ve sensör kurulumlarına (b) ait görsel	163
Şekil 2.118. Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası'na ait ana görsel ekranı.....	164
Şekil 2.119. Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kulesi'ne ait OMA (2023) yazılımından elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri	164
Şekil 2.120. Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası'na ait OMA (2023) yazılımından GFTAA yöntemine göre elde edilen frekanslara ait mod şekilleri	165
Şekil 2.121. Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası'na ait 1.ölçüm (a), 2.ölçüm (b), 3.ölçüm (c), 4.ölçüm (d) ve 5.ölçümden € elde edilen frekans hakim aralıkları ve eşik sınırları	166
Şekil 2.122. Geliştirilen metodoloji kapsamında Artvin Deriner Barajı'na ait elde edilen frekansların zamana göre değişimleri	168
Şekil 2.123. Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası'nda 1. Mod (a), 2.Mod (b), 3.Mod (c) ve 4.Mod (d) ve 5.Mod € ait Bayes Sinir Ağı modeli ile elde edilen frekans güven aralığı.....	169
Şekil 2.124. Rize-Artvin Havalimanı Terminal Binası'na ait genel görseller	171
Şekil 2.125. Rize-Artvin Havalimanı Terminal Binası'na ait şekil değiştirme ölçerlere ait çatı yerleşim planı (a) ve kurulumlarına (b) ait görsel	172
Şekil 2.126. Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda Rize-Artvin Havalimanı Terminal Binası'na ait ana görsel ekranı.....	172
Şekil 2.127. Rize-Artvin Havalimanı Terminal Binası'nda şekil değiştirme ölçer verilerine ait Bayes Sinir Ağı modeli ile elde edilen güven aralığı	174

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1	İvmeölçerlere ait genel özellikler..... 18
Tablo 1.2	Sensebox7003'e ait genel özellikler 21
Tablo 1.3	Meteorolojik veri ölçere ait genel özellikler 22
Tablo 1.4	Yaygın olarak kullanılan aktivasyon fonksiyonları (Tharsanee vd., 2021) 39
Tablo 2.1	Dynamic Modal yazılımı ana ekran bölümüne ait üst menü butonları..... 50
Tablo 2.2	Dynamic Modal yazılımı kurulum ekran bölümüne ait üst menü butonları..... 50
Tablo 2.3	Dynamic Modal yazılımı modelleme bölümüne ait üst menü butonları..... 50
Tablo 2.4	Dynamic Modal yazılımı analiz bölümüne ait üst menü butonları..... 51
Tablo 2.5	Dynamic Update yazılımı ana menüsüne ait butonlar ve açıklamaları..... 64
Tablo 2.6	Dynamic Update model menüsüne ait butonlar ve açıklamaları 64
Tablo 2.7	Dynamic Update tanımlama menüsüne ait butonlar ve açıklamaları 65
Tablo 2.8	Dynamic Update analiz menüsüne ait butonlar ve açıklamaları..... 66
Tablo 2.9	Laboratuvar ortamında üretilmiş boru kesitli konsol profilinin deneysel ölçümlerden elde edilen frekansların karşılaştırılması 91
Tablo 2.10	Trabzon Cephanelik Binasının deneysel ölçümlerden elde edilen frekansların karşılaştırılması..... 94
Tablo 2.11	Tarihi Velipaşa Hanı'na ait deneysel ölçümlerden elde edilen frekansların karşılaştırılması..... 99
Tablo 2.12	Tarihi Buzlupınar Köprüsü'ne ait deneysel ölçümlerden elde edilen frekansların karşılaştırılması..... 103
Tablo 2.13	Eynel Köprüsü'ne ait deneysel ölçümlerden elde edilen frekansların karşılaştırılması..... 107
Tablo 2.14	Dynamic Update yazılımından elde edilen frekanslarla Çevresel Titreşim Yöntemi ile elde edilen frekansların (Sevim, 2010) karşılaştırılması..... 110
Tablo 2.15	Hasarsız ve hasarlı laboratuvar model kullanılarak Çevresel Titreşim Yöntemi ile elde edilen frekansların karşılaştırılması 111
Tablo 2.16	Laboratuvar modeline ait otomatik sonlu eleman model güncellemesi ile Dynamic Update yazılımından elde edilen frekansların karşılaştırılması..... 113
Tablo 2.17.	Z24 Köprüsü'ne ait hasar senaryoları (Teughels ve Roeck,2004)..... 116

Tablo 2.18.	Z24 Köprüsü’nden elde edilen frekansların karşılaştırılması	118
Tablo 2.19.	Z24 Köprüsü’nde beş farklı ölçüm veri setinden elde edilen frekanslara karşılık gelen frekans güven aralığına ait minimum eşik değerleri	120
Tablo 2.20.	Z24 Köprüsü’nde Bayes Sinir Ağı model eğitiminde çeşitli katman sayılarından elde edilen kök ortalama karesel hata.....	123
Tablo 2.21.	Trabzon Şehir Cami Minaresi’ne ait GFTAA yönteminden elde edilen frekanslar.....	130
Tablo 2.22.	Trabzon Şehir Cami Minaresi’nde beş farklı ölçüm veri setinden elde edilen frekanslara karşılık gelen frekans güven aralığına ait minimum eşik değerleri.....	133
Tablo 2.23.	Trabzon Şehir Cami Minaresi’nde Bayes Sinir Ağı model eğitiminde çeşitli katman sayılarından elde edilen kök ortalama karesel hata değerleri	135
Tablo 2.24.	Çok Katlı Betonarme Bina’ya ait GFTAA yönteminden elde edilen frekanslar.....	139
Tablo 2.25.	Çok Katlı Betonarme Bina’ya ait beş farklı ölçüm veri setinden elde edilen frekanslara karşılık gelen frekans güven aralığına ait minimum eşik değerleri	142
Tablo 2.26.	Çok Katlı Betonarme Bina’da Bayes Sinir Ağı model eğitiminde çeşitli katman sayılarından elde edilen kök ortalama karesel hata	143
Tablo 2.27.	Tekkale Viyadüğü’ne ait GFTAA yönteminden elde edilen frekanslar	148
Tablo 2.28.	Tekkale Viyadüğü’ne ait beş farklı ölçüm veri setinden elde edilen frekanslara karşılık gelen frekans güven aralığına ait minimum eşik değerleri.....	151
Tablo 2.29.	Tekkale Viyadüğü’nde Bayes Sinir Ağı model eğitiminde çeşitli katman sayılarından elde edilen kök ortalama karesel hata.....	152
Tablo 2.30.	Deriner Barajı’na ait GFTAA yönteminden elde edilen frekanslar.....	156
Tablo 2.31.	Deriner Barajı’na ait beş farklı ölçüm veri setinden elde edilen frekanslara karşılık gelen frekans güven aralığına ait minimum eşik değerleri.....	159
Tablo 2.32.	Artvin Deriner Barajı’nda Bayes Sinir Ağı model eğitiminde çeşitli katman sayılarından elde edilen kök ortalama karesel hata.....	160
Tablo 2.33.	Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası’na ait GFTAA yönteminden elde edilen frekanslar	165
Tablo 2.34.	Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası’na ait beş farklı ölçüm veri setinden elde edilen frekanslara karşılık gelen frekans güven aralığına ait minimum eşik değerleri.....	167
Tablo 2.35.	Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası’nda Bayes Sinir Ağı model eğitiminde çeşitli katman sayılarından elde edilen kök ortalama karesel hata.....	169

Tablo 2.36. Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası’nda Bayes Sinir Ağı model eğitiminde çeşitli katman sayılarından elde edilen kök ortalama karesel hata.....	174
--	-----



SEMBOLLER DİZİNİ

$G_{xx}(j\omega)$	Etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk (GSY) Fonksiyonunu
$G_{yy}(j\omega)$	Tepki sinyalinin GSY Fonksiyonunu
$H(j\omega)$	Frekans davranış fonksiyonu
T	Transpoze
U_{ij}	Tekil vektörü
s_{ij}	Skaler tekil değerler
M	Kütle
C	Sönüm
K	Rijitlik matrisi
$R(t)$	Titreşim kuvveti
$U(t)$	Yer değiştirme vektörü
$\dot{U}(t)$	Hız vektörü
$\ddot{U}(t)$	İvme vektörü
$R(t)$	Kuvvet vektörü
A^*	Durum matrisi
B^*	Veri matrisi
$x(t)$	Durum vektörü
C^*	Sistem davranış matrisi
D^*	Doğrudan iletişim matrisi
$x_k=x(k\Delta t)$	Ayrık-zaman durum vektörü
u_k	Etki sinyal vektörü
w_k	Gürültü sinyallerini,
v_k	Sensöre ait gürültü sinyali
E^*	Beklenen değer operatörü
δ_{pq}	Kronecker deltası
u_k	Belirgin sinyal verisi

$H_{ik}(i\omega)$	Frekans Davranış Fonksiyonu
$X_i(\omega)$	Frekans tanım alanındaki tepki fonksiyonu
$Y_k(\omega)$	Frekans tanım alanındaki etki fonksiyonu
$[M]$	Kütle matrisi
$[C]$	Sönüm matrisi
$[K]$	Rijitlik matrisi
$\{x(t)\}$	Yer değiştirme vektörü
$\{\dot{x}(t)\}$	Hız vektörü
$\{\ddot{x}(t)\}$	İvme vektörü
$\{F(t)\}$	Kuvvet vektörü
Δ	Değişim oranı
ϕ_{xi}, ϕ_{yj}	Sırasıyla x ve y modellerine ait mod şekil vektörleri
R_i	Tepki değerleri
P_j	Parametre değerleri
YK	Yakınsama kriteri
C_{R_i}	Beklenen hata oranı
N	Mod sayısı
f_i	Frekans değeri
$\{R\}$ ve $\{R^e\}$	Sonlu eleman model ile deneysel modal vektörleri
$\{P\}$ ve $\{P^0\}$	Güncellenen modelin ve başlangıç modelinin parametre vektörleri
$[C_R]$	Deneysel parametrelerin ağırlık matrisi
$[C_p]$	Model parametrelerin ağırlık matrisi
H	Ağırlaştırılmış hata fonksiyonunu
$[G]$	Kazanım matrisi
y_i	Ağın ürettiği çıktı değeri
N	Veri sayısı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte, mühendislik yapılarının tasarımları bilgisayar destekli yöntemler kullanılarak kolayca yapılabilmektedir. Yapıların projelendirilme aşamasında analitik çözümlerin yapılması zor olduğundan dolayı işlem hacmini azaltmak amacıyla sayısal yöntemler (Sonlu Eleman Yöntemi, Sonlu Farklar Yöntemi vs.) kullanılmakta ve elde edilen analizler yardımıyla modal, statik, dinamik, lineer ve lineer olmayan davranışlar belirlenebilmektedir. İnşaat mühendisliğinde yapıların projelendirilme aşamasında yapılan kabuller, üretim aşamasında projede belirlenen hedeflerin tam olarak sağlanamaması ya da yıllar içerisinde yapının çeşitli etkilere (farklı yüklemeler sonucu oluşan çatlamlar, yorulmalar, mesnet çökmeleri vb.) maruz kalması ile yapısal davranış zaman içerisinde proje aşamasında öngörülen seviyelerden/değerlerden uzaklaşabilmektedir. Bu belirsizliği ortadan kaldırmak amacıyla, mühendislik yapılarının mevcut durumlarının belirlenmesi, oluşabilecek hasar seviyelerinin ve hasar bölgelerinin tahmin edilmesi, sürekli ölçümler yardımıyla yapı sağlığının izlenerek ileride oluşabilecek can ve mal kayıplarının önüne geçilmesi gerekmektedir.

Yapı Sağlığı İzleme (YSİ), bir yapının yapısal elemanlarının ve tamamının güvenli bir şekilde işlev gördüğünden emin olmak için yapılan bir takip ve denetim sürecidir. Bu süreç, mühendislik yapılarının inşasından yıkımına kadar olan zaman diliminde yapılabilmektedir. YSİ ile yapının sağlıklı bir şekilde kullanımını amaçlanmaktadır. Aynı zamanda, bu süreç ile yapının güvenliği ve performansı takip edilebilmektedir. YSİ için çeşitli sensörlerden faydalanılmakta olup, genellikle çeşitli hareketleri ve deformasyonları ölçebilen ivmeölçer, şekil değiştirme ölçer, yer değiştirme ölçer, eğim ölçer, optik sensörler, manyetik sensörler, termal sensörler ve benzeri cihazlardan oluşmaktadır. Bu sensörler, yapının hareketlerini, deformasyonlarını, gerilmelerini ölçerek yapıda mevcut ya da oluşabilecek hasarların varlığını belirleyerek yapının güvenliğinin tespitinde önemli bir fayda sağlamaktadır.

Hasar tespiti, bir yapının hasarlı olduğunu veya hasar gördüğünü tespit etmek için yapılan bir süreçtir. Bu süreç, yapının güvenli bir şekilde kullanımını sağlamak amacıyla yapılır. Hasar tespiti ile yapısal elemanların hasarlı olup olmadığı ve bu elemanların güvenli bir şekilde işlev gördüğünün tespiti yapılabilmektedir. Hasar tespitinde, yapının güvenliğini

ve performansını belirlemek önemlidir. Bu süreçte, yapısal elemanlar sensörler veya görsel muayene ile incelenir ve hasarlı olup olmadıkları tespit edilir. Eğer hasarlı bileşenler tespit edilirse, bu bileşenlerin onarılması/güçlendirilmesi ya da değiştirilmesi gerekmektedir.

Hasar tespiti ve YSİ, bir yapının güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için önemli iki süreçtir. Bu süreç birbiriyle bağlantılıdır ve yapının güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için birlikte çalışırlar. Hasar tespiti sonucunda bir yapıya ait yapısal elemanların hasarlı olduğu tespit edilirse, bu yapısal elemanların onarılması/güçlendirilmesi ya da değiştirilmesi gerekir. Bu elemanların onarım/güçlendirme ya da değiştirilmesi işlemi, YSİ sürecini etkileyecektir ve bu süreçte yapının hareketleri ve deformasyonları tekrar ölçülerek yapının güvenli bir şekilde işlev gördüğünden emin olunacaktır. Bu şekilde, hasar tespiti ve YSİ birlikte çalışarak yapının güvenli bir şekilde kullanılabilmesini sağlamaktadır.

Hasar tespiti veya durum değerlendirmesi analitik/sayısal ve deneysel modeller üzerinden yapılabilmektedir. Analitik/sayısal modellere ait veriler ve deneysel olarak elde edilen veriler kullanılarak aralarında oluşabilecek farklılıkların ölçüm verilerine göre iyileştirilmesi gerekmektedir. Böylelikle analitik/sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki farklılıklar minimum seviyeye indirgenerek, yapının mevcut durumu hakkında bilgi edinilebilmektedir. Deneysel modeller üzerinden elde edilen referans verilerine dayalı olarak çeşitli yöntemler ile yapıların mevcut durumu hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir.

Yapıların mevcut durum değerlendirmesi veya hasar tespiti yapılabilmesi için deneysel verilerin uygun bir şekilde elde edilmesi çok önemlidir. Deneysel olarak statik (gerilme, şekil değiştirme ve yer değiştirme vb.) ve dinamik (frekans, mod şekli ve sönüm oranı) tepkiler elde edilerek verilerin işlenmesinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Statik tepkileri ölçmek, dinamik tepkileri ölçmekten daha kolay olmasına rağmen mevcut durum değerlendirmesi veya hasarın neden olduğu değişikliklere karşı hassasiyeti daha az olmaktadır (Doebeling vd., 1998). Bu nedenle yapıların değerlendirmesinde dinamik yöntemler daha çok kullanılmaktadır. Yapıların dinamik davranışları frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristiklerin elde edilmesi ile belirlenebilmektedir. Bu amaçla en yaygın yöntem Titreşime Dayalı Yöntemlerdir. Titreşime dayalı yöntemlerden en çok Çevresel Titreşim Yöntemi ve Zorlanmış Titreşim Yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde analitik/sayısal modellerden elde edilen analizler sonucunda modal hareket noktalarına hassas ivmeölçer sensörleri yerleştirilerek sinyaller toplanmakta ve bu sinyaller veri toplama ünitesi aracılığıyla çeşitli yazılımlarda işlenerek yapıya ait dinamik karakteristikler elde edilebilmektedir.

Analitik/sayısal modellerin kullanılmasıyla birlikte, deneysel olarak elde edilen veriler arasında oluşabilecek farklılıkların minimize edilmesi gerekmektedir. Analitik yöntemler, sayısal yöntemlere göre daha kesin sonuç vermesine rağmen kompleks yapılarda analizlerin yapılması zorlu bir süreci kapsamaktadır. Bu nedenle analitik yöntemden daha çok sayısal yöntemler tercih edilmektedir. Sayısal yöntemlerde en çok kullanılan yöntem Sonlu Eleman Analiz Yöntemi'dir. Sonlu eleman analizi, bir yapının statik ve dinamik yükler altında nasıl bir yapısal tepki verdiğini inceleyen sayısal yöntemdir. Bu yöntemde, yapının bir bütün olarak nasıl çalıştığını anlamak için parçalara bölünen yapısal elemanların her bir parçasının nasıl çalıştığı incelenmektedir. Sonlu eleman modeli ile deneysel veriler arasında oluşabilecek farklılıkların iyileştirilmesi işlemi Sonlu Eleman Model Güncelleme olarak tanımlanmaktadır. Sonlu Eleman Model Güncellemesinde deneme yanılma yöntemi veya optimizasyona dayalı algoritmalar kullanılarak model iyileştirmesi yapılabilmektedir. Bu sayede yapının mevcut durumunu yansıtan sonlu eleman modeli elde edilebilmektedir.

Yapının, inşasından yıkımına kadar geçen süreçte, yapının periyodik/sürekli olarak yapı sağlığının izlenmesi gerekmektedir. Mevcut yapı stoğunun fazla olduğu düşünüldüğünde elde edilen veri boyutunun da fazla olması, verileri yorumlayabilecek insan iş gücünün artacağını da açıkça göstermektedir. Fakat son yıllarda veri biliminin gelişmesi ile bilgisayar sistemlerinin öğrenme sürecini destekleyen Derin Öğrenme kavramları ortaya çıkmıştır. Derin öğrenme, sensör verilerini veya onlardan elde edilen çıktıları kullanarak öğrenme sürecini gerçekleştirir. Derin öğrenme, verilerde bulunan özellikleri tespit ederek bu özelliklerin kullanılmasıyla tahminler yapar. Derin öğrenme sistemleri, çok sayıda gizli katmanı olan ağırlıklandırılmış sinir ağları kullanır ve bu ağlar veri setlerini kullanarak öğrenme sürecini gerçekleştirir. Böylece bu yöntem ile yapılarda anormallik/hasar tespitinde bulunabilir. Fakat verilerin değerlendirilmesi için donanımsal altyapıya sahip çeşitli yazılımlar gereklidir. Yazılım fiyatlarının pahalı olması, bazı yazılımların paketler halinde sunulması, mevcut yazılımların algoritmalarının kapalı olması, sayısal çözüm yöntemlerinin oldukça kısıtlı bir miktarda kullanıcıya sunulması, ara işlemlerin kontrol edilememesi, yeni geliştirilen algoritmaların yazılımlara entegre edilememesi, farklı yazılımların birbirleriyle uyumlu çalışmaması gibi birçok neden birbirleriyle etkileşimli çalışabilen yazılımların geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

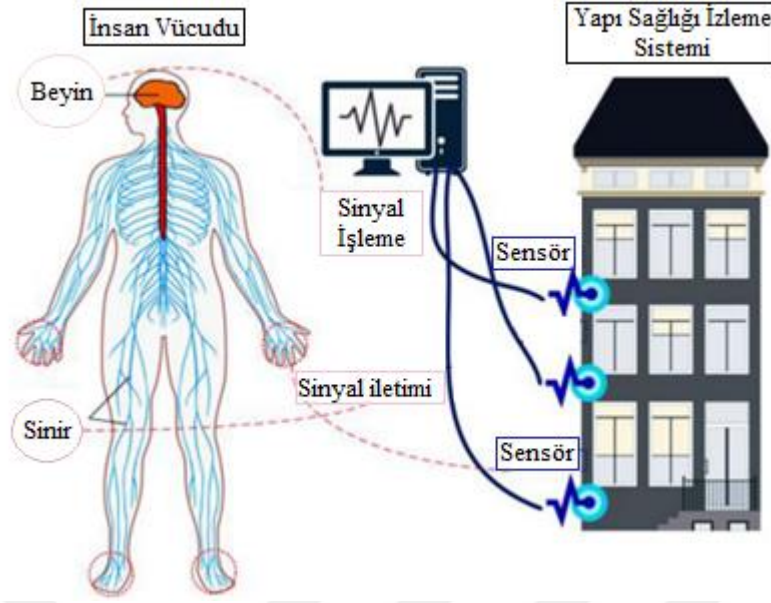
1.2.1. Yapı Sağlığı İzlemesi Konusunda Yapılmış Çalışmalar

Yapı Sağlığı İzlemesi (YSİ) ile bir sistemin mevcut mekanik durumunu ve tepkilerini değerlendirerek, o sistemin nasıl davrandığı hakkında bilgiler sağlamaktadır. Bu sistemler laboratuvar modeli, köprü, bina, tarihi yapılar gibi mühendislik yapıları olabilmektedir. Başlangıçta YSİ, havacılık mühendisliği ve endüstri alanında uçak hasarını belirlemek için kullanılmıştır. Ancak, 1970'lerin sonunda açık deniz platformlarını incelemek için faydalanılmıştır (Farrar CR, Worden K, 2012). 1990'ların başından itibaren inşaat mühendisliği ve altyapı sistemlerini içerecek şekilde genişletilmiştir. Beck JL (1992), bir yapının rijitlik dağılımında herhangi bir değişikliği tanımlayarak genel sağlığının izlenmesi için olasılıksal bir tanımlama tekniği olarak adlandırmışlardır. Al-Khalidy (1997), doğrusal sistemlerin yapı sağlığının izlenmesine ilişkin dalgacıklar kullanılarak ilk çalışmaları gerçekleştirmişlerdir ve mühendislik yapılarında hasar tespiti için YSİ'yi teşvik etmenin gerekliliğinden bahsetmişlerdir. Mita (1999), Japon inşaat mühendisliğinde hızla gelişen Yapı Sağlığı İzleme sistemlerine ait yönerge ile ilgili bir çalışma yapmıştır.

Son yirmi yılda, sensör teknolojilerinin gelişmesi, bilgisayarlardaki önemli ilerlemeler ve yapısal kontrol yaklaşımlarının dahil edilmesi ile YSİ önemli ölçüde büyümüştür (Basu vd., 2014; Aydın vd., 2020). YSİ'nin temel konseptini açıklamak için insan sinir sistemi ile bir benzetme kullanılabilir (Speckmann vd., 2004). Bu benzetme ile ilgili görsel Şekil 1.1'de verilmiştir. Mühendislik yapılarında kullanılan sensörlerin yaptığı işlevler, insan sinir sistemine benzerlik göstermektedir. İnsan sinir sistemi, iç veya dış çevreden gelen etkileri algılayarak beyne çok sayıda sinyal göndermekte ve beyinde işlenen sinyal verilerinin yorumlanmasına yardımcı olmaktadır. Benzer şekilde, YSİ sisteminde titreşim, gerilim, stres veya sıcaklık gibi sensörlerden sinyaller toplanmakta ve sinyallerin işleneceği ana merkezde verilerin yorumlanması yapılmaktadır (Speckmann vd., 2004).

YSİ sistemi, genel olarak üç temel bileşenden oluşur (Amezquita ve Adeli, 2016):

- Sensörler
- Veri işleme ünitesi (veri toplama, aktarma ve depolama vb.)
- Verilerin yorumlama sistemi



Şekil 1.1. İnsan vücudu ve YSİ karşılaştırması (Speckmann vd., 2004)

İnsan vücudu hasta olduğu zaman hastalık ile ilgili bulguların bulunması (tanı) ve bu hastalığı belirlenmesi (teşhis) gerekmektedir. Benzer şekilde, mühendislik yapılarında yapısal değişiklikler sonucunda tanı ve teşhis yapılabilir. Mühendislik yapılarında tanı işlemi hasarın varlığı ile ilgili olmaktadır. Teşhis ise hasarın başlangıcı, yeri veya derecesi hakkında bilgiler vermektedir. Tanı ve teşhisin yapılabilmesi için birçok akıllı sensöre ihtiyaç duyulmaktadır (Gopalakrishnan vd., 2012). Bu unsurlar birleştirildiğinde, inşaat mühendisliği için bir YSİ sistemi oluşturmaktadır. Yapıdan toplanan bilgiler ile birlikte YSİ sisteminde hasar tespiti dört seviyede yapılmaktadır (Rytter, 1993).

1. Seviye: Hasarın varlığının belirlenmesi.
2. Seviye: Hasarın yeri/bölgesinin belirlenmesi
3. Seviye: Hasarın şiddetinin belirlenmesi
4. Seviye: Yapının kalan ömrünün tahmin edilmesi

1. Seviye yapının zaman içinde istenilen niteliklerin izlenmesini gerektirmektedir ve yapıda genel hasarın mevcut olup olmadığına dair bulgular sunmaktadır. Buna karşılık ikinci seviyede hasarın bölgesini ve konumunun belirlenmesi için daha kapsamlı analiz yapılması gerekmektedir (Gopalakrishnan vd., 2012).

Genel olarak, 1. Seviye tanı aşaması, 2. Seviye teşhis aşaması olarak geçmektedir. Sonraki seviyeler öngörü/tahmin seviyeleri olarak tanımlanmaktadır. 1. ve 2. seviyelerin herhangi bir model kullanılmadan analiz edilebileceği, 3. seviyenin analitik/sayısal

modelleme, 4. seviye için ise kırılma mekaniği, yorulma ömrü analizi, güvenilirlik analizi veya yapısal tasarım değerlendirmesi gibi tekniklerin kullanılması gerekmektedir (Monavari, 2019). 4. seviyede ayrıca kırılma özelliklerini değerlendirmek yorulma ömrü analizi yapmak ve yapının kalan ömrünü belirlemek için 3. seviyenin de yapılmış olması gerekmektedir (Gopalakrishnan vd., 2012). Literatürde, YSİ için farklı seviyelerde birçok çalışma yöntemleri gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemler başlıca tepki bazlı, güvenilirlik analizi, akustik emisyon, özellik çıkarımı, bilgisayarlı görü ve makine öğrenmesi olarak sıralanmaktadır.

Tepki bazlı yöntemlerde dış etkiler (çevresel koşullar, yükleme, zorlanmış titreşim vb.) nedeniyle meydana gelen yapı tepkisinden elde edilen verileri değerlendirmektedir. Yapıdan elde edilen tepkiler statik (gerilme, şekil değiştirme ve yer değiştirme vb.) ve dinamik (frekans, mod şekli ve sönüm oranı) olarak iki ana bölüme ayrılmaktadır. Statik tepkileri ölçmek, dinamik tepkileri ölçmekten daha kolay olmasına rağmen hasara karşı göstereceği tepki daha az olmaktadır (Doebbing vd., 1998). Tepki-bazlı yöntemler ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Kim ve Stubbs (2003), yapılarda doğal frekansa ve mod şekline bağlı hasarın boyutunu belirlemek için bir metodoloji geliştirmişlerdir. Çalışmada ilk olarak doğal frekanslardaki değişikliklerden kaynaklanan hasarı bulmak için hasar bulma algoritması, çatlak boyutunu tahmin etmek için hasar boyutlandırma algoritması ve mod şekline dayalı hasar tespit algoritması geliştirmişlerdir. Ayrıca elde edilen bu algoritma değişimlerini incelemek için hasar indeksi geliştirmişlerdir. Sunulan algoritmalar sayısal olarak önerilmeli beton üzerinde farklı hasar bölgeleri ve boyutlarındaki durumlarını değerlendirmişlerdir. Çalışma sonunda sunulan algoritmaların doğru bir şekilde hasarın bölgesini ve boyutunu tahmin ettiğini göstermişlerdir.

Jang vd. (2007), Bernal tarafından önerilen hasar tespit vektörleriyle şekil değiştirme sensörlerini birleştiren bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmada üç boyutlu makas sistemi üzerinde sayısal ve deneysel olarak hasarın bölgesini belirlemeye çalışmışlardır. Çalışma sonunda geliştirilen hasar tespit vektörlerinin hasarlı elemanlar üzerinde sensör olmadığına bile hasar yerlerinin başarılı bir şekilde belirlenebildiğini göstermişlerdir.

He ve Zhu (2011), çelik yapılarda cıvatalı birleşimlerinin gevşemesi ile birlikte oluşabilecek problemlerin, titreşime bağlı yöntemlerle tespit edilebilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada sonlu eleman analizi yöntemi kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasındaki farklılığı minimize eden Levenberg-Marquardt Yöntemi ile

optimizasyon tabanlı bir algoritma kullanmışlardır. Çalışma sonunda modelleme hatası ve ölçüm gürültüsünün olmadığı sayısal simülasyonlarda hasar yerlerinin ve şiddetlerinin bulabileceğini göstermişlerdir.

Roy ve Chaudhuri (2013), yapısal hasarlardan meydana gelen mod şekilleri ve türevleri arasındaki ilişkiyi matematiksel bir pertürbasyon yaklaşımı ile belirlemeye çalışmışlardır. Çalışma farklı hasar bölgelerine sahip bir betonarme bina ve çelik çerçeve üzerinde sayısal olarak incelenmesiyle yapılmıştır. Çalışma sonunda çok sayıda sensörden elde edilen verilerden daha hassas sonuçlar alındığını göstermişlerdir.

Jeong vd. (2014), bir yapıdaki hasar bölgelerini sınıflandırmak için rijitlik hasarının neden olduğu modal frekansların değişimini kullanan Isomap algoritmasını geliştirmişlerdir. Isomap algoritması, yüksek boyutlu veriler için yeni bir koordinat sistemi oluşturan klasik çok boyutlu ölçeklendirmenin doğrusal olmayan bir genellemesini kapsamaktadır. Çalışma sonunda Isomap algoritması, simülasyon örnekleri ile hasar bölgelerinin başarılı bir şekilde değerlendirildiğini göstermişlerdir.

Mohan vd. (2014), hasar değerlendirmesi için frekans değişimleri ve mod şekilleri arasındaki korelasyona dayalı Hasar Yeri Güvence Kriterlerini geliştirmişlerdir. Çalışmada farklı hasar bölgelerine sahip üç kiriş modellenmiştir. Yapılan korelasyon analizlerinden hasar bölgelerinin uyum içinde olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, MATLAB tabanlı kodlama geliştirerek korelasyon tabanlı algoritmayı otomatikleştirmişlerdir.

Zhang vd. (2016), fiber takviyeli kompozit elemanlarda oluşan delaminasyon hasarı üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada izotrop kirişlerde çatlağın üç parametresini (katman, konum ve boyut) tahmin etmek için grafiksel bir yöntem sunmuşlardır. Ayrıca sunulan grafiksel yöntemin optimizasyon veya Yapay Sinir Ağlarına kıyasla hesaplama olarak daha hızlı sonuç verdiği belirtilmiştir. Geliştirdikleri yöntemle basit mesnetli ve konsol kirişler üzerinde modal testlerden elde edilen deneysel veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Çalışma sonunda önerilen grafik tekniğinin, kompozit kirişlerdeki delaminasyonunun yerini ve şiddetini yüksek doğruluk derecesi ile değerlendirmek için kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Wang vd. (2016), yapılardaki frekans değişimlerini belirleyen yeni bir yöntem sunmuşlardır. Bu yöntem yapının frekans ve genlik değişim etkilerini tek bir uzay eğrisinde birleştirerek yapı sağlık durumunu ve özelliklerini analiz edilmektedir. Ayrıca yöntemdeki frekans ve genlikten gelen katkıyı otomatik olarak ayarlayan bir algoritma önermişlerdir. Çalışmada önerilen yöntemin geçerliliğini göstermek için farklı hasar boyutlarına,

şiddetlerine ve sönümlerine sahip sayısal örnekler sunulmuştur. Çalışma sonunda farklı hasarlara sahip iki çelik kiriş üzerinde yöntemin geçerli ve hesaplama açısından verimli olduğunu açıklamışlardır.

Roy (2017), bir yapının hasarsız ve hasarlı mod şekillerinin türevlerini kullanarak titreşime dayalı matematiksel bir hasar tespit yöntemi geliştirmiştir. Çalışmada önerilen yöntemin etkinliği sayısal olarak bir binada ve laboratuvar ortamında ise ölçeklenmiş 6 katlı çerçeve modelinin sarsma tablası testleri ile birlikte oluşan hasar ile incelenmiştir. Çalışma sonunda elde edilen sayısal ve deneysel sonuçların önerilen matematiksel yaklaşımla hasar tespitinin yapılabilirliğini göstermiştir.

Huang vd. (2018), laboratuvar ortamında bir çelik kiriş elemanda analitik ve sayısal modeller ile yer değiştirmeye dayalı bir hasar değerlendirme yöntemi önermişlerdir. Çalışmada taban çizgisinden bağımsız hasar konum algoritması önerilmiş ve doğrulanmıştır. Ayrıca sıcaklığın etkisi, sensörün ek ağırlığı ve konumu hakkında geliştirdikleri yöntem üzerinde etkilerini araştırmışlardır.

Rageh vd. (2018), YSİ verileri kullanılarak otomatik hasar tespiti yapabilen bir yöntem önermişlerdir. Çalışmada çift hatlı çelik demiryolu makas köprüsü üzerine şekil değiştirme ölçerler yerleştirilmiştir. Önerdikleri yöntemde hasar özelliklerini ve yoğunluklarını otomatik belirlemek için Yapay Sinir Ağlarını kullanmışlardır. Çalışma sonunda önerilen yöntemin çevresel koşullar altında ölçülen sinyallerle hasarın başarılı bir şekilde tespit edilebildiği sonucuna varılmıştır.

Zhao vd. (2018), Fiber Bragg Izgara sensörleri kullanarak boru hattı sistemlerinde dinamik makro şekil değiştirmelerine göre Derin Öğrenme tabanlı yaklaşım ile hasar tespit yöntemleri geliştirmişlerdir. Çalışmada boru sistemlerinde eğilme ve burulma farklılığından elde edilen veriler ile modelini eğitmişlerdir. Çalışma sonunda farklı yapısal tepkiler ve çevre koşullarında Derin Öğrenmeye dayalı geliştirdikleri yöntemin farklı hasar türlerine karşı güzel sonuçlar verdiğini göstermişlerdir.

Janeliukstis vd. (2019), tam ölçekli demiryolu öngerilmeli beton traverslerde çatlak hasarını ve şiddetini belirlemek için titreşime dayalı çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, demiryolu beton traversleri İngiliz Standartlarına uygun deney düzeneği kullanarak ilk çatlağa sebep olan yük ve ilk çatlakta oluşan yükün 1.5 katı kadar fazla yüke maruz bırakılmıştır. Deneysel Modal Analiz sonucu elde edilen dinamik karakteristiklerden (frekans, mod şekli) mod şekilleri kullanılarak hasarı belirlenmek için Dinamik Mod Şekil Eğrilik Kareler Yöntemi uygulanmıştır. Kullanılan yöntemde traverslerde ilk çatlama

yapının dinamik karakteristiklerinde ihmal edilecek kadar az değişiklerin olduğu görölmüştür. Bunu iyileştirmek için Eğrilik Karesi Yaklaşımı geliştirmişlerdir. Çalışma sonunda elde edilen yaklaşımın demiryolu traverslerinde çatlak tespiti için kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Ono vd. (2019), tam ölçekli bir sonlu eleman köprü döşemesindeki hasarı tespit etmek için yer değiştirme ölçümlerine dayalı tesir çizgilerini kullanmışlardır. Sunulan metodolojinin performansı üzerindeki etkilerini araştırmak için hasarlı konumlar ve sınır koşulları gibi farklı parametreleri incelemişlerdir. Önerilen yöntemin, sensör konumundan uzaktaki hasara karşı duyarsız olduğu ve uygun aralıklarla yer değiştirme ölçerler kurularak hasar tespitinin doğru bir şekilde yapılabilceğini belirtmişlerdir.

Marrongelli vd. (2019), yapılardaki anormallikleri tespit etmek için titreşime dayalı bir hasar tespit yaklaşımı önermişlerdir. Çalışmada yapılardaki hasarlardan meydana gelen mod şekillerinde değişimler Modal Güvence Kriteri ve mod karmaşıklığı kullanarak hasar tespit yaklaşımı yapmışlardır. Çalışma sonunda San Michele köprüsü ile önerdikleri yaklaşımın farklı çevre koşullarında güvenilirliğini test etmişlerdir.

Sha vd. (2019), kiriş tipi yapılarda hasar tespiti için frekans ve mod şekli değişimine bağlı eğriler arasındaki bağıntıyı ilişkilendirerek bir denklem sunmuşlardır. Değişim eğrileri ve ölçülen değerler hasarın yerini belirlemek ve ölçmek için iki adımlı bir yöntem içermektedir. Tek ve çoklu hasarın yerini belirlemek için Bayes veri füzyonu kullanılarak yeni bir olasılıksal hasar göstergesi geliştirmişlerdir. Yöntemin etkinliğini sayısal olarak doğruladıktan sonra çatlamış kirişler için deneysel çalışmalar yapmışlardır.

Sha vd. (2020), bir yapıda meydana gelen hasarın mod şekillerinde tekilliğe neden olmakta ve bu hasarın ortaya çıkması nedeniyle dalgacık dönüşümü ile Teager enerji operatörü ismi verilen mod şekilleri üreten bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntemin etkinliği çeşitli gürültüler altında sayısal olarak doğrulanmıştır. Ardından, lamine kompozit kirişler üzerinde deneysel olarak doğrulama çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonunda geliştirdikleri yöntem ile sayısal ve deneysel sonuçlardan elde edilen verilerin çoklu hasarı tespit edebildiği sonucuna varmışlardır.

Huseyno vd. (2020), köprülerde durum değerlendirmesi yapmak amacıyla dönme değerlerinin elde edilmesi için bir metodoloji sunmuşlardır. Başlangıçta önerilen köprü hasarlarının tespiti için sayısal analizler yapmışlardır. Çalışma sonunda hasarlı ve hasarsız köprü durumları için elde edilen dönme tesir çizgilerindeki farklılık bir hasar göstergesi olarak önerilmiştir. Ayrıca dönmenin hasara duyarlılığı ve sensör konumlarının sensör

hassasiyetleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonunda önerilen köprü değerlendirme metodolojisini birçok farklı senaryoda test etmişlerdir ve hasarı doğru bir şekilde belirleyebildiklerini göstermişlerdir.

Jayasundara vd. (2020), kemer köprülerdeki hasarlar için titreşime dayalı bir yöntem geliştirmişlerdir. Önerilen yöntemde genel bir hasar değerlendirmesi yapmak için Yapay Sinir Ağlarını kullanarak birleştirilmiş modal esneklik, modal gerinim enerjisi tabanlı hasar indeksi yapmışlardır. Geliştirdikleri yöntemi küçük laboratuvar modeli üzerinde doğruladıktan sonra tam ölçekli uzun bir kemer köprüsüne uygulamışlardır. Çalışma sonunda Yapay Sinir Ağları ile eğitilmiş verilerin kemer köprüler için verimli sonuçlar ürettiğini ifade etmişlerdir.

Ou vd. (2021), ölçekli bir rüzgar türbin kanadının titreşime bağlı değerlendirmesini yapmışlardır. Çalışmada Sonkyo Enerji tarafından sağlanan Windspot 3.5kW gücündeki bir model parçasının değişen çevresel koşullar altında hasarsız ve hasarlı durumlarına ait titreşim testlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada rüzgar türbin modeline ait farklı çevresel koşullarda ve hasarlarda sensör dağılımlarına ait kapsamlı dokümanı oluşturmuşlardır.

Vega ve Yu (2022), akıllı telefonlar kullanılarak deprem nedeniyle oluşan hasarların tespiti için derin öğrenmeye dayalı Yapı Sağlığı İzleme sistemi geliştirmişlerdir. Çalışmada akıllı telefonlarda gömülü olan ivmeölçer sensörü kullanılarak binanın her katındaki doğrusal ivmeyi elde etmiş, derin öğrenme yöntemlerinden birisi olan Uzun-Kısa Süreli Bellek yöntemi kullanılarak Android işletim sistemine sahip telefonlar ile yapılarda hasar tahmin sistemi geliştirmişlerdir. Önerdikleri hasar tespit tahmin sistemini laboratuvar ortamında üretilmiş iki katlı çelik çerçeve sistemi üzerinde denemişlerdir. Çalışma sonunda önerilen yöntemde düşük maliyetli olarak hasarın varlığını belirleyebildiklerini göstermişlerdir.

Wang vd. (2022), tarihi ahşap yapıların daha uygun bir şekilde korunması için çok kaynaklı bilgi entegrasyonuna sahip Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) tabanlı bir yönetim platformu geliştirmişlerdir. Çalışmada YSİ sistemlerinin sensör fazlalığından kaynaklı büyük verilerin yönetilmesinde zorluklar yaşanacağı ve YBM teknolojisi kullanılarak bilgi entegrasyonu ve görselleştirmenin ön plana çıktığını göstermişlerdir. Ayrıca YBM teknolojisi ile erken uyarı sistemi de geliştirmişlerdir. Çalışma sonunda geliştirdikleri platformda tarihi ahşap yapıyı başarılı bir şekilde izlediklerini göstermişlerdir.

Zhang vd. (2022), bir köprünün Yapı Sağlığı İzlemesinde elde edilen gerçek zamanlı sinyallerin veri anormalliklerini tespit etmeye yarayan bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu

yaklaşımında gerçek zamanlı sinyallerin makine öğrenme yöntemine göre sınıflandırılması amacıyla kullanılan Rastgele Orman algoritmasına göre verileri eğitmişlerdir. Çalışma sonunda önerdikleri yaklaşımın literatürdeki diğer çalışmalara göre daha hassas sonuçlar verdiğini göstermişlerdir.

1.2.2. Sonlu Eleman Model Güncellemesi Konusunda Yapılmış Çalışmalar

Analitik/sayısal analizlerde eleman boyutları, malzeme özellikleri ve sınır şartlarına göre oluşturulan modeller ile analiz yapılabilmektedir. Fakat analizlerde yapılan kabuller, üretim aşamasında projede belirlenen hedeflerin tam olarak sağlanamaması ya da yapının yıllar içerisinde çeşitli etkilere (farklı yüklemeler sonucu oluşan çatlamlar, yorulmalar, mesnet çökmeleri vb.) uğraması ile yapısal davranış zaman içerisinde proje aşamasında öngörülen seviyelerden/değerlerden uzaklaşabilmektedir. Dolayısıyla, analitik/sayısal olarak belirlenen yapısal durumun, yapıların statik ve dinamik yükler altındaki davranışlarının belirlenmesinde kullanılmasıyla doğru olmayan analiz sonuçlarının elde edilebileceği düşünülmektedir. Bu düşünce, birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalarda vurgulanmıştır (Chuntavan, 1993; Womack ve Halling, 1999; Achter, 2000; Inaudi vd., 2000; Halling vd., 2001; Zhao ve DeWolf, 2002; Brownjohn vd., 2003; Kim ve Stubbs, 2003). Bu nedenle, analitik/sayısal yöntemlerden elde edilen verilerin deneysel yöntemlerle de belirlenmesi gerekmektedir. Analitik yöntemler, sayısal yöntemlere göre daha kesin sonuç vermesine rağmen kompleks yapılarda analizlerin yapılması zorlu bir süreç gerektirmektedir. Bu nedenle analitik yöntemden daha çok sayısal yöntemler tercih edilmektedir. Sayısal yöntemlerde en çok kullanılan yöntem Sonlu Eleman Analiz Yöntemi'dir. Sonlu Eleman Analiz sonuçlarından elde edilen farklılıkları azaltmak için Sonlu Eleman Model Güncellemesi kullanılmaktadır. Sonlu Eleman Model Güncellemesi ile aynı zamanda hasar tanımlama seviyelerinden 1. Seviye, 2. Seviye ve 3. Seviye için değerlendirmeler yapılabilir. Ayrıca, 4. Seviye'deki ileri analizler için güncel sonlu eleman model kullanılmaktadır. Sonlu Eleman Model Güncellemesi ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Mottershead vd. (2011), titreşim verilerine dayalı duyarlılığa bağlı Sonlu Eleman Model Güncellemesi için endüstriyel sorunlara dayalı birçok uygulama yapmışlardır. Çalışmada Duyarlılığa Bağlı Sonlu Eleman Model Güncellemesine dayalı birçok öğretici örnekler ile büyük ölçekli bir helikopterin model güncellemesini gerçekleştirmişlerdir.

Çalışma sonunda titreşim verilerine dayalı Duyarlılığa Bağlı Model Güncellemenin diğer yöntemlere kıyasla daha başarılı sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Farshadi vd. (2017), titreşim verilerinden elde edilen frekans tepki fonksiyonu ve modal verileri kullanarak Sonlu Eleman Model Güncellemesine dayalı bir algoritma geliştirmişlerdir. Çalışmada ilk olarak belirsiz parametreler altında değişen mod şekillerinin duyarlılığa bağlı denklemlerini elde etmişlerdir. Ardından geliştirilen denklemler frekans tepki fonksiyonları arasındaki farklılıkları ilişkilendirmek için kullanılmıştır. Elde edilen farklılıkları minimize etmek için duyarlılığa bağlı denklemleri en küçük kareler yöntemine göre analiz edilerek belirsiz parametre tahmininde bulunmuşlardır. Sunulan algoritmayı test etmek için farklı hasar durumlarına sahip iki boyutlu makas sistemi üzerinde sayısal bir model kullanılmıştır. Çalışma sonunda önerilen yöntemin hassas sonuçlar verdiğini göstermişlerdir.

Schommer vd. (2017), 6 açıklıktan oluşan ve toplam 46 metre uzunluğuna sahip öngerilmeli bir betonarme köprüde statik ve dinamik yükler altında Sonlu Eleman Model Güncellemesi ile ilgili bir yaklaşım önermişlerdir. Çalışmada betonarme köprüde statik olarak yer değiştirme sensörleri ve dinamik olarak yapının dinamik karakteristiklerini elde etmek için ivmeölçer sensörleri kullanılmıştır. Köprüde aynı zamanda öngerilme halatlarının aşamalı bir şekilde kesilmesiyle elde edilen veriler ile sonlu eleman modelden elde edilen verilerin farklılıkları karşılaştırılmış ve önerdikleri yaklaşıma göre Sonlu Eleman Model Güncellemesi gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonunda önerdikleri yöntemin sıcaklık etkisi dikkate alınmadan verimli sonuçlar alınabildiğini göstermişlerdir.

Altunışık vd. (2018), tarihi bir kale yapısında titreşim verilerine dayalı Bayes Duyarlılığa Bağlı Model Güncellemesi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, çevresel titreşim verilerinden tarihi kalenin dinamik karakteristikleri elde etmişlerdir. Deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler sonlu eleman model ile karşılaştırılmış ve farklılıklar hem deneme yanılma hem de otomatik model güncelleme yapılarak minimize edilmiştir. Çalışma sonunda deneme yanılma ve otomatik model güncelleme olarak elde edilen dinamik karakteristikler arasındaki farklılıklar sırasıyla maksimum %3 ve %0.02 olarak elde edilmiştir.

Bianconi vd. (2020), Modal Güvence Kriterine dayalı genetik algoritmanın Sonlu Eleman Model Güncellemesinde uygulanabilirliğini denemişlerdir. Çalışmada İtalya'da bulunan tarihi Fermo kilisesinin kulesinde titreşim verilerine dayalı ölçümler gerçekleştirilerek deneysel olarak kuleye ait dinamik karakteristikler elde edilmiştir.

Ardından Midas programında sonlu eleman modeli oluşturularak deneysel olarak elde edilen farklılıkları hem deneme yanılma hem de genetik algoritma kullanarak belirlemişlerdir. Çalışma sonunda genetik algoritma elde edilen verilerin deneme yanılma yöntemine göre daha verimli sonuçlar elde edildiği ifade edilmiştir.

He vd. (2020), İspanya’da 16.4 metre uzunluğuna ve öngerilmeli betonarme kuru kesite sahip A-67 karayolu üzerinde Sonlu Eleman Model Güncelleme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, köprünün dinamik karakteristiklerini Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemi ile elde etmişlerdir. Model köprüsünün sonlu eleman modeli ANSYS programında yapılmış olup dinamik karakteristikler arasındaki farklılıkları hem deneme yanılma hem de Duyarlılığa Bağlı Sonlu Eleman Model Güncelleme ile elde etmişlerdir. Çalışma sonunda Sonlu Eleman Model Güncellemesi ile sayısal modeldeki belirsizlerin minimuma indirildiğini ifade etmişlerdir.

Shahbaznia vd. (2020), trenlerin demiryolu köprüleri üzerinden geçerken düşük şiddetli hasarların belirlenmesinde, tren yükünün bilinmezliği nedeniyle zor olduğunu vurgulamışlardır. Çalışmada araç-köprü etkileşimi dikkate alınarak yenilikçi bir Sonlu Eleman Model Güncellemesi önermişlerdir. Önerilen yöntemde duyarlılık analizi ve Tikhonov düzenleştirmesi kullanarak dinamik karakteristikler arasındaki farkların hızlı bir şekilde yakınlığını sayısal çalışma olarak göstermişlerdir. Çalışma sonunda sayısal sonuçlardan elde edilen verilerin ölçüm gürültüsü olduğunda bile yapısal hasarların yerini ve bölgesini doğru bir şekilde belirleyebildiklerini göstermişlerdir.

Sun vd. (2020), köprülerde elde edilen yer değiştirmeleri değerlendirmek için çok sayıda sensör olduğu ve bu sayının artmasıyla izlemenin zorlaşacağından deneysel ve sonlu eleman modeli birleştiren hibrit izleme algoritması önermişlerdir. Çalışmada laboratuvar ortamında ölçekli çelik köprü üzerinde farklı hasar tipleri, gürültüler, yüklemeler ve sınır koşulları altında köprü modeline yerleştirdikleri şekil değiştirme, yer değiştirme, ivmeölçer ve hava durumu istasyonu sensörlerinden gelen yapısal tepkileri elde etmişlerdir. Elde edilen verilerden geliştirdikleri hibrit izleme algoritmasının etkinliğini incelemişlerdir. Çalışma sonunda köprülerdeki deformasyon eğrilerinin önerdikleri hibrit yöntem ile etkili bir şekilde bulunabildiği sonucuna varmışlardır.

Ereiz vd. (2022), oyun teorisine bağlı Sonlu Eleman Model Güncelleme etkinliğini ve çözüm yaklaşımlarını araştırmışlardır. Çalışmada oyun teorisi hakkında genel kavramları, deneysel ve sonlu eleman model arasındaki farklılıkları minimuma indirgenmesi için çeşitli farklı hesap modelleri sunmuşlardır. Çalışma sonunda oyun teorisinin Sonlu Eleman Model

Güncellemesinde başarılı bir şekilde uygulanabileceği ve hesaplamalarda sonuçların daha hızlı alınabileceğini vurgulamışlardır.

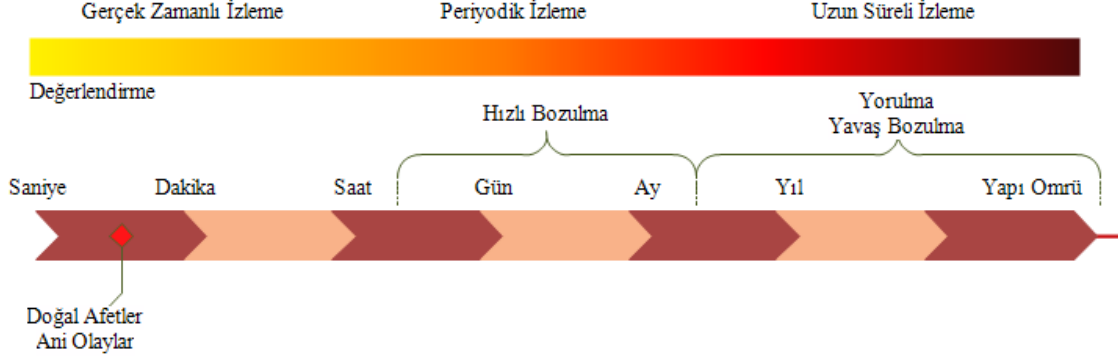
Minh vd. (2022), Sap2000 ve MATLAB arayüzü kullanılarak yeni bir Sonlu Eleman Model Güncelleme Yöntemi geliştirmişlerdir. Çalışmada geliştirdikleri yöntemde Cuckoo Arama Algoritmasından faydalanmışlardır. Elde ettikleri yöntemi farklı hasar durumlarında ve literatürde olan diğer algoritmalarla sayısal olarak karşılaştırmışlardır. Çalışma sonunda geliştirdikleri yöntemin diğer yöntemlere göre daha efektif ve hızlı sonuçlar alındığı sonucuna varmışlardır.

Qin vd. (2022), Çin'in ilk uzun açıklıklı balastsız demiryolu köprüsü olan Gangiang Köprüsü'nün kullanımına açılmadan önce statik/dinamik saha testlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada deneysel olarak çeşitli köprü statik/dinamik yüklemeler gerçekleştirilmiş ve titreşim verileri elde edilerek değerlerin sonlu eleman modeli üzerinden kontrolleri sağlanmıştır. Ayrıca Sonlu Eleman Model Güncellemesi için Yer Değiştirme Güvence Kriterine (YDGK) dayalı bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalışma sonunda geliştirdikleri yöntemle beraber sayısal ve deneysel model arasındaki farklılıkların minimum olduğu ve YDGK'nın geleneksel Sonlu Eleman Model Güncelleme Yöntemlerine göre daha iyi performans verdiği sonucuna varmışlardır.

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Yapılan literatür araştırmasında Yapı Sağlığı İzlemesi ve Sonlu Eleman Model Güncellemesi konusu üzerinde yapıların statik ve dinamik davranışlarını belirleyen birçok çalışmanın olduğu görülmektedir. Ayrıca yapılan çalışmalar gerçek zamanlı, periyodik ve uzun süreli izleme süreçlerini kapsamaktadır (Şekil 1.2). Deneysel ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi için donanımsal altyapıya sahip çeşitli yazılımlar gerekmektedir. Yazılım fiyatlarının pahalı olması, bazı yazılımların paketler halinde sunulması, mevcut yazılımların algoritmalarının kapalı olması, sayısal çözüm yöntemlerinin oldukça kısıtlı bir miktarda kullanıcıya sunulması, ara işlemlerin kontrol edilememesi, yeni geliştirilen algoritmaların yazılımlara entegre edilememesi, YSİ süreçlerinde kullanılan yazılımların birbirleriyle uyumlu çalışmaması gibi birçok neden birbirleriyle etkileşimli çalışabilen yazılımların geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Son yıllarda gelişen teknoloji karşısında, var olan yapıların yeniden gözden geçirilerek deprem ve dış yükler altında davranışlarının belirlenmesi, bu yüklerin herhangi bir hasara yol açıp açmadığı ve hasar oluşumu durumunda

hasar yerinin tespiti için yenilikçi yöntemlerle birlikte yazılımların geliştirilmesi önem arz etmektedir.



Şekil 1.2. Yapı Sağlığı İzleme süreçlerine ait akış şeması

Literatüre katkı sağlayacağı düşünülen bu tez çalışmasında mühendislik yapılarının mevcut durumlarının belirlenmesi, oluşabilecek hasar seviyelerinin ve hasar bölgelerinin tahmin edilmesi, sürekli ölçümler yardımıyla derin öğrenme tabanlı yapı sağlığının izlenmesi için birbirleriyle etkileşimli çalışabilecek mühendislik yazılımlarının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen yazılımlar üç aşamadan oluşmaktadır.

Birinci aşamada yapılardan elde edilen ham sinyallerin frekans ve zaman ortamında işlenerek yapıların davranışlarını belirlemek amacıyla C# programlama dili kullanılarak dinamik karakteristik belirleme programı hazırlanmıştır. Hazırlanan programa Dynamic Modal adı verilmiştir. Dynamic Modal programında, deneysel olarak elde edilen sinyallerin içeri aktarılabilirdiği, yapı geometrisinin oluşturulabilirdiği, sensör yönlerinin saha ortamına uygun olacak şekilde tanımlanabilirdiği, yapıların yapısal davranışlarının belirlenmesi amacıyla Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma ve Stokastik Alt Alan Belirleme yöntemleri kullanarak dinamik karakteristiklerin elde edilebilirdiği, Modal Güvence Kriteri (Modal Assurance Criteria – MAC) kullanılarak modal hakim bölgelerinin ve stabilite diyagramlarının belirlenebilirdiği, kullanıcı etkileşimli arayüz ve animasyon ekranının olduğu bir yazılım hazırlanmıştır.

İkinci aşamada deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler referans alınarak, sonlu eleman model ile arasındaki farklılıkların minimuma indirgenmesi amacıyla C# programlama dili kullanılarak otomatik Sonlu Eleman Model Güncelleme programı hazırlanmıştır. Programa Dynamic Update adı verilmiştir. Dynamic Update programı ile

sonlu eleman analizi için gereken eleman tiplerine uygun modal analiz yapabilen, sonlu eleman model sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki dinamik karakteristiklerde (frekans, mod şekli) meydana gelen farklılıkları ve hangi oranda uyum oluştuğunu MAC kriterleri ile hesaplayabilen, eleman tiplerine göre belirsiz parametreler atanabilen, belirsiz parametrelerin etkinliğini belirlemek için Duyarlılık Analizi yapabilen, elde edilen frekans ve mod şekil değerlerinin deneyselle yakınlaştırılması amacıyla Bayes Parametre Tahmin Yöntemiyle iteratif çözüm yapabilen, grafiksel animasyonlu model arayüz ekranına sahip bir yazılım hazırlanmıştır.

Üçüncü aşamada, mühendislik yapılarında uzun süreli yapı sağlığının izlenmesi amacıyla ASP.NET MVC, C#, Python, Grafana ortamında geliştirilmiş Online Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme platformu hazırlanmıştır. Bu platformda, Miniseed (.msd), Seismic Analysis Code (.sac), Technical Data Management Streaming (.tdsms), Text File (.txt) gibi dosya formatlarına sahip ham sinyallerin sürekli olarak depolanmasında PostgreSQL veri tabanı kullanabilen, ham sinyallerin zamana bağlı görsel grafiklerini oluşturabilen, sinyaller belirlenen eşik seviyelere ulaştığı zaman uyarı verebilen, dinamik karakteristiklerin elde edilmesi için geliştirilen metodoloji ile otomatik frekans takibi yapabilen, değişen çevre koşullarından kaynaklı belirsizliklerin Bayes Sinir Ağları ile güven aralığını belirleyebilen, geliştirilen otokodlayıcı tabanlı metodoloji ile anormallik tespiti yapabilen derin öğrenmeye dayalı bir web tabanlı yazılım hazırlanmıştır.

Yazılımların geliştirilmesi aşaması tamamlandıktan sonra, yazılımların doğrulanması sürecinde birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Dynamic Modal programı için Trabzon Burcu, Cephanelik Binası, Tarihi Velipaşa Hanı, Eynel Köprüsü, Gülburnu Köprüsü; Dynamic Update programı için Laboratuvar Modeli ve Laboratuvar Baraj Modeli; Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme platformu için Z24 Köprüsü, Artvin Deriner Barajı, Rize-Artvin Havalimanı (RAH) Kule Binası, RAH Terminal Binası, Çok Katlı Betonarme Bina, Trabzon Moloz Cami Minaresi, Tekkale Dengeli Konsol Viyadüğü üzerinde çalışmalar yapılarak programların ve geliştirilen metodolojilerin performansı, elde edilen sonuçların hem kendi içinde hem de literatüre uygunluğu kontrol edilerek programlar paketler halinde araştırmacı ve mühendisler için uygun bir hale getirilmiştir.

Yukarıda açıklanan hususlar göz önünde bulundurulduğunda, bu tez çalışmasında hazırlanan yazılımlar ile elde edilecek veriler kullanılarak/değerlendirilerek ilgili mühendislik yapılarının/elemanlarının;

- Yapısal davranışlarının hızlı bir şekilde deneysel olarak belirlenmesi,
- Sonlu eleman sonuçları ile karşılaştırmalı olarak irdelenmesi,
- Elde edilen farklılıkları gidermek amacıyla seçilen belirsiz parametreler altında otomatik Sonlu Eleman Model Güncellemenin yapılması,
- Deneysel ölçüm sonuçlarına bağlı çeşitli yöntemler kullanarak hasar tespiti, seviyesi, yeri ve şiddetinin belirlenmesi,
- Geliştirilen metodoloji yardımıyla yapılarda otomatik frekans takibinin yapılması,
- Çevre koşullarından kaynaklı belirsizlik altında derin öğrenme tabanlı güven aralığının belirlenmesi,
- Uzun süreli ölçüm sonuçlarına bağlı derin öğrenme tabanlı Yapı Sağlığı İzlemesi ve geliştirilen metodoloji ile anormallik tespitinin yapılması

gerçekleştirilebilecektir. Ayrıca, ilgili yapıların hasarlı ve/veya hasarsız durumlarına ait sonlu eleman modelleri SAP2000 genel mühendislik programlarına entegreli bir şekilde çalışması sağlanarak statik, dinamik, lineer ve lineer olmayan analizlerin yapılmasına imkan sağlanabilecektir. Uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesi ile herhangi bir deprem meydana gelmeden önce/sonra, yapıların mevcut durumları belirlenebilecek ve hasar tespitleri yapılarak can ve mal kayıplarının önüne geçebilmek adına yenilikçi yöntemlerle gerekli önlemlerin alınması sağlanabilecektir.

1.4. Yapı Sağlığı İzleme

1.4.1. Yapı Sağlığı İzlemesinde Kullanılan Sensörler

YSİ’de birçok farklı sensör kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalarda ve literatürde sıkça kullanılan sensörlere ait genel bilgiler bu kısımda verilmiştir.

1.4.1.1. İvmeölçer

İvmeölçer bir veya daha fazla yöndeki ivme hareketlerini ölçerler ve bu hareketleri ölçmek için elektro-mekanik ilkeler kullanılmaktadır. İnşaat mühendisliği alanında bu hareketler daha çok yapılardaki titreşimleri ölçmek, çarpma etkilerini belirlemek, dinamik yer değiştirmeleri elde etmek amacıyla kullanılmaktadır. İvmeölçerler, YSI amacıyla yaygın

olarak dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde ve yapısal durumunun izlenmesinde kullanılmaktadır (Lin vd., 2015). İvmeölçerlerin piezoelektrik, piezo resistif, kapasitif, kuvvet-denge, mikroeletro-mekanik sistem (MEMS), fiber optik teknolojisi gibi birçok türleri bulunmaktadır. Yapıların dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla kullanılacak ivmeölçer türleri hassasiyet, frekans aralığı, maksimum ivme değeri ve çalışma sıcaklığına göre değişmektedir. Bu nedenle yapılarda titreşim verilerinin doğru bir şekilde elde edilmesi için ivmeölçer tipinin dikkatli seçilmesi gerekmektedir. Tez çalışması kapsamında ivmeölçer sensörü, yapıların çevresel titreşim ölçümlerinin yapılması amacıyla dinamik karakteristiklerin elde edilmesi için kullanılmıştır. Çalışmalarda Sara SL06 ve Sensebox7043-D ivmeölçerleri kullanılmıştır. İvmeölçerlere ait görüntüler Şekil 1.3'te ve genel özellikler ise Tablo 1.1'de verilmiştir.



a) Sara SL06



b) Sensebox7043-D

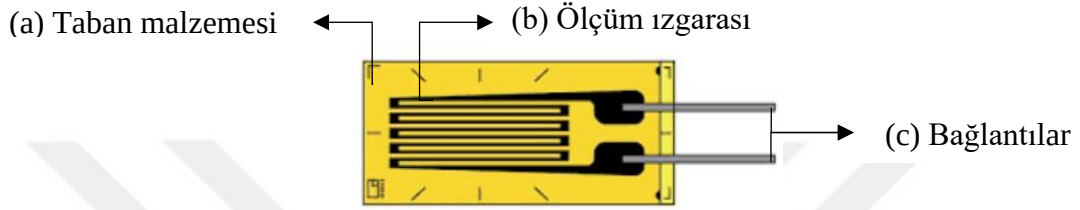
Şekil 1.3. Tez çalışması kapsamında kullanılan ivmeölçerlere ait görünüşler

Tablo 1.1. İvmeölçerlere ait genel özellikler

Model	Sara SL06	Sensebox7043-D
Türü	Kuvvet-Denge	MEMS
Maksimum ivme	$\pm 2g$	$\pm 15g$
Dinamik aralığı	156dB	160dB
Frekans aralığı	0-1500Hz	0-400Hz
Çalışma sıcaklığı	-20/+70°C	-30/+70°C
Boyutlar	210x170x100mm	157.5x90x58.5mm

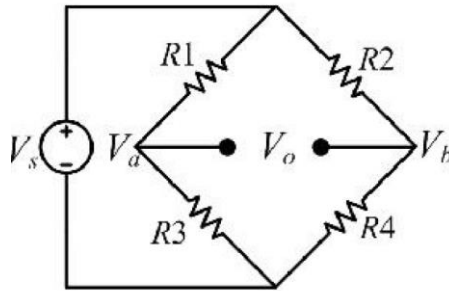
1.4.1.2. Şekil Değiştirme Ölçer

Şekil değiştirme ölçer, yüksek derecede ölçüm hassasiyeti sayesinde yapısal elemanlarda dış kuvvetlerden meydana gelen şekil değiştirmeleri ölçmek amacıyla kullanılmaktadır. Şekil değiştirme ölçerler ilk defa Edward E. Simmons ve Arthur C. Ruge tarafından geliştirilmiştir (Hoffmann, 1989). Şekil değiştirme ölçer taban malzemesi, ölçüm ızgarası ve bağlantıları olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. Şekil değiştirme ölçere ait genel görsel (İrsel, 2021)

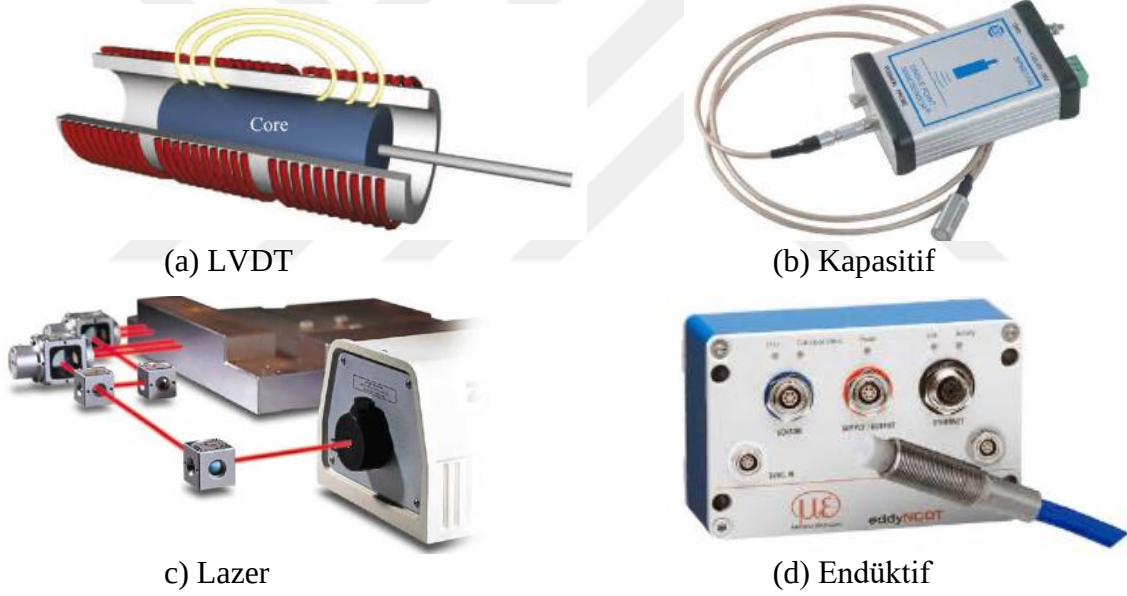
Şekil değiştirme ölçer sensörleri elektrikli sensörlerdir (İrsel, 2021). Bu sensörlerin değerlerini ölçmek için Wheatstone köprüsü kullanılmaktadır. Bu köprü dört dirençten oluşan bir elektrik akım devresinde bilinmeyen bir direnç değerini bulmak amacıyla kullanılmaktadır. Şekil değiştirme ölçerin üzerindeki ölçüm ızgarası sensörün elektriksel direncini oluşturmaktadır. Sensörün monte edilen yüzeyinde oluşabilecek şekil değiştirme değerleri sensör direncini etkileyerek voltaj farkı elde edilmesine neden olmakla birlikte bu voltaj farkı çeşitli bağıntılar kullanılarak şekil değiştirme değeri elde edilmektedir. Tipik Wheatstone köprüsüne ait elektrik şeması Şekil 1.5'te verilmekte olup şekil değiştirme ölçerler de çeyrek, yarım ve tam Wheatstone köprüsü kullanılmaktadır.



Şekil 1.5. Tipik Wheatstone köprüsü (Ang, 2014)

1.4.1.3. Yer Değiştirme Ölçer

Yer değiştirme ölçer, yapısal elemanların fiziksel olarak konumunu, hareketini veya ivme, basınç gibi harekete dönüştürülebilen diğer fiziksel nicelikleri ölçmek için kullanılmaktadır. Yer değiştirme ölçer, temaslı ve temassız olmak üzere iki farklı türü vardır. Temaslı yer değiştirme ölçerlerden lineer değişken diferansiyel transformatör (LVDT), string potansiyometre en çok tercih edilen sensörler iken temassız yer değiştirme ölçerde en yaygın kullanılanlar lazer, kapasitif, endüktif ve fiber optik sensörlerdir (Fleming, 2013). Bazı yer değiştirme ölçer sensör türlerine ait resimler Şekil 1.6'da gösterilmiştir. Yer değiştirme ölçer sensörleri mesafeyle orantılı bir voltaj, milimetre, santimetre gibi mühendislik birimlerinde bir çıktı sağlamaktadırlar.



Şekil 1.6. Yer değiştirme ölçer türlerine ait görsel resimler (Fleming, 2013)

1.4.1.4. Eğim Ölçer

Eğim ölçer, YSİ alanında bir yapının eğimindeki küçük değişiklikleri izlemek için kullanılmaktadır. Bu sensörler, yerçekimine göre monte edildiği yerin eğimini veya açılarını ölçmektedirler. Tez çalışması kapsamında Sensebox7003 tipi eğim ölçer kullanılmıştır. Sensebox7003'e ait görsel Şekil 1.7'de ve genel özellikleri Tablo 1.2'de verilmiştir.



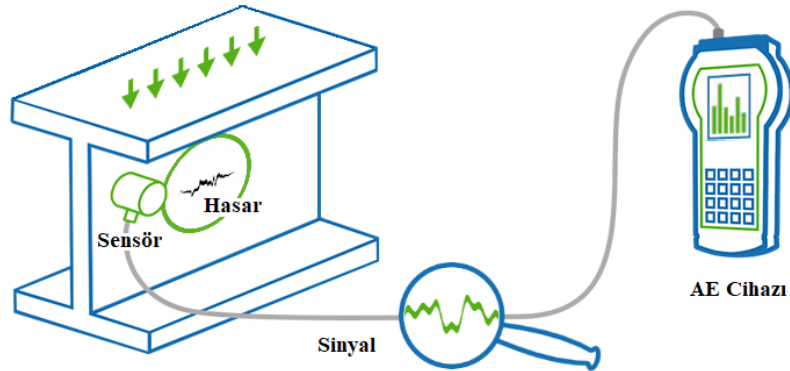
Şekil 1.7. Sensebox7003'e ait görsel

Tablo 1.2. Sensebox7003'e ait genel özellikler

Model	Sensebox7003
Türü	MEMS
Dinamik aralığı	100dB
Hassasiyeti	0.4V/g
Açı ölçüm aralığı	$\pm 90^\circ$
Açı çözünürlüğü	0.00023°
Çalışma Sıcaklığı	-40/+60°C

1.4.1.5. Akustik Emisyon Sensör

Akustik emisyon (AE) sensörler birçok yapı/makine elemanlarından yüksek frekanslı enerji sinyallerini ölçen cihazlardır. AE, duyulamayan ultrasonik sinyallerdir. Bu şekilde ölçülen elektrik sinyalleri frekans ve ses genliklerden oluşmaktadır ve bu nedenle YSİ için birçok araştırma çalışmasında kullanılmaktadır. Akustik emisyon sensöre ait genel görsel Şekil 1.8'de verilmiştir.



Şekil 1.8. Akustik emisyon sensör çalışmasına ait görsel (URL-1, 2022)

1.4.1.6. Meteorolojik Veri Ölçer

Meteorolojik veri ölçer hava sıcaklığı, nem oranı, rüzgar yönü, rüzgar hızı gibi ortamlardaki meteorolojik verileri ölçen sensörlerdir. Yapıların çevresel koşullara göre fiziksel özelliklerini değiştirebilen ortam hava koşulları nedeniyle mühendislik yapılarının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesinde kullanılması önerilmektedir (Shahsavari, 2018). Tez çalışması kapsamında kullanılan meteorolojik veri ölçere ait görsel resim Şekil 1.9’da ve genel özellikler Tablo 1.3’te verilmiştir.



Şekil 1.9. Meteorolojik veri ölçere ait görsel

Tablo 1.3. Meteorolojik veri ölçere ait genel özellikler

	Ölçüm aralığı	Hassasiyeti
Hava sıcaklığı	-40/+80°C	±0.2°C
Nem oranı	%0-100	±%2
Rüzgar yönü	0-359°	±%3°
Rüzgar hızı	0-75m/sn	±0.3m/sn

1.4.2. Yapı Sağlığı İzleminde Kullanılan Yöntemler

YSİ’de hasar tespiti veya yapısal mevcut durum değerlendirmesinde Lokal ve Global yöntemler kullanılmaktadır (Doebling, 1998). Bu bölümde Lokal ve Global yöntemlere ait genel bilgiler verilmiştir.

1.4.2.1. Lokal Yöntemler

Lokal yöntemler, yapısal elemanlardaki bölgesel hasarın bulunması veya izlenmesine yardımcı olmaktadır (Shih, 2009). Lokal yöntemlerde en çok kullanılan yöntemler ultrasonik, eddy current, sıvı penetrant, radyografi, akustik emisyon, görsel inceleme vb. dir. Lokal yöntemler daha çok yapısal elemanların bir bölgesindeki çatlak ve delaminasyon gibi hasarların bulunmasında kullanılmaktadır (Pawar ve Ganguli, 2011). Bu nedenle testler çok zaman almakta ve pahalı olmaktadır (Chang, 2003). Lokal yöntemler yapının genel mevcut durumu hakkında genel bilgi vermemekle birlikte genellikle küçük ve kompleks olmayan yapılar için kullanılmaktadır (Shih, 2009).

1.4.2.2. Global Yöntemler

Global yöntemler, yapının genel durumu hakkında bilgi vermekte birlikte hasarın varlığını tespit etmek için kullanılmaktadır. Global yöntemlerden optik inceleme, optoelektronik tarama, üç boyutlu lazer tarama, titreşime dayalı yöntemler gibi birçok yöntem kullanılmaktadır. Titreşime dayalı yöntemler, yapının kompleks olduğuna bakılmaksızın yapıda oluşabilecek davranış farklılığından kaynaklı değişimlerden büyük ölçüde etkilenmesinden dolayı en çok kullanılan yöntemlerden birisidir (Boscato, 2019). Bu nedenle, bu tez çalışması kapsamında yapıların mevcut durum ve uzun süreli değerlendirmeleri için titreşime dayalı yöntemler kullanılmıştır. Titreşime dayalı yöntemler alt bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır.

1.4.2.2.1. Titreşime Dayalı Yöntemler

1.4.2.2.1.1. Çevresel Titreşim Yöntemi

Çevresel Titreşim Yönteminde (ÇTY), mühendislik yapılarının çevresel etkiler altında titreştirildiği kabul edilmekte ve bu titreşime gösterdiği tepki ölçülmektedir. ÇTY’de yapıyı titreştiren etki kuvvetleri ölçülemediğinden dolayı Etki Davranış Fonksiyonu belirlenememektedir. Bu nedenle bu yöntem literatürde Operasyonel Modal Analiz veya Sadece Tepki Analizi şeklinde ifade edilmektedir (Brincker vd., 2003). ÇTY’de verilerin işlenmesinde frekans ve zaman tanım alanında algoritmalar kullanılarak yapıya ait dinamik karakteristikler elde edilebilmektedir. Frekans tanım alanındaki yöntemler etki ve tepki güç spektrum yoğunluğu arasındaki ilişkiye dayanırken, zaman tanım alanı yöntemlerinde tepki zaman geçmişindeki korelasyon fonksiyon analizlerine dayanmaktadır (Bendat ve Piersol, 2011). Frekans tanım alanında kullanılan yöntemler başlıca Piklerin Seçilmesi, Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi, Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemidir. Zaman tanım alanında kullanılan yöntemlerin bazıları En Büyük Olabilirlik Yöntemi, Rastgele Azalım Yöntemi, Rekürsif Teknikler ve Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemleridir (Ramos, 2007).

Tez çalışması kapsamında, yapıların dinamik davranışlarını elde etmek amacıyla frekans ortamında Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi (GFTAA) ile zaman ortamında Stokastik Altalan Belirleme Yöntemi (SAB) kullanılmıştır.

1.4.2.2.1.1.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) Yöntemi

GFTAA yöntemi, Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (FTAA) yönteminin genişletilmiş halidir. Çevresel titreşim yöntemlerinde en çok kullanılan yöntemlerden birisidir (Zahid vd., 2020). Bu yöntemde, güç spektral matrisinin tekil değer ayrıştırılması ile spektral yoğunluk fonksiyonu oluşturularak piklerin seçilmesiyle modlar elde edilmektedir. FTAA doğal frekanslar ve mod şekilleri belirlenebilirken sönüm oranları belirlenememektedir. GFTAA yönteminde ise doğal frekanslar ve mod şekillerini daha yüksek doğrulukla tahmin edilmekle birlikte sönüm oranları da ayrıca elde edilebilmektedir (Jacobsen, 2006). Fakat, GFTAA yöntemi kullanılarak elde edilen sönüm oranlarının ölçüm

gürültüsünden etkilendiğinden dolayı kesin olarak hesaplanması problem olmakla birlikte geliştirilmeye açık bir alandır (Hasan vd., 2018). GFTAA yönteminde bilinmeyen etki kuvveti ve bilinen davranış fonksiyonu arasındaki ilişki,

$$G_{yy}(j\omega) = H(j\omega)^* G_{xx}(j\omega) H(j\omega)^T \quad (1.1)$$

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

$$G_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^H \quad (1.2)$$

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

1.4.2.2.1.1.2. Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi

SAB yöntemi, çevresel titreşim yönteminde zaman tanım alanına dayalı bir yöntemdir. Bu yöntemde, spektruma veya korelasyona gerek duymadan doğrudan zaman verileriyle çalışan, zaman tanım alanına dayalı bir yöntemdir. Bu yöntemde yapı sisteminin dinamik davranışı lineer şekilde ifade edilmektedir.

$$M\ddot{U}(t) + C\dot{U}(t) + KU(t) = R(t) = Bu(t) \quad (1.3)$$

Burada M , C , K sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, $R(t)$ titreşim kuvvetini, $U(t)$, $\dot{U}(t)$, $\ddot{U}(t)$ ise zamana bağlı yer değiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. $R(t)$

kuvvet vektörü olmak üzere, ölçüm verilerini simgeleyen B matrisi ve $u(t)$ vektörü cinsinden ifade edilmektedir. Denklem (1.3)'de verilen dinamik denge denklemi, yapının davranışını temsil etmesine rağmen SAB yöntemine uygun değildir. Bu yüzden, denklem (1.3) ayrık-zaman stokastik durum-uzayı modeline dönüştürülmesiyle daha uygun bir form haline getirilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Denklem (1.3) aşağıdaki tanımlamalar kullanılarak,

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= \begin{pmatrix} U(t) \\ \dot{U}(t) \end{pmatrix} \\ A_* &= \begin{pmatrix} 0 & I_{n_2} \\ -M^{-1} & -M^{-1}C \end{pmatrix} \\ B_* &= \begin{pmatrix} 0 \\ -M^{-1}B \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

$$\dot{x}(t) = A_* x(t) + B_* u(t) \quad (1.5)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Burada, A_* durum matrisini, B_* veri matrisini ve $x(t)$ durum vektörünü göstermektedir. Çevresel titreşim testlerinde, yapının bütün düğüm noktalarını ölçmek pek mümkün olmadığından dolayı durum-uzay vektörünün eleman sayısı, sistemin durumunu tanımlayan bağımsız değişken sayısına eşittir. Gözlem denklemi,

$$y(t) = C_* x(t) + D_* u(t) \quad (1.6)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Burada C_* sistem davranış matrisini, D_* doğrudan iletişim matrisini göstermektedir. Denklem (1.5) ve (1.6) sürekli-zaman durum-uzayı modelini oluşturmaktadır. Ortamlardaki gürültüler ve örnekleme süresi sinyal verilerini etkilemektedir. Örneklemeden sonra, durum-uzay modeli,

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= A_* x_k + B_* u_k \\ y_k &= C_* x_k + D_* u_k \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Burada, $x_k = x(k\Delta t)$ ayrık-zaman durum vektörünü, u_k etki sinyal vektörünü göstermektedir. Gerçek çevresel koşullarda yapılan ölçümler, yapıya ve dış ortamdaki gürültüye ait sinyalleri içermektedir. Bu nedenle stokastik durum-uzay model, denklem (1.7) stokastik gürültü bileşenleri eklendiğinde,

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= A_* x_k + B_* u_k + w_k \\ y_k &= C_* x_k + D_* u_k + v_k \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

şeklinde ifade olmaktadır (Yu ve Ren, 2005). Burada, w_k modeldeki belirsizlikler nedeniyle işlenen gürültü sinyallerini, v_k ise sensörde meydana gelen gürültü sinyalini göstermektedir. Her iki vektörde değeri ölçülemeyen sinyallerden oluşmaktadır. Kovaryans ve beyaz gürültü matrisleri,

$$E_x \left[\begin{pmatrix} w_p \\ v_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_q^T & v_q^T \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad (1.9)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Burada, E_* beklenen değer operatörünü, δ_{pq} ise Kronecker deltayı göstermektedir. Kronecker delta iki değişkenli bir fonksiyondur ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\delta_{pq} = \begin{cases} 1, \text{eğer } p = q \\ 0, \text{eğer } p \neq q \end{cases} \quad (1.10)$$

SAB yönteminde yapı sisteminin davranışı, normal operasyon koşullarında değeri ölçülemeyen sinyallerle titreştirilerek belirlenmektedir. Bu veri eksikliğinden dolayı, Denklem (1.8)'de gösterilen belirgin sinyal verisi u_k 'yi, gürültü terimleri olan w_k ve v_k 'den ayırt etmek mümkün değildir. Bu durumda, u_k gürültü terimleri w_k ve v_k cinsinden yazılırsa yapının ayrık-zaman stokastik durum-uzay modeli,

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= A_* x_k + W_k \\ y_k &= C_* x_k + v_k \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (1.11), dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde zaman alanının temelinı oluşturmaktadır.

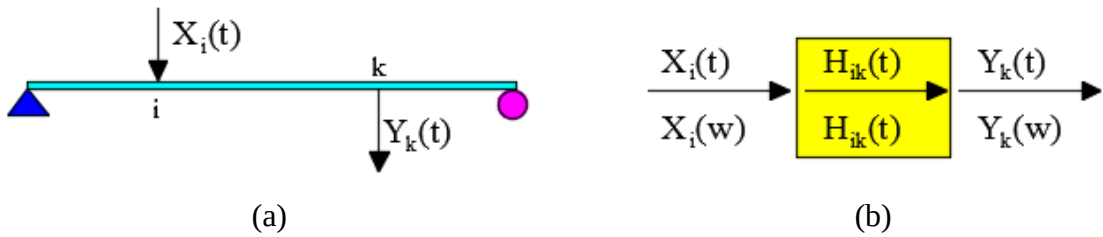
1.4.2.2.1.2. Zorlanmış Titreşim Yöntemi

Zorlanmış Titreşim Yöntemi'nde, yapı $X_i(t)$ gibi ölçülebilen etki sonucu yapının bu etkiye göstermiş olduğu tepki $Y_k(t)$, $X_i(t)$ ile birlikte ölçülmektedir (Şekil 1.10a). Yapıya etki eden bu ölçülebilen etkiler, sarsıcılar veya darbe çekiçleri ile olabilmektedir. Ölçülen bu sinyaller frekans tanım alanında Hızlı Fourier Dönüşümü kullanılarak, etki-tepki zaman sinyalleri arasındaki ilişkiyi gösteren FDF- H_{ik} yerini Transfer Matrisi $H_{ik}(iw)$ olarak adlandırılan FDF matrisine bırakmaktadır (Şekil 1.10b) (Schwarz ve Richardson, 1999).

Zorlanmış Titreşim Yöntemi'nde, etki-tepki sinyalleri arasındaki ilişki,

$$H_{ik} = \frac{Y_k(w)}{X_i(w)} \quad (1.12)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; $H_{ik}(iw)$ Frekans Davranış Fonksiyonu'nu, $X_i(w)$ frekans tanım alanındaki tepki fonksiyonunu ve $Y_k(w)$ frekans tanım alanındaki etki fonksiyonunu göstermektedir. Farklı sayısal teknikler yardımıyla Frekans Davranış Fonksiyonu kullanılarak yapıya ait dinamik karakteristikler (frekanslar, mod şekli ve sönüm oranı) elde edilmektedir.



Şekil 1.10. Zorlanmış Titreşim Yöntemi'ne ait a) şematik gösterim b) Frekans davranış fonksiyonunun belirlenmesi

1.5. Sonlu Eleman Yöntemi

Sonlu Eleman Yöntemi (SEY), yapısal elemanların mekanik özelliklerini ve davranışını inceleyebilmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, sayısal bir yöntemdir ve matematiksel modeller kullanılarak uygulanmaktadır. SEY, karmaşık modelleri analitik yöntemlere göre daha kolay ve hızlı analiz yaptığı için son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. SEY uygulanması için geometrinin modellenmesi, malzeme ve sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Bu amaçla oluşturulan model Sonlu Eleman Model (SEM) olarak tanımlanmaktadır.

SEM geometrisinde sonsuz tane nokta bulunmaktadır. Tüm noktaları analiz etmek hem zaman kaybı oluşturmakta hem de denklem çözümlemelerinde hata oranını arttıracaktır. SEY’de sonsuz sayıda noktası olan bir modelin sonlu parçalara bölünmesi ile analizler gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle, yapının gerçek davranışını temsil etmek için SEM çok sayıda sonlu parçalara bölünmesi gerekmektedir. SEM’in yeterli sonlu sayıda parçalara ayrılmazsa analiz sonuçlarının hassas sonuç vermeyeceği ifade edilmektedir (Zienkiewicz, 2000). SEM’in çok sayıda parçaya bölünmesi sonucunda oluşan işlem hacminin fazla olacağına dikkate edilmelidir. Ayrıca, belirli bir sonlu parçadan sonra analiz sonuçlarında herhangi bir farklılaşma oluşmamaktadır. Bu nedenle, SEM oluşturmak için yapıyı en iyi temsil edecek sonlu eleman sayısının optimum seviyede olmasına özen gösterilmelidir. SEY’de, yapının gerçek davranışını temsil edecek eleman tipinin seçilmesi gerekmektedir. Şekil 1.11’de bir, iki ve üç boyutlu sonlu eleman örnekleri verilmektedir. Genellikle kafes sistemler için bir boyutlu, perde ve plaklar için iki boyutlu, köprü, baraj ve tarihi yapılar için ise üç boyutlu eleman tipi kullanılmaktadır.

a) 1D	b) 2D	c) 3D
Çubuk 2 D.N. 3 D.N. D.N.: Düşüm Noktası	Üçgen 3 D.N. Dörtgen 4 D.N. 6 D.N. 8 D.N.	Dört yüzlü 4 D.N. Beş yüzlü 8 D.N. Altı yüzlü 8 D.N. 10 D.N. 15 D.N. 20 D.N.

Şekil 1.11. Bir, iki ve üç boyutlu sonlu eleman örnekleri

1.5.1. Sonlu Eleman Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

SEY’de, dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde Modal Analiz Yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde çok serbestlik dereceli sistemlerin hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (1.13)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, $[M]$ kütle matrisini, $[C]$ sönüm matrisini, $[K]$ rijitlik matrisini, $\{x(t)\}$ yer değiştirme vektörünü, $\{\dot{x}(t)\}$ hız vektörünü, $\{\ddot{x}(t)\}$ ivme vektörünü ve $\{F(t)\}$ kuvvet vektörünü göstermektedir.

Bir yapının dinamik karakteristiklerine ait doğal frekans ve mod şekillerini belirlemek için sönümsüz serbest titreşim hareket denklemi kullanılmaktadır. Serbest titreşim hareketinde, dış ortamda meydana gelen etki kuvvetinin olmadığı kabul edilmektedir. Sistemin zamana bağlı sönümsüz serbest titreşim hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (1.14)$$

olarak belirlenmektedir. Denklemin çözümü için,

$$\{x(t)\} = \{X\}e^{i\omega t} \quad (1.15)$$

denklem (1.15) ifadesi denklem (1.14)’te yerine yazılırsa,

$$([K] - \omega^2 [M])\{x\}e^{i\omega t} = \{0\} \quad (1.16)$$

denklemi elde edilmektedir. Bu denklemin sıfırdan farklı çözümü için aşağıda belirtilen karakteristik determinant elde edilmektedir.

$$\det|[K] - \omega^2 [M]| = 0 \quad (1.17)$$

N serbestlik derecesine sahip bir sistem için, denklem (1.17) çözümünden sönümsüz doğal açısal frekans (özdeğer) ($w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$) elde edilmektedir. Özdeğerlerin küçükten

büyüğe doğru sıralanmasıyla elde edilen en küçük frekansa hakim frekans ve bu frekansa karşılık mod şekli ise (özvektör) hakim mod şekli olarak isimlendirilmektedir.

1.6. Dinamik Karakteristikler Arasında Karşılaştırma ve Korelasyon Teknikleri

Mühendislik yapılarında kullanılan korelasyon teknikleri iki model arasındaki uyumluluğun değerlendirilmesi için kullanılmaktadır. Bu iki model, sayısal ve deneysel modeller arasındaki farklılıklar olabileceği gibi deneysel modellerin kendi içinde de karşılaştırılması olabilmektedir. Dinamik karakteristikler arasında en yaygın kullanılan korelasyon teknikleri bu bölümde verilmiştir.

1.6.1. Doğal Frekansların Korelasyonu

Doğal frekansların korelasyonu en yaygın ve basit bir yaklaşım olarak kullanılmaktadır (Şahin, 2009). İki model arasındaki doğal frekansların karşılaştırılmasında kullanılan denklem aşağıda verilmiştir.

$$\Delta = \left| \frac{f_j - f_i}{f_i} \right| \quad (1.18)$$

Burada f_j ve f_i sırasıyla j ve i sayısal/deneysel modellere ait elde edilen doğal frekans değerlerini göstermektedir. Δ değişim oranı vermektedir.

1.6.2. Mod Şekillerinin Korelasyonu

Mod şekilleri, yapının ilgili doğal frekansına karşı göstermiş olduğu modal yer değiştirme davranışını ifade etmekte ve birimsiz genliklerden oluşmaktadır. Dinamik karakteristikler arasındaki karşılaştırmalarda doğal frekanslarla beraber mod şekillerinin de karşılaştırılması yapılmaktadır. Bunun için en çok kullanılan yöntemler Modal Güvence Kriteri ve Koordinat Modal Güvence Kriterleri olup, bu yöntemlere ait formülasyonlar aşağıda verilmiştir.

1.6.2.1. Modal Güvence Kriteri

Modal Güvence Kriteri (Modal Assurance Criterion – MAC), İki model olarak hesaplanan farklı mod şekil vektörlerinin bütünsel bir benzerliğini karşılaştırmak amacıyla kullanılmaktadır. MAC değeri,

$$MAC(i, j) = \frac{|\phi'_{xi} \cdot \phi_{yj}|^2}{(\phi'_{xi} \cdot \phi_{xi}) \cdot (\phi'_{yj} \cdot \phi_{yj})} \quad (1.19)$$

bağıntısı ile ifade edilmektedir (Heylen vd. 2007). Burada ϕ_{xi} , ϕ_{yj} sırasıyla x ve y modellerine ait mod şekil vektörlerini göstermektedir. MAC(i, j), iki model arasındaki mod şekil vektörlerinin ne kadar benzer olduğunu göstermektedir. Tüm mod şekilleri hesaplanarak, MAC değerleri bir MAC matrisini oluşturmaktadır. MAC değerleri 0-1 arasında değişmektedir. Sıfır değeri iki mod arasında herhangi bir korelasyon olmadığını gösterirken bu değer yükseldikçe korelasyon değerinin de artacağı ifade edilmektedir (Jaishi, 2005).

1.6.2.2. Koordinat Modal Güvence Kriteri

Koordinat Modal Güvence Kriteri (Coordinate Modal Assurance Criterion – COMAC), iki model arasındaki mod şekillerinin düğüm noktaları arasındaki benzerliğini karşılaştırmak amacıyla kullanılmaktadır. COMAC değeri,

$$COMAC(i) = \frac{\left(\sum_{j=1}^{N_m} |\phi_{xij} \cdot \phi_{yij}| \right)^2}{\left(\sum_{j=1}^{N_m} |\phi_{xij} \cdot \phi_{xij}| \right) \cdot \left(\sum_{j=1}^{N_m} |\phi_{yij} \cdot \phi_{yij}| \right)} \quad (1.20)$$

ifade edilmektedir (Lieven ve Ewins, 1988). Burada ϕ_{xij} x modeline ait j.ci mod şekil vektörünün i.ci düğüm noktasına ait modal yerdeğiştirme değerini, ϕ_{yij} y modeline ait j.ci mod şekil vektörünün i.ci düğüm noktasına ait modal yerdeğiştirme değerini ve N_m ise toplam mod şekli sayısını göstermektedir. COMAC değeri 0-1 arasında değişmekte ve bire

yakın olması ilgili düğüm noktasındaki modal yerdeğişikliklerin birbirine yakın olduğu anlamına gelmektedir (Lieven ve Ewins, 1988).

1.7. Sonlu Eleman Model Güncellemesi

Sonlu Eleman Model Güncellemesi sensörler aracılığıyla deneysel ölçümlerden elde edilen veriler (şekil değiştirme, gerilme, dinamik karakteristikler vb.) referans alınarak SEM üzerinde yapısal parametrelerinin (sınır koşulları, rijitlik, malzeme özellikleri vb.) değiştirilmesine dayalı yöntemlerdir. Bu yöntemin amacı, sonlu eleman analizi (sayısal) ve deneysel olarak elde edilen sonuçları mümkün olduğunca birbirine yaklaştırarak istenilen korelasyonun sağlanması, yapıların mevcut durum değerlendirilmesinin yapılması ve oluşabilecek hasarın varlığı, bölgesini ve şiddetini tahmin edilebilmesidir (1-3.Seviye).

Literatürde Sonlu Eleman Model Güncelleme ile ilgili Yapay Sinir Ağları, İstatiksel Model Güncelleme, Genetik Algoritma, Optimum Matris Güncelleme, Duyarlılığa Bağlı Model Güncelleme Yöntemleri gibi birçok yöntem kullanılmaktadır. Tez çalışması kapsamında deneysel olarak titreşim verilerinden elde edilen dinamik karakteristiklerin referans olarak kullanılarak Sonlu Eleman Model Güncellemesi için Bayes Duyarlılığa Bağlı Model Güncelleme Yöntemi kullanılmış olup bu yöntemle ait işlem adımları bu kısımda anlatılmıştır.

1.7.1. Belirsiz Parametrelerin Seçilmesi

Sonlu eleman modelin oluşturulmasında en önemli adım sınır şartları, kesit özellikleri ve malzeme özelliklerinin tanımlanmasıdır. Bu parametreler yapısal parametreler olduğu için sonuçların yapı davranışı üzerindeki etkisi oldukça fazladır. Bu nedenle bu yapısal parametrelerin gerçeğe yakın bir değer seçilmesi ya da deneysel olarak elde edilen sonuçları en iyi yansıtacak şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Sonlu Eleman Model Güncellemesinde, belirsiz parametre olarak genellikle elastisite modülü, birim hacim ağırlığı gibi malzeme özellikleri, yay eleman olarak tanımlamalarında kullanılan mesnet şartları, çubuk elemanlarda kesit atalet momentleri ve birleşim bölgelerindeki dönme değerleri göz önüne alınmaktadır (Vanhonacker vd.,1980). Sonlu Eleman Model Güncelleme yapılmadan önce, seçilen belirsiz parametrelerin yapısal davranış üzerindeki etkisini görmek için duyarlılık analizi yapılmalıdır.

1.7.2. Duyarlılık Analizi

Duyarlılık analizi, sonlu eleman güncelleme için belirlenen belirsiz parametrelerin analiz sonuçlarını nasıl etkilediğini gösteren bir yöntemdir. Duyarlılık analizinde en çok kullanılan Sonlu Fark Duyarlılık Analizi ve Diferansiyel Duyarlılık Analizi yöntemleridir. Tez çalışması kapsamında, belirsiz parametrelerin dinamik karakteristikler üzerine etkisinin belirlenmesi için Diferansiyel Duyarlılık Analizi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, duyarlılık matrisi,

$$[S] = S_{ij} = \left[\frac{\delta R_i}{\delta P_j} \right] \quad i = 1 \dots N, \quad j = 1 \dots N \quad (1.21)$$

olarak elde edilmektedir (Zeischka vd., 1988). Burada, R_i tepki değerlerini, P_j ise parametre değerlerini göstermektedir. Belirsiz parametrelerin doğal frekans üzerine etkisini incelemek için Frekans Diferansiyel Duyarlılık Analizi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, sönümsüz çok serbestlik dereceli sistemlerde hareket denklemleri kullanılarak belirsiz parametrelerin frekans üzerindeki etkisi, aşağıdaki denklemlerden elde edilmektedir.

$$\{\phi_i\}^T [K] \frac{\delta \{\phi_k\}}{\delta P_j} = \frac{\delta \{\phi_i\}^T}{\delta P_j} [K] \{\phi_k\} \quad (1.22)$$

$$\{\phi_i\}^T [M] \frac{\delta \{\phi_k\}}{\delta P_j} = \frac{\delta \{\phi_i\}^T}{\delta P_j} [M] \{\phi_k\} \quad (1.23)$$

$i=k$ olması durumunda,

$$\frac{\delta f_i}{\delta P_j} = \frac{\{\phi_i\}^T \left(\frac{\delta [K]}{\delta P_j} - 4\pi^2 f_i^2 \frac{\delta [M]}{\delta P_j} \right) \{\phi_i\}}{8\pi^2 f_i^2 \left(\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\} \right)} \quad (1.24)$$

denklemleri elde edilmektedir (Jung, 1992). Denklem (1.24), parametre değerlerinin rijitlik ve kütle değişimlerini içermektedir.

1.7.3. Yakınsama Kriterlerinin Belirlenmesi

Yakınsama kriteri, deneysel ve sonlu eleman modelden elde edilen dinamik karakteristikler arasındaki farklılığı minimuma indirmeninde hangi koşullarda iterasyonun tamamlanması gerektiğidir. Bunun için bazı kriterler tanımlanmaktadır. Bu kriter genellikle frekanslar için; Ağırlıklı Mutlak Nispi Fark, Ağırlıklı Nispi Fark, mod şekilleri için; Ağırlıklı Mutlak Modal Yer Değiştirme, Ortalama Modal Güvence Kriteri kullanılmaktadır.

Ağırlıklı Mutlak Nispi Fark Kriteri: Sonlu eleman model ve deneysel frekanslar arasındaki mutlak farklılığın ortalamasını dikkate almaktadır. Bu değer,

$$YK = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{R_i} \frac{|\Delta f_i|}{f_i} \quad (1.25)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Ağırlıklı Nispi Fark Kriteri: Sonlu eleman model ve deneysel frekanslar arasındaki göreceli farklılıkların ortalamasını göstermektedir. Bu değer,

$$YK = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{R_i} \frac{\Delta f_i}{f_i} \quad (1.26)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada, YK yakınsama kriterini, C_{R_i} beklenen hata oranını, n mod sayısını ve f_i frekans değerini göstermektedir.

Ortalama Modal Güvence Kriteri Değeri: Sonlu eleman model ve deneysel olarak hesaplanmış modal güvence kriterinin ortalama değerleri göz önüne alınmaktadır. Bu değer,

$$YYK = \frac{1}{C_R} \sum_{i=1}^N (1 - C_{R_i} MGK_i) \quad (1.27)$$

$$C_R = \sum_{i=1}^N C_{R_i} \quad (1.28)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Ağırlıklı Mutlak Modal Yer değiştirme Kriteri: Sonlu eleman model ve deneysel mod şekil bileşenlerinin göreceli farklılıklarının ortalaması dikkate alınmaktadır. Bu değer,

$$YK = \frac{1}{C_R} \sum_{i=1}^N C_{R_i} \frac{\Delta\phi_i}{\phi_i} \quad (1.29)$$

$$C_R = \sum_{i=1}^N C_{R_i} \quad (1.30)$$

olarak tanımlanmaktadır.

1.7.4. Bayes Parametre Tahmin Yöntemi

Bayes Parametre Tahmin Yöntemi, başlangıç sonlu eleman modeli ile deneysel model arasındaki ağırlıklı hata fonksiyonunu kullanılarak dinamik karakteristikler arasındaki farklılıkların minimize edilmesine olanak sağlayan bir yöntemdir. Ağırlaştırılmış hata fonksiyonu,

$$H = \left(\{R\} - \{R^e\} \right)^T [C_R] \left(\{R\} - \{R^e\} \right) + \left(\{P\} - \{P^o\} \right)^T ([C_p]) \left(\{P\} - \{P^o\} \right) \quad (1.31)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, $\{R\}$ ve $\{R^e\}$ sırasıyla sonlu eleman model ile deneysel modal vektörlerini, $\{P\}$ ve $\{P^o\}$ güncellenen modelin ve başlangıç modelinin parametre vektörlerini, $[C_R]$ ve $[C_p]$ deneysel ve model parametrelerin ağırlık matrislerini ve H ise ağırlaştırılmış hata fonksiyonunu göstermektedir. Bu fonksiyonu minimize etmek için kısmi türevi alınıp P_j sıfıra eşitlenirse,

$$\{P\} = \{P^o\} + [G] \left(\{R^e\} - \{R\} \right) \quad (1.32)$$

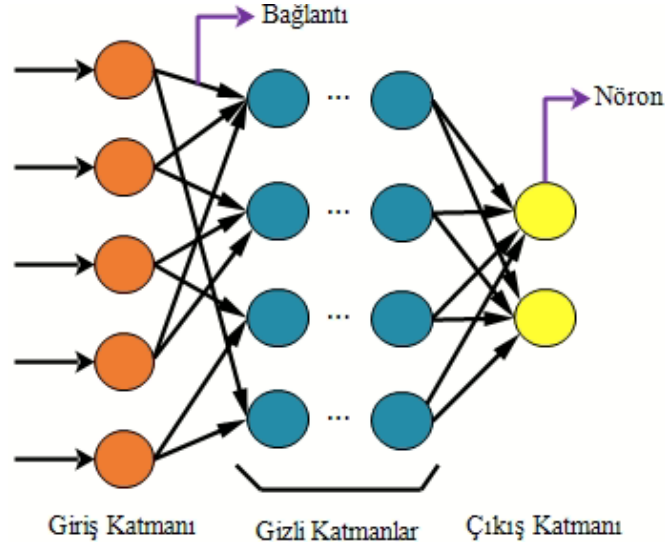
$$[G] = [C_p] [S]^T \left([C_R] + [S] [C_p] [S]^T \right)^{-1} \quad (1.33)$$

ifadesi elde edilmektedir. Burada, $[G]$ kazanım matrisini göstermektedir.

Denklem (1.32) ve Denklem (1.33) kullanılarak iteratif çözüm yapılır. İteratif çözüm istenilen yakınsama kriterleri sağlayana kadar bir döngü halinde devam etmektedir. İstenilen yakınsama kriteri sağlandıktan sonra Sonlu Eleman Model Güncelleme işlemi tamamlanmaktadır. Elde edilen güncel sonlu eleman model yapısal durum değerlendirme, statik/dinamik yükler altında davranışın değerlendirilmesi, yapının kalan ömrünün değerlendirilmesi, Yapı Sağlığı İzlemesi, hasar tespiti gibi birçok konu üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmesine öncülük etmektedir.

1.8. Derin Öğrenme

Derin öğrenme, makine öğrenimi yöntemlerinden biridir ve insan beyninin işleyişini taklit eden yapay sinir ağları kullanılarak çalışır. Öğrenme sırasında, bu ağlar birçok katmana sahip olabilmektedir. Her katman öğrenme işlemi daha da derinleştirerek daha fazla özellik çıkartmaktadır. Yapay sinir ağları insanı beynine benzer şekilde nöronlardan oluşmaktadır. Yapay sinir ağlarına ait görsel Şekil 1.12’de gösterilmiştir. Şekil 1.12’de görüldüğü gibi, tüm nöronlar birbirlerine bağlıdır ve bu nöronlar giriş, gizli ve çıkış katmanı olmak üzere üç farklı katmandan oluşmaktadır.

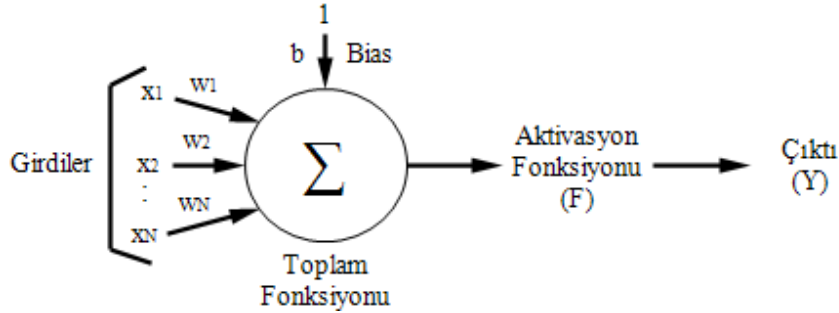


Şekil 1.12. Yapay sinir ağlarına ait görsel

Girdi katmanı, verilerin giriş bölümünü göstermektedir. Burada herhangi bir işlem yapılmadan dış ortamdan gelen verilerin bir sonraki katmana iletilmesi görevini

sağlamaktadır. Gizli katman/katmanlar, girdi katmanından gelen verileri alarak çıktı katmanına iletmektedirler. Bu katmanların sayısı modelin yapısına göre değişmektedir. Gizli katmanların sayısı girdi ve çıktı sayısından bağımsız olarak deneme yanılma yoluyla belirlenmektedir. Çıktı katmanı ise gizli katmanlardan gelen verilere göre bilginin dışarıya iletilme görevini yapan katmandır.

Derin öğrenme birden fazla gizli katmanın olması durumudur (Li ve Yu, 2014; Schmidhuber, 2015; Chien, 2019). Derin öğrenme veri kümelerinden öğrenir ve bu verileri kullanarak çeşitli çıktıların tahminini yapacak olan yapay zekanın eğitilmesine yardımcı olmaktadır. Öğrenme süreci nöronlarda gerçekleşmektedir. Nöronlar bir önceki katmandan gelen bilgileri girdi olarak değer alıp çıktı üretmektedirler (Şekil 1.13). Şekil 1.13'te görüldüğü gibi, nörona dış taraftan gelen girdiler (x_n) kullanılarak bu girdilerin bağlantı ağırlıklarını gösteren (w_n) ile çarpılarak nöronun gövdesine bağlanmaktadır. Her girdiden gelen tüm ağırlıklı girdiler ($x_n * w_n$) toplanmakta ve toplam sonucuna bias (eşik) değeri eklenerek nörona ait net girdiyi ifade eden toplam fonksiyon elde edilmektedir. Toplam fonksiyonundan elde edilen değer aktivasyon fonksiyonuna girdi olarak kullanılarak veri işlenmekte ve işlenmiş bilgi nöron çıktısını sağlamaktadır (López-Monroy ve García-Salinas, 2022).



Şekil 1.13. Nöron yapısına ait görsel (López-Monroy ve García-Salinas, 2022)

Tipik bir nörona ait çıktı değeri,

$$Y = F\left(\sum_{i=1}^n w_n * x_n + b\right) \quad (1.34)$$

olarak ifade edilmektedir (Krenker vd., 2011). Denklem (1.34)'te x_N , w_N , b , Y sırasıyla girdi, ağırlık, bias ve çıktı değerini, F aktivasyon fonksiyonunu göstermektedir.

Ağırlıklar, gizli katmanların içindeki girdi verilerini ölçeklendirmek için kullanılmaktadır. Ağırlıkların değerleri ağırlık performansını etkilemektedir ve genellikle $[-1, 1]$ veya $[-0.5, 0.5]$ aralığında değişmektedir. Model girdi verileriyle ağırlıklar toplanarak toplam fonksiyonunu oluşturur. Toplam fonksiyonu biaslı ve biassız olarak tasarlanabilmektedir fakat bias değeri kullanılan modeller biassız modellerden daha verimli sonuçlar elde edilmektedir (Demirtaş, 2022).

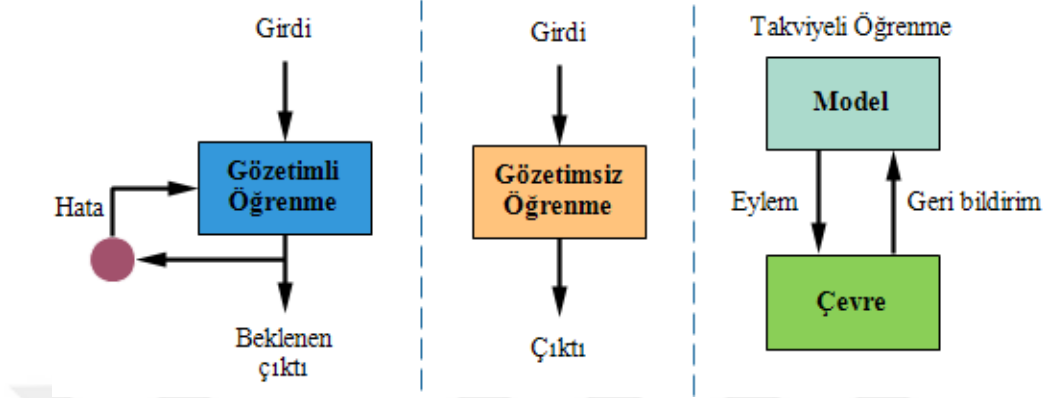
Aktivasyon fonksiyonu nöronların doğrusal/doğrusal olmayan davranışlarının tanımlanması ve çıktıların geniş bir aralıkta olmasını engellemek için kullanılmaktadır (Zhou vd., 2021). Aktivasyon fonksiyon davranışının tanımlanması yapay sinir ağı modeline göre değişmekte olup en yaygın kullanılan aktivasyon fonksiyonları Tablo 1.4'te verilmiştir.

Tablo 1.4. Yaygın olarak kullanılan aktivasyon fonksiyonları (Tharsanee vd., 2021)

Aktivasyon fonksiyonu	Aralık	Kullanım Alanları
Doğrusal	$[-\infty, \infty]$	Doğrusal problemlerin çözümü için kullanılmaktadır
Düzeltilmiş doğrusal	$[0, \infty]$	Karmaşık sinir ağlarına sahip modellerde hızlı ve verimli öğrenme süreçlerinde kullanılmaktadır.
Adım (Basamak)	0 veya 1	Girdileri iki farklı kategoride sınıflandırmak için kullanılmaktadır
Sigmoid	$[-1, 1]$	Olasılıksal bir çıktı elde ederek ikili sınıflandırmada kullanılmaktadır.
Tanjant-Hiperbolik	$[-1, 1]$	Geri yayılım algoritmalarında öğrenme sürecini hızlandırmak için kullanılmaktadır.
Softmax	$[-\infty, \infty]$	Olasılıksal bir çıktı elde ederek çoklu sınıflandırmada kullanılmaktadır.

Yapay sinir ağlarında öğrenme süreçleri için Denetimli, Denetimsiz ve Takviyeli öğrenme olarak üç yöntem kullanılmaktadır. Denetimli öğrenme, girdi ve çıktı verileri kullanıcı tarafından yapılarak verilerin eğitilme sürecinde kullanılmaktadır. Denetimsiz öğrenme, sadece girdi verilerinin kullanıcı tarafından verildiği ve çıktıların bilinmediği durumlarda uygulanmaktadır. Takviyeli öğrenme ise modelin girdi ve çıktıların bulunduğu

ortama göre algılaması ve kendi başına deneme yanılma yoluyla öğrenebilmesidir (Fourati vd., 2021). Yapay sinir ağlarında öğrenme süreçlerine ait görsel Şekil 1.14'te gösterilmiştir.



Şekil 1.14. Yapay sinir ağlarına öğrenme süreçlerine ait görsel (Fourati vd., 2021)

Yapay sinir ağlarının performansını değerlendirmek için birçok farklı kriterler bulunmaktadır. En yaygın kullanılan kriterler aşağıda verilmiştir (Twomey ve Smith, 1995; Sheela ve Deepa, 2013; Rekik vd., 2014; Sevinç ve Kaya, 2021).

$$\text{Ortalama Mutlak Hata (MAE)} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (1.35)$$

$$\text{Hata Kareleri Toplamı (SSE)} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1.36)$$

$$\text{Ortalama Karesel Hata (MSE)} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (1.37)$$

$$\text{Kök Ortalama Karesel Hata (RMSE)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (1.38)$$

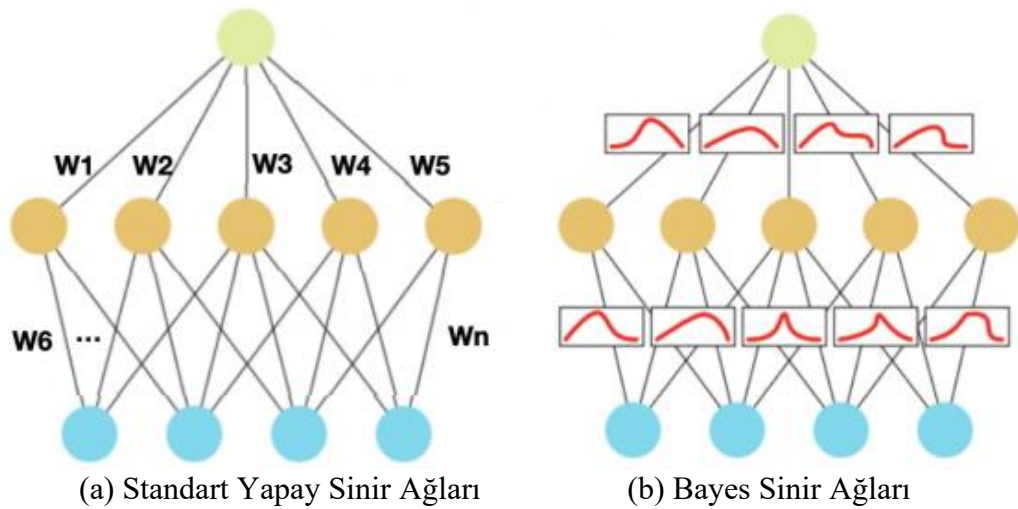
$$\text{Ortalama Mutlak Hata Yüzdesi (MAPE)} = 100 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (1.39)$$

Denklem (1.35-1.39)'da y_i gerçek çıktı değerini, y_i ağı'n ürettiği çıktı değerini ve n veri sayısını göstermektedir.

Derin öğrenme süreçlerinde yapay sinir ağının eğitilmesinde birçok algoritma modeli kullanılmaktadır. Derin öğrenmede yaygın olarak kullanılan algoritma modelleri Evrişimli Sinir Ağları, Uzun Kısa Süreli Bellek Ağları, Tekrarlayan Sinir Ağları, Üretken Düşman Ağları, Radyal Temelli Fonksiyon Ağları, Çok Katmanlı Algılayıcılar, Kendini Düzenleyen Haritalar, Derin İnanç Ağları, Kısıtlı Boltzmann Makineleri, Bayesian Sinir Ağları ve Otokodlayıcılar'dır (Kumar ve Garg, 2018; Shrestha ve Mahmood, 2019; Kumar vd., 2021). Tez çalışması kapsamında derin öğrenme amacıyla Bayesian Sinir Ağları ve Otokodlayıcı kullanılmıştır. İlgili yöntemlere ait bilgiler aşağıda verilmiştir.

1.8.1. Bayes Sinir Ağları

Bayes sinir ağları, modeldeki belirsizlikleri, ağırlıkları ve çıktıları olasılıksal olarak belirleyen bir sinir ağı modelidir (Mullachery vd., 2018). Standart yapay sinir ağlarında veri setlerinden yararlanılarak nöronlardaki ağırlıklar hesaplanmaktadır. Dolayısıyla, ağırlıklar ve çıktılar sabit değer olmaktadır. Bayes sinir ağları modelinde ise ağırlıklar ve çıktılar olasılık dağılımı olarak elde edilmektedir. Standart yapay sinir ağları ve Bayes sinir ağları modellerini arasındaki karşılaştırılmalı görsel Şekil 1.15'te gösterilmiştir.



Şekil 1.15. Standart yapay sinir ağları ve Bayes sinir ağları modelinin karşılaştırması (Pan ve Mishra, 2022)

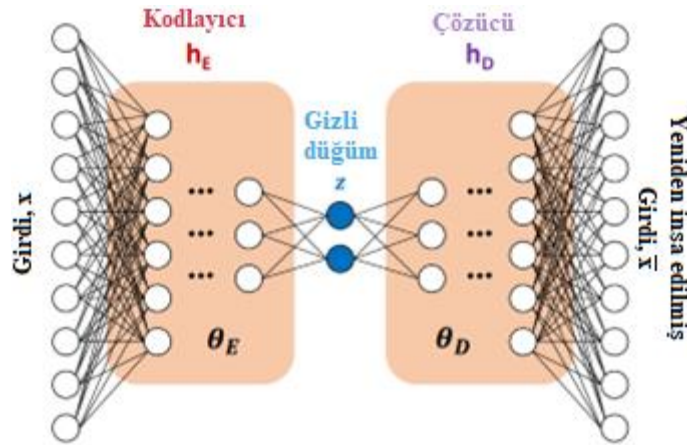
Bayes sinir ağlarında, olasılıksal modellemede Bayes teoremi kullanılmaktadır. Bu teoreme göre nöronlara ait ağırlıkların hesaplanmasında,

$$p(w/D) = \frac{p(D/w)p(w)}{p(D)} \quad (1.39)$$

formülü kullanılmaktadır (Pan ve Mishra, 2022). Burada w ağırlıkları, D girdi veri setini ve p ise olasılığı göstermektedir. Girdi verilerine bağlı olarak denklem (1.39) kullanılarak nöronlara ait ağırlıklar ve çıktıların olasılık dağılımları elde edilmektedir. Aynı şekilde, Bayes sinir ağları kullanılarak çıktılara ait belirsizliklerin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Pan ve Mishra, 2022).

1.8.2. Otokodlayıcılar

Otokodlayıcılar, girdi ve çıktı verilerini kopyalayıp öğrenebilen bir sinir ağı modelidir (Wang vd., 2021). Otokodlayıcılar, kodlayıcı, çözücü ve gizli düğüm olmak üzere üç ana parçadan oluşmaktadır (Şekil 1.16). Otokodlayıcılar veriyi yeniden yapılandırdığı için girdi katmanındaki nöron sayısı ile çıktı katmanındaki nöron sayıları eşittir. Aynı zamanda, Otokodlayıcılar girdi verisini tekrar kendisine eşleştiren bir sinir ağı olarak da düşünülebilir (Karcı, 2021). Otokodlayıcılar'da girdi ve çıktı katmanlarındaki nöron sayıları orta katmanlardan fazla olmaktadır ve bu durum veri boyutunun indirgenmesini sağlamaktadır (Ng, 2011).



Şekil 1.16. Otokodlayıcı ağına ait görsel (Dutta vd., 2021)

Şekil 1.16’da görüldüğü gibi, Otokodlayıcılar’nın girdiden gizli düğüm bölgesine olan kısmına kodlayıcı bölümü olarak ifade edilmektedir. Burada, girdi verisi dikkate alınarak kodlayıcıdan elde edilen gizli düğüm,

$$z = h_E(x; \theta_E) \quad (1.40)$$

olarak ifade edilmektedir (Dutta vd., 2021). Burada z , gizli düğüm vektörünü, h_E kodlayıcıyı, x girdi vektörünü ve θ_E kodlayıcı parametrelerini göstermektedir. Aynı şekilde, yeniden yapılandırılan girdi verisinden gizli düğüme kadar olan kısım çözücü bölümüdür. Bu bölümde yeniden yapılandırılan girdi vektörü

$$\bar{x} = h_D(z; \theta_D) \quad (1.41)$$

olarak ifade edilmektedir (Dutta vd., 2021). Burada, $\bar{x}$ yeniden yapılandırılan girdi vektörünü, h_D çözücüyü ve θ_D çözücü parametrelerini göstermektedir. Otokodlayıcılar’da eğitim yapılırken kodlayıcı ve çözücü parametreleri olan θ_E ve θ_D minimize edilmesiyle,

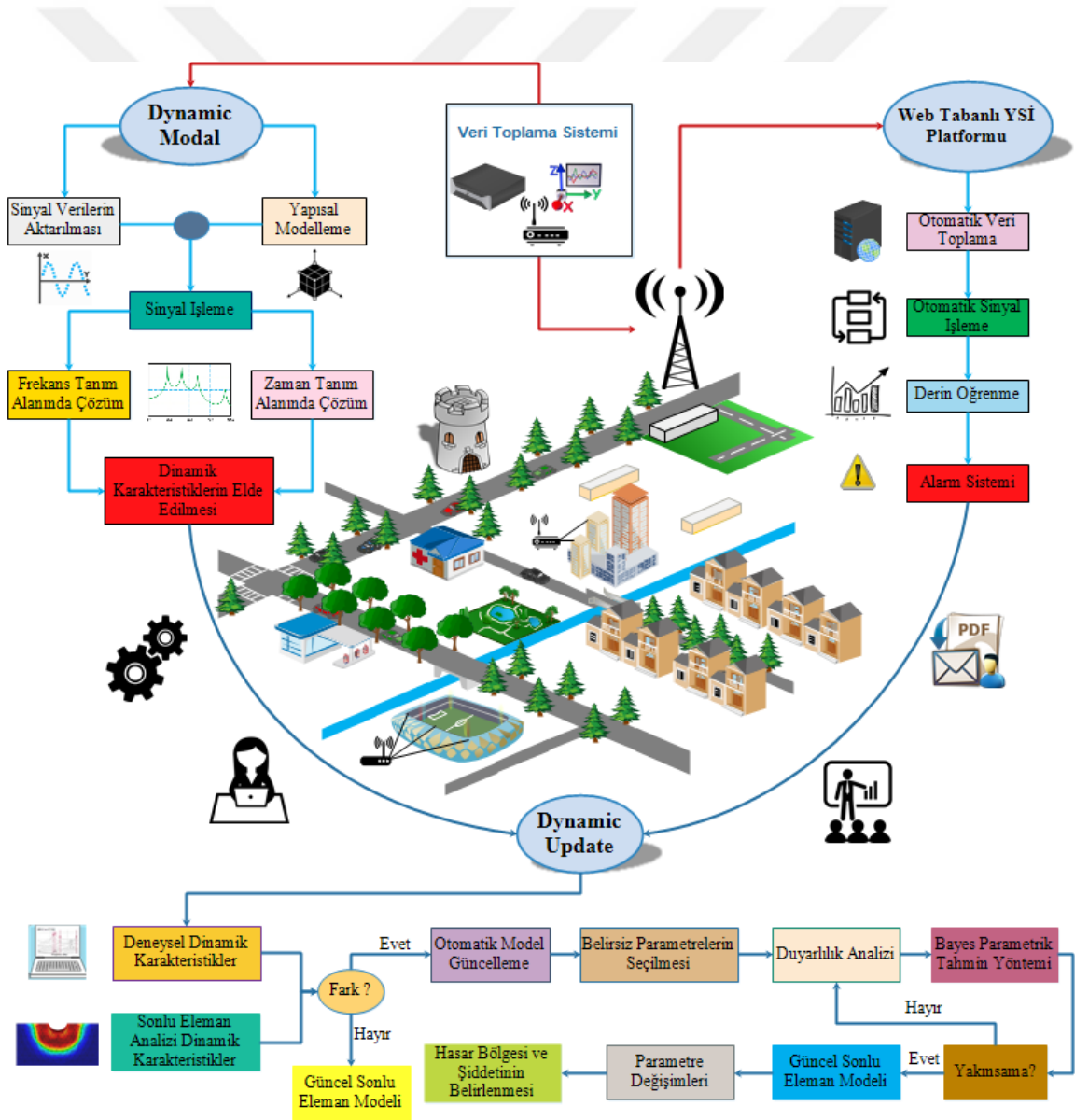
$$\theta_E^*, \theta_D^* = \min_{\theta_E, \theta_D} \mathbb{L}(x, \bar{x}) \quad (1.41)$$

denklemini elde edilmektedir (Dutta vd., 2021). Burada, $\mathbb{L}(x, \bar{x})$ kodlayıcı ve çözücü vektörleri arasındaki farklılığını ve θ_E^*, θ_D^* sırasıyla optimum kodlayıcı ve çözücü parametrelerini göstermektedir. Elde edilen optimum kodlayıcı ve çözücü parametreleriyle Otokodlayıcı modeli oluşturulmaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR BULGULAR VE İRDELEME

2.1. Giriş

Bu tez çalışmasında, mühendislik yapılarında hasar tespiti ve uzun süreli yapı sağlığı izlenmesi amacıyla mühendislik yazılımları geliştirilmiştir. Geliştirilen mühendislik yazılımlarına ait akış şeması Şekil 2.1’de verilmiştir. Bu bölümde, geliştirilen yazılımlara ait detaylı açıklamalarla birlikte yapılan deneysel çalışmalara ait bilgiler, bulgular ve irdelemeler verilmiştir.

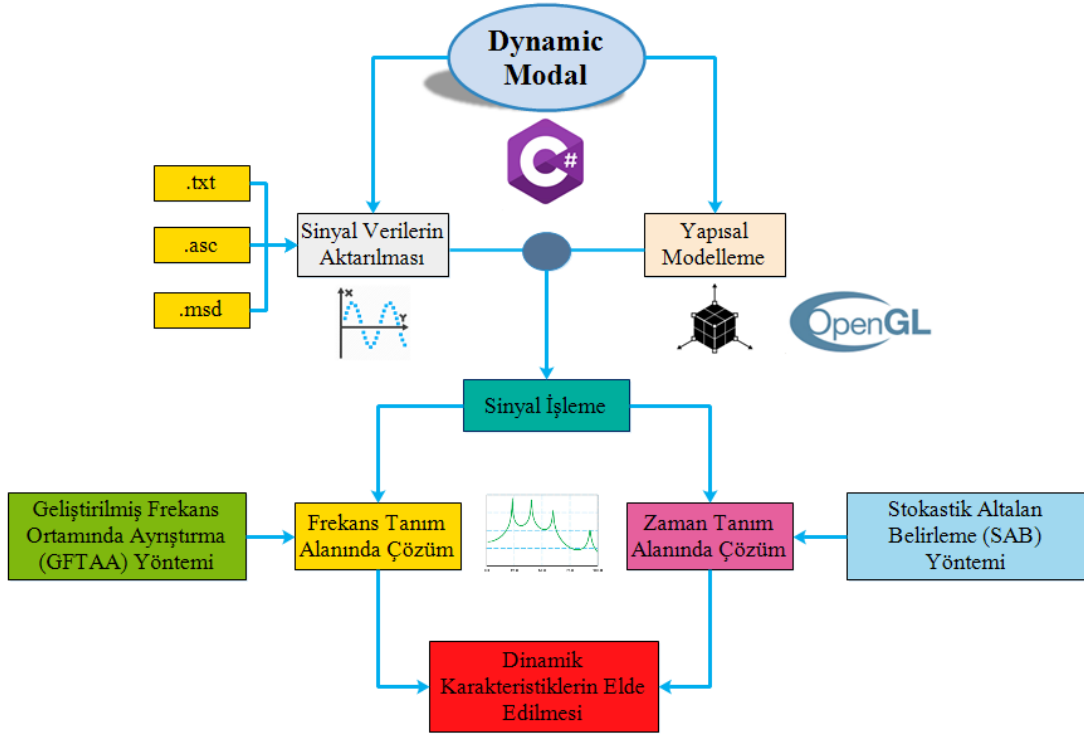


Şekil 2.1. Geliştirilen mühendislik yazılımlarına ait akış şeması

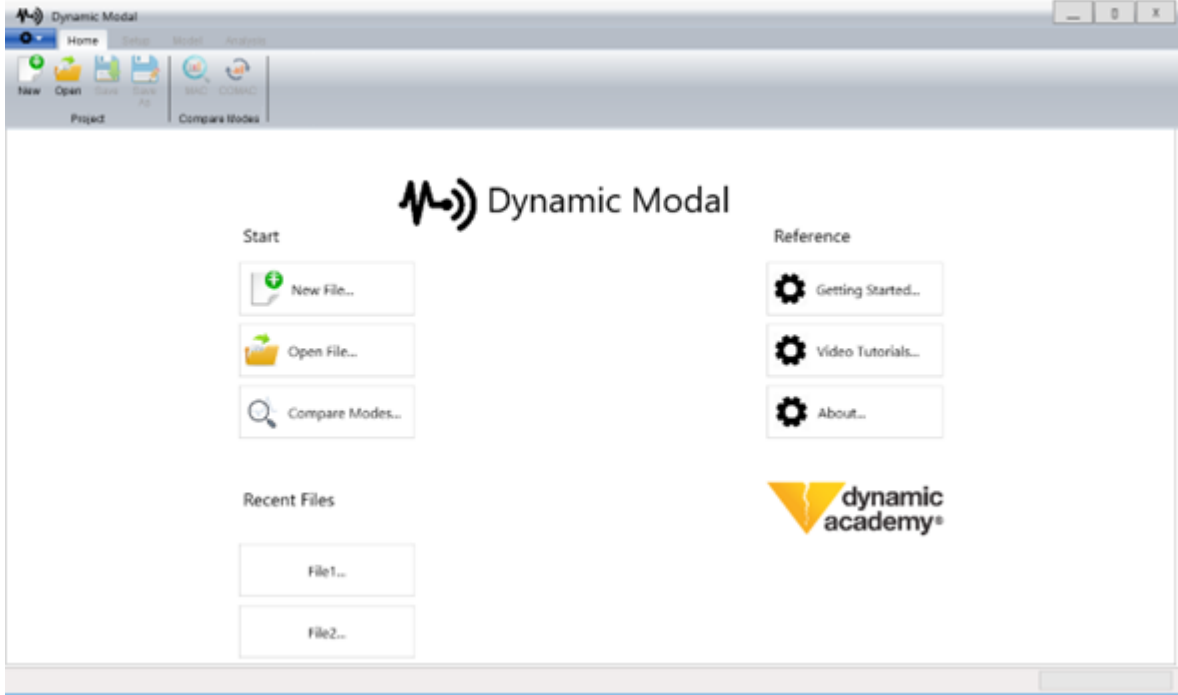
2.2. Geliştirilen Mühendislik Yazılımları

2.2.1. Dynamic Modal Yazılımı

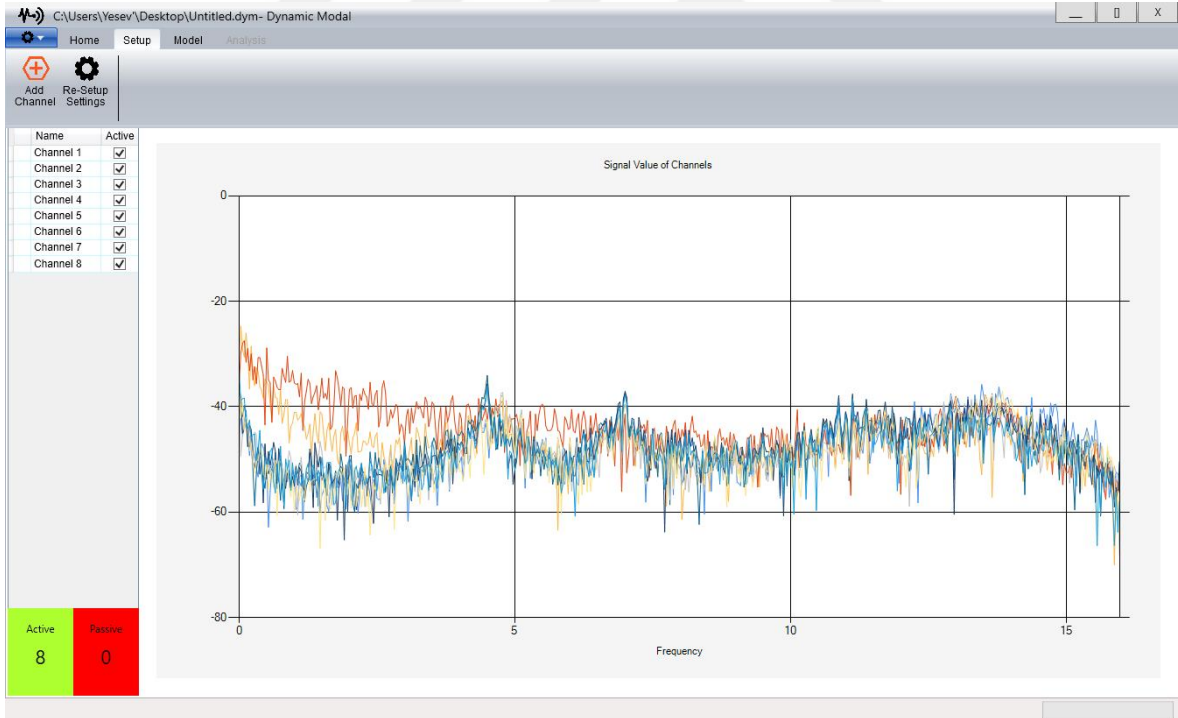
Dynamic Modal, mühendislik yapılarının dinamik davranışlarının deneysel yöntemlerle belirlenmesi ve dinamik karakteristiklerin elde edilmesi amacıyla geliştirilen mühendislik yazılımıdır. Dynamic Modal yazılımında, sinyal verileri dışardan yazılıma aktararak sistem geometrisi ve sensör yerleşim konfigürasyonu tasarlanmaktadır. Elde edilen model verilerine göre Operasyonel Modal Analiz yöntemlerine ait olan frekans alanında GFTAA Yöntemi ve zaman ortamında SAB Yöntemine göre dinamik karakteristikler elde edilebilmektedir. Ayrıca, dinamik karakteristiklerin elde edilmesinden sonra mod şekillerinin animasyon olarak görsel takip edilmesine de olanak sağlamaktadır. Yazılım C# programlama dilinde hazırlanmıştır ve modelleme ekranından OpenGL kütüphanesi kullanılmıştır. Dynamic Modal yazılımına ait akış şeması Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Dynamic Modal yazılımı, ana ekran, kurulum, modelleme ve analiz bölümü olmak üzere dört kısımdan oluşmaktadır. İlgili bölümlere ait genel ekran görüntüleri Şekil 2.3’te verilmiştir.



Şekil 2.2. Dynamic Modal yazılımına ait akış şeması



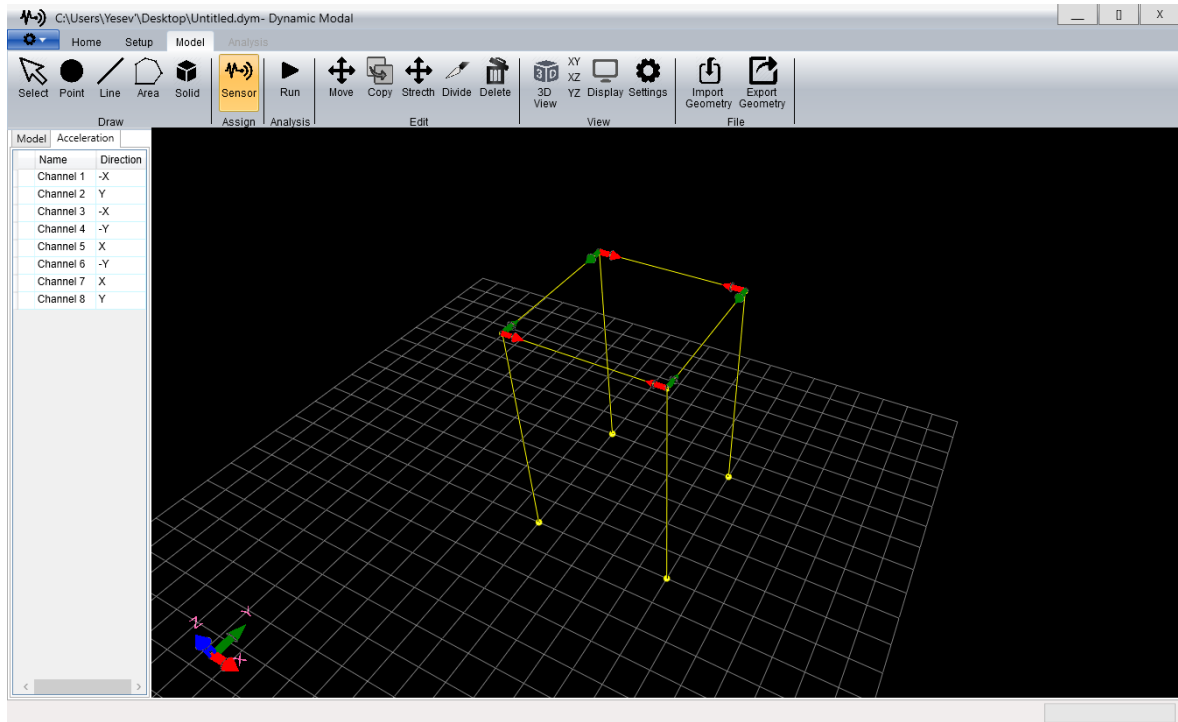
(a) Ana ekran bölümü



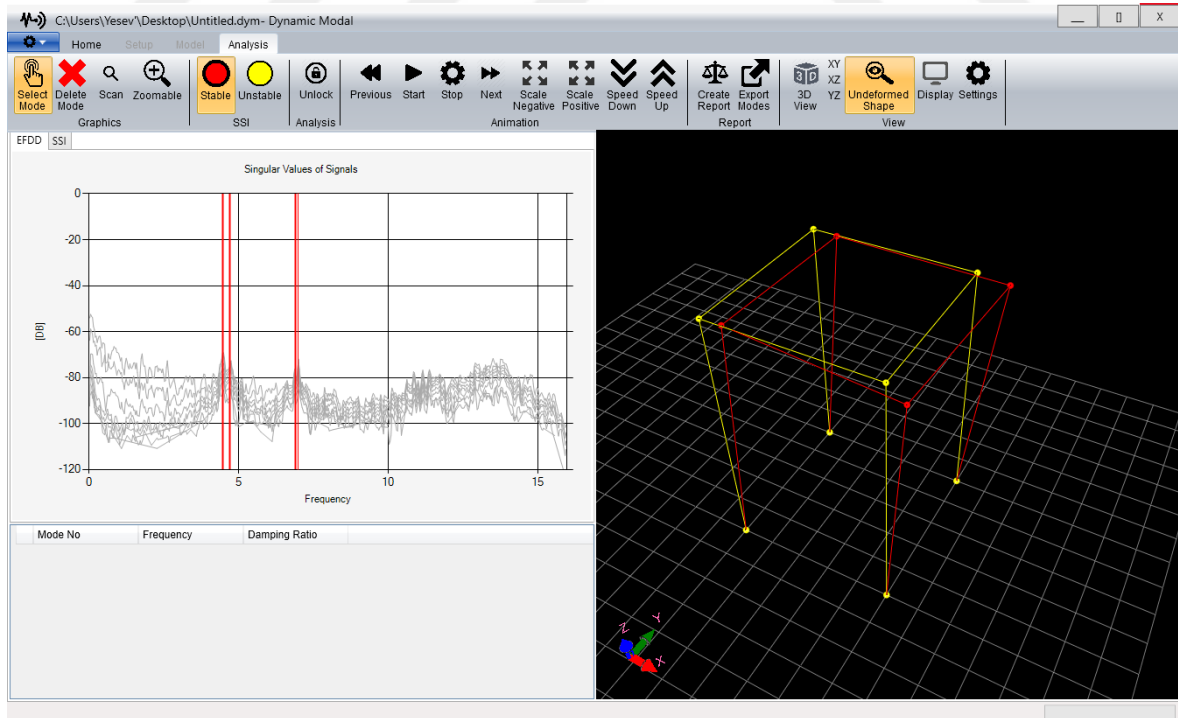
(b) Kurulum bölümü

Şekil 2.3. Dynamic Modal yazılım bölümlerine ait ekran görüntüleri

Şekil 2.3'ün devamı



c) Modelleme bölümü



d) Analiz bölümü

Yazılımın ana ekran bölümü Şekil 2.3(a)'da gösterilmiştir. Bu bölüm, yazılım açıldığı zaman kullanıcıların yeni bir dosya oluşturabileceği, kaydedilen bir dosyayı çağırabileceği, farklı iki dosya arasındaki MAC, COMAC yöntemlerine dayalı korelasyon ilişkisini belirleyebileceği, referans doküman ve bilgilere ulaşabileceği bir kısımdır. Bu bölüm aynı zamanda yazılıma giriş ekranı olarak da düşünülebilir.

Yazılımın kurulum bölümü Şekil 2.3(b)'de gösterilmiştir. Bu bölüm, kullanıcıların ham sinyalleri yazılıma aktarabildiği, sinyallerin çeşitli pencereleme fonksiyonu ile ayarlamaların düzenlenebildiği, kanalların analizlerde aktif ve pasif olarak düzenlenebildiği bir kısımdır.

Yazılımın modelleme bölümü Şekil 2.3(c)'de gösterilmiştir. Bu bölüm, OpenGL grafik teknolojisi kullanılarak kullanıcıların nokta, çubuk, alan ve katı modelleme elemanlarının oluşturulabileceği/düzenlenebileceği, model geometrisinin içeri/dışarı aktarabileceği, sensör kanallarının yönlerinin tanımlanabileceği bir kısımdır.

Yazılımın analiz bölümü Şekil 2.4(d)'de gösterilmiştir. Bu bölüm, yazılıma aktarılan ham sinyaller ve modelleme ekranına girilen sensör yönleri işlenerek GFTAA ve SAB yöntemine göre grafiklerin çıktı olarak alınabileceği, dinamik karakteristiklerin elde edilebileceği, mod şekil animasyonunu başlatma, durdurma, ölçeğini artırma/azaltma takibinin yapabileceği bir kısımdır.

Yukarıda belirtilen hususlar kapsamında Dynamic Modal yazılımında mühendislik yapılarında dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde izlenecek yol aşağıda verilmiştir.

- Ham sinyal verilerinin yazılıma aktarılması
- Sistem geometrisinin modellenmesi ve sensör kanallarına ait yönlerin ilgili düğüm noktalarına tanımlanması
- Frekans tanım alanında GFTAA ve zaman tanım alanında SAB yöntemine göre analizlerin yapılması
- Elde edilen dinamik karakteristiklerin kullanıcı tarafından doğruluk, tutarlılık kontrollerinin yapılması ve mod şekillerinin görsel animasyonlarının değerlendirilmesi

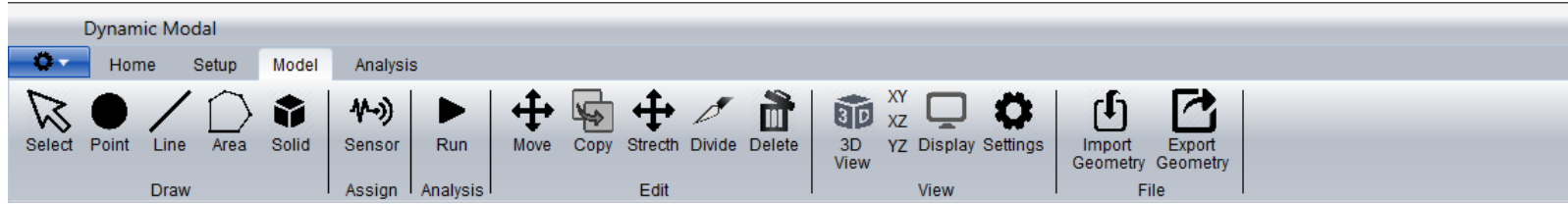
Dynamic Modal yazılımında dört bölümün üst menü butonlarına ait ekran görüntüsü Şekil 2.4'te ve butonların kullanım amaçları Tablo 2.1-2.4'te verilmiştir.



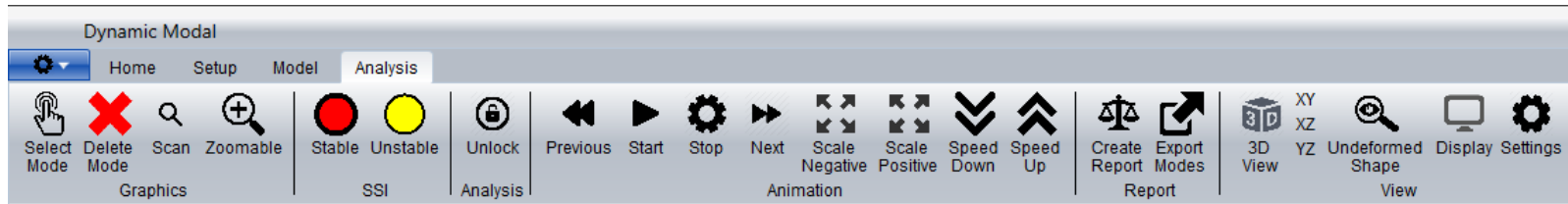
(a) Ana ekran bölümü menü butonları



(b) Kurulum bölümü menü butonları



(c) Modelleme bölümü menü butonları



(d) Analiz bölümü menü butonları

Şekil 2.4. Dynamic Modal yazılım menü butonlarına ait ekran görüntüleri

Tablo 2.1. Dynamic Modal yazılımı ana ekran bölümüne ait üst menü butonları

Buton	Açıklama	Buton	Açıklama
 New	Yeni çalışma dosyası oluştur	 Open	Çalışma dosyası aç
 Save	Çalışma dosyasını kaydet	 Save As	Çalışma dosyasını farklı kaydet
 MAC	MAC analizi	 COMAC	COMAC analizi

Tablo 2.2. Dynamic Modal yazılımı kurulum ekran bölümüne ait üst menü butonları

Buton	Açıklama	Buton	Açıklama
 Add Channel	Sensör kanal ekle	 Re-Setup Settings	Kurulum ayarlarını yeniden düzenle

Tablo 2.3. Dynamic Modal yazılımı modelleme bölümüne ait üst menü butonları

Buton	Açıklama	Buton	Açıklama
 Select	Seçim modu	 Point	Nokta eleman oluştur
 Line	Çubuk eleman oluştur	 Area	Alan eleman oluştur
 Solid	Katı eleman oluştur	 Sensor	Sensör atama
 Run	Analiz	 Move	Eleman taşıma işlemi
 Copy	Eleman kopyalama işlemi	 Stretch	Eleman uzatma işlemi

Tablo 2.3'ün devamı

Buton	Açıklama	Buton	Açıklama
 Divide	Eleman bölme	 Delete	Eleman silme
 3D View	Kamera 3D görünüşü	XY	Kamera XY görünüşü
XZ	Kamera XZ görünüşü	YZ	Kamera YZ görünüşü
 Display	Görüntü düzenleme	 Settings	Görüntü ayarları
 Import Geometry	Geometri içeri aktar	 Export Geometry	Geometri dışarı aktar

Tablo 2.4. Dynamic Modal yazılımı analiz bölümüne ait üst menü butonları

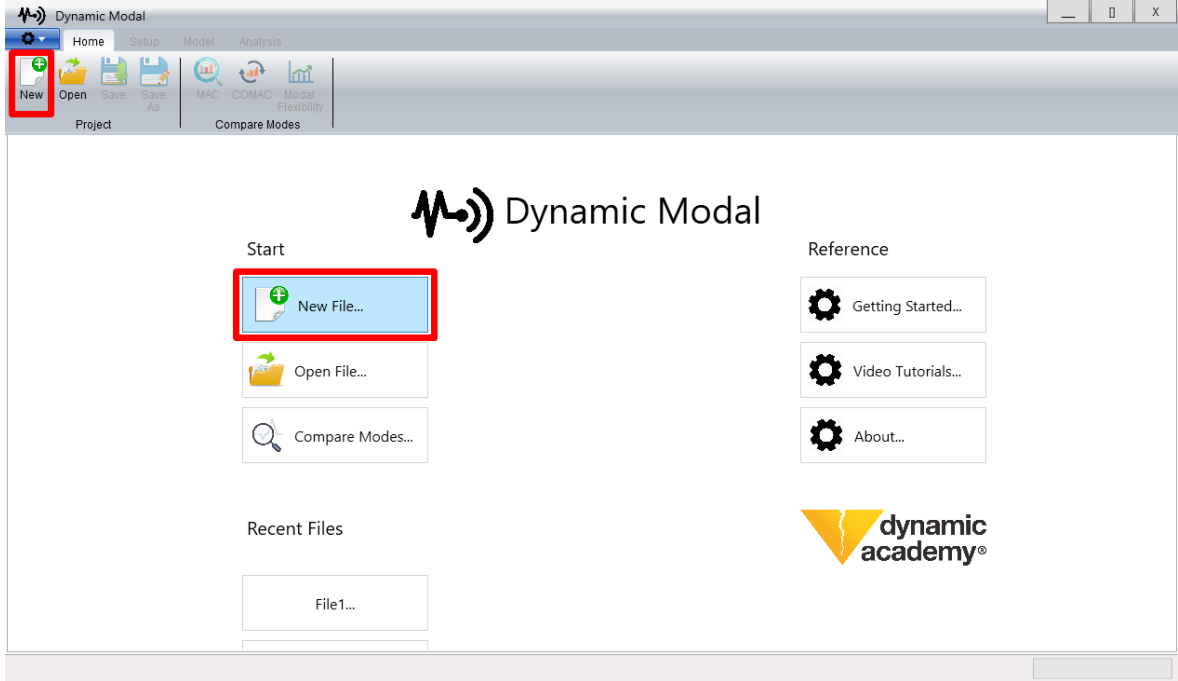
Buton	Açıklama	Buton	Açıklama
 Select Mode	Grafik seçim modu	 Delete Mode	Mod silme
 Scan	SAB yöntemine göre tarama işlemi	 Zoomable	Grafik yakınlaştırma
 Stable	SAB yöntemi stabilizasyonları göster/gösterme	 Unstable	SAB yöntemi stabil olmayanları göster/gösterme
 Unlock	Analiz kilidini açma	 Previous	Mod animasyonu önceki kare
 Start	Mod animasyonu başlat	 Stop	Mod animasyonu durdur
 Next	Mod animasyonu sonraki kare	 Scale Negative	Mod animasyonu genlik ölçeğini azaltma

Tablo 2.4'ün devamı

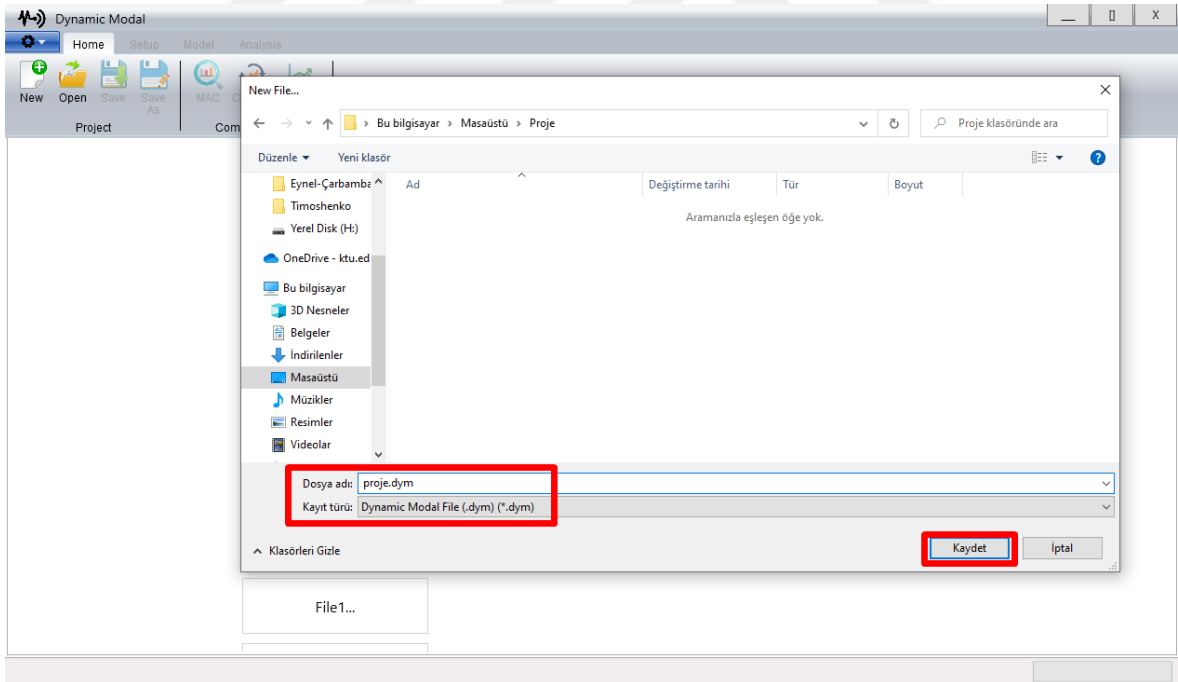
Buton	Açıklama	Buton	Açıklama
	Mod animasyonu genlik ölçeğini artırma		Mod animasyonu hız düşürme
	Mod animasyonu hız arttırma		Rapor oluşturma
	Seçilen modları dışarı aktar		Kamera 3D görünüş
XY	Kamera XY görünüş	XZ	Kamera XZ görünüş
YZ	Kamera YZ görünüş		Şekil değiştirmemiş durumu göster
	Görüntü düzenleme		Görüntü ayarları

2.2.1.1. Sensör Verilerinin Sisteme Aktarılması

Dynamic Modal yazılımı açıldığı zaman ilk olarak ana ekran bölümü (Şekil 2.3(a)) çıkmaktadır. Bu ekranda yeni proje yapılması istendiğinde üst menü butonundan New veya ana ekran üzerinde bulunan New File butonuna tıklanır (Şekil 2.5). Ekrana gelen pencere üzerinde yeni oluşturulacak proje dosyasının kaydedileceği konum ve proje dosyasının ismi belirtilerek kaydet butonuna tıklanıp Dynamic Modal File uzantılı (.dym) dosyası oluşturulur (Şekil 2.6). Bu dosya uzantısı içinde ham sinyal dosya özellikleri, geometri, analiz sonuçları gibi proje verilerine ait tüm bilgileri barındırmaktadır. Dynamic Modal File uzantılı (.dym) dosya verileri açık okunabilir JSON (JavaScript Object Notation) formatında kaydedilmektedir. Bu sayede, elde edilen verilerin başka masaüstü ve web uygulamalarında verilerin aktarılması/görülmesine imkan sağlamaktadır.



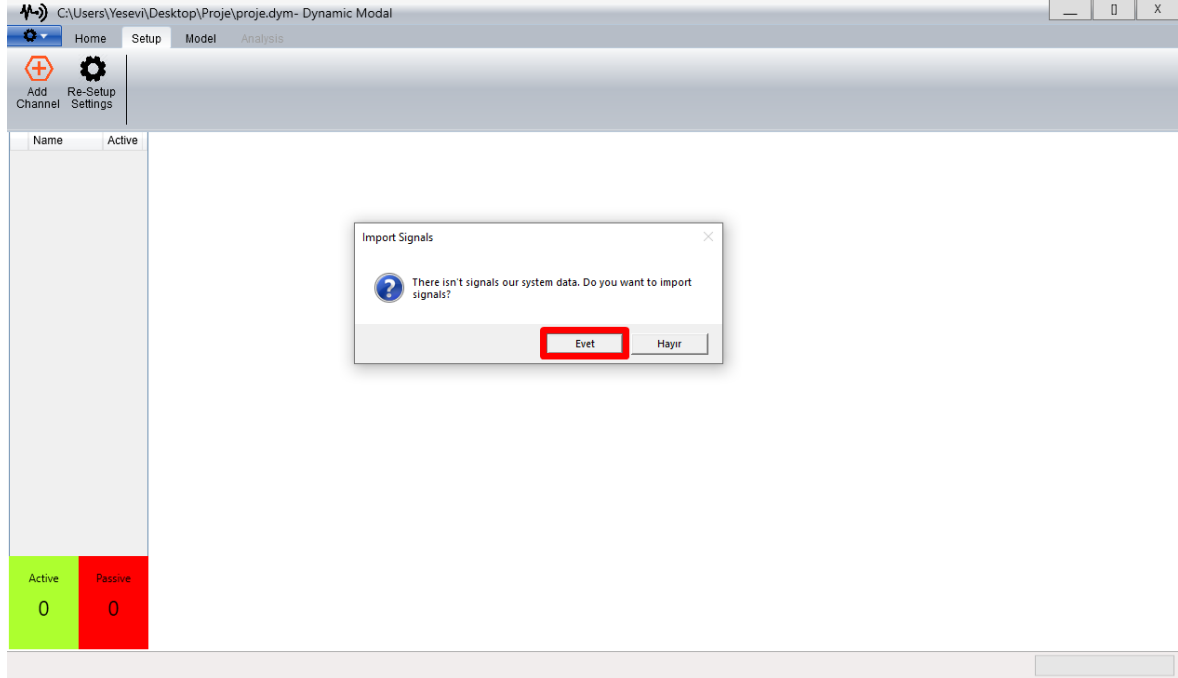
Şekil 2.5. Dynamic Modal yazılımında yeni proje dosyası oluşturma



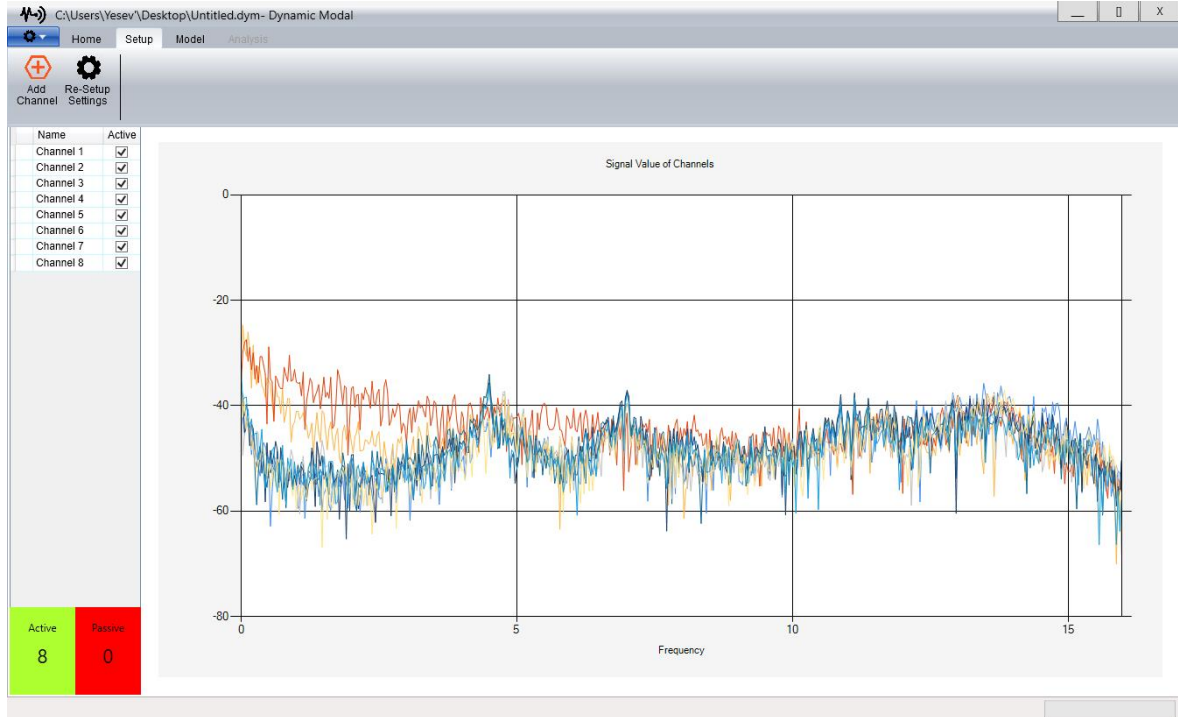
Şekil 2.6. Dynamic Modal yazılımında yeni proje dosyasının kaydedilmesi

Üst menü bölümünden Setup'a tıklanarak açılan ekranda Imports Signal penceresinde Evet'e tıklanır (Şekil 2.5) ve deneysel olarak kaydedilen sinyal dosyası seçilerek programa aktarılması sağlanır (Şekil 2.6). Add Chanel butonu ile sinyal dosyası eklenebilir. Re-Setup

Setting butonunda sinyal verilerine ait örnekleme frekansı, pencereleme fonksiyonu ayarlamaları gerçekleştirilebilir.



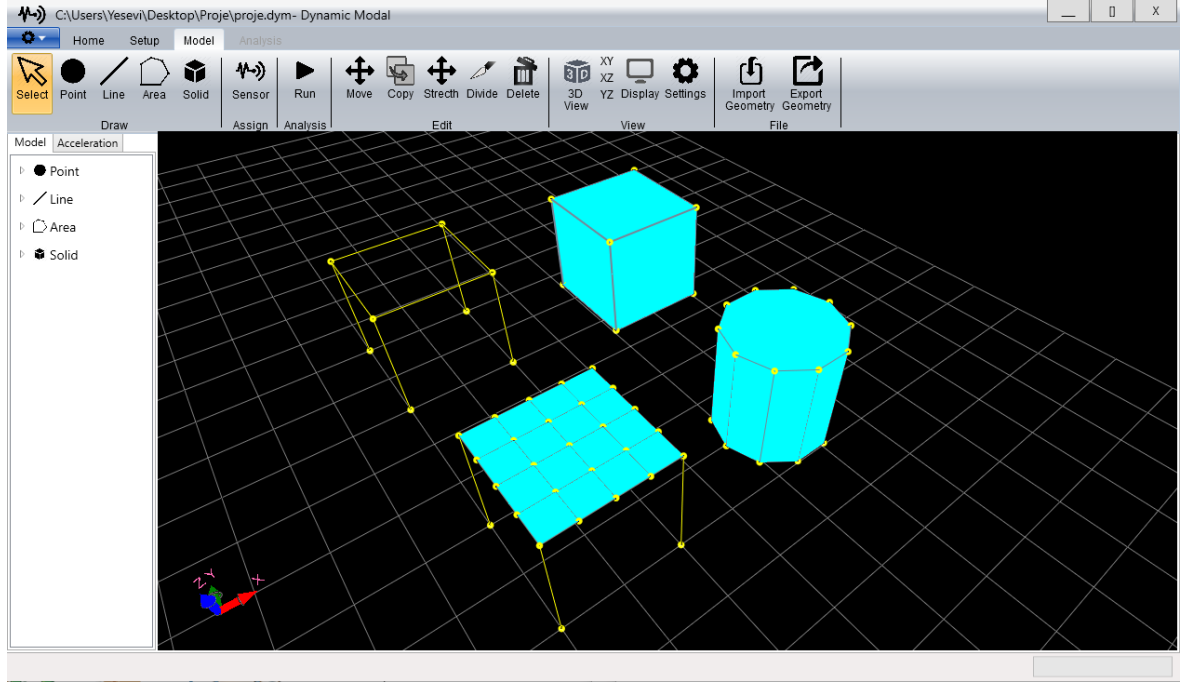
Şekil 2.7. Dynamic Modal yazılımında yeni proje dosyası oluşturma



Şekil 2.8. Dynamic Modal yazılımında yeni proje dosyası oluşturma

2.2.1.2. Model Geometrisinin Programa Tanıtılması

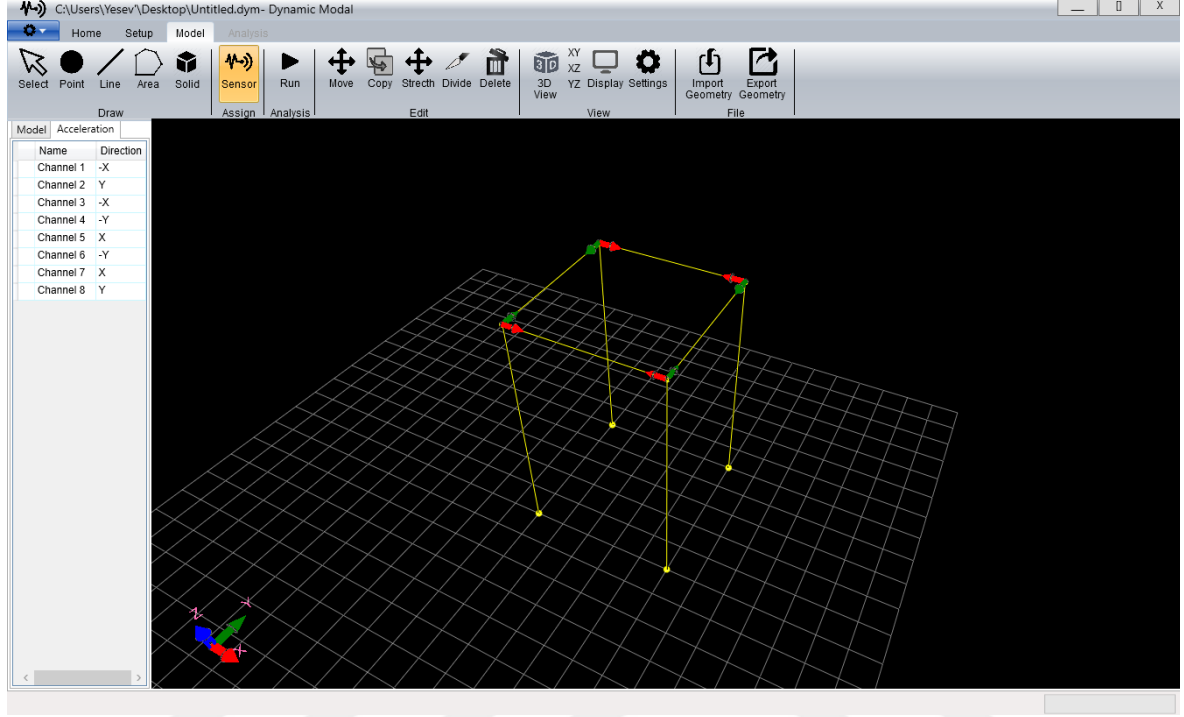
Dynamic Modal yazılımı içerisinde modelleme bölümüne erişmek için üst menü sekmesinden Model'e tıklanır. İlgili bölümde Draw kısmında bulunan Point, Line, Area, Solid butonları kullanılarak eleman tiplerine göre modelleme gerçekleştirilebilir. Model ekranında eleman modellenirken gerekli düzenlemeler Edit kısmında bulunan Move, Copy, Stretch, Divide ve Delete butonları yardımıyla model elemanları üzerinde gerekli değişiklikler yapılabilir. Aynı zamanda oluşturulan model geometrilerini Import Geometry ve Export Geometry butonları yardımıyla model geometrisini sırasıyla içeri ve dışarı aktarması yapılabilir. Modelleme ekranının sol bölümünde bulunan liste üzerinden, modelleme yapılan eleman özellikleri ve sensör kanalları ile ilgili bilgilere erişim sağlanabilir. Dynamic Modal yazılımında modelleme yapılabilecek eleman tiplerine ait görsel Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9. Dynamic Modal yazılımında modelleme yapılabilecek eleman tiplerine ait görsel

Model geometrisi kullanıcı etkileşimli olarak interaktif bir şekilde modellendikten sonra Assign kısmında bulunan Sensor butonu yardımıyla ilgili sensörlere ait yönler modelleme ekranı üzerinde tanımlanarak deneysel model tamamlanır. Ayrıca, sensör kanalları ve yönlerine ait bilgilere modelleme ekranının sol kısmında bulunan liste

yardımıyla erişim sağlanabilir. Sensör yönlerinin atanması işlemi ile ilgili görsel Şekil 2.10'da verilmiştir.

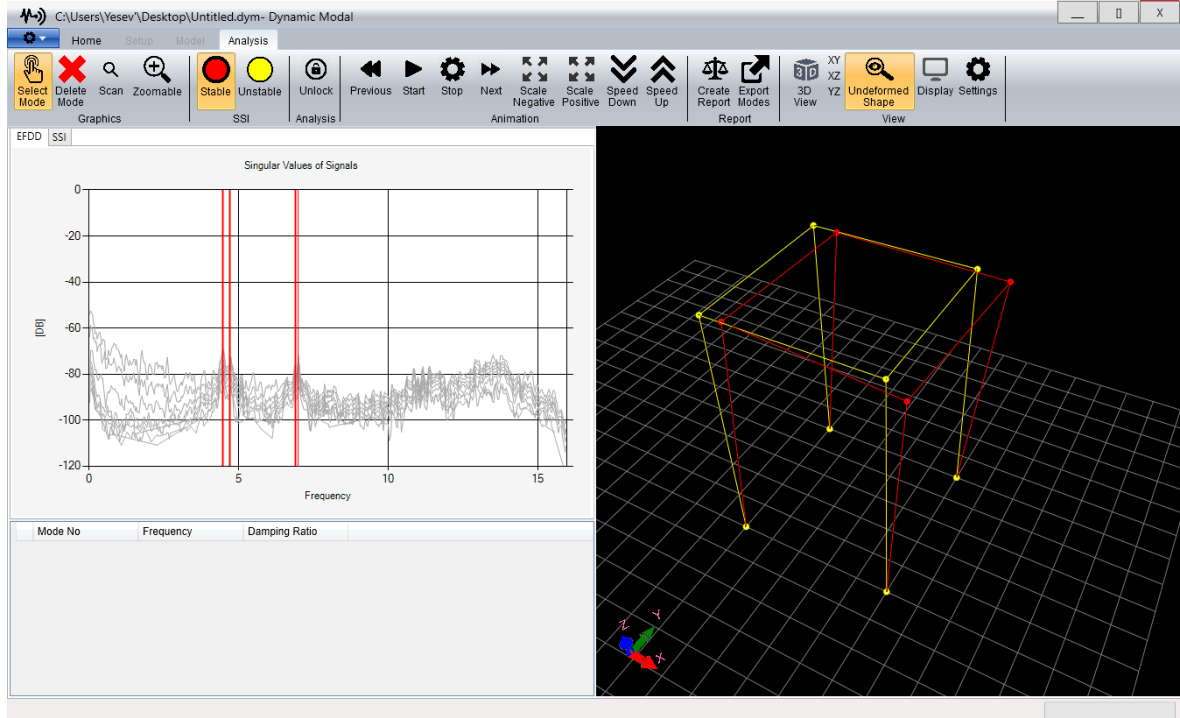


Şekil 2.10. Dynamic Modal yazılımında sensör yönlerinin tanımlanmasına ait görsel

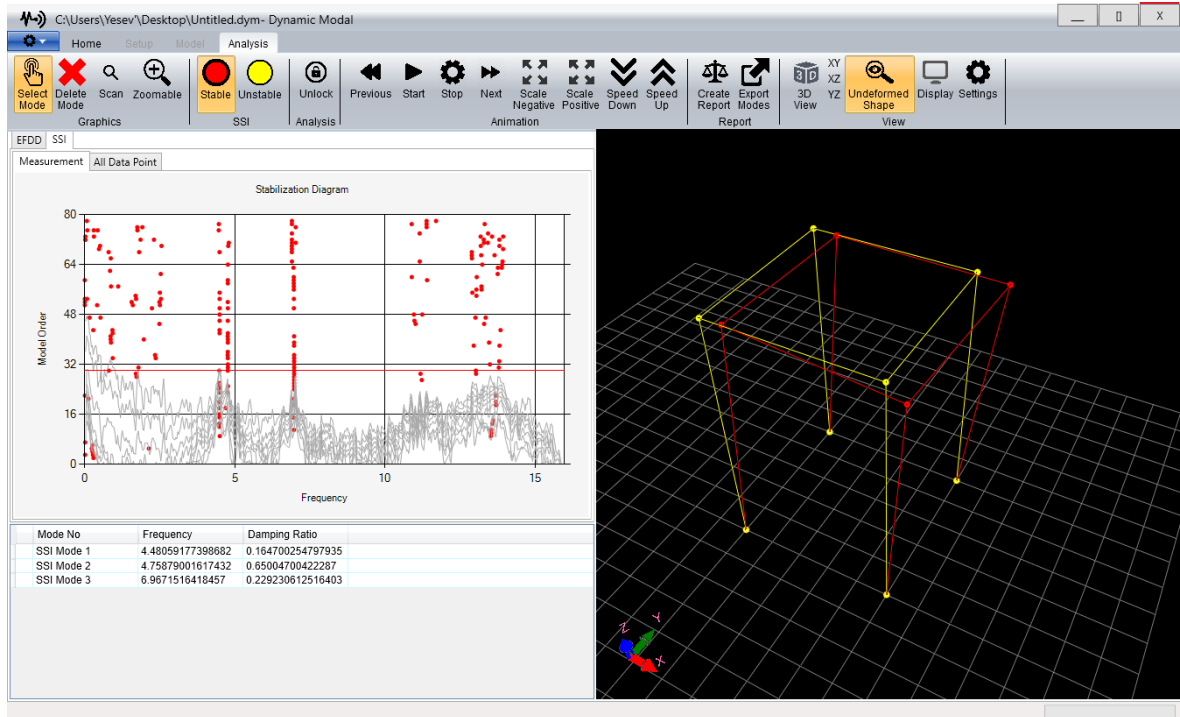
2.2.1.3. Modele ait Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi

Dynamic Modal yazılımında deneysel modele ait dinamik karakteristiklerin elde edilmesi için sinyal verileri yazılıma aktarılıp, model geometrisi ve sensör yönlerinin tanımlanmasından sonra Run butonuna tıklanarak analizler gerçekleştirilir. Analizler başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğinde analiz bölümü ekrana gelmektedir. Analiz bölümünde GFTAA yöntemine göre elde edilen görsel grafik Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Şekil 2.11'de görüldüğü gibi, GFTAA yönteminde, üst menüde bulunan Select Mode butonu aktif hale getirildikten sonra spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri grafiğindeki pik noktalara tıklanarak dinamik karakteristikler belirlenebilmektedir. SAB yöntemi kullanılarak elde edilen stabilizasyon ve stabilizasyon modlarına ait grafikler sırasıyla Şekil 2.12 ve Şekil 2.13'te gösterilmiştir. Şekil 2.12'de bulunan stabilizasyon grafiğindeki stabil noktaları üst menüde bulunan Scan butonu yardımıyla taranarak Şekil 2.13'teki gibi ilgili stabilizasyon noktalarına ait mod grafikleri elde edilmektedir. Her iki yöntemden elde edilen dinamik

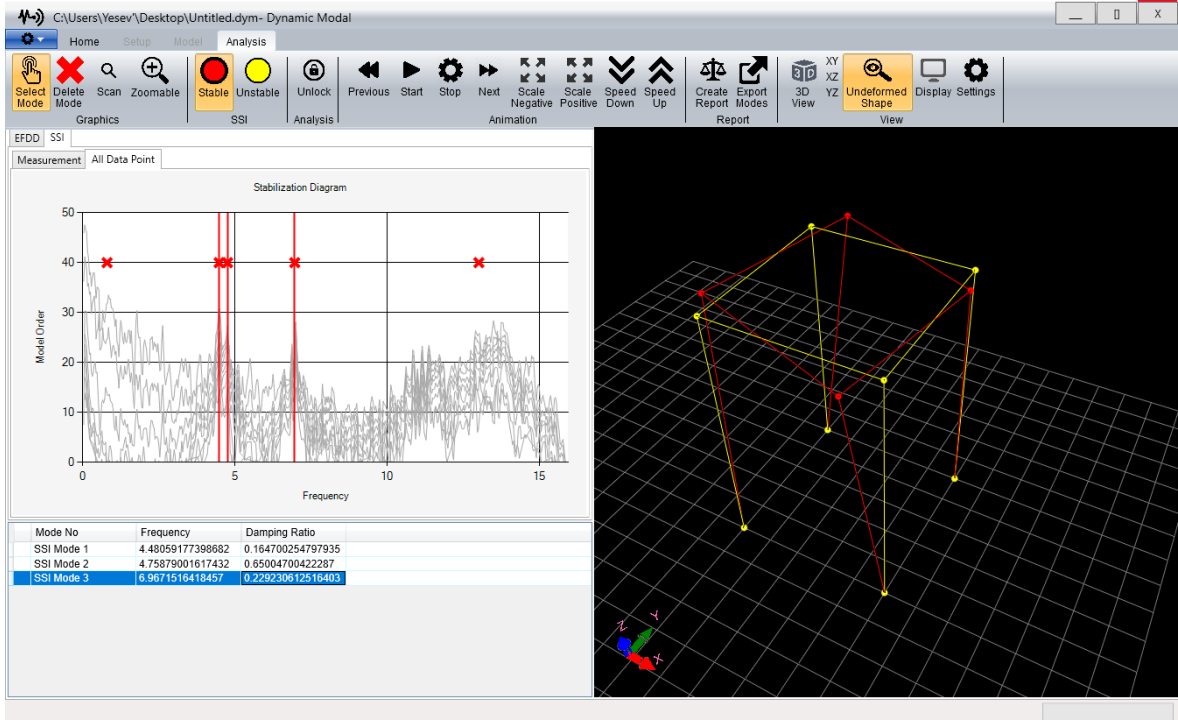
karakteristiklerin mod şekilleri ekranın sağ bölümünde bulunan animasyon ekranı yardımıyla animasyon olarak da görülebilmektedir.



Şekil 2.11. Dynamic Modal yazılımında GTFAA yönteminden elde edilen grafiğe ait görsel

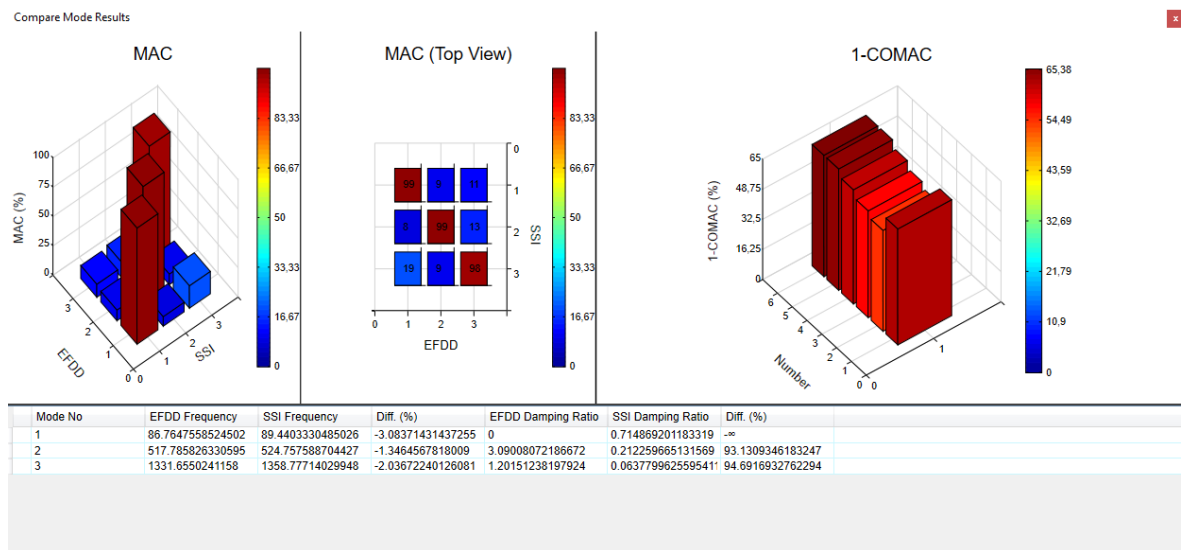


Şekil 2.12. Dynamic Modal yazılımında SAB yönteminden elde edilen stabilizasyon grafiğine ait görsel



Şekil 2.13. Dynamic Modal yazılımında SAB yönteminden elde edilen stabilizasyon noktalarına ait mod grafiğine

Dynamic Modal yazılımında aynı zamanda her iki yöntem veya farklı dosyalar arasındaki dinamik karakteristikler arasında da korelasyon belirleme yapılabilmektedir (Şekil 2.14).

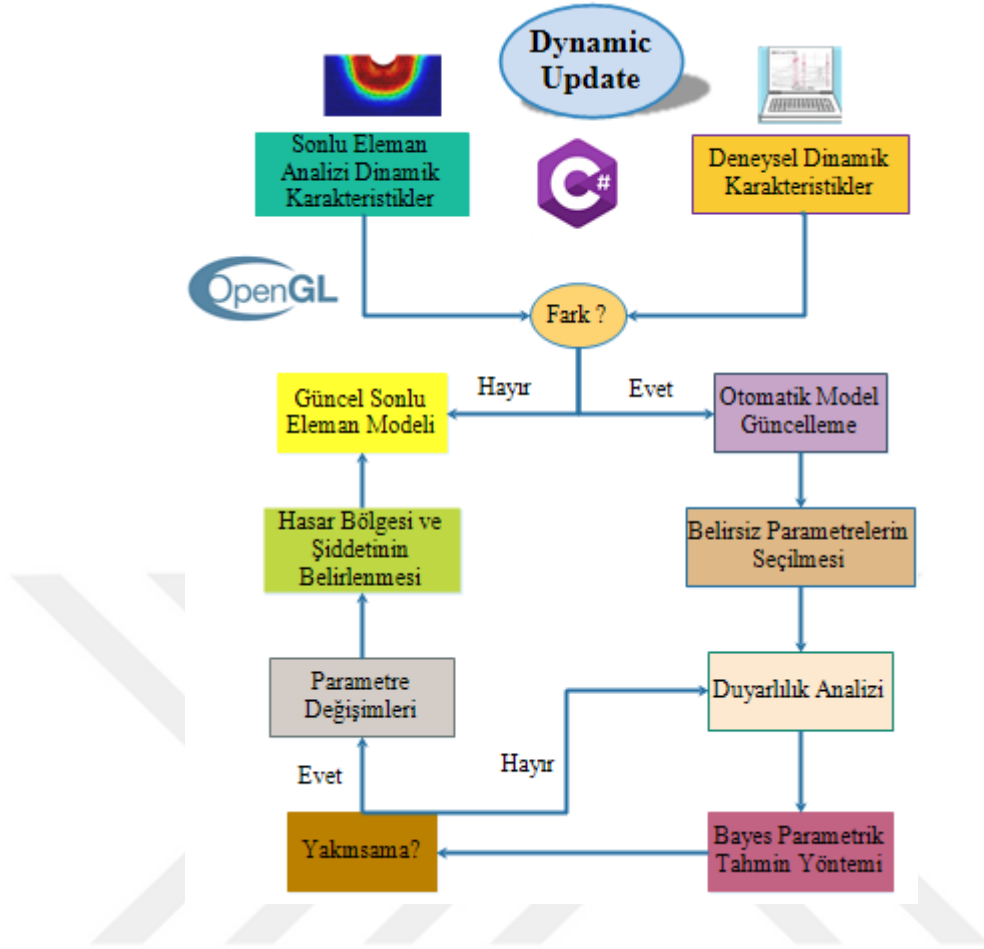


Şekil 2.14. Dynamic Modal yazılımında GFTAA ve SAB yöntemleri kullanılarak MAC ve COMAC yöntemlerinden elde edilen korelasyon grafiğine ait görsel

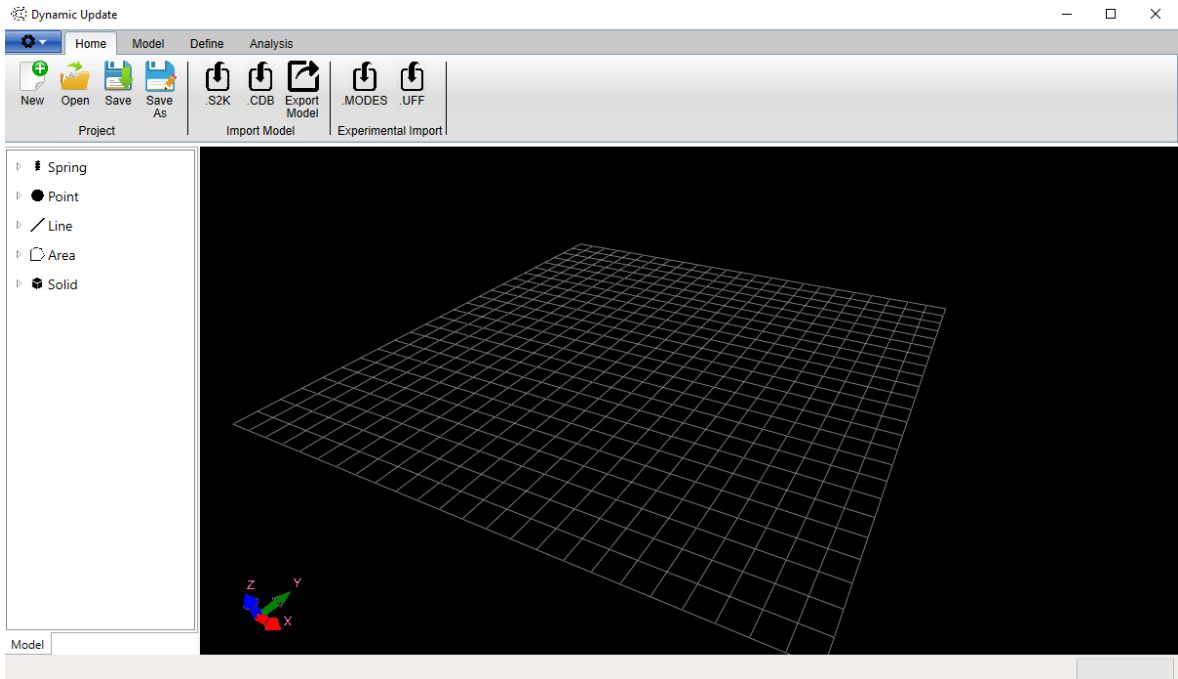
Şekil 2.14'te görüldüğü gibi dinamik karakteristikler arasındaki korelasyon Doğal Frekansların Korelasyonu, MAC ve COMAC yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. COMAC değerinin 1'e yakın olması durumunda ilgili düğüm noktaları arasındaki uyumun iyi olduğu anlaşılmaktadır. Fakat ilgili düğüm noktaları arasında oluşabilecek farklılıklar gözle görülemeyecek kadar düşük olduğundan dolayı yönteminde oluşabilecek farklılıkları daha görüntülenmesi amacıyla değerlerin hesaplanması (1-COMAC) olarak tasarlanmıştır.

2.2.2. Dynamic Update Yazılımı

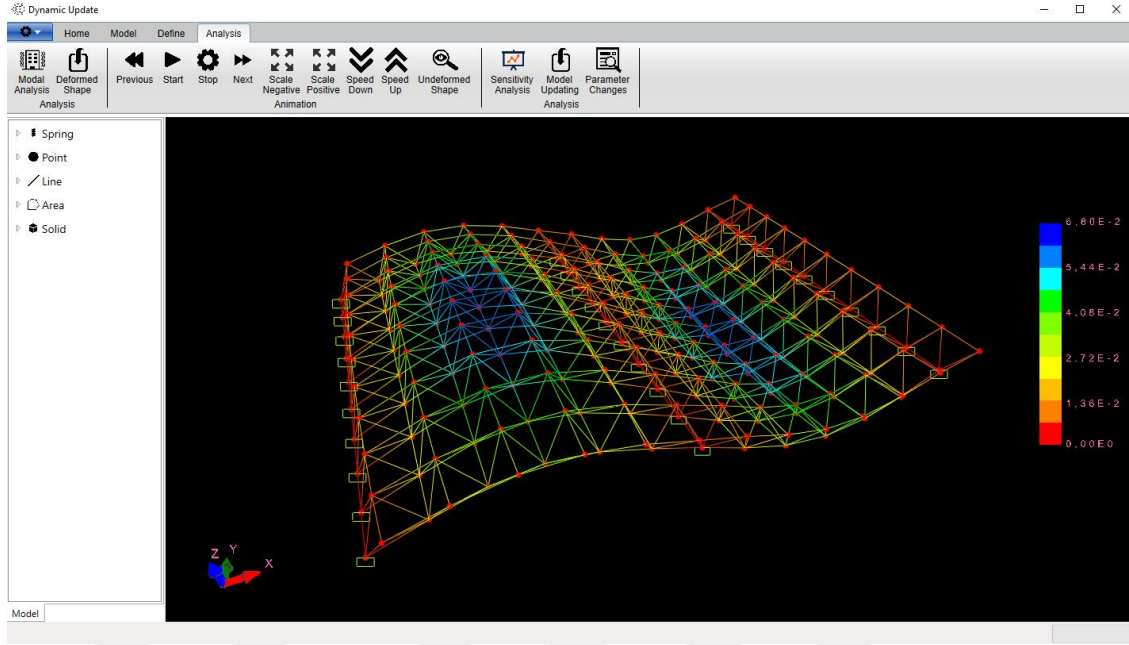
Dynamic Update yazılımı, sonlu eleman ve deneysel model olarak elde edilen dinamik karakteristikler arasındaki farklılıkları minimuma indirmeyi amaçlayan otomatik bir Sonlu Eleman Model Güncellemesi yazılımıdır. Dynamic Update yazılım arayüzü ve kendi iç kütüphanesi C# programlama dilinde yazılmış ve grafik ekran teknolojinde OpenGL kütüphanesi kullanılmıştır. Sonlu eleman model S2K (Sap2000) ve CDB (Ansys) uzantılı dosyalar kullanılarak aktarılabilir. Dynamic Update kendi sonlu eleman kütüphanesine sahiptir ve yay (Spring), kafes (Bar), çubuk (Frame), alan (QUAD4) ve solid (HEX8) eleman tiplerini içermektedir. Aynı zamanda yeni eleman tiplerinin kolaylıkla eklenmesine olanak sağlayacak şekilde geliştirilmiştir. Geliştirilen sonlu eleman kütüphanesi sadece sonlu eleman modeli üzerinden dinamik karakteristiklerin (frekans, mod şekli) elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Diğer taraftan deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristiklerin yazılıma aktarılması ve sonlu eleman model üzerindeki düğüm noktası ve modların sonlu eleman model ile eşleştirilmesi otomatik gerçekleştirilerek, sonlu eleman ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler arasındaki korelasyon yazılım tarafından yapılmaktadır. Korelasyon arasında farklılıklar varsa Duyarlılığa bağlı Bayes Parametrik Tahmin Yöntemi kullanılarak otomatik model güncelleme gerçekleştirilmektedir. Elde edilen güncel sonlu eleman model ile yapısal durum değerlendirme, statik/dinamik yükler altında davranışın değerlendirilmesi, yapının kalan ömrünün değerlendirilmesi, Yapı Sağlığı İzleme, hasar tespiti gibi birçok çalışma gerçekleştirilmesine öncülük etmektedir. Dynamic Update yazılımına ait akış şeması, yazılıma ait genel görünüş ekranı, çubuk, alan ve katı modellere ait görseller sırasıyla Şekil 2.15-2.19'da gösterilmiştir. Dynamic Update yazılım ekranı Şekil 2.16'da görüldüğü gibi ana model grafik ekranı, eleman listesi ve üst menü butonlarından oluşmaktadır.



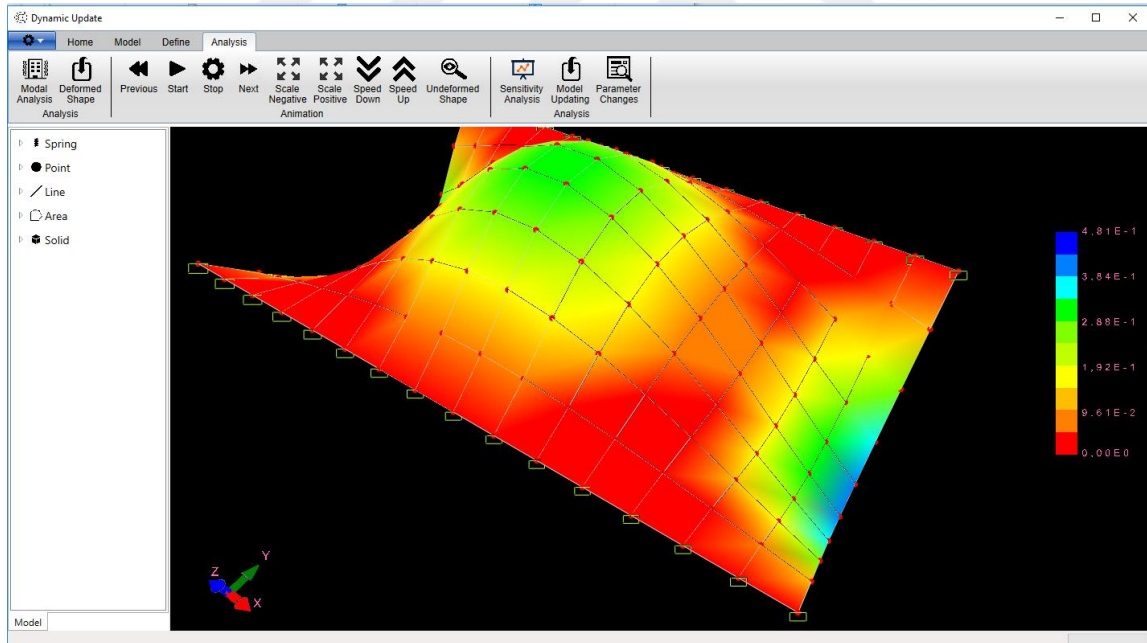
Şekil 2.15. Dynamic Update yazılımına ait akış şeması



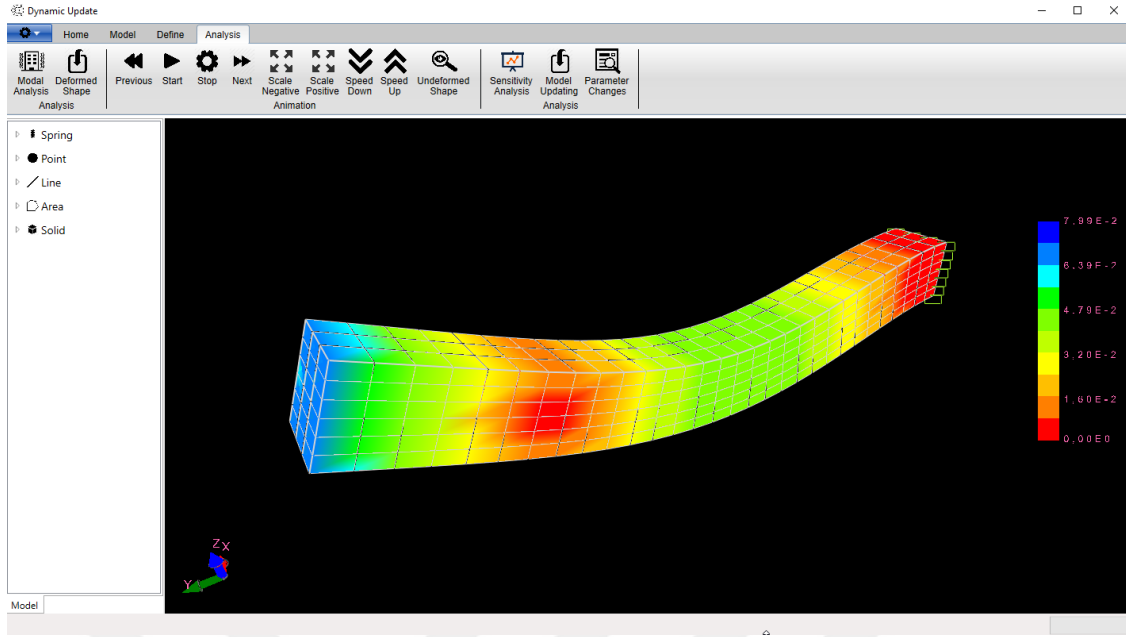
Şekil 2.16. Dynamic Update yazılımına ait genel görünüş



Şekil 2.17. Dynamic Update yazılımında çubuk eleman modeline ait görsel



Şekil 2.18. Dynamic Update yazılımında ait alan eleman modeline ait görsel



Şekil 2.19. Dynamic Update yazılımında katı eleman modeline ait görsel

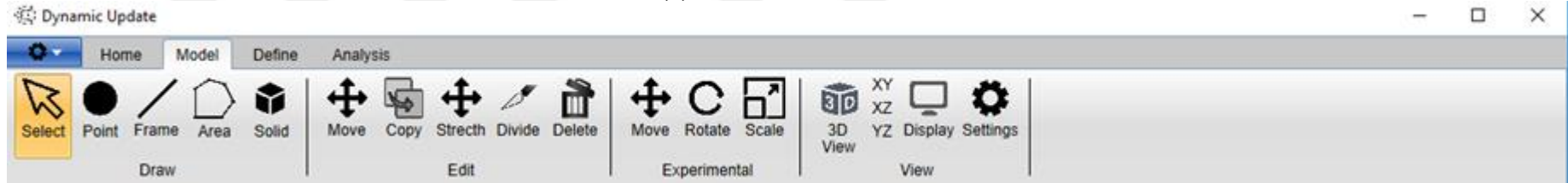
Dynamic Update yazılımında otomatik Sonlu Eleman Model Güncelleme için izlenecek yol aşağıda verilmiştir.

- Sonlu eleman ve deneysel modelin yazılıma aktarılması
- Sonlu eleman ve deneysel modelden elde edilen dinamik karakteristiklerin eşleştirilmesi
- Belirsiz parametrelerin tanımlanması ve Duyarlılık Analizi yapılması
- Bayes Parametrik Çözüm Yöntemi ile sonlu eleman ve deneysel model arasındaki dinamik karakteristiklerin farklılıklarının minimuma indirgenmesi
- Parametre değişimlerinden güncel sonlu eleman modelinin elde edilmesi ve değerlendirilmesi

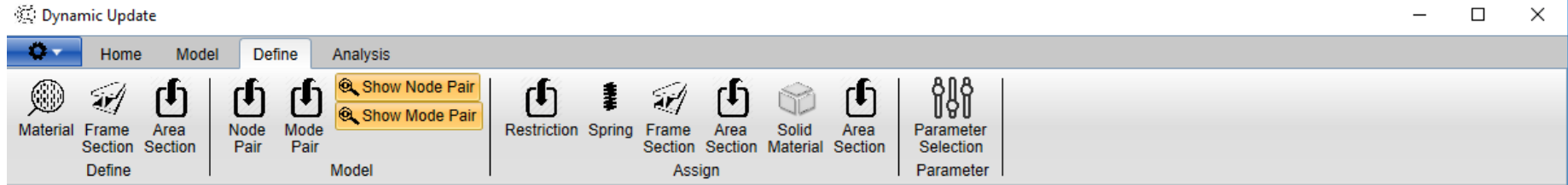
Dynamic Modal yazılımında üst menü butonları Ana (Home), Model (Model), Tanımlama (Define) ve Analiz (Analysis) menüleri olmak üzere dört kısımdan oluşmaktadır. İlgili menülere ait ekran görüntüsü Şekil 2.20’de ve butonların kullanım amaçları Tablo 2.5-2.9’da gösterilmiştir.



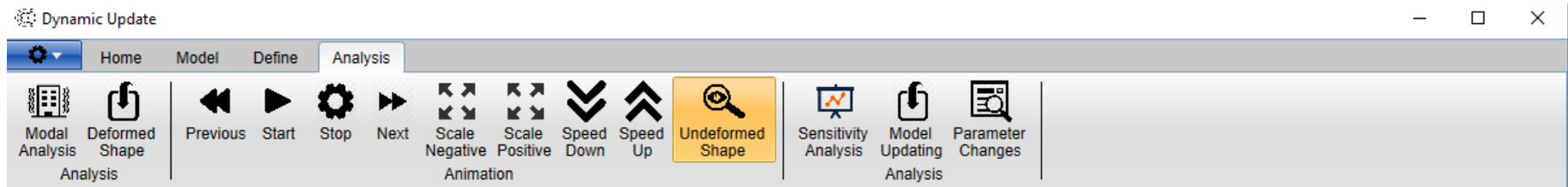
(a) Ana menü butonları



(b) Model menüsü butonları



© Tanımlama menüsü butonları



(d) Analiz menüsü butonları

Şekil 2.20. Dynamic Update yazılımı üst menü butonlarına ait görsel

Tablo 2.5. Dynamic Update yazılımı ana menüsüne ait butonlar ve açıklamaları

Buton	Açıklama	Buton	Açıklama
	Yeni proje dosyası oluştur		Proje dosyası aç
	Dosyayı kaydet		Dosyayı farklı kaydet
	S2K dosyası içeri aktar		CDB dosyası içeri aktar
	Model dışarı aktar		MODES dosyası içeri aktar
	UFF dosyası içeri aktar		

Tablo 2.6. Dynamic Update model menüsüne ait butonlar ve açıklamaları

Buton	Açıklama	Buton	Açıklama
	Seçim modu		Nokta eleman oluştur
	Çubuk eleman oluştur		Alan eleman oluştur
	Katı eleman oluştur		Sonlu eleman taşıma işlemi
	Sonlu eleman kopyalama işlemi		Sonlu eleman uzatma işlemi
	Sonlu eleman bölme işlemi		Sonlu eleman silme işlemi

Tablo 2.6'nın devamı

Buton	Açıklama	Buton	Açıklama
 Move	Deneysel model taşıma işlemi	 Rotate	Deneysel model döndürme işlemi
 Scale	Deneysel model ölçekleme işlemi	 3D View	Kamera 3D görünüş
XY	Kamera XY görünüş	XZ	Kamera XZ görünüş
YZ	Kamera YZ görünüş	 Display	Görüntü düzenleme
 Settings	Görüntü ayarları		

Tablo 2.7. Dynamic Update tanımlama menüsüne ait butonlar ve açıklamaları

Buton	Açıklama	Buton	Açıklama
 Material	Malzeme tanımlama	 Frame Section	Çubuk eleman kesit tanımlama
 Area Section	Alan eleman kesit tanımlama	 Node Pair	Sonlu eleman ve deneysel model arasında düğüm noktası eşleştirme
 Mode Pair	Sonlu eleman ve deneysel model arasında modları eşleştirme	 Show Node Pair	Sonlu eleman ve deneysel model arasında eşleştirilen düğüm noktasını göster
 Show Mode Pair	Sonlu eleman ve deneysel model arasında eşleştirilen modları göster	 Restriction	Mesnet atama
 Spring	Yay atama	 Frame Section	Çubuk kesit atama

Tablo 2.7'nin devamı

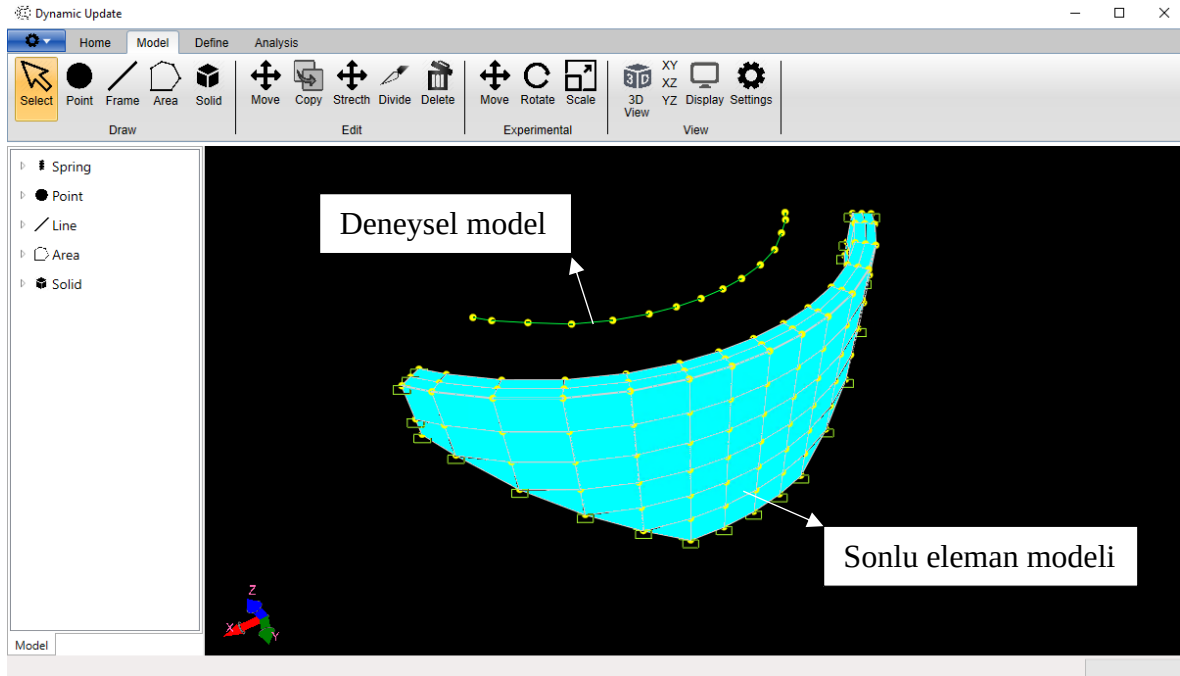
Buton	Açıklama	Buton	Açıklama
 Area Section	Alan kesit atama	 Solid Material	Katı modele malzeme atama
 Parameter Selection	Belirsiz parametre tanımlama		

Tablo 2.8. Dynamic Update analiz menüsüne ait butonlar ve açıklamaları

Buton	Açıklama	Buton	Açıklama
 Modal Analysis	Modal analiz	 Deformed Shape	Mod şekillerini göster
 Previous	Mod animasyon önceki adımı göster	 Start	Mod animasyon başlat
 Stop	Mod animasyon durdur	 Next	Mod animasyon ilerle
 Scale Negative	Mod animasyon ölçek küçültme	 Scale Positive	Mod animasyon ölçek artırma
 Speed Down	Mod animasyon hızı düşürme	 Speed Up	Mod animasyon hızı arttırma
 Undeformed Shape	Şekil değiştirmemiş hali göster	 Sensitivity Analysis	Duyarlılık analizi
 Model Updating	Model güncelleme analizi	 Parameter Changes	Parametre değişimlerini göster

2.2.2.1. Sonlu Eleman ve Deneysel Modelin Sisteme Aktarılması

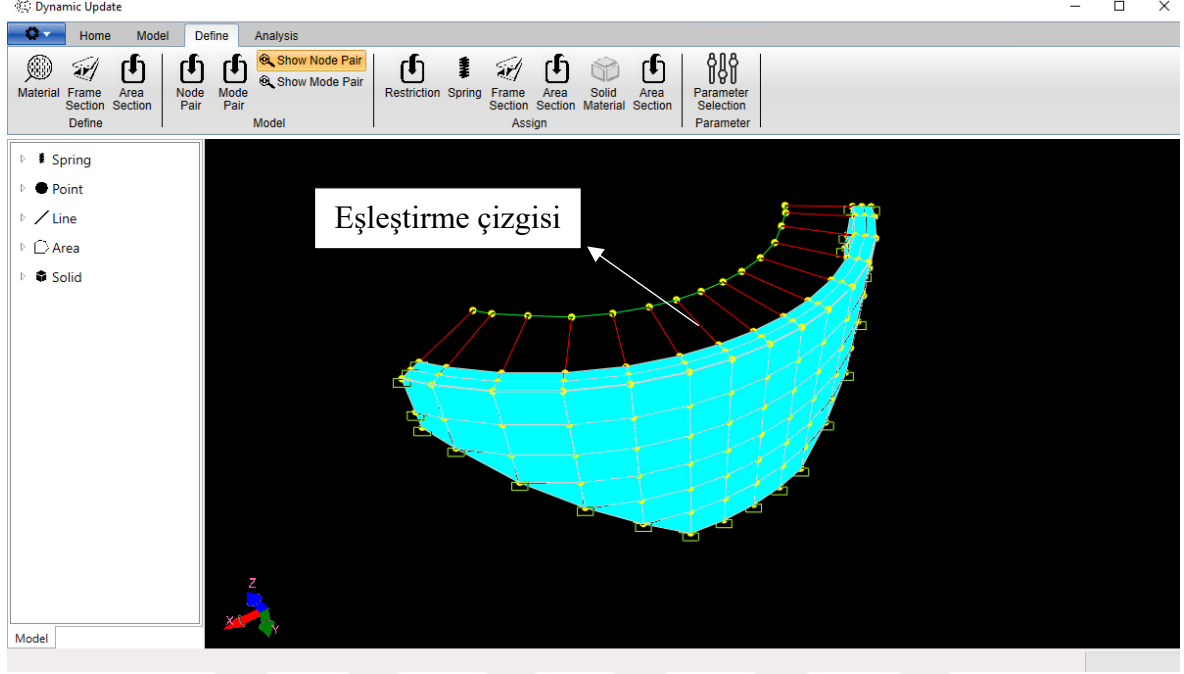
Dynamic Update yazılımında otomatik model güncelleme gerçekleştirilebilmesi için sonlu eleman ve deneysel modelin yazılıma aktarılması gerekmektedir. Sonlu eleman model dosyalarından S2K (Sap2000) ve CDB (Ansys) uzantılı dosyalar içeri aktarılabilir. Benzer şekilde deneysel model için MODES (Dynamic Modal) ve UFF (Artemis, OMA) uzantılı dosyalar aktarılabilir. İlgili aktarma butonlarına Home menüsü üzerinden erişilmektedir. Dynamic Update yazılımında sonlu eleman ve deneysel modelin sisteme aktarılmasına ait görsel Şekil 2.21’de gösterilmiştir.



Şekil 2.21. Dynamic Update yazılımında sonlu eleman ve deneysel modelinin sisteme aktarılmasına ait görsel

Sisteme aktarılan sonlu eleman ve deneysel model arasındaki korelasyonun yazılım tarafından hesaplanması için düğüm noktalarının eşleştirilmesi gerekmektedir. Bu eşleştirme Dynamic Update yazılımı tarafından yapılabilir. Düğüm noktalarının eşleştirilebilmesi için sonlu eleman model ve deneysel model arasındaki düğüm noktalarının mümkün olduğunda birbirine yakın olacak şekilde taşıma işleminin yapılması gerekmektedir. Düğüm noktalarının eşleştirme işlemi Define menüsünden Node Pair butonu

kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Dynamic Update yazılımında düğüm noktası eşleştirmesine ait görsel Şekil 2.22’de gösterilmektedir.



Şekil 2.22. Dynamic Update yazılımında sonlu eleman ile deneysel modelin düğüm noktası eşleştirmesine ait görsel

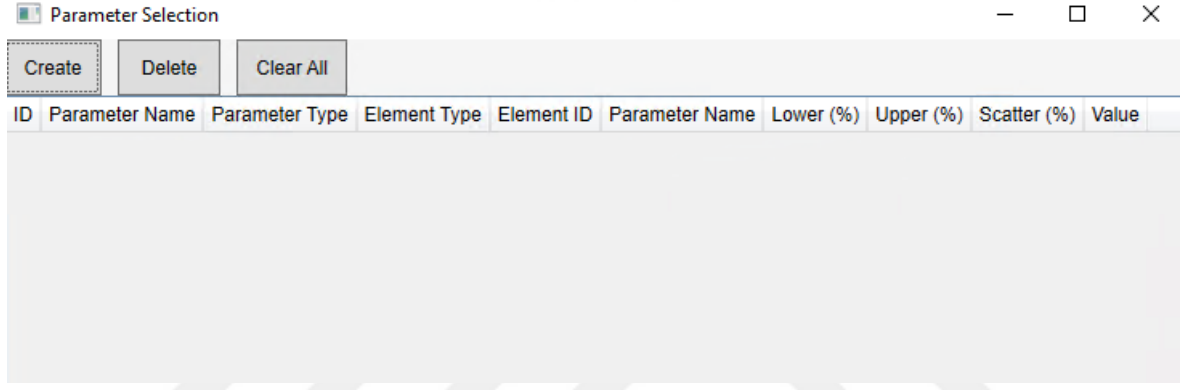
2.2.2.2. Belirsiz Parametrelerin Seçilmesi ve Duyarlılık Analizinin Gerçekleştirilmesi

Dynamic Update yazılımında otomatik Sonlu Eleman Model Güncelleme gerçekleştirilebilmesi için belirsiz parametrelerin kullanıcı tarafından belirlenmesi gerekmektedir. Bu belirsiz parametreler malzeme bakımından elastisite modülü (Modulus of Elasticity), birim hacim ağırlığı (Mass) olabileceği gibi eleman tiplerine göre de değişmektedir. Yazılımda eleman tiplerine göre dikkate alınabilecek belirsiz parametreler aşağıda verilmiştir.

- Yay eleman için yer değiştirme (K_x , K_y , K_z) ve dönme parametreleri (R_x , R_y , R_z),
- Çubuk eleman için eleman eksenlerine göre atalet momenti (I_x , I_y , I_z),
- Alan eleman için kalınlık (thickness)

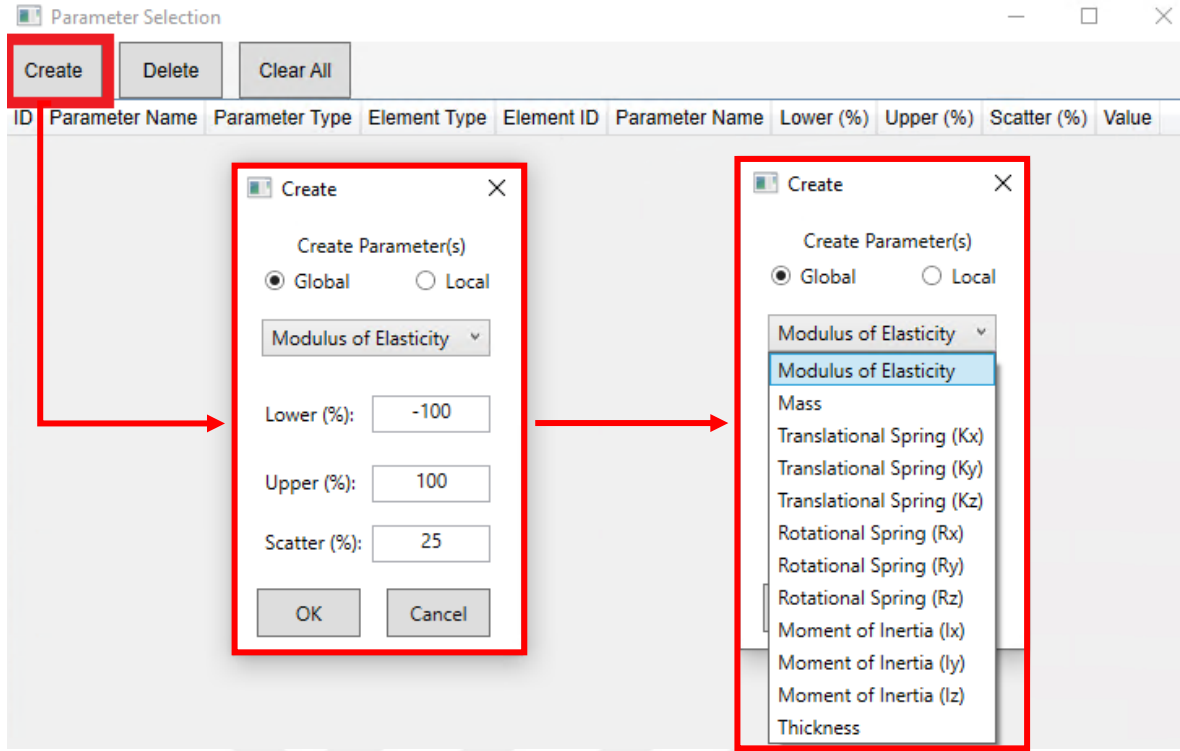
Dynamic Update yazılımında belirsiz parametreler Define menüsünde Parameters Changes butonuna tıklanarak Parameter Selection (Parametre Seçme) penceresi ekrana

getirilir (Şekil 2.23). Şekil 2.23'te görüldüğü gibi Parametre Seçme penceresi üst butonlar yardımıyla parametre oluşturma (Create), seçili parametreleri silme (Delete), tüm parametreleri silme (Clear all) butonlarından ve parametre liste ekranından oluşmaktadır. Parametre listesi parametrelere ait özellikleri göstermektedir. Bu kısım parametre numarası (ID), belirsiz parametre adı (Parameter Name), parametre tipi (Parameter Type), eleman tipi (Element Type), eleman numarası (Element ID), parametre adı (Parameter Name), parametre alt limit (Lower), parametre üst limit (Upper), parametre yayılımı (Scatter) ve parametre değerinden (Value) oluşmaktadır.



Şekil 2.23. Dynamic Update yazılımında belirsiz parametre seçilmesiyle ilgili pencereye ait görsel

Dynamic Update yazılımında belirsiz parametreleri tanımlamak için Parameter Selection penceresinde bulunan Create butonuna tıklanarak, Create penceresi ekrana getirilir (Şekil 2.24). Create penceresi Şekil 2.24'te görüldüğü gibi, belirsiz parametreye ait parametrenin tipi, adı, alt limit, üst limit ve parametre yayılım değerlerinden oluşmaktadır. Ayrıca, belirsiz parametre malzeme özelliği olabileceği gibi eleman tipine göre rijitlik matrisini etkileyen belirsiz parametreler de tanımlanabilmektedir. Parametre tipi tanımlanırken bütünsel (Global) ve yerel (Local) olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Belirsiz parametrenin tipi bütünsel olması durumunda parametreye ait mesh elemanların aynı değere sahip olduğu varsayılır. Benzer şekilde belirsiz parametrenin yerel olması durumunda ise parametreye ait mesh elemanların birbirinden farklı değerlere sahip olduğu varsayılmaktadır. Bu nedenle parametrelerin yerel seçilmesi bütünsel seçilmesine göre daha gerçekçi sonuç vermektedir. Dynamic Update yazılımında bütünsel parametre listesine ait örnek görsel Şekil 2.25'te, yerel parametre listesine ait örnek görsel Şekil 2.26'da gösterilmiştir.



Şekil 2.24. Dynamic Update yazılımında belirsiz parametre oluşturulmasına ait görsel

The image shows the 'Parameter Selection' dialog box with three buttons: 'Create', 'Delete', and 'Clear All'. Below the buttons is a table with columns: ID, Parameter Name, Parameter Type, Element Type, Element ID, Parameter Name, Lower (%), Upper (%), Scatter (%), and Value. The table contains two rows of data.

ID	Parameter Name	Parameter Type	Element Type	Element ID	Parameter Name	Lower (%)	Upper (%)	Scatter (%)	Value
1	ModulusElasticity	Global	ALL	ALL	1SO	-50	70	25	3E+07
2	Density	Global	ALL	ALL	1SO	-5	5	25	2.400412

Şekil 2.25. Dynamic Update yazılımında bütünsel parametre listesine ait örnek görsel

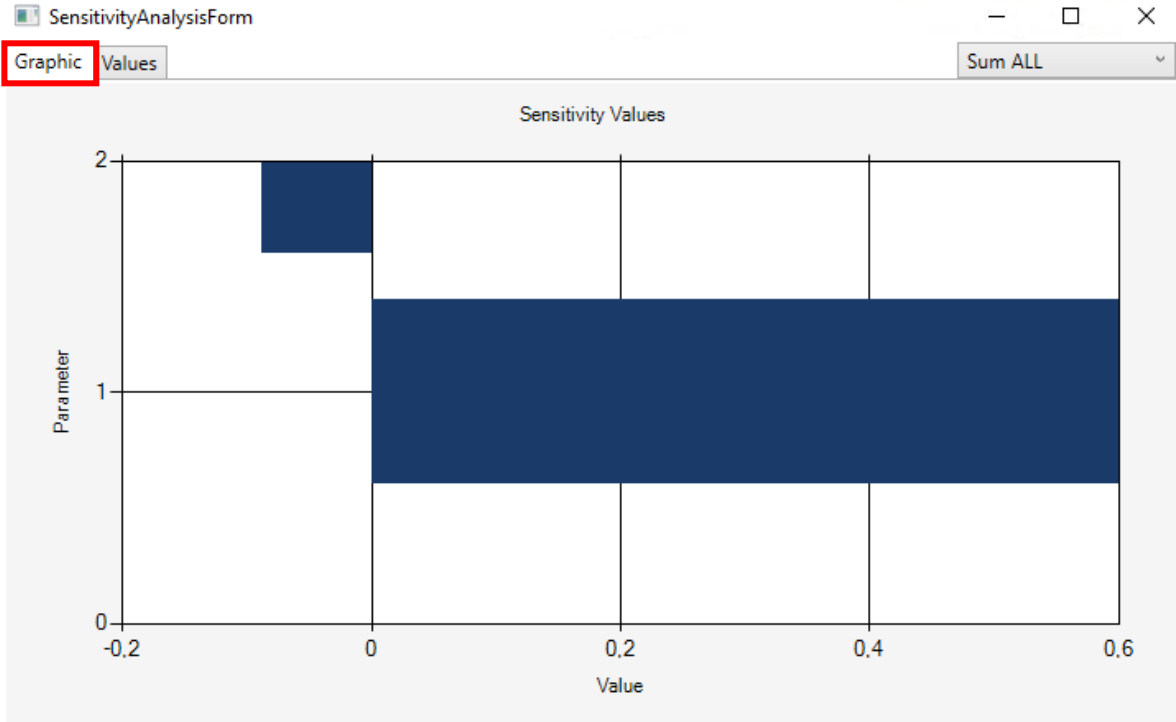
Parameter Selection

Create Delete Clear All

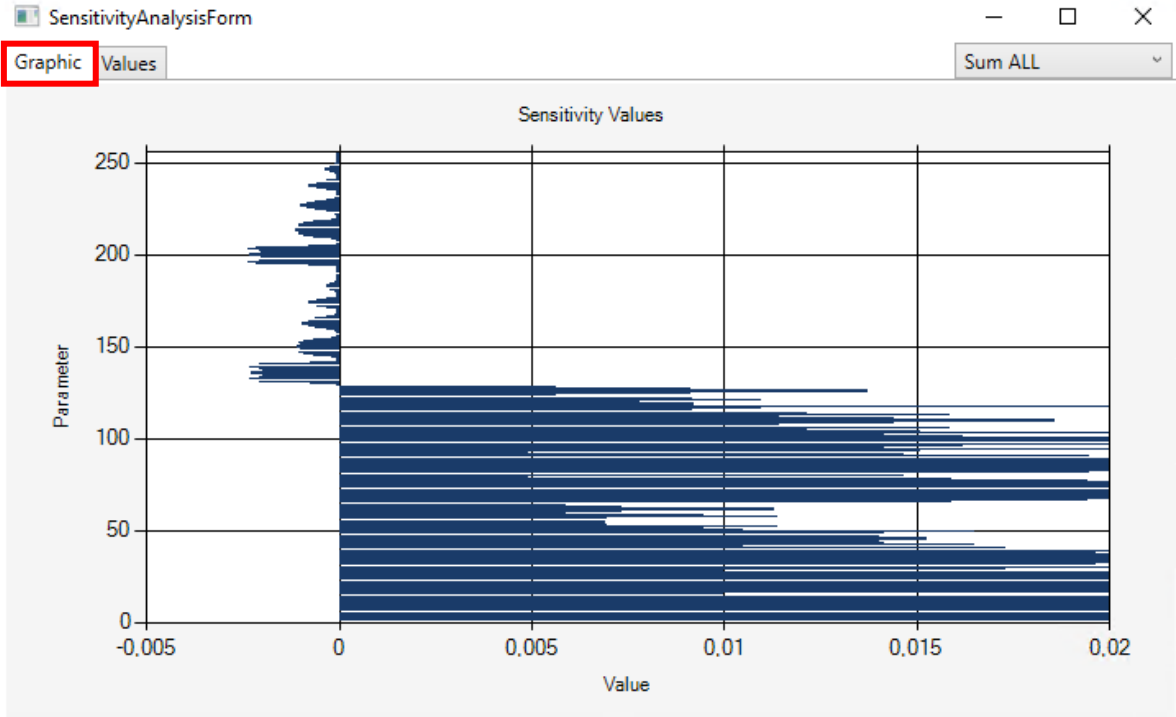
ID	Parameter Name	Parameter Type	Element Type	Element ID	Parameter Name	Lower (%)	Upper (%)	Scatter (%)	Value
1	ModulusElasticity	Local	Solid	1	ISO-1	-50	70	25	3E+07
2	ModulusElasticity	Local	Solid	2	ISO-2	-50	70	25	3E+07
3	ModulusElasticity	Local	Solid	3	ISO-3	-50	70	25	3E+07
4	ModulusElasticity	Local	Solid	4	ISO-4	-50	70	25	3E+07
5	ModulusElasticity	Local	Solid	5	ISO-5	-50	70	25	3E+07
6	ModulusElasticity	Local	Solid	6	ISO-6	-50	70	25	3E+07
7	ModulusElasticity	Local	Solid	7	ISO-7	-50	70	25	3E+07
8	ModulusElasticity	Local	Solid	8	ISO-8	-50	70	25	3E+07
9	ModulusElasticity	Local	Solid	9	ISO-9	-50	70	25	3E+07
10	ModulusElasticity	Local	Solid	10	ISO-10	-50	70	25	3E+07
11	ModulusElasticity	Local	Solid	11	ISO-11	-50	70	25	3E+07
12	ModulusElasticity	Local	Solid	12	ISO-12	-50	70	25	3E+07
13	ModulusElasticity	Local	Solid	13	ISO-13	-50	70	25	3E+07
14	ModulusElasticity	Local	Solid	14	ISO-14	-50	70	25	3E+07
15	ModulusElasticity	Local	Solid	15	ISO-15	-50	70	25	3E+07
16	ModulusElasticity	Local	Solid	16	ISO-16	-50	70	25	3E+07
17	ModulusElasticity	Local	Solid	17	ISO-17	-50	70	25	3E+07
18	ModulusElasticity	Local	Solid	18	ISO-18	-50	70	25	3E+07
19	ModulusElasticity	Local	Solid	19	ISO-19	-50	70	25	3E+07
20	ModulusElasticity	Local	Solid	20	ISO-20	-50	70	25	3E+07
21	ModulusElasticity	Local	Solid	21	ISO-21	-50	70	25	3E+07
22	ModulusElasticity	Local	Solid	22	ISO-22	-50	70	25	3E+07
23	ModulusElasticity	Local	Solid	23	ISO-23	-50	70	25	3E+07

Şekil 2.26. Dynamic Update yazılımında yerel parametre listesine ait örnek görsel

Parametre tiplerinin bütünsel seçilmesi durumunda yapılan analize Bütünsel (Global) Model Güncelleme, yerel seçilme durumunda ise Yerel (Local) Model Güncelleme denir. Belirsiz parametrelerin etkinliklerini görmek için Duyarlılık Analizi gerçekleştirilmektedir. Dynamic Update yazılımında Frekans Diferansiyel Duyarlılık Analiz yöntemi kullanılarak belirsiz parametrelerin frekans üzerindeki etkileri hızlı bir şekilde hesaplanabilmektedir. Yazılımda, belirsiz parametrelerin Duyarlılık Analizini gerçekleştirmek için Analiz menüsünden Sensitivity Analysis butonuna tıklanarak Sensitivity Analysis Form penceresi ekrana getirilir. Bu pencere, seçilen belirsiz parametrelerin Duyarlılık Analizi sonucunda elde edilen duyarlılık katsayısı grafiği (Graphic) ve değerlerini (Values) içermektedir. Belirsiz parametrelerin Duyarlılık Analizi sonucunda bütünsel ve yerel olarak seçilmesi durumlarında elde edilebilecek görseller Şekil 2.27’de verilmektedir. Duyarlılık analizi sonucu elde edilen değerlere ait görsel Şekil 2.28’de gösterilmiştir. Yazılımın bu özelliği sayesinde kullanıcılar tarafından seçilen belirsiz parametrelerin frekanslara olan etkisinin Duyarlılık Analizi sonucuna göre değerlendirilmesinin yapılmasına olanak sağlamaktadır.



a) Bütünsel parametre listesine göre



b) Yerel parametre listesine göre

Şekil 2.27. Dynamic Update yazılımında elde edilen duyarlılık analizine ait görsel

SensitivityAnalysisForm

Graphic Values

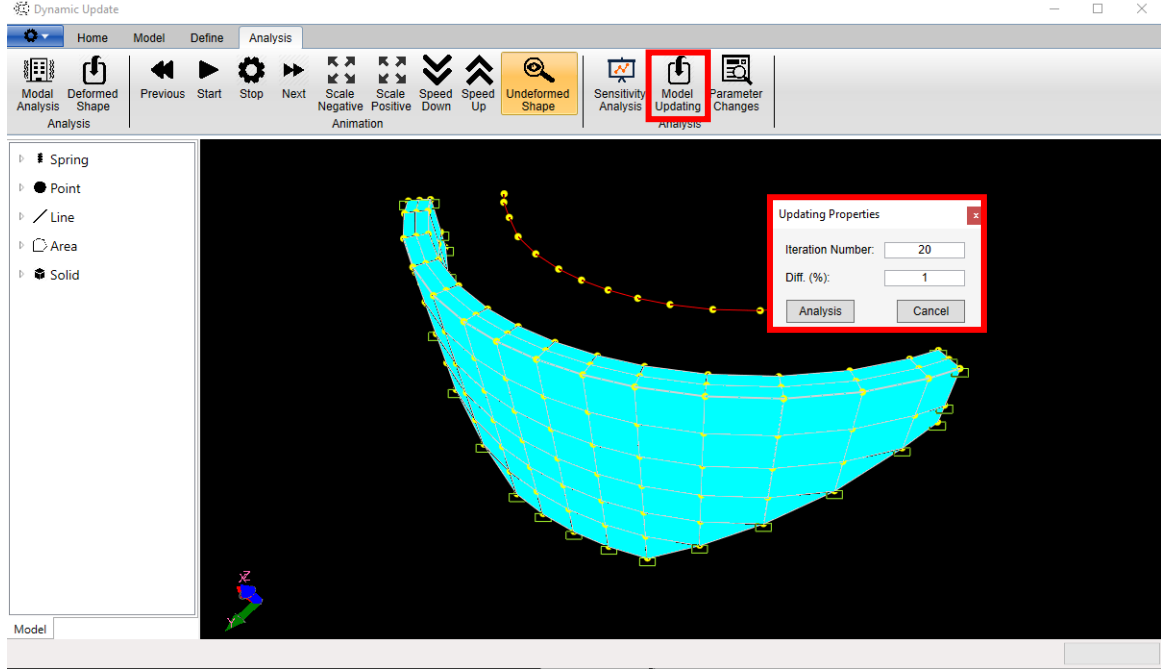
ID	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	
1	0,001041036	0,007361509	0,01358799	0,0006556715	0,01313773	
2	0,005210958	0,007791185	0,007597642	0,0002547614	0,005768052	
3	0,01089883	0,00477397	0,005864676	0,001348163	0,009844454	
4	0,01263079	0,00400709	0,008116986	0,004596927	0,006706855	
5	0,009853482	0,006311833	0,005294613	0,006127682	0,0085825	
6	0,005995506	0,005932352	0,007219194	0,003982488	0,01290133	
7	0,005499782	0,004134693	0,01411021	0,002563014	0,004149633	
8	0,005500281	0,004134603	0,0141102	0,002563147	0,004149554	
9	0,005997914	0,005932881	0,00721913	0,003982856	0,01290146	
10	0,009851489	0,006310175	0,005294612	0,006127394	0,00858232	
11	0,0126314	0,00400826	0,008117775	0,004596997	0,006707092	
12	0,01089879	0,004773332	0,005864639	0,001348182	0,009844461	
13	0,005210912	0,007790759	0,007597831	0,0002547643	0,00576809	
14	0,001041024	0,007361284	0,01358827	0,0006556779	0,01313777	
15	0,0003255829	0,002166803	0,003919644	0,0001347931	0,003444049	
16	0,003431975	0,00681304	0,007457777	0,0001981708	0,004476534	
17	0,008342512	0,002492019	0,003112968	0,0009133526	0,006442667	
18	0,009356982	0,001970795	0,005213031	0,003924843	0,005722929	
19	0,006402609	0,005845635	0,003698533	0,006748112	0,005309626	

Şekil 2.28. Dynamic Update yazılımında belirsiz parametrelerin duyarlılık analizi sonucunda elde edilen değerlere ait görsel

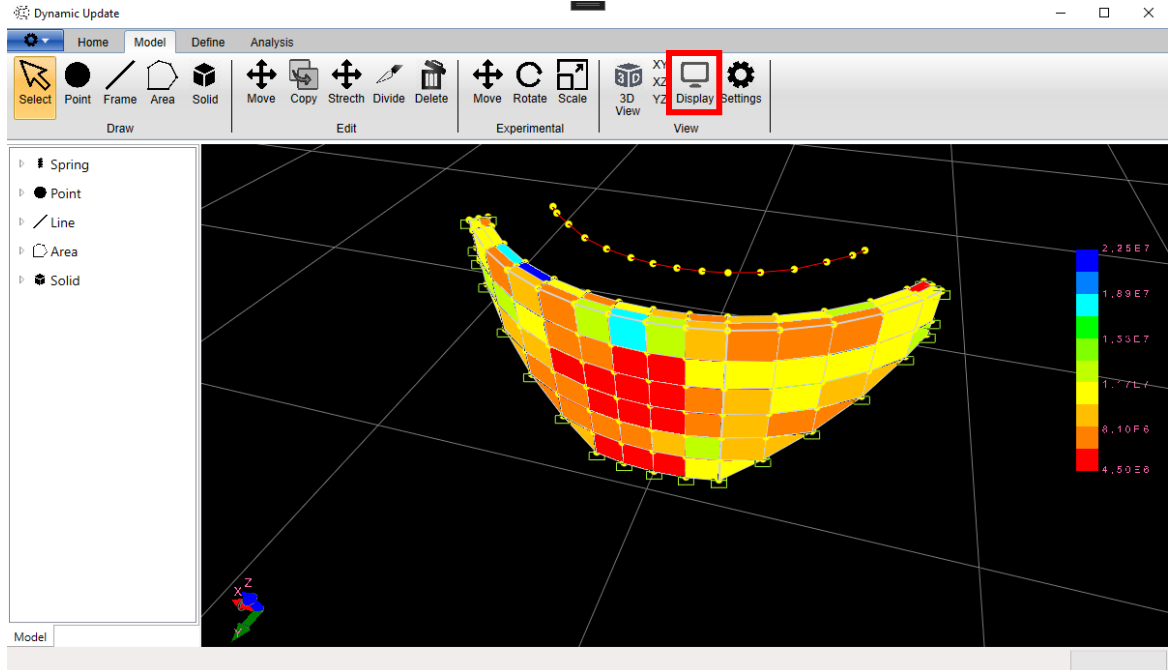
2.2.2.3. Bayes Parametrik Tahmin Yöntemi ile Sonlu Eleman Model Güncelleme

Kullanıcılar tarafından Dynamic Update yazılımına sonlu eleman ve deneysel model geometrisi aktarılıp, düğüm noktaları eşleştirildikten sonra belirsiz parametrelerin duyarlılık analizi yapılarak analiz sonucunun belirlenmesinin ardından otomatik model güncelleme işlemine geçilmektedir. Bu işlem için Analysis menüsünde bulunan Model Updating butonuna tıklanarak Updating Properties penceresi ekrana getirilir (Şekil 2.29). Şekil 2.29’da görüldüğü gibi pencerede otomatik model güncelleme işleminin başlatılabilmesi için iterasyon sayısı (Iteration Number), sonlu eleman ve deneysel frekanslar arasındaki maksimum fark (Difference) parametrelerinin tanımlanması gerekmektedir. Analysis butonuna tıklandığı zaman otomatik model güncelleme işlemi frekanslar arasındaki maksimum farka veya iterasyon sayısına ulaştığı zaman tamamlanmaktadır. Elde edilen parametre değişimlerine ait sonuçların görsel olarak incelenmesi için Model menüsünde bulunan Display butonu, liste ve dinamik karakteristikler arasındaki korelasyonu incelemek için Analysis menüsünde bulunan Parameter Changes butonu kullanılır. İlgili şekillere ait örnek görseller Şekil 2.30-2.32’de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar istenilen değerler arasında ise güncel sonlu eleman model kabul edilmiş olup, bu model üzerinde yapısal

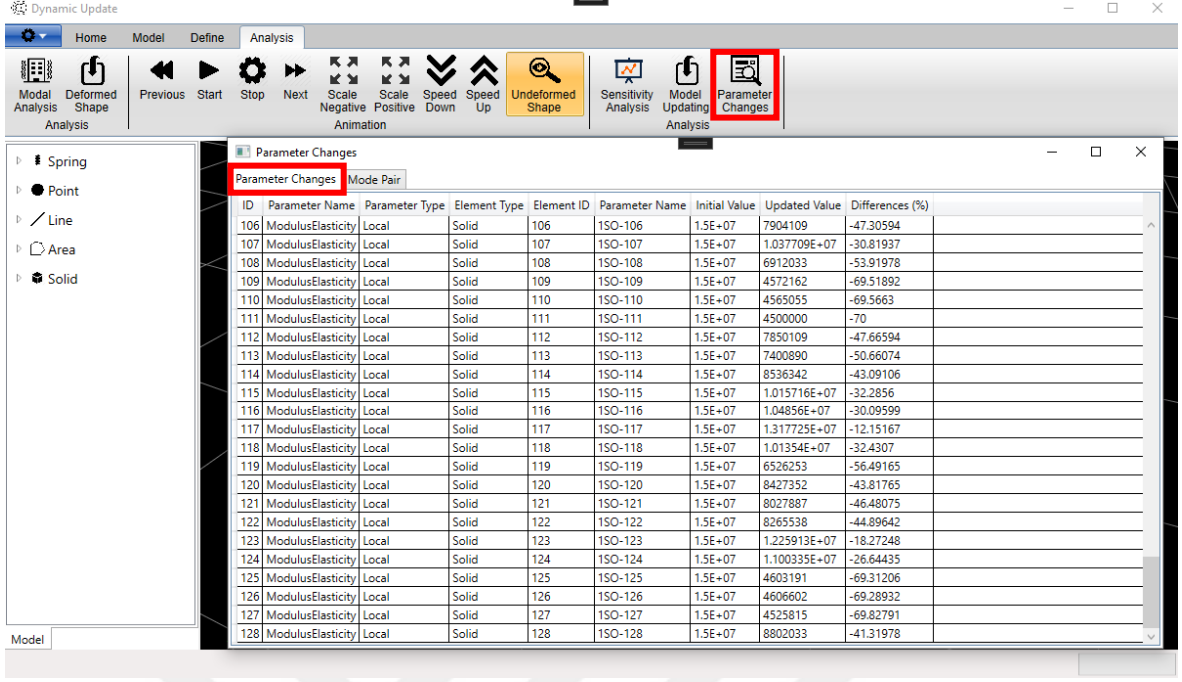
durum değerlendirme, statik/dinamik yükler altında davranışın değerlendirilmesi, gibi birçok konuda çalışmaların gerçekleştirilmesine öncülük etmektedir.



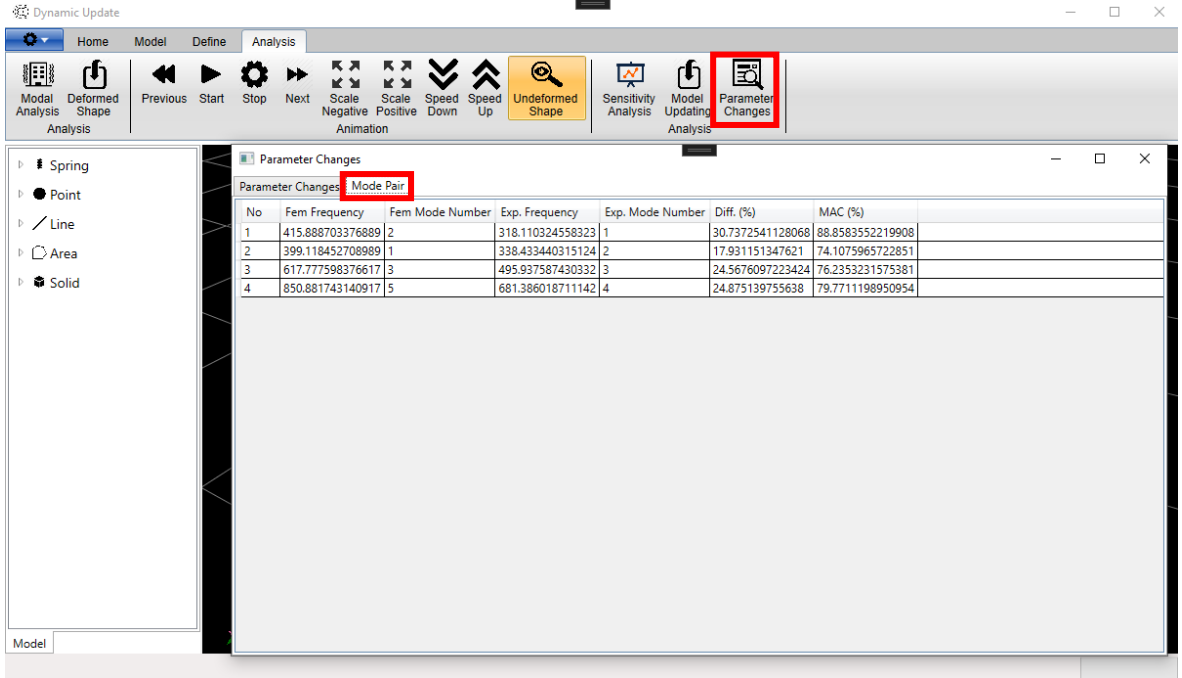
Şekil 2.29. Dynamic Update yazılımında otomatik model güncellemeye ait görsel



Şekil 2.30. Dynamic Update yazılımında parametre değişimlerine ait görsel



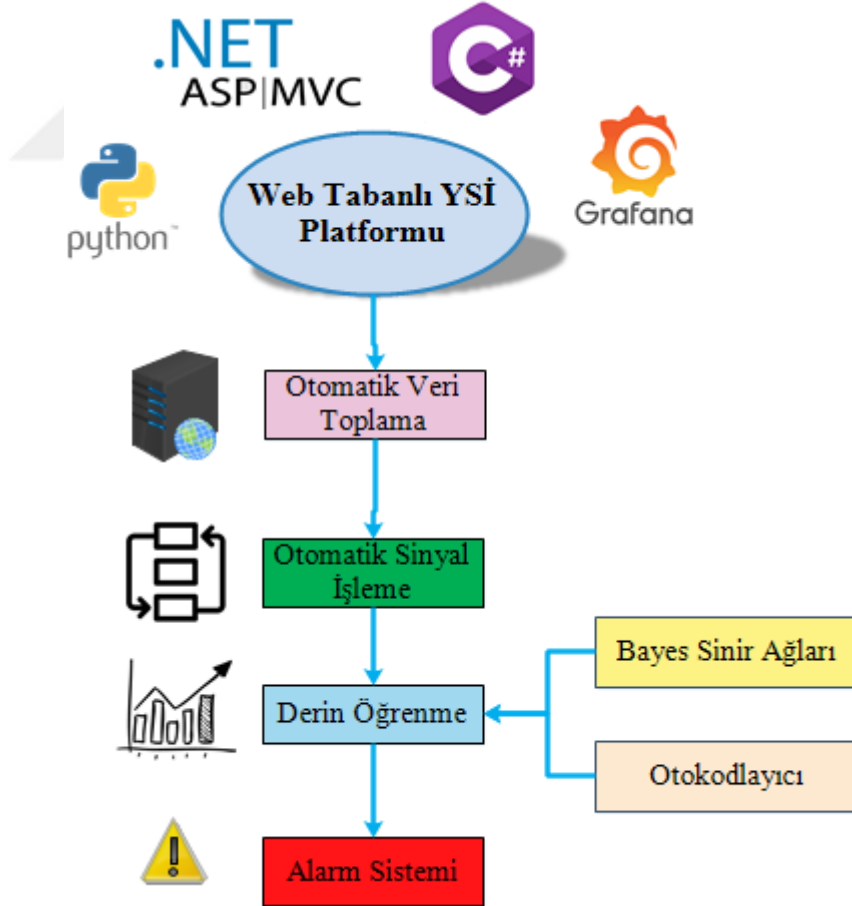
Şekil 2.31. Dynamic Update yazılımında parametre değişim listesine ait görsel



Şekil 2.32. Dynamic Update yazılımında dinamik karakteristikler arasındaki korelasyona ait görsel

2.2.3. Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformu

Bu çalışma kapsamında, mühendislik yapılarının, web tabanlı olarak hazırlanan Yapı Sağlığı İzleme Platformu ile ortam sıcaklığı, nemi ve rüzgar hızı gibi birçok çevresel etkenlere bağlı olarak değişebilen mevcut durumunu ifade eden sinyallerin online olarak izlenmesi, verilerin işlenmesi, yorumlanması, grafiklendirilmesi, raporlandırılması ve istenilen tarihteki verilere kolaylıkla ulaşılabilmesi sağlanmaktadır. Dinamik karakteristiklere ait verilerin otomatik işlenmesi için ve ayrıca, elde edilen sürekli sinyallerde anormallik tespiti için derin öğrenme tabanlı metodolojiler geliştirilmiş, değişen çevre koşullarından kaynaklı belirsizlikler altında Bayes Sinir Ağları ile güven aralığı belirlenmesine yönelik çalışma yapılmış ve bu platforma entegre edilmiştir. Platformun geliştirilmesinde ASP.NET MVC, C#, Python, Grafana ve veritabanı için PostgreSQL kullanılmıştır. Platforma ait akış şeması Şekil 2.33'te gösterilmiştir.



Şekil 2.33. Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformuna ait akış şeması

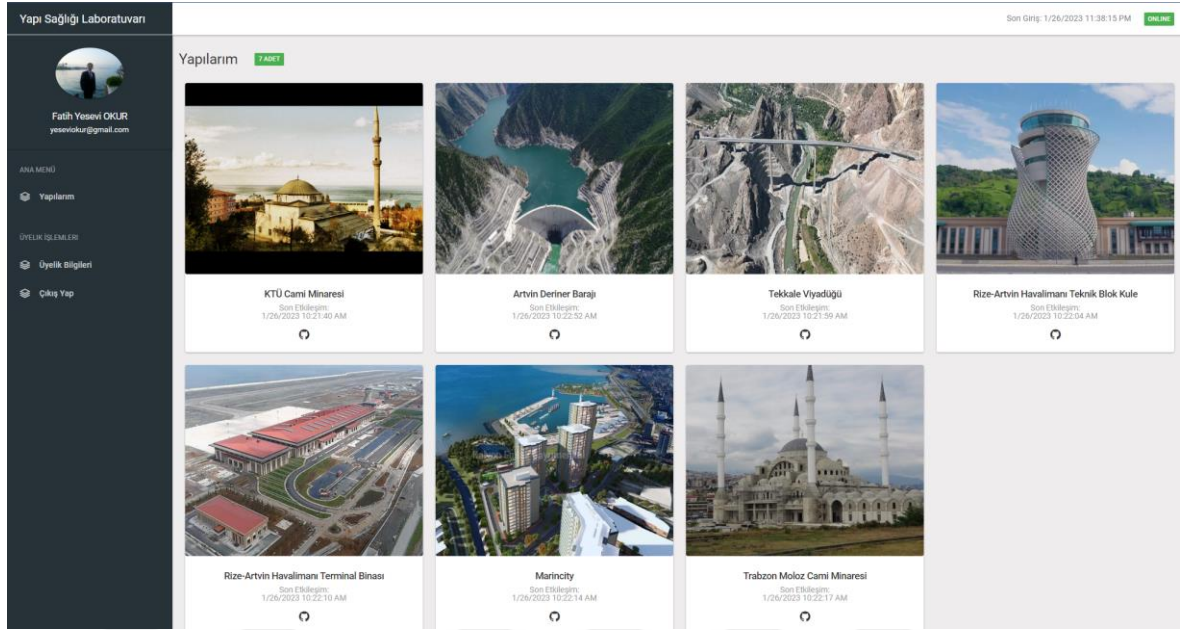
Yapı Sağlığı İzleme platformu ile yürütülen çalışmalara ait tüm verilere 7/24 ulaşılabilme ve yapı hakkında istenilen zamanda bilgi sahibi olabilmenin yanı sıra;

- Yapıya yerleştirilecek sensörler ile sürekli izleme sağlanabilmekte,
- Yapılardan gelen sinyallerin ana server'a aktarılması depolanması ve verilerin işlenerek değerlendirilmesi yapılabilmekte,
- İşlenen verilerin sistematik olarak tarih ve saatlik gösterilmesi ve izleme süreci boyunca gelen yeni veri ile karşılaştırılması yapılabilmekte,
- İzleme sürecinde veri işleme algoritmaları uygulanabilmekte,
- İzleme sürecinde yapısal davranışta meydana gelen değişimler anlık olarak sunulabilmekte ve oluşabilecek ekstrem durumlarda acil müdahaleye imkan sağlanabilmekte,
- Site üyeleri kendilerine özel şifreler ile yapılarına günün her anında erişim sağlayabilmekte olup, acil durum ikazı e-posta yoluyla bildirilebilmektedir.

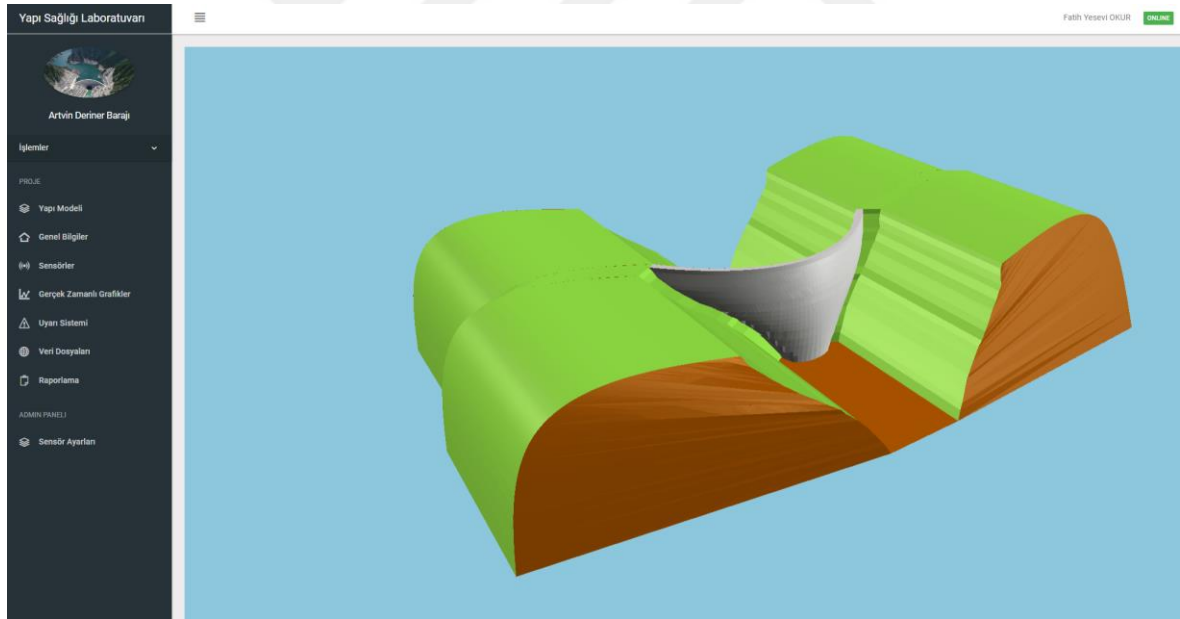
Çalışma kapsamında hazırlanan Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformuna ait ana giriş ekran görseli Şekil 2.34'te gösterilmektedir. Hazırlanan bu platformda izlenen her bir yapıya ait özel sayfa bulunmaktadır. Talep eden tarafından yetkilendirilen kişiler tanımlanan şifre ile yapıya ait sayfaya erişim sağlayabilmektedir (Şekil 2.35). Bu sayfada yapıya yerleştirilen sensörlerden 7/24 alınan sinyallerin grafiklerine, yapının mevcut durumu hakkındaki bilgilere ve raporlara ulaşılabilir (Şekil 2.36, Şekil 2.37).



Şekil 2.34. Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformu giriş ekranına ait görsel



Şekil 2.35. Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda izlenen yapılara ait görsel



Şekil 2.36. Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda izlenen bir yapının ekran sayfasına ait görsel



Şekil 2.37. Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda izlenen bir yapının gerçek zamanlı grafiklerine ait görsel

2.2.3.1. Gerçek Zamanlı İzleme

2.2.3.1.1. Gerçek Zamanlı Frekans Takibi İçin Metodoloji Geliştirilmesi

Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte titreşime dayalı Yapı Sağlığı İzleme birçok mühendislik yapılarında uygulanmaktadır. Sürekli izlemede yapının frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristikleri takip edilmektedir. Titreşime dayalı Yapı Sağlığı İzlemesinde yapının işleyişini kesmeyen, ekonomik, yapay yük gerektirmeyen ve güvenli bir şekilde uygulanabilen çevresel titreşim analizlerine önem verilmektedir (Zeng ve Kim, 2023). Ayrıca dinamik karakteristiklerin elde edilmesi Sonlu Eleman Model Güncellemesinde, titreşime dayalı hasar tespit yöntemlerinde ve gerçek zamanlı alarm sistemlerinde referans olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır.

Sensörlerden gelen verilerin sürekli ve uzun süreli izlenmesi ile beraber çok miktarda verinin takip edilmesi ve kısa süre içinde analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bu nedenle, deneyimli kişiler tarafından büyük ölçekli verileri manuel olarak işlemek büyük bir emek gücü gerektirmekle beraber pratik bir çözüm de sunmamaktadır. Aynı zamanda, büyük ölçekli verilere çok fazla kullanıcı müdahalesinin olması hatalı sonuçların elde edilmesine sebep olabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı, gerçek zamanlı izlemelerde yapıların mevcut durumlarının otomatik olarak değerlendirilmesi önerilmektedir (Zeng ve Kim, 2023).

Otomatik dinamik karakteristiklerin takibi için birçok çalışma bulunmaktadır (Vanlanduit vd., 2003; Verboven vd., 2003; Guan vd., 2005; Brincker vd., 2007; Deraemaeker vd., 2008; Zhang vd., 2014; Cabboi vd., 2017; Sun vd., 2017; Xin vd., 2019; Karami vd, 2020; Zeng ve Kim, 2023). Bu çalışmaların temelinde frekans veya zaman tanım alanındaki yöntemler kullanılmaktadır

Otomatik dinamik karakteristiklerin zaman tanım alanında belirlenmesindeki en büyük zorluk durum-uzay modelinin doğru model sırasını belirlemektir. İlgili frekans aralığındaki fiziksel modları tanımlamak için, model sırasının fazla tahmin edilmesi yapısal olmayan modların hesaplanmasına neden olmaktadır. Frekansların zaman tanım alanında otomatik olarak belirlenmesi ile ilgili yapılan birçok çalışmada stabilizasyon diyagramlarıyla ilgili araçlar kullanılarak fiziksel ve yalancı modların ayırt edilmesi amaçlanmıştır. Zaman tanım alanında daha gerçekçi sonuçların elde edilebilmesi için model sayısının artırılması gerekmektedir. Fakat bu durum, bilgisayarlarda işlem hacminin artmasına, daha fazla zaman ve güç tüketimine neden olmaktadır (Döhler ve Mevel, 2012).

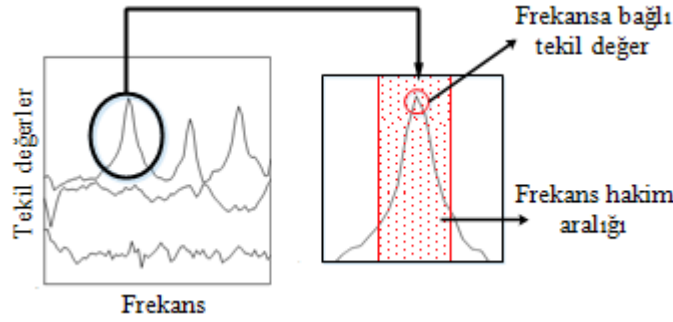
Otomatik dinamik karakteristiklerin frekans tanım alanında belirlenmesinde en çok kullanılan yöntem FTAA Yöntemidir. Bu yöntem aynı zamanda parametrik olmayan ve fiziksel anlamıyla da basitliğiyle tanınmaktadır (Cabboi vd., 2017). Otomatik FTAA yöntemi ilk defa Brincker vd. (2007) tarafından model kararlılık fonksiyonu kullanılarak fiziksel piklerin elde edildiği bir prosedür ile geliştirilmiştir. Fakat çalışmalarında sınır değere bağlı pik seçilmesinin gürültü ve yalancı piklere karşı hassas sonuçlar vermediği vurgulanmıştır (Rainieri ve Fabbrocino, 2010).

Yukarıda bahsedilen durumlar ve yapılan çalışmalar genel olarak özetlenirse otomatik dinamik karakteristiklerin takibi için geliştirilen birçok algorithmada,

- Birçok eşik tabanlı piklerin otomatik olarak elde edilmesi ve bu pik değerlerin gürültü altında hassas çalışmaması,
- Başlangıçta statik olarak tanımlanan parametreler için hasar oluşması veya çevresel etkilerin değişmesi nedeniyle sürekli kalibrasyona ihtiyaç duyulması,
- Gürültüye karşı çok duyarlı olmaları
- Zaman tanım alanındaki yöntemlerin birçoğunun bilgisayarın çözebileceği işlem hacminden daha fazlasına ihtiyaç duyması

sebebiyle alternatif bir metodoloji geliştirilmesi gereği duyulmuştur. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında frekans tanım alanında GFTAA yöntemi kullanılarak otomatik frekansların elde edilmesi ile ilgili metodoloji geliştirilmesi amaçlanmıştır.

GFTAA yönteminde elde edilen birinci tekil değerlerin pik noktaları yapının modlarını temsil edebilmektedir. GFTAA yönteminin her frekans adımında, ilgili frekans adımına ait mod şekil değerleri hesaplanmaktadır. Yapıya ait hakim frekans (pik noktasındaki değer) bölgesinin aralığı yapının sönüm oranından etkilenmekte, bu aralık sönüm oranına bağlı olarak genişleyip daralabilmektedir. Bu bölge frekans hakim aralığı (Modal etki alanı – Modal domain) olarak ifade edilmektedir (Şekil 2.38). Frekans hakim aralığı hesaplanırken mod şekilleri korelasyonu yöntemlerinden birisi olan MAC yöntemi kullanılmaktadır. Frekans değerine ait mod şekilleri referans alınarak, frekans adımının sağında ve solunda olmak üzere her frekans değerine ait mod şekillerinden istenilen MGK korelasyonunu (önerilen minimum %80) sağlayacak şekilde adım adım ilerlenmesi ile frekans hakim aralığı elde edilebilmektedir.



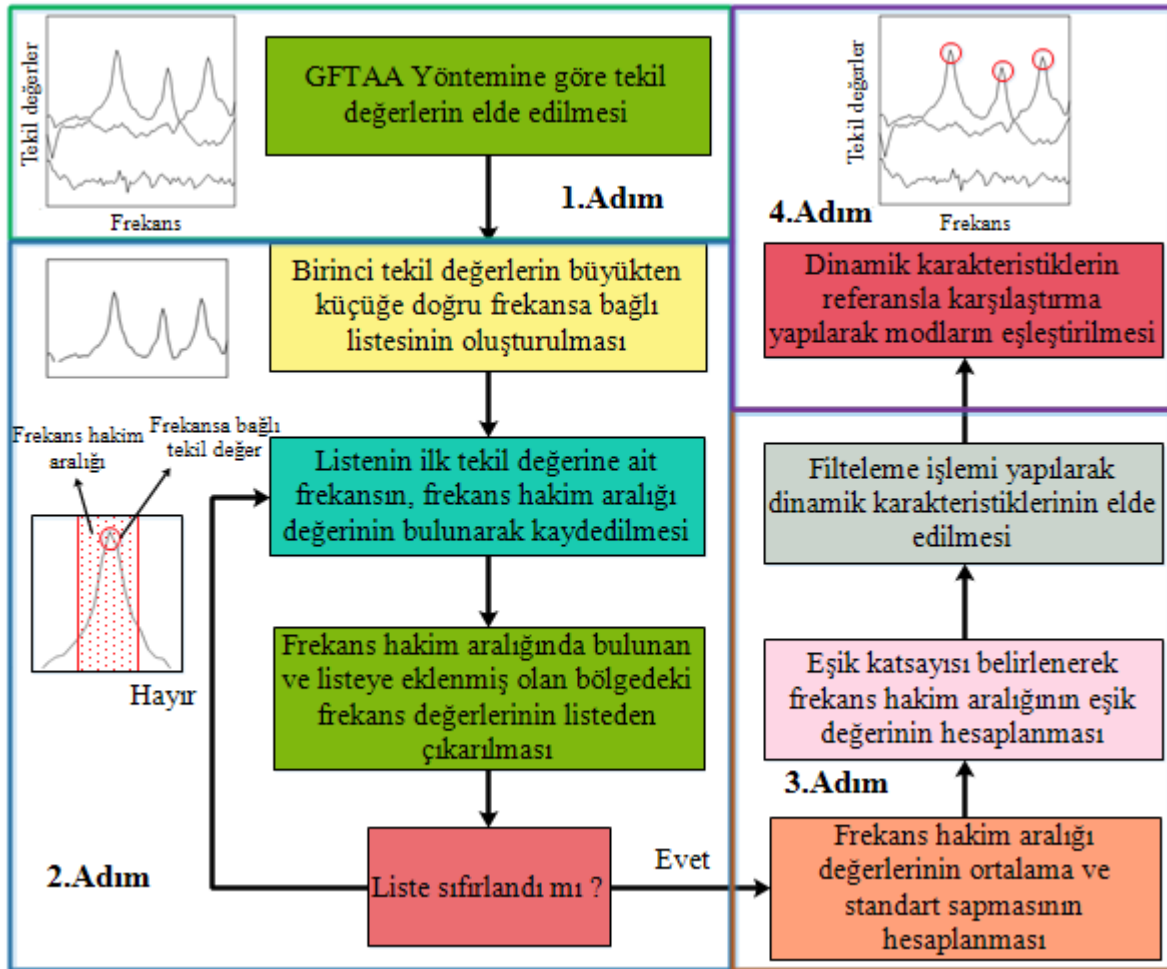
Şekil 2.38. GFTAA yönteminde pik noktasına ait frekans hakim bölgesi ile ilgili görsel

Yapısal frekanslara ait hakim aralıklar, yapısal olmayan frekanslara ait hakim aralıklara göre daha geniştir. Bu durum kullanılarak metodolojinin GFTAA yönteminden elde edilen birinci tekil değerlerin frekans hakim aralığında bulunan ve normal olmayan (yüksek) değerlerin tespit edilmesiyle, yapıya ait dinamik karakteristiklerin elde edilmesi hususuna dayanmaktadır. Bu amaçla geliştirilen metodoloji dört adımdan oluşmaktadır. Geliştirilen metodolojiye ait adımlar detaylı olarak aşağıda verilmekte olup akış şeması Şekil 2.39’da gösterilmiştir.

- 1. Adım (GFTAA yöntemine göre tekil değerlerin elde edilmesi): Sensörlerden gelen sinyallerin her frekans adımı için oluşturulan güç spektrum matrisleri ile Tekil Değer Ayırıştırma Yöntemi kullanılarak tekil değerleri elde edilir. Elde edilen değerler desibel (dB) cinsine çevrilerek işlem adımı tamamlanır.

- 2. Adım (Frekans hakim aralığı değerlerinin hesaplanması): Frekansa bağlı tekil değerlerin pik noktaları, yapıya ait hakim mod olabileceğinin göstergesidir. Bu nedenle bu bölgelerin frekans hakim aralığının belirlenmesi gerekmektedir. Bunu elde etmek için, 1. Adımda elde edilen tekil değerlerin birinci sıralamasında bulunan elemanların, frekansa bağlı olarak büyükten küçüğe doğru listesi oluşturulur. Elde edilen listenin ilk değerine karşılık gelen frekansın frekans hakim aralığı değeri bulunarak kaydedilir ve o bölgedeki diğer frekans değerleri listeden çıkarılır. Döngü tüm liste sıfırlanana kadar devam ettirilir. Bu adım sayesinde, frekanslara karşılık gelen frekans hakim aralığı listesi elde edilmiş olur.
- 3. Adım (Filtreleme işlemi): Frekanslara karşılık gelen frekans hakim aralığı değer listesi kullanılarak, frekans hakim aralığı değerlerinin ortalaması ve standart sapması hesaplanır. Ardından bir eşik katsayısı belirlenir. Bu eşik katsayısı standart sapma noktaları arasında olan $[-3, 3]$ aralığında olmalıdır. Eşik katsayısı yapıdan yapıya değişmekle birlikte $[0, 2]$ aralığında alınması önerilmektedir. Belirlenen eşik katsayısı, eşik katsayısının standart sapma değeri ile çarpılır ve frekans hakim aralığı değer listesinin ortalaması ile toplanarak frekans hakim aralığının eşik değeri elde edilir. Frekans hakim aralığının eşik değerinden az olan frekans değerleri listeden çıkarılarak filtreleme işlemi gerçekleştirilir. Elde edilen filtrelenmiş liste ile dinamik karakteristikler (frekans, mod şekli ve sönüm oranı) elde edilir. Filtreleme işlemi sayesinde frekans hakim aralığı değerlerinin normal dağılım grafiği ile standart sapması fazla olan frekanslar hesaplanarak olası mod listesi elde edilir.
- 4. Adım (Dinamik karakteristiklerin eşleştirilmesi): Filtrelenmiş liste içerisinde bulunan dinamik karakteristikler yapıya ait hakim modlar olabilmekle birlikte bazı gürültü sinyalleri nedeniyle aynı dinamik karakteristiklere sahip birbirine yakın frekanslarda mod değerleri elde edilebilmektedir. Fazla mod seçimini engellemek ve modları uygun şekilde gruplandırmak için, filtrelenmiş dinamik karakteristik listesinin referansla karşılaştırılarak en yakın korelasyon ilişkisini sağlayan modları gruplandırılır. Korelasyon için frekans değişimi ve mod şekillerine bağlı MAC yöntemi kullanılır. Dinamik karakteristikler arasındaki en yakın korelasyonun elde edilebilmesi için, filtrelenmiş listede bulunan dinamik karakteristiklerin referans model ile frekans değişiminin en az olduğu (önerilen maksimum %10) ve MAC değerinin en yüksek (önerilen minimum %80) olduğu dinamik karakteristik değeri elde edilerek gruplandırma yapılır. Eğer referansta kullanılan mod korelasyonu

sağlanmış ve gruplandırma yapılmış ise, ilgili referans mod çıkarılarak eşleştirmede kullanılmaz. Bu adım sayesinde dinamik karakteristikler referansla eşleşmekte ve otomatik olarak belirleme işlemi tamamlanmış olmaktadır.



Şekil 2.39. Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda frekans takibi için geliştirilen metodolojiye ait akış şeması

2.2.3.1.2. Derin Öğrenme ile Verilerde Anormallik Tespiti

Web tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda birçok veriye ait değerler veri tabanına otomatik olarak kaydedilmektedir. Platformda, yapı ve sensör sayısının fazla olması ve kullanıcı müdahalesini minimize etmek amacıyla verilerin değerlendirilmesinde Derin Öğrenme tabanlı yöntemler kullanılmıştır. Aynı zamanda verilerde anormallik tespiti için Otokodlayıcı tabanlı metodoloji geliştirilmiş olup ilgili detaylar bu bölümde açıklanmıştır.

2.2.3.1.2.1. Değişen Çevre Koşullarından Kaynaklı Belirsizlikler Altında Bayes Sinir Ağları ile Güven Aralığının Belirlenmesi

İnşaat Mühendisliğinde yapıların tasarlanmasında” veya yapısal durum değerlendirmesinde çeşitli belirsizlikler altındaki durum ele alınır. Bir yapının tasarım veya mevcut durumunda karşılaşılabileceği belirsizlikler aşağıda verilmiştir (William, 2008).

- Zaman: Geleceği tahmin etmedeki belirsizlikler (yapının kalan ömrünün belirlenmesi, değişen çevre koşullarının tahmini, bilinmeyen dış ortam yüklemeleri vb.)
- Model sınırları: Tasarım sırasında analitik veya sayısal modelde yapılan idealleştirmeler
- Rastgelelik: Malzeme özelliği ve dayanımın her elemanda aynı olmamasından kaynaklı belirsizlikler
- İnsan hatası: Yapının tasarımı veya inşasından kaynaklı hatalar

Yapıların çevresel koşullara göre fiziksel özelliklerini değiştirebilen ortam hava koşullarının bir parametre olarak mühendislik yapılarının uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesinde kullanılması önerilmektedir (Shahsavari, 2018). Tez çalışması kapsamında, yapıların bulduğu ortam hava koşulları elde edilmiş olup, bilinmeyen dış yükler ve sınır koşulları nedeniyle yapıların mevcut durumlarındaki belirsizlikler Derin Öğrenme tabanlı Bayes Sinir Ağları kullanarak yöntemin etkinliği ve uygulanabilirliğini belirlemek amacıyla çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bayes Sinir Ağlarının kullanımında Python programlama dili ve TensorFlow kütüphanesinden yararlanılmıştır.

2.2.3.1.2.2. Anormallik Tespiti İçin Otokodlayıcı Tabanlı Metodoloji Geliştirilmesi

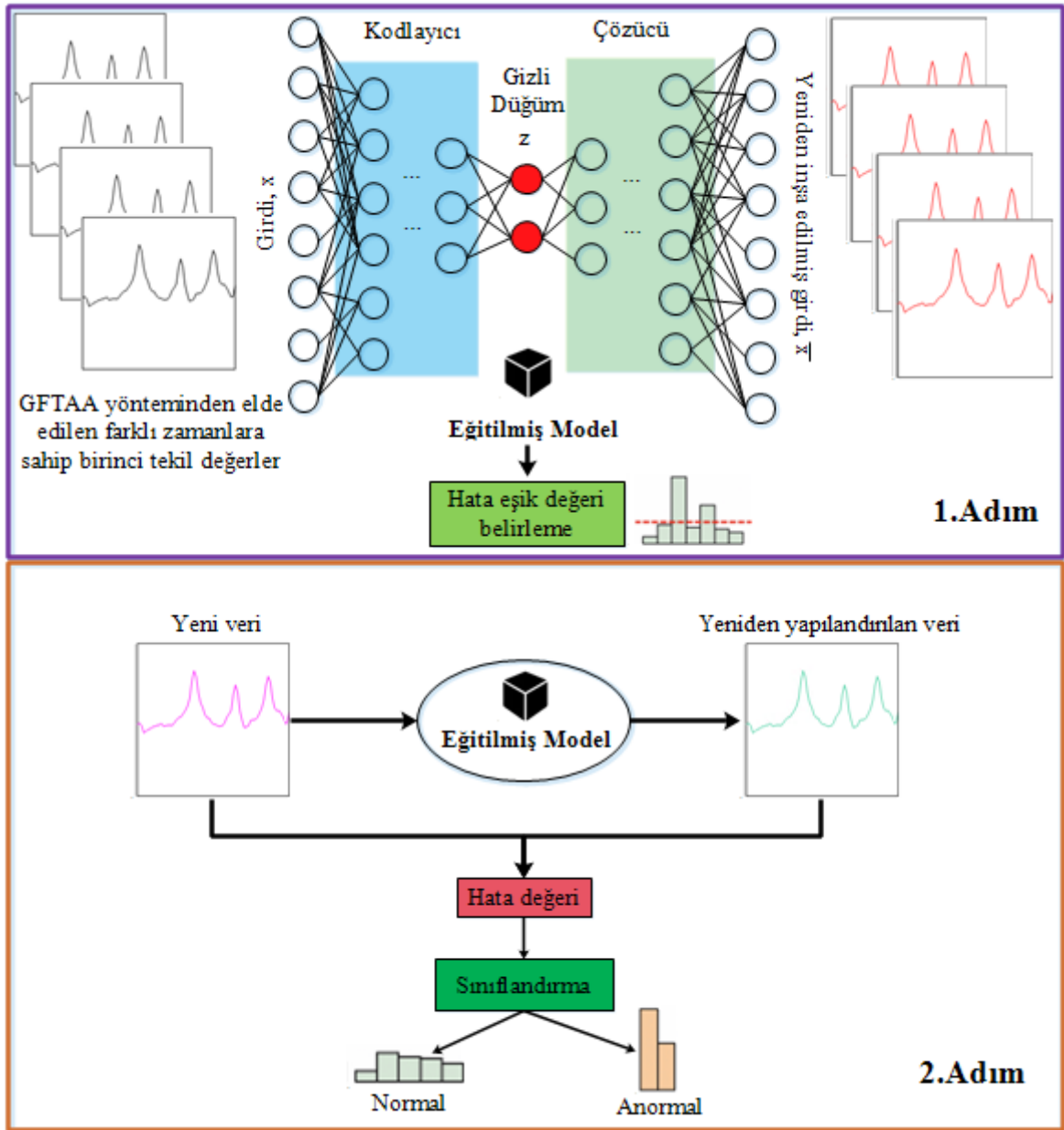
Mühendislik yapılarında değişen çevre koşulları altında sensörlerden elde edilen sinyaller ölçülmektedir. Değişen çevre koşulları altında yapının göstereceği davranış çeşitli belirsizlikler içermekte olup, yapıda oluşan bu belirsizlikler elde edilen sinyallere de yansımakta ve yapıların mevcut durumlarının doğru değerlendirilmesinde araştırmacıların işini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, değişen çevresel koşullardan kaynaklanan veri anormalliklerinin tespit edilmesi büyük önem arz etmektedir. Son yıllarda yapılarda anormallik tespiti için birçok model tabanlı yöntemler geliştirilmiştir (Abdelghani ve Friswell, 2004; Thiagarajan vd., 2017; Wan ve Ni, 2018; Wang vd., 2019; Mao vd., 2021).

Bu yöntemlerde istatistiksel modellerin oluşturulması ve uygun eşik aralıklarının tahmin edilmesi ile anormallik tespit edilmektedir.

Yapıların uzun süreli izlenmesi nedeniyle büyük miktarda verilerle karşı karşıya kalan araştırmacılar, son yıllarda anormallik tespiti için makine öğrenmesi ve derin öğrenme teknikleri kullanmaya başlamışlardır. Bu tekniklerin en önemli özelliği, verilere müdahale gerektirmeden birbiriyle ilişkilendirme yapması ve özellikleri belirlemek için veriyi hızlı bir şekilde tarayarak öğrenmesidir. Bao vd. (2019), Yapı Sağlığı İzlemede kamera sensörü ile elde edilen ham zaman serilerinin vektöre dönüştürüldüğü, çeşitli anormallikleri tespit etmek için Derin Sinir Ağları ile beslenen bir bilgisayar görüşü ve derin öğrenme tabanlı anormallik algılama yöntemi önermişlerdir. Fakat kamera sensörü ile elde edilen zaman serileri kullanılarak rijit yapılarda hassas sonuçlar elde edilememiştir (Payawal ve Kim, 2023). Fu vd. (2019), anormallikleri tespit etmek için sensörlere ait güç spektral yoğunlukları Yapay Sinir Ağları ile eğitmişlerdir. Çalışmalarında kullanılan Yapay Sinir Ağları ile öğrenmedeki belirsizlikleri gidermek için çeşitli öneriler sunmuşlardır. Tang vd. (2019) çalışmasında, gerçek zaman serilerini ve bu serilerin hızlı Fourier dönüşümlerini Evrişimli Sinir Ağları kullanarak anormallik tespiti yapmışlar ve algoritma geliştirmişlerdir. Çalışmada, zaman ve frekans alanındaki zaman serisi ölçümlerinin resim olarak görselleştirilmesi yapılarak sinir ağlarını eğitmişler ve anormallik tespiti için sınıflandırmada kullanmışlardır. Çalışmalarında her sensör ağının, eğitilmiş veri setlerinin sonuçlarını değiştirebildiği vurgulanmıştır. Aynı zamanda eğitim amaçlı kullanılan büyük veri setleri gözetimli öğrenme olarak kullanılmış ve veri setlerinde manuel etiketleme yapmışlardır. Derin öğrenmede kullanılan Otokodlayıcılar sinyal, görüntü gürültüleri altında başarılı sonuçlar vermektedir (Bajaj vd., 2020). Mao vd. (2020), bilgisayarlı görme ile Otokodlayıcı tabanlı anormallik tespiti için yöntem önermişlerdir. Çalışmada, Otokodlayıcı tabanlı anormallik tespitinde görüntüler üzerinde anormallik tespitinin yapılabildiği fakat büyük miktardaki verileri izlemek için yeterli olmadığı belirtilmiştir.

Çok kanallı sensörlerdeki ham sinyaller kullanılarak, GFTAA yöntemiyle elde edilen birinci tekil değerler ile tüm sensörlere ait tek bir sinyal çıktısı elde edilebilmektedir. Bu sinyal çıktısı aynı zamanda bütüncül bir değerlendirme olan yapılara ait frekansları da içermektedir. GFTAA yöntemi kullanılarak elde edilen tek sinyal çıktısındaki değişikliklerin Otokodlayıcı yöntemi ile anormallik tespitine dayalı metodoloji geliştirilmiştir. Geliştirilen metodoloji iki adımdan oluşmakta olup, ilgili adımlara ait detaylı açıklamalar aşağıda belirtilmiş ve metodolojiye ait akış şeması Şekil 2.40'ta gösterilmiştir.

- 1. Adım (Eğitilmiş modelin oluşturulması ve hata eşik değerinin belirlenmesi): Sensörlerden gelen zamana bağlı sinyallerin her frekans adımı için güç spektrum matrisleri oluşturulur. Her frekans adımı için elde edilen güç spektrum matrislerinin birinci tekil değer listesi Tekil Değer Ayırıştırma Yöntemi kullanılarak elde edilir. Eğitilmiş modelin oluşturulması için farklı zamanlara bağlı sinyallerin GFTAA yönteminden elde edilen birinci tekil değerleri kullanılarak veri setleri oluşturulur. Veri setleri Otokodlayıcı'da girdi verisi olarak kullanılmasıyla eğitilmiş model oluşturulur. Otokodlayıcı'da derin öğrenme amaçlı eğitilmiş model oluşturulurken kullanılacak nöron ve katman sayısı veri setine bağlı olarak kullanıcı tarafından deneme yanılma ile belirlenmekte ve eğitimde yüksek performanslı sonuç veren nöron ve katman sayısı kullanılmaktadır. Eğitilmiş model elde edildikten sonra eğitilmiş veri setleri kullanılarak veriler tahmin edilir ve oluşacak hata değerleri kaydedilir. Eğitilmiş veri setlerinden elde edilen hata değerlerinin normal dağılım testi yapılarak hata değerlerine ait ortalama ve standart sapma hesaplanır. Normal dağılım için eşik değerin belirlenmesinde z-skoru katsayısı $[-3,3]$ aralığında belirlenir (%95 güven aralığı için önerilen değer ± 1.96). Böylelikle bu adımda eğitilmiş model oluşturulur ve hata eşik değeri belirlenir.
- 2. Adım (Yeni verilerin işlenip sınıflandırılması): Değişen zaman ortamında GFTAA yönteminden elde edilen birinci tekil değerler kullanılarak eğitilmiş modele girdi olarak tanımlanıp yeniden yapılandırılan girdi değeri elde edilir. Yeni veri ile yeniden yapılandırılan veri arasında karşılaştırma yapılarak hata değeri elde edilir. Elde edilen hata değeri 1. Adımda hesaplanan eşik değerinin altında ise normal, değilse anormal olarak sınıflandırma yapılır. Bu adımda verilerin sürekli işlenmesiyle anormallik tespiti yapılabilmektedir.



Şekil 2.40. Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda anormallik tespiti için geliştirilen Otokodlayıcı tabanlı metodolojiye ait akış şeması

2.3. Deneysel Çalışmalar

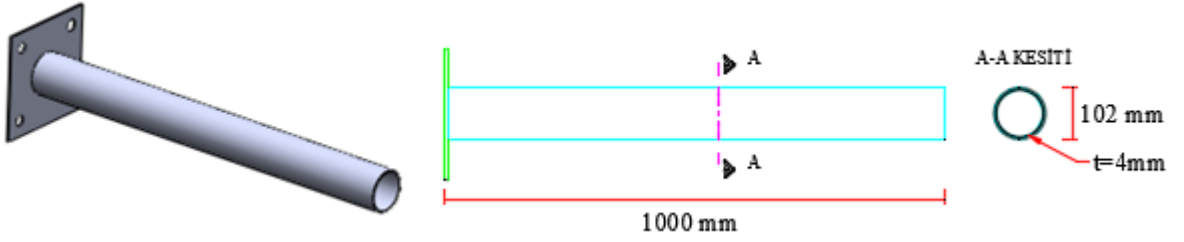
Bu bölümde Dynamic Modal, Dynamic Update ve Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformu için gerçekleştirilmiş deneysel çalışmalara ait veriler, bulgular ve irdelemeler verilmektedir.

2.3.1. Dynamic Modal Yazılımı için Yapılan Çalışmalar

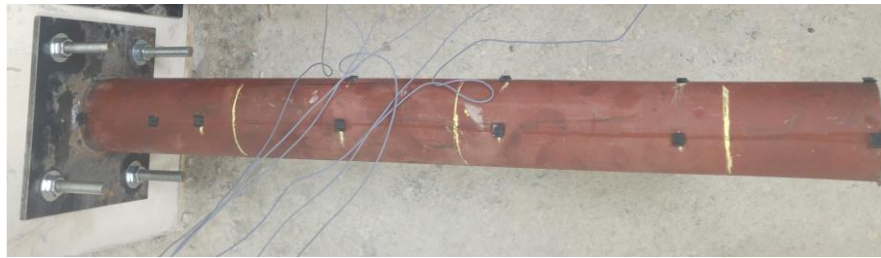
2.3.1.1. Laboratuvar Ortamında Üretilmiş Boru Kesitli Konsol Profil

2.3.1.1.1. Model Geometrisi

Okur (2017) tarafından laboratuvar ortamında hazırlanan boru kesitli çelik konsol kirişin boru çapı, et kalınlığı ve uzunluğu sırasıyla 102mm, 4mm ve 1m'dir. Kirişe ait deneysel dinamik karakteristikler OMA (2006) yazılımı ile belirlenmiştir. Okur (2017) tarafından yapılan deneysel ölçümlerde kullanılan sensörlerden elde edilmiş ham sinyaller bu tez kapsamında geliştirilen Dynamic Modal yazılımında kullanılmış ve elde edilen sonuçlar OMA (2006) yazılımına ait sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Laboratuvar ortamında üretilmiş boru kesitli konsol profile ait geometrik bilgiler ve görünüş Şekil 2.41'de gösterilmiştir.



(a) Geometrik bilgiler

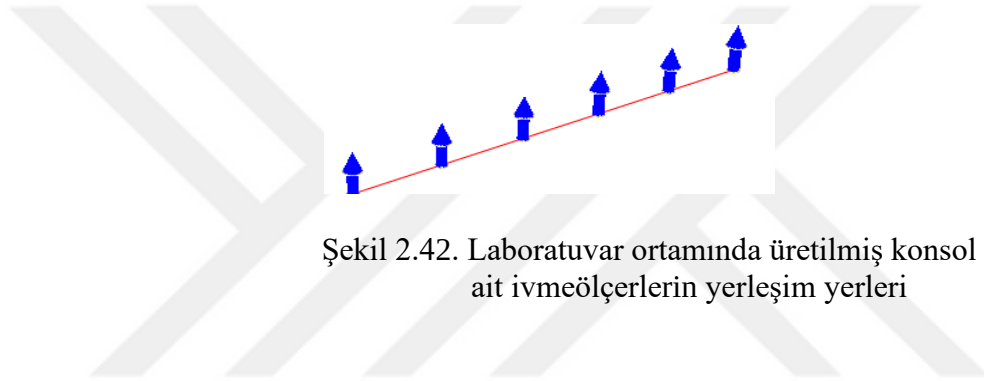


(b) Boru kesitli konsol profil

Şekil 2.41. Laboratuvar ortamında üretilmiş konsol boru profile ait geometrik bilgiler ve laboratuvar modeline ait görsel (Okur, 2017)

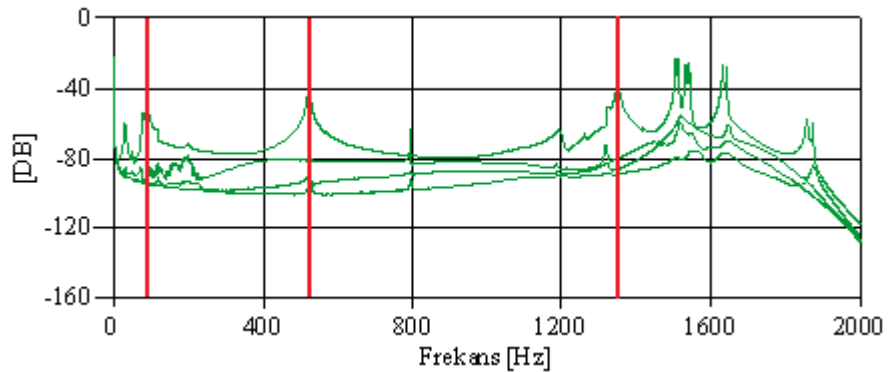
2.3.1.1.2. Çevresel Titreşim Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilerek Karşılaştırılması

Okur (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, laboratuvar ortamında üretilmiş boru kesitli çelik konsol kirişe ait frekans, mod şekilleri ve sönüm oranı gibi deneysel dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde çevresel titreşim yöntemi uygulanmıştır. Deneysel ölçümlerin gerçekleştirilebilmesi için kullanılan B&K 4507 tipi tek eksenli 6 adet ivmeölçer düşey yönde yerleştirilmiştir. İvmeölçerlere ait yerleşim planı Şekil 2.42’de verilmektedir. 0-200Hz aralığında 10 dakika boyunca ölçüm alınarak ham sinyaller kaydedilmiştir.



Şekil 2.42. Laboratuvar ortamında üretilmiş konsol boru profile ait ivmeölçerlerin yerleşim yerleri

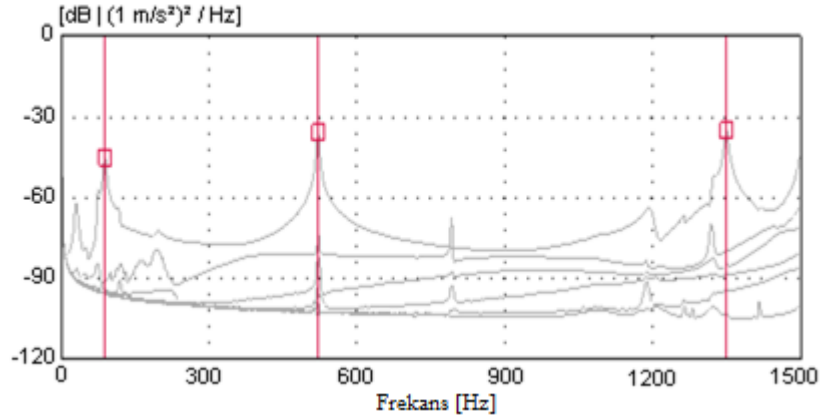
Ham sinyaller işlenerek GFTAA yöntemine göre Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarından elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri Şekil 2.43’te, SAB yöntemine göre elde edilen kararlılık diyagramı Şekil 2.44’te, her iki yazılımdan elde edilen mod şekilleri Şekil 2.45’te ve elde edilen frekans değerleri Tablo 2.9’da gösterilmiştir.



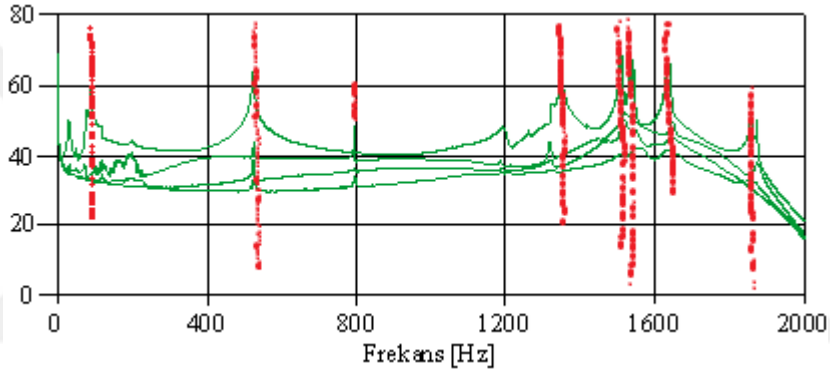
(a) Dynamic Modal yazılımı

Şekil 2.43. Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarından elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

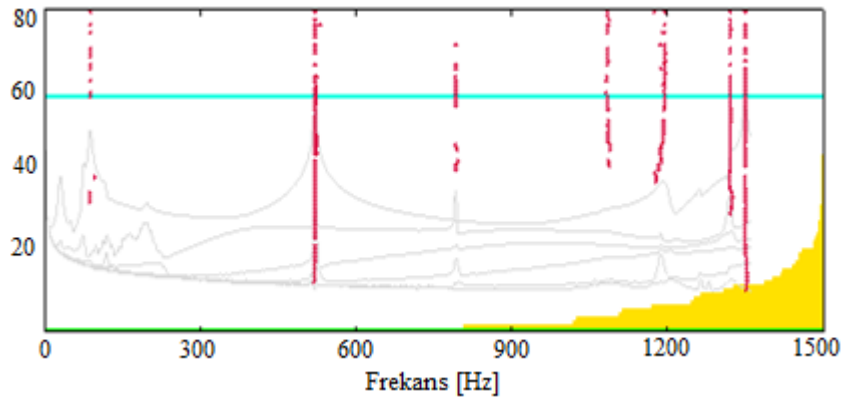
Şekil 2.43'ün devamı



(b) OMA (2006) yazılımı

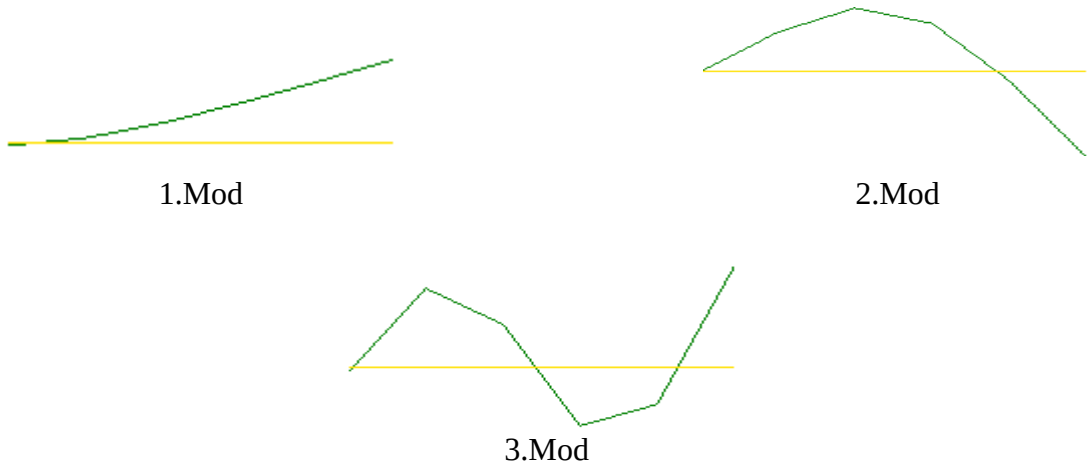


(a) Dynamic Modal yazılımı



(b) OMA (2006) yazılımı

Şekil 2.44. Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarından elde edilen kararlılık diyagramı



Şekil 2.45. Laboratuvar ortamında üretilmiş boru kesitli konsol profilin deneysel ölçümlerden elde edilen mod şekilleri

Tablo 2.9. Laboratuvar ortamında üretilmiş boru kesitli konsol profilin deneysel ölçümlerden elde edilen frekansların karşılaştırılması

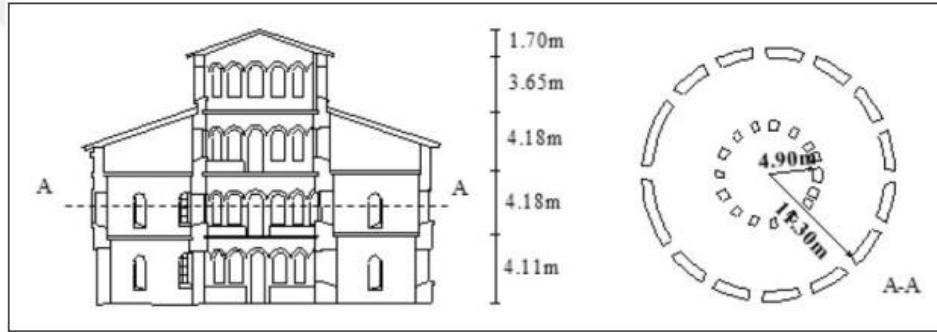
Mode No	GFTAA			SAB		
	Dynamic Modal	Fark (%)	OMA (2006)	Dynamic Modal	Fark (%)	OMA (2006)
1	86,77	2,56	89,05	88,05	-1,00	88,94
2	517,79	0,78	521,85	524,47	0,57	521,50
3	1336,73	0,98	1350	1388,99	2,89	1350

Tablo 2.9’den görüldüğü üzere, laboratuvar ortamında üretilmiş boru kesitli konsol profilin GFTAA ve SAB yöntemleri kullanılarak elde edilen ilk üç frekans değerleri Dynamic Modal yazılımı için sırayla 86,77-1336,73, 88,05-1388,99, OMA (2006) yazılımı için ise sırasıyla 89,05-1350 ve 88,94-1350 aralığındadır. Ayrıca, Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarından elde edilen frekans değerlerinin birbirine yakın olduğu ve aralarındaki farklılıkların sırasıyla maksimum %2,56 ve %2,89 olarak elde edildiği görülmüştür.

2.3.1.2. Trabzon Cephanelik Binası

2.3.1.2.1. Model Geometrisi

Trabzon Cephanelik Binası, tarihi bir yapı olup iç içe geçen iki silindir kuleden oluşmaktadır. Dış ve iç kulenin yarıçapları sırasıyla 11,30m ve 4,90m iken yükseklikleri 10m ve 16m'dir. Yapının duvarları kesme taş malzemeden yapılmıştır. Yapı 4,11-5,35m aralıklarında çeşitli kat yüksekliklerine sahip olup 4 kattan oluşmaktadır. Yapının toplam yüksekliği 17,82m'dir. Trabzon Cephanelik Binasına ait geometrik bilgiler ve genel görünüş Şekil 2.46'da verilmektedir.



(a) Geometrik bilgiler

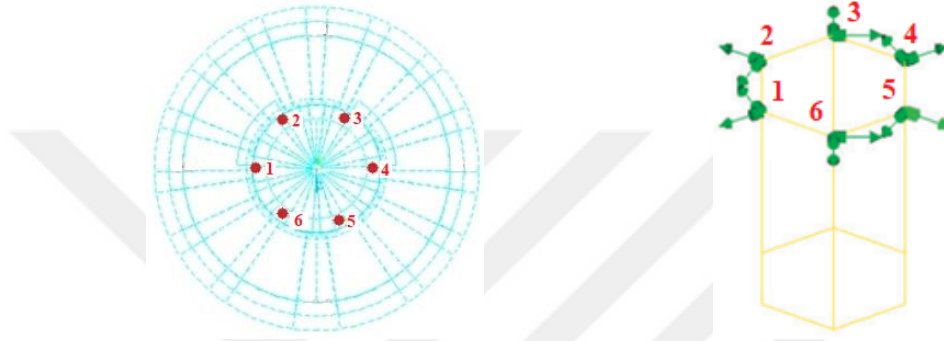


(b) Genel görünüş

Şekil 2.46. Trabzon Cephanelik Binasına ait geometrik bilgiler ve genel görünüş

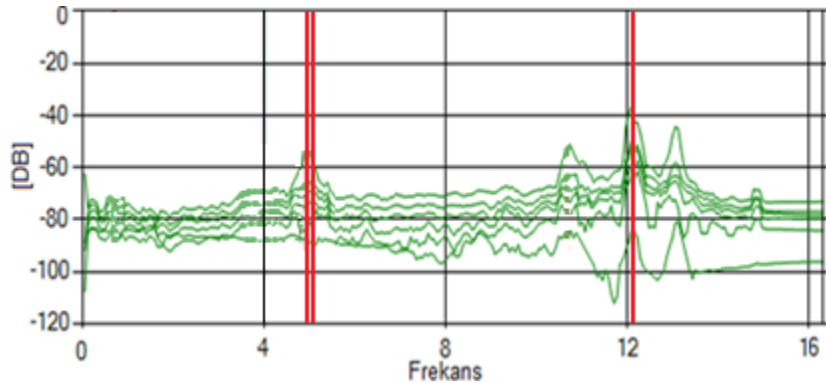
2.3.1.2.2. Çevresel Titreşim Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilerek Karşılaştırılması

Trabzon Cephanelik Binasına ait frekans, mod şekilleri ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristikleri elde etmek için Çevresel Titreşim Yöntemi kullanılmıştır. Çalışma kapsamında 12 adet B&K 8340 tipi ivmeölçer kullanılmış olup, ivmeölçerlere ait yerleşim planı Şekil 2.47’de gösterilmektedir.



Şekil 2.47. Trabzon Cephanelik Binasına ait ivmeölçer yerleşim planı

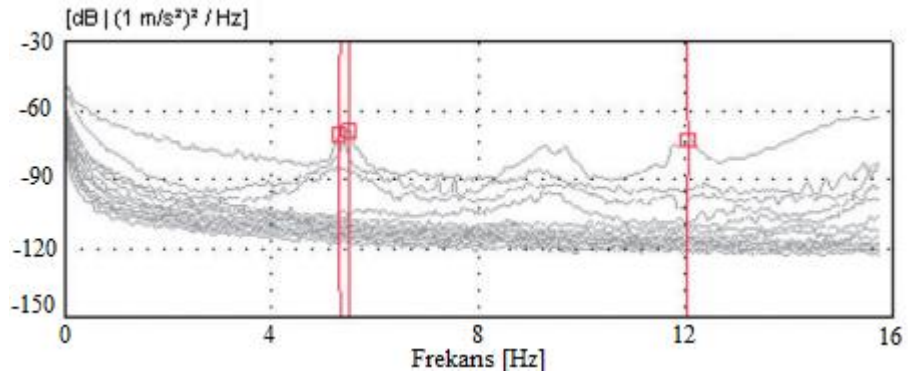
Yapıdan 0-16Hz aralığında 60 dakika süren ölçüm alınmıştır. Elde edilen ham sinyaller işlenerek GFTAA yöntemine göre Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımları kullanılarak hesaplanan spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri Şekil 2.48’de verilmiştir. SAB yöntemine göre kararlılık diyagramı her iki yazılımda da elde edilememiştir. Her iki yazılımdan elde edilen mod şekilleri Şekil 2.48’de ve elde edilen frekans değerlerinin karşılaştırılması Tablo 2.10’da verilmiştir.



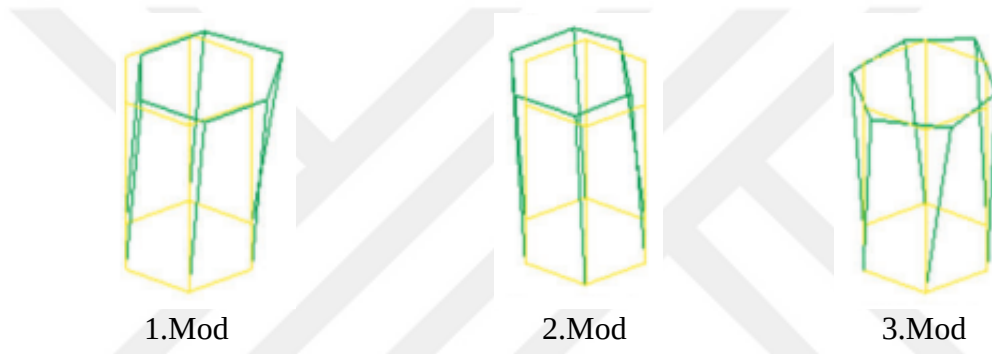
(a) Dynamic Modal yazılımı

Şekil 2.48. Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarından elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

Şekil 2.48'in devamı



(b) OMA (2006) yazılımı



Şekil 2.49. Trabzon Cephanelik Binasının deneysel ölçümlerden elde edilen mod şekilleri

Tablo 2.10. Trabzon Cephanelik Binasının deneysel ölçümlerden elde edilen frekansların karşılaştırılması

Mode No	GFTAA		
	Dynamic Modal	Fark (%)	OMA (2006)
1	5,31	0.56	5,34
2	5,54	0.54	5,51
3	12,12	0.58	12,05

Tablo 2.10'da görüldüğü üzere, cephanelik yapısının GFTAA yöntemine göre ilk üç frekans değeri Dynamic Modal yazılımı için sırasıyla 5,31-12,12Hz aralığında, OMA (2006) yazılımı için ise sırasıyla 5,34-12,05Hz aralığındadır. Ayrıca, frekans değerleri arasındaki farklar maksimum %0.58 olarak elde edilmiştir.

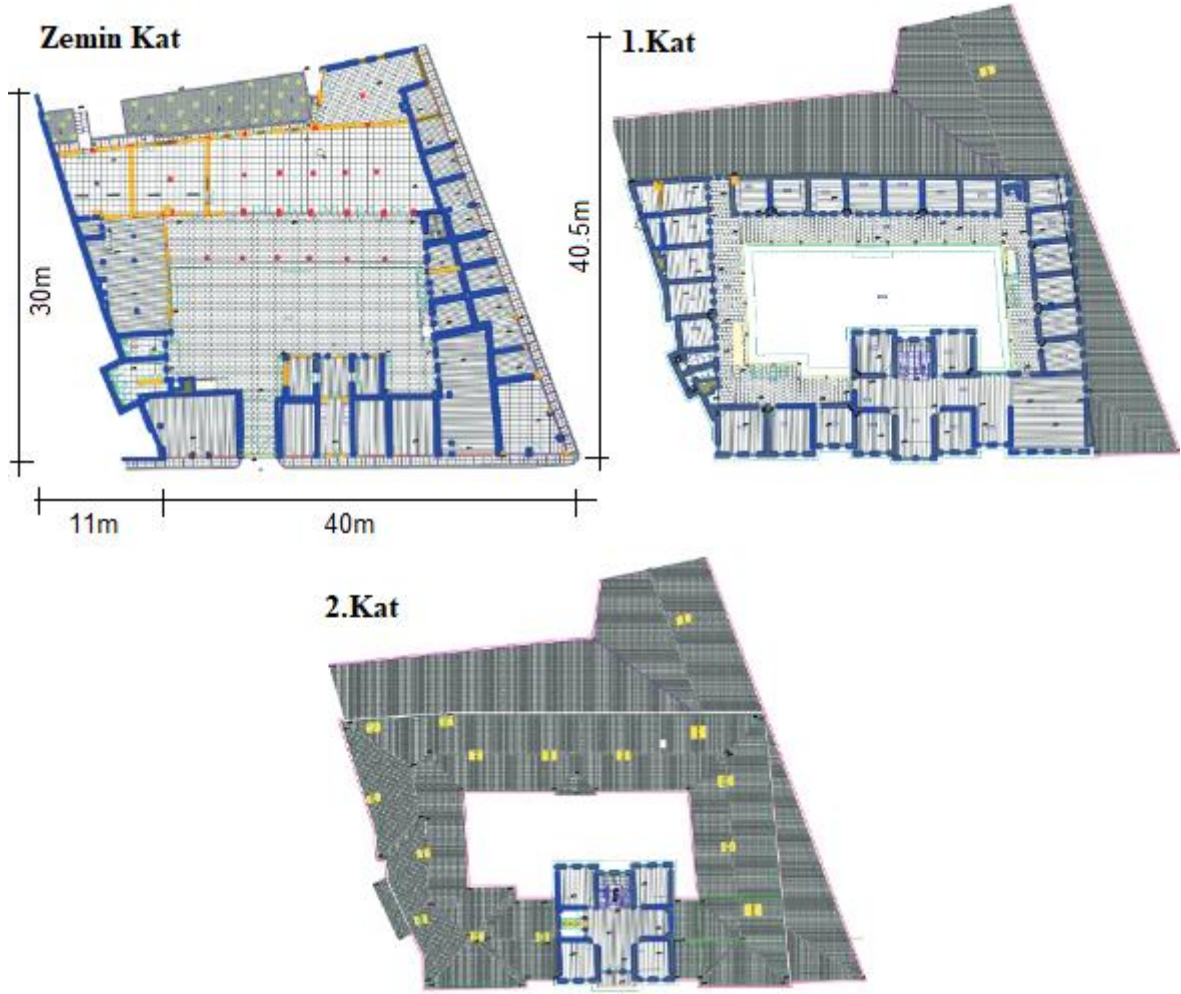
2.3.1.3. Tarihi Velipaşa Hanı

2.3.1.3.1. Model Geometrisi

Tarihi Velipaşa Hanı, Çorum ilçesinde yer almakta olup, tasarımı üç katlı bir otel ve iç bahçe etrafında iki kat halinde düzenlenmiş bir dizi odadan oluşmaktadır. Malzemesi ahşap ve bağdadi duvar elemanlarından oluşmaktadır. Model geometrisi planda 51x40,5m ve kat yükseklikleri 3,2m, 4,2m ve 3,8m'dir. Tarihi Velipaşa Hanı'na ait görseller Şekil 2.50'de, model geometrisi ve kat planları Şekil 2.51'de verilmektedir.



Şekil 2.50. Tarihi Velipaşa Hanı'na ait genel görseller

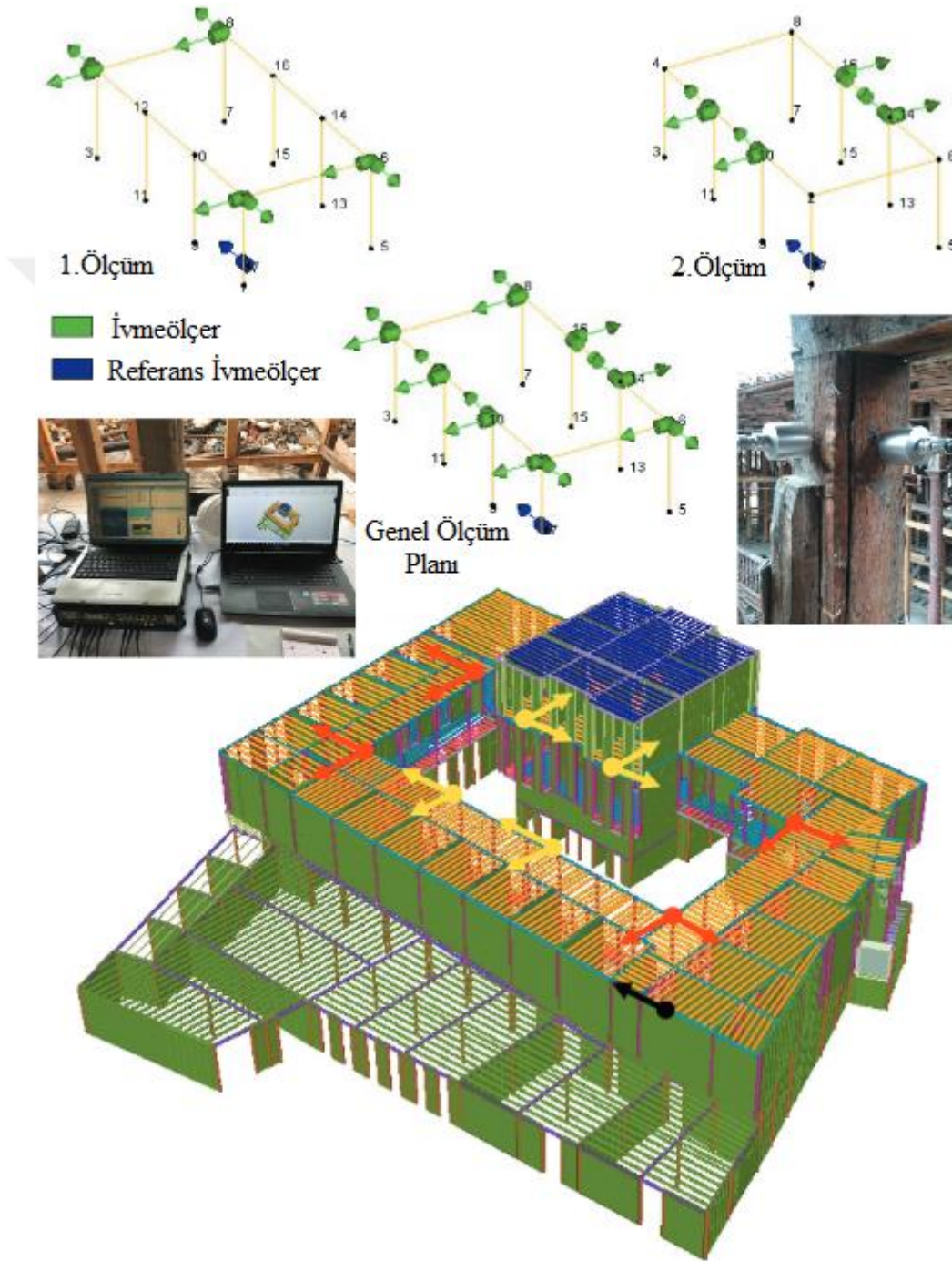


Şekil 2.51. Tarihi Velipaşa Hanı'na ait geometrik bilgiler ve kat planları

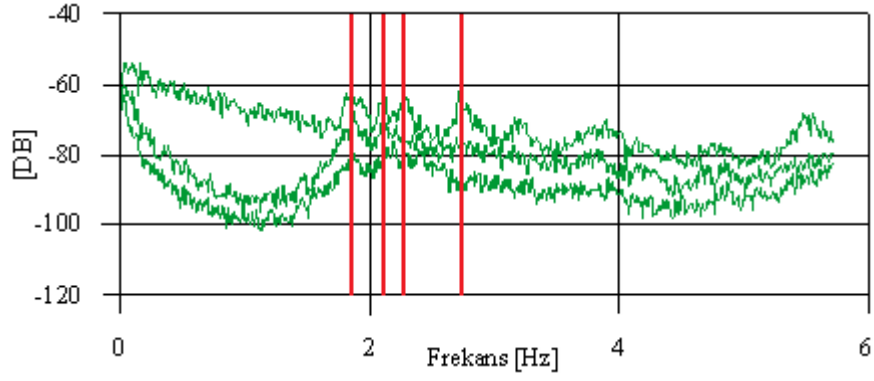
2.3.1.3.2. Çevresel Titreşim Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilerek Karşılaştırılması

Tarihi Velipaşa Hanı'na ait frekans, mod şekilleri ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristikleri elde etmek için Çevresel Titreşim Yöntemi kullanılmıştır. Çalışma kapsamında 8 adet B&K 8340 tipi ivmeölçer kullanılmış olup, iki farklı referanslı ölçüm konfigürasyonu oluşturularak ölçümler birleştirilmiştir. İvmeölçerlere ait yerleşim planı Şekil 2.52'de gösterilmiştir. Yapıda 0-25Hz aralığında 15'er dakikalık ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ham sinyaller işlenerek GFTAA yöntemine göre Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarından hesaplanan spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri Şekil 2.53'te verilmiştir. SAB yöntemine göre kararlılık diyagramları her iki yazılımda da elde edilememiştir. Her iki yazılımdan elde edilen mod şekilleri Şekil 2.54'te verilmiş olup, elde edilen frekansların karşılaştırılması Tablo 2.11'de yapılmıştır. Tablo

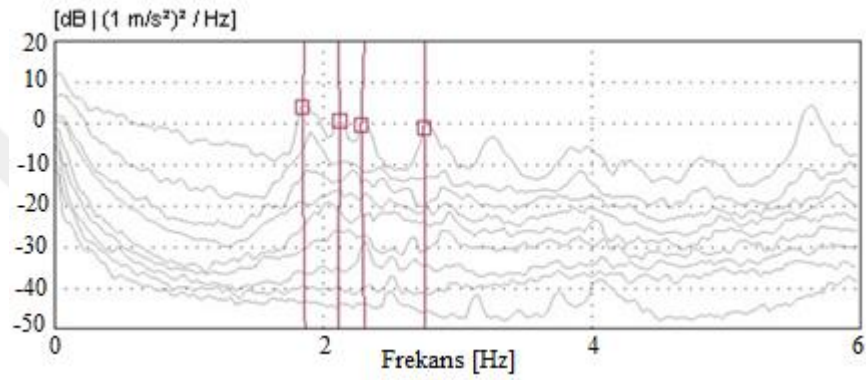
2.11’den görüldüğü üzere, Tarihi Velipaşa Hanı’nın GFTAA yöntemine göre ilk dört frekans değerleri Dynamic Modal yazılımı için sırasıyla 1,85-2,87Hz aralığında, OMA (2006) yazılımı için ise sırasıyla 1,87-2,76Hz aralığında elde edilmiştir. Ayrıca, frekans değerleri arasındaki farklar maksimum %1,42 olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.52. Tarihi Velipaşa Hanı’na ait ivmeölçer yerleşim planı

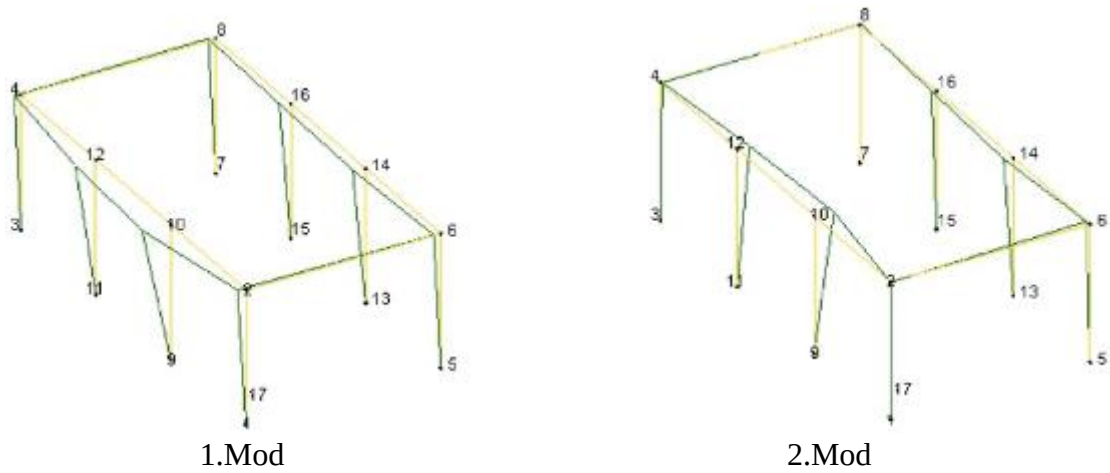


(a) Dynamic Modal yazılımı



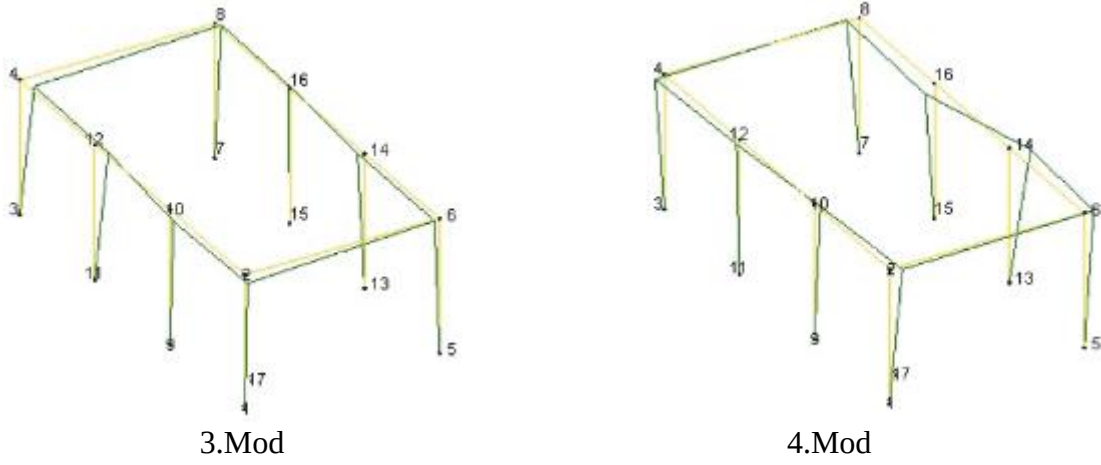
(b) OMA (2006) yazılımı

Şekil 2.53. Tarihi Velipaşa Hanı için Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarından elde edilen spektral yoğunluk matrisleri



Şekil 2.54. Tarihi Velipaşa Hanı'na ait deneysel ölçümlerden elde edilen mod şekilleri

Şekil 2.54'ün devamı



Tablo 2.11. Tarihi Velipaşa Hanı'na ait deneysel ölçümlerden elde edilen frekansların karşılaştırılması

Mode No	GFTAA		
	Dynamic Modal	Fark (%)	OMA (2006)
1	1,85	1,07	1,87
2	2,14	1,42	2,11
3	2,48	0,87	2,31
4	2,87	0,72	2,76

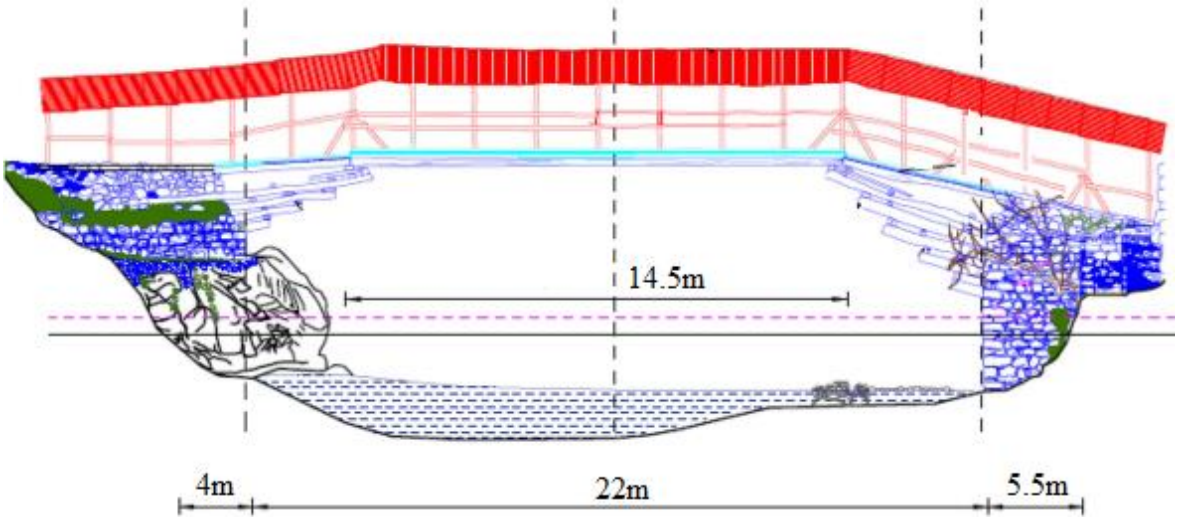
2.3.1.4. Tarihi Ahşap Buzlupınar Köprüsü

2.3.1.4.1. Model Geometrisi

Tarihi Ahşap Buzlupınar Köprüsü, Rize'nin Çayeli ilçesinde yer almakta olup, köprü, yaya, hayvan ve yük taşımacılığı amacıyla kullanılmaktadır. Köprü'nün ana uzunluğu ve genişliği sırasıyla 31,5m ve 2,20m'dir. Tarihi Ahşap Buzlupınar Köprüsü'ne ait görseller Şekil 2.55'te ve model geometrisi Şekil 2.56'da gösterilmiştir.



Şekil 2.55. Tarihi Ahşap Buzlupınar Köprüsü'ne ait genel görseller



Şekil 2.56. Tarihi Ahşap Buzlupınar Köprüsü'ne ait geometrik bilgiler

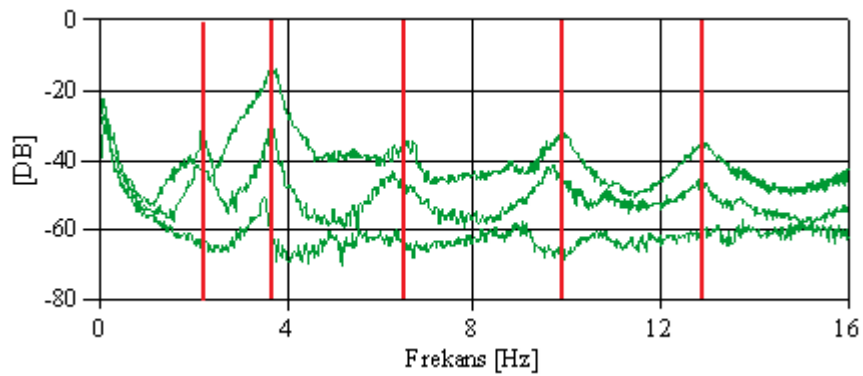
2.3.1.4.2. Çevresel Titreşim Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilerek Karşılaştırılması

Tarihi Ahşap Buzlupınar Köprüsü'ne ait frekans, mod şekilleri ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristiklerin elde edilmesi için Çevresel Titreşim Yöntemi kullanılmıştır. Çalışma kapsamında 12 adet B&K 4506 tipi ivmeölçer kullanılmış olup, ivmeölçerlere ait

yerleşim planları Şekil 2.57’de verilmektedir. Köprüde 0-25Hz aralığında 15’er dakikalık ölçümler alınmıştır. Elde edilen ham sinyaller GFTAA yöntemine göre işlenerek Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarından hesaplanan spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri Şekil 2.58’de, SAB yöntemine göre elde edilen kararlılık diyagramı Şekil 2.59’da gösterilmiştir. Her iki yazılımdan elde edilen mod şekilleri aynı olup mod şekillerine ait görsel Şekil 2.60’ta elde edilen frekans değerleri ise Tablo 2.12’de gösterilmektedir. Tablo 2.12’den görüldüğü üzere, GFTAA ve SAB yöntemlerine göre ilk dört frekans değeri Dynamic Modal yazılımı için sırasıyla 2,21-12,81Hz ve 3,71-12,72 aralığında, OMA (2006) yazılımı için se sırasıyla 0,89-12,88Hz ve 3,69-12,68Hz aralığında elde edilmiştir. Ayrıca OMA (2006) yazılımında SAB yöntemine göre birinci frekansın elde edilemediği görülmüştür. GFTAA ve SAB yöntemlerinden elde edilen frekans değerleri arasındaki maksimum farklar sırasıyla %1,37 ve %0,54 olarak elde edilmiştir.



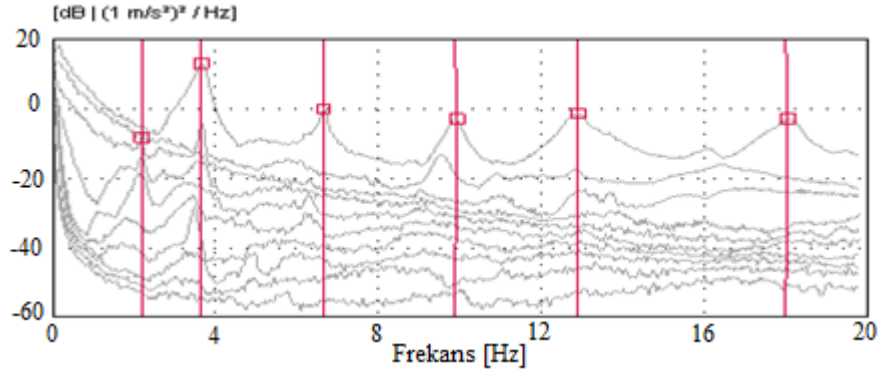
Şekil 2.57. Tarihi Ahşap Buzlupınar Köprüsü’ne ait ivmeölçer yerleşim planı



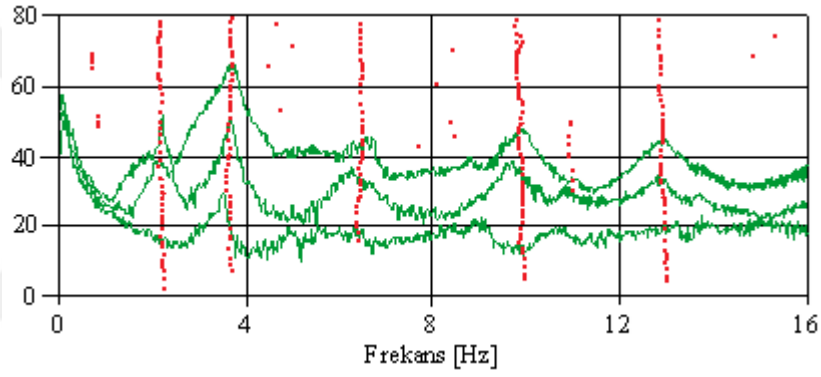
(a) Dynamic Modal yazılımı

Şekil 2.58. Tarihi Ahşap Buzlupınar Köprüsü’ne ait Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarından elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

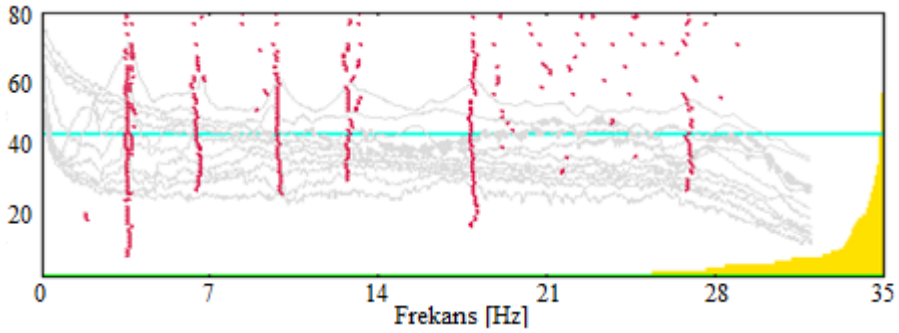
Şekil 2.58'in devamı



(b) OMA (2006) yazılımı

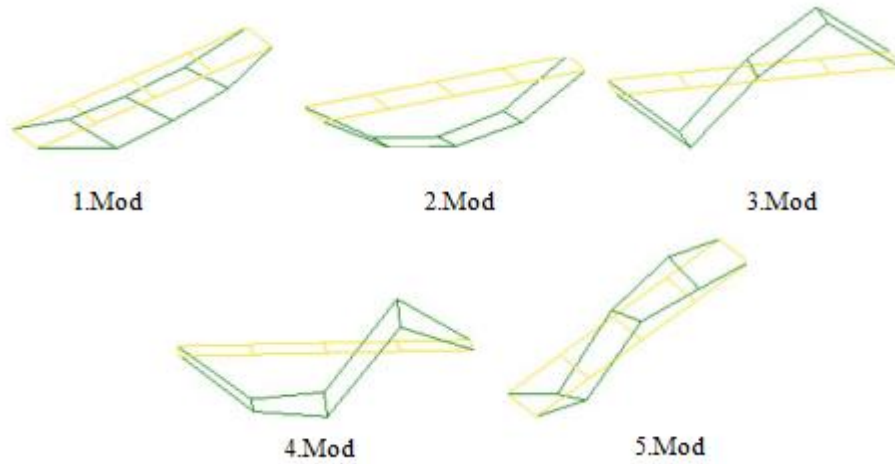


(a) Dynamic Modal yazılımı



(b) OMA (2006) yazılımı

Şekil 2.59. Tarihi Ahşap Buzlupınar Köprüsü'ne ait Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarından elde edilen kararlılık diyagramı



Şekil 2.60. Tarihi Buzlupınar Köprüsü'ne ait deneysel ölçümlerden elde edilen mod şekilleri

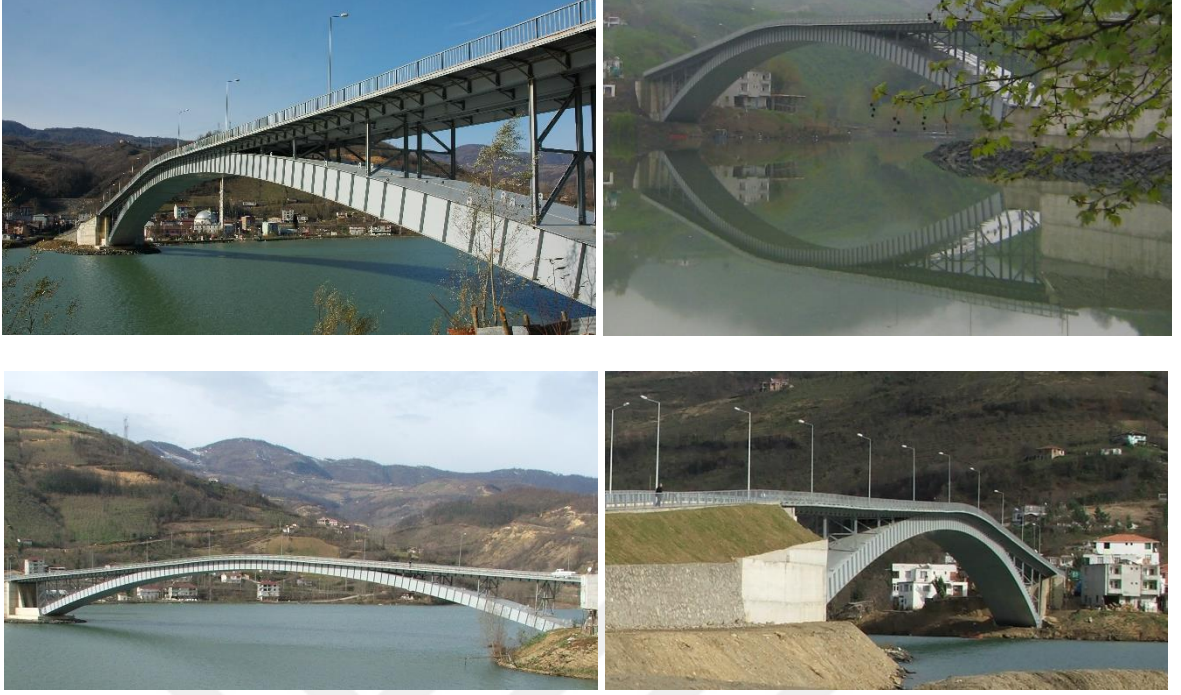
Tablo 2.12. Tarihi Buzlupınar Köprüsü'ne ait deneysel ölçümlerden elde edilen frekansların karşılaştırılması

Mode No	GFTAA			SAB		
	Dynamic Modal	Fark (%)	OMA (2006)	Dynamic Modal	Fark (%)	OMA (2006)
1	2,21	0,89	2,23	2,25	-	-
2	3,70	1,37	3,65	3,71	0,54	3,69
3	6,63	0,60	6,67	6,50	0,31	6,52
4	9,84	0,30	9,87	9,90	0,30	9,87
5	12,81	0,54	12,88	12,72	0,32	12,68

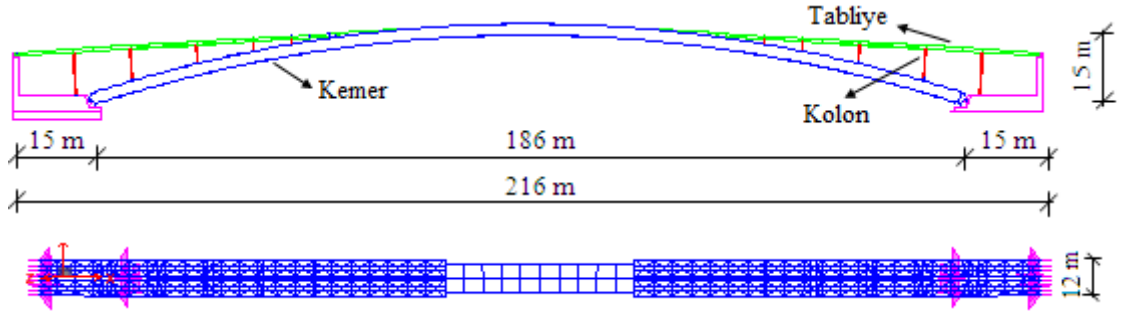
2.3.1.5. Eynel Köprüsü

2.3.1.5.1. Model Geometrisi

Eynel Köprüsü, Samsun'un Ayvacık ilçesinde bulunmakta olup çelik taşıyıcı sisteme sahip bir karayolu köprüsüdür. Köprünün genişliği ve toplam uzunluğu sırasıyla 12m ve 216m'dir. Köprüye ait genel görseller ve geometrik bilgiler sırasıyla Şekil 2.61 ve Şekil 2.62'de gösterilmiştir.



Şekil 2.61. Eynel Köprüsü'ne ait genel görseller



Şekil 2.62. Eynel Köprüsü'ne ait geometrik bilgiler

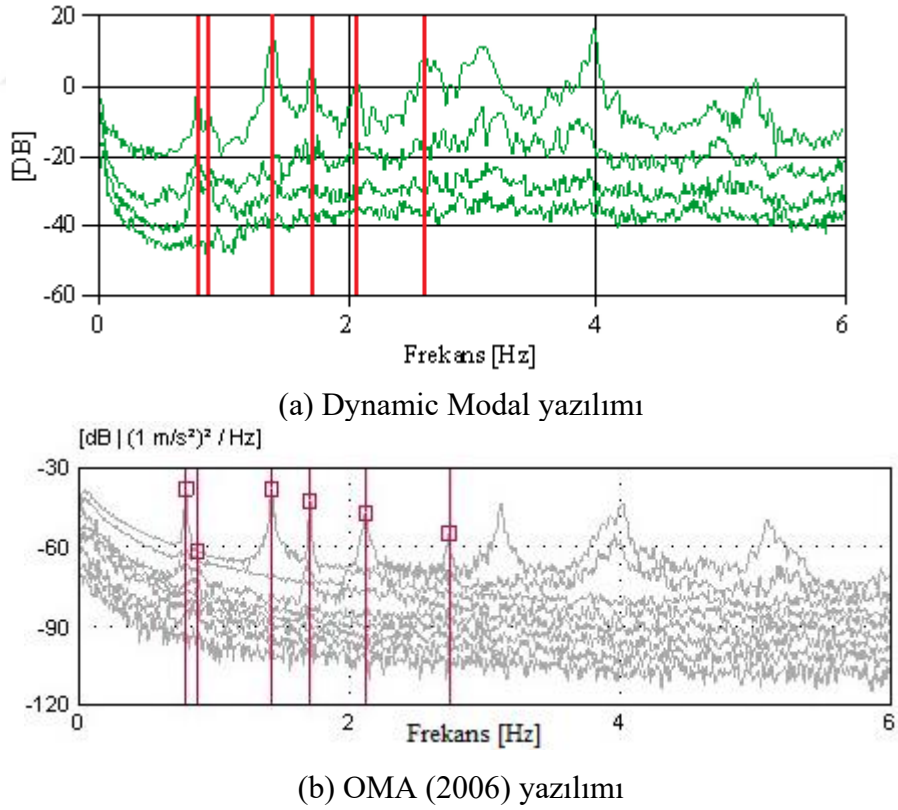
2.3.1.5.2. Çevresel Titreşim Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilerek Karşılaştırılması

Eynel Köprüsü'ne ait frekans, mod şekilleri ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristikleri elde etmek için Çevresel Titreşim Yöntemi kullanılmıştır. Çalışma kapsamında 8 adet B&K 8340 tipi ivmeölçer kullanılmış olup, ivmeölçerlere ait yerleşim planı Şekil 2.63'te gösterilmiştir. 0-6,25Hz aralığında 15'er dakikalık referanslı ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ham sinyaller GFTAA yöntemine göre işlenerek Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarından elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri Şekil 2.64'te, SAB yöntemine göre elde edilen kararlılık diyagramı Şekil 2.65'te

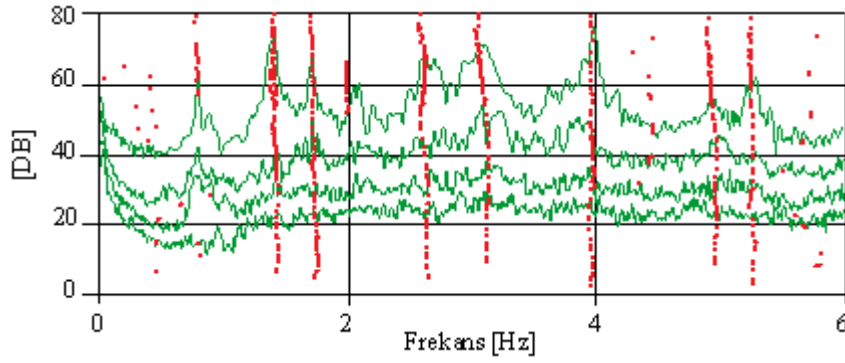
verilmektedir. Her iki yazılımdan elde edilen mod şekilleri aynı olup mod şekillerine ait görseller Şekil 2.66’da elde edilen frekans değerleri ise Tablo 2.13’te verilmiştir.



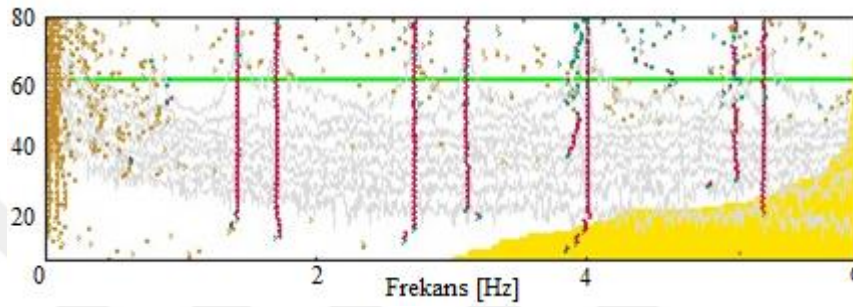
Şekil 2.63. Eynel Köprüsü’ne ait ivmeölçer yerleşim planı



Şekil 2.64. Eynel Köprüsü’ne ait Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarından elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

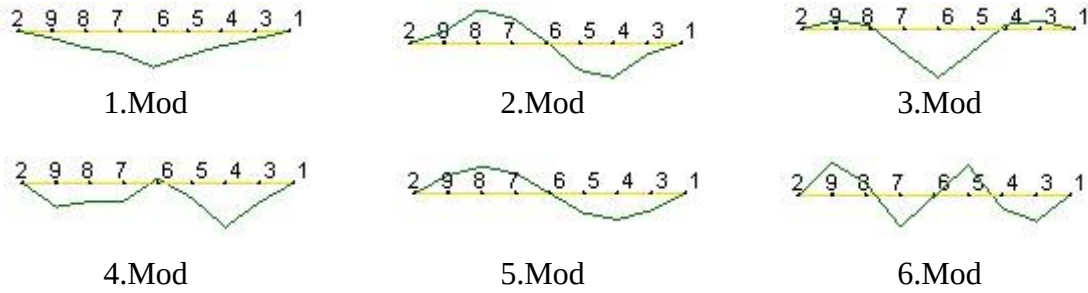


(a) Dynamic Modal yazılımı



(b) OMA (2006) yazılımı

Şekil 2.65. Eynel Köprüsü'ne ait Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarından elde edilen kararlılık diyagramı



Şekil 2.66. Eynel Köprüsü'ne ait deneysel ölçümlerden elde edilen mod şekilleri

Tablo 2.13'ten görüldüğü üzere, Eynel Köprüsü'ne ait GFTAA ve SAB yöntemlerine göre ilk altı frekans değeri Dynamic Modal yazılımı için sırasıyla 0,81-2,69Hz ve 0,80-2,70Hz aralığında, OMA (2006) yazılımı için ise sırasıyla 0,80-2,74Hz ve 0,80-2,74Hz aralığında elde edilmiştir. Her iki yazılımda da SAB yöntemine göre ikinci frekans değerleri elde edilememiştir. Ayrıca, GFTAA ve SAB yöntemlerinden elde edilen frekanslar arasındaki maksimum farkların sırasıyla %1,82 ve %1,46 olduğu görülmüştür.

Tablo 2.13. Eynel Köprüsü'ne ait deneysel ölçümlerden elde edilen frekansların karşılaştırılması

Mod Numarası	GFTAA			SAB		
	Dynamic Modal	<i>Fark (%)</i>	OMA (2006)	Dynamic Modal	<i>Fark (%)</i>	OMA (2006)
1	0,81	1,25	0,80	0,80	0	0,80
2	0,87	1,14	0,88	-	-	-
3	1,44	0,70	1,43	1,43	0,70	1,42
4	1,70	1,16	1,72	1,72	0,58	1,73
5	2,15	1,42	2,12	1,94	1,04	1,92
6	2,69	1,82	2,74	2,70	1,46	2,74

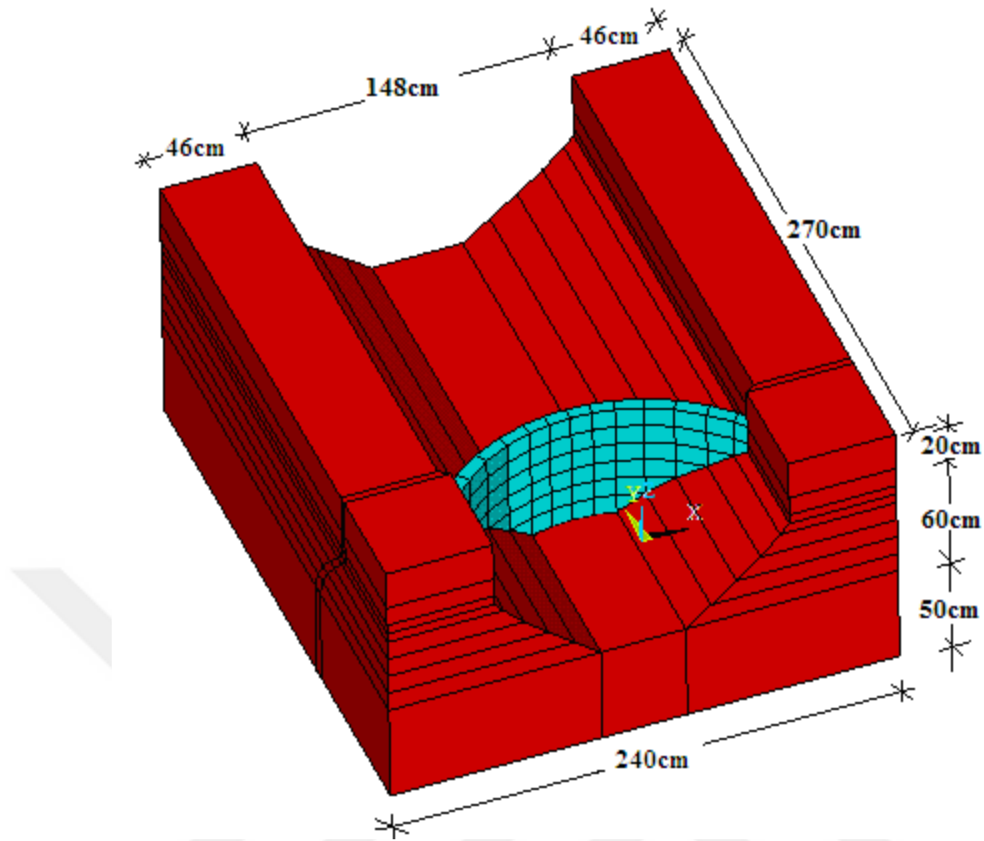
2.3.2. Dynamic Update Yazılımı için Yapılan Çalışmalar

2.3.2.1. Laboratuvar Baraj Modeli

Sevim (2010) tarafından hazırlanan doktora tezi kapsamında, laboratuvar baraj modeli oluşturulmuştur. Sevim vd. (2012), Altunışık vd. (2015) tarafından yapılan çalışmalarda baraj modeline hasar verilerek dinamik karakteristiklerdeki değişimler incelenmiştir. Bu tez kapsamında hazırlanan Dynamic Update yazılımı kullanılarak hasar verilmiş laboratuvar modelinin Otomatik Sonlu Eleman Model Güncellenmesi ile hasar bölgeleri ve şiddetlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2.3.2.2. Model Geometrisi

Sevim (2010) doktora tezi çalışması kapsamında, laboratuvar baraj modelini Tip-1 kemer barajına ait parametrelere göre hesaplamış olup, baraj modeline ait yükseklik 60cm, kret ve taban genişliği 6cm, barajın kret uzunluğu, memba kısmında 171,13cm ve mansap kısmında 160,03cm olarak belirlemiştir. Bu özelliklere sahip laboratuvar kemer barajına ait geometrik bilgiler Şekil 2.67'de, laboratuvar baraj modeline ait bazı fotoğraflar Şekil 2.68'de verilmektedir.



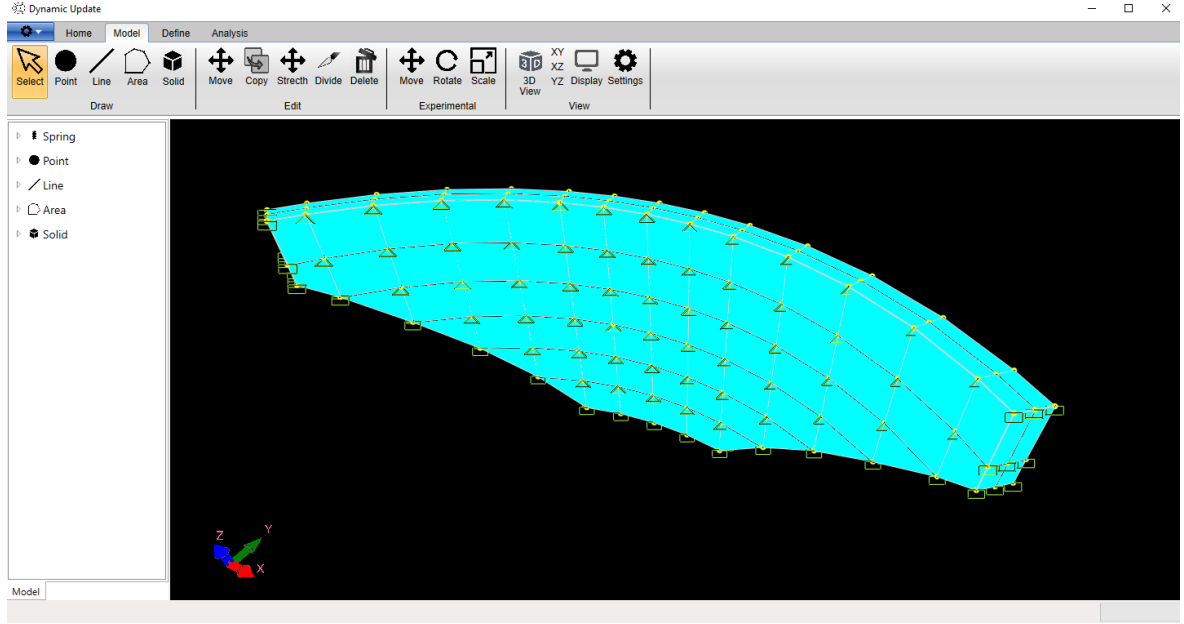
Şekil 2.67. Laboratuvar baraj modeline ait geometrik bilgiler (Sevim, 2010)



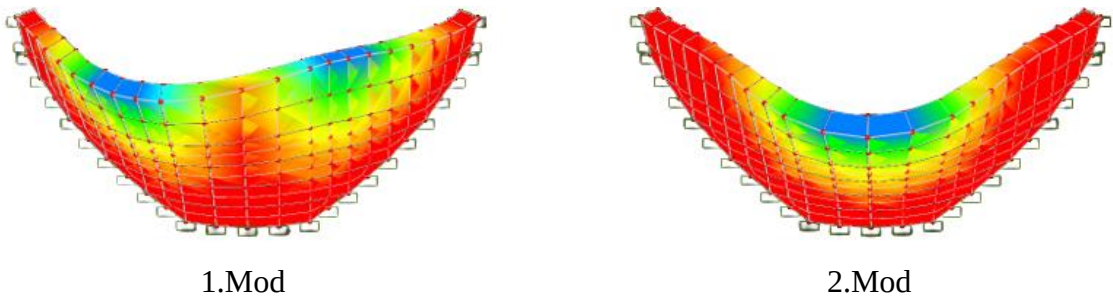
Şekil 2.68. Laboratuvar baraj modeline ait bazı fotoğraflar (Sevim, 2010)

2.3.2.3. Sonlu Eleman Yöntemiyle Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Laboratuvar baraj modelinin sonlu eleman modeli, Sevim (2010) tarafından hazırlanmış olup bu tez kapsamında kullanılmıştır. ANSYS programında hazırlanan barajın sonlu eleman modeli CDB uzantılı dosya ile Dynamic Update yazılımına aktarılmıştır. Dynamic Update yazılımına aktarılan sonlu eleman modele ait görsel Şekil 2.69’da verilmektedir. Beton malzemesi 15000MPa olarak dikkate alınmıştır Sevim (2010). Ayrıca, Dynamic Update yazılımında gerçekleştirilen Modal Analiz sonucunda elde edilen frekans değerleri ve mod şekillerinin Sevim (2010)’un tezinde verilen deneysel sonuçlar ile benzer olduğu görülmüştür. İlgili frekanslara ait mod şekilleri Şekil 2.70’te, frekans değerleri ise Tablo 2.14’te gösterilmiştir.

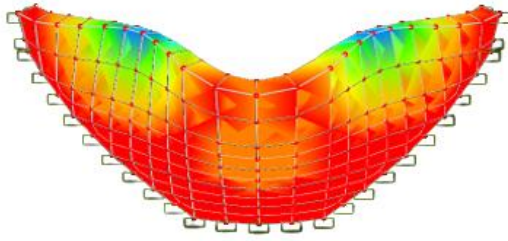


Şekil 2.69. Dynamic Update yazılımına aktarılan laboratuvar baraj modeline ait görsel

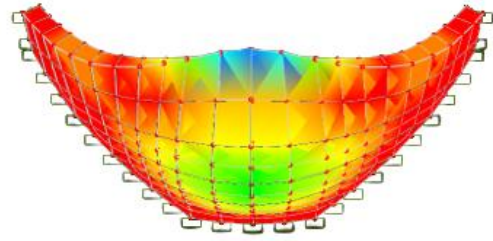


Şekil 2.70 Dynamic Update yazılımına aktarılan laboratuvar baraj modeline ait mod şekilleri

Şekil 2.70'in devamı



3.Mod



4.Mod

Tablo 2.14. Dynamic Update yazılımından elde edilen frekanslar ile Çevresel Titreşim Yönteminden elde edilen frekansların (Sevim, 2010) karşılaştırılması

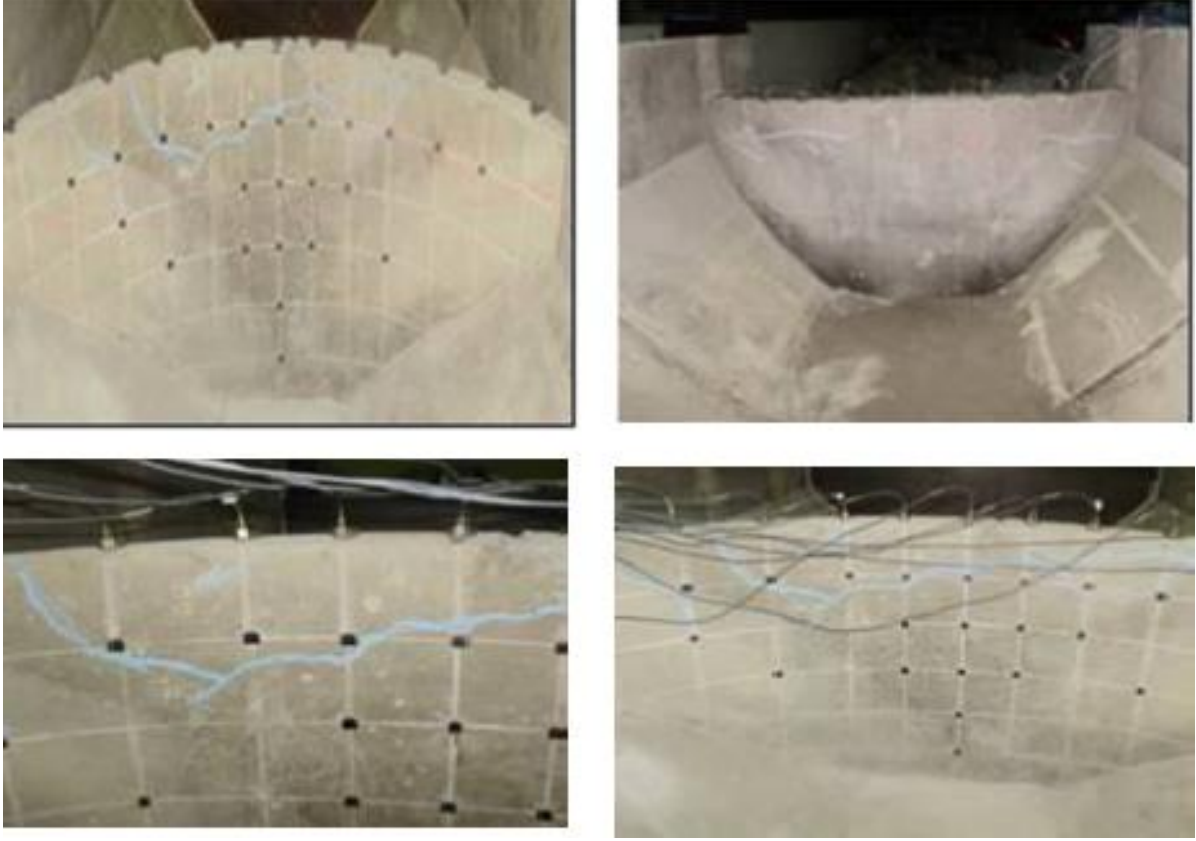
Mod	Dynamic Update	Fark (%)	Çevresel Titreşim Yöntemi
1	331,15	2,37	339,20
2	368,51	1,10	372,60
3	558,40	1,10	552,30
4	602,24	2,83	619,80

Tablo 2.14'te görüldüğü gibi, laboratuvar barajına ait ilk dört frekans değeri Dynamic Update yazılımında 328,15-602,24Hz iken Sevim (2010) tarafından Çevresel Titreşim Yöntemi ile elde edilen frekans değerleri 339,2-619,8Hz aralığındadır. Ayrıca, sonlu eleman model ile deneysel olarak elde edilen frekans değerleri arasındaki farklılıklar maksimum %2,83 olarak elde edilmiştir.

2.3.2.4. Çevresel Titreşim Yöntemiyle Hasarlı Modele Ait Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Altunışık vd. (2014) tarafından hazırlanan çalışma kapsamında, laboratuvar baraj modeline farklı bölgelerde ağır hasarlar verilmiş ve hasarlı modele ait deneysel ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Tez çalışması kapsamında Altunışık vd. (2014) tarafından 2014 yılında yapılan çalışmadaki hasarlı modelden elde edilen dinamik karakteristikler kullanılmıştır. Çalışmadaki hasarlı modele ait genel görünüş Şekil 2.71'de verilmiştir.

Hasarlı ve hasarsız olarak elde edilen frekans değerlerine ait karşılaştırma Tablo 2.15'te yapılmıştır.



Şekil 2.71. Hasarlı laboratuvar modeline ait genel görseller (Altunışık vd. 2014)

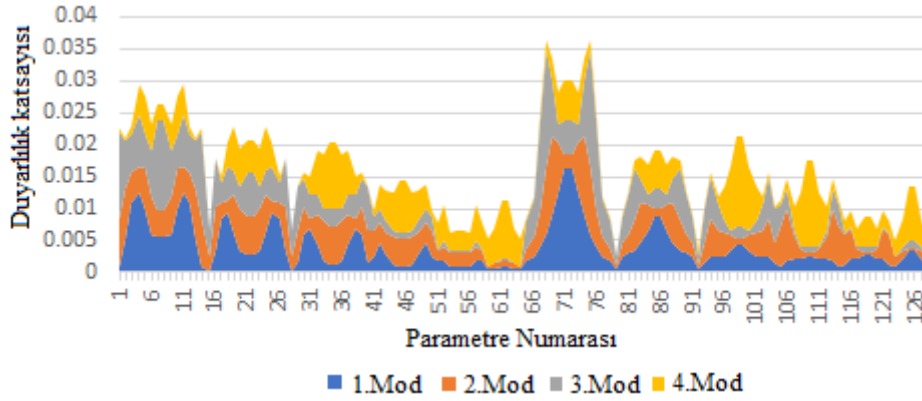
Tablo 2.15. Hasarsız ve hasarlı laboratuvar modellerinin Çevresel Titreşim Yöntemi ile elde edilen frekansların karşılaştırılması (Sevim, 2010; Altunışık vd. 2014)

Mod Numarası	Hasarsız model	Fark (%)	Hasarlı model
1	339,20	55,34	151,50
2	372,60	52,20	178,00
3	552,30	55,11	247,90
4	619,80	50,65	305,90

Tablo 2.15'te görüldüğü üzere hasarlı modele ait ilk dört frekans değeri 151,50-305,90Hz aralığında elde edilmiştir. Ayrıca hasarsız ve hasarlı modellere ait frekanslar arasındaki farklılıkların maksimum %55,34 olarak elde edildiği görülmüştür.

2.3.2.5. Otomatik Sonlu Eleman Model Güncellemesi

Hasarlı laboratuvar modeline ait sonlu eleman modelinin Duyarlılığa bağlı Bayes Parametre Tahmin yapılmadan önce, laboratuvar modeline ait muhtemel belirsiz parametrelerin üst ve alt sınır değerleri belirlenmiştir. Laboratuvar baraj modeli laboratuvar ortamında üretildiği için sadece kemer gövdesine ait elastisite modülü belirsiz parametre olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca katı model olarak oluşturulan sonlu eleman modelde rijitlik matrisini etkileyen tek parametre malzeme özelliğidir. Hasar bölgelerinin belirlenebilmesi için parametre özelliği lokal olarak seçildiği için 128 adet parametre değeri yazılım tarafından elde edilmiştir. Ayrıca, parametrelere ait alt ve üst değerleriyle -70% ve 10% seçilmiştir. Belirsiz parametrelere ait Duyarlılık Analizi sonucu elde edilen grafik Şekil 2.72’de gösterilmiştir.



Şekil 2.72. Laboratuvar baraj modelinde belirsiz parametrelere ait Duyarlılık Analizi sonuçları

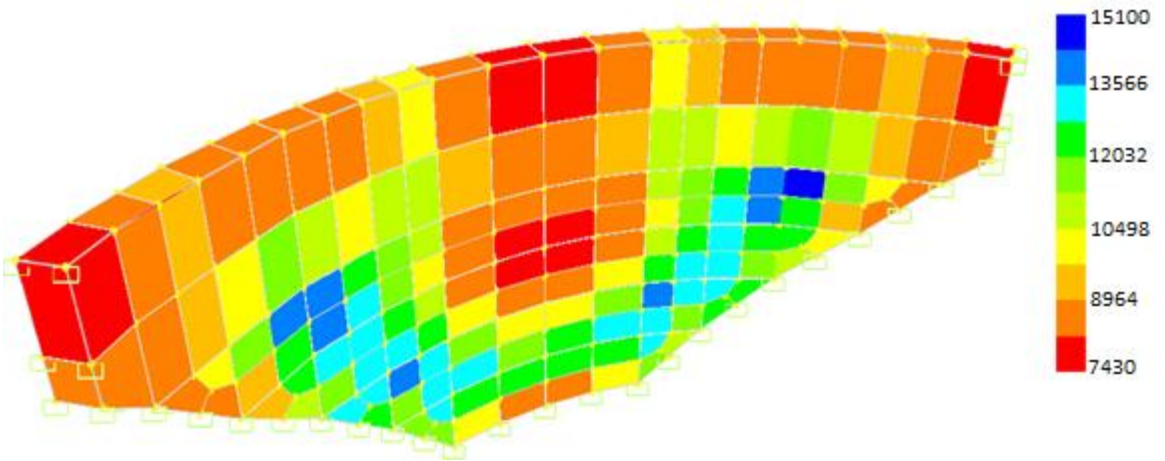
Hasarlı laboratuvar baraj modeline ait deneysel ölçümler referans alınarak duyarlılığa bağlı Bayes Parametre Tahmin Yöntemi ile otomatik Sonlu Eleman Model Güncellemesi yapılmıştır. Sonlu eleman model güncellemesi sonucunda elde edilen frekanslarla deneysel olarak elde edilen frekansların karşılaştırılması Tablo 2.16’da yapılmaktadır. Tablo 2.16 incelendiğinde, güncellenen sonlu eleman model ile deneysel model arasındaki frekans farklılıklarının maksimum $0,61\%$ olduğu ve MAC değerlerinin yüksek olmasından dolayı mod şekillerinin de uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Laboratuvar baraj modeline ait güncellenen sonlu eleman modeldeki elastisite modülü değişimi Şekil 2.73’te gösterilmektedir. Şekil 2.73’te görüldüğü üzere laboratuvar baraj

modeline ait elastisite modülleri 7430MPa ile 15100MPa arasında değişmekle beraber değişimlerin çoğunluğu Şekil 2.71’de gösterilen kret ve gövde hasarlarıyla uyumlu bir şekilde elde edildiği görülmektedir.

Tablo 2.16. Laboratuvar modeline ait otomatik Sonlu Eleman Model Güncelleme ile Dynamic Update yazılımından elde edilen frekansların karşılaştırılması

Mod	Dynamic Update	Fark (%)	Hasarlı model	MAC (%)
1	155,42	0.61	151,50	95.72
2	174,47	0.30	178,00	93.45
3	245,84	0.83	247,90	98.12
4	300,10	0.39	305,90	90.35



Şekil 2.73. Laboratuvar baraj modelinde otomatik Sonlu Eleman Model Güncelleme ile elde edilen elastisite modülündeki değişim dağılımları

2.3.3. Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformu İçin Yapılan Çalışmalar

2.3.3.1. Z24 Köprüsü

Z24 Köprü testleri, European Brite EuRAM desteğiyle “System Identification to Monitor Civil Engineering Structures” isimli proje kapsamında titreşime dayalı Yapı Sağlığı İzleme için tam ölçekli, uzun süreli ve aşamalı hasarları içeren kapsamlı araştırma veri

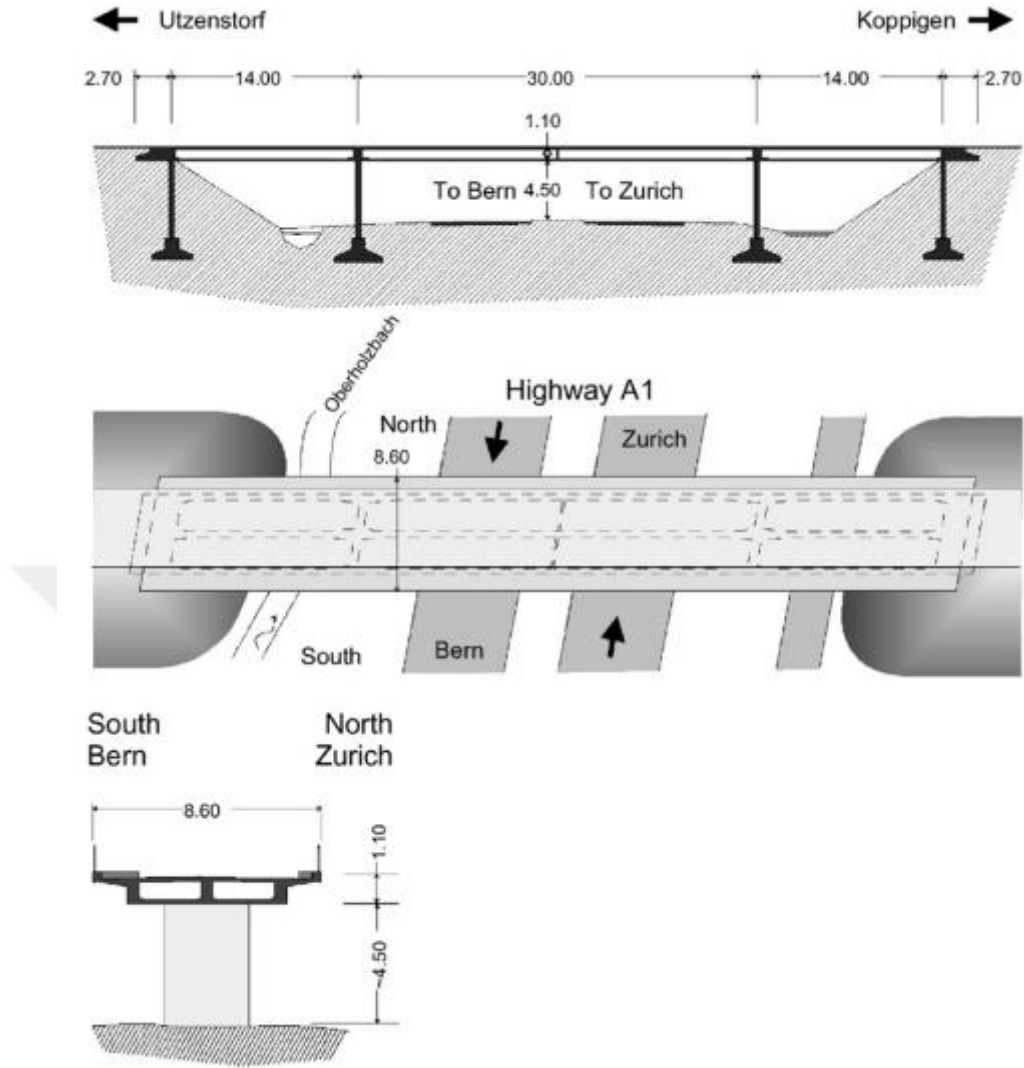
setlerini içermektedir (Roeck, 2003). 1963 yılında inşa edilen köprü, 1998 yılı sonunda otoyola bitişik daha geniş kenar açıklığına sahip yeni köprü yapılmasıyla yıkılmıştır. Araştırma kapsamında köprü yıkılmadan önce 1 yıl boyunca titreşime dayalı sistemler ile sürekli olarak izlenmiş ve köprünün çeşitli bölgelerinde hasarlar oluşturularak testler gerçekleştirilmiştir. Köprüden elde edilen veri setleri literatürde birçok doğrulama çalışmalarında kullanılmıştır. Z24 Köprüsü'ne ait daha fazla bilgi Maech ve Roeck (2003) ve Reynders ve Roeck (2015)'ten bulunabilir. Tez çalışması kapsamında Z24 Köprüsü veri setleri kullanılarak geliştirilen metodolojilerin doğrulama çalışmaları yapılmıştır.

2.3.3.1.1. Geometri Özellikleri

Z24 Köprüsü, İsviçre'nin Bern Kantonu'nda bulunmaktadır. Öngermeli prekast köprü, iki şerit ve üç açıklığına sahip olup toplam uzunluğu 58m'dir. Z24 köprüsüne ait genel ve kesit görüşleri sırasıyla Şekil 2.74 ve Şekil 2.75'te verilmiştir.



Şekil 2.74. Z24 Köprüsü'ne ait genel görüşler (Kramer vd., 2003)



Şekil 2.75. Z24 Köprüsü'ne ait kesit görünüşleri (Birimler metredir.) (Maech ve Roeck, 2003)

2.3.3.1.2. Hasar Senaryoları

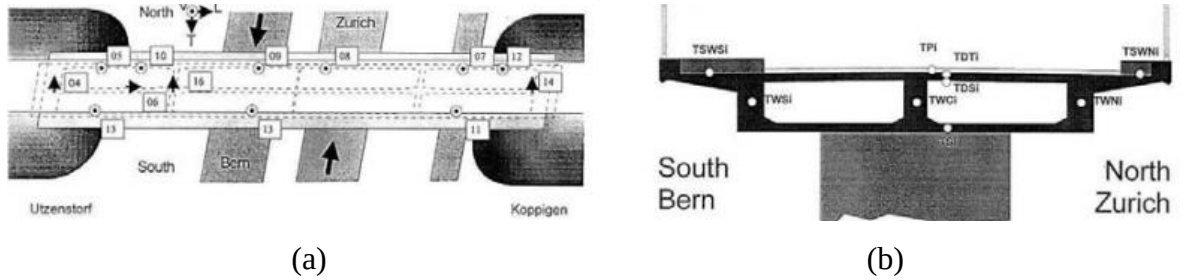
Z24 Köprüsü tamamen yıkılmadan kısa bir süre önce köprüde aşamalı hasar senaryoları gerçekleştirilmiştir. Köprüde mesnet çökmesi, mesnet dönmesi, betonarme kirişte kesit kayıpları ve plastik mafsallarda, öngerme halat başlığının kopması ve öngerme halatının kopması gibi farklı hasar senaryoları gerçekleştirilmiştir. Z24 Köprüsü'nde gerçekleştirilen hasar senaryoları ve bu senaryolara karşılık gelebilecek gerçek hasar durumları Tablo 2.17'de gösterilmiştir.

Tablo 2.17. Z24 Köprüsü'ne ait hasar senaryoları (Teughels ve Roeck,2004).

No	Senaryo adı	Gerçekte oluşabilecek hasar durumu
1	Mesnet çökmesi, 20mm	Lokal zemin çökmesi, erozyon
2	Mesnet çökmesi, 40mm	
3	Mesnet çökmesi, 80mm	
4	Mesnet çökmesi, 95mm	
5	Mesnet dönmesi	
6	Betonarme kirişte kesit kaybı, 12m ²	Araç çarpması, klorür, korozyon
7	Betonarme kirişte kesit kaybı, 24m ²	
8	Kolon ayağında heyelan	Şiddetli yağış, erozyon
9	Betonarme kirişte plastik mafsallı olması	Aşırı klorür, korozyon
10	Öngerme halat başlığı kopması, I	Korozyon, aşırı gerilme
11	Öngerme halat başlığı kopması, II	
12	Öngerme halat başlığı kopması, III	
13	Öngerme halat kopması, I	Hatalı enjeksiyon, klorür etkisi
14	Öngerme halat kopması, II	
15	Öngerme halat kopması, III	

2.3.3.1.3. Sensör Konfigürasyon Planı

Z24 Köprüsü'nde gerçekleştirilen testler kapsamında 16 adet ivmeölçer, 6 adet zemin sıcaklık ölçer, 3 kesitte toplam 24 adet kesitlere ait sıcaklık ölçer ve 1 adet hava sıcaklığı, nem oranı ve rüzgar hızını ölçmek için meteorolojik veri ölçer yerleştirilmiştir. Köprüye ait sensör yerleşimleri Şekil 2.76'da gösterilmiştir.



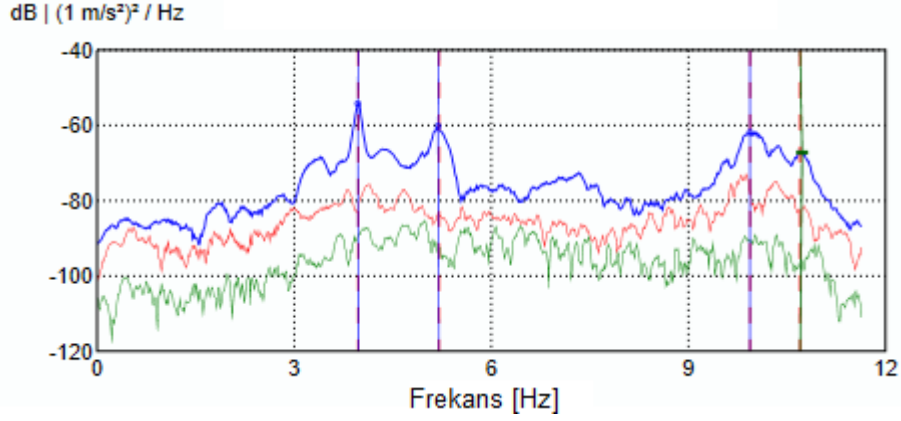
Şekil 2.76. Z24 Köprüsü'ne ait ivmeölçer yerleşim planı (a) ve sıcaklık ölçer sensör yerleşimleri (b) (Kramer vd.,1999)

2.3.3.1.4. Geliştirilen Metodoloji Kapsamında Dinamik Karakteristiklerin Otomatik Olarak Belirlenmesi

Z24 Köprüsü yıkılmadan önceki bir yıl boyunca köprüye yerleştirilen sensörler aracılığıyla sürekli izleme yapılmıştır. Bu kapsamda, ivmeölçer ve sıcaklık ölçerlerden elde edilen veri setleri paylaşılarak araştırmacılar önemli bir veri kaynağı oluşturulmuştur. Tez kapsamında, Z24 Köprüsü'ne yerleştirilen ivmeölçer verileri kullanılarak dinamik karakteristiklerin otomatik olarak belirlenmesi ile ilgili geliştirilen metodolojinin irdelenmesi ve elde edilen sonuçların literatür verileriyle karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Geliştirilen metodoloji kapsamında dinamik karakteristiklerin otomatik olarak belirlenmesi işlemi dört adımdan oluşmaktadır. Birinci adımda sensörlerden elde edilen ham sinyaller kullanılarak GFTAA yöntemine göre tekil değerler hesaplanmaktadır. İkinci adım, tekil değerlerin büyükten küçüğe doğru sıralanmasıyla frekans hakim aralığının belirlenmesi işlemidir. Üçüncü adımda filtreleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Filtreleme işleminin amacı dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde yapısal olmayan modların elemine edilmesini sağlamaktır. Dördüncü adımda filtrelenmiş veriler kullanılarak dinamik karakteristiklerde fazla mod seçimini engellemek ve yapısal modların uygun bir şekilde gruplandırılmasını sağlamak için referans dinamik karakteristiklerle karşılaştırma işlemi yapılmaktadır. Bu nedenle referans alınacak dinamik karakteristiklerin doğru bir şekilde belirlenmesi önem arz etmektedir.

Z24 Köprüsü'ne ait referans dinamik karakteristiklerin belirlenmesi işleminde, köprü sensörlerinden ilk kurulum aşamasında elde edilmiş rastgele bir ölçüm veri seti kullanılmıştır. Ölçüm veri setinin süresi 1 saat olup ölçüm frekans aralığı 0-100Hz aralığındadır. Referans dinamik karakteristiğin belirlenmesinde OMA (2023) yazılımı kullanılmıştır. Z24 Köprüsü'ne ait GFTAA yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri Şekil 2.77'de gösterilmektedir. Ayrıca elde edilen frekanslara ait değerler Reynders ve Roeck (2008) tarafından yapılan çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Tablo 2.18). Tablo 2.18'den görüldüğü üzere, Z24 Köprüsü'nde GFTAA yöntemi ile elde edilen frekanslar 3,97-10,70Hz arasında iken Reynders ve Roeck (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada 3,87-10,51Hz arasında elde edilmiştir. Ayrıca, frekanslar arasındaki fark maksimum %3,94 olarak elde edilmiştir. Frekanslar arasında elde edilen farklılıklar çok düşük olup, elde edilen bu frekans ve mod şekilleri referans olarak kullanılmıştır.



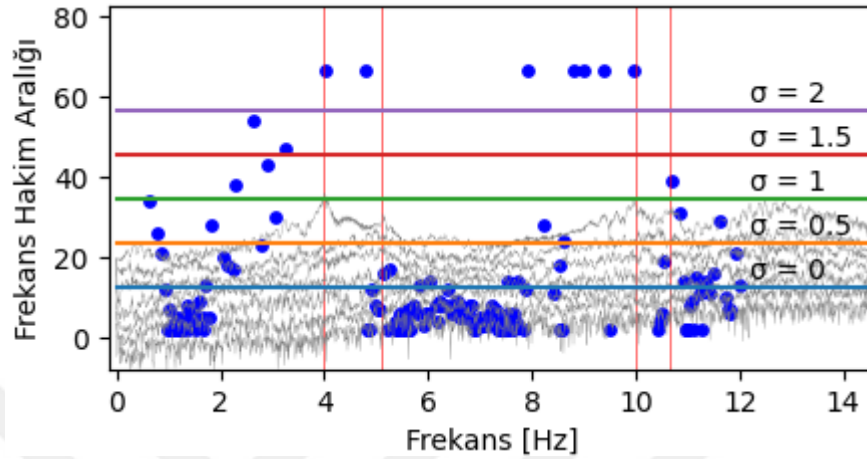
Şekil 2.77. Z24 Köprüsü'ne ait OMA (2023) yazılımından elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

Tablo 2.18. Z24 Köprüsü'nden elde edilen frekansların karşılaştırılması

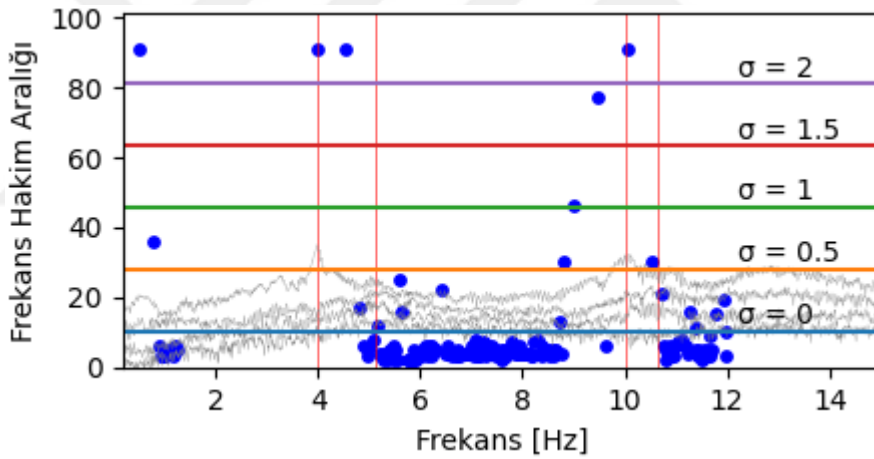
No	OMA (2023)	Fark (%)	Reynders ve Roeck (2008)
1	3,97	2,58	3,87
2	5,01	3,94	4,82
3	9,94	1,74	9,77
4	10,70	1,81	10,51

Geliştirilen metodoloji kapsamında GFTAA yönteminden elde edilen tekil değerlerin (birinci adım) kullanılmasıyla, ilgili tekil değerlere ait frekans hakim aralıkları (ikinci adım) hesaplanmaktadır. Ardından filtreleme işlemi (üçüncü adım) uygulanmaktadır. Filtreleme işlemi uygulanmadan önce eşik değerin belirlenmesi gerekmektedir. Eşik değer frekans hakim aralığı değerlerine ait standart sapma değeri olduğundan dolayı $[-3, 3]$ aralığında değişmektedir. Eşik değer yapıdan yapıya farklılık göstermekle birlikte $[0, 2]$ aralığında alınması tavsiye edilmektedir. Z24 Köprüsü'nde eşik değerin belirlenmesi için beş farklı ölçüm veri seti kullanılarak değerlendirme yapılmıştır. Beş ölçüme ait veri setinden elde edilen frekans hakim aralıkları ve karşılaştırmalı eşik değerlere ait grafikler Şekil 2.78'de gösterilmiştir. Şekil 2.78'de eşik değerinin belirlenmesi için Tablo 2.18'e göre referans alınan frekans değerlerinden düşey çizgiler çizilmiştir. Düşey çizgilerin kesiştiği mavi noktalar frekans hakim aralığı değerini ifade etmektedir. Düşey çizgi ile frekans hakim aralığı değerinin kesiştiği bölge hangi eşik değer çizgisinin üzerinde ise o değer eşik değer olarak dikkate alınır. Referans alınan frekanslara ait elde edilen eşik değerler Tablo 2.19'da

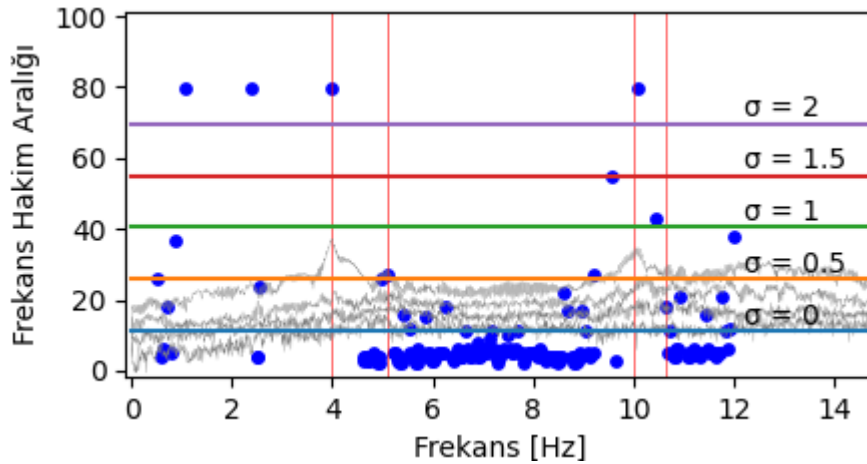
gösterilmiştir. Tablo 2.19’da, beş farklı ölçümden elde edilen eşik değerlerin minimum olanı eşik değeri olarak belirlenmiştir. Z24 köprüsünün dinamik karakteristiklerinin otomatik belirlenmesinde minimum eşik değeri sıfır olarak seçilmiştir.



(a)



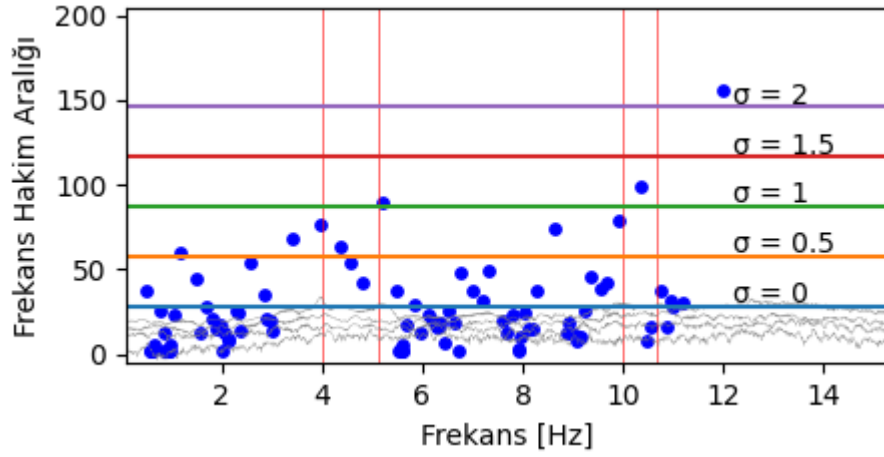
(b)



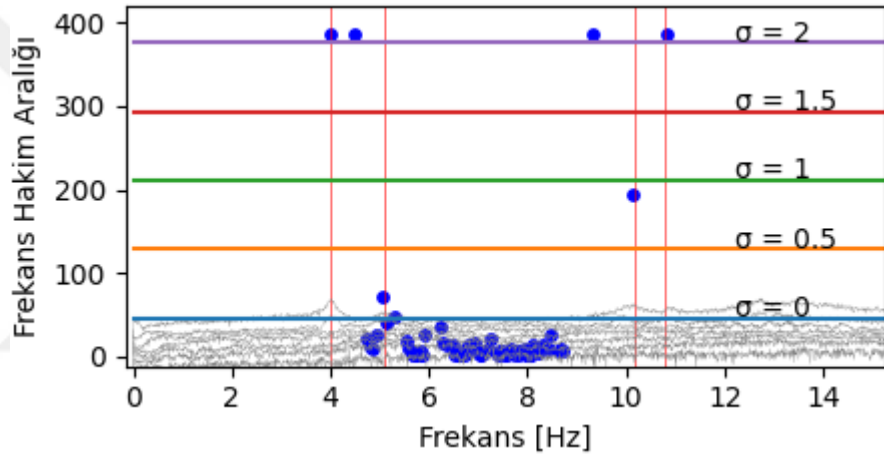
(c)

Şekil 2.78. Z24 Köprüsü’nde 1.ölçüm (a), 2.ölçüm (b), 3.ölçüm (c), 4.ölçüm (d) ve 5.ölçümden (e) elde edilen frekans hakim aralıkları ve eşik sınırları

Şekil 2.78'in devamı



(d)

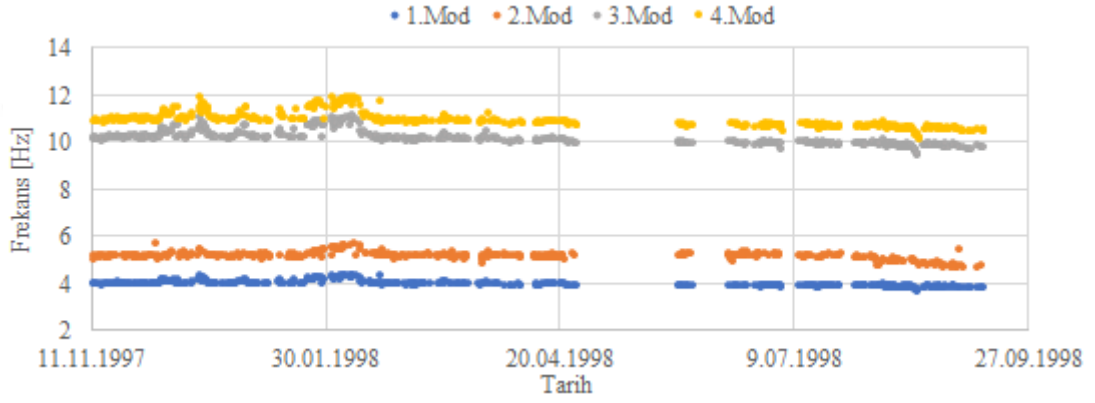


(e)

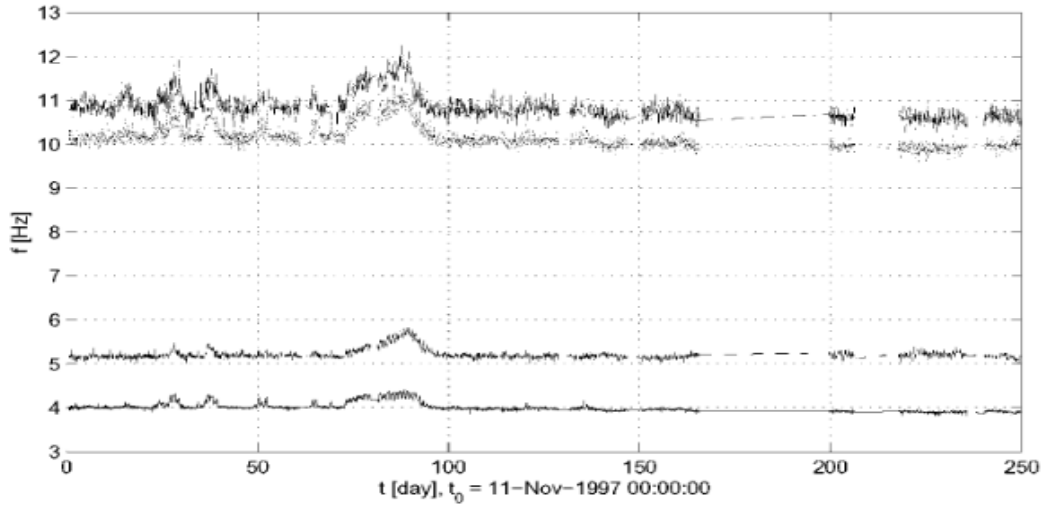
Tablo 2.19. Z24 Köprüsü'nde beş farklı ölçüm veri setinden elde edilen frekanslara karşılık gelen frekans güven aralığına ait minimum eşik değerleri

Ölçüm No	Minimum eşik değer				Seçilen (Minimum)
	1.Mod	2.Mod	3.Mod	4.Mod	
1	2	0	2	1	0
2	2	0	2	0,5	0
3	2	0,5	2	0	0
4	0,5	1	0,5	0	0
5	2	0	0,5	2	0

Geliştirilen metodoloji kapsamında elde edilen parametreler kullanılarak Z24 Köprüsü'ne ait bir yıllık dinamik karakteristik değerleri otomatik olarak belirlenmiştir. Geliştirilen metodoloji kapsamında elde edilen frekansların zamana göre değişimleri Şekil 2.79'da gösterilmiştir. Aynı zamanda, literatürde Z24 Köprüsü'nün bir yıllık frekanslara bağlı değişimleri Peeters ve Roeck (2001) tarafından elde edilmiştir. Elde edilen bu frekansların zamana bağlı değişim grafiği Şekil 2.80'de gösterilmiştir. Şekil 2.79 ve Şekil 2.80 incelendiğinde bir yıllık frekans verilerinin benzer eğilimde olduğu görülmüştür.



Şekil 2.79. Geliştirilen metodoloji kapsamında Z24 Köprüsü'ne ait elde edilen frekansların zamana göre değişimleri



Şekil 2.80. Z24 Köprüsü'ne ait Peeters ve Roeck (2001) tarafından elde edilen frekansların zamana bağlı değişimleri

2.3.3.1.5. Uzun Süreli Yapı Sağlığı İzleme Verilerinde Anormallik Tespiti

2.3.3.1.5.1. Dinamik Karakteristiklerin Bayes Sinir Ağları ile Güven Aralığının Belirlenmesi

Literatürde mühendislik yapılarının çevresel etkilerin (sıcaklık, kar, rüzgar, araç yükleri vb.) dinamik karakteristikler üzerindeki etkilerinin incelenmesi ile ilgili birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Peeters ve Roeck, 2001; Ni vd., 2009; Ding ve Li, 2011; Moser ve Moaveni, 2011; Nandan ve Singh, 2014; Soria vd., 2016; Jang vd., 2020; Diao vd. 2021). Z24 Köprüsü'nde çevresel etki olarak sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Ayrıca köprünün kullanım servis ömrü boyunca kar yükü, araç yükü etkileri söz konusu olmakta ve bu da frekanslar üzerinde belirsizliği arttırmaktadır. Tez çalışması kapsamında çevresel etki olarak sıcaklık sensörü parametresi kullanılmış ve içerisinde diğer belirsizliklerinde bulunduğu dinamik karakteristiklerin Bayes Sinir Ağları ile güven aralığı elde edilerek performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

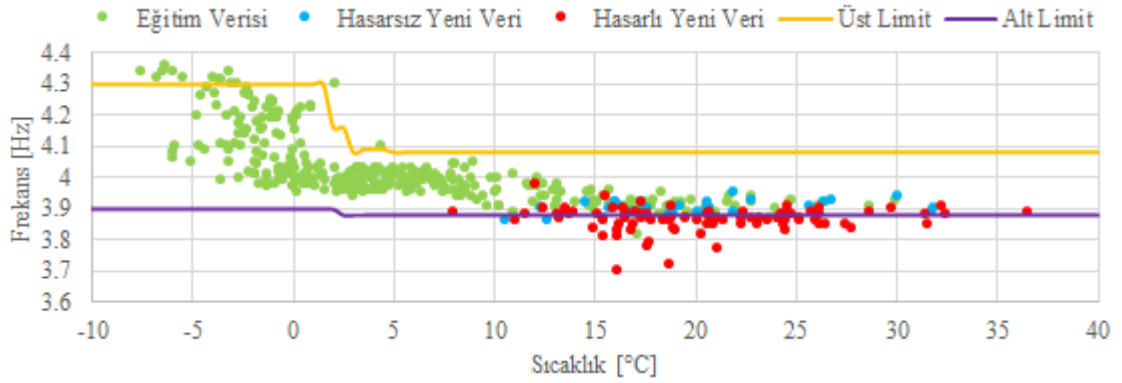
Bayes Sinir Ağlarında verilere ait eğitim veri seti sayısı ve katman sayısının belirlenmesi gerekmektedir. Köprünün bir yıllık frekans verilerinde 475 tane ölçüm verisi elde edilmiştir. Bu verilerin 11 Kasım 1997-11 Temmuz 1999 aralığına ait 340 tanesi Eğitim Verisi, 12 Temmuz 1998-4 Ağustos 1998 tarihleri arasındaki verileri Hasarsız Yeni Veri, 5 Ağustos 1998-11 Eylül 1998 tarihleri arasındaki veri Hasarlı Yeni Veri etiketi ile gruplandırılmıştır. Eğitim Verisi yapay sinir ağı modelinin eğitilmesinde, Hasarsız ve Hasarlı Yeni Veri etiketleri ise eğilen sinir ağının verimliliğinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Yapay sinir ağı modelinde modelin optimum sonuç vermesini sağlayan en önemli özellik katman sayısı ve katmanlarda kullanılacak nöron sayısıdır. Katman ve katmanlarda kullanılacak nöronların sayısı kullanıcı tarafından deneme-yanılma yoluyla belirlenmektedir. Yapay sinir ağının eğitilmesinde katman sayısının artması daha hassas sonuçlar vermektedir. Fakat belirli bir değerden sonra sonuçlar değişmemekle birlikte bilgisayarda gerçekleştirilen işlem sayısının da artmasına neden olmaktadır. Z24 Köprüsü'nde giriş parametresi olarak sıcaklık değeri, çıktı olarak frekans değeri kullanılmıştır. Bu parametreler kullanılarak köprüye ait Bayes Sinir Ağı modelinin eğitilmesi için çeşitli katman sayılarından oluşan modellerin testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerin doğrulanmasında kök ortalama karesel hata değeri (RMSE) kullanılmıştır. Farklı katman sayılarına ait elde edilen kök ortalama karesel hata (RMSE) değerleri Tablo 2.20'de gösterilmiştir. Tablo 2.20'de görüldüğü üzere seçilen ilk üç katmanda katman sayısı arttıkça

eğitim modelinde oluşan hata değeri azalmasına rağmen dört katmanlı sistem sonuçlarında önemli değişiklik gözlenmemiştir. Bu nedenle model eğitilmesinde 16x16x8 olacak şekilde üç katmanlı Bayes Sinir Ağı modeli tasarlanmıştır.

Tablo 2.20. Z24 Köprüsü'nde Bayes Sinir Ağı model eğitiminde çeşitli katman sayılarından elde edilen kök ortalama karesel hata

Mod	Katman sayısı				
	3	3x3	8x8	16x16x8	16x16x8x8
1	0,922	0,321	0,247	0,153	0,185
2	1,243	0,303	0,285	0,137	0,145
3	1,906	0,922	0,715	0,411	0,448
4	7,854	0,498	0,529	0,458	0,504

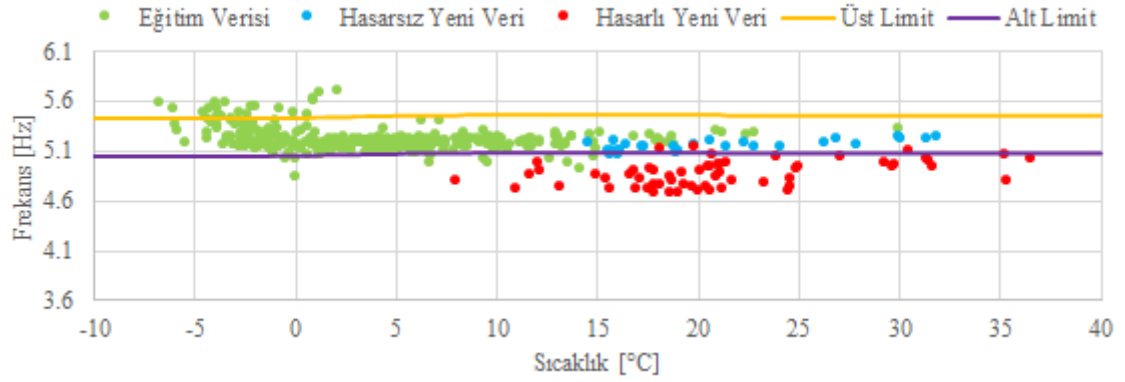
Oluşturulan Bayes Sinir Ağı modelinde eğitim verisi kullanılarak çevresel etkilerden kaynaklı belirsizliklerde dahil olmak üzere ilk dört frekansa ait sıcaklığa bağlı frekans değerlerinin üst ve alt limitleri belirlenmiştir. Köprü'nün ilk dört frekansına ait üst ve alt limitler ile eğitim verisi, hasarsız yeni veri, hasarlı yeni veri gruplarına ait karşılaştırmalı grafikler Şekil 2.81'de gösterilmiştir. Şekil 2.81 incelendiğinde eğitim verisinin büyük bir bölümünün üst ve alt limitler içerisinde kaldığı, hasarsız yeni verinin de üst ve alt limitler arasında kaldığı, ancak hasarlı yeni verinin alt limit sınırlarını aştığı görülmektedir. Bu durum elde edilen güven aralığının hasar durumunda aşıldığını ve böylece belirlenen güven aralığının uygun olduğunu göstermektedir.



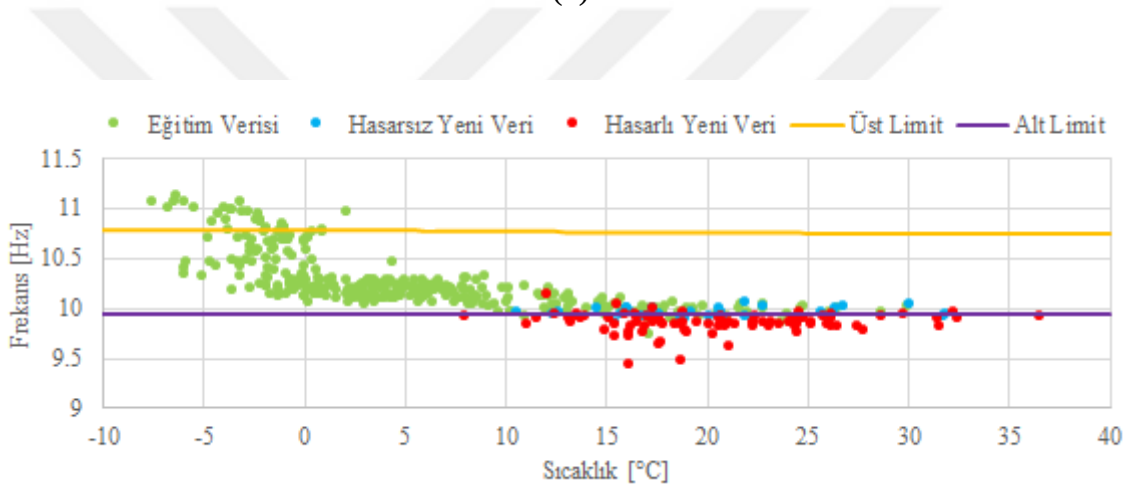
(a)

Şekil 2.81. Z24 Köprüsü'nde 1. Mod (a), 2.Mod (b), 3.Mod (c) ve 4.Mod (d) ait Bayes Sinir Ağı modeli ile elde edilen güven aralığının farklı hasar durumlarına ait grafik

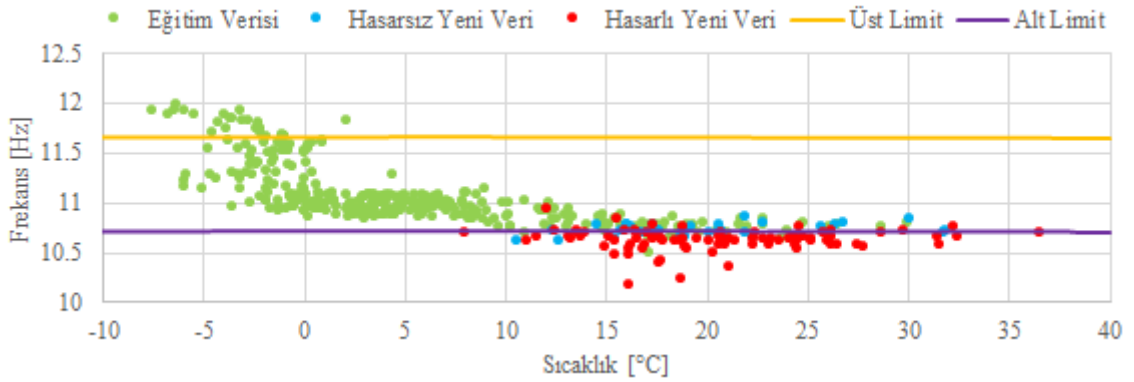
Şekil 2.81'in devamı



(b)



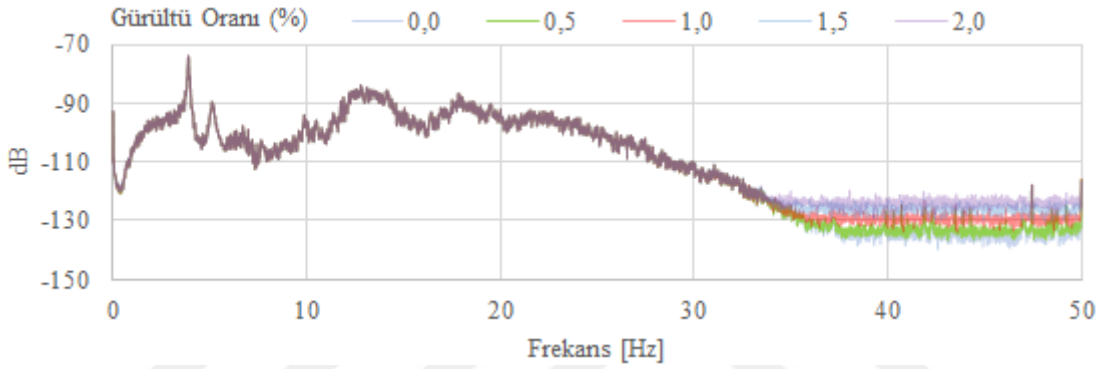
(c)



(d)

2.3.3.1.5.2. Geliştirilen Otokodlayıcı Tabanlı Metodoloji ile Anormallik Tespiti

Bu kısımda, Geliştirilen Otokodlayıcı Tabanlı Anormallik Tespit Sisteminin performansının belirlenmesi için Z24 Köprüsü'ndeki ivmeölçer sensörlerinden elde edilen ham sinyallerin farklı gürültü oranları (%0, %0,5, %1, %1,5, %2,0) altında testlerinin yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla köprüden farklı gürültü oranları ile elde edilen ham sinyallere ait GFTAA yöntemin birinci tekil değerleri hesaplanmıştır. Farklı gürültü oranları altında elde edilen tekil değerlere ait örnek bir ölçüm grafiği Şekil 2.82'de gösterilmiştir.

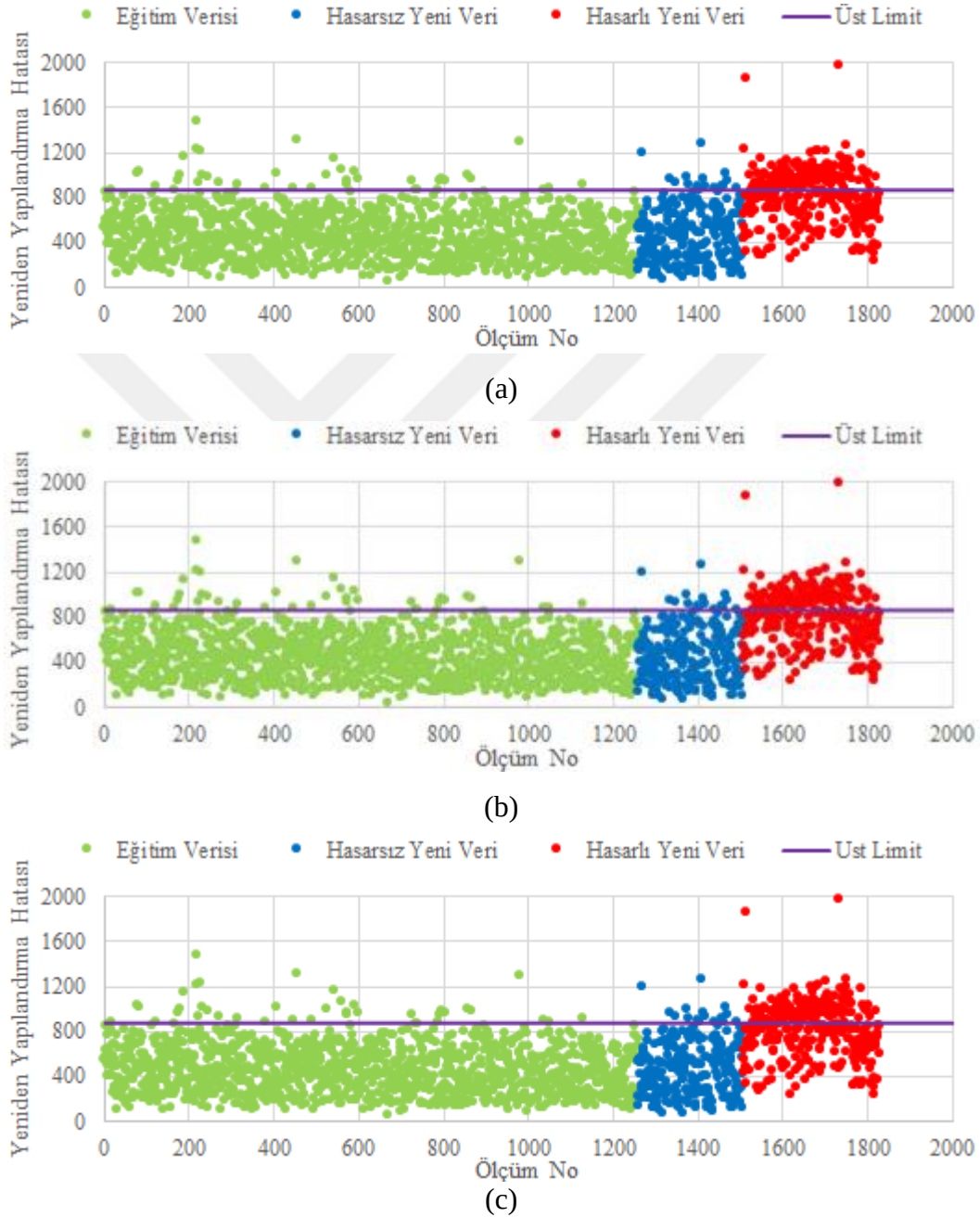


Şekil 2.82. Z24 Köprüsü'ne ait farklı gürültü oranlarına sahip (%0, %0,5, %1, %1,5) sinyallerin GFTAA yöntemi kullanılarak hesaplanan birinci tekil değerlerine ait grafik

Otokodlayıcı eğitim modelinde 4 katmanlı bir kodlayıcı-çözücü içeren otokodlayıcı modeli tasarlanmıştır. GFTAA yöntemi ile elde edilen birinci tekil değerlere ait sinyal verileri kullanılarak Eğitim Verisi (1260 adet), Hasarsız Yeni Veri (250 adet), Hasarlı Yeni Veri (320 adet) etiketleri ile gruplandırma yapılmıştır. Eğitim verisi Otokodlayıcı modelinin eğitilmesinde kullanılmıştır. Ayrıca elde edilen Otokodlayıcı modelinde Hasarsız ve Hasarlı Yeni Veri gruplarının karşılaştırılarak performansı değerlendirilmiştir.

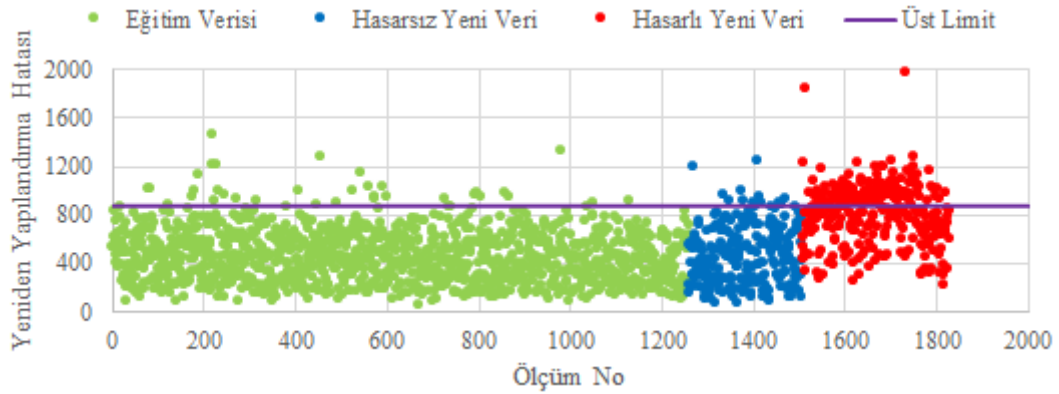
Otokodlayıcıda girdi verisi ile çıktı verisinin aynı olması beklenildiğinden dolayı yapılan bu işleme yeniden yapılandırma (Reconstruction) adı verilmektedir. Girdi verisi ile çıktı verisi arasındaki farka yeniden yapılandırma hatası (Reconstruction error) adı verilmektedir. Z24 Köprüsü'nde farklı gürültü oranlarına sahip (%0, %0,5, %1, %1,5, %2,0) Eğitim Verisi kullanılarak oluşturulan Otokodlayıcı modeli ile Hasarsız ve Hasarlı Yeni Veriler arasındaki yeniden yapılandırma hatasına ait grafikler Şekil 2.83'te gösterilmiştir. Ayrıca, Otokodlayıcı modelindeki Eğitim Verisi kullanılarak %95 güven aralığındaki üst

limit hesaplanmıştır. Şekil 2.83 incelendiğinde, Hasarsız Yeni Verinin büyük bir bölümünün üst limitin altında kaldığı, Hasarlı Yeni Verilerin büyük çoğunluğunun ise üst limiti aştığı görülmüştür. Ayrıca farklı gürültü oranlarının (%0, %0,5, %1, %1,5, %2,0) sonuçlar üzerinde gözle görülür farklılık oluşturmadığı görülmektedir.

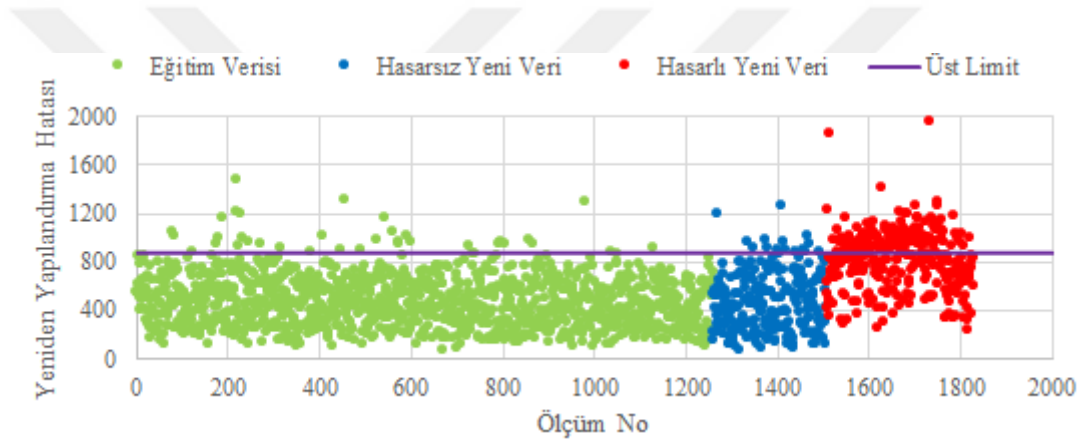


Şekil 2.83. Z24 Köprüsü'nde %0 (a), %0,5 (b), %1,0 (c), %1,5 (d), %2 (e) gürültü oranına sahip ham sinyaller kullanılarak elde edilen Otokodlayıcı modeli ile farklı hasar durumlarından elde edilen yeniden yapılandırma hatası grafiği

Şekil 2.83'ün devamı



(d)



(e)

Bir yıllık veri kullanılarak Eğitim Verisi ve Hasarsız Yeni Verinin büyük bir kısmının üst limit değerinin altında olması Hasarlı Yeni Verinin ise bu limiti aşması ve değerlerin yükselen bir eğilimde olması ve ayrıca farklı gürültüler altında sonuçların değişkenlik göstermemesi geliştirilen metodolojinin uygun olduğunu göstermektedir. Ayrıca grafiklerdeki değişimler beklenen eğilimde ve sınırlar içerisinde olup metodolojinin oluşan hasara karşı duyarlı olduğunu göstermektedir.

Grafiklerin oluşturulmasında yapıdan alınan ham sinyaller frekans ortamında elde edilerek insan müdahalesine gerek duyulmadan derin öğrenme işlemi kullanılmıştır. Geliştirilen metodolojinin insan müdahalesine gerek kalmadan analizleri gerçekleştirmesi çok sayıda yapının kısa sürede incelenerek varsa anormal durumların belirlenmesine imkan sağlamaktadır. Ayrıca bu metodoloji ile insan müdahalesi nedeniyle oluşabilecek ekstra hataların da önüne geçilmektedir.

2.3.3.2. Trabzon Şehir Cami Minaresi

Trabzon İlinin Ortahisar İlçesinde yer alan Trabzon Şehir Camisi'nin yapımına 2018 yılında başlanmış ve 2021 yılında kaba inşaatı tamamlanmıştır. Trabzon Şehir Camisi 4 minareden oluşmaktadır. Tez çalışması kapsamında Trabzon Şehir Camisi'nin kuzey-batı bölümünde bulunan minarede uzun süreli titreşime dayalı ölçümler gerçekleştirilerek minareye ait dinamik karakteristiklerin zamana bağlı değişimlerinin ve Bayes Sinir Ağları ile frekans güven aralıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Betonarme olarak inşa edilen minare 3 şerefeli ve yaklaşık 80 metre yüksekliğe sahiptir. Trabzon Şehir Cami Minaresi'ne ait genel görseller Şekil 2.84'te verilmektedir.

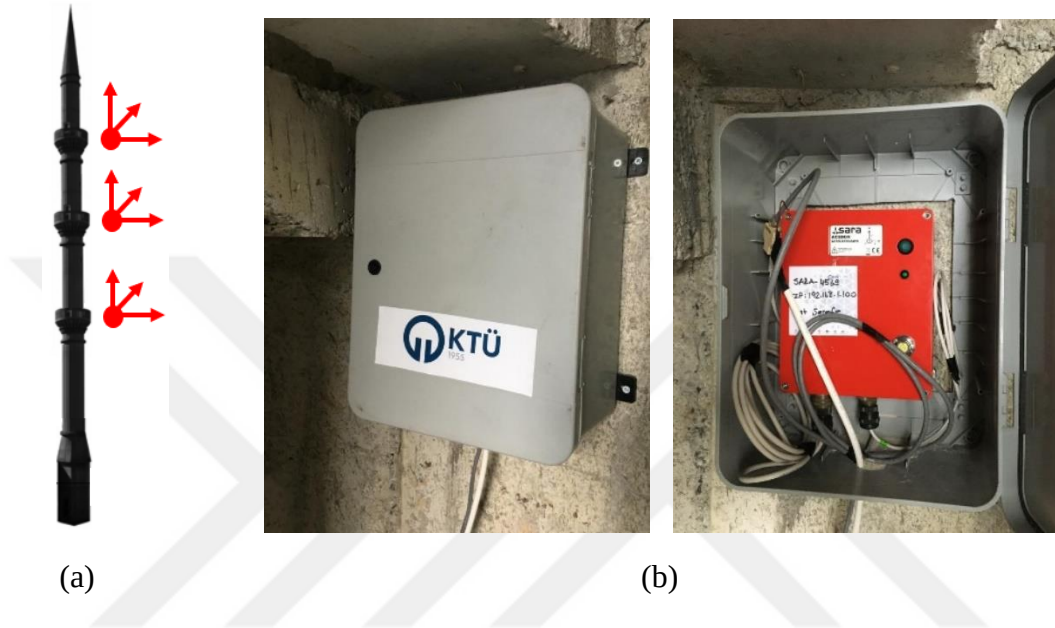


Şekil 2.84. Trabzon Şehir Cami Minaresi'ne ait genel görseller

2.3.3.2.1. Sensör Konfigürasyon Planı

Tez çalışmasında minarenin titreşime dayalı yapı sağlığı izlenmesi için her şerefeye bir adet üç eksenli ivmeölçer sensörü olmak üzere toplamda üç adet sensör yerleştirilmiştir. Veriler, Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformuna entegre edilmiştir.

Üç eksenli ivmeölçer sensörü olarak SARA SL06 modeli kullanılmıştır. İvmeölçer sensör yerleşim planı ve kurulumlarına ait görseller Şekil 2.85'te gösterilmiştir. Ayrıca Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformundan elde edilen verilere ait ana sayfa görseli Şekil 2.86'da verilmiştir.



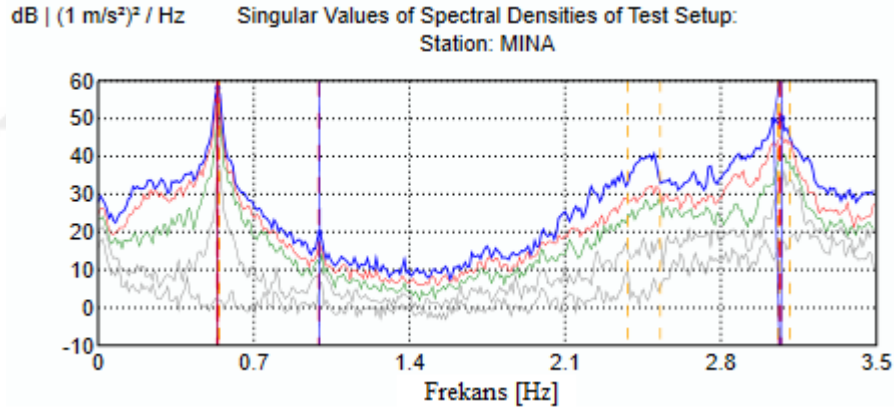
Şekil 2.85. Trabzon Şehir Cami Minaresi'ne ait ivmeölçer sensör yerleşimi (a) ve sensör kurulumlarına (b) ait görsel



Şekil 2.86. Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda Trabzon Şehir Cami Minaresi'ne ait ana sayfa görsel ekranı

2.3.3.2.2. Geliştirilen Metodoloji Kapsamında Dinamik Karakteristiklerin Otomatik Olarak Belirlenmesi

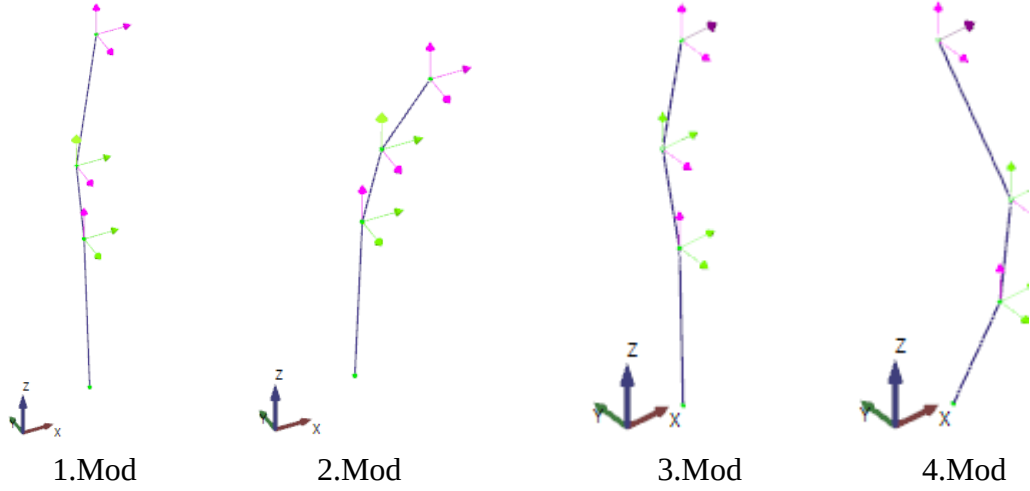
Trabzon Şehir Cami Minaresi'nde 30 Ağustos 2022-14 Şubat 2023 arasında yaklaşık 6 aylık sürekli izleme süreci gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte çalışma kapsamında geliştirilen metodoloji ile dinamik karakteristiklerin otomatik olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak referans alınacak dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Başlangıç ölçümlerde 0-100Hz aralığında ve 1 saatlik ölçüm verisi kullanılmıştır. Elde edilen ham sinyaller kullanılarak dinamik karakteristikler OMA (2023) yazılımı ile belirlenmiştir. Minarenin başlangıç ölçümlerinden elde edilen ham sinyaller GFTAA yöntemine göre hesaplanan spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri Şekil 2.87'de gösterilmektedir. Ayrıca elde edilen frekans ve mod şekilleri sırasıyla Tablo 2.21'de ve Şekil 2.88'de gösterilmiştir. Tablo 2.21'den görüldüğü üzere, GFTAA yöntemine göre elde edilen frekanslar 0,54-3,07Hz aralığındadır.



Şekil 2.87. Trabzon Şehir Cami Minaresi'ne ait OMA (2023) yazılımından elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

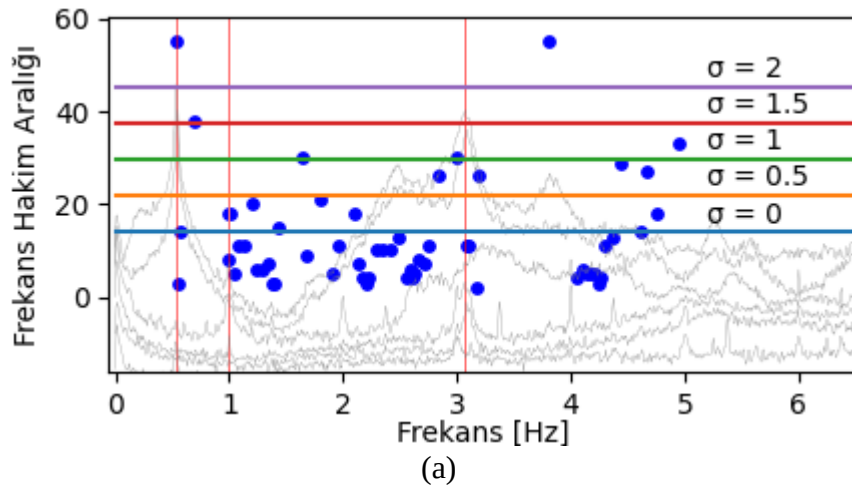
Tablo 2.21. Trabzon Şehir Cami Minaresi'ne ait GFTAA yönteminden elde edilen frekanslar

Mod Numarası	OMA (2023)	Mod Şekli
1	0,54	1. Öteleme
2	0,54	2. Öteleme
3	0,99	Burulma
4	3,07	1. Eğilme



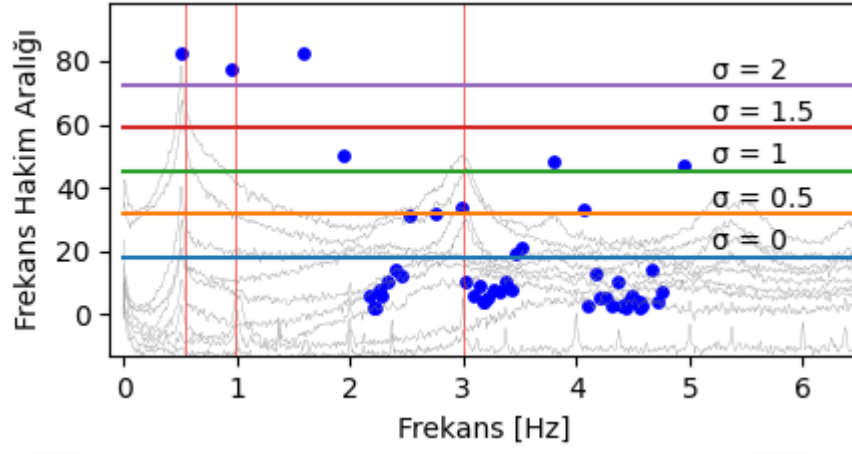
Şekil 2.88. Trabzon Şehir Cami Minaresi'ne ait OMA (2023) yazılımından GFTAA yöntemine göre elde edilen frekanslara ait mod şekilleri

Geliştirilen metodoloji kapsamında dinamik karakteristiklerin otomatik olarak elde edilmesinde filtreleme işlemi uygulanması için eşik değerin belirlenmesi gerekmektedir. Trabzon Şehir Cami Minaresi'nde eşik değerinin belirlenmesi için beş farklı ölçüm veri seti kullanılarak değerlendirilme yapılmıştır. Beş ölçüm veri setinden elde edilen frekans hakim aralıkları ve karşılaştırmalı eşik değerlere ait grafikler Şekil 2.89'da gösterilmiştir. Frekanslara ait minimum eşik değerinin belirlenebilmesi için referans frekanslar dikkate alınarak Şekil 2.89'da çizilen düşey çizgilerin kesiştiği frekans hakim aralığı değerleri hangi eşik çizgisinin üzerinde ise o değer minimum eşik değer olarak dikkate alınıp Tablo 2.22'de özetlenmiştir.

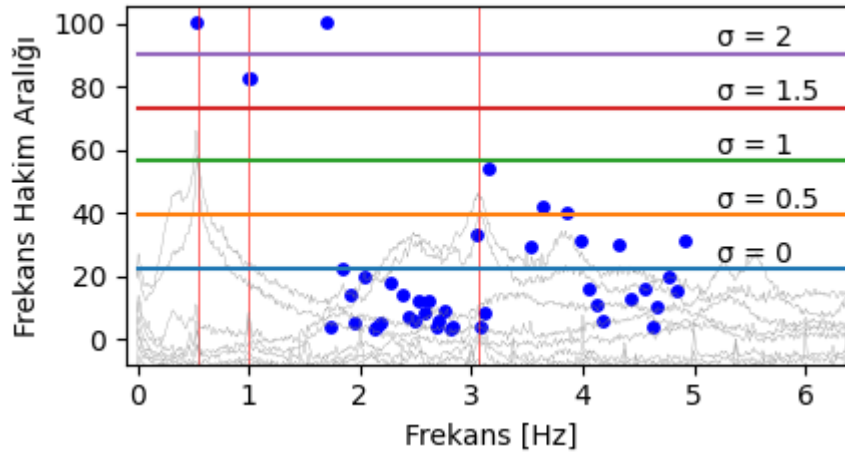


Şekil 2.89. Trabzon Şehir Cami Minaresi'ne ait 1.ölçüm (a), 2.ölçüm (b), 3.ölçüm (c), 4.ölçüm (d) ve 5.ölçümden (e) elde edilen frekans hakim aralıkları ve eşik sınırları

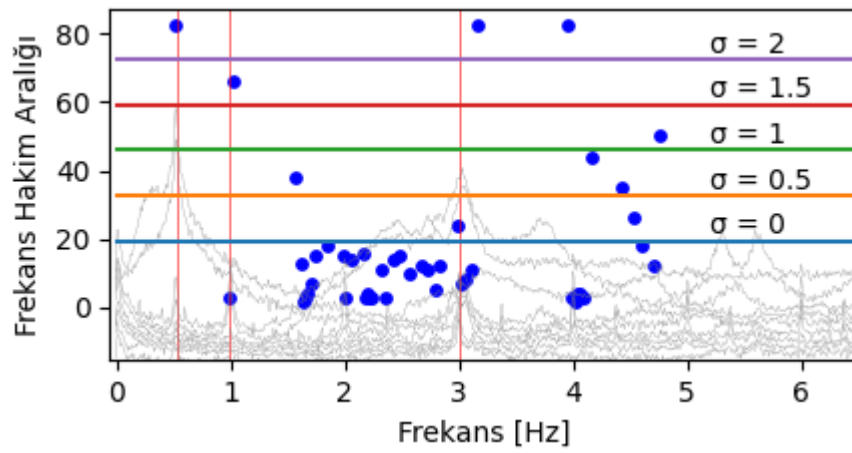
Şekil 2.89'un devamı



(b)

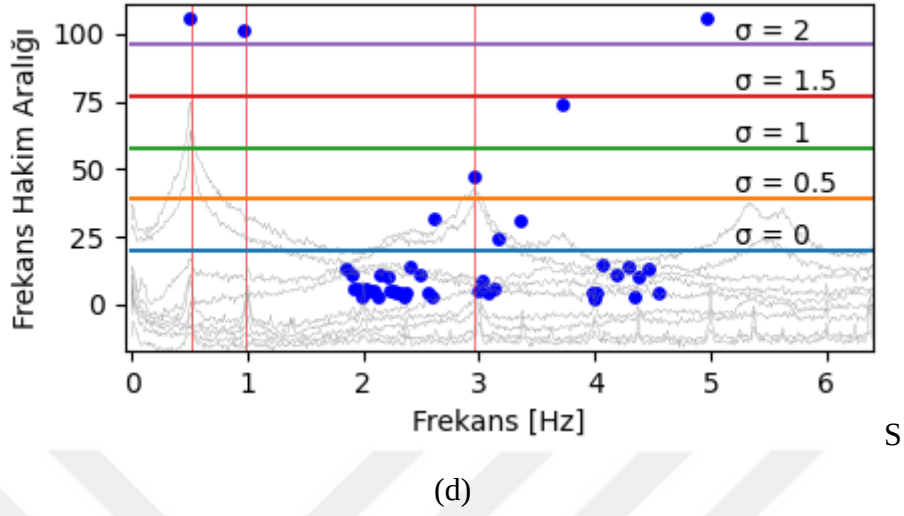


(c)



(d)

Şekil 2.89'un devamı

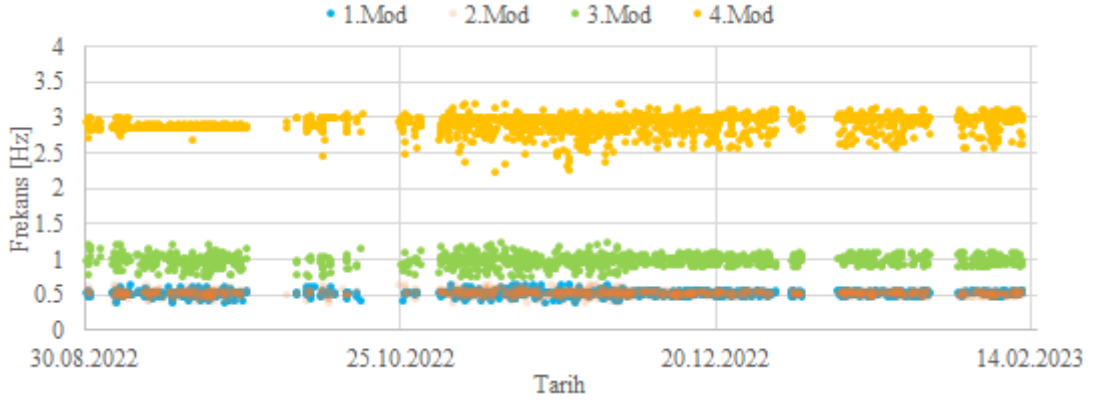


Tablo 2.22’de görüldüğü üzere, beş farklı ölçümden elde edilen minimum eşik değerleri birinci, üçüncü ve dördüncü ölçümler için 0, ikinci ve beşinci ölçümler için ise 0,5 olarak belirlenmiştir. Bu değerler arasından da minimum değer seçilerek dinamik karakteristiklerin otomatik belirlenmesinde eşik değeri sıfır olarak dikkate alınmıştır.

Tablo 2.22. Trabzon Şehir Cami Minaresi’nde beş farklı ölçüm veri setinden elde edilen frekanslara karşılık gelen frekans güven aralığına ait minimum eşik değerleri

Ölçüm No	Minimum eşik değeri				Seçilen (Minimum)
	1.Mod	2.Mod	3.Mod	4.Mod	
1	2	2	0	0,5	0
2	2	2	2	0,5	0,5
3	2	2	1,5	0	0
4	2	2	1,5	0	0
5	2	2	2	0,5	0,5

Geliştirilen metodoloji kapsamında elde edilen parametreler kullanılarak Trabzon Şehir Cami Minaresi’ne ait yaklaşık altı aylık verilerden (30 Ağustos 2022-14 Şubat 2023) dinamik karakteristikler otomatik olarak belirlenmiştir. Geliştirilen metodoloji kapsamında elde edilen frekansların zamana göre değişimleri Şekil 2.90’da gösterilmiştir.



Şekil 2.90. Geliştirilen metodoloji kapsamında Trabzon Şehir Cami Minaresi'ne ait elde edilen frekansların zamana göre değişimleri

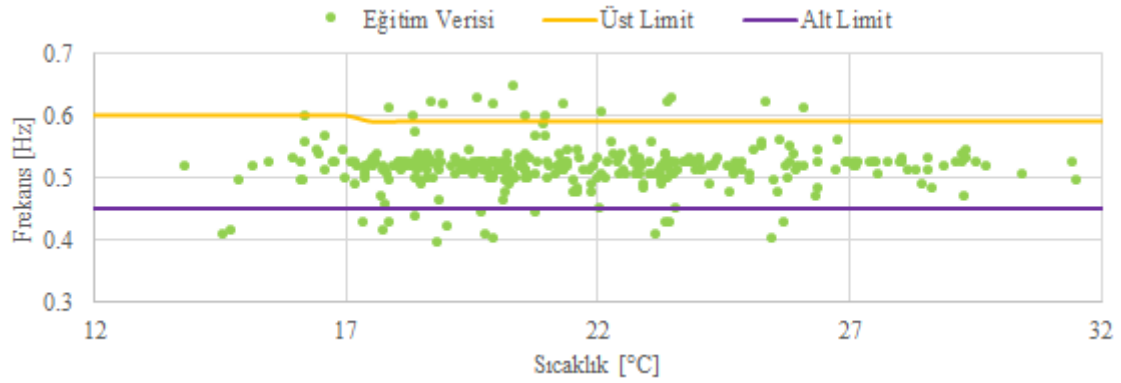
2.3.3.2.3. Dinamik Karakteristiklerin Bayes Sinir Ağları ile Güven Aralığının Belirlenmesi

Trabzon Şehir Cami Minaresi'nde yaklaşık 6 ay boyunca elde edilen dinamik karakteristikler kullanılarak değişen çevresel koşulları altında Bayes Sinir Ağları ile frekans güven aralıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yaklaşık 6 ay boyunca, 720 adet ölçüm verisi elde edilmiştir. Trabzon Şehir Cami Minaresi'nde giriş parametresi olarak sıcaklık değeri, çıktı olarak frekans değeri kullanılmıştır. Bu parametreler kullanılarak minareye ait Bayes Sinir Ağı modelinin eğitilmesi için çeşitli katman sayılarından oluşan modellerin testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerin doğrulanmasında kök ortalama karesel hata değeri kullanılmıştır. Farklı katman sayılarına ait elde edilen kök ortalama karesel hata değerleri Tablo 2.23'te gösterilmiştir. Tablo 2.23'te görüldüğü üzere seçilen ilk dört katmanda katman sayısı arttıkça eğitim modelinde oluşan hata değeri azalmasına rağmen dördüncü katmandan sonra sonuçlarda değişiklik gözlenmemiştir. Bu nedenle modelin eğitilmesinde 16x16x8 olacak şekilde dört katmanlı Bayes Sinir Ağı modeli tasarlanmıştır.

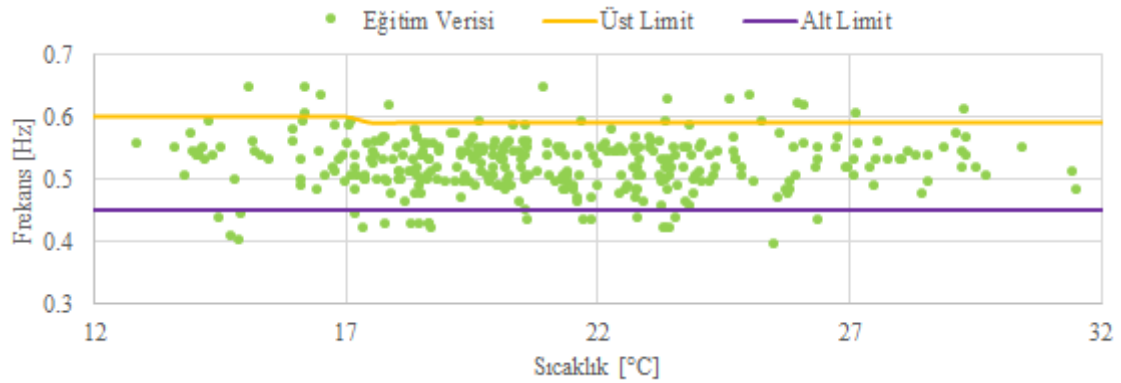
Oluşturulan Bayes Sinir Ağı modelinde eğitim verisi kullanılarak çevresel etkilerden kaynaklı belirsizliklerin ilk dört frekansına ait sıcaklığa bağlı frekans değerlerinin üst ve alt limitleri belirlenmiştir. Minarenin ilk dört frekansına ait üst ve alt limitler ile eğitim verisine ait grafikler Şekil 2.91'de gösterilmiştir. Şekil 2.91 incelendiğinde eğitim verisinin büyük bir bölümünün üst ve alt limitleri içerisinde kaldığı görülmektedir. Ayrıca, sıcaklık etkisine bağlı olarak üst ve alt limit değerlerinde farklılıkların çok olmadığı görülmüştür.

Tablo 2.23. Trabzon Şehir Cami Minaresi'nde Bayes Sinir Ağı model eğitiminde çeşitli katman sayılarından elde edilen kök ortalama karesel hata değerleri

Mod	Katman sayısı				
	3	3x3	8x8	16x16x8	16x16x8x8
1	0,324	0,301	0,245	0,113	0,125
2	0,424	0,410	0,342	0,217	0,205
3	1,906	0,922	0,715	0,411	0,448
4	7,854	0,498	0,529	0,458	0,504



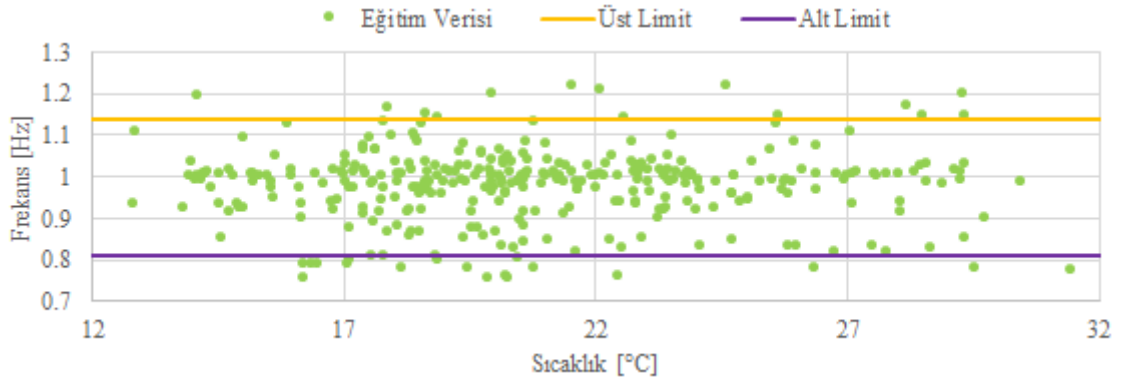
(a)



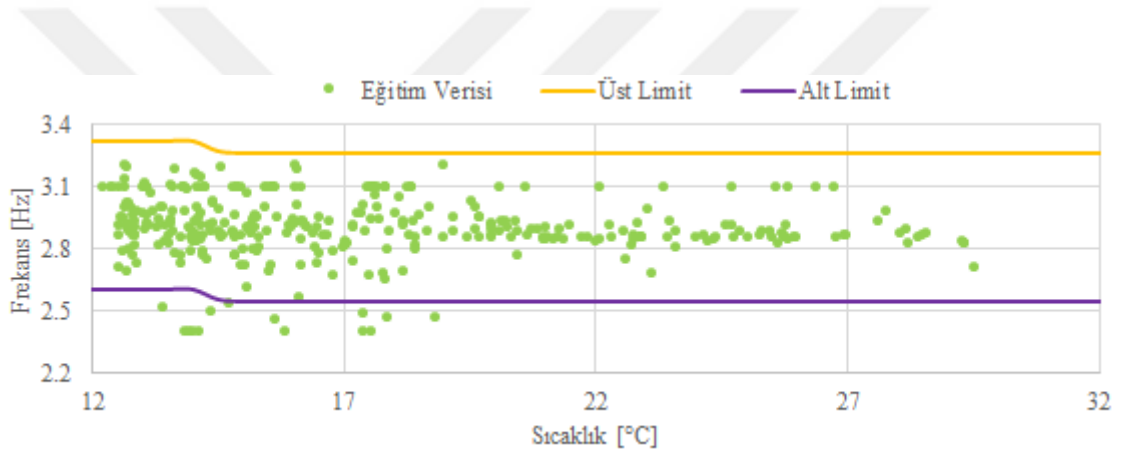
(b)

Şekil 2.91. Trabzon Şehir Cami Minaresi'nde 1. Mod (a), 2.Mod (b), 3.Mod (c) ve 4.Moda (d) ait Bayes Sinir Ağı modeli ile elde edilen frekans güven aralığı

Şekil 2.91'in devamı



(c)



(d)

2.3.3.3. Çok Katlı Betonarme Bina

Tez çalışması kapsamında Trabzon İlinin Yomra İlçesinde yer alan çok katlı betonarme binada uzun süreli titreşime dayalı ölçümler gerçekleştirilerek betonarme binaya ait dinamik karakteristiklerin zamana bağlı değişimleri ve Bayes Sinir Ağları ile frekans güven aralıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Zemin+20 kattan oluşan binanın her katının net yüksekliği 2,95m olup zemin kattan itibaren toplam yüksekliği yaklaşık 65m'dir. Çok katlı betonarme binaya ait genel görseller Şekil 2.92'de verilmektedir.



Şekil 2.92. Trabzon İli Yomra İlçesinde yer alan Çok Katlı Betonarme Bina'ya ait görsel

2.3.3.3.1. Sensör Konfigürasyon Planı

Çok katlı betonarme binada titreşime dayalı Yapı Sağlığı İzleme için binanın en üst katında kuzey-batı ve güney-batı köşe noktalarına birer adet üç eksenli ivmeölçer sensörü olmak üzere toplamda iki adet sensör yerleştirilmiştir. Veriler, Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformuna entegre edilmiştir. Üç eksenli ivmeölçer sensörü olarak SARA SL06 modeli kullanılmıştır. İvmeölçer sensör yerleşimlerine ait görsel Şekil 2.93'te gösterilmektedir. Ayrıca Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformundan elde edilen verilere ait ana görsel ekranı Şekil 2.94'te verilmiştir.



(a)

Şekil 2.93. Çok Katlı Betonarme Bina'ya ait ivmeölçer sensör yerleşimi (a) ve sensör kurulumlarına (b) ait görsel

Şekil 2.93'ün devamı



(b)

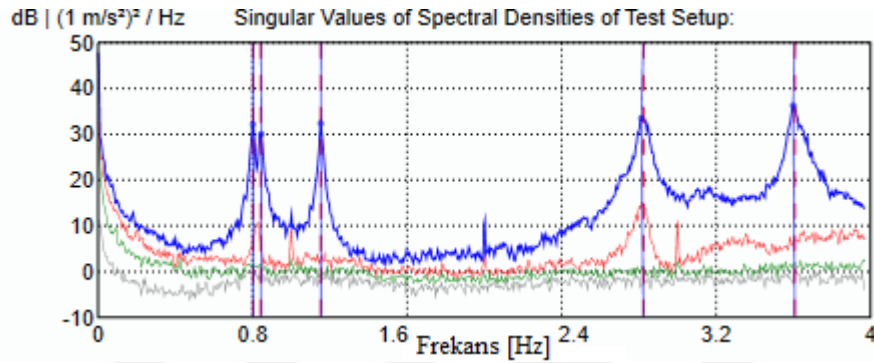


Şekil 2.94. Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda Çok Katlı Betonarme Bina'ya ait ana görsel ekranı

2.3.3.3.2. Geliştirilen Metodoloji Kapsamında Dinamik Karakteristiklerin Otomatik Olarak Belirlenmesi

Çok Katlı Betonarme Bina'da 30 Ağustos 2022-14 Şubat 2023 tarihleri arasında yaklaşık 6 aylık sürekli izleme süreci gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte çalışma kapsamında geliştirilen metodoloji ile dinamik karakteristiklerin otomatik olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak referans alınacak dinamik karakteristikler

belirlenmiştir. Başlangıç ölçümlerinde 0-100Hz aralığında ve 1 saatlik ölçüm verisi dikkate alınmıştır. Elde edilen ham sinyaller kullanılarak dinamik karakteristikler OMA (2023) yazılımı kullanılarak belirlenmiştir. Binanın başlangıç ölçümlerinden elde edilen ham sinyallerin GFTAA yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri Şekil 2.95'te gösterilmektedir. Ayrıca elde edilen frekans ve mod şekilleri sırasıyla Tablo 2.24'te ve Şekil 2.96'da verilmektedir. Tablo 2.24'ten görüldüğü üzere, GFTAA yöntemine göre ilk beş frekans değerleri 0,80-3,61Hz aralığında elde edilmiştir.



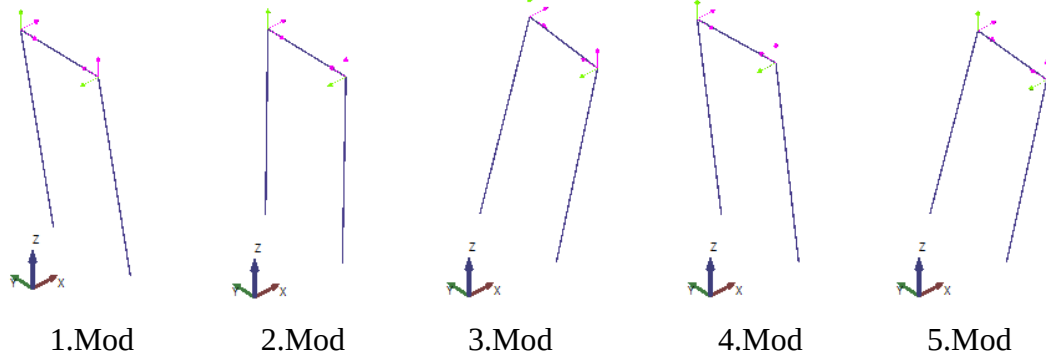
Şekil 2.95. Çok Katlı Betonarme Bina'ya ait OMA (2023) yazılımından elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

Tablo 2.24. Çok Katlı Betonarme Bina'ya ait GFTAA yönteminden elde edilen frekanslar

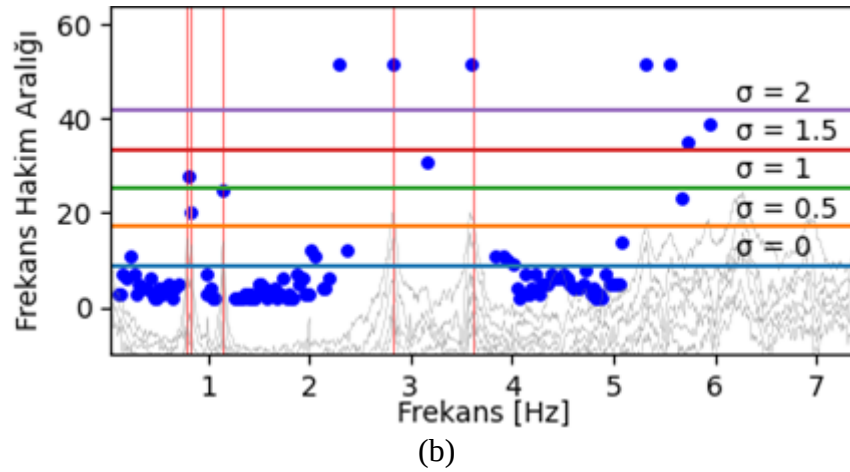
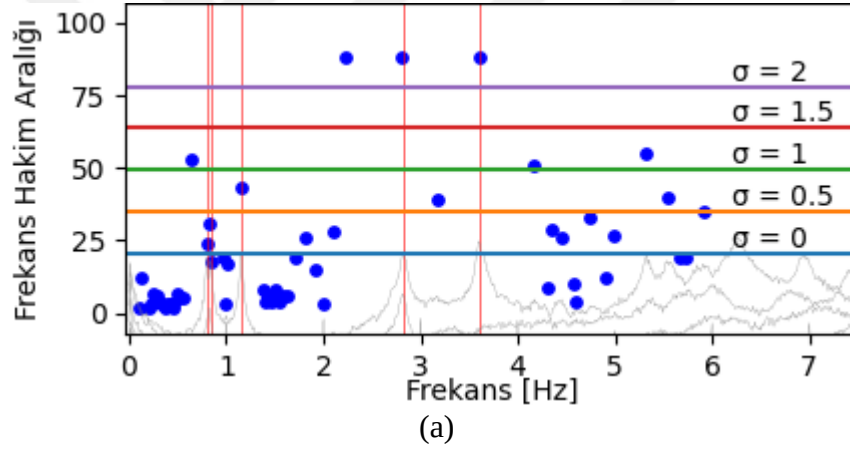
Mod Numarası	OMA (2023)	Mod Şekli
1	0,80	1. Öteleme
2	0,84	Burulma
3	1,15	2. Öteleme
4	2,82	1. Eğilme
5	3,61	2. Eğilme

Geliştirilen metodoloji kapsamında dinamik karakteristiklerin otomatik elde edilmesi için filtreleme işlemi uygulanması için eşik değerin belirlenmesi gerekmektedir. Çok Katlı Betonarme Bina'da eşik değerinin belirlenmesi için beş farklı ölçüm veri seti kullanılarak değerlendirilmesi yapılmıştır. Beş ölçüm veri setinden elde edilen frekans hakim aralıkları ve karşılaştırmalı eşik değerlere ait grafikler Şekil 2.97'de gösterilmiştir. Frekanslara ait minimum eşik değerinin belirlenebilmesi için referans frekanslar dikkate alınarak Şekil

2.97’de çizilen düşey çizgilerin kesiştiği frekans hakim aralığı değerleri hangi eşik çizgisinin üzerinde ise o değer minimum eşik değeri olarak dikkate alınıp Tablo 2.25’te özetlenmiştir.

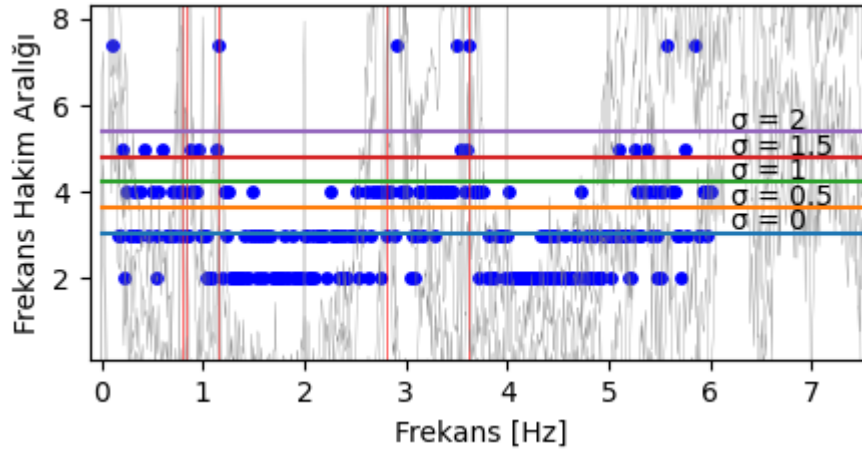


Şekil 2.96. Çok Katlı Betonarme Bina’ya ait OMA (2023) yazılımından GFTAA yöntemine göre elde edilen frekanslara ait mod şekilleri

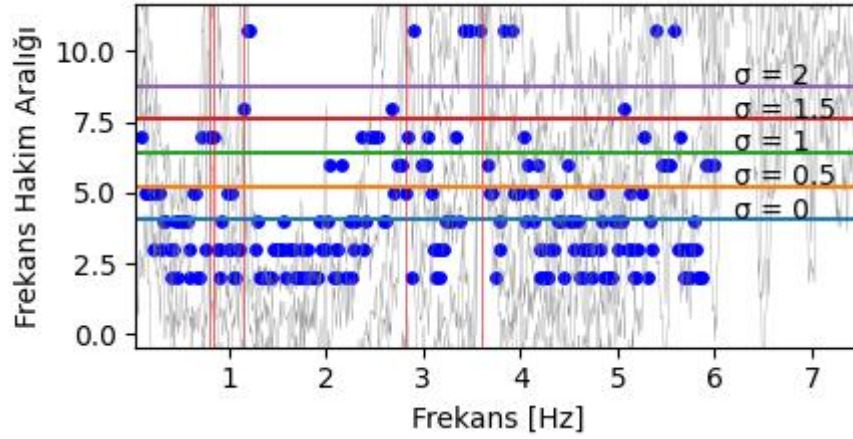


Şekil 2.97. Çok Katlı Betonarme Bina’ya ait 1.ölçüm (a), 2.ölçüm (b), 3.ölçüm (c), 4.ölçüm (d) ve 5.ölçümünden (e) elde edilen frekans hakim aralıkları ve eşik sınırları

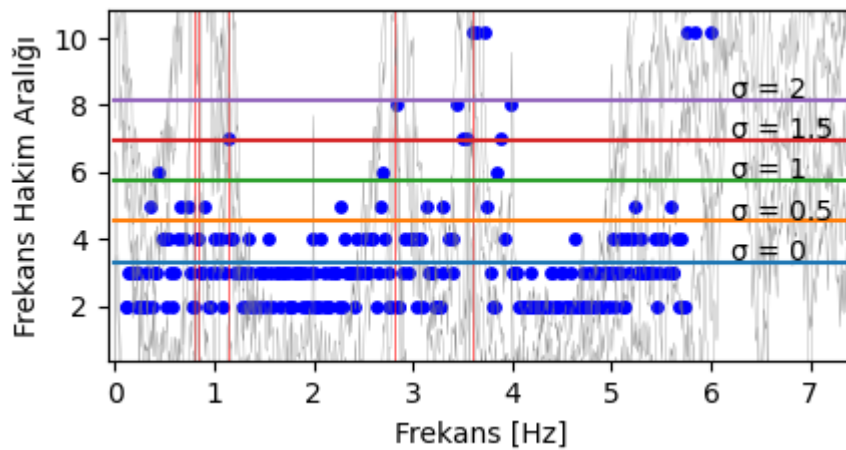
Şekil 2.97'nin devamı



(c)



(d)



(e)

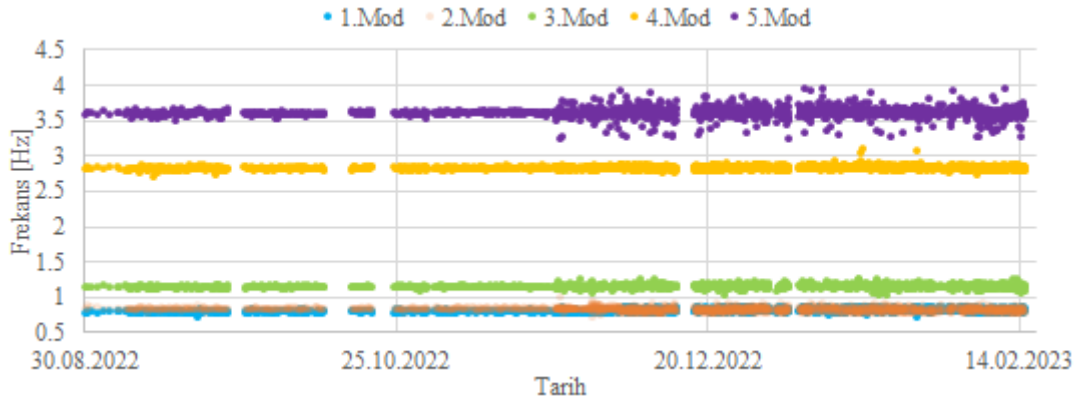
Tablo 2.25'te görüldüğü üzere, beş farklı ölçümden elde edilen minimum eşik değerleri birinci ve beşinci ölçümler için 0, ikinci ve üçüncü ölçümler için 0,5 ve dördüncü ölçüm

ise 1 olarak belirlenmiştir. Bu değerler arasından da minimum değer seçilerek dinamik karakteristiklerin otomatik belirlenmesinde eşik değer sıfır olarak dikkate alınmıştır.

Tablo 2.25. Çok Katlı Betonarme Bina'ya ait beş farklı ölçüm veri setinden elde edilen frekanslara karşılık gelen frekans güven aralığına ait minimum eşik değerleri

Ölçüm No	Minimum eşik değer					Seçilen (Minimum)
	1.Mod	2.Mod	3.Mod	4.Mod	5.Mod	
1	0	0	0,5	2	2	0
2	1	0,5	0,5	2	2	0,5
3	0,5	1,5	2	0,5	0,5	0,5
4	1	1	1,5	1	2	1
5	0	0	1,5	1,5	2	0

Geliştirilen metodoloji kapsamında elde edilen parametreler kullanılarak Çok Katlı Betonarme Bina'ya ait dinamik karakteristikler yaklaşık altı ayın sonunda (30 Ağustos 2022-14 Şubat 2023) otomatik olarak belirlenmiştir. Geliştirilen metodoloji kapsamında elde edilen frekansların zamana göre değişimleri Şekil 2.98'de gösterilmiştir.



Şekil 2.98. Geliştirilen metodoloji kapsamında Çok Katlı Betonarme Bina'ya ait elde edilen frekansların zamana göre değişimleri

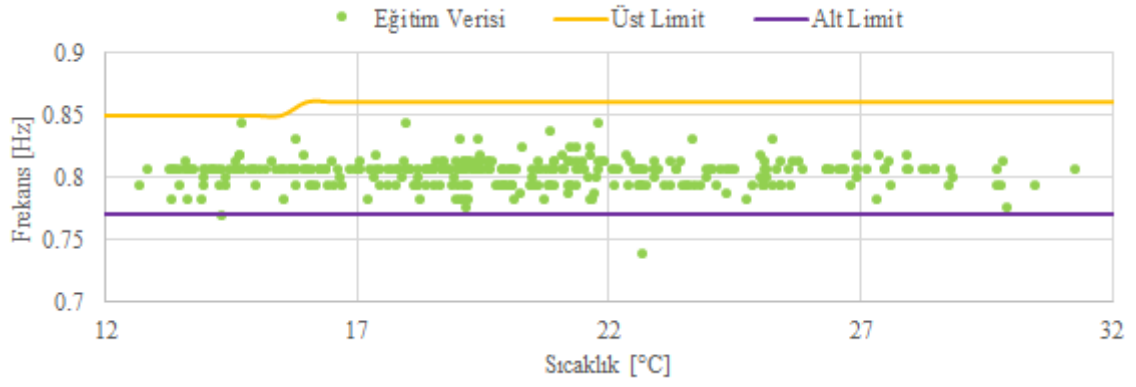
2.3.3.3.3. Dinamik Karakteristiklerin Bayes Sinir Ağları ile Güven Aralığının Belirlenmesi

Çok Katlı Betonarme Bina'dan yaklaşık 6 ay boyunca elde edilen dinamik karakteristikler kullanılarak değişen çevresel koşullar altında Bayes Sinir Ağları ile frekans güven aralıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. 6 ay boyunca, 840 adet ölçüm verisi elde edilmiştir. Çok Katlı Betonarme Bina'nın Bayes Sinir Ağı Modelinde giriş parametresi olarak sıcaklık değeri, çıktı parametresi olarak frekans değeri kullanılmıştır. Bu parametreler kullanılarak binaya ait Bayes Sinir Ağı model eğitilmesi için çeşitli katman sayılarından oluşan modellerin testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerin doğrulanmasında kök ortalama karesel hata değeri kullanılmıştır. Farklı katman sayılarına ait elde edilen kök ortalama karesel hata değerleri Tablo 2.26'da gösterilmiştir. Tablo 2.26'dan görüldüğü üzere seçilen ilk üç katmanda katman sayısı arttıkça eğitim modelinde oluşan hata değeri azalmasına rağmen dört katman için sonuçlarda önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Bu nedenle modelin eğitilmesinde 16x16x8 olacak şekilde üç katmanlı Bayes Sinir Ağı modeli tasarlanmıştır.

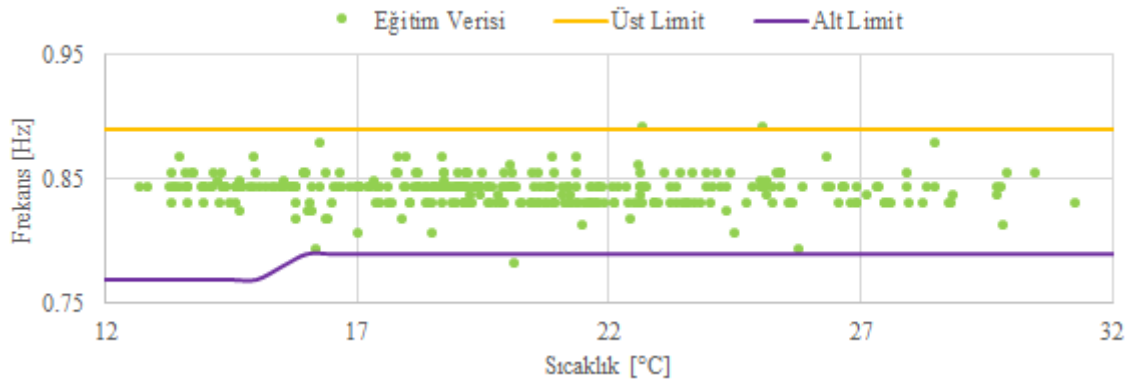
Oluşturulan Bayes Sinir Ağı modelinde eğitim verisi kullanılarak çevresel etkilerden kaynaklı belirsizliklerin ilk beş frekansa ait sıcaklığa bağlı frekans değerlerinin üst ve alt limitleri belirlenmiştir. Binanın ilk beş frekansına ait üst ve alt limitler ile eğitim verisine ait grafikler Şekil 2.99'da gösterilmiştir. Şekil 2.99 incelendiğinde eğitim verisinin büyük bir bölümünün üst ve alt limitleri içerisinde kaldığı görülmektedir.

Tablo 2.26. Çok Katlı Betonarme Bina'da Bayes Sinir Ağı model eğitiminde çeşitli katman sayılarından elde edilen kök ortalama karesel hata

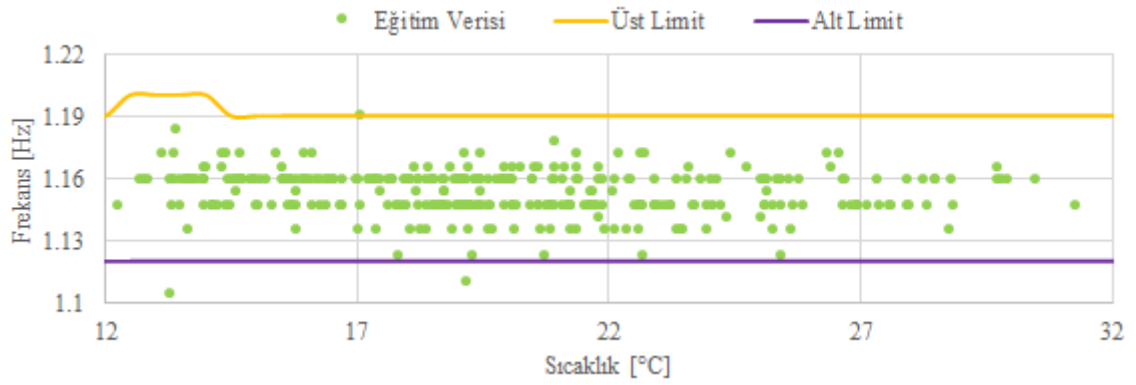
Mod Numarası	Katman sayısı				
	3	3x3	8x8	16x16x8	16x16x8x8
1	0,158	0,141	0,114	0,008	0,009
2	0,254	0,189	0,174	0,108	0,105
3	0,647	0,547	0,247	0,185	0,182
4	0,457	0,342	0,205	0,157	0,164
5	0,328	0,248	0,158	0,122	0,125



(a)



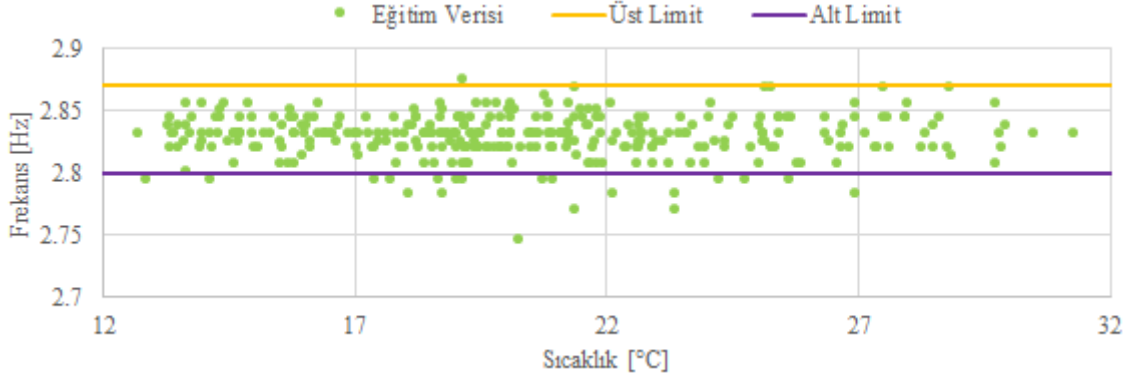
(b)



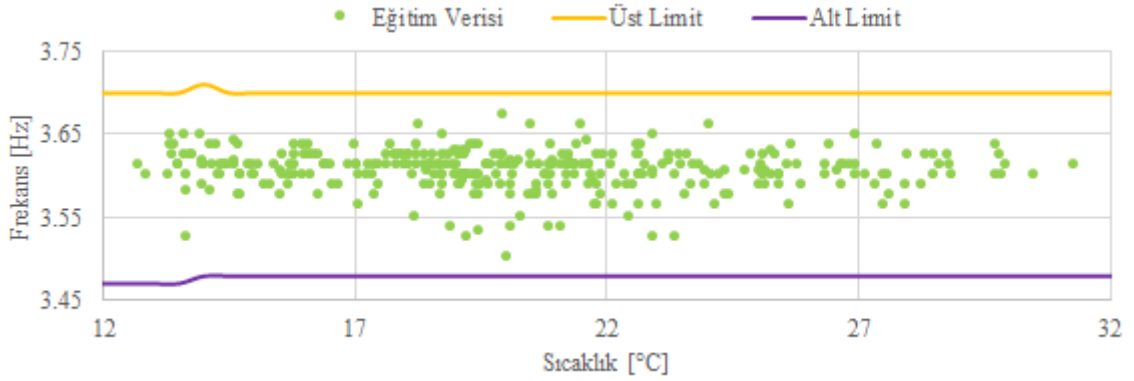
(c)

Şekil 2.99. Çok Katlı Betonarme Bina’da 1. Mod (a), 2.Mod (b), 3.Mod (c), 4.Mod (d) ve 5.Mod (e) ait Bayes Sinir Ağı modeli ile elde edilen frekans güven aralığı

Şekil 2.99'un devamı



(d)



(e)

2.3.3.4. Tekkale Viyadüğü

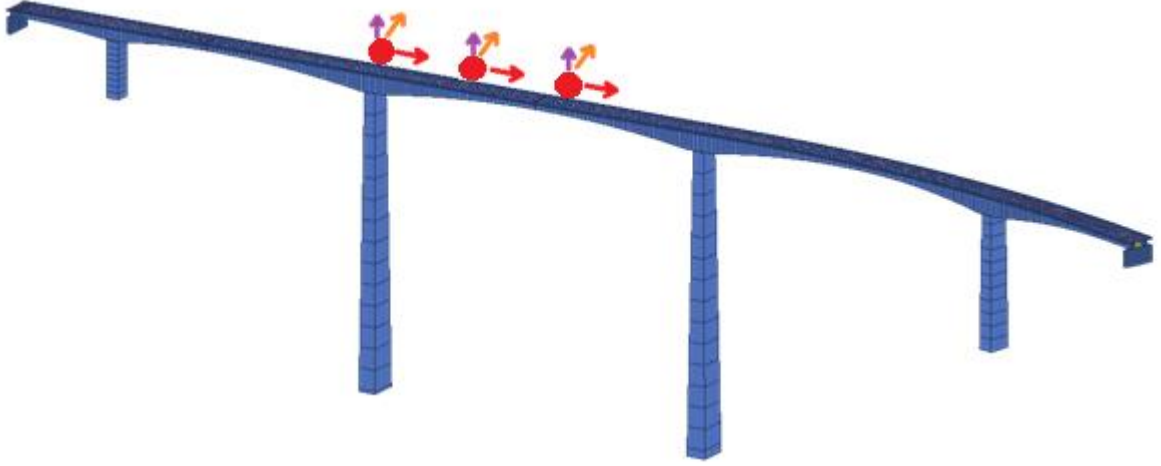
Tekkale Viyadüğü Artvin İlinin Yusufeli İlçesinde yer almaktadır. Köprü'nün yapımı 2022 yılında tamamlanmış ve trafiğe açılmıştır. Köprü dengeli konsol tekniği ile inşa edilmiş olup açıklık mesafeleri 53-175m aralığında 5 açıklıktan oluşmakta oluşmaktadır. Köprü'nün toplam uzunluğu 628m'dir. Köprü'nün üst yapı genişliği ve en yüksek ayak uzunluğu sırasıyla 14,5m ve 144m'dir. Tez çalışması kapsamında, köprüde uzun süreli titreşime dayalı ölçümler gerçekleştirilerek dinamik karakteristiklerin zamana bağlı değişimleri ve Bayes Sinir Ağları ile frekans güven aralıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Tekkale Viyadüğü'ne ait genel görseller Şekil 2.100'de gösterilmiştir.



Şekil 2.100. Tekkale Viyadüğü'ne ait görseller

2.3.3.4.1. Sensör Konfigürasyon Planı

Tekkale Viyadüğü'ne ait titreşime dayalı yapı sağlığı izlenme ana açıklığının en fazla olduğu bölümde ana açıklığın ortasına, dörtte birine ve kolon üzerine denk gelecek şekilde birer adet üç eksenli ivmeölçer sensörü olmak üzere toplamda üç adet sensör yerleştirilmiştir. Veriler, Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformuna entegre edilmiştir. Üç eksenli ivmeölçer sensörü olarak SARA SL06 modeli kullanılmıştır. İvmeölçer sensör yerleşimine ait görsel Şekil 2.101'de gösterilmiştir. Ayrıca Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda elde edilen verilere ait ana görsel ekranı Şekil 2.102'de verilmiştir.



Şekil 2.101. Tekkale Viyadüğü'nde ivmeölçer sensör yerleşimine ait görsel

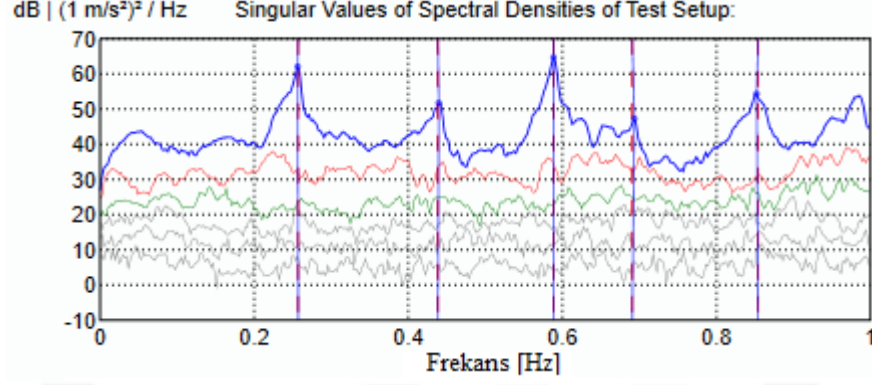


Şekil 2.102. Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda Tekkale Viyadüğü'ne ait ana görsel ekranı

2.3.3.4.2. Geliştirilen Metodoloji Kapsamında Dinamik Karakteristiklerin Otomatik Olarak Belirlenmesi

Tekkale Viyadüğü'nde 3 Kasım 2022-14 Şubat 2023 tarihleri arasında yaklaşık 3 aylık sürekli izleme süreci gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte çalışma kapsamında geliştirilen metodoloji ile dinamik karakteristiklerin otomatik olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak referans alınacak dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Başlangıç ölçümlerinde 0-100Hz aralığında ve 1 saatlik ölçüm verisi dikkate alınmıştır. Elde edilen ham sinyaller kullanılarak dinamik karakteristikler OMA (2023) yazılımı ile belirlenmiştir. Köprü'nün başlangıç ölçümlerinden elde edilen ham sinyallerin GFTAA yöntemine göre elde

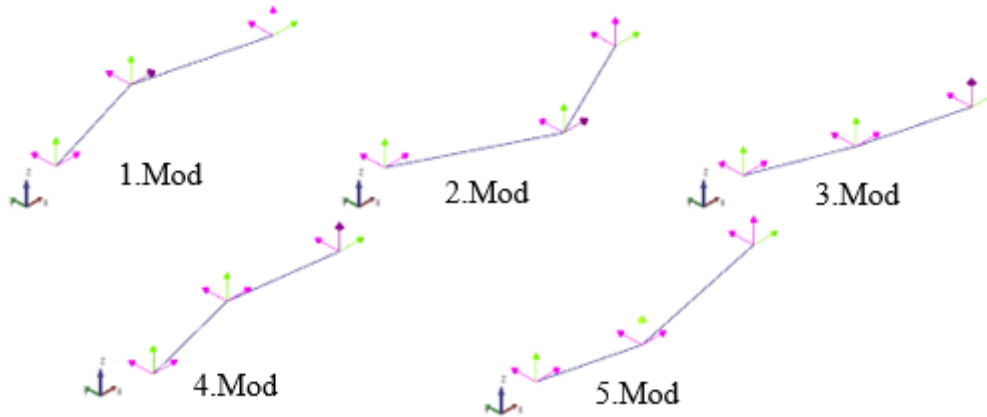
edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değeri Şekil 2.103'te gösterilmektedir. Ayrıca elde edilen frekans ve mod şekilleri sırasıyla Tablo 2.27'de ve Şekil 2.104'te gösterilmiştir.



Şekil 2.103. Tekkale Viyadüğü'ne ait OMA (2023) yazılımından elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değeri

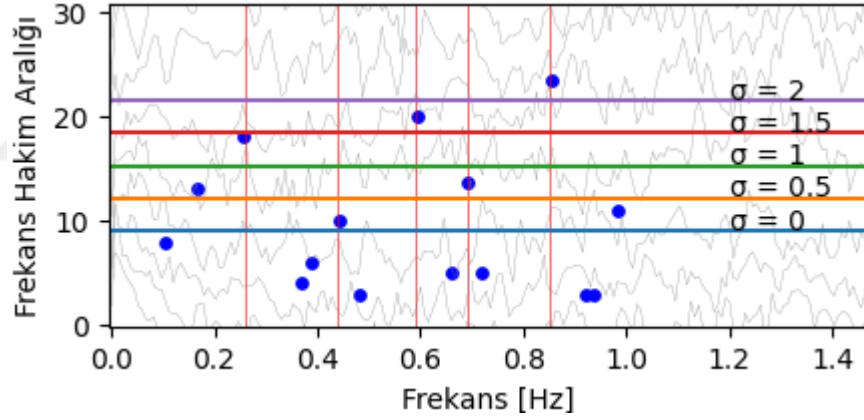
Tablo 2.27. Tekkale Viyadüğü'ne ait GFTAA yönteminden elde edilen frekanslar

Mod Numarası	OMA (2023)	Mod Şekli
1	0,26	1. Öteleme
2	0,44	2. Öteleme
3	0,59	1. Eğilme
4	0,69	2. Eğilme
5	0,85	3. Öteleme

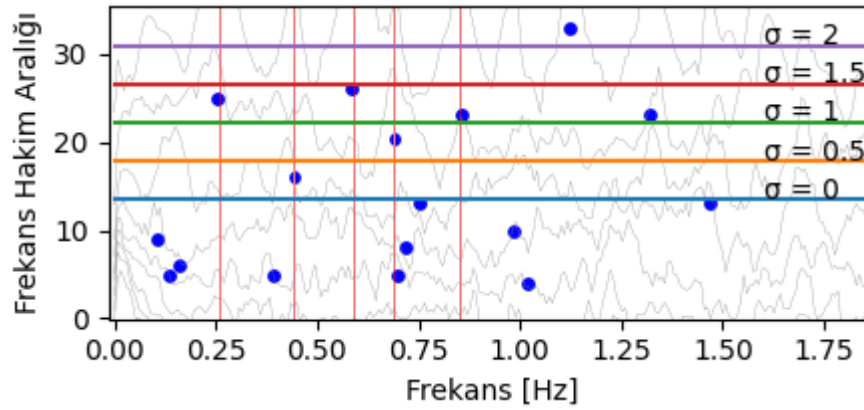


Şekil 2.104. Tekkale Viyadüğü'ne ait OMA (2023) yazılımından GFTAA yöntemine göre elde edilen frekanslara ait mod şekilleri

Tablo 2.27’den görüldüğü üzere, Tekkale Viyadüğü’ne ait GFTAA yöntemine göre elde edilen ilk beş frekans değeri 0,26-0,85Hz aralığında elde edilmiştir. Geliştirilen metodoloji kapsamında dinamik karakteristiklerin otomatik olarak elde edilmesinde filtreleme işlemi uygulanması için eşik değerin belirlenmesi gerekmektedir. Köprünün eşik değerinin belirlenmesi için beş farklı ölçüm veri seti kullanılarak değerlendirilme yapılmıştır. Beş ölçüm veri setinden elde edilen frekans hakim aralıkları ve karşılaştırmalı eşik değerlere ait grafikler Şekil 2.105’te gösterilmiştir. Frekanslara ait minimum eşik değerinin belirlenebilmesi için referans frekanslar dikkate alınarak Şekil 2.105’te çizilen düşey çizgilerin kesiştiği frekans hakim aralığı değerleri hangi eşik çizgisinin üzerinde ise o değer minimum eşik değer olarak dikkate alınıp Tablo 2.28’de gösterilmiştir. Tablo 2.28’de görüldüğü üzere, beş farklı ölçümden elde edilen minimum eşik değerler sıfır olduğundan dolayı dinamik karakteristiklerin otomatik belirlenmesinde eşik değeri sıfır olarak dikkate alınmıştır.



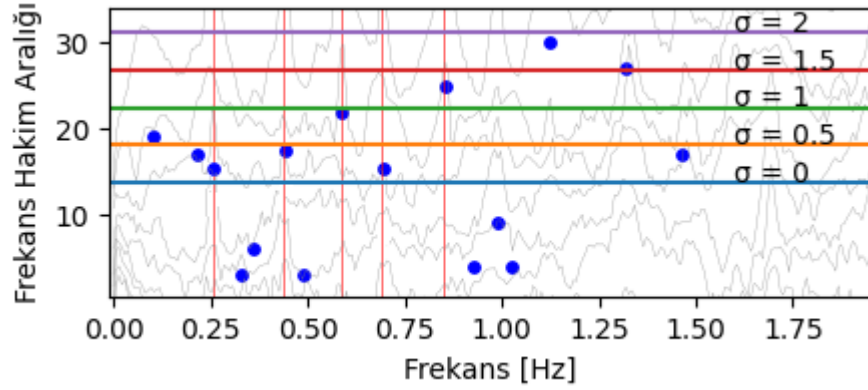
(a)



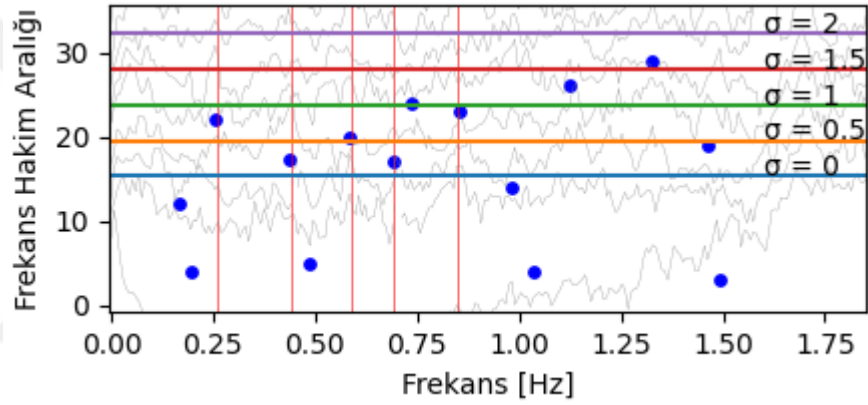
(b)

Şekil 2.105. Tekkale Viyadüğü’ne ait 1.ölçüm (a), 2.ölçüm (b), 3.ölçüm (c), 4.ölçüm (d) ve 5.ölçümden (e) elde edilen frekans hakim aralıkları ve eşik sınırları

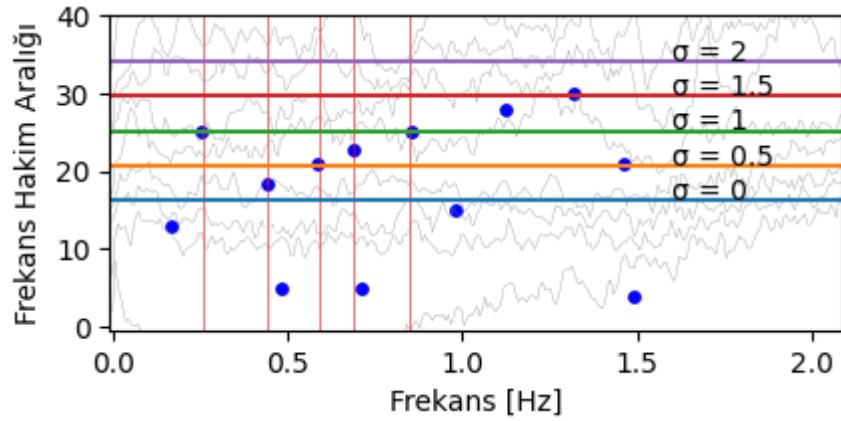
Şekil 2.105'in devamı



(c)



(d)



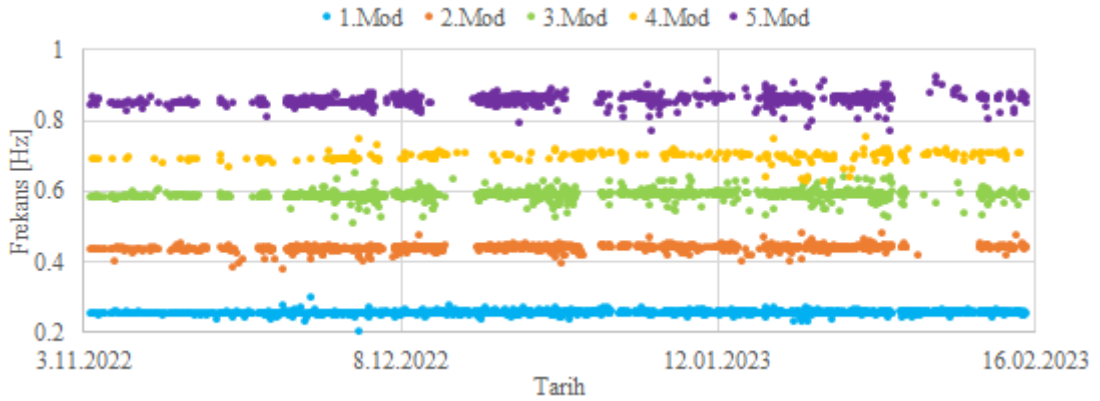
(e)

Geliştirilen metodoloji kapsamında elde edilen parametreler kullanılarak Tekkale Viyadüğü'ne ait dinamik karakteristikler yaklaşık üç ayın sonunda (3 Kasım 2022-14 Şubat

2023) otomatik olarak belirlenmiştir. Geliştirilen metodoloji kapsamında elde edilen frekansların zamana göre değişimleri Şekil 2.106’da gösterilmiştir.

Tablo 2.28. Tekkale Viyadüğü’ne ait beş farklı ölçüm veri setinden elde edilen frekanslara karşılık gelen frekans güven aralığına ait minimum eşik değerleri

Ölçüm No	Minimum eşik değer					Seçilen (Minimum)
	1.Mod	2.Mod	3.Mod	4.Mod	5.Mod	
1	1	0	1,5	0,5	2	0
2	1	0	1	0,5	1	0
3	0	0	0,5	0	1	0
4	0,5	0	0,5	0	0,5	0
5	1	0	0,5	0,5	1	0



Şekil 2.106. Geliştirilen metodoloji kapsamında Tekkale Viyadüğü’ne ait elde edilen frekansların zamana göre değişimleri

2.3.3.4.3. Dinamik Karakteristiklerin Bayes Sinir Ağları ile Güven Aralığının Belirlenmesi

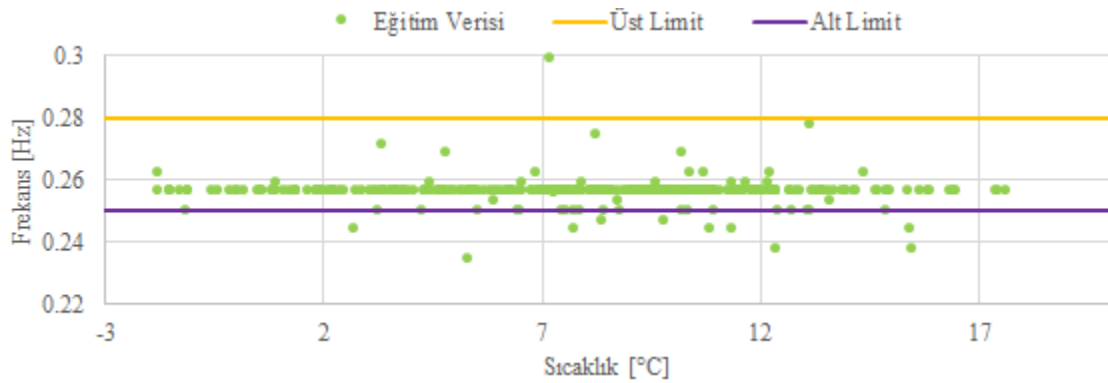
Tekkale Viyadüğü’nde Yapı Sağlığı İzleme sistem verilerinden elde edilen dinamik karakteristikler kullanılarak değişen çevresel koşullar altında Bayes Sinir Ağları ile frekans güven aralıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yaklaşık 3 ay boyunca, 360 adet ölçüm verisi elde edilmiştir. Tekkale Viyadüğü’nün Bayes Sinir Ağı Modelinde giriş parametresi olarak sıcaklık değeri, çıktı olarak frekans değeri kullanılmıştır. Bu parametreler kullanılarak binaya ait Bayes Sinir Ağı modelinin eğitilmesi için çeşitli katman sayılarından oluşan

modellerin testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerin doğrulanmasında kök ortalama karesel hata değeri kullanılmıştır. Farklı katman sayılarına ait elde edilen kök ortalama karesel hata Tablo 2.29’da gösterilmiştir. Tablo 2.29’da görüldüğü üzere seçilen ilk üç katmanda katman sayısı arttıkça eğitim modelinde oluşan hata değeri azalmasına rağmen dört katmanlı sonuçlarda önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Bu nedenle modelin eğitilmesinde 16x16x8 olacak şekilde üç katmanlı Bayes Sinir Ağı modeli tasarlanmıştır.

Oluşturulan Bayes Sinir Ağı modelinde eğitim verisi kullanılarak çevresel etkilerden kaynaklı belirsizliklerin ilk beş frekans değerine ait sıcaklığa bağlı frekans değerlerinin üst ve alt limitleri belirlenmiştir. Binanın ilk beş frekansına ait üst ve alt limitler ile eğitim verisine ait grafikler Şekil 2.107’de gösterilmiştir. Şekil 2.107 incelendiğinde eğitim verisinin büyük bir bölümünün üst ve alt limitleri içerisinde kaldığı görülmektedir.

Tablo 2.29. Tekkale Viyadüğü’nde Bayes Sinir Ağı model eğitiminde çeşitli katman sayılarından elde edilen kök ortalama karesel hata

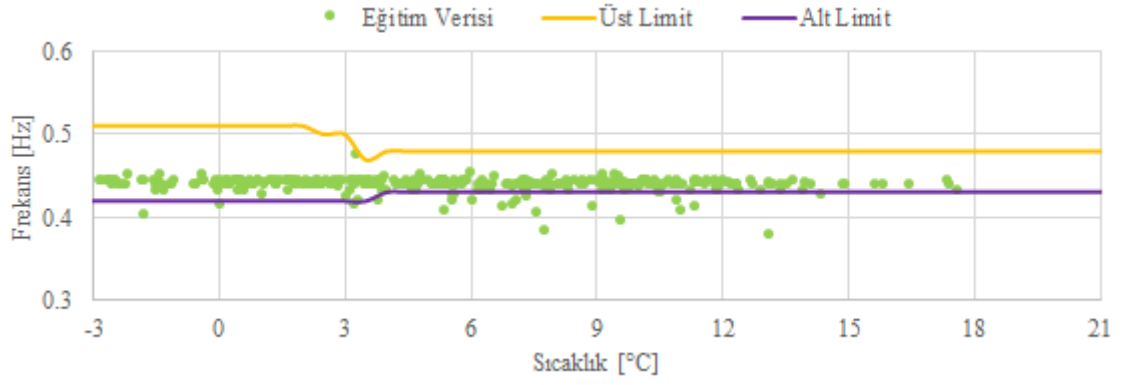
Mod	Katman sayısı				
	3	3x3	8x8	16x16x8	16x16x8x8
1	0,147	0,098	0,085	0,014	0,015
2	0,124	0,088	0,040	0,016	0,019
3	0,117	0,095	0,041	0,020	0,025
4	0,547	0,358	0,249	0,166	0,154
5	0,567	0,425	0,035	0,0223	0,247



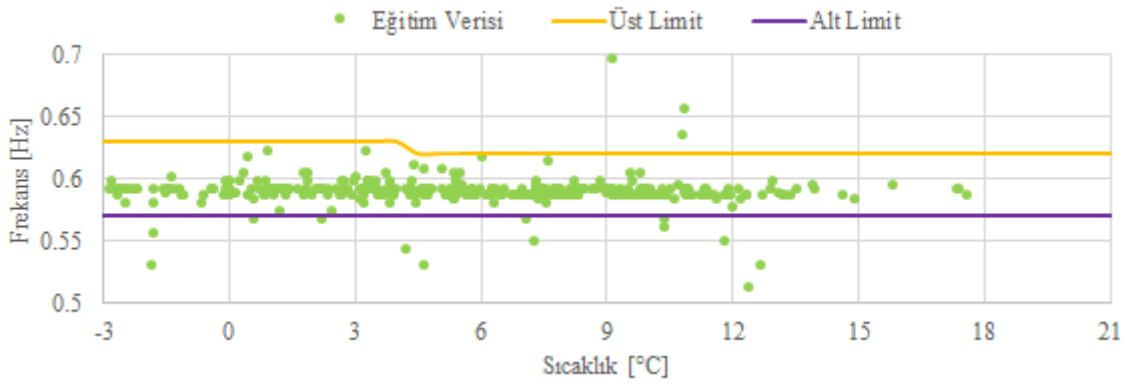
(a)

Şekil 2.107. Tekkale Viyadüğü’nde 1. Mod (a), 2.Mod (b), 3.Mod (c), 4.Mod (d) ve 5.Mod (e) ait Bayes Sinir Ağı modeli ile elde edilen frekans güven aralığı

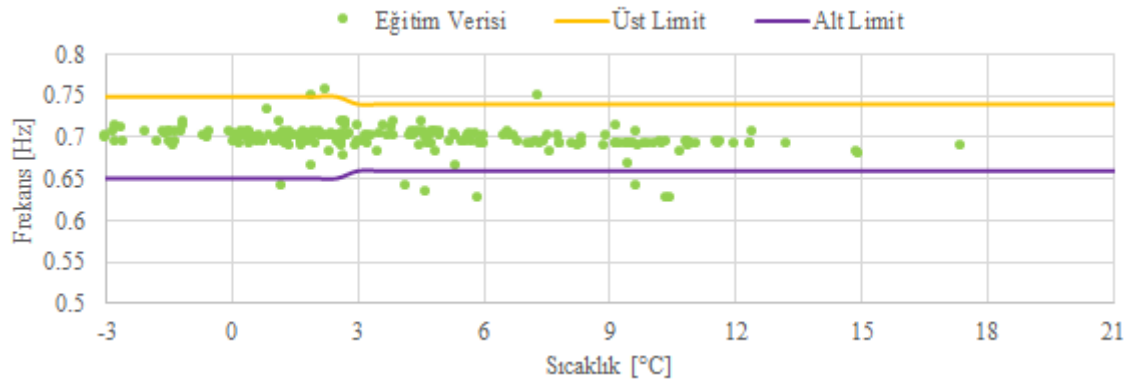
Şekil 2.107'nin devamı



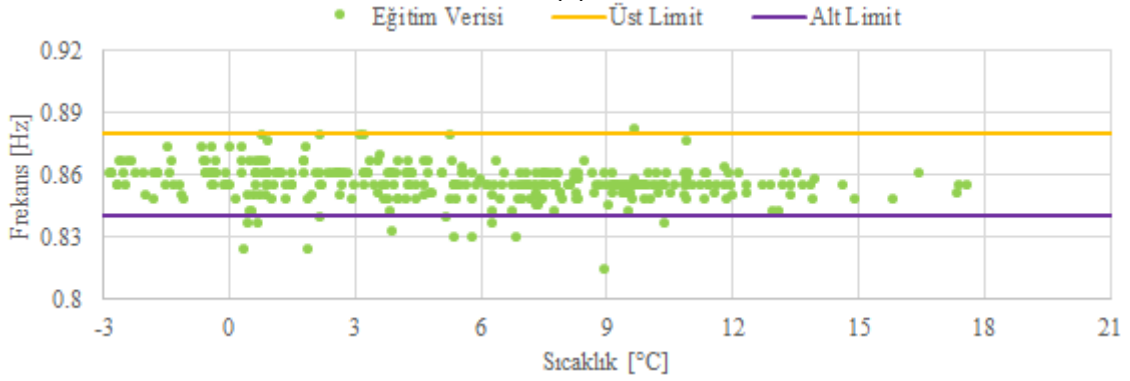
(b)



(c)



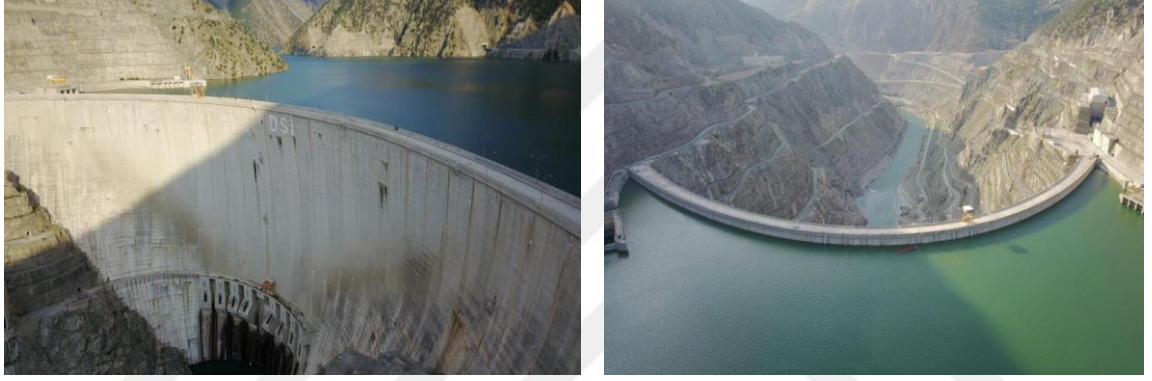
(d)



(e)

2.3.3.5. Deriner Barajı

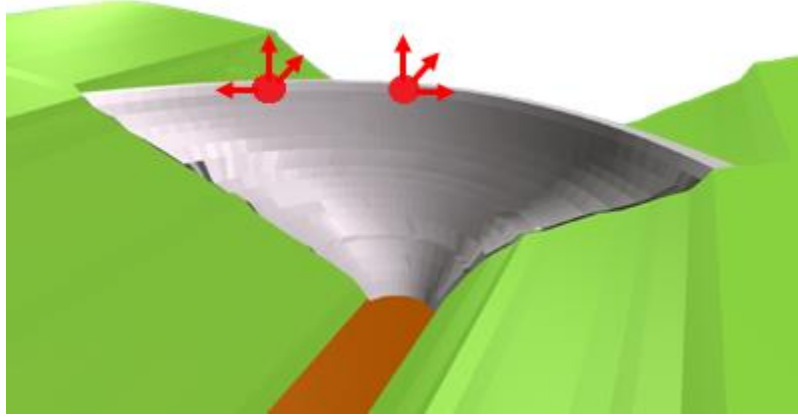
Artvin İlinde bulunan Deriner barajı, çift eğrilikli beton kemer baraj olup, Çoruh Nehri üzerine inşa edilmiştir. Temelden itibaren gövde yüksekliği 249.00m ve kret uzunluğu 720m'dir. 1998 yılında başlanan baraj inşaatı tamamlanarak 2012 yılında su tutulmaya başlamıştır. Halen tam kapasiteli olarak elektrik üretmeye devam eden Deriner Barajı'nın uzun süreli titreşime dayalı ölçümleri gerçekleştirilerek dinamik karakteristiklerin zamana bağlı değişimleri ve Bayes Sinir Ağları ile frekans güven aralıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Artvin Deriner Barajı'na ait genel görseller Şekil 2.108'de gösterilmiştir.



Şekil 2.108. Deriner Barajı'na ait genel görseller

2.3.3.5.1. Sensör Konfigürasyon Planı

Barajın titreşime dayalı yapı sağlığı izlenmesinde kretin dörtte biri mesafesine ve ortasına birer adet üç eksenli ivmeölçer sensörü olmak üzere toplamda iki adet sensör yerleştirilmiştir. Veriler, Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformuna entegre edilmiştir. Üç eksenli ivmeölçer sensörü olarak SARA SL06 modeli kullanılmıştır. İvmeölçer sensör yerleşimi ve kurulumlarına ait görsel Şekil 2.109'da gösterilmiştir. Ayrıca Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformundan elde edilen verilere ait ana görsel ekranı Şekil 2.110'da verilmiştir.



(a)



(b)

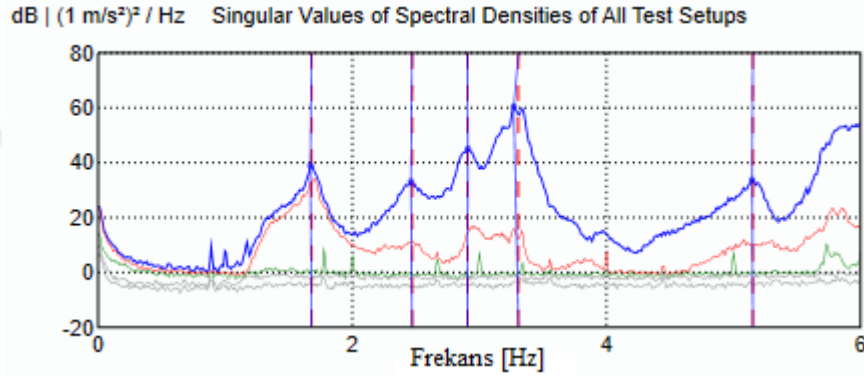
Şekil 2.109. Deriner Barajı'na ait ivmeölçer sensör yerleşimi (a) ve sensör kurulumlarına (b) ait görsel



Şekil 2.110. Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda Deriner Barajı'na ait ana görsel ekranı

2.3.3.5.2. Geliştirilen Metodoloji Kapsamında Dinamik Karakteristiklerin Otomatik Olarak Belirlenmesi

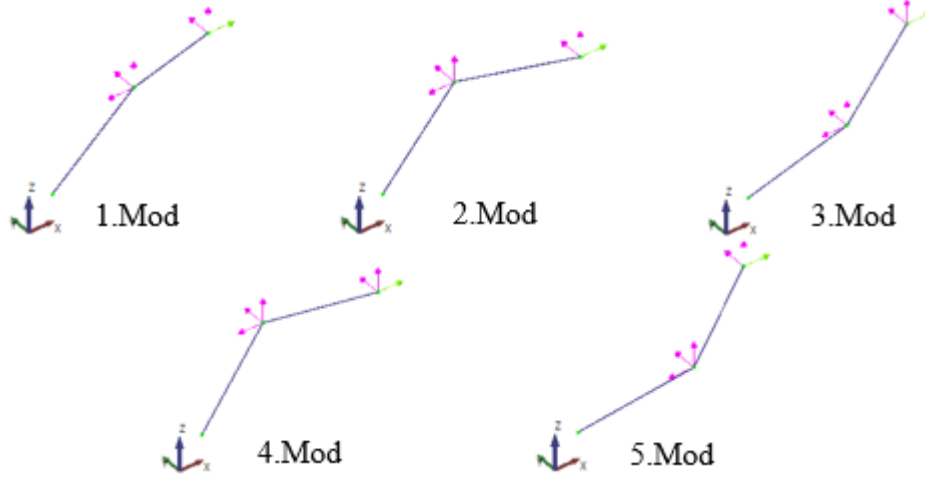
Deriner Barajı'nda 15 Ağustos 2022-14 Şubat 2023 tarihleri arasında yaklaşık 6 aylık sürekli izleme süreci gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte çalışma kapsamında geliştirilen metodoloji ile dinamik karakteristiklerin otomatik olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak referans alınacak dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Başlangıç ölçümlerinden 0-100Hz aralığında ve 1 saatlik ölçüm verisi alınmıştır. Elde edilen ham sinyaller kullanılarak dinamik karakteristikler OMA (2023) yazılımı ile belirlenmiştir. Barajın başlangıç ölçümlerinden elde edilen ham sinyallerin GFTAA yöntemine göre hesaplanan spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri Şekil 2.111'de gösterilmektedir. Ayrıca elde edilen frekans ve mod şekilleri sırasıyla Tablo 2.30'da ve Şekil 2.112'de gösterilmiştir. Tablo 2.30'da görüldüğü üzere, Deriner Barajı'nda GFTAA yöntemine göre elde edilen frekans değerleri 1,68-5,15Hz aralığında elde edilmiştir.



Şekil 2.111. Deriner Barajı'na ait OMA (2023) yazılımından elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

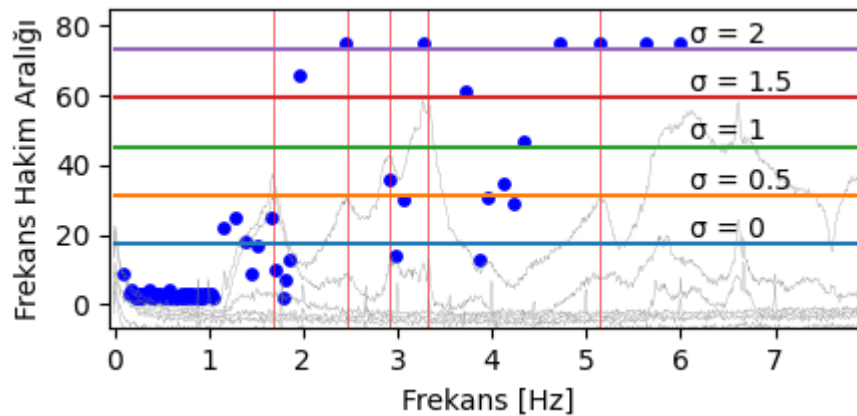
Tablo 2.30. Deriner Barajı'na ait GFTAA yönteminden elde edilen frekanslar

Mod Numarası	OMA (2023)
1	1,68
2	2,47
3	2,91
4	3,31
5	5,15



Şekil 2.112. Deriner Barajı'na ait OMA (2023) yazılımından GFTAA yöntemine göre elde edilen frekanslara ait mod şekilleri

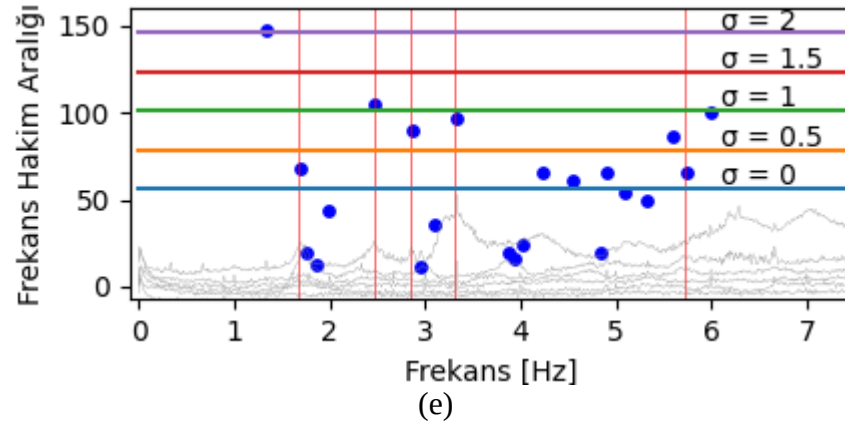
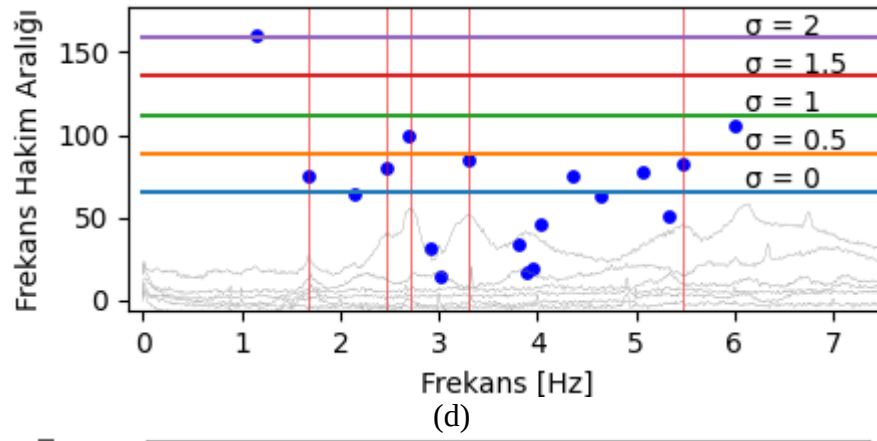
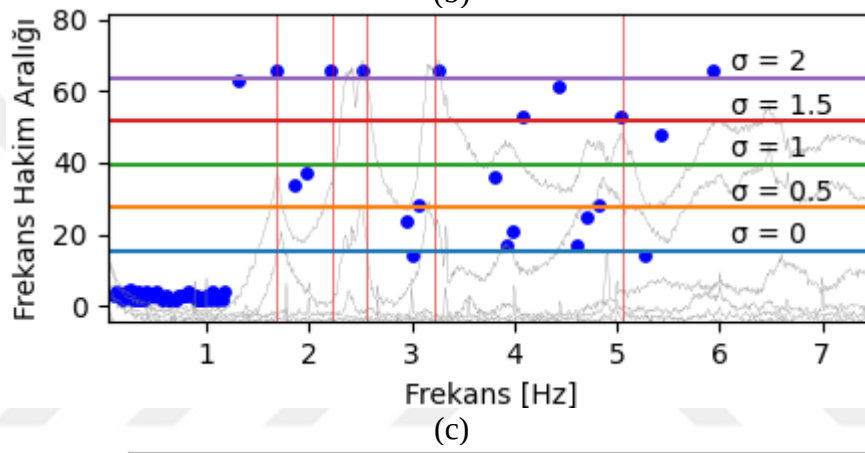
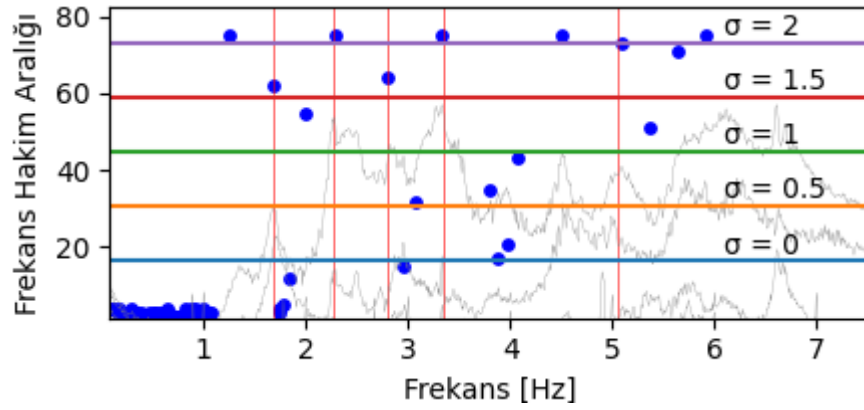
Geliştirilen metodoloji kapsamında dinamik karakteristiklerin otomatik olarak elde edilmesi için filtreleme işlemi uygulanarak eşik değerin belirlenmesi gerekmektedir. Deriner Barajı'nda eşik değerin belirlenmesi için beş farklı ölçüm veri seti kullanılarak değerlendirme yapılmıştır. Beş ölçüm veri setinden elde edilen frekans hakim aralıkları ve karşılaştırmalı eşik değerlere ait grafikler Şekil 2.113'te gösterilmiştir. Frekanslara ait minimum eşik değerlerin belirlenebilmesi için referans frekanslar dikkate alınarak Şekil 2.113'te çizilen düşey çizgilerin kesiştiği frekans hakim aralığı değerleri hangi eşik çizgisinin üzerinde ise o değer minimum eşik değer olarak dikkate alınıp Tablo 2.31'de özetlenmiştir.



(a)

Şekil 2.113. Deriner Barajı'na ait 1.ölçüm (a), 2.ölçüm (b), 3.ölçüm (c), 4.ölçüm (d) ve 5.ölçümden (e) elde edilen frekans hakim aralıkları ve eşik sınırları

Şekil 2.113'ün devamı

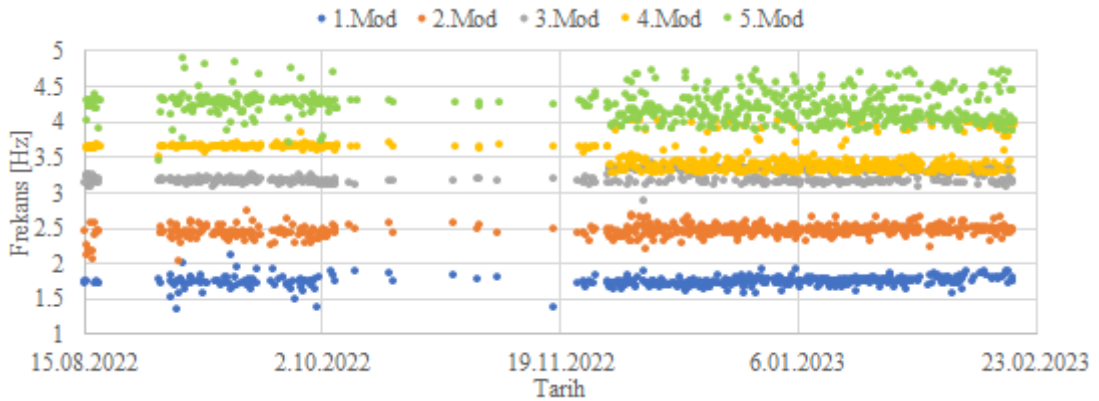


Tablo 2.31’den görüldüğü üzere, beş farklı ölçümden elde edilen minimum eşik değerleri birinci, dördüncü ve beşinci ölçümler için 0, ikinci ve üçüncü ölçümler için ise 1,5 olarak belirlenmiştir. Bu değerler arasından da minimum değer seçilerek dinamik karakteristiklerin otomatik belirlenmesinde eşik değer sıfır olarak dikkate alınmıştır.

Tablo 2.31. Deriner Barajı’na ait beş farklı ölçüm veri setinden elde edilen frekanslara karşılık gelen frekans güven aralığına ait minimum eşik değerleri

Ölçüm No	Minimum eşik değer					Seçilen (Minimum)
	1.Mod	2.Mod	3.Mod	4.Mod	5.Mod	
1	0	2	0,5	2	2	0
2	1,5	2	1,5	2	1,5	1,5
3	2	2	2	2	1,5	1,5
4	0	0	0,5	0	0	0
5	0	1	0,5	0,5	0	0

Geliştirilen metodoloji kapsamında elde edilen parametreler kullanılarak Artvin Deriner Barajı’na ait dinamik karakteristikler yaklaşık altı aylık izleme sonucunda (15 Ağustos 2022-14 Şubat 2023) otomatik olarak belirlenmiştir. Geliştirilen metodoloji kapsamında elde edilen frekans değerlerinin zamana göre değişimleri Şekil 2.114’te gösterilmiştir.



Şekil 2.114. Geliştirilen metodoloji kapsamında Artvin Deriner Barajı’na ait elde edilen frekansların zamana göre değişimleri

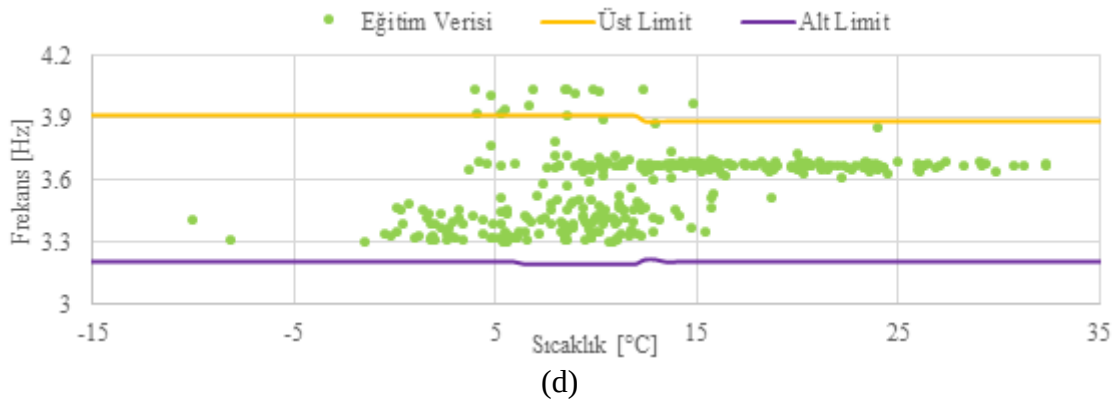
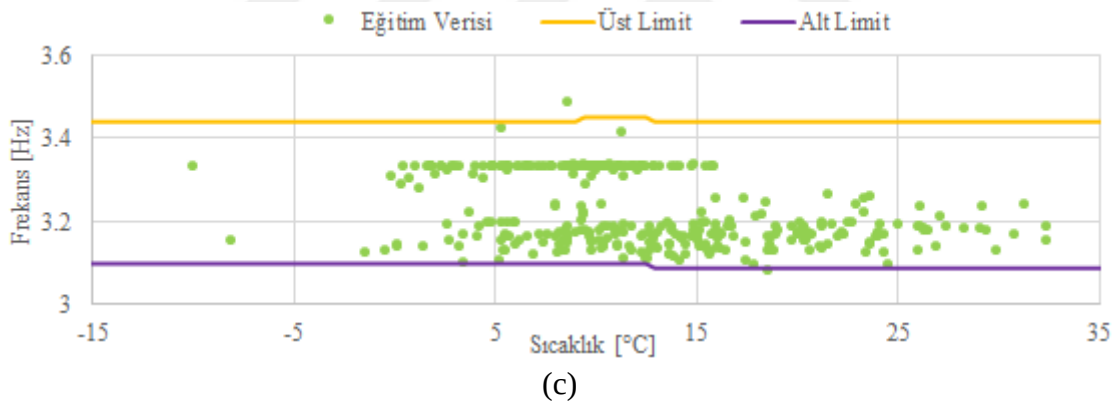
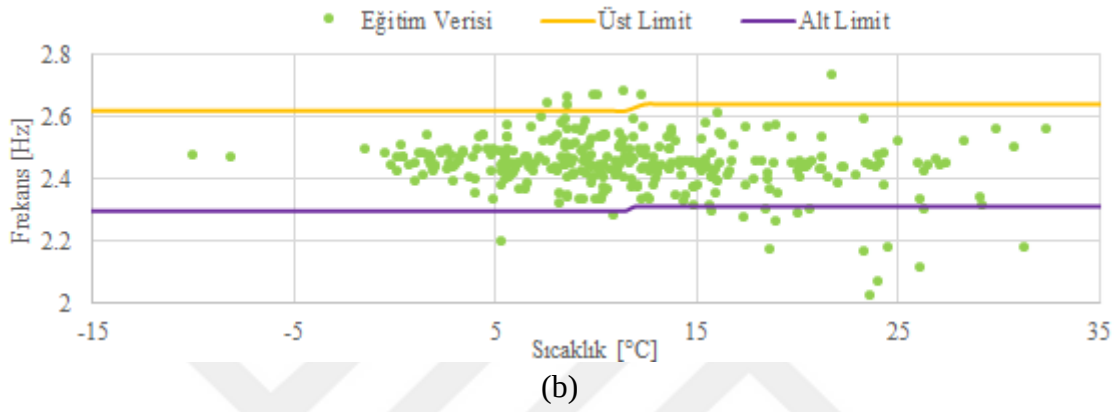
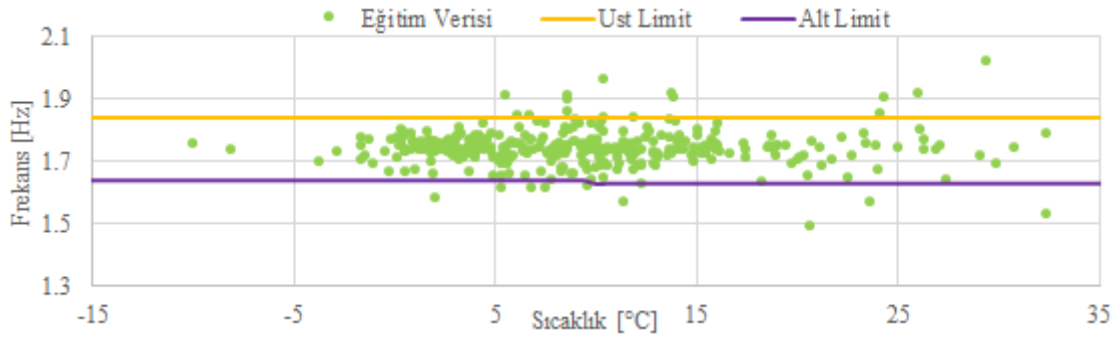
2.3.3.5.3. Dinamik Karakteristiklerin Bayes Sinir Ağları ile Güven Aralığının Belirlenmesi

Artvin Deriner Barajı'nda Yapı Sağlığı İzleme ile elde edilen dinamik karakteristikler kullanılarak değişen çevresel koşullar altında Bayes Sinir Ağları kullanılarak frekans güven aralıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yaklaşık 6 ay boyunca, 840 adet ölçüm verisi elde edilmiştir. Artvin Deriner Barajın'a ait Bayes Sinir Ağı Modelinde giriş parametresi olarak sıcaklık değeri, çıktı parametresi olarak frekans değeri kullanılmıştır. Bu parametreler kullanılarak baraja ait Bayes Sinir Ağı modelinin eğitilmesi için çeşitli katman sayılarından oluşan modellerin testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerin doğrulanmasında kök ortalama karesel hata değeri kullanılmıştır. Farklı katman sayılarına ait elde edilen kök ortalama karesel hata Tablo 2.32'de gösterilmiştir. Tablo 2.32'de görüldüğü üzere seçilen ilk üç katmanda katman sayısı arttıkça eğitim modelinde oluşan hata değeri azalmasına rağmen dört katmanlı sonuçlarda önemli değişiklik gözlenmemiştir. Bu nedenle modelin eğitilmesinde 16x16x8 olacak şekilde üç katmanlı Bayes Sinir Ağı modeli tasarlanmıştır.

Oluşturulan Bayes Sinir Ağı modelinde eğitim verisi kullanılarak çevresel etkilerden kaynaklı belirsizliklerin ilk dört frekansına ait sıcaklığa bağlı frekans değerlerinin üst ve alt limitleri belirlenmiştir. Minarenin ilk dört frekansına ait üst ve alt limitler ile eğitim verisine ait grafikler Şekil 2.115'te gösterilmiştir. Şekil 2.115 incelendiğinde eğitim verisinin büyük bir bölümünün üst ve alt limitleri içerisinde kaldığı görülmektedir.

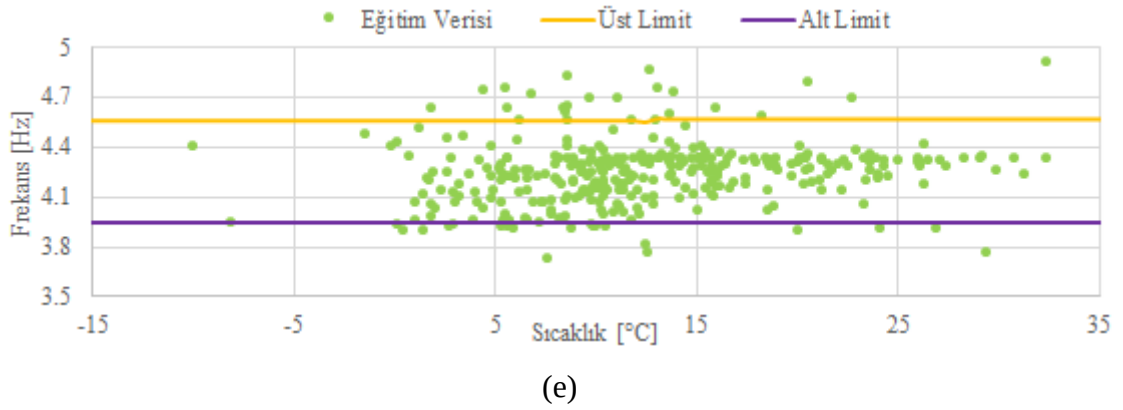
Tablo 2.32. Artvin Deriner Barajı'nda Bayes Sinir Ağı model eğitiminde çeşitli katman sayılarından elde edilen kök ortalama karesel hata

Mod	Katman sayısı				
	3	3x3	8x8	16x16x8	16x16x8x8
1	0,541	0,247	0,115	0,098	0,095
2	0,654	0,325	0,174	0,112	0,117
3	0,247	0,147	0,138	0,133	0,131
4	0,741	0,547	0,357	0,292	0,287
5	0,874	0,654	0,415	0,304	0,321



Şekil 2.115. Trabzon Şehir Cami Minaresi'nde 1. Mod (a), 2.Mod (b), 3.Mod (c) ve 4.Mod (d) ve 5.Moda ait Bayes Sinir Ağı modeli ile elde edilen frekans güven aralığı

Şekil 2.115'in devamı



2.3.3.6. Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası

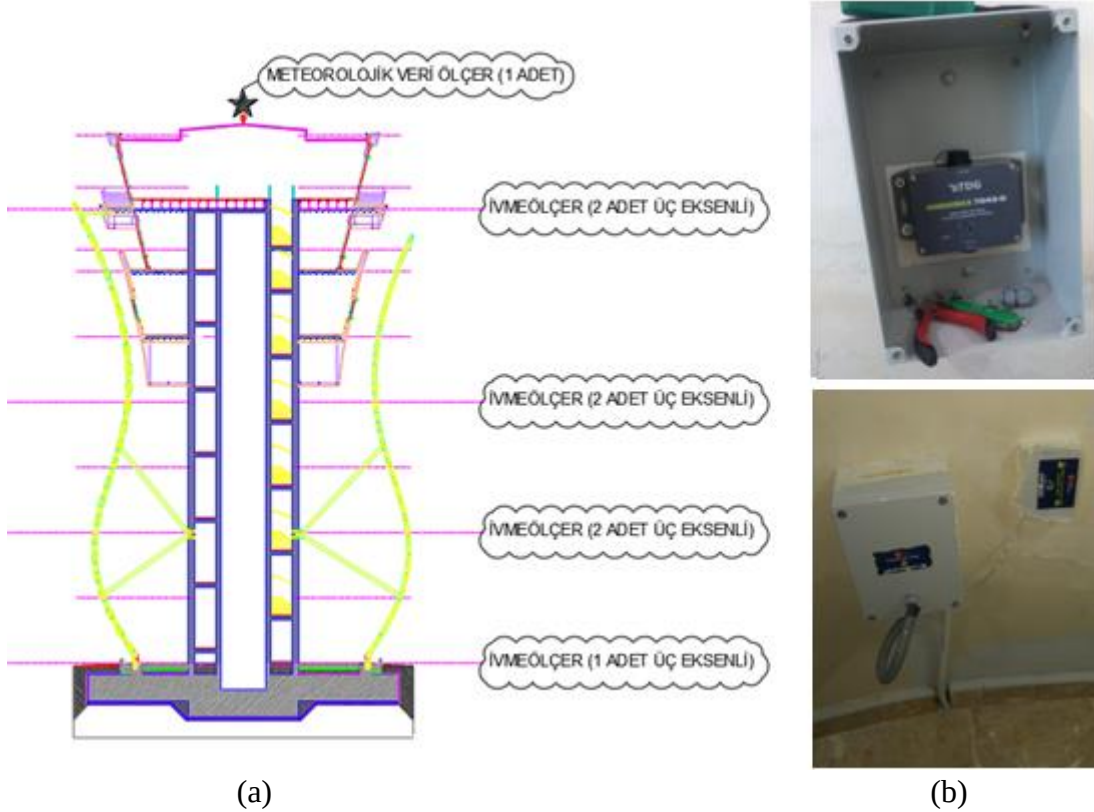
Rize-Artvin Havalimanı Rize İli, Pazar İlçesinde yer almakta olup inşaatı 2022 yılında tamamlanmıştır. Teknik Blok Kule Binası, iç içe tasarlanmış çekirdek betonarme perde taşıyıcı sisteme sahip olup, temel kotundan yaklaşık 30,5m yüksekliğe sahiptir. Dış ve iç perde kalınlıkları sırasıyla 40cm ve 30cm iken çapları sırasıyla 7,10m ve 3,50m'dir. İki çekirdeği birbirine bağlayan ve çekirdek yüksekliği boyunca sarmal şeklinde yükselen betonarme merdiven bulunmaktadır. Betonarme çekirdek üzerinde çeşitli mimari özelliklere sahip yaklaşık 1,00m x 2,00m ebatlarına sahip kapı ve pencere boşlukları bulunmaktadır. Kule binası, zemin+7 kat olmak üzere toplam 8 kattan oluşmaktadır. Teknik Blok Kule Binası'na ait bazı görseller Şekil 2.116'da gösterilmiştir.



Şekil 2.116. Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası'na ait genel görseller (URL-2, 2022; URL-3, 2023)

2.3.3.6.1. Sensör Konfigürasyon Planı

Teknik Blok Kule Binası'nda ivmeölçer, şekil değiştirme ölçer ve eğim ölçer sensörleri bulunmaktadır. Tez çalışması kapsamında titreşime dayalı Yapı Sağlığı İzlemesi ile yapıya kurulan sensörlerden elde edilen verilerin kullanılarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Teknik Blok Kule Binası'nda ivmeölçer sensörü zemin katta 1 adet, 2. kat, 4. kat ve 7. katlarda 2'şer adet olmak üzere toplam 7 adet üç eksenli ivmeölçer sensörü bulunmaktadır. Üç eksenli ivmeölçer sensörü olarak SENSEBOX 7043-D kullanılmaktadır. Ayrıca çatı katında meteorolojik veri ölçer sensörü bulunmaktadır. Tüm sensörlere ait veriler, Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformuna entegre edilmiştir. İvmeölçer sensör yerleşimi ve kurulumlarına ait görsel Şekil 2.117'de gösterilmiştir. Ayrıca Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformundan elde edilen verilere ait ana görsel ekranı Şekil 2.118'de verilmiştir.



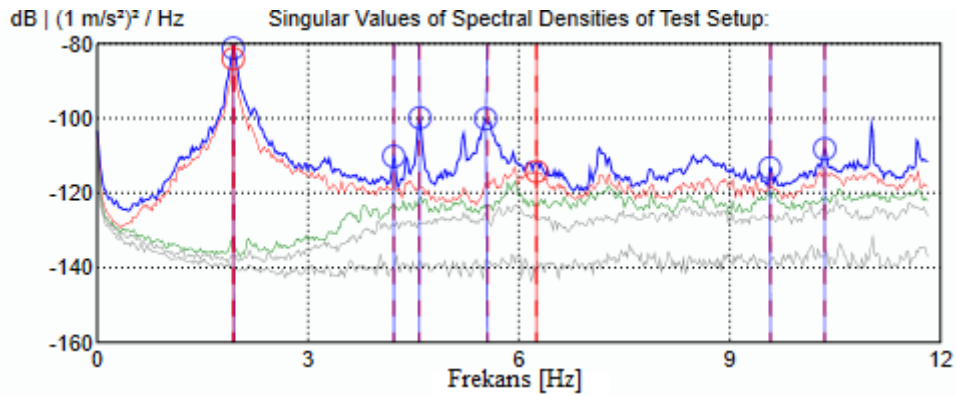
Şekil 2.117. Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası'na ait ivmeölçer sensör yerleşimi (a) ve sensör kurulumlarına (b) ait görsel



Şekil 2.118. Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası'na ait ana görsel ekranı

2.3.3.6.2. Geliştirilen Metodoloji Kapsamında Dinamik Karakteristiklerin Otomatik Olarak Belirlenmesi

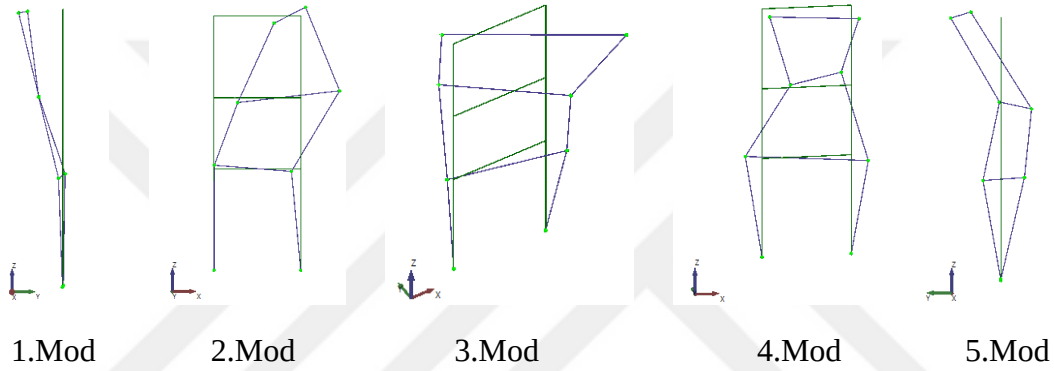
Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası'nda 3 Ekim 2022-14 Şubat 2023 tarihleri arasında yaklaşık 5 aylık sürekli izleme süreci gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte çalışma kapsamında geliştirilen metodoloji ile dinamik karakteristiklerin otomatik olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak referans alınacak dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Başlangıç ölçümlerinden 0-200Hz aralığında ve 30 dakikalık ölçüm verisi alınmıştır. Elde edilen ham sinyaller kullanılarak dinamik karakteristikler OMA (2023) yazılımı ile belirlenmiştir. Kule binasının başlangıç ölçümlerinden elde edilen ham sinyallerin GFTAA yöntemine göre elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri Şekil 2.119'da gösterilmektedir. Ayrıca elde edilen frekans ve mod şekilleri sırasıyla Tablo 2.33'te ve Şekil 2.120'de gösterilmiştir.



Şekil 2.119. Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kulesi'ne ait OMA (2023) yazılımından elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

Tablo 2.33. Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası'na ait GFTAA yönteminden elde edilen frekanslar

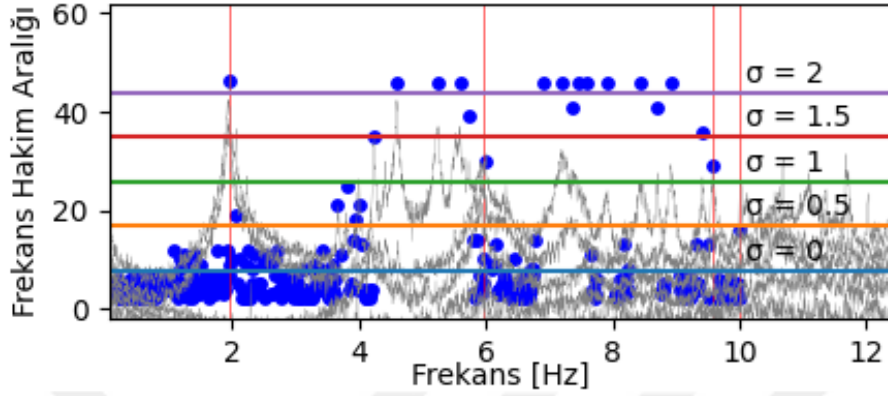
Mod Numarası	OMA (2023)	Mod Şekli
1	1,94	1. Öteleme
2	1,94	Burulma
3	6,25	2. Öteleme
4	9,58	1. Eğilme
5	10,35	2. Eğilme



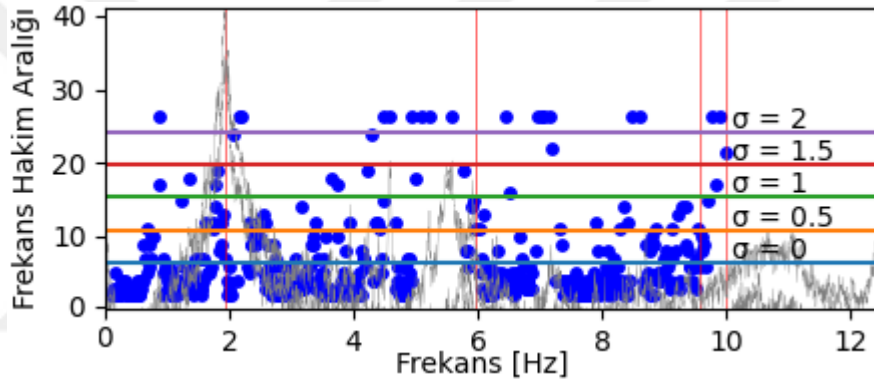
Şekil 2.120. Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası'na ait OMA (2023) yazılımından GFTAA yöntemine göre elde edilen frekanslara ait mod şekilleri

Tablo 2.33'te görüldüğü üzere, GFTAA yöntemine göre ilk beş frekans değeri 1,94-10,35Hz aralığında elde edilmiştir. Geliştirilen metodoloji kapsamında dinamik karakteristiklerin otomatik olarak elde edilmesi için filtreleme işlemi uygulanarak eşik değerlerin belirlenmesi gerekmektedir. Teknik Blok Kule Binası'nda eşik değerlerin belirlenmesi için beş farklı ölçüm veri seti kullanılarak değerlendirme yapılmıştır. Beş ölçüm veri setinden elde edilen frekans hakim aralıkları ve karşılaştırmalı eşik değerlere ait grafikler Şekil 2.121'de gösterilmiştir. Frekanslara ait minimum eşik değerinin belirlenebilmesi için referans frekanslar dikkate alınarak Şekil 2.121'de çizilen düşey çizgilerin kesiştiği frekans hakim aralığı değerleri hangi eşik çizgisinin üzerinde ise o değer minimum eşik değer olarak dikkate alınıp Tablo 2.34'te gösterilmiştir. Tablo 2.34'te görüldüğü üzere, beş farklı ölçümden elde edilen minimum eşik değerleri birinci, dördüncü ve beşinci ölçümler için 0, ikinci ve üçüncü ölçümler için ise 0,5 olarak belirlenmiştir. Bu

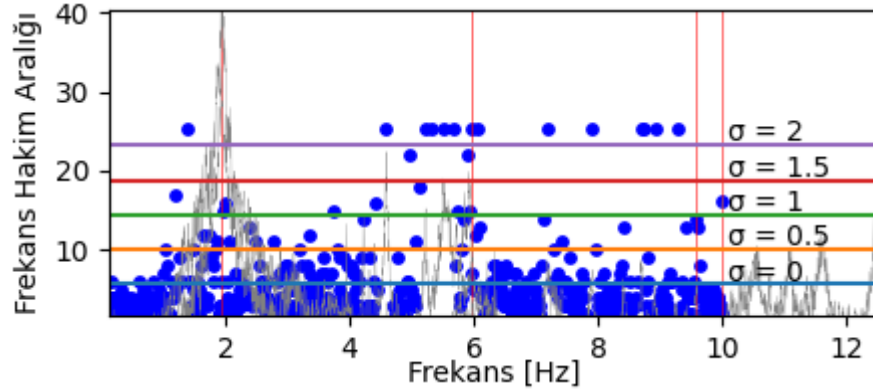
değerler arasından da minimum değer seçilerek dinamik karakteristiklerin otomatik belirlenmesinde eşik değeri sıfır olarak dikkate alınmıştır.



(a)



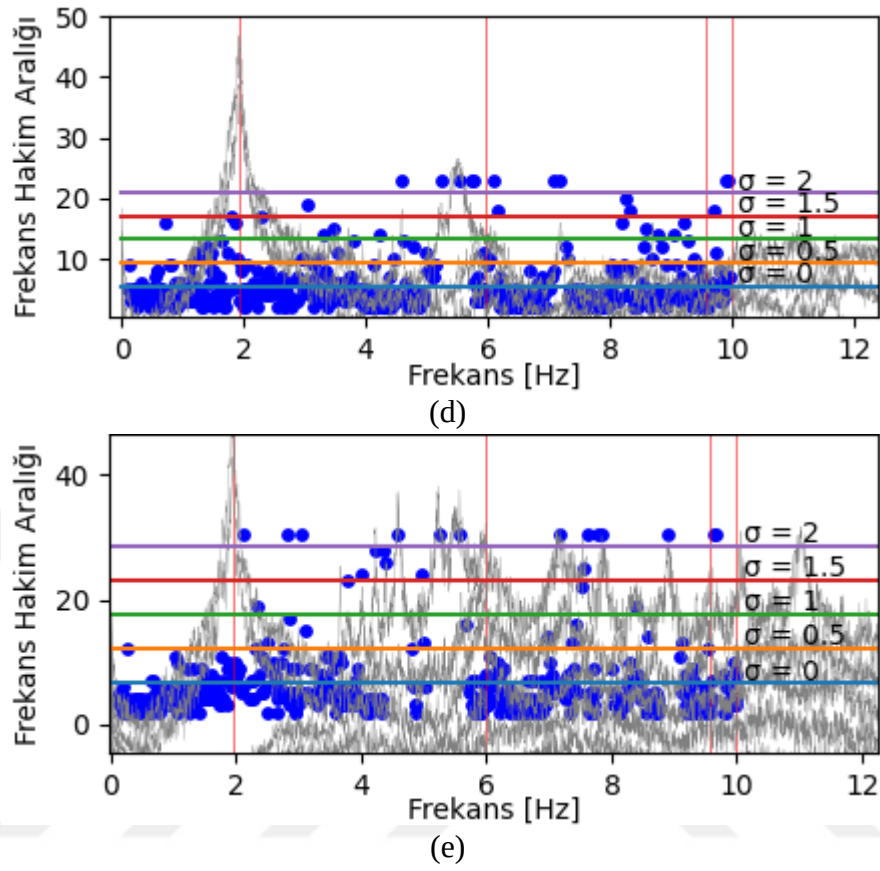
(b)



(c)

Şekil 2.121. Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası'na ait 1.ölçüm (a), 2.ölçüm (b), 3.ölçüm (c), 4.ölçüm (d) ve 5.ölçümden (e) elde edilen frekans hakim aralıkları ve eşik sınırları

Şekil 2.121'in devamı

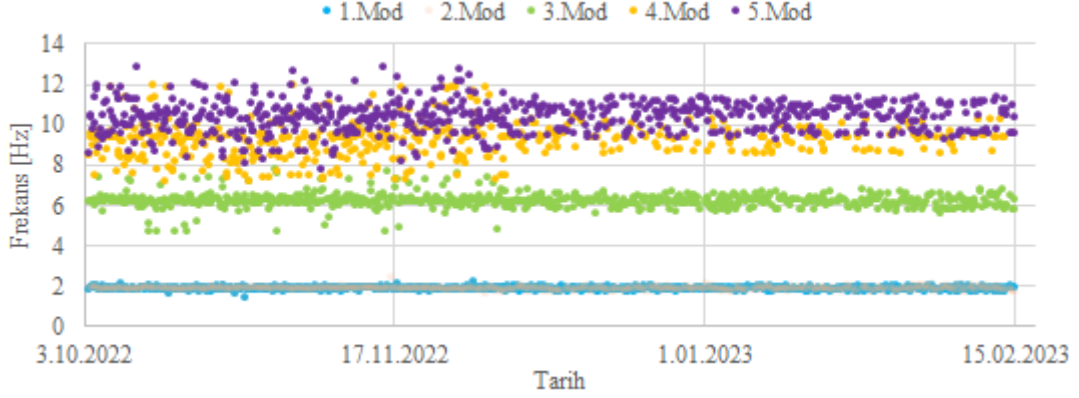


Tablo 2.34. Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası'na ait beş farklı ölçüm veri setinden elde edilen frekanslara karşılık gelen frekans güven aralığına ait minimum eşik değerleri

Ölçüm No	Minimum eşik değer					Seçilen (Minimum)
	1.Mod	2.Mod	3.Mod	4.Mod	5.Mod	
1	2	0,5	1	1	0	0
2	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5
3	1	1	1	0,5	1	0,5
4	1	1	0,5	0	0	0
5	0	0	0	0,5	0	0

Geliştirilen metodoloji kapsamında elde edilen parametreler kullanılarak Teknik Blok Kule Binası'na ait dinamik karakteristikler yaklaşık 5 aylık izleme sürecinin sonunda (3

Ekim 2022-14 Şubat 2023) otomatik olarak belirlenmiştir. Geliştirilen metodoloji kapsamında elde edilen frekansların zamana göre değişimleri Şekil 2.122’de gösterilmiştir.



Şekil 2.122. Geliştirilen metodoloji kapsamında Artvin Deriner Barajı’na ait elde edilen frekansların zamana göre değişimleri

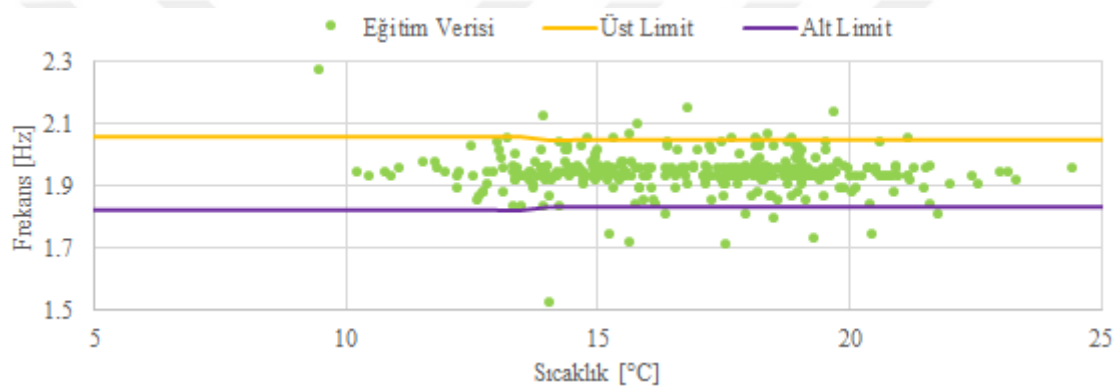
2.3.3.6.3. Dinamik Karakteristiklerin Bayes Sinir Ağları ile Güven Aralığının Belirlenmesi

Rize-Artvin Havalimanı Kule Binası’nda Yapı Sağlığı İzleme ile elde edilen dinamik karakteristikler kullanılarak değişen çevresel koşullar altında Bayes Sinir Ağları ile frekans güven aralıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. 5 ay boyunca, 650 adet ölçüm verisi elde edilmiştir. Teknik Blok Kule Binası’na ait Bayes Sinir Ağı Modelinde giriş parametresi olarak sıcaklık değeri, çıktı parametresi olarak frekans değeri kullanılmıştır. Bu parametreler kullanılarak baraja ait Bayes Sinir Ağı modelinin eğitilmesi için çeşitli katman sayılarından oluşan modellerin testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerin doğrulanmasında kök ortalama karesel hata değeri kullanılmıştır. Farklı katman sayılarına ait elde edilen kök ortalama karesel hata değerleri Tablo 2.35’te gösterilmiştir. Tablo 2.35’te görüldüğü üzere seçilen ilk üç katmanda katman sayısı arttıkça eğitim modelinde oluşan hata değeri azalmasına rağmen dört katmanlı sonuçlarda önemli değişiklik gözlenmemiştir. Bu nedenle modelin eğitilmesinde 16x16x8 olacak şekilde üç katmanlı Bayes Sinir Ağı modeli tasarlanmıştır.

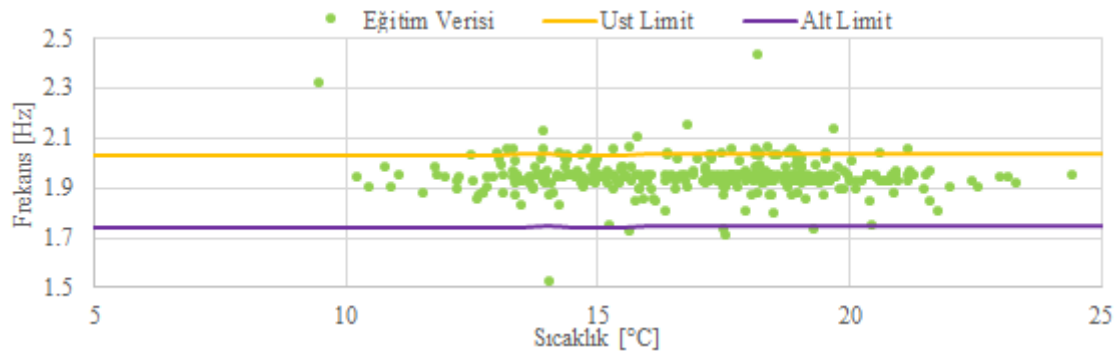
Oluşturulan Bayes Sinir Ağı modelinde eğitim verisi kullanılarak çevresel etkilerden kaynaklı belirsizliklerin ilk dört frekansına ait sıcaklığa bağlı frekans değerlerinin üst ve alt limitleri belirlenmiştir. Minarenin ilk dört frekansına ait üst ve alt limitler ile eğitim verisine ait grafikler Şekil 2.123’te gösterilmiştir. Şekil 2.123 incelendiğinde eğitim verisinin büyük bir bölümünün üst ve alt limitleri içerisinde kaldığı görülmektedir.

Tablo 2.35. Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası'nda Bayes Sinir Ağı model eğitiminde çeşitli katman sayılarından elde edilen kök ortalama karesel hata

Mod	Katman sayısı				
	3	3x3	8x8	16x16x8	16x16x8x8
1	0,187	0,145	0,124	0,097	0,094
2	0,218	0,167	0,154	0,119	0,115
3	0,324	0,298	0,278	0,231	0,245
4	1,895	1,547	1,354	1,091	1,054
5	2,478	1,389	1,250	1,046	1,125



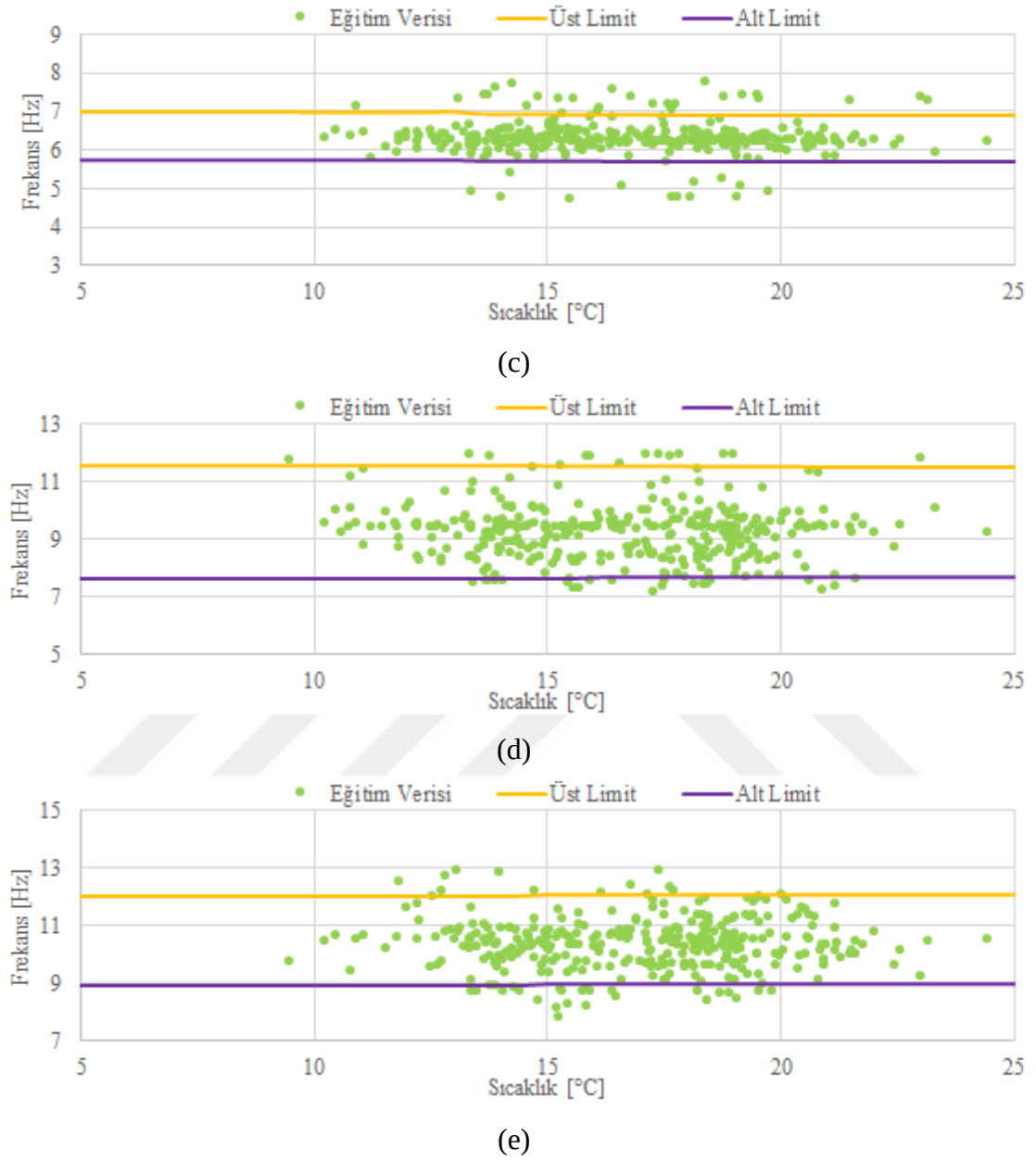
(a)



(b)

Şekil 2.123. Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası'nda 1. Mod (a), 2.Mod (b), 3.Mod (c) ve 4.Mod (d) ve 5.Mod (e) ait Bayes Sinir Ağı modeli ile elde edilen frekans güven aralığı

Şekil 2.123'ün devamı



2.3.3.7. Rize-Artvin Havalimanı Terminal Binası

Rize-Artvin Havalimanı Terminal Binası, ana terminal binası ve VIP olmak üzere iki ayrı yapıdan oluşmaktadır. Ana terminal binasının uzunluğu 266,40m, genişliği 75,60m'dir. VIP binasının uzunluğu ise 44m, genişliği 75,60m'dir. Her iki binada 4,5m uzunluğunda konsol saçaklar mevcuttur. Dış cephe ve çatı kısımları çelik, iç kısımlar ise betonarme taşıyıcı sistem olarak tasarlanmıştır. Çelik taşıyıcı sistem yüksekliği 14,55m olan ikili

istavroz kolonlardan ve iki noktadan V çaprazlar ve betonarme kolonlarla desteklenen kafes kirişlerden oluşmaktadır. Rize-Artvin Havalimanı Terminal Binası'na ait görseller Şekil 2.124'te gösterilmiştir.

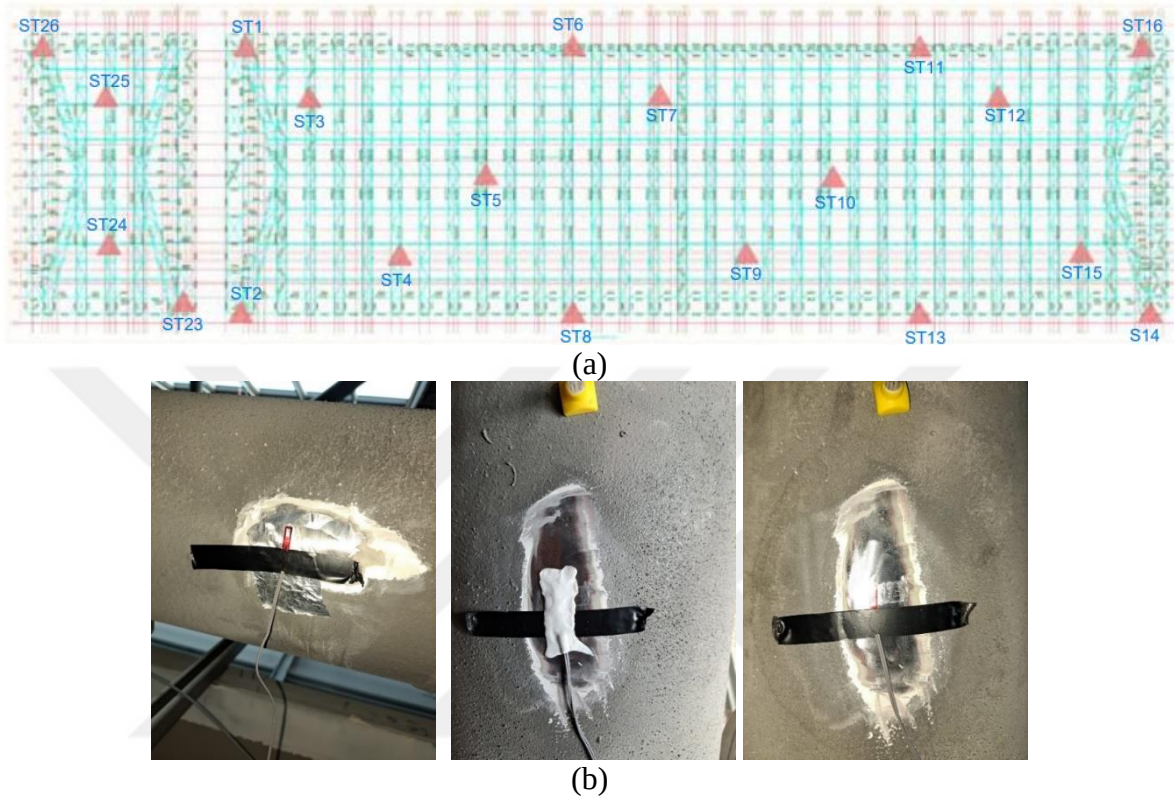


Şekil 2.124. Rize-Artvin Havalimanı Terminal Binası'na ait genel görseller

2.3.3.7.1. Sensör Konfigürasyon Planı

Terminal Binası'nda ivmeölçer, şekil değiştirme ölçer ve eğim ölçer sensörleri bulunmaktadır. Tez çalışması kapsamında çelik çatıda bulunan bazı şekil değiştirme ölçerlerden elde edilen veriler kullanılarak Bayes Sinir Ağları ile güven aralıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Terminal Binası'nda çeşitli bölgelerde olmak üzere toplam 32 adet şekil değiştirme ölçer sensörü bulunmaktadır. Sensör kurulumları Teknik Destek Grubu (TDG) tarafından gerçekleştirilmiştir. Tüm sensör verileri Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme

Platformuna entegre edilmiştir. Çatıya ait sensör yerleşim planı ve kurulumlarına ait görsel Şekil 2.125'te gösterilmiştir. Ayrıca Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformundan elde edilen verilere ait ana görsel ekranı Şekil 2.126'da verilmiştir.



Şekil 2.125. Rize-Artvin Havalimanı Terminal Binası'na ait şekil değiştirme ölçerlere ait çatı yerleşim planı (a) ve kurulumlarına (b) ait görsel



Şekil 2.126. Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda Rize-Artvin Havalimanı Terminal Binası'na ait ana görsel ekranı

2.3.3.7.2. Şekil Değiştirme Ölçer Verilerin Bayes Sinir Ağları ile Güven Aralığının Belirlenmesi

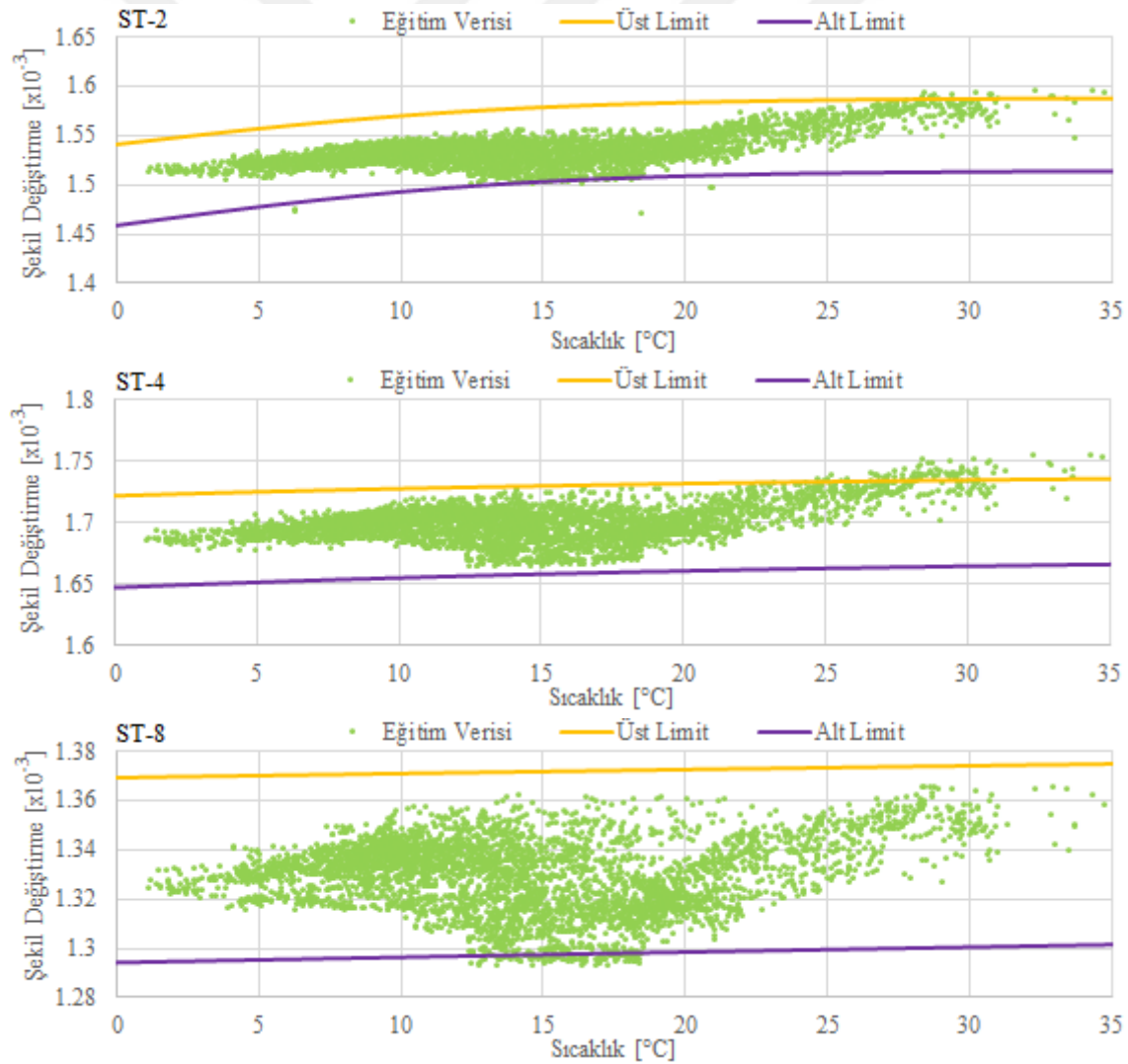
Şekil değiştirme ölçer sensörleri saniyede 1 örnek alacak şekilde verileri kaydedilmektedir. Statik olarak elde edilen bu değerler, dinamik ölçümler gibi anlık değişim göstermediğinden dolayı elde edilen verilerin saatlik ortalaması alınıp, işlenerek depolanmaktadır. Şekil değiştirme değerlerinin üst ve alt sınırları malzemenin dayanımı bilindiğinden dolayı kolaylıkla elde edilebilmektedir. Fakat, YSİ’de yapının normal koşullar altında yapısal durumunun takip edilmesi için sinyallere ait olası bir değişikliğin algılanması ve böylece erken müdahalede bulunulması önem arz etmektedir. Bu nedenle yapıların normal koşullar altındaki davranışı ile üst ve alt limitlerin belirlenmesi gerekmektedir.

Rize-Artvin Havalimanı Terminal Binası’nda 25 Ağustos 2022-14 Şubat 2023 tarihleri arasında yaklaşık 6 ay boyunca elde edilen şekil değiştirme değerlerinin değişen çevresel koşullar altında Bayes Sinir Ağları ile şekil değiştirme güven aralıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Tez çalışması kapsamında ST-2, ST-4, ST-8, ST-16, ST-24, ST-26 isimli şekil değiştirme ölçerlerden elde edilen veriler sunulmuştur. 6 ay boyunca, 4350 adet ölçüm verisi elde edilmiştir. Terminal Binası’na ait Bayes Sinir Ağı Modelinde giriş parametresi olarak sıcaklık değeri, çıktı parametresi olarak şekil değiştirme değeri kullanılmıştır. Bu parametreler kullanılarak binaya ait Bayes Sinir Ağı modelinin eğitilmesi için çeşitli katman sayılarından oluşan modellerin testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerin doğrulanmasında kök ortalama karesel hata kullanılmıştır. Farklı katman sayılarına ait elde edilen kök ortalama karesel hata değerleri Tablo 2.36’da gösterilmiştir. Tablo 2.36’da görüldüğü üzere seçilen ilk katmandan sonra katman sayısı arttıkça eğitim modelinde oluşan hata değeri azalmasına rağmen üç katmanlı sonuçlarda önemli değişiklik gözlenmemiştir. Bu nedenle modelin eğitilmesinde 4x2 olacak şekilde iki katmanlı Bayes Sinir Ağı modeli tasarlanmıştır.

Oluşturulan Bayes Sinir Ağı modelinde eğitim verisi kullanılarak çevresel etkilerden kaynaklı sıcaklığa bağlı şekil değiştirme verilerinin üst ve alt limitleri belirlenmiştir. Terminal Binası’nda ST-2, ST-4, ST-8, ST-16, ST-24, ST-26 isimli şekil değiştirme ölçerlerden elde edilen üst ve alt limitler ile eğitim verisine ait grafikler Şekil 2.127’de gösterilmiştir. Şekil 2.127 incelendiğinde eğitim verisinin büyük bir bölümünün üst ve alt limitleri içerisinde kaldığı görülmektedir.

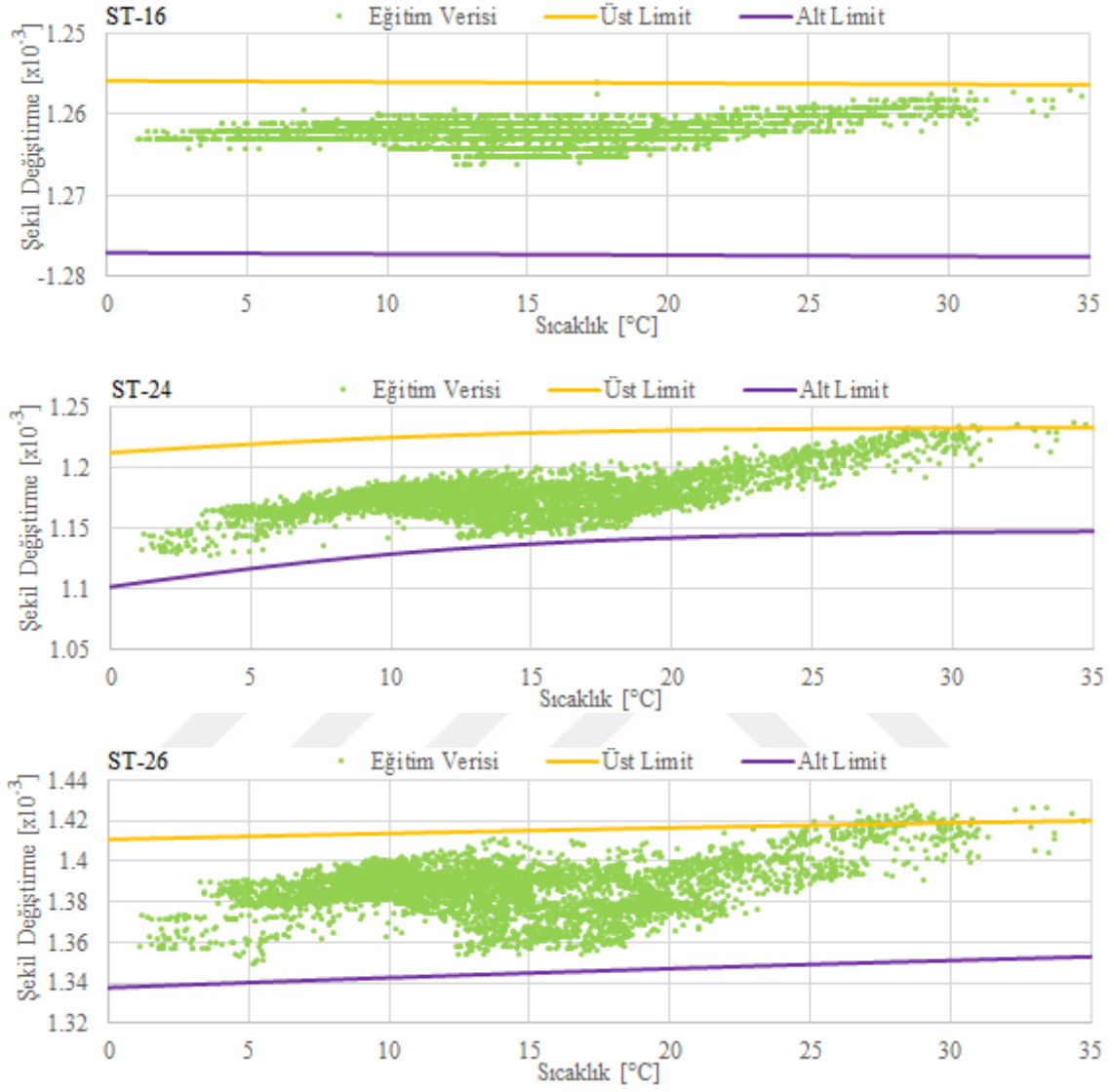
Tablo 2.36. Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası'nda Bayes Sinir Ağı model eğitiminde çeşitli katman sayılarından elde edilen kök ortalama karesel hata

Şekil değiştirme ölçer	Katman sayısı			
	4	4x2	4x4x2	8x8x4
ST-2	0,042	0,017	0,018	0,017
ST-4	0,028	0,019	0,018	0,021
ST-8	0,034	0,029	0,032	0,028
ST-16	0,012	0,009	0,012	0,010
ST-24	0,045	0,021	0,020	0,022
ST-26	0,034	0,018	0,019	0,018



Şekil 2.127. Rize-Artvin Havalimanı Terminal Binası'nda şekil değiştirme ölçer verilerine ait Bayes Sinir Ağı modeli ile elde edilen güven aralığı

Şekil 2.127'nin devamı



3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, mühendislik yapılarının mevcut durumlarının belirlenmesi, oluşabilecek hasar seviyelerinin ve hasar bölgelerinin tahmin edilmesi, sürekli ölçümler yardımıyla derin öğrenme tabanlı yapı sağlığının izlenmesi için birbirleriyle etkileşimli çalışabilecek mühendislik yazılımları ve yenilikçi metodolojilerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, mühendislik yapılarının dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla Dynamic Modal yazılımı, sonlu eleman modeli ile deneysel model arasında farklılıkların minimuma indirgenmesi için otomatik Sonlu Eleman Model Güncelleme yapabilen Dynamic Update yazılımı ve uzun süreli Yapı Sağlığı İzlemesi amacıyla Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformu geliştirilmiştir. Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme platformunda gerçek zamanlı frekans takibi ve anormallik tespiti için otokodlayıcı tabanlı metodoloji geliştirilmiştir. Ayrıca, çevresel faktörlerden kaynaklı belirsizliklerin Bayes Sinir Ağları kullanılarak yapıdan alınan tepki değerlerine bağlı olarak (frekans, şekil değiştirme vb.) üst ve alt limitlerine göre güven aralığının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yazılımların ve metodolojilerin verimliliklerini doğrulamak amacıyla birçok deneysel çalışmalar gerçekleştirilerek farklı ticari yazılımlar veya literatür verileriyle karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda Dynamic Modal yazılımı için laboratuvar ortamında üretilmiş boru kesitli konsol profil, Trabzon Cephanelik Binası, Tarihi Velipaşa Hanı, Tarihi Buzlupınar Köprüsü ve Eynel Köprüsünde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Dynamic Update yazılımı için ise laboratuvar ortamındaki baraj modelinde çalışma gerçekleştirilmiştir. Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformunda Z24 Köprüsü, Trabzon Şehir Cami Minaresi, Çok Katlı Betonarme Bina, Tekkale Viyadüğü, Artvin Deriner Barajı, Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule, Rize-Artvin Havalimanı Terminal Binasında çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında çalışmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır.

➤ Okur (2018) tarafından üretilen laboratuvar ortamında üretilmiş boru kesitli konsol profilde Çevresel Titreşim Yöntemi ile elde edilen ham sinyaller Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarında GFTAA ve SAB yöntemlerine göre işlenmiştir. Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarında GFTAA yöntemi kullanılarak hesaplanan frekans değerleri arasında maksimum fark %2,56, SAB yöntemine göre hesaplanan maksimum fark ise %2,89 olarak elde edilmiştir.

➤ Trabzon Cephanelik Binası'nda Çevresel Titreşim Yöntemi ile elde edilen ham sinyaller Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarında GFTAA yöntemine göre işlenmiştir. Her iki yazılımda GFTAA yöntemine göre elde edilen frekanslar arasında fark maksimum %0,58 olarak elde edilmiştir. Her iki yazılımda da SAB yöntemine göre frekanslar elde edilememiştir.

➤ Tarihi Velipaşa Hanı'nda Çevresel Titreşim Yöntemi ile elde edilen ham sinyaller, Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarında GFTAA yöntemi kullanılarak işlenmiştir. Bu yazılımlarda GFTAA yöntemine göre hesaplanan frekans değerleri arasında maksimum fark %1,42 olarak elde edilmiştir. Her iki yazılımda da SAB yöntemine göre frekanslar elde edilememiştir.

➤ Tarihi Ahşap Buzlupınar Köprüsü'nde Çevresel Titreşim Yöntemi ile elde edilen ham sinyaller Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımları kullanılarak GFTAA ve SAB yöntemlerine göre işlenmiştir. Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarında GFTAA yöntemi kullanılarak hesaplanan frekans değerleri arasında maksimum fark %1,37, SAB yöntemine göre hesaplanan maksimum fark ise %0,54 olarak elde edilmiştir.

➤ Eynel Köprüsü'nde Çevresel Titreşim Yöntemi ile elde edilen ham sinyaller Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarında GFTAA ve SAB yöntemleri kullanılarak işlenmiştir. Dynamic Modal ve OMA (2006) yazılımlarında GFTAA yöntemi kullanılarak hesaplanan frekans değerleri arasında maksimum fark %1,82, SAB yöntemine göre hesaplanan maksimum fark ise %1,46 olarak elde edilmiştir.

➤ Konsol boru profil, Trabzon Cephanelik Binası, Tarihi Velipaşa Hanı, Tarihi Ahşap Buzlupınar Köprüsü, Eynel Köprüsü'ne ait dinamik karakteristikler tez kapsamında hazırlanan program ve piyasada yaygın bir şekilde kullanılan OMA (2023) ile elde edilmiştir. Çeşitli taşıyıcı sistemlere sahip tüm yapı örneklerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Geliştirilen Dynamic Modal yazılımına ait sonuçlar OMA (2003) yazılımına ait sonuçlar ile kıyaslandığında sonuçların çok yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca ilgili frekans değerlerine ait mod şekilleri de elde edilmiştir.

➤ Sevim (2010) tarafından oluşturulan laboratuvar baraj modeline ait sonlu eleman model Dynamic Update yazılımına aktarılmıştır. Laboratuvar çalışmaları kapsamında ağır hasar verilmiş olan baraj modeline ait dinamik karakteristikler Altunışık vd. (2014) tarafından hazırlanan çalışma kapsamında elde edilmiştir. Çalışmada, sonlu eleman model ile deneysel model arasındaki dinamik karakteristiklerin indirgenerek hasar bölge ve şiddetlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Sonlu Eleman Model Güncellemesi için belirsiz

parametre olarak elastisite modülü dikkate alınmış ve belirsiz parametrelere ait Duyarlılık Analizi yapılmıştır. Duyarlılığa bağlı Bayes Parametre Tahmin Yöntemi ile otomatik Sonlu Eleman Model Güncellemesi yapılmıştır. Güncellenen sonlu eleman model ile deneysel model arasındaki frekans farklılıkları maksimum %0,61 olarak elde edildiği ve MAC değerlerinin yüksek olmasından dolayı mod şekillerinin de bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Ayrıca, güncellenen sonlu eleman modelin elastisite modülü değişimlerine ait kontur diyagramı incelendiğinde laboratuvar ortamında oluşturulan hasar bölgeleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu örnek ile geliştirilen Dynamic Update yazılımının gerçek yapının hasar durumlarını simüle edebildiği görülmektedir.

➤ Z24 Köprüsü'nden elde edilen veriler, Web Tabanlı Yapı Sağlığı İzleme Platformu'na aktararak doğrulama çalışmalarında kullanılmıştır. Geliştirilen metodoloji kapsamında Z24 köprüsünün dinamik karakteristikleri otomatik olarak belirlenmiş olup, Reynders ve Roeck (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışma ile belirlenmiş olan Z24 köprüsüne ait referans dinamik karakteristikler ile karşılaştırılmıştır. OMA (2003) yazılımı kullanılarak Z24 Köprüsü'nde GFTAA yöntemine göre elde edilen frekanslar 3,97-10,70Hz arasında iken Reynders ve Roeck (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada 3,87-10,51Hz arasında elde edilmiştir. Ayrıca, frekanslar arasındaki maksimum fark %3,94 olarak elde edilmiştir. Frekanslar arasında elde edilen farklılıklar çok yakın olup, elde edilen frekanslar ve mod şekilleri referans olarak kullanılmıştır. Geliştirilen metodoloji kapsamında eşik değerin belirlenmesinde beş farklı ölçüm veri setinden elde edilen frekans hakim aralıkları ve karşılaştırmalı grafiklerinden minimum eşik değeri belirlenmiştir (Z24 köprüsü için eşik değeri sıfır olarak alınmıştır). Geliştirilen metodoloji kapsamında elde edilen parametreler kullanılarak Z24 Köprüsü'ne ait bir yıllık dinamik karakteristikler otomatik olarak belirlenmiştir. Z24 Köprüsü'nün bir yıllık frekanslara bağlı değişimleri Peeters ve Roeck (2001) tarafından elde edilen zamana bağlı frekans verilerinin benzer dağılımda olduğu görülmüştür.

➤ Z24 Köprüsü'nde çevresel etki olarak sıcaklık sensörü parametresi kullanılarak diğer belirsizlikleri de içeren dinamik karakteristiklerin Bayes Sinir Ağları ile güven aralığının elde edilerek performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bayes Sinir Ağları için Eğitim Verisi, Hasarsız Yeni Veri ve Hasarlı Yeni Veri etiketleri ile farklı veri setleri oluşturulmuştur. Eğitim Verisi yapay sinir ağı modelinin eğitilmesinde, Hasarsız ve Hasarlı Yeni Veri grupları ise eğitilen sinir ağının verimliliğinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Yapay sinir ağı modelinde modelin iyi sonuç vermesini sağlayan en önemli özellik katman

sayısı ve katmanlarda kullanılacak nöron sayısıdır. Z24 Köprüsü'nde giriş parametresi olarak sıcaklık değeri, çıktı parametresi olarak frekans değeri kullanılarak çeşitli katman sayıları için oluşturulan modellerin testleri gerçekleştirilmiştir ve Z24 köprüsü için 16x16x8 olacak şekilde üç katmanlı Bayes Sinir Ağı modeli tasarlanmıştır. Oluşturulan Bayes Sinir Ağı modelinde eğitim verisi kullanılarak çevresel etkilerden kaynaklı belirsizliklerin ilk dört frekansına ait sıcaklığa bağlı frekans değerlerinin üst ve alt limitleri belirlenmiştir. Eğitim verisinin büyük bir bölümünün üst ve alt limitleri içerisinde kaldığı, hasarsız yeni verinin üst ve alt limitler arasında kaldığı, hasarlı yeni verinin alt limit sınırlarını aştığı görülmüştür. Bu durum elde edilen güven aralığının hasar durumu sonuçları ile uyumlu olduğunu göstermiştir.

➤ Z24 Köprüsü'nden ivmeölçer sensörleri ile elde edilen ham sinyaller farklı gürültü oranlarına (%0, %0,5, %1, %1,5, %2,0) göre yeniden elde edilmiştir. Farklı gürültü oranlarına sahip bu ham sinyaller Geliştirilen Otokodlayıcı Tabanlı Anormallik Tespit Sisteminin performansının belirlenmesinde kullanılmıştır. Köprü'nün farklı gürültü oranlarına sahip ham sinyallerinin, GFTAA yöntemi ile birinci tekil değerleri elde edilmiştir. Otokodlayıcı eğitim modelinde 4 katmanlı bir kodlayıcı-çözücü içeren otokodlayıcı modeli tasarlanmıştır. GFTAA yöntemi ile elde edilen birinci tekil değerlere ait sinyal kullanılarak Eğitim Verisi (1260 adet), Hasarsız Yeni Veri (250 adet) ve Hasarlı Yeni Veri (320 adet) etiketleri ile gruplandırma yapılmıştır. Z24 Köprüsü'nde farklı gürültü oranlarındaki (%0, %0,5, %1, %1,5, %2,0) Eğitim Verisi kullanılarak oluşturulan Otokodlayıcı modeli ile Hasarsız ve Hasarlı Yeni Veriler arasındaki yeniden yapılandırma hataları elde edilerek grafikleştirilmiştir. Ayrıca, Otokodlayıcı modelinde Eğitim Verisi kullanılarak %95 güven aralığındaki üst limit hesaplanmıştır. Elde edilen grafikler incelendiğinde, Hasarsız Yeni Verinin büyük bir bölümü üst limitin altında kaldığı, Hasarlı Yeni Verilerin büyük çoğunluğunun üst limiti aştığı görülmüştür. Ayrıca farklı gürültü oranlarının (%0, %0,5, %1, %1,5, %2,0) sonuçlar üzerinde gözle görülür farklılıklar oluşturmadığı görülmüştür. Z24 Köprüsü'ne ait bir yıllık veri kullanılarak Eğitim Verisi ve Hasarsız Yeni Verinin büyük bir kısmının üst limit değerinin altında olması, Hasarlı Yeni Verinin ise bu limiti aşması ve değerlerin yükselen bir eğilimde olması ve ayrıca farklı gürültüler altında sonuçların değişkenlik göstermemesi geliştirilen metodolojinin uygun olduğunu göstermektedir. Ayrıca grafiklerdeki değişimler beklenen eğilimde ve sınırlar içerisinde olup metodolojinin oluşan hasara karşı duyarlı olduğu görülmüştür. Geliştirilen metodolojinin insan müdahalesine gerek kalmadan analizleri gerçekleştirmesi çok sayıda yapının kısa sürede incelenerek varsa

anormal durumların belirlenmesine imkan sağlamaktadır. Bu yöntem ile ayrıca, insan müdahalesi nedeniyle oluşabilecek ekstra hataların da önüne geçilmektedir.

➤ Trabzon Şehir Cami Minaresi'nde 30 Ağustos 2022-14 Şubat 2023 tarihleri arasında yaklaşık 6 aylık Yapı Sağlığı İzleme süreci gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte çalışma kapsamında geliştirilen metodoloji ile dinamik karakteristiklerin otomatik olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak referans alınacak dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Trabzon Şehir Cami Minaresi'ne ait GFTAA yöntemine göre referans dinamik karakteristiklere ait frekanslar 0,54-3,07Hz olarak elde edilmiştir. Geliştirilen metodoloji kapsamında dinamik karakteristiklerin otomatik elde edilmesi için filtreleme işlemi uygulanmış ve eşik değerin belirlenmesinde beş farklı ölçüm veri seti kullanılarak değerlendirilme yapılmıştır. Beş farklı ölçümden elde edilen minimum eşik değeri sıfır olduğundan dolayı dinamik karakteristiklerin otomatik belirlenmesinde eşik değeri sıfır olarak dikkate alınmıştır. Geliştirilen metodoloji kapsamında elde edilen parametreler kullanılarak Trabzon Şehir Cami Minaresi'ne ait dinamik karakteristikler yaklaşık altı ayın sonunda (30 Ağustos 2022-14 Şubat 2023) otomatik olarak belirlenmiştir.

➤ Trabzon Şehir Cami Minaresi'nde yaklaşık 6 ay boyunca Yapı Sağlığı İzleme ile elde edilen dinamik karakteristikler kullanılarak değişen çevresel koşullar altında Bayes Sinir Ağları ile frekans güven aralıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Trabzon Şehir Cami Minaresi'nde giriş parametresi olarak sıcaklık değeri, çıktı parametresi olarak frekans değeri kullanılmıştır. Bu parametreler kullanılarak minareye ait Bayes Sinir Ağı modelinin eğitilmesi için çeşitli katman sayılarından oluşan modellerin testleri gerçekleştirilmiş ve modelin eğitilmesinde 16x16x8 olacak şekilde üç katmanlı Bayes Sinir Ağı modeli tasarlanmıştır. Oluşturulan Bayes Sinir Ağı modelinde eğitim verisi kullanılarak çevresel etkilerden kaynaklı belirsizliklerin ilk dört frekansına ait sıcaklığa bağlı frekans değerlerinin üst ve alt limit tahminleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda eğitim verisinin büyük bir bölümünün üst ve alt limitleri içerisinde kaldığı görülmüştür. Ayrıca, sıcaklık etkisine ait üst ve alt limit değerlerinde çok farklılık olmadığı görülmüştür.

➤ Çok Katlı Betonarme Bina'da 30 Ağustos 2022-14 Şubat 2023 tarihleri arasında yaklaşık 6 aylık Yapı Sağlığı İzleme süreci gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte çalışma kapsamında geliştirilen metodoloji ile dinamik karakteristiklerin otomatik olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak referans alınacak dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Çok Katlı Betonarme Bina'ya ait GFTAA yöntemine göre frekanslar 0,80-3,61Hz olarak elde edilmiştir. Geliştirilen metodoloji kapsamında Çok Katlı Betonarme

Bina’da eşik değerin belirlenmesi için beş farklı ölçüm veri seti kullanılarak değerlendirme yapılmış ve eşik değeri sıfır olarak dikkate alınmıştır. Geliştirilen metodoloji kapsamında elde edilen parametreler kullanılarak Çok Katlı Betonarme Bina’ya ait dinamik karakteristikler yaklaşık altı ayın sonunda (30 Ağustos 2022-14 Şubat 2023) otomatik olarak belirlenmiştir.

➤ Çok Katlı Betonarme Bina’da yaklaşık 6 ay boyunca elde edilen dinamik karakteristikler kullanılarak değişen çevresel koşullar altında Bayes Sinir Ağları ile frekans güven aralıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çok Katlı Betonarme Bina’nın Bayes Sinir Ağı Modelinde giriş parametresi olarak sıcaklık değeri, çıktı parametresi olarak frekans değeri kullanılmıştır. Bu parametreler kullanılarak binaya ait Bayes Sinir Ağı modelinin eğitilmesi için çeşitli katman sayılarından oluşan modellerin testleri gerçekleştirilerek, model eğitiminde kullanılmak üzere 16x16x8 olacak şekilde üç katmanlı Bayes Sinir Ağı modeli tasarlanmıştır. Oluşturulan Bayes Sinir Ağı modelinde eğitim verisi kullanılarak çevresel etkilerden kaynaklı belirsizliklerin ilk beş frekansa ait sıcaklığa bağlı frekans değerlerinin üst ve alt limitleri belirlenmiştir. Ayrıca, sıcaklık etkisine ait üst ve alt limit değerlerinde çok farklılık olmadığı görülmüştür.

➤ Tekkale Viyadüğü’nde 3 Kasım 2022-14 Şubat 2023 tarihleri arasında yaklaşık 3 aylık Yapı Sağlığı İzleme süreci gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte çalışma kapsamında geliştirilen metodoloji ile dinamik karakteristiklerin otomatik olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak referans alınacak dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Tekkale Viyadüğü’ne ait GFTAA yöntemine göre frekanslar 0,26-0,85Hz olarak elde edilmiştir. Geliştirilen metodoloji kapsamında Tekkale Viyadüğü’nde eşik değerinin belirlenmesi için beş farklı ölçüm veri seti kullanılarak değerlendirilme yapılmış ve eşik değeri sıfır olarak dikkate alınmıştır. Geliştirilen metodoloji kapsamında elde edilen parametreler kullanılarak Tekkale Viyadüğü’ne ait dinamik karakteristikler yaklaşık üç ayın sonunda (3 Kasım 2022-14 Şubat 2023) otomatik olarak belirlenmiştir.

➤ Tekkale Viyadüğü’nde yaklaşık 3 ay boyunca elde edilen dinamik karakteristikler kullanılarak değişen çevresel koşullar altında Bayes Sinir Ağları ile frekans güven aralıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Tekkale Viyadüğü’nün Bayes Sinir Ağı modelinde giriş parametresi olarak sıcaklık değeri, çıktı parametresi olarak frekans değeri kullanılmıştır. Bu parametreler kullanılarak viyadüğe ait Bayes Sinir Ağı modelinin eğitilmesi için çeşitli katman sayılarından oluşan modellerin testleri gerçekleştirilerek, modelin eğitiminde kullanılmak üzere 16x16x8 olacak şekilde üç katmanlı Bayes Sinir Ağı

modeli tasarlanmıştır. Oluşturulan Bayes Sinir Ağı modelinde eğitim verisi kullanılarak çevresel etkilerden kaynaklı belirsizliklerin ilk beş frekansa ait sıcaklığa bağlı frekans değerlerinin üst ve alt limitleri belirlenmiştir. Ayrıca, sıcaklık etkisine ait üst ve alt limit değerlerinde çok farklılık olmadığı görülmüştür.

➤ Deriner Barajı'nda 15 Ağustos 2022-14 Şubat 2023 tarihleri arasında yaklaşık 6 aylık Yapı Sağlığı İzleme süreci gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte çalışma kapsamında geliştirilen metodoloji ile dinamik karakteristiklerin otomatik olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak referans alınacak dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Deriner Barajı'nda GFTAA yöntemine göre frekanslar 1,68-5,15Hz olarak elde edilmiştir. Geliştirilen metodoloji kapsamında Deriner Barajı'nda eşik değerinin belirlenmesi için beş farklı ölçüm veri seti kullanılarak değerlendirilme yapılmış ve eşik değer sıfır olarak dikkate alınmıştır. Geliştirilen metodoloji kapsamında elde edilen parametreler kullanılarak Deriner Barajı'na ait dinamik karakteristikler yaklaşık altı aylık (15 Ağustos 2022-14 Şubat 2023) izleme süreci sonunda otomatik olarak belirlenmiştir.

➤ Deriner Barajı'nda yaklaşık 6 ay boyunca elde edilen dinamik karakteristikler kullanılarak değişen çevresel koşullar altında Bayes Sinir Ağları ile frekans güven aralıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Deriner Barajı'nın Bayes Sinir Ağı modelinde giriş parametresi olarak sıcaklık değeri, çıktı parametresi olarak frekans değeri kullanılmıştır. Bu parametreler kullanılarak baraja ait Bayes Sinir Ağı modelinin eğitilmesi için çeşitli katman sayılarından oluşan modellerin testleri gerçekleştirilerek, modelin eğitiminde kullanılmak üzere 16x16x8 olacak şekilde üç katmanlı Bayes Sinir Ağı modeli tasarlanmıştır. Oluşturulan Bayes Sinir Ağı modelinde eğitim verisi kullanılarak çevresel etkilerden kaynaklı belirsizliklerin ilk beş frekansa ait sıcaklığa bağlı frekans değerlerinin üst ve alt limitleri belirlenmiştir. Ayrıca, sıcaklık etkisine ait üst ve alt limit değerlerinde çok farklılık olmadığı görülmüştür.

➤ Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası'nda 3 Ekim 2022-14 Şubat 2023 tarihleri arasında yaklaşık 5 aylık Yapı Sağlığı İzleme süreci gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte çalışma kapsamında geliştirilen metodoloji ile dinamik karakteristiklerin otomatik olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak referans alınacak dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Teknik Blok Kule Binası'nda GFTAA yöntemine göre frekanslar 1,94-10,35Hz olarak elde edilmiştir. Geliştirilen metodoloji kapsamında Teknik Blok Kule Binası'nda eşik değerin belirlenmesi için beş farklı ölçüm veri seti kullanılarak değerlendirilme yapılmış ve eşik değer sıfır olarak dikkate alınmıştır. Geliştirilen metodoloji

kapsamında elde edilen parametreler kullanılarak Teknik Blok Kule Binası'na ait dinamik karakteristikler yaklaşık beş aylık (3 Ekim 2022-14 Şubat 2023) izleme verileri ile otomatik olarak belirlenmiştir.

➤ Rize-Artvin Havalimanı Teknik Blok Kule Binası'nda yaklaşık 5 ay boyunca elde edilen dinamik karakteristikler kullanılarak değişen çevresel koşullar altında Bayes Sinir Ağları ile frekans güven aralıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Teknik Blok Kule Binası'nın Bayes Sinir Ağı modelinde giriş parametresi olarak sıcaklık değeri, çıktı parametresi olarak frekans değeri kullanılmıştır. Bu parametreler kullanılarak kule binasına ait Bayes Sinir Ağı modelinin eğitilmesi için çeşitli katman sayılarından oluşan modellerin testleri gerçekleştirilerek, modelin eğitiminde kullanılmak üzere 16x16x8 olacak şekilde üç katmanlı Bayes Sinir Ağı modeli tasarlanmıştır. Oluşturulan Bayes Sinir Ağı modelinde eğitim verisi kullanılarak çevresel etkilerden kaynaklı belirsizliklerin ilk beş frekansına ait sıcaklığa bağlı frekans değerlerinin üst ve alt limitleri belirlenmiştir. Ayrıca, sıcaklık etkisine ait üst ve alt limit değerlerinde çok farklılık olmadığı görülmüştür.

➤ Rize-Artvin Havalimanı Terminal Binası'nda 25 Ağustos 2022-14 Şubat 2023 tarihleri arasında yaklaşık 6 ay boyunca Yapı Sağlığı İzleme süreci ile elde edilen şekil değiştirme değerlerinin değişen çevresel koşullar altında Bayes Sinir Ağları ile şekil değiştirme güven aralıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Tez çalışması kapsamında ST-2, ST-4, ST-8, ST-16, ST-24, ST-26 isimli şekil değiştirme ölçerlerden elde edilen veriler sunulmuştur. Terminal Binası'na ait Bayes Sinir Ağı Modelinde giriş parametresi olarak sıcaklık değeri, çıktı parametresi olarak şekil değiştirme değeri kullanılmıştır. Bu parametreler kullanılarak binaya ait Bayes Sinir Ağı modelinin eğitilmesi için çeşitli katman sayılarından oluşan modellerin testleri gerçekleştirilerek, modelin eğitiminde kullanılmak üzere 4x2 olacak şekilde iki katmanlı Bayes Sinir Ağı modeli tasarlanmıştır. Oluşturulan Bayes Sinir Ağı modelinde eğitim verisi kullanılarak çevresel etkilerden kaynaklı belirsizliklerin şekil değiştirmelere ait sıcaklığa bağlı şekil değiştirme değerlerinin üst ve alt limitleri belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ışığında yapılabilecek çalışmalarla ilgili bazı öneriler aşağıda sunulmuştur.

- Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi'ne göre elde edilen sönüm oranı değerlerinde ham sinyallere göre değişkenlik göstermektedir. Bu durum ölçümlerden elde edilen sonuçların güvenilirliği hakkında soru işaretleri olmaktadır. Yenilikçi

yöntemlerle sönüm oranlarının daha iyi elde edilmesi üzerinde çalışmalar gerçekleştirilebilir.

- Sonlu eleman model güncellemesinde farklı tip sensörlerden elde edilen veriler kullanılarak otomatik model güncelleme teknikleri üzerinde çalışmalar gerçekleştirilebilir.
- Farklı hasar durumları ve seviyeleri dikkate alınarak güncel sonlu eleman modeli üzerinde yapının kalan ömrünü belirleyebilen yazılım geliştirilebilir.
- Makine öğrenmesi, derin öğrenme yöntemleri ile yapılara ait hızlı değerlendirme, hasar tespiti teknikleri üzerinde yenilikçi çalışmalar gerçekleştirilebilir.
- Derin öğrenme tabanlı Otomatik Sonlu Eleman Model Güncellemesi yazılımı geliştirilebilir.



4. KAYNAKLAR

- Abdelghani, M. ve Friswell, M. I., 2004. Sensor Validation for Structural Systems with Additive Sensor Faults, Structural Health Monitoring, 3, 3, 265–275.
- Achter, J.L., 2000. Full-Scale Bridge Bent Condition Assessment using Forced-Vibration Testing, Yüksek Lisans Tezi, Utah State University, Logan, Utah.
- Al-Khalidy, A., Noori, M., Hou, Z., Carmona, R., Yamamoto, S., Masuda, A. ve Sone A., 1997. A Study of Health Monitoring Systems of Linear Structures using Wavelet Analysis, ASME, 347, 49–58.
- Altunışık, A.C., Okur, F.Y., Genç, A.F., Günaydın, M. ve Adanur, S., 2018. Automated Model Updating of Historical Masonry Structures based on Ambient Vibration Measurements, Journal of Performance of Constructed Facilities, 32, 1, 04017126.
- Altunışık, A.C., Sevim, B., Bayraktar, A., Adanur, A. ve Günaydın, M., 2015. Time Dependent Changing of Dynamic Characteristics of Laboratory Arch Dam Model, KSCE Journal of Civil Engineering, 19, 4, 1069-1077.
- Amezquita-Sanchez, J.P. ve Adeli, H., 2016. Signal Processing Techniques for Vibration-Based Health Monitoring of Smart Structures, Archives of Computational Methods in Engineering, 23, 1, 1–15.
- Ang, W.C., Kropelnicki, P., Tsai, J.M.L., Leong, K.C. ve Tan, C.S., 2014. Design, Simulation and Characterization of Wheatstone Bridge Structured Metal Thin Film Uncooled Microbolometer, Procedia Engineering, 94, 6-13.
- Aydın, E., Ozturk, B., Farsangi, E.N. ve Bogdanovic, A., 2020. Editorial: New Trends and Developments on Structural Control & Health Monitoring, Frontiers in Built Environment, 6, 53.
- Bajaj, K., Singh, D.K. ve Ansari, M.A., 2020. Autoencoders Based Deep Learner for Image Denoising, Procedia Computer Science, 171, 1535–1541.
- Bao, Y., Tang, Z., Li, H. ve Zhang, Y., 2019. Computer Vision and Deep Learning–Based Data Anomaly Detection Method for Structural Health Monitoring, Structural Health Monitoring, 18, 2, 401–421.
- Basu, B., Bursi, O.S., Casciati, F., Casciati, S., Del Grosso, A.E. ve Domaneschi, M., 2014. A European Association for The Control of Structures Joint Perspective, Recent Studies in Civil Structural Control Across Europe, Structural Control and Health Monitoring, 21, 12, 1414–1436.

- Beck, J.L. ve Katafygiotis, L.S., 1992. Probabilistic System Identification and Health Monitoring of Structures, Proceedings of The Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, 3721-3726.
- Bendat, J.S. ve Piersol, A.G., 2004. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 3th Edition, John Wiley and Sons, USA.
- Bendat, J.S. ve Piersol, A.G., 2011. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, Wiley, Hoboken, 729 s.
- Bianconi, F., Salachoris, G.P., Clementi, F. ve Lenci S., 2020. A Genetic Algorithm Procedure for The Automatic Updating of FEM based on Ambient Vibration Tests, Sensors, 20, 11, 3315.
- Boscato, G., Fragonara, L.Z., Cecchi, A., Reccia, E. ve Baraldi D., 2019. Structural Health Monitoring through Vibration-Based Approaches, Shock and Vibration, 2019 2380616.
- Brincker, R., Andersen, P. ve Jacobsen, N. J., 2007. Automated Frequency Domain Decomposition for Operational Modal Analysis, Proceedings of the 25th SEM International Modal Analysis Conference, Orlando, USA.
- Brincker, R., Zhang, L. ve Andersen, P., 2000. Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition, 18th International Modal Analysis Conference, San Antonio, USA, 4062, 2, 625-630.
- Brownjohn, J.M.W., Moyo, P., Omenzetter, P. ve Lu, Y., 2003. Assessment of Highway Bridge Upgrading by Dynamic Testing and Finite-Element Model Updating, Journal of Bridge Engineering, 8, 3, 162-172.
- Bulleit, W.M., 2008. Uncertainty in Structural Engineering, Practice Periodical on Structural Design and Construction, 13, 1, 24-30.
- Cabboi, A., Magalhães, F., Gentile, C. ve Cunha, A., 2017. Automated Modal Identification and Tracking: Application to An Iron Arch Bridge, Structural Control and Health Monitoring, 24, 1, e1854.
- Chang, P.C., Flatau, A. ve Liu, S., 2003. Review Paper: Health Monitoring of Civil Infrastructure, Structural Health Monitoring, 2, 3, 257–267.
- Chien, J.T., 2019. Source Separation and Machine Learning, Academic Press, 259-320 s.
- Chuntavan, C., 1993. Structural Identification of Steel Stringer Bridges for Condition Assessment, Doktora Tezi, University of Cincinnati, Cincinnati, USA.
- De Roeck, G., 2003. The State-Of-The-Art of Damage Detection by Vibration Monitoring: The SIMCES Experience, Journal of Structural Control, 10, 127-143.

- Demirtaş, B., 2022. Yapay Sinir Ağlarıyla Mühendislik Yapılarının Titreşim Özelliklerine Dayalı Hasar Tespiti”, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Deraemaeker, A., Reynders, E., De Roeck, G. ve Kullaa, J., 2008. Vibration-Based Structural Health Monitoring Using Output-Only Measurements under Changing Environment, Mechanical Systems and Signal Processing, 22, 34-56.
- Diao, Y.S., Sun, Z.Z., Guo, K.Z., 2021. Structural Damage Identification Under Variable Environmental/Operational Conditions based on Singular Spectrum Analysis and Statistical Control Chart, Structural Control and Health Monitoring, 28, 6, e2721.
- Ding, Y.L. ve Li, A.Q., 2011. Temperature-Induced Variations of Measured Modal Frequencies of Steel Box Girder for A Long-Span Suspension Bridge, International Journal of Steel Structures, 11, 2, 145-155.
- Doebbling, S.W., Farrar, C.R. ve Prime, M.B., 1998. A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods, Shock and Vibration, 30, 2, 91–105.
- Döhler, M. ve Mevel, L., 2012. Fast Multi-Order Computation of System Matrices in Subspace Based System Identification, Control Engineering Practice, 20, 9, 882-894.
- Dutta, S., Rivera-Casillas, P., Cecil, O.M. ve Farthing, M.W., Perracchione, E. ve Putti, M., 2021. Data-Driven Reduced Order Modeling of Environmental Hydrodynamics using Deep Autoencoders and Neural Odes, Arxiv, 2107.02784v1.
- Ereiz, S., Duvnjak, I. ve Jiménez-Alonso, J.F., 2022. Structural Finite Element Model Updating Optimization Based on Game Theory, Materials Today: Proceedings, 65, 1425-1432.
- Fahad, B.Z., Ong, Z.C. ve Khoo, S.Y., 2020. A Review of Operational Modal Analysis Techniques for in-Service Modal Identification, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 42, 8, 398.
- Farrar, C.R. ve Worden, K., 2012. Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective, Wiley, New York, 656 s.
- Farshadi, M., Esfandiari, A. ve Vahedi, M., 2017. Structural Model Updating using Incomplete Transfer Function and Modal Data, Structural Control and Health Monitoring, 24, 7, e1932.
- FEMTools, 2016. FEMtools Model Updating Theoretical Manual, Belçika.
- Fleming, A.J., 2013. A Review of Nanometer Resolution Position Sensors: Operation and Performance, Sensors and Actuators: A Physical, 190, 106–126.

- Fourati, H., Maaloul, R., Maaloul, R. ve Fourati, L.C., 2021. A Survey of 5G Network Systems: Challenges and Machine Learning Approaches, International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 12, 385–431.
- Fu, Y., Peng, C., Gomez, F., Narazaki, Y., ve Spencer, B. F., 2019. Sensor Fault Management Techniques for Wireless Smart Sensor Networks in Structural Health Monitoring, Structural Control and Health Monitoring, 26, 7, e2362.
- Gopalakrishnan, S., Ruzzene, M. ve Hanagud, S. 2011. Computational Techniques for Structural Health Monitoring. Springer, Berlin, 518 s.
- Guan, H., Karbhari, V. M. ve Sikorski, C. S., 2005. Time-Domain Output Only Modal Parameter Extraction and Its Application, Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference, Copenhagen, Denmark.
- Haeil, J., 1992. Structural Dynamic Model Updating using Eigensensitivity Analysis, Doktora Tezi, University of London, Londra.
- Halling, M.W., Muhammad, I., Womack, K.C., 2001. Dynamic Field Testing for Condition Assessment Bridge Bents, Journal of Structural Engineering, ASCE, 127, 2, 161-167.
- Hasan, A., Danial, M., Ahmad, Z., Leong M.S., Hee, L., 2018. Enhanced Frequency Domain Decomposition Algorithm: A Review of a Recent Development for Unbiased Damping Ratio Estimates, Journal of Vibroengineering, 20, 5, 1919–1936.
- He, L., Reynders, E., García-Palacios, J.H., Marano, G.C., Briseghella, B. ve De Roeck, G., 2020. Wireless-Based Identification and Model Updating of a Skewed Highway Bridge for Structural Health Monitoring, Applied Sciences, 10, 7, 2347.
- He, K. ve Zhu, W., 2011. Structural Damage Detection using Changes in Natural Frequencies: Theory and Applications, Journal of Physics: Conference Series, 305, 012054.
- Heylen, W., Lammens, S. ve Sas, P., 2007. Modal Analysis Theory and Testing, Leuven Katholieke Universiteit, Department of Mechanical Engineering, Leuven, Belçika.
- Hoffmann, K., 1989. An Introduction to Measurements using Strain Gages, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Alsbach, 172 s.
- Huang, T., Chaves-Vargas, M., Yang, J. ve Schröder, K.U., 2018. A Baseline-Free Structural Damage Indicator Based on Node Displacement of Structural Mode Shapes. Journal of Sound and Vibration, 433, 366–384.
- Huseynov, F., Kim, C., O'Brien, E., Brownjohn, J., Hester, D. ve Chang, K., 2020. Bridge Damage Detection using Rotation Measurements–Experimental Validation, Mechanical Systems and Signal Processing, 135, 106380.

- Inaudi, D., Casanova, N., Vurpillot, S., Glisic, B., Kronenberg, P. ve Lloret, S., 2000. Bridge Deformation Monitoring during Enlargement and Refurbishment Works under Traffic Conditions, International Association for Bridge and Structural Engineering, IABSE, 16th Congress, Luzern, Switzerland, 1-8.
- İrsel, G., 2021. Research on Electrical Strain Gages and Experimental Stress Analysis: Case Study for A Full Wheatstone Bridge, DUJE (Dicle University Journal of Engineering), 12, 5, 783-792.
- Jacobsen, N.J., Andersen, P. ve Brincker, R., 2006. Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis, Proceedings of ISMA2006, International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium.
- Jaishi, B., 2005. Finite Element Model Updating of Civil Engineering Structures Under Operational Conditions, Doktora Tezi, Fuzhuo University, College of Civil Engineering and Architecture, Çin.
- Janeliukstis, R., Ručevskis, S. ve Kaewunruen, S., 2019. Mode Shape Curvature Squares Method for Crack Detection in Railway Prestressed Concrete Sleepers, Engineering Failure Analysis, 105, 386–401.
- Jang, J. ve Smyth, A.W., 2020. Data Riven Models for Temperature Distribution Effects on Natural Frequencies and Thermal Prestress Modeling, Structural Control and Health Monitoring, 27, 2, e2489.
- Jang, S., Sim, S. ve Spencer, B.F., 2007. Structural Damage Detection using Static Strain Data, Proceedings of the World Forum on Smart Materials and Smart Structures Technology, Çin.
- Jayasundara, N., Thambiratnam, D., Chan, T. ve Nguyen, A., 2020. Damage Detection and Quantification in Deck Type Arch Bridges using Vibration-Based Methods and Artificial Neural Networks, Engineering Failure Analysis, 109, 104265.
- Jeong, M., Choi, J.H. ve Koh, B.H. 2014. Isomap-Based Damage Classification of Cantilevered Beam using Modal Frequency Changes, Structural Control and Health Monitoring, 21, 4, 590–602.
- Karami, K., Fatehi, P. ve Yazdani, A., 2020. On-Line System Identification of Structures using Wavelet-Hilbert Transform and Sparse Component Analysis, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 35, 8, 870–886.
- Karcı, Ş., 2021. Farklı Otokodlayıcı Modelleri ile Sentetik Beyin MR Görüntülerinin Çoğaltılması, Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2, 1, 29-34.
- Kim, J.T. ve Stubbs, N., 2003. Nondestructive Crack Detection Algorithm for Full-Scale Bridges, Journal of Structural Engineering, ASCE, 129, 10, 1358-1366.

- Kim, J.T., Ryu, Y.S., Cho, H.M. ve Stubbs, N., 2003. Damage Identification in Beam-Type Structures: Frequency-Based Method vs Mode-Shape-Based Method, Engineering Structures, 25, 1, 57–67.
- Kramer, C., De Smet, C. ve De Roeck, G., 1999. Z24 Bridge Damage Detection Tests, Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference (IMAC17), Orlando, 1023–1029.
- Krenker, A., Bešter, J. ve Kos, J., 2011. Introduction to the Artificial Neural Networks, Methodological Advances and Biomedical Applications, InTech, 362 s.
- Kumar V. ve Garg M.L., 2018. Deep Learning as a Frontier of Machine Learning: A Review, International Journal of Computer Applications, 182, 1, 22-30.
- Kumar, P. S., Sakthivel, V. P., Raju, M. ve Sathya, P. D., 2021. A Comprehensive Review on Deep Learning Algorithms and its Applications, Second International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC), Coimbatore, India, 1378-1385.
- Li, D. ve Yu, D., 2014. Deep Learning: Methods and Applications, Now Foundations and Trends, 206 s.
- Lieven, N. A. J., Ewins, D. J., 1998. Spatial Correlation of Mode Shapes, The Coordinate Modal Assurance Criterion (COMAC), Proceedings, International Modal Analysis Conference, 690-695.
- Lin, C.H., Chen, S.Y., Kuo C.T., Sung G.N. ve Yang, C.C., 2015. A Real-Time Bridge Structural Health Monitoring Device using Cost-Effective One-Axis Accelerometers, 2015 IEEE Tenth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP) Demo and Video Singapore, Singapur, 1-2.
- López-Monroy A.P. ve García-Salinas, J.S., 2022. Biosignal Processing and Classification Using Computational Learning and Intelligence, Academic Press, 177-196 s.
- Maeck, J. ve De Roeck, G., 2003. Description of Z24 Benchmark, Mechanical Systems and Signal Processing, 17, 1, 127-131.
- Maeck, J., 2003. Damage Assessment of Civil Engineering Structures by Vibration Monitoring, Doktora Tezi, K.U. Leuven, Belçika.
- Mao, J., Wang, H., Spencer, B.F., 2021. Toward Data Anomaly Detection for Automated Structural Health Monitoring: Exploiting Generative Adversarial Nets and Autoencoders, Structural Health Monitoring, 20, 4, 1609-1626.
- Marrongelli, G., Gentile, C. ve Saisi, A., 2019. Anomaly Detection based on Automated OMA and Mode Shape Changes: Application on A Historic Arch Bridge, International Conference on Arch Bridges, Berlin, 447-455.

- Minh, H.L, Sang-To, T., Wahab, M.A. ve Cuong-Le, T., 2022. Structural Damage Identification in Thin-Shell Structures using A New Technique Combining Finite Element Model Updating and Improved Cuckoo Search Algorithm, Advances in Engineering Software, 173, 103206.
- Mita, A., 1999. Emerging Needs in Japan for Health Monitoring Technologies in Civil and Building Structures, 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University.
- Mohan. V., Parivallal, S., Kesavan, K., Arunsundaram, B., Ahmed, A.F. ve Ravisankar, K., 2014. Studies on Damage Detection using Frequency Change Correlation Approach for Health Assessment, Procedia Engineering, 86, 503–510.
- Monavari, B., 2019. SHM-Based Structural Deterioration Assessment, Doktora Tezi, Queensland University of Technology, Brisbane.
- Moser, P. ve Moaveni, B., 2011. Environmental Effects on The Identified Natural Frequencies of The Dowling Hall Footbridge, Mechanical Systems and Signal Processing, 25, 7, 2336-2357.
- Mottershead, J.E., Link, M. ve Friswell, M.I., 2011. The Sensitivity Method in Finite Element Model Updating: A Tutorial, Mechanical Systems and Signal Processing, 25, 7, 2275–2296.
- Mullachery, V., Khera, A. ve Husain, A., 2018. Bayesian Neural Networks, arXiv, 1801.07710.
- Nandan, H. ve Singh, M.P., 2014. Effects of Thermal Environment on Structural Frequencies: Part I – A Simulation Study, Engineering Structures, 81, 480-490.
- Ng, A., 2011. Sparse Autoencoders, https://web.stanford.edu/class/cs294a/sparseAutoencoder_2011new.pdf, 15 Şubat 2023.
- Nguyen, T., Chan, T.H. ve Thambiratnam D.P., 2014. Field Validation of Controlled Monte Carlo Data Generation for Statistical Damage Identification Employing Mahalanobis Squared Distance, Structural Health Monitoring, 13, 4, 473–488.
- Ni, Y.Q., Zhou, H.F. ve Ko, J.M., 2009. Generalization Capability of Neural Network Models for Temperature-Frequency Correlation using Monitoring Dat, Journal of Structural Engineering, 135, 10, 1290-1300.
- Okur, F.Y., 2017. Mühendislik Yapılarında Analitik, Sayısal ve Deneysel Yöntemlere Dayalı Hasar Tespiti”, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Ono, R., Ha, T.M. ve Fukada, S., 2019. Analytical Study on Damage Detection Method using Displacement Influence Lines of Road Bridge Slab, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 9, 4, 565–577.

- Ou, Y., Tatsis, K.E., Dertimanis, V.K., Spiridonakos, M.D. ve Chatzi, E.N., 2021. Vibration-Based Monitoring of A Small-Scale Wind Turbine Blade under Varying Climate Conditions. Part I: An Experimental Benchmark. Structural Control and Health Monitoring, 28, 6, e2660.
- Pan, Z. ve Mishra, P., 2022. Backdoor Attacks on Bayesian Neural Networks using Reverse Distribution, arXiv, 2205.09167v1.
- Pawar, P.M. ve Ganguli, R., 2011. Structural Health Monitoring using Genetic Fuzzy Systems, Springer, Berlin, 140 s.
- Payawal, J.M.G. ve Kim, D.K., 2023. Image-Based Structural Health Monitoring: A Systematic Review, Applied Sciences, 13, 2, 968.
- Peeters, B. ve De Roeck, G., 2001. One-Year Monitoring of The Z24-Bridge: Environmental Effects Versus Damage Events, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 30, 2, 149-171.
- Qin, S., Han, S. ve Li, S., 2022. In-situ Testing and Finite Element Model Updating of A Long-Span Cable-Stayed Bridge with Ballastless Track, Structures, 45, 1412-1423.
- Rageh, A., Linzell, D.G. ve Azam, S.E., 2018. Automated, Strain-Based, Output-Only Bridge Damage Detection, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 8, 5, 833–846.
- Rainieri, C. ve Fabbrocino, G., 2008. Operational Modal Analysis: Overview and Applications, 2nd Meeting Workshop: Strategies for Reduction of The Seismic Risk, Italy, 29–44.
- Rainieri, C. ve Fabbrocino, G., 2010. Automated Output-Only Dynamic Identification of Civil Engineering Structures, Mechanical Systems and Signal Processing, 24, 3, 678–695.
- Ramos, J.L.F.S., 2007. Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, Doktora Tezi, University of Minho, Portugal.
- Rekik, Y.M., Hachicha, W. ve Boujelbene, Y., 2014. Agent-Based Modeling and Investors Behavior Explanation of Asset Price Dynamics on Artificial Financial Markets, Procedia Economics and Finance, 13, 30–46.
- Reynders, E. ve De Roeck, G., 2008. Reference-Based Combined Deterministic–Stochastic Subspace Identification for Experimental and Operational Modal Analysis, Mechanical Systems and Signal Processing, 22, 617–637.
- Reynders, E. ve De Roeck, G., 2015. Vibration-Based Damage Identification: The Z24 Benchmark, Encyclopedia of Earthquake Engineering, Springer, 3871-3879.

- Roy, K. 2017. Structural Damage Identification using Mode Shape Slope and Curvature. Journal of Engineering Mechanics, 143, 9, 04017110.
- Roy, K. ve Ray-Chaudhuri, S., 2013. Fundamental Mode Shape and its Derivatives in Structural Damage Localization. Journal of Sound and Vibration, 332, 21, 5584–5593.
- Rytter, A., 1993. Vibrational based Inspection of Civil Engineering Structures, Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, R9314, No. 44, Danimarka, 207 s.
- Şahin, A., 2009. Yapıların Deneysel ve Operasyonel Modal Analizleri için Sayısal Sinyal İşleme, Dinamik Karakteristik Belirleme ve Sonlu Eleman İyileştirme Yazılımları: SignalCAD – ModalCAD – FemUP, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Schmidhuber, J., 2015. Deep Learning in Neural Networks: An Overview, Neural Networks, 61, 85-117.
- Schommer. S, Nguyen, V.H., Maas, S. ve Zürbes, A., 2017. Model Updating for Structural Health Monitoring using Static and Dynamic Measurements, Procedia Engineering, 199, 2146–2153.
- Schwarz, B.J. ve Richardson, M.H., 1999. Experimental Modal Analysis, CSI Reliability, 35, 1, 1-12.
- Sen, S. ve Bhattacharya, B., 2013. Eigen Structure Assignment based Finite Element Model Updating, International Conference on Computer Aided Engineering (CAE-2013), Chennai, 1-6.
- Sevim, B., 2010. Kemer Barajların Dinamik Davranışlarının Sonlu Eleman ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Sevim, B., Altunışık, A.C. ve Bayraktar, A., 2012. Experimental Evaluation of Crack Effects on The Dynamic Characteristics of A Prototype Arch Dam using Ambient Vibration Tests, Computers and Concrete, 10, 3, 277-294.
- Sevinç, A. ve Kaya, B., 2021. Derin Öğrenme Yöntemleri ile Sıcaklık Tahmini: Diyarbakır İli Örneği, Journal of Computer Science, 2021, 217-225.
- Sha, G., Radziński, M., Cao, M. ve Ostachowicz, W., 2019. A Novel Method for Single and Multiple Damage Detection in Beams using Relative Natural Frequency Changes, Mechanical Systems and Signal Processing, 132, 335–352.
- Sha, G., Radziński, M., Soman, R., Cao, M., Ostachowicz, W. ve Xu, W., 2020. Multiple Damage Detection in Laminated Composite Beams by Data Fusion of Teager Energy Operator-Wavelet Transform Mode Shapes, Composite Structures, 235, 111798.

- Shahbaznia, M., Dehkordi, M.R. ve Mirzaee A., 2020. An Improved Time-Domain Damage Detection Method for Railway Bridges Subjected to Unknown Moving Loads, Periodica Polytechnica Civil Engineering, 64, 928–938.
- Shahsavari, V., Chouinard, L. ve Bastien, J., 2018. Detection of Structural Damage under Varying Environmental Conditions, Conference: Canadian Society for Civil Engineering (CSCE), the 10th International Conference on Short and Medium Span Bridges, Quebec, 1-10.
- Sheela, K.G. ve Deepa, S.N., 2013. Review on Methods to Fix Number of Hidden Neurons, Mathematical Problems in Engineering, 2013, 425740.
- Shih, H.W., 2009. Damage Assessment in Structures Using Vibration Characteristics, Doktora Tezi, Queensland University of Technology, Brisbane.
- Shih, H.W., Thambiratnam, D.P. ve Chan, T.H., 2009. Vibration Based Structural Damage Detection in Flexural Members using Multicriteria Approach, Journal of Sound and Vibration, 323, 3, 645–661.
- Shrestha, A. ve Mahmood, A., 2019. Review of Deep Learning Algorithms and Architectures, IEEE, 7, 53040-53065.
- Soderstrom, T., 1975. On Model Structure Testing in System Identification, Automatica, 11, 537-541.
- Soria, J., Diaz, I.M., Garcia-Palacios J.H. ve Iban, N., 2016. Vibration Monitoring of A Steel-Plated Stress-Ribbon Footbridge: Uncertainties In The Modal Estimation, Journal of Bridge Engineering, 21, 8, C50150028.
- Speckmann, H. ve Henrich, R., 2004. Structural health monitoring [SHM]–Overview on Technologies under Development, Proceedings of the World conference on NDT, Montreal, 1-8.
- Sun, L., Li, Y. ve Zhang, W., 2020. Experimental Study on Continuous Bridge-Deflection Estimation through Inclination and Strain, Journal of Bridge Engineering, 25, 5, 04020020.
- Sun, M., Alamdari, M.M. ve Kalhori, H., 2017. Automated Operational Modal Analysis of A Cable-Stayed Bridge, Journal of Bridge Engineering, 22, 12, 05017012.
- Tang, Z., Chen, Z., Bao, Y. ve Li, H., 2019. Convolutional Neural Network-Based Data Anomaly Detection Method using Multiple Information for Structural Health Monitoring, Structural Control and Health Monitoring, 26, 1, e2296.
- Teughels, A. ve De Roeck, G., 2004. Structural Damage Identification of The Highway Bridge Z24 By FE Model Updating, Journal of Sound and Vibration, 278, 589–610.

- Tharsanee, R.M., Soundariya, R.S., Kumar, A.S., Karthiga, M. ve Sountharajan, S., 2021. Data Science for COVID-19, Academic Press, 117-145.
- Thiyagarajan, K., Kodagoda, S., ve Van Nguyen, L., 2017. Predictive Analytics for Detecting Sensor Failure using Autoregressive Integrated Moving Average Model. 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Cambodia, 1926–1931.
- Twomey, J.M. ve Smith, A.E., 1995. Performance Measures, Consistency, and Power for Artificial Neural Network Models, Mathematical and Computer Modelling, 21, 1-2, 243-258.
- URL-1, <https://www.physicalacoustics.com/ae-technology>, 28.12.2022.
- URL-2, <https://i4.hurimg.com/i/hurriyet/75/770x0/627f4a584e3fe119c0890e8c.jpg>, 20.02.2023.
- Vanhonacker, P., 1980. The Use of Modal Parameters of Mechanical Structures in Sensitivity Analysis, System Synthesis and System Identification Methods, Doktora Tezi, University of Leuven, Belgium.
- Vanlanduit, S., Verboven, P., Guillaume, P. ve Schoukens, J., 2003. An Automatic Frequency Domain Modal Parameter Estimation Algorithm, Journal of Sound and Vibration, 265, 3, 647–661.
- Vega, F. ve Yu, W., 2022. Smartphone based Structural Health Monitoring using Deep Neural Networks, Sensors and Actuators: A. Physical, 346, 113820.
- Verboven, P., Parloo, E., Guillaume, P. ve Van Overmeire, M., 2003. An Automatic Frequency Domain Modal Parameter Estimation Algorithm, Journal of Sound and Vibration, 265, 647-661.
- Wan, H.P., ve Ni, Y.Q., 2018. Bayesian Modeling Approach for Forecast of Structural Stress Response using Structural Health Monitoring Data, Journal of Structural Engineering, 144, 9, 04018130.
- Wang, H., Zhang, Y.M., Mao, J.X., Wan, H.P., Tao, T.Y. ve Zhu, Q.X., 2019. Modeling and Forecasting of Temperature-Induced Strain of A Long-Span Bridge using An Improved Bayesian Dynamic Linear Model, Engineering Structures, 192, 220–232.
- Wang, J., You, H., Qi, X. ve Yang, Na., 2022. BIM-Based Structural Health Monitoring and Early Warning for Heritage Timber Structures, Automation in Construction, 144, 104618.
- Wang, L., Lie, S.T. ve Zhang, Y. 2016. Damage Detection using Frequency Shift Path, Mechanical Systems and Signal Processing, 66, 298–313.

- Wang, Z., Lia, K., Xiab, S.Q. ve Liua, H., 2021. Economic Recession Prediction Using Deep Neural Network, arXiv, 2107.10980v1.
- Womack, K.C. ve Halling, M.W., 1999. Forced Vibration Testing of the I-15 South Temple Bridge, Proje Sonuç Raporu, Rapor No: UT-99.15, Department of Civil and Environmental Engineering, Utah State University, Logan, Utah, USA.
- Xin, Y., Hao, H. ve Li, J., 2019. Operational Modal Identification of Structures based on Improved Empirical Wavelet Transform, Structural Control and Health Monitoring, 26, 3, e2323.
- Yu, DJ. ve Ren, WX, 2005. EMD- Based Stochastic Subspace Identification of Structures from Operational Vibration Measurements, Engineering Structures, 27, 1741-1751.
- Zeischka, H., Storrer, O., Leuridan, J. ve Vandeuren, U., 1988. Calculation of Modal Parameter Sensitivities Based on a Finite Element Proportionality Assumption, 6th International Modal Analysis Conference (IMAC), Bethel, CT, 2, 1082-1087.
- Zeng, J. ve Kim, Y.H., 2023. A Two-Stage Framework for Automated Operational Modal Identification, Structure and Infrastructure Engineering, 19, 1, 1-20.
- Zhang, G., Ma, J., Chen, Z. ve Wang, R., 2014. Automated Eigen System Realisation Algorithm for Operational Modal Analysis, Journal of Sound and Vibration, 333, 15, 3550–3563.
- Zhang, Y., Tang, Z. ve Yang, R., 2022. Data Anomaly Detection for Structural Health Monitoring by Multi-View Representation based on Local Binary Patterns, Measurement, 202, 111804.
- Zhang, Z., Shankar, K., Morozov, E.V. ve Tahtali, M., 2016. Vibration Based Delamination Detection in Composite Beams Through Frequency Changes, Journal of Vibration and Control, 22, 2, 496–512.
- Zhao, J., DeWolf, J.T., 2002. Dynamic Monitoring of Steel Girder Highway Bridge, Journal of Bridge Engineering, 7, 6, 350-356.
- Zhao, Y., Noori, M., Altabey, W.A., Ghiasi, R. ve Wu, Z. 2018. Deep Learning-Based Damage, Load and Support Identification for A Composite Pipeline by Extracting Modal Macro Strains from Dynamic Excitations, Applied Sciences, 8, 12, 2564.
- Zhou, Y., Li, D., Huo, S. ve Kung, S.Y., 2021. Shape Autotuning Activation Function, Expert Systems with Applications, 171, 114534.
- Zienkiewicz, O.C., 2000. The Finite Element Method, McGraw Hill Book Company.

ÖZGEÇMİŞ

Fatih Yesevi OKUR, ilkokulu 1999-2007 yılları arasında Trabzon Dumlupınar İlköğretim Okulu'nda, orta öğrenimini ise 2007-2011 yılları arasında Trabzon Lisesi'nde tamamladı. 2011 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde "Lisans" eğitimine başladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda "Yüksek Lisans" eğitimine başladı. 2017 yılında "Mühendislik Yapılarında Analitik, Sayısal ve Deneysel Yöntemlere Dayalı Hasar Tespiti" isimli tez çalışmasıyla yüksek lisansını tamamladı. Aynı yıl doktora eğitimine başladı. 2018 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2019 yılında "TÜBİTAK 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı"nı kazanarak University of Central Florida'da doktora çalışmalarını sürdürdü. Evli ve iyi derece İngilizce bilen OKUR'un bugüne kadar yapmış olduğu akademik çalışmalara ait bilgiler aşağıda sunulmaktadır.

ATIF SAYISI

Google Scholar: 514 / Web of Science: 344 / Scopus: 419

H-Index

Google Scholar: 13 / Web of Science: 12 / Scopus: 12

ÖDÜLLER & BURSLAR

- "Trabzon Ortahisar Ödülleri En İyi Uygulama Projesi Ödülü", Trabzon Ortahisar Belediyesi, Haziran 2022.
- "Genç Bilim ve Sanat İnsanı Ödülü", Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mayıs 2022.
- "2020 Yılı Mühendislik Fakültesi, Uluslararası Bilimsel Dergilerde (SCI) Yapılan Yayınlarla ait Derece Ödülü (Araştırma Görevlileri Arasında Fakülte 2.'liği)", Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mart 2022.

- “TÜBİTAK 2214/A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Bursu”, TÜBİTEK BİDEB, Araştırma Yapılan Üniversite: University of Central Florida, Mayıs 2019.
- “Genç Bilim ve Sanat İnsanı Ödülü”, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mayıs 2019.
- 1.lik Ödülü, "Tekla Global Student BIM Awards 2018", Trimble, Las Vegas, ABD, Eylül 2018.
- 2.lik Ödülü, "Ahlat Gençlik Kampı Mimari Proje Yarışması", Bitlis İl Özel İdaresi, Ağustos 2017.
- “Yılın Başarılı Öğrencisi Ödülü”, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mayıs 2016.
- 1.lik Ödülü, "Design Together with BIM 2016", İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendisliğe Hazırlık Kulübü, Şubat 2016.
- 2.lik Ödülü, "International Student Steel Bridge Competition 2015", Boğaziçi Üniversitesi Yapı Kulübü, Nisan 2015.
- "İnşaat Mühendisliği Bölümü Yüksek Onur Öğrencisi", Karadeniz Teknik Üniversitesi, Haziran 2015.
- "İnşaat Mühendisliği Bölümü İkincilik Ödülü", Karadeniz Teknik Üniversitesi, Haziran 2015.

BİLİMSEL PROJELER

- Mühendislik Ürünü Ahşap Binaların Deprem Performansının Lifli Polimer Kompozit Kumaşlar ile Arttırılması, Araştırmacı, Karadeniz Teknik Üniversitesi BAP13 Projesi, Proje No: FBA-2023-10560, 2023-Devam Ediyor.
- Tarihi Yığma Minarelerin Video Kamera Tabanlı Yapı Sağlığı İzlemesi ve Derin Öğrenme Yöntemine Dayalı Uzun Vadeli Karar Verme Modelinin Geliştirilmesi, Araştırmacı, TÜBİTAK-1001, Proje No: 222M140, 2022-Devam Ediyor.
- Titreşim Verileri Kullanılarak Modal Katkı Oranlarına Dayalı Hasar Tespiti, Araştırmacı, Karadeniz Teknik Üniversitesi BAP02 Projesi, Proje No: FHD-2022-10402, 2022-Devam Ediyor.
- Doğu Karadeniz Bölgesindeki Stratejik Öneme Sahip Mühendislik Yapıları İçin Yapı Sağlığı İzleme Ağının Kurulması ve Yenilikçi Yöntemlerin Geliştirilmesi, Araştırmacı, Bilimsel Araştırma Projesi (Altyapı), Karadeniz Teknik Üniversitesi BAP04 Projesi, Proje No: FAY-2021-9635, 2021-Devam ediyor.

- Komşu Betonarme Binalardaki Çarpışma Hasarlarına LP Kompozit Malzeme Güçlendirme Etkisinin Sarsma Masasında DeneySEL Olarak İncelenmesi, Araştırmacı, Temel Araştırma Projesi (BAP01), Karadeniz Teknik Üniversitesi, Proje No: FBA-2021-9227, 2021-Devam Ediyor.
- 06 Şubat 2023 Kahramanmaraş (Pazarcık ve Elbistan) Depremleri Sonrası Mühendislik Yapılarında Tespit Edilen Yapısal Hasarlar, Nedenleri ve İleriye Dönük Öneriler, Araştırmacı, TÜBİTAK 1002-C Doğal Afetler Odaklı Saha Çalışması Acil Destek Programı, 2023-2023.
- Mühendislik Yapılarının Dinamik Yükler Altındaki Performanslarının Sarsma Masası Kullanılarak Belirlenmesi, Araştırmacı, Alt Yapı Projesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Proje No: FAY-2018-7715, 2018-2021.
- Mühendislik Yapılarında Yapı Sağlığı İzlemesi ve Dinamik Değerlendirme Üzerine Yenilikçi Yöntem Geliştirme, Yürütücü, TÜBİTAK 2214/A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Bursu, Proje No: 1059B141800930, Araştırma Yapılan Üniversite: University of Central Florida, Orlando, 2019-2020.
- Mühendislik Yapılarında Hasar Tespiti ve Uzun Süreli Yapı Sağlığı İzlenmesi, Araştırmacı, Bilimsel Araştırma Projesi, TÜBİTAK-TEYDEB 1512, Projesi, Proje No: 1050644, 2017-2019.

KAMU-ÜNİVERSİTE-SANAYİ İŞ BİRLİĞİ KAPSAMINDAKİ PROJELER

- Samsun British American Tobacco Sigara Fabrikasının Yapı Sağlığı İzleme İşlerinin Yapılması, Dynamic Academy, 2022-Devam Ediyor.
- Rize-Artvin Havalimanı Kule ve Terminal Binalarının Yapı Sağlığı İzleme İşlerinin Yapılması, Dynamic Academy-Cengiz İnşaat İş Birliği, 2022-Devam Ediyor.
- Betonarme Yapılarda Patlama Etkilerine Karşı Koruyucu Tasarım Kriterleri ve Hesap-Değerlendirme Metodu Projesi, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı-KTÜ İş Birliği, Araştırmacı, 16.08.2021-13.12.2021.

SCI, SSCI, AHCI indekslerine giren dergilerde yayınlanan makaleler

- Altunışık A.C., Genç A.F., Ertürk E., Günaydın M., Okur F.Y., “Soil–Structure Interaction and Earthquake Input Models Effect on the Structural Response of the Santa Maria Church and Guesthouse Building”, Basımda, 2023.
- Kaya A., Adanur S., Bello R.A., Genç A.F., Okur F.Y., Sunca F., Günaydın M., Altunışık A.C., Sevim B., “Post-Earthquake Damage Assessments of Unreinforced Masonry (URM) Buildings by Shake Table Test and Numerical Visualization”, Engineering Failure Analysis, 143, 106858, 2023.
- Sesli H., Hüsem M., Sunca F., Altunışık A.C., Okur F.Y., “Experimental Investigation on New Mechanical Systems Effectiveness to Reduce The Coupling Beam Damages”, Bulletin of Earthquake Engineering, 21, 535-582, 2023.
- Günaydın M., Genç A.F., Altunışık A.C., Okur F.Y., Kalkan Okur E., Adanur A., “Structural Condition Assessment of A Historical Masonry School Building using Experimental and Numerical Methods”, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 12, 1083-1113, 2022.
- Günaydın, M., Sunca, F., Altunışık, A.C., Ergün, M., Okur, F.Y., “Non-Destructive Experimental Measurement, Model Updating and Fatigue Life Assessment of Çarşamba Suspension Bridge”, Journal of Bridge Engineering, 27, 2, 05021017, 2022.
- Günaydın, M., Ertürk, E., Genç, A.F., Okur, F.Y., Altunışık, A.C., Tavşan, C., “FE Model Updating and Seismic Performance Evaluation of a Historical Masonry Clock Tower”, Earthquakes and Structures, 22, 1, 65-82, 2022.
- Günaydın, M., Demirkır, C., Altunışık, A.C., Gezer, E.D., Genç, A.F., Okur, F.Y., “Diagnosis and Monitoring of Historical Timber Velipaşa Han Building Prior to Restoration”, International Journal of Architectural Heritage, 17, 2, 285-309, 2021.
- Sunca, F., Ergün, M., Altunışık, A.C., Günaydın, M., Okur, F.Y., “Modal Identification and Fatigue Behavior of Eynel Steel Arch Highway Bridge with Calibrated Models”, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 11, 1337-1354, 2021.
- Kalkan Okur, E., Altunışık, A.C., Okur, F.Y., Meral, M., Yılmaz, Z., Günaydın, M., Genç, A.F., “Dynamic Response of a Traditional Hımış Mansion using Updated FE

Model with Operational Modal Testing”, *Journal of Building Engineering*, 43, 103060, 2021.

- Kahya, V., Okur, F.Y., Karaca, S., Altunışık, A.C., Aslan, M., “Multiple Damage Detection in Laminated Composite Beams using Automated Model Update”, *Structure*, 34, 1665-1683, 2021.
- Altunışık, A.C., Sevim, B., Sunca, F., Okur, F.Y., “Optimal Sensor Placements for System Identification of Concrete Arch Dams”, *Advances in Concrete Construction*, 11, 5, 397-407, 2021.
- Sunca, F., Okur, F.Y., Altunışık, A.C., Kahya, V., “Optimal Sensor Placement for Laminated Composite and Steel Cantilever Beams by Effective Independence Method”, *Structural Engineering International*, 31, 1, 85-92, 2021.
- Kahya, V., Karaca, S., Okur, F.Y., Altunışık, A.C., Aslan, M., “Damage Localization in Laminated Composite Beams with Multiple Edge Cracks Based on Vibration Measurements”, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45, 75-87, 2021.
- Altunışık, A.C., Kalkan, E., Okur, F.Y., Karahasan, O., Ozgan, K., “Finite Element Model Updating and Dynamic Responses of Reconstructed Historical Timber Bridges using Ambient Vibration Test Results”, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34, 1, 04019085, 2020.
- Nasery, M.M., Husem, M., Okur, F.Y., Altunışık, A.C., “Damage Effect on Experimental Modal Parameters of Haunch Strengthened Concrete Encased Composite Column-Beam Connections”, *International Journal of Damage Mechanics*, 29, 2, 297-334, 2020.
- Altunışık, A.C., Karahasan, O.Ş., Okur, F.Y., Kalkan, E., Özgan, K., “Ambient Vibration Test and FE Modelling of Historical Timber Mosques after Restoration”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings*, 173, 12, 956-968, 2020.
- Günaydın, M., Genç, A.F., Karahasan, O.Ş., Altunışık, A.C., Okur, F.Y., Adanur, S., “Nonlinear Dynamic Response of a RC Frame for Different Structural Conditions Including the Effect of FE Model Updating”, *International Journal of Civil Engineering*, 18, 551-567, 2020.

- Altunışık, A.C., Okur, F.Y., Karaca, S., Kahya, V., “Vibration-Based Damage Detection in Beam Structures with Multiple Cracks: Modal Curvature vs. Modal Flexibility Methods”, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 34, 1, 33-53, 2019.
- Altunışık, A.C., Okur, F.Y., Kahya, V., “Vibrations of A Box-Sectional Cantilever Timoshenko Beam with Multiple Cracks”, *International Journal of Steel Structures*, 19, 2, 635-649, 2019.
- Kahya, V., Karaca, S., Okur, F.Y., Altunışık, A.C., Aslan, M., “Free Vibrations of Laminated Composite Beams with Multiple Edge Cracks: Numerical Model And Experimental Validation”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 159, 30-42, 2019.
- Genç, A.F., Ergün, M., Günaydın, M., Altunışık, A.C., Ateş, Ş., Okur, F.Y., Mosallam, A., “Dynamic Analyses of Experimentally Updated FE Model of Historical Masonry Clock Towers using Site-Specific Seismic Characteristics and Scaling Parameters According to the 2018 Turkey Building Earthquake Code”, *Engineering Failure Analysis*, 105, 402-426, 2019.
- Altunışık, A.C., Kalkan, E., Okur, F.Y., Ozgan, K., Karahasan, O.Ş., Bostancı, A., “Non-Destructive Modal Parameter Identification of Historical Timber Bridges using Ambient Vibration Tests after Restoration”, *Measurement*, 146, 411-424, 2019.
- Altunışık, A.C., Karahasan, O.Ş., Okur, F.Y., Kalkan, E., Özgan, K., “Finite Element Model Updating and Dynamic Analysis of a Restored Historical Timber Mosque Based on Ambient Vibration Tests", *Journal of Testing and Evaluation*, 47, 212-225, 2018.
- Altunışık, A.C., Genç, A.F., Günaydın, M., Okur, F.Y., Karahasan, O.Ş., “Dynamic Response of a Historical Armory Building Using the Finite Element Model Validated by the Ambient Vibration Test", *Journal of Vibration and Control*, 24, 5472-5484, 2018.
- Altunışık, A.C., Okur, F.Y., Genç, A.F., Günaydın, M., Karahasan, O.Ş., “Automated Model Updating Effect on the Linear and Nonlinear Dynamic Responses of Historical Masonry Structures”, *Experimental Techniques*, 42, 605-621, 2018.
- Altunışık, A.C., Okur, F.Y., Genç, A.F., Günaydın, M., Adanur, S., “Automated Model Updating of Historical Masonry Structures based on Ambient Vibration

Measurements”, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, 32, 1, 04017126, 2018.

- Altunışık, A.C., Genç, A.F., Günaydın, M., Adanur, S., Okur, F.Y., “Ambient Vibration Based System Identification of a Medieval Masonry Bastion for Health Assessment using Nonlinear Analyses”, *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 19, 2, 1-15, 2018.
- Altunışık, A.C., Karahasan, O.Ş., Genç, A.F., Okur, F.Y., Günaydın, M., Kalkan, E., Adanur, S., “Modal Parameter Identification of RC Frame under Undamaged, Damaged, Repaired and Strengthened Conditions”, *Measurement*, 124, 260-276, 2018.
- Hüsem, M., Nasery, M.M., Okur, F.Y., Altunışık, A.C., “Experimental Evaluation of Damage Effect on Dynamic Characteristics of Concrete Encased Composite Column-Beam Connections”, *Engineering Failure Analysis*, 91, 129-150, 2018.
- Altunışık, A.C., Karahasan, O.Ş., Genç, A.F., Okur, F.Y., Günaydın, M., Adanur, S., “Sensitivity-Based Model Updating of Building Frames using Modal Test Data”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22, 4038-4046, 2018.
- Altunışık, A.C., Karahasan, O.Ş., Genç, A.F., Okur, F.Y., Günaydın, M., Kalkan, E., Adanur, S., “Effect of FRP Strengthening on Dynamic Characteristics of an RC Frame using Model Updating”, *ACI Structural Journal*, 115, 6, 1589-1601, 2018.
- Altunışık, A.C., Okur, F.Y., Kahya, V., “Vibrations of a Box-Sectional Cantilever Timoshenko Beam with Multiple Cracks”, *International Journal of Steel Structures*, 19, 635-649, 2018.
- Altunışık, A.C., Adanur, S., Genç, A.F., Günaydın, M., Okur, F.Y., “An Investigation of the Seismic Behaviour of an Ancient Masonry Bastion using Non-Destructive and Numerical Methods”, *Experimental Mechanics*, 57, 245-259, 2017.
- Altunışık, A.C., Okur, F.Y., Kahya, V., “Modal Parameter Identification and Vibration Based Damage Detection of a Multiple Cracked Cantilever Beam”, *Engineering Failure Analysis*, 79, 154-170, 2017.
- Altunışık, A.C., Okur, F.Y., Kahya, V., “Structural Identification of a Cantilever Beam with Multiple Cracks: Modelling and Validation”, *International Journal of Mechanical Science*, 130, 74-89, 2017.

- Altunışık, A.C., Okur, F.Y., Kahya, V., “Automated Model Updating of Multiple Cracked Cantilever Beams for Damage Detection”, Journal of Constructional Steel Research, 138, 499-512, 2017.
- Altunışık, A.C., Adanur, S., Genç, A.F., Günaydın, M., Okur, F.Y., “Non-Destructive Testing of an Ancient Masonry Bastion”, Journal of Cultural Heritage, 22, 1049-1054, 2016.

Uluslararası Diğer Yayınlar

- Altunışık, A.C., Kalkan Okur, E., Okur, F.Y., Günaydın, M., Genç, A.F., “Experimental Modal Analysis and Structural Health Monitoring of the Double Curvature Deriner Arch Dam”, Natural & Applied Sciences Journal 4, 1, 22, 2021.
- Altunışık, A.C., Okur, F.Y., “Domestic Software Developed for Updating of Finite Element Models and Experimental Modal Analysis of Structures”, Natural & Applied Sciences Journal 4, 1, 15, 2021.
- Yılmaz, Z., Okur, F.Y., Günaydın, M., Altunışık, A.C., “Structural Modeling in Object-Oriented Based Software by Utilizing Data Tables”, Journal of Construction Engineering, Management & Innovation, 4, 4, 267-273, 2021.
- Genç, A.F., Ertürk, E., Altunışık, A.C., Günaydın, M., Okur, F.Y., “Effect of Damping Ratios on the Seismic Behavior of a Historical Masonry Guesthouse Building”, Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering, 2, 2, 60-71, 2021

Hakemli konferans/sempozyumların bildiri kitaplarında yer alan yayınlar

- Okur F.Y., Kalkan Okur E., Altunışık A.C., "Parametric Modeling in New Generation Civil Engineering Projects", The 4th International Conference on Advanced Technologies for Humanity (ICATH'2022), Marrakech, Fas, 11-12 Kasım 2022.
- Yılmaz Z., Okur F.Y., Altunışık A.C., Günaydın M., “Numerical Study of Damage Identification Through Modal Participation Ratio", The 4th International Conference on Advanced Technologies for Humanity (ICATH'2022), Marrakech, Fas, 11-12 Kasım 2022.

- Altunışık, A.C., Günaydın, M., Okur, F.Y., Genç, A.F., “Operational Modal Analysis of a Historical Wooden Building”, PACE-2021, International Congress on the Phenomenological Aspect of Civil Engineering, Erzurum, Türkiye, 20-23 Haziran 2021.
- Sunca, F., Okur, F.Y., Altunışık, A.C., Kahya, V., “Experimental Investigation of Optimal Sensor Placement of a Laminated Composite Cantilever Beam”, PACE-2021, International Congress on the Phenomenological Aspect of Civil Engineering, Erzurum, Türkiye, 20-23 Haziran 2021.
- Altunışık A.C., Günaydın, M., Okur, F.Y., Karahasan, O.Ş., Sarı, M., Kalkan, E., “Asma Köprülerde Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile Modal Parametrelerin Belirlenmesi”, 4. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, Ankara, Türkiye, 1-2 Kasım 2019.
- Altunışık A.C., Kalkan, E., Okur, F.Y., Karahasan, O.Ş., Özgan, K., “Çevresel Titreşim Test Sonuçlarına Göre Güncellenmiş Tarihi Ahşap Köprünün Dinamik Analizi”, 4. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, Ankara, Türkiye, 1-2 Kasım 2019.
- Okur, F.Y., Altunışık A.C., “Yapıların ve/veya Laboratuvar Modellerinin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Sonlu Eleman Model Güncellemesi ve Hasar Tespiti Amacıyla Geliştirilen Yerli Yazılımlar”, 7. Yapı Mekaniği Laboratuvarları Çalıştayı, Konya, Türkiye, 4-5 Ekim 2019.
- Altunışık A.C., Okur F.Y., “Deneysel Modal Analiz, Model Güncelleme ve Yapı Sağlığı İzlemesi Amacıyla Geliştirilen Yerli Yazılımlar (DynamicModal / DynamicUpdate / DynamicCondition)”, 2. Deneysel Modal Analiz Çalıştayı, İstanbul, Türkiye, 19-20 Haziran 2019.
- Okur F.Y., Genç A.F., Günaydın M., Altunışık A.C., “Experimental Modal Testing of a Historical Clock Tower”, International Conference on Innovative Engineering Applications, SİVAS, TÜRKİYE, 20-22 Eylül 2018, pp.1-8.
- Kahya V., Şimşek S., Okur F.Y., Altunışık A.C., Aslan M., “Natural Frequency Analysis of Laminated Composite Beams with Multiple Open Transverse Cracks”, International Conference on Innovative Engineering Applications, Sivas, 20-22 Eylül 2018, pp.327-334.
- Kahya V., Karaca S., Altunışık A.C., Okur F.Y., Aslan M., “Localization of Open Transverse Cracks in Laminated Composite Beams Based on Modal Data”,

International Congress on Engineering and Architecture, Alanya, Türkiye, 14-16 Kasım 2018.

- Genç A.F., Okur F.Y., Günaydın M., Altunışık A.C., “Vibration Characteristics of Historical Masonry Museum”, International Conference on Innovative Engineering Applications, Sivas, Türkiye, 20-22 Eylül 2018, pp.1-7.
- Altunışık A.C., Okur F.Y., Genç A.F., Günaydın M., Adanur S., “Finite Element Model Updating of Historical Masonry Structures”, Second International Conference on Advanced Engineering Technologies, Bayburt, 21-23 Eylül 2017, pp.60-60.
- Altunışık A.C., Okur F.Y., Genç A.F., Günaydın M., Adanur S., “Tarihi Yığma Yapılarda Sonlu Eleman Model İyileştirmesi”, Second International Conference on Advanced Engineering Technologies, Bayburt, 21-23 Eylül 2017, pp.69-69.
- Altunışık A.C., Karahasan O.Ş., Okur F.Y., Genç A.F., Günaydın M., Adanur S., “Evaluation of Dynamic Response of Reinforced Concrete Buildings by Operational Modal Analysis Method”, 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Eskişehir, 11-13 Ekim 2017, pp.1-12.
- Altunışık A.C., Genç A.F., Okur F.Y., Günaydın M., Adanur S., “Finite Element Model Updating Effect on Earthquake Behaviour of Masonry Structures”, 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Eskişehir, 11-13 Ekim 2017, pp.1-12
- Altunışık A.C., Okur F.Y., Kahya V., Karaca S., "Damage Detection of A Multiple Cracked Cantilever Beam", 8th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, 19-22 Ekim 2017, pp.75-82.
- Altunışık A.C., Okur F.Y., Kahya V., “Analytical, Numerical and Experimental Investigation of A Box-Sectional Cantilever Beam With Multiple Cracks”, 2nd International Conference on Civil and Environmental Engineering, Nevşehir, 8-10 Mayıs 2017, pp.2131-2140.
- Altunışık A.C., Genç A.F., Günaydın M., Okur F.Y., Karahasan O.Ş., Adanur S., “Ambient Vibration Tests of Historical Masonry Buildings for Structural Condition Assessment”, Second International Conference on Civil and Environmental Engineering, Nevşehir, 8-10 Mayıs 2017, pp.1-10.

Kitap/Kitap Bölümleri

- Şevket, A., Okur, F.Y., Altunışık, A.C., “İnşaat Mühendisliğinde Tekla Structures Uygulamaları”, Dynamic Academy, ISBN: 978-605-81854-0-1, pp. 416, 2019.
- Altunışık, A.C., Günaydın, M., Genç, A.F., Okur, F.Y., “İnşaat Mühendisliğinde ANSYS Uygulamaları”, Dynamic Academy, ISBN: 978-605-81854-0-1, pp.639, 2018.
- Altunışık A.C., Genç A.F., Günaydın M., Okur F.Y., “Structural Identification of Historical Masonry Structures: Finite Element Analyses, Ambient Vibration Tests, Model Updating and Earthquake Response”, Scholar Press--Lambert Academic Publishing, ISBN: 978-3330090859, 2017.