



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Yusuf YANIK Tarafından Hazırlanan

MALZEME ÖZELLİKLERİNİN TİTREŞİM TESTİ VERİLERİNE DAYALI MODEL
KALİBRASYON YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 12 / 12 / 2017 gün ve 1731 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof.Dr.Mehmet Aydın KÖMÜR

Üye : Doç.Dr.Temel TÜRKER

Üye : Doç.Dr.Tayfun DEDE





Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

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

“Malzeme Özelliklerinin Titreşim Testi Verilerine Dayalı Model Kalibrasyon Yöntemiyle Belirlenmesi” isimli tez çalışmasını bana öneren, yoğun çalışma temposu içerisinde çalışmamın her aşamasında benim yanımda olan, engin bilgi ve tecrübelerinden daima yararlandığım ve daha iyi ve daha güzel çalışmalar için beni sürekli olarak teşvik etmeyi ihmal etmeyen çok değerli Hocam Sayın Doç. Dr. Temel TÜRKER'e teşekkürlerimi sunmayı her zaman bir borç bilirim.

Tez ile ilgili değerli görüş ve önerilerini benimle paylaşan ve tezimi inceleyerek bana yol gösteren çok değerli Hocam Sayın Doç. Dr. Tayfun DEDE'ye ve uzaktan katılarak bilgilerini paylaşan Hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet Aydın KÖMÜR'e teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, görüşlerinden faydalandığım hocalarım Yrd. Doç. Dr. Hasan Basri BAŞAĞA'ya ve Yrd. Doç. Dr. Hasan Tahsin ÖZTÜRK'e; uygulama aşamalarındaki yardımlarından dolayı Arş. Gör. Betül DEMİRTAŞ'a, İnş. Yük. Müh. Berna ÇORUHLU'ya, İnş. Müh. Bilal KUNT'a, Mohammed Durdi KARİMİ'ye, Arş. Gör. Kübra SAKA'ya ve Mak. Müh. Soner BİRİNCİ'ye çok teşekkür ederim.

Akademik ve özel hayattaki güçlüklerle birlikte göğüs gerdiğimiz, acıları ve mutlulukları birlikte paylaştığımız gerek iyi gerekse en zor zamanlarımda her zaman maddi ve manevi olarak yanımda olan değerli ev arkadaşım ve dostum Öğr. Gör. Ömer YILDIRIM'a ve çok kıymetli zamanımı ve tecrübelerini benimle paylaşan Hocam Sayın Doç. Dr. Tayfun DEDE'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde ellerinden gelen tüm imkanları sağlayan, özellikle hayatımın bu önemli aşamasında maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen, haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim ve bana her türlü desteği sağlayan babam Turan YANIK'a, annem Aysel YANIK'a ve her zaman yanımda olan değerli kardeşlerim Bahar YANIK'a, Yakup YANIK'a ve Oktay YANIK'a müteşekkir olduğumu belirtir, bu çalışmanın ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Yusuf YANIK

Trabzon 2018

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “*Malzeme Özelliklerinin Titreşim Testi Verilerine Dayalı Model Kalibrasyon Yöntemiyle Belirlenmesi*” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım *Doç. Dr. Temel TÜRKER*'in 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. 05/01/2018



Yusuf YANIK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Konuyla İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	3
1.2.1. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesine Yönelik Yapılan Çalışmalar	3
1.2.2. Dinamik Davranışların Belirlenmesi ile İlgili Yapılan Çalışmalar	10
1.2.3. Model Kalibrasyon ve Güncelleme ile İlgili Yapılan Çalışmalar	16
1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	23
1.4. Deneysel Yöntemlerle Modal Analiz	24
1.4.1. Ölçüm Yöntemleri	24
1.4.1.1. Çevresel Titreşim Yöntemi.....	24
1.4.1.2. Zorlanmış Titreşim Yöntemi	26
1.4.2. Çevresel Titreşim Testi Yöntemi'ne Ait Formülasyonlar	26
1.4.2.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) Yöntemi	26
1.4.2.2. Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi	26
1.4.3. Ölçüm Ekipmanları.....	27
1.4.3.1. Sensörler (Algılayıcılar)	27
1.4.3.2. Titreştirici	31
1.4.3.3. Veri Toplama Ünitesi	31
1.4.4. Sinyal İşleme	32
1.4.4.1. Sinyal Türleri.....	34

1.4.4.1.1.	Rastgele Sinyaller	34
1.4.4.1.2.	Periyodik Olmayan Sinyaller.....	35
1.4.4.1.3.	Örnekleme Zaman Fonksiyonları	36
1.4.4.1.4.	Örnekleme Zaman ve Frekans Dönüşümü	38
1.4.4.2.	Sinyal İşlemede Kullanılan Analiz Parametreleri.....	39
1.4.4.3.	Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi	40
1.5.	Sonlu Eleman Yöntemiyle Modal Analiz.....	41
1.5.1.	Sonlu Eleman Modeli Oluşturulması	41
1.5.2.	Modal Analiz Formülasyonları.....	42
1.5.2.1.	Tek Serbestlik Dereceli Sistemler	42
1.5.2.2.	Çok Serbestlik Dereceli Sistemler	47
1.5.3.	SAP2000 Programıyla Tekrarlı Analizler (Application Program Interface)....	49
1.6.	Model Kalibrasyon Yöntemiyle Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi.....	50
1.6.1.	Temel Unsurları	50
1.6.2.	İşlem Adımları	51
1.6.2.1.	Deneyel ve Analitik Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi	51
1.6.2.2.	Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması.....	51
1.6.2.3.	Amaç Fonksiyonlarının Belirlenmesi	51
1.6.2.4.	Değişkenlerin Belirlenmesi	52
1.6.2.5.	Değişim Aralığının Tayin Edilmesi.....	52
1.6.2.6.	Yakınsama Kriterinin Tanımlanması.....	52
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	55
2.1.	Giriş	55
2.2.	Ölçüm Sistemi Oluşturulması.....	56
2.2.1.	Donanım Kısmı.....	57
2.2.1.1.	Sensör	57
2.2.1.2.	Veri Toplama Kartı Tasarlanması	58
2.2.2.	Yazılım Kısmı.....	67
2.2.2.1.	Model Kalibrasyon Arayüz Programının Oluşturulması	67
2.2.2.1.1.	Deneyel Modal Analiz Kısmı (Birinci Bölüm).....	68
2.2.2.1.2.	Sonlu Eleman Modelleme Kısmı (İkinci Bölüm).....	75
2.2.2.1.3.	Model Kalibrasyon Kısmı (Üçüncü Bölüm)	77

2.3.	Çelik Model Uygulaması.....	79
2.3.1.	Geometrik Özellikleri ve Sınır Şartları.....	79
2.3.2.	Başlangıç Sonlu Eleman Modeli	80
2.3.3.	Arayüz Programı Yardımıyla Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi.....	81
2.3.3.1.	Çevresel Titreşim Testi.....	81
2.3.3.2.	Sonlu Eleman Model Aktarımı.....	85
2.3.3.3.	Model Kalibrasyonu	86
3.	BULGULAR VE İRDELEMELER	88
3.1.	Çelik Model İçin Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi.....	88
3.1.1.	Çelik Modelin Elastisite Modülünün Belirlenmesi	90
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	91
5.	KAYNAKLAR.....	94
	ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

MALZEME ÖZELLİKLERİNİN TİTREŞİM TESTİ VERİLERİNE DAYALI MODEL
KALİBRASYON YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ

Yusuf YANIK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Temel TÜRKER
2018, 104 Sayfa

Bu çalışmada, yapı elemanlarının elastisite modülü çevresel titreşim verilerinden elde edilen dinamik karakteristikler kullanılarak model kalibrasyon yöntemi yardımıyla belirlenmiştir. Bu amaçla çelik çubuk üzerinde çevresel titreşim testleri yapılarak frekanslar elde edilmiştir. Bu frekanslar aynı yapısal elemanın bilgisayar ortamında modellenmesiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Değişim parametresi olarak elastisite modülü seçilerek deneysel ve analitik olarak bulunan frekans değerleri arasındaki farkın azaltılmasına dayanan model kalibrasyon yöntemiyle elastisite modülünün gerçek değeri yani deneysel sonuçları veren değeri belirlenmeye çalışılmıştır. Deneysel ölçümler için ivmeölçerlerden ve sinyal toplama ünitesi olarak kullanılan elektronik devreden oluşan bir ölçüm sistemi tasarlanarak veriler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bu veriler Matlab programında analiz edilmiş ve deneysel frekanslar bulunmuştur. SAP2000 paket programı kullanılarak sonlu eleman yöntemiyle de teorik sonuçlar bulunmuştur. Deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki fark, elastisite modülündeki değişim dikkate alınarak SAP2000 programının API özelliğinden yararlanılarak Matlab ortamında oluşturulan bir yazılım aracılığıyla iterasyona tabi tutulmuştur. Bu sayede deneysel ölçüm sonuçlarına en yakın sonuç veren elastisite modülü belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Doğal Frekanslar, Malzeme Özelliği, Modal Analiz, Model Kalibrasyon, Titreşim Testi

Master Thesis

SUMMARY

DETERMINATION BY MODAL CALIBRATION METHOD BASED UPON
VIBRATION TEST DATA OF MATERIAL PROPERTIES

Yusuf YANIK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Temel TURKER
2018, 104 Pages

In this study, the elasticity modulus for the steel material is identified by the model calibration method using the dynamic characteristics obtained from the environmental vibration data. For this aim, the natural frequencies of the steel bar have been identified by carrying out the vibration test. The same bar has been modelled by SAP2000 finite element program. The experimental frequencies are compared with the results attained from finite element modal analysis. It has been attempted to determine the real value of the elasticity modulus by using the model calibration method. For this purpose, the elasticity modulus is selected as the change parameter and the difference between the experimental and analytical frequencies are minimized. For vibration test, a measurement system consisting of accelerometer and an electronic circuit used as data acquisition unit was designed and the signals were transferred into a computer. These data were analyzed in Matlab program and the experimental frequencies were extracted from these data. The model calibration process was carried out by using the API feature of SAP2000 program with iteration through software generated in Matlab program. In this view, the elasticity modulus which gives the closest result to the experimental measurement results is determined.

Keywords: Natural Frequencies, Material Property, Modal Analysis, Model Calibration, Vibration Test.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Operasyonel Modal Analiz Yöntemi'ne ait ölçüm sistemi (Türker, 2011).....	25
Şekil 1.2.	B&K4507 ve B&K8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler (Türker, 2011)	28
Şekil 1.3.	Piezo elektrik sensör	28
Şekil 1.4.	Üç eksenli ivmeölçer çipi	30
Şekil 1.5.	ADXL335 analog ivmeölçer pin yapısı	31
Şekil 1.6.	Veri toplama ünitesi	32
Şekil 1.7.	Dikdörtgen sinyal serisi ve genlik spektrumu (Heylen vd.,2007)	35
Şekil 1.8.	Periyodik olmayan dikdörtgen sinyal ve genlik spektrumu (Heylen vd., 2007)	36
Şekil 1.9.	Örnekleme dikdörtgen sinyal ve genlik spektrumu (Heylen vd., 2007).....	37
Şekil 1.10.	Örnekleme periyodik dikdörtgen sinyal ve genlik spektrumu (Heylen vd., 2007)	39
Şekil 1.11.	Tek serbestlik dereceli bir sistemin analitik modeli	43
Şekil 1.12.	Tek serbestlik dereceli bir sistemin matematik modeli	43
Şekil 1.13.	İki serbestlik dereceli bir sistemin analitik modeli	47
Şekil 1.14.	Matlab'da oluşturulan arayüz için akış şeması	49
Şekil 2.1.	Genel sistem sistematığı	56
Şekil 2.2.	Ölçüm sistemi akış diyagramı	56
Şekil 2.3.	ADXL335 üç eksenli analog ivmeölçer modülü	58
Şekil 2.4.	Veri toplama kartı blok şeması	59
Şekil 2.5.	Gürültülü işaret ve bu işarete ait FFT grafiği	60
Şekil 2.6.	Filtrelenmiş işaret ve bu işarete ait FFT grafiği	60
Şekil 2.7.	Kuantalama seviyesinin dijital sinyal üzerindeki etkisi	62
Şekil 2.8.	Kuantalama seviyesinin dijital sinyal üzerindeki etkisi	62
Şekil 2.9.	Örnekleme frekansının dijital sinyal üzerindeki etkisi	63
Şekil 2.10.	PROTEUS 8 (Proteus, 2017)'de tasarlanan veri toplama kartı	65
Şekil 2.11.	Veri toplama kartı üstten görünüşü	66
Şekil 2.12.	Veri toplama kartı alttan görünüşü	66

Şekil 2.13. Bakır plakete üzerinde veri toplama kartı	67
Şekil 2.14. Matlab ortamında oluşturulan ölçüm ve kalibrasyon arayüzü	68
Şekil 2.15. Titreşim sinyali örneği	68
Şekil 2.16. FFT dönüşümünün çizildiği grafik	69
Şekil 2.17. Sinyalin gerçek zamanlı olarak incelenmesini sağlayan durum	69
Şekil 2.18. Kayıt ayarları ekranı	70
Şekil 2.19. Kalan kayıt sayısını gösteren ekran	71
Şekil 2.20. Grafik kabul şeması	71
Şekil 2.21. FFT grafik çizimi	72
Şekil 2.22. Frekans seçimi ekranı	72
Şekil 2.23. Deneysel Modal Analiz kısmı	73
Şekil 2.24. Deneysel ölçüm blok diyagramı	74
Şekil 2.25. Sonlu Eleman model aktarım ekranı	75
Şekil 2.26. Sonlu elemanlar blok diyagramı	76
Şekil 2.27. Model kalibrasyon kısmı	77
Şekil 2.28. Model kalibrasyon blok diyagramı	78
Şekil 2.29. Çelik konsol kiriş modele ait üç boyutlu görünüm ve boyutlar.....	79
Şekil 2.30. Ölçümü yapılan çelik konsol model ve mesnet bağlantısı	80
Şekil 2.31. Çelik konsol kirişin sonlu eleman modeli	80
Şekil 2.32. Çelik konsol kiriş model için oluşturulan ölçüm düzeneği	82
Şekil 2.33. Çelik modelden alınan sinyal örneği	83
Şekil 2.34. Operasyonel Modal Analiz (OMA, 2006) programına aktarılan sinyal örneği	84
Şekil 2.35. İvmeölçerlerin yerleştirilme yönü	84
Şekil 2.36. OMA yazılımı ile elde edilen kararlılık diyagramı	85
Şekil 2.37. Sonlu Eleman Yöntemi sonucu elde edilen başlangıç frekans değerleri	86
Şekil 2.38. Çelik modelin başlangıç modelinin kalibre edilmesine ait ekran görüntüsü ...	87

TABLULAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Çelik modele ait malzeme özellikleri ve değerleri	81
Tablo 2.2. Çelik konsol kirişe ait başlangıç analitik modelden elde edilen doğal frekanslar	81
Tablo 2.3. Çelik konsol kirişe ait deneysel ölçümlerden elde edilen doğal frekanslar	83
Tablo 2.4. Çelik konsol modelin OMA programında elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları	85
Tablo 2.5. Konsol kiriş modelin deneysel ve başlangıç analitik frekansları	86
Tablo 2.6. Konsol kiriş modelin deneysel ve kalibre edilmiş başlangıç analitik frekansları	87
Tablo 3.1. Çelik konsol kiriş model için deneysel ve başlangıç analitik frekansları	89
Tablo 3.2. Konsol kiriş modelin deneysel ve kalibre edilmiş analitik frekansları	89
Tablo 3.3. Çelik model için elde edilen elastisite modülü	90

SEMBOLLER DİZİNİ

A	Genlik
An	Analog sinyal
ABC	Yapay arı koloni algoritması
AE	Ses yayılımı
A_{kuant}	Kuantalanmış sinyal
ANF	Ağırlıklı nispi fark kriteri
AMNF	Ağırlıklı mutlak nispi fark kriteri
AMMF	Ağırlıklı mutlak modal yer değiştirme kriteri
AMMK	Ağırlıklı mutlak modal kütle kriteri
a_0, a_n, b_n	Fourier serisi katsayıları
[C]	Sönüm matrisi
c	Yapının sönümü
C_{R_i}	İstenen hata oranı
c_{cr}	Kritik sönüm
ÇTY	Çevresel titreşim yöntemi
DMA	Deneysel modal analiz
E	Elastisite modülü
ECAM	Eşdeğer kaba agrega kütlesi
FE	Sonlu elemanlar
FFT	Fast fourier transform
FTAA	Frekans tanım alanında ayrıştırma
FYF	Frekans yanıt fonksiyonu
F(t)	Titreşim kuvveti
F_D	Sönüm kuvveti
F_I	Atalet kuvveti
F_S	Yay kuvveti
f_a	Analitik veya sayısal olarak elde edilen frekans değerleri
f_d	Deneysel ölçümlerden elde edilen frekans değerleri
f_i	Frekans

f_{\max}	Maksimum frekans
f_{\min}	Minimum frekans
f_s	Örnekleme frekansı
$f(t)$	Uygulanan kuvvet
f_{1a}	Teorik ölçümlerden elde edilen 1. frekans değeri
f_{2a}	Teorik ölçümlerden elde edilen 2. frekans değeri
f_{3a}	Teorik ölçümlerden elde edilen 3. frekans değeri
f_{1d}	Deneysel ölçümlerden elde edilen 1. frekans değeri
f_{2d}	Deneysel ölçümlerden elde edilen 2. frekans değeri
f_{3d}	Deneysel ölçümlerden elde edilen 3. frekans değeri
GFTAA	Geliştirilmiş frekans tanım alanında ayrıştırma
GSY	Güç spektral yoğunluk fonksiyonu
GUI	Grafik kullanıcı arayüzü
$G(f)$	İleri fourier dönüşümü
$G(k\Delta f)$	Değerler kümesi
$g(t)$	Ters fourier dönüşümü
$H(\omega)$	Frekans davranış fonksiyonu
Hz	Hertz
i	Karmaşık sayı sembolü
j	$\sqrt{-1}$ değeri
k	Frekans adım sayısı
k	Yapının rijitliği
[K]	Rijitlik matrisi
[M]	Kütle matrisi
m	Yapının kütlesi
m_r	r. moda ait genelleştirilmiş kütle matrisi
MGK	Modal güvence kriteri
N	Örnek sayısı
NDT	Tahribatsız yöntem
n	Mod sayısı

N_s	Zaman örnek sayısı
OMA	Operasyonel modal analiz
PUNDIT	Ultrasonik darbe hızı aracı
R.H.	Rölatif hata kriteri
SAB	Stokastik altalan belirleme
SCM	Yardımcı çimento malzemesi
SEY	Sonlu eleman yöntemi
SVR	Destek vektör regresyonu
sn	Saniye
TSDS	Tek serbestlik dereceli sistemler
t	Zaman
T	Periyot
UCS	Tek eksenli basınç dayanımı
ω	Sönümsüz doğal açısal frekans
ω_d	Sönümlü doğal açısal frekans
YK	Yakınsama kriteri
YSA	Yapay sinir ağı
ZTY	Zorlanmış titreşim yöntemi
$\alpha(\omega)$	Genlik
θ_α	Faz açısı
ξ	Sönüm oranı
τ	Blok genişliği
$\{u(t)\}$	Yerdeğiştirme vektörü
$u(t)$	Yapının yerdeğiştirmesi
$\{\dot{u}(t)\}$	Hız vektörü
$\dot{u}(t)$	Yapının hızı
$\{\ddot{u}(t)\}$	İvme vektörü
$\ddot{u}(t)$	Yapının ivmesi

$\{F(t)\}$	Kuvvet vektörü
Δ	Değişim oranı
Δf	Frekans aralığı
Δt	Zaman örnekleme aralığı



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Yapılara etki eden yüklerin güvenli bir şekilde taşınabilmesi için yapısal davranışın iyi bilinmesi oldukça önemlidir. Yapısal davranışın belirlenmesinde ise malzeme özelliklerinin ve sınır şartlarının tespit edilmesi önemli bir husustur. Yapılarda birbirinden farklı malzemeler kullanılabilir. Bu malzemelerin özelliklerine bağlı olarak yapısal davranış ve yük taşıma kapasitesi değişkenlik göstermektedir. Dolayısıyla malzeme özelliklerinin doğru olarak belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu amaçla kullanılabilen farklı yöntemler mevcuttur. Malzeme özellikleri belirlenirken yapı ya da yapı elemanları üzerinde gerçekleştirilen incelemelerde yapı ya da yapı elemanına hasar verilerek ya da hasar verilmeksizin inceleme yapılarak malzeme özellikleri belirlenmektedir. Günümüzde yeni yöntemler geliştirilmektedir. Gelişen teknoloji sayesinde incelemeler hasar verilmeden yapılabilecek hale gelmiştir. Bu yöntemler yapısal titreşimlerin gözlemlenmesine dayanmaktadır.

Mühendislik yapılarının yapısal davranışları dinamik karakteristiklere bağlı olarak değerlendirilmektedir. Dinamik karakteristikler, analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmektedir. Analitik yöntemde, yapının geometrisi, malzeme özellikleri ve mesnet şartları dikkate alınarak oluşturulan sonlu eleman modellerinin serbest titreşim (modal) analizleri gerçekleştirilmekte ve doğal frekanslar ile mod şekilleri elde edilmektedir. Dinamik karakteristiklerin deneysel olarak belirlenmesinde “Deneysel Modal Analiz Yöntemi” özellikle son yıllarda yaygın olarak uygulanmaktadır. Deneysel Modal Analiz Yöntemi'nin tarihsel süreci 1940'lı yıllara kadar uzanmaktadır. Bu yıllarda uçaklardaki titreşimin doğru olarak belirlenmesi amacıyla dinamik karakteristiklerin deneysel olarak değerlendirilmeye çalışılmıştır (Ewins, 1995). Dinamik kuvvetleri ölçen dönüştürücüler basit seviyelerde olduğundan çoğunlukla pratik olmayan ve zaman alan analog yaklaşımlar uygulanmıştır. 1960'lı yıllarda sayısal bilgisayarların ve Hızlı Fourier Dönüşümlerinin (Fast Fourier Transform-FFT) geliştirilmesi sonucu Deneysel Modal Analiz Yöntemi birçok mühendislik dalında uygulama alanı bulmuştur.

Deneysel Modal Analiz, inşaat mühendisliğinden havacılık ve uzay sanayisine, otomotiv sektöründen silah sanayisine kadar pek çok alanda karşımıza çıkmaktadır. Teorik

olarak ise, elektronik mühendisliğinin, makine mühendisliğinin ve uygulamalı matematiğin bir arada olduğu çok disiplinli bir çalışma alanını kapsamaktadır.

Deneysel Modal Analiz yöntemi, Çevresel Titreşim Yöntemi ve Zorlanmış Titreşim Yöntemi olarak iki grupta sınıflandırılmaktadır. Çevresel Titreşim Yöntemi'nde yapının doğal bir etki ile titreştirildiği kabul edilmekte ve yapının bu etkiye göstermiş olduğu tepki ölçülmeye çalışılmaktadır. Tepkilerin ölçülüp değerlendirilmesinde frekans ve zaman tanım alanına dayalı birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin matematik tabanları aynı olup veri işleme ve denklem çözme teknikleri farklıdır. Kısaca Çevresel Titreşim Yöntemi'nde, yapı üzerinde maksimum genliklerin olduğu noktalara değişik türde hassas ivmeölçerler yerleştirilmektedir. Elde edilen titreşim sinyalleri veri toplama ünitesinde toplandıktan sonra çeşitli yazılımlar aracılığıyla işlenmektedir. İşlenen bu sinyallerden yapının dinamik karakteristikleri belirlenmektedir. Zorlanmış Titreşim Yöntemi'nde ise yapı bilinen ve ölçülebilen bir etki ile (sarma tablası, darbe çekici, sarsıcılar vd.) titreştirilmekte ve yapının bu etkiye verdiği tepki ölçülüp istenilen sonuçlara ulaşılmaktadır.

Analitik ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler işçilik hataları ve yapıların projelendirme aşamasında yapılan birtakım kabuller gibi nedenlerden dolayı birbirine çok benzerlik gösterememektedir. Bunların sonucunda, teorik analizi yapılan yapı ile yapının benzer dinamik karakteristiklere sahip olup olmadığının bilinmesi oldukça önemlidir. Eğer farklılıklar varsa, deneysel yöntemlerle elde edilen veriler yapının o anki mevcut durumunu en iyi yansıtması sebebiyle oluşan farklılıkların giderilmesi gerekmektedir. Bu amaçla sonlu eleman modelinde yapılan bu işleme "Sonlu Eleman Model Kalibrasyon" adı verilmektedir. Model kalibrasyonunda, yapıda hasarsız durum için gerçekleştirilen ölçüm sonuçları baz alınarak, başlangıç analitik modelinde değişiklik yapıp deneysel ve analitik sonuçlar arasındaki farkın azaltılması işlemine denilmektedir. Model kalibrasyonu işleminde analitik model üzerinde malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki değişimler dikkate alınmaktadır. Daha sonra kalibre edilmiş analitik model oluşturulmaktadır. Kalibre edilmiş analitik model, başlangıç analitik modelin malzeme özellikleri ve sınır şartları dikkate alınarak kalibre edilmesi sonucunda elde edilen yapının hasarsız durumunu temsil ettiği varsayılan analitik modeldir. Bu sayede yapının dinamik karakteristikleri yardımıyla malzeme özelliklerinin belirlenmesi mümkün olmaktadır.

1.2. Konuyla İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Bu bölümde konu ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar incelenmektedir. Yapılmış çalışmalar kısmı üç bölüme ayrılmıştır. Birinci bölümde, malzeme özelliklerinin belirlenmesine yönelik yapılmış çalışmalara yer verilmektedir. İkinci bölümde, dinamik davranışın deneysel ve analitik olarak elde edilmesi ile ilgili yapılmış çalışmalar anlatılmaktadır. Son bölümde ise model kalibrasyon ve güncelleme ile ilgili yapılmış çalışmalar incelenmektedir.

1.2.1. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesine Yönelik Yapılan Çalışmalar

Bütün yapılar, normal işletim koşulları altında sürekli çeşitli kaynaklardan gelen çevresel titreşimlerin etkisi altındadırlar. Bir yapının sağlık taraması için, çevresel titreşimlerin kullanımı yapıyı titreştirmede oldukça önemli bir yöntemdir. Bu tür titreşim deneyleri, zorlanmış titreşim deneyine karşı iyi bir alternatiftir.

Christaras vd. (1994), yaptıkları çalışmada iki tane dinamik tahribatsız yöntem kullanarak kayaçların elastisite modüllerini hesaplamaya çalışmışlardır. Birinci yöntemde P ve S dalga ultrasonik hız ile belirlemeyi amaçlamışlardır. İkincisinde ise mekanik rezonans frekans algılamasını kullanmışlardır. Sonuçları karşılaştırdıklarında ise korelasyonların oldukça iyi olduğunu görmüştür. İki yöntem, statik yöntemle elde edilen sonuçlar ile önemli ölçüde karşılaştırılabilir sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Çalışmada statik ve dinamik değerler arasında tutarlı bir fark kaydetmişlerdir.

Mantena (1996), yaptığı çalışmada frekans alanında titreşim analizini kullanarak malzemeleri karakterize eden tahribatsız deneysel tekniği üzerinde çalışmıştır. Dinamik modülü belirlemek için metalik, polimerik ve kompozit malzemeler üzerinde deneyler gerçekleştirmiş ve zaman alanlı serbest titreşim testlerinden elde edilen verilerle kıyaslamıştır.

Brownjohn (1997), çevresel titreşim deneyini, titreşim kaynağı olarak köprü üzerinde yürüyen bir insan kullanarak Singapur'da bir üstgeçit üzerinde gerçekleştirmiştir. İlk iki dikey titreşim modunun, ortalama yaya adımı kadar yani iki Hertz civarında olduğu görülmüştür. Yayalara olan tepki, hareketli bir uyarılma kaynağının doğrusal ve doğrusal olmayan modelleri kullanılarak simüle edilmiştir.

Hermans ve Auweraer (1999), çalışmalarında doğal etki tekniğini ve dengeli gerçekleşme ile standart değişken analizi olarak isimlendirilen iki altalan tekniklerinin endüstriyel sorunlara uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Bir aracın hareket boyunca arka süspansiyon sisteminin modal karakteristiklerini gürültü problemini irdelemek; uçağın uçuş sırasındaki titreşim analizini değerlendirmek ve üç açıklıklı beton köprüünün mod şekillerini, frekanslarını vb. belirlemek amacıyla belirlenen modeller çevresel etkiler altında test edilmiştir.

Gibson (2000), yaptığı çalışmada, tek bir modda veya çoklu titreşim modunda modal testin çeşitli çevre koşulları altında kompozitlerin ve bileşenlerinin elastisite modüllerini ve sönümlenme faktörlerini belirlemek için kullanılabileceğini araştırmıştır. Modal test hem içsel özellikleri için hem de kalite kontrolü için hızlı ve doğru bir yaklaşım olma özelliğine sahiptir. Bu ölçümler, kompozitlerin genel elastik sabitleriyle kompozitler içindeki takviye edici liflerin dağılımı, kompozitlerin zaman alanlı sünme tepkisi, kompozitlerin ve bileşenlerinin yükseltilmiş sıcaklık davranışı, kompozitlerin ara tabakalarda kırılma tokluğunu karakterize etmek için uygulanmaktadır. Bu çalışmada kompozit onarımların etkinliğini değerlendirmek için modal titreşim testlerinin kullanımına ilişkin araştırmaların gerekliliği vurgulanmaktadır.

Chang vd. (2001), Hong Kong'da bulunan uzun açıklıklı bir kablolu köprüünün dinamik karakteristiklerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu amacı gerçekleştirmek için Sonlu Eleman Yöntemi'ni ve Çevresel Titreşim Testi ölçümlerini kullanmışlardır.

Ren vd. (2004a), yapmış oldukları çalışmada arazi deneyleri için trafik ve rüzgâr gibi çevresel uyarıcıları dikkate alarak çelik kirişli kemer köprülerinin deneysel ve analitik modal analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

Ren vd. (2004b), Ohio'da bulunan Roebling asma köprüsünün Operasyonel Modal Analiz Yöntemi yardımıyla çevresel titreşim etkisi altındaki dinamik karakteristiklerini bulmaya çalışmışlardır.

Ren vd. (2004c), üç açıklıklı sürekli kirişli Cumberland Köprüsü'nün Çevresel Titreşim deneylerine dayalı sismik performansını değerlendirmeye çalışmışlardır. Çalışma, Çevresel Titreşim deneylerinin yapılarak gerekli ölçümlerin alınması, sonlu eleman modelinin oluşturulması vb. kısımlardan oluşmaktadır.

Baptista vd. (2004), yaptıkları çalışmada Portekiz'in Algerva bölgesinde 16. yüzyılda yapılmış ve 1755 yılındaki Lizbon depreminde hasar gören N. Sra do Carmo kilisesi üzerinde köprüünün dinamik karakteristiklerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Bunun için

modelin analitik modelinden ve Çevresel Titreşim deneylerinden dinamik karakteristik değerleri alınarak değerlendirilmiştir.

Göge vd. (2005), titreşim testi yöntemiyle uçak modeli üzerinde lineer olmayan etkileri belirlemek amacıyla yapının lineer olduğu kabulüyle deneysel ölçümler üzerinde çalışmışlardır. Alınan sonuçlara bakılarak yapının tamamıyla lineer olmadığı görülmüştür. Yapıdaki lineer olmama, rezonans frekanslarının lineer olarak çizilmesiyle elde edilmiştir.

Jaishi ve Ren (2005), yapılar için pratik bir sonlu eleman iyileştirme tekniğini Çevresel Titreşim Test sonuçları vasıtasıyla geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bunu gerçekleştirmek amacıyla seçilen basit bir kirişin frekans değişimleri ve mod şekilleri değerlendirilmiştir. Daha sonra kirişin sonlu eleman güncellemesi için bir amaç fonksiyonu belirlendikten sonra Çevresel Titreşim Test'lerinden alınan sonuçlara göre beton ve çelik karışımı bir köprünün analitik modelinde güncelleme yoluna gidilmiştir.

Bayraktar vd. (2007a), çalışmalarında Çevresel Titreşim Testi deneyleri vasıtasıyla elektrik iletim kablolarının, çelik direklerin özellikle de iki ayaklı çelik elektrik direklerin üzerinde dinamik karakteristiklerine etkisini değerlendirmişlerdir.

Bayraktar vd. (2007b), çalışmalarında Trabzon İlinin Akçaabat İlçesinde yapım aşamasında olan bir çatı sistemini seçerek düzlem kafes taşıyıcı sistemlerin dinamik karakteristiklerini Çevresel Titreşim Testi ile belirleme çalışmışlardır.

Bayraktar vd. (2007c), çalışmalarında Çevresel Titreşim Deneyleri vasıtasıyla taş ocağı yakınlarında yer alan bir yığma binanın, taş ocağında yapılan patlatma etkisi altındaki dinamik davranışını incelemişlerdir. Ölçümlerin sonunda patlatma etkisinin çevrede herhangi bir olumsuz etki yapmayacağı sonucu elde edilmiştir.

Bayraktar vd. (2007d), Trabzon İlinde bulunan ve ağır araç trafiğine maruz bir karayolu köprüsü seçilerek karayolu köprülerinin deprem davranışlarının Çevresel Titreşim Deneyleri ile belirlenmesi konusunda çalışmalarını tamamlamışlardır.

Bayraktar vd. (2008a), yaptıkları çalışmada iki şerefeli bir minarenin Çevresel Titreşim Deneyi üzerinde çalışmışlardır. Betonarme olan minarenin ANSYS programı ile üç boyutlu sonlu eleman modeli hazırlanmıştır. Minarenin Çevresel Titreşim Deneyi doğal etkiler altında yapılmıştır.

Bayraktar vd. (2008b), Çevresel Titreşim Deneyi vasıtasıyla patlatma etkisinden kaynaklanan yer hareketi etkisinin taş ocağından yaklaşık 500 m uzaklıkta bulunan bir karayolu köprüsü üzerindeki dinamik davranış etkilerini araştırmışlardır.

Bayraktar vd. (2009), yaptıkları çalışmada Trabzon'daki Ayasofya Kilisesi'nin 23m yüksekliğindeki çan kulesi üzerinde yapılan Çevresel Titreşim Testi ve Operasyonel Modal Analiz sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Geometrik araştırmalardan sonra analitik model oluşturulmuştur. Daha sonra deneysel ölçümler iki farklı zamanda alınarak gerçekleştirilmiştir. İlk kurulumda on iki tek eksenli ivmeölçer kullanılırken ikinci kurulumda bir tek eksenli referanslı dört üç eksenli ivmeölçer, hem kubbe doğal frekansları ve modal sönüm oranları için hem de eğilme ve burulma modu şekillerinin belirlenmesi için kullanılmıştır. Analitik ve deneysel sonuçlardan elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

Topçu vd. (2010), yapmış oldukları çalışmada betonun basınç dayanımını ultrases geçiş hızı ve Schmidt değerlerinden tahmin etmek için SONREB yöntemine alternatif olarak bir yapay sinir ağları (YSA) modeli üzerinde çalışmışlardır. Beş farklı seride beton üretimi yapıldıktan sonra bir kenarı 15 cm olan küp numuneler üzerinden ultrases geçiş hızı, Schmidt çekici okumaları ve daha sonra da basınç dayanımı değerleri alınmaya çalışılmıştır. Elde edilen verilerle beraber YSA modeli hazırlanmıştır. Hazırlanan YSA modelinin sonuçları ile diğer araştırmacıların sonuçları incelendiğinde YSA model sonuçlarının daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Jung vd. (2012), N-ilaveli CMn yapısal çeliklerin mekanik özelliklerinin impuls iç sürtünme tekniği ile analizini yaptıkları çalışmada gerçekleştirmişlerdir.

Albayrak vd. (2013), yaptıkları çalışmada beton basınç dayanımının, tahribatsız deney yöntemleri sonuçları kullanılarak Yapay Sinir Ağları ile tahmini araştırmışlardır. Betonun basınç dayanımını elde etmek amacıyla numunenin ultrases geçiş hızı (m/sn), kür süresi (gün) ve Schmidt test çekici sonuçlarından oluşan 151 seri deney gerçekleştirilip betonun basınç dayanımları tahribatsız yöntemle değerlendirilmeye çalışmışlardır. Tahribatsız yöntemden sonra tahribatlı yöntem aracılığıyla da beton basınç dayanımları elde edilmiştir. Yapay sinir ağları uygulaması için 121 örnek eğitim aşamasında, 30 örnek de test aşamasında kullanılarak deneyden alınan verilere yaklaşık olup olmadığı değerlendirilmeye çalışılmıştır. Alınan değerlerin birbirine yakın çıktığı sonucuna ulaşılmıştır.

Dos Santos vd. (2013), yaptıkları çalışmada üç farklı yöntem için elde edilen elastisite modülü sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Boyutları 150x30x20mm³ olan numuneler kullanılarak elastisite modülü statik ve dinamik olarak farklı yöntemlerle belirlenmiştir. Elastisite modülünün çekme, basınç, kırılma, RFDA ve ultrasonik hız ölçümleri gibi farklı fiziksel testler kullanılarak alınan sonuçların tutarlı bir yakınlık oluşturduğu görülmüştür.

Çankaya vd. (2013), yapmış oldukları çalışmada beton basınç dayanımının belirlenmesinde kullanılan geleneksel deney yöntemleri üzerinde çalışmışlardır. Bu yöntemlere ek olarak görüntü işleme tekniğinin betonun basınç dayanımının belirlenmesindeki performansı üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bunu görebilmek amacıyla görüntünün sayısallaştırılması uygulaması ile bir dizi analitik modelleme yapmışlardır. Görüntü işleme ve yapay sinir ağları beraber kullanılarak sayısallaştırılan görüntü üzerinde analitik bir model elde etmişlerdir. Analitik modellemenin başarısı deneysel verilerle karşılaştırılmış ve yüksek bir doğruluk oranı ile sonuçlandığı görülmüştür.

Brebels ve Bollen (2014), yapmış oldukları çalışmada hasarsız olarak malzeme özelliklerini belirlemeye çalışmışlardır. Bunun için malzemeler üzerinde elastisite modülü, kayma modülü ve poisson oranı gibi malzeme özelliklerinin ölçümü için test yapmışlardır. Test için performanslı bir ekipman oluşturulmuş ve Impulse Excitation Technique ile tahribatsız olarak malzeme analizi yapılmıştır.

Chen vd. (2014), çalışmalarında Yeni Zelanda'da bulunan 20m uzunluğa sahip Newmarket Viyadüğü'nün sonlu eleman modelini Çevresel Titreşim Testi verileri yardımıyla güncellemeyi amaçlamışlardır. Bu viyadüğün başlangıç sonlu eleman modelindeki malzeme özellikleri; proje dökümanları, laboratuvar deneyleri ve saha incelemeleri aracılığıyla elde edilmiştir. Köprü üzerinde uzun süreli yapı sağlığı izleme sistemi bulunmaktadır. Uzun süreli alınan veriler ışığında köprünün otomatik model güncellemesi yapılarak köprünün anlık performansı araştırılmıştır. Tüm FE model kalibrasyon sürecinin başarısı FE modelinin güncellenmesinde kullanılan bilinmeyen parametreler, amaç fonksiyonları ve seçilen çözüm yolu hakkında mühendislik kararları oldukça önemli bir yer kaplamaktadır.

Drelich vd. (2015), yaptıkları çalışmada selüloz elyaf çimento levhalarının üretim sırasındaki otomatik kalite kontrolü için lamb dalgalarını kullanan temassız bir ultrasonik yöntem sunmayı amaçlamışlardır. Çatlaklar, malzeme heterojenliği gibi kusurları belirlemek için özel olarak yapılmış bir ultrason tarayıcı kullanılmaya çalışılmıştır. Ayrıca, tahta nem içeriğinin ultrasonik test sonuçlarına etkisi göz önüne alınmıştır. Levhadaki nem içeriği üretimlerinin tüm aşamalarında ölçülmüş ve bitmiş selüloz elyaf çimento levhalarındaki ortalama kütle nem içeriğinin dağılımını gösteren haritalar çizilmesi amaçlanmıştır. Çalışmalar, temassız ultrason yönteminin üretimin tamamlanmadığı tüm levhaların test edilmesi için uygun bir araç olduğunu belirtmektedir.

Türker vd. (2015), çalışmalarında laboratuvar ortamında oluşturdukları 1/10 ölçekli taş kemer köprü modelinin dinamik karakteristiklerini Çevresel Titreşim Testi Yöntemi'ni kullanarak elde etmişlerdir. Daha sonra SAP2000 programında üç boyutlu katı elemanlar kullanarak modelin modal analizini yapmışlardır. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar ile modal analiz sonuçlarını kıyaslayarak farklılıkları değerlendirmişlerdir.

Zoidis vd. (2016), köprünün beton yüzeyinde geniş çatlaklara neden olan nedenlerin araştırılması amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Çalışmanın amacı, köprü betonunun durumunun değerlendirilmesi ve köprünün statik verimliliğinin mevcut durumu ile sistematik testler yoluyla NDT yöntemleri kullanılarak değerlendirilmesidir. Çatlakların görsel denetimi, çatlama derinliğinin (ultrason darbe hızı ölçümleri) ile beton kalite tahmininin petrografik analizi, su yalıtım bütünlüğü vb. gibi yöntemler üzerinde çalışmışlardır. Bunun sonucunda, alkali-silika reaksiyonunun köprü unsurları üzerinde şiddetli çatlamanın nedeni olduğu gösterilmiştir.

Gupta vd. (2016), yaptıkları çalışmada eşdeğer kaba agrega kütlesi (ECAM) yöntemi olarak adlandırılan geri dönüştürülmüş beton agrega kullanılarak normal dayanımlı beton üretimi için yeni karışım oranlama yöntemi üzerinde çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Birinci aşamada, tek bir parametre tek eksenli basınç dayanımını inceleyerek önerilen karışım tasarım yöntemini doğrulamak için bir deney programı gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında ise geri dönüştürülmüş betonun mekanik özelliklerini araştırmak amacıyla önerilen yöntem kullanılarak üç farklı beton sertliği tasarlamak için uygulanmıştır. Basınç dayanımı, elastisite modülü, Schmidt çekiç testi, ultrasonik darbe hızı testi, taze yoğunluk ve sertleştirilmiş yoğunluk olmak üzere farklı farklı mekanik özellikler üzerinde çalışmalarını gerçekleştirmiş ve sonuçlarını sunmuşlardır.

Ahn vd. (2017), yaptıkları çalışmada, beş ultrasonik tabanlı tahribatsız test yönteminin (darbe hızı, yüzey-dalga iletimi, yayılmış ultrasonografi ve AE (ses yayılımı) analizi) teorilerini, vaka incelemelerini, uygulanabilirliklerini ve sınırlamalara göre ayrıntılı bir şekilde incelemeyi amaçlamışlardır.

Karaton vd. (2017), yapmış oldukları çalışmada 12. yüzyılda inşa edilen 38.6m ana açıklığa sahip Malabadi Köprüsü'nün doğrusal olmayan sismik tepkileri değerlendirilmeye çalışılmışlardır. Üç farklı deprem seviyesi (D1, D2 ve D3) seçimi sismik yükleme için uygun görülmüştür. Bu deprem seviyeleri için köprünün doğrusal olmayan sismik analizleri yapılmıştır. Köprü üzerinde tek eksenli basınç dayanım testleri, ultrasonik testler, Schmidt çekiç testleri ve kütle kaybı testleri gerçekleştirilerek köprünün malzeme özellikleri

belirlenmeye çalışılmıştır. Makro modelleme tekniği için malzeme özellikleri test sonuçlarının kullanılmasıyla belirlenmiştir. D1 ve D2 deprem yükleri altında kemerler ve fiskiye duvarlarda hasar bölgesi oluşmamıştır. Ama D2 deprem yükleri altında dolgu malzemesinde plastik deformasyonlar oluşmuştur. Sayısal sonuçlara bakıldığında köprünün ana kemerinin D3 deprem yüklemesi altında ağır hasar göreceği varsayılmaktadır. Bu nedenle, köprü ana kemeri akış yönünde güçlendirilmesi yapılan çalışmada vurgulanmıştır.

Lai vd. (2017), yapmış oldukları çalışmada Schmidt çekiç geri tepme değerlerini kullanarak Antarktika Yarımadası'ndaki seçili alanlardan gelen kayaların basınç dayanımını belirlemeye çalışmışlardır.

Adnan (2017), yaptığı çalışmada ahşap esaslı cami üzerinde caminin yapısal dayanıklılığını belirlemek amacıyla ultrasonik darbe hızı aracı (PUNDIT) ve Schmidt çekiç testlerini gerçekleştirmiştir. Bu testler mevcut yapıyı bozmadan gerçekleştirilebilmektedir. Kaydedilen okumalar, girişlerin ve kolonların çoğunun orta veya zayıf bir mukavemete sahip olduğu sonucuna ulaştırmıştır. Bu nedenle, caminin yapısal bütünlüğünü korumak için düzeltici önlemler alınmalıdır. Bu nedenle, kullanıcıların güvenliğini sağlamak, caminin yapısal bütünlüğü, bakım ve onarım için uygun tedbirlerin yapılması gerektiğinin önemine dikkat çekilmiştir.

El Mir ve Nehme (2017), yaptıkları çalışmada NDT (tahribatsız yöntem) yönteminin sınırlamalarını anlamak için Schmidt çekiçli tepki indeksinin farklı ölçülmüş parametreler üzerine çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Kompozit malzeme olan beton, son zamanlarda SCM'lerin (yardımcı çimento malzeme) kullanımı ile gelişmektedir. Oldukça fazla beton tipi üretilmektedir. Karışım içindeki materyallere göre betonun sınıfı belirlendiğinden bir parametre seçiminin etkisine göre yüzey sertliğinin tekrarlanabilirliği üzerine bir analiz göstermeyi hedeflemişlerdir.

El Aal ve Nabawy (2017), yaptıkları çalışmada Suudi Arabistan'daki Wajid Kumtaşlarının fiziksel ve mekanik özelliklerini tanımlamak ve inşaat amaçlı ekonomik değerlerini açıklamaya çalışmışlardır. Çalışma alanındaki üç alandan Wajid Kumtaşlarından temsili olarak örnekler toplanarak mekanik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Mekanik özellikler, tek eksenli basınç dayanımı, en büyük gerilme kuvveti, Schmidt çekiç sayısı, gözeneklilik, kılcal su emme vb. gibi özellikler içermektedir.

Karakul (2017), yaptığı çalışmada doygunluğun Schmidt tepki değerlerine etkisi ve basınç dayanımı ile Schmidt tepkisi arasındaki ilişkileri farklı kökenli çeşitli kaya türleri için araştırılmaya çalışılmıştır.

Fattahi (2017), yaptığı çalışmada tek eksenli basınç dayanımını tahmin etmek için ANFIS-SCM (uyarlamalı nöron bulanık çıkarım sistemi-çıkarımsal kümeleme yöntemi) ve SVR (destek vektör regresyonu)-ABC (yapay arı koloni algoritması) adlı veri analizi için yumuşak hesaplama yöntemlerinin uygulanmasını göstermeyi amaçlamıştır. Bu modellerde, Schmidt çekiç geri verme değerleri, giriş parametreleri olarak kullanılmıştır. UCS (tek eksenli basınç dayanımı) ise çıkış parametresi olarak kullanılmıştır. Alınan sonuçlara bakıldığında ANFIS-SCM modelinin, yüksek dereceli doğruluk ile Schmidt çekiçli tepki değerlerinden kayaların UCS'sinin dolaylı olarak tahmin edilmesinde güçlü bir potansiyele sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

1.2.2. Dinamik Davranışların Belirlenmesi ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Brughmans vd. (1995), bir araba karoseri üzerinde modal analiz çalışmaları yapmışlardır. Modal analiz çalışmalarının içeriği deneysel ve analitik olarak iki kısma ayrılmaktadır. Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile sonuçlar alındıktan sonra MSC/NASTRAN sonlu elemanlar programıyla alınan sonuçlarla kıyaslanmıştır. Daha sonra araba karoserinin analitik modeli geliştirilmeye çalışılmıştır.

Taleghani ve Pappa (1996), kauçuk tabakaların modal parametreler üzerindeki etkisini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla grafit epoksi tüpler üzerinde çekiç testleri kullanılarak gerçekleştirilen Deneysel Modal Analiz ölçümlerini yapmışlardır. Bu sonuçlar daha sonra NASTRAN sonlu eleman analiz programıyla analiz edilmiştir. Alınan bu iki sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlara bakıldığında kauçuk tabakaların yapısal sönümü arttırdığı görülmüştür. Ayrıca kauçuk tabakaların doğal frekansları da azalttığı görülmüştür.

Farrar ve Doebling (1997), büyük yapılar üzerinde hasar tespiti için gerçekleştirdikleri ölçümler sonucunda buldukları sonuçları yapmış oldukları çalışmalarında anlatmışlardır. Büyük yapılarda test yapmanın oldukça zor olduğu belirtilmiştir. Çünkü test için gerekli olan maddiyat problemi sorun teşkil etmektedir. Bu çalışmada, Amerika'nın Albuquerque şehrindeki Rio Grande Köprüsü'nde gerçekleştirilen Deneysel Modal Analiz ölçümleri yapılmıştır. Alınan sonuçlar verilmiştir.

Pavic vd. (1998), çalışmasında inşaat mühendisliği alanındaki Deneysel Modal Analiz uygulamalarını havacılık, mekanik, otomotiv alanındaki uygulamalarla kıyaslamıştır.

Ceballos vd. (1998), Arjantin'deki Atucha II NPP reaktör binasının dinamik karakteristiklerini elde etmeye çalışmışlardır. Tesisin sismik özellikleri hakkında bilgi almak

ve dört katmanlı bir toprak tabakası üzerine inşa edilen nükleer tesisin deneysel ve teorik analizleri için yöntemler geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bunun için doğal frekanslar ve modal sönüm oranlarını belirlemek amacıyla darbe testi uygulamışlardır. Teorik analizler başka bir çalışmada kararlı durum davranışından elde edilen temel rijitlik katsayısı kullanılarak yapılan üç boyutlu model üzerinde ölçüm alınmıştır. Hesaplanan temel rijitlik katsayısı, ölçüm sonuçlarıyla ve eksenel simetrik analiz sonuçlarıyla kıyaslanması yapılmıştır. Çalışmadan, sonlu eleman yöntemi kullanılarak yapılan analizler neticesinde alınan temel rijitlik katsayılarının kararlı durum davranışından alınandan oldukça düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Ashory (1999), Deneysel Modal Analiz ölçümleriyle ilgili oluşan mekanik hataları dikkate alarak bu hatalara çözüm yolu bulmayı amaçlamıştır. Ayrıca Deneysel Modal Analiz ölçümlerini geliştirmeyi hedeflemiştir. Bu hedefle, ivmeölçer kütle etkisinin, çekiç yapı etkileşiminin, askı yayı etkilerini ve lineer olmayan etkilerin Deneysel Modal Analiz ölçümleri üzerindeki etkilerini incelemiştir.

Schwarz ve Richardson (1999), Deneysel Modal Analiz Yöntemi'nin, ölçümlerde kullanılan cihazları, modal parametrelerin elde edilmesini, frekans davranış fonksiyonlarının elde edilmesini, alternatif formdaki frekans davranış fonksiyonlarını, çekiç testi, sarsıcı testi, sinyal türleri ve modal parametrelerini içeren geniş kapsamlı bir çalışma yapmışlardır.

Maeck ve Roeck (2000), yolcu, yük trenleri ve hızlı metrolardan kaynaklanan titreşimleri belirlemek için modeller geliştirmeyi amaçlamışlardır. Yüksek hızlı trenlerin geçtiği bir köprü üzerinde yapılan ölçümlerde köprüye ve raylara ivmeölçerler bağlamışlardır. Bu sayede trenlerden oluşan titreşimleri belirlemişlerdir. Bu amacı gerçekleştirmeye yönelik çalışmayı yapmışlardır.

Çolakoğlu ve Köksal (2000), elektronik savunma sistemlerinde hareketli platforma monte edilmiş cihazlarda oluşan titreşimler üzerine çalışmalar yapmışlardır. Doğal frekans analizi için hava harp sistemlerinde kullanılan el-kontrol ünitesi seçilip bilgisayar ortamında üç boyutlu katı model olarak tasarlanan ünitenin, doğal frekanslarının ve mod şekillerinin elde edilmesi için ANSYS programından elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlarla sonlu eleman analiz sonuçları kıyaslanmış ve irdelenmiştir.

Pavic ve Reynolds (2002), arazide daha az süre çalışmayla iyi sonuçlar alabilen ve yayaların kullanımı amacıyla yapılan köprülerin sürekli kullanımda olmalarından dolayı, modal testlerin kısa sürede yapılması ve yüksek doğruluk derecesine sahip veriler elde edilmesini amaç edinen bir yöntem gerçekleştirmişlerdir. İstenilen sonuç hakkında hangi

yöntemin daha iyi ve daha hızlı bir şekilde sonuç vereceğini bilmek kolaylık sağlamaktadır. Pavic ve Reynolds'un yaptıkları yöntem elektrodinamik bir sarsıcı tarafından uygulanan 1 ila 39 Hertz aralığında frekansa sahip geçici bir sinyalin yapıya elektromanyetik sarsıcı ile uygulanmasıyla frekans davranış fonksiyonunun belirlenmesini amaçlamaktadır.

Yao vd. (2002), insanların hareketinden dolayı oluşan davranışı belirlemek amacıyla esnek bir yapı üzerinde konsol kirişlerle desteklenmiş tek serbestlik dereceli bir platform olan bir test düzeneği yapmışlardır. Bu düzenele yapıya uygulanan kuvvet ve yapının ivme tepkileri belirlenmiştir.

Reynolds ve İbrahim (2004), stadyum tipi yapıların titreşimlerinden daha iyi veri alabilmek, stadyumun seyircili olduğundaki yapısal davranışını izlemek ve bazı istatistiksel güvenilirlik sonuçlarına ulaşmak için uzaktan kontrol sistemi geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla dikkate alınan yöntemin gayet başarılı olduğu ve insan yoğunluğuna bağlı olarak stadyumun modal parametrelerinin değişim gösterdiği ortaya koyulmuştur.

Şanlıtürk ve Çakar (2004), ortamdaki gürültüden olumsuz etkilendiği Deneysel Modal Analiz ölçümlerini tekil değerler azalması (Singular Value Decomposition, SVD) yönteminden faydalanarak frekans davranış fonksiyonlarından gürültü etmeninin azaltılmasının etkisini incelemiştir.

Bayraktar ve Türker (2005-a, 2005-b), konsol kiriş, düzlem çerçeve ve üç boyutlu çerçeve modellerinin deneysel ve teorik modal analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Deneysel Modal Analiz ölçümlerinden elde edilen dinamik karakteristikler teorik analiz sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Deneysel Modal Analiz Yöntemi'nin mevcut yapıların dinamik karakteristiklerinin elde edilmesinde güvenle kullanılabileceği sonucu bu çalışmada ortaya koyulmaktadır.

Kammer (2005), üç eksenli ivmeölçerler için ilgili mod için matrisin determinantının en az olmasına dayanan yeni bir yöntem üzerinde çalışmışlardır.

Karakan (2008), yaptığı tez çalışması kapsamında Deneysel Modal Analiz Yöntemi'ni incelemiştir. Birçok yapısal basit sistem kullanarak deneysel ve analitik parametrelerin Frekans Yanıt Fonksiyonu (FYF) etkisi üzerinde çalışmalar yapmıştır.

Brencich ve Sabia (2008), çalışmalarında 1866 yılında inşa edilen 18 açıklıklı tarihi Tanaro Köprüsü üzerinde çalışmışlardır. Köprünün malzeme özelliklerini belirledikten sonra beş farklı sonlu eleman modeli hazırlamışlardır. Yapılan teorik analizler sonucunda köprünün dinamik karakteristiklerini değerlendirmişlerdir. Sonrasında ivmeölçerler kullanarak köprünün dinamik analizlerini yapmışlardır.

Bayraktar vd. (2010b), yapmış oldukları çalışmada, deneysel ölçüm yöntemi yardımıyla farklı inşa aşamalarındaki üç betonarme binanın dinamik parametreleri üzerinde çalışmışlardır. Yapılan ölçümlerden binaların o anki durumları için doğal frekansları, mod şekilleri ve modal sönüm oranları belirlenmiştir. Binaların birinci doğal frekansları standartlarda kullanılan yaklaşık yöntemlerle hesaplanmış, ölçülen ve hesaplanan frekans değerleri kıyaslanmıştır. Bu çalışmada, çalışma yapılan binaların doğal titreşim frekansları ve mod şekilleri mevcut durum için değerlendirilmiş ve beklenen modal davranışın olduğu görülmüştür. Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile binalar üzerinde gerçekleştirilen ölçümlerden alınan veriler yardımıyla, binaların dinamik davranışlarının belirlenmesi amacıyla yapılacak analitik modellerin binanın mevcut durumu için yapılacak ölçümlerden alınacak sonuçlara göre iyileştirilebileceği sonucuna ulaşılabilmektedir.

Türker (2011), yapmış olduğu çalışmada çevresel titreşim altında deneysel olarak ölçülen dinamik karakteristikleri dikkate alarak yapıların hasar durumlarının tespiti ve değerlendirilmesine olanak sağlayan bir yaklaşım üzerinde çalışmıştır. Önerilen yaklaşımın uygulanabilirliğini, laboratuvar ortamında oluşturulan yapı modelleri üzerinde yapılan incelemelerle ortaya çıkarmıştır. Çelik konsol giriş ve iki boyutlu çerçeve modeller ile betonarme tek katlı bina, üç katlı bina, köprü ve baraj modelleri üzerinde farklı hasar durumları için gerçekleştirilen uygulamalar vermiştir. Hasarlı duruma ait ölçümlerden alınan verilerden yararlanılarak önerilen yaklaşım vasıtasıyla her bir model için hasarın varlığı, yeri ve yapı davranışına etkisini meydana çıkarmıştır. Temel mühendislik yapılarını temsil eden laboratuvar modelleri üzerinde gerçekleştirilen incelemelerden, kullanılan yaklaşımın yapıların hasar durumlarının tespiti ve değerlendirilmesinde oldukça etkin olduğu yapılan çalışmayla ortaya çıkmıştır.

Tarinejad vd. (2014), yaptıkları çalışmada baraj-rezervuar-temel sisteminin dinamik karakteristiklerini belirlemek için Kuzey İran'daki Shadid Rajae beton kemer barajı üzerinde zorlanmış titreşim testlerini ve analitik çalışmalarını sunmuşlardır. Beton kemer baraj üzerinde gerçekleştirilen deneysel ve analitik deneylerden alınan sonuçları kıyaslamışlardır. Bu sonuçların büyük oranda birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Cardoso vd. (2015), yaptıkları çalışmada Brezilya'nın Maraba şehrinde, Tocantins nehrinin üzerindeki Brezilya'nın en uzun ikinci karayolu-demiryolu köprüsü olan kompozit karayolu-demiryolu köprüsünü üzerinde Operasyonel Modal Analizi üzerinde çalışmışlardır. Köprü'nün uzunluğu 2310 metredir. Çalışmada köprü üzerindeki trenlerin yüklü ve yüksüz olması, yol trafiği, rüzgâr, nehir gibi çevresel etkilere karşı köprü'nün

verdiği tepkiler değerlendirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler, analitik çalışmalardan elde edilen veriler ile kıyaslanmıştır.

Kudu vd. (2015), yapmış oldukları modal parametreleri belirlemek için kullandıkları yöntemde örnekleme aralığı, frekans aralığı ve ölçüm süresini değişken parametreler olarak belirleyerek bunların sönüm oranını belirlemede etkisini kıyaslayan 3 katlı çelik bina modeli üzerinde bir çalışma yapmışlardır. 12 tek eksenli ivmeölçer çevresel titreşim testlerinde kullanılarak ölçüm alınmıştır. Ölçümler farklı sürelerde, farklı ölçüm aralığında ve farklı örnekleme aralığında tekrar edilerek gerçekleştirilmiştir. Alınan doğal frekanslar ve sönüm oranları tüm durumlar için birbirleriyle kıyaslanmıştır.

Bayraktar vd. (2015a), ülkemizin farklı bölgelerinde inşa edilmiş, içlerinde tarihi taş yığma bir köprünün de bulunduğu dört farklı taşıyıcı sisteme sahip uzun açıklıklı köprüye çevresel titreşimlere dayalı yapı sağlığı izleme sistemlerinin uygulanıp uygulanamayacağını çalışmalarında incelemişlerdir. Köprülerin dinamik karakteristiklerini deneysel olarak Çevresel Titreşim Testi Yöntemi kullanarak belirlemişlerdir. Dinamik karakteristikleri analitik olarak ise Sonlu Eleman Yöntemiyle belirleyip sonuçları elde etmişlerdir. Çalışma sonucunda tarihi köprü sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesinde deneysel ölçümlerin gerekliliğinin önemini vurgulamışlar. Ayrıca çevresel titreşimlere dayalı yapı sağlığı izleme sistemlerinin uzun açıklıklı tarihi köprüler üzerinde etkin sonuç verdiğini görmüşlerdir.

Bayraktar vd. (2015b), çalışmalarında tarihi taş kemer köprülerin frekans ve sönüm oranlarını belirlemeyi hedeflemişlerdir. Taş ve horasan harç ile inşa edilmiş, farklı açıklıklara sahip sekiz adet tarihi taş kemer köprü seçtikten sonra bu köprülerin dinamik karakteristiklerini Operasyonel Modal Analiz Yöntemi'ni kullanarak elde etmişlerdir. Seçtikleri köprülerin frekanslarını, sönüm oranlarını ve mod şekillerini Geliştirilmiş Frekans Ayırıştırma Alanı ve Rastgele Kimlik Tespiti tekniklerini kullanarak elde etmişlerdir. Köprüleri; frekansları, sönüm oranları ve mod şekilleri açısından birbirleriyle kıyaslamışlardır. Çalışmanın sonunda, tarihi taş kemer köprülerin frekanslarını, sönüm oranlarını ve mod şekillerini belirlemek için bir formül sunmuşlardır.

Kömür ve Deneme (2015), laboratuvarında inşa edilen simetrik ve simetrik olmayan iki çelik yapının dinamik karakteristiklerini Operasyonel Modal Analizleri yapılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla her iki çelik yapıda da altı adet tek eksenli ivmeölçer kullanılarak çevresel etkilerden yararlanılarak yapılan deneysel ölçüm sonucu veriler alınmıştır. Alınan bu verilerin değerlendirilmesinde ARTEMİS programında mevcut frekans tanım alanında ayırıştırma ve stokastik altalan belirleme yöntemleri kullanılarak istenilen

bulgular elde edilmeye çalışılmışlardır. Her iki yöntemden alınan sonuçlar arasında azda olsa farklılıklar olduğu görülmüştür. Daha sonra bu iki çelik yapı nümerik olarak da modellenerek mod şekilleri ve doğal frekansları elde edilmiştir. Sonlu eleman modellemesinden elde edilen frekans değerleri ile deneysel ölçümden elde edilen değerler arasında oldukça fark olduğu görülmüştür. Bu fark simetrik olmayan yapıda daha açık bir şekilde olduğu görülmektedir. İvmeölçer ağırlıklarının sonlu eleman modellemesinde dikkate alındığında ise sonuçların birbirine daha uyumlu olduğu görülmüştür.

Kömür vd. (2015), çalışmalarında tek katlı-tek açıklıklı ve üç katlı-tek açıklıklı olmak üzere laboratuvarda hazırlanmış küçük ölçekli çelik çerçevelerin Operasyonel Modal Analiz Yöntemi yardımıyla dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi üzerine çalışmalarını yapmışlardır. Çerçeve sistemlerin SAP2000 programında sonlu eleman modelleri oluşturulduktan sonra dinamik karakteristikler sonuçları nümerik olarak alınmıştır. Daha sonra Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile çerçeve sistemlerin dinamik karakteristikleri belirlenip bu iki analizden sonuçları kıyaslanmıştır. İvmeölçer ağırlıklarının dikkate alınması ve alınmaması durumunda deneysel ve nümerik olarak alınan frekans değerlerinde değişme gözlenmiştir. Sonlu eleman modellemesinde ivme ağırlıkları dikkate alınarak yapılan analiz sonucunda doğal frekans sonuçlarının birbirine daha yakın olmuştur.

Wojcicki vd. (2016), Polonya'daki Odra nehri üzerindeki bir bağlama yapısının Operasyonel Modal Analizi (OMA) üzerinde çalışmışlarını yapmışlardır. Çevresel Titreşim Testi yöntemini uygulamışlardır. Çevresel Titreşim Testi Yöntemi'ni Odra nehrinin su debi ve seviyesinin alçak ve yüksek olduğu dönemde uygulamaya çalışmışlardır.

Karahasan (2017), yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında, betonarme binaların dinamik davranışına lifli polimer kompozit malzeme etkisini deneysel ve analitik yöntemlerle belirlenmeye çalışmıştır. Bu amacı gerçekleştirmek için laboratuvar ortamında inşa edilen betonarme düzlem çerçeve üzerinde analitik ve deneysel çalışmaları uygulamıştır. Deneysel çalışmada model çerçevenin hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumlar için çevresel titreşim testleri yapılarak ayrı ayrı olarak alınan dinamik karakteristikler birbirleriyle kıyaslanmış ve elde edilen farklılıklar değerlendirilmiştir. Analitik çalışma kısmında da betonarme düzlem çerçevenin sonlu eleman modeli ANSYS programında hazırlanmıştır. Daha sonra analitik dinamik karakteristik verileri alınmıştır. Analitik ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler birbirleriyle kıyaslanmıştır. Sonuçlar arasındaki farklılıklar, malzeme özellikleri dikkate alınarak FEMtools programı kullanılarak minimize edilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın son

kısımında da betonarme düzlem çerçevenin hasarsız, hasarlı, onarılmış ve güçlendirilmiş durumlarının doğrusal olmayan dinamik davranışları belirlenmiştir.

Torres vd. (2017), Şili'deki Santiago Metropolitan Katedralinin dinamik karakteristiklerinin ve mekanik malzeme özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi üzerinde çalışma yapmışlardır. Daha sonra sonlu eleman model iyileştirmesi üzerine çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla deneysel çalışmada, çevresel titreşime maruz yapının tepkisinin elde edilmesi hedeflenmiştir. Çevresel Titreşim Testlerinde 6 adet yüksek hassasiyetli ve üç eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) yöntemi ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemi aracılığıyla dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Katedralin taş bloklarına mekanik testler yapıp deneysel verilere göre sonlu eleman modeli iyileştirilmesi yapılmıştır.

1.2.3. Model Kalibrasyon ve Güncelleme ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Modellerin doğru olarak değerlendirilmesi için deneysel ve analitik model test sonuçlarının birbirine yakın olması gerekmektedir. Ama genellikle deneysel model sonuçlarıyla analitik model sonuçları tam olarak örtüşmediğinden bu iki sonucu birbirine yakınsamak için tekrarlı bir döngüye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple sonlu eleman yöntemiyle elde edilen bulguların belirlenen aralıkta deneysel test sonuçlarına yaklaşıncaya kadar iteratif olarak doğrulanması gerekmektedir. Sonlu eleman model güncellemesi günümüzde, ölçüm verileri ile sonlu eleman modeli verileri arasındaki korelasyonu geliştiren bir yöntem olarak uygulanmaya başlanmıştır (Mottershead ve Friswell, 1993; Friswell ve Mottershead, 1995). Sonlu eleman model güncellemesi farklı yapı çeşitlerine uygulanmıştır.

Brownjohn ve Xia (2000), Singapur'daki asma köprü olan Safti Link Köprüsü'nün dinamik davranışını belirlemeye çalışmışlardır. Betonun elastisite modülündeki değişimleri Sonlu Eleman Model Analizi yardımıyla belirlenmiştir. Bu yaptıkları çalışmada Sonlu Eleman Analizi FEMtools ile birlikte ANSYS kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ilk ölçüm deneylerinden alınan modal verilere dayanarak yapısal geometri ve betonun elastisite modülü gibi belirli olmayan yapısal parametrelerin düzeltilerek sonlu eleman modeli iyileştirilmeye çalışılmıştır.

Ruotolo vd. (2000), yapmış oldukları çalışma kapsamında üç boyutlu kafes sistemlerin deneysel veri sonuçlarını kullanarak sonlu eleman modellerini iyileştirmişlerdir.

Reynolds vd. (2002), İngiltere'deki York Üniversitesi'nde yüksek kaliteli döşeme üzerinde döşemenin yüksek rijitlik ve kütle özelliklerinden dolayı belli sınırlar içerisinde döşeme titreştirilerek Deneysel Modal Analiz ölçümlerini yapmışlardır. Deneysel ve teorik olarak elde edilen sonuçları karşılaştırmak amacıyla döşemenin sonlu eleman yöntemiyle de teorik analizi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra deneysel sonuçlar kullanılarak sonlu elemanlar modelinde iyileştirilmeler yapılmıştır.

Kaya (2004), yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında Deneysel Modal Analiz, dinamik test, dinamik parametre tahmini ve kalibrasyon konuları üzerine çalışmasını gerçekleştirmiştir. Modal parametre tahmini ve kalibrasyon için Matlab platformunda programlar hazırlanmıştır. Yazılan programlar dinamik test sonucu alınan bilgiler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Wu (2004), laboratuvarında 1/10 ölçekli oluşturduğu vinç modelinin sonlu eleman modelini geliştirmeyi hedeflemiştir. Vinç modelinin sonlu eleman modeli hazırlandıktan sonra teorik analizini yapmıştır. Model üzerinde Deneysel Modal Analiz ölçümlerini de yapılmıştır. Sonlu eleman modelindeki geliştirmeler deneysel sonuçların vasıtasıyla sonuçlar kullanılarak iyileştirilmiştir.

Ahşap yapılar üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmada Wang vd. (2005), yapının analitik modelini titreşim testlerinden elde edilen doğal frekansları kullanarak güncellemeyi amaçlamışlardır.

Gürbüzer (2006), yapmış olduğu tez kapsamında sayısal model güncelleme yöntemlerini inceleyerek, incelenen yöntemler içerisinde seçilen ve başarı oranı yüksek bir yaklaşımla, sayısal model güncellemenin pratikte uygulanabilirliğinin ortaya konmasını amaçlayan çalışması üzerinde çalışmıştır. Bu amacı gerçekleştirmek için model güncelleme yöntemlerini inceleyerek duyarlılık yöntemini izlenecek yaklaşım olarak kabul etmiştir. Güncelleme esnasında parametre sayısının yazılabilen denklem sayısından fazla olduğu durumlarda "Etkin Bağımsızlık Dağılımı" uygulamıştır. Parametrelerin güncellenmesi, güncelleme sürecinde sadece elde edilen denklemlerle anlamlı olarak çözülebilecek bu dağılımının kullanılmasıyla gerçekleşmiştir. Seçilen yaklaşımın kullanılabilirliği için bir güncelleme programı yazılmıştır. Bu program sayesinde model güncelleme uygulamaları sayısal ve deneysel uygulamalar olmak üzere iki aşamada yapılmıştır.

Guan (2006), hazırlamış olduğu doktora tezi kapsamında Amerika'nın California eyaletinde bulunan Watson Wash, Vincent Thomas ve Kings Stormwater betonarme köprülerin dinamik karakteristiklerinin yapısal titreşimlere bağlı olarak elde edilmesi

üzerine çalışmasını gerçekleştirmiştir. Köprülerin dinamik karakteristikleri, sonlu eleman analizleri ve çevresel titreşim testleri kullanılarak deneysel ölçümler ile elde edilmiştir. Deneysel titreşim verilerinin işlenip dinamik karakteristikleri verilerinin elde edilmesinde frekans ve zaman tanım alanlarındaki yöntemler kullanılmış ve alınan sonuçlar kıyaslanmıştır. Deneysel ölçüm verilerinin ışığı altında köprülere ait sonlu eleman modellerinde iyileştirilme yapılmıştır. Ayrıca sürekli tekrarlanan deneysel ölçümlerle belirlenen frekans ve mod şekilleri arasındaki değişimlere bakılarak köprülerin zamana bağlı hasar seviyeleri elde edilmiştir.

Bayraktar vd. (2007e), Trabzon İlinin Akçaabat İlçesinde bulunan Şinik Köprüsü'nü tarihi köprüler üzerinde yapılan Sonlu Eleman model iyileştirmesinin deprem davranışına etkisini araştırmak amacıyla ANSYS programıyla üç boyutlu modal analizini yapmışlardır. Analiz sonucunda doğal frekans ve mod şekillerini belirlemişlerdir. Daha sonra Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile köprünün dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Deneysel ve teorik karakteristikler birbirleriyle karşılaştırılmış ve köprünün mevcut durumunu yansıtan sonlu eleman modeli hazırlanmıştır.

Bayraktar vd. (2007f), Trabzon İlinin Of İlçesinde bulunan bir karayolu köprüsünün sonlu eleman modelinin Operasyonel Modal Analiz sonuçları kullanılarak iyileştirilmesi konusunda çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın analitik kısmında SAP2000 programı kullanılarak köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli proje verileri üzerinden hazırlanmıştır. Daha sonra modal analizi yapılarak dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Titreşim deneyinde üç eksenli ivmeölçerler ve on yedi kanallı veri toplama ünitesi ile ölçümler yapılmıştır. Sonrasında deneysel ve teorik analizlerden alınan dinamik karakteristikleri minimize edebilmek amacıyla malzeme özelliklerindeki değişimler kullanılarak köprünün sonlu eleman modeli iyileştirilmeye çalışılmıştır.

Bayraktar vd. (2008c), sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin, Operasyonel Modal Analiz sonuçları kullanılarak sonlu eleman model iyileştirmesini akaryakıt depolamada kullanılan çelik silindirik bir tank üzerinde çalışmalarını yapmışlardır. Yapının sonlu eleman modeli ANSYS programı ile hazırlanarak teorik dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Tank içerisindeki akaryakıtın davranışı, Lagrangian yaklaşımı kullanılarak hesaba eklenmiştir. Daha sonra Çevresel Titreşim Deneyi uygulanarak deneysel dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Elde edilen deneysel ve analitik frekanslar arasındaki farklılıkları minimize etmek için sistemin sonlu eleman modeli üzerinde malzeme özelliklerindeki belirsizlikler dikkate alınarak iyileştirilmeye çalışılmıştır.

Şahin (2009), yapı sistemlerinin ve çevresel ve zorlanmış titreşim deneylerinden toplanan sinyal kayıtlarını analiz etmiştir. Analiz edilen sinyal kayıtları aracılığıyla yapıların göstermiş oldukları dinamik davranışı belirlemeyi, yapıya ait teorik modelleri optimum seviyede iyileştirmek için bilgisayar programları geliştirmeyi ve bu programların laboratuvar modeli üzerinde uygulamalarını gerçekleştirmeyi hedeflemiştir. Deney aşaması bittikten sonra yapılması gereken sayısal sinyal işleme, modal parametrelerin belirlenmesi ve sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesidir. Bu amaçla Matlab platformunda grafik kullanıcı arayüzüne sahip bilgisayar programları geliştirmeye çalışmıştır.

Bayraktar vd. (2009), yapmış oldukları çalışmada Rize’de bulunan kagir kemer köprünün sonlu elemanlar modellemesi, modal testi ve sonlu elemanlar modeli güncellemesini gerçekleştirmişlerdir. Köprünün 3B sonlu elemanlar modeli ANSYS yazılımı vasıtasıyla hazırlanmıştır. Daha sonra köprünün dinamik özellikleri analitik olarak elde edilmiştir. Ortamdaki titreşim testleri, köprüdeki çevresel uyarılar altında gerçekleştirilmiştir. Modal parametre belirleme yöntemiyle dinamik özellikleri deneysel olarak elde edilmiştir. Sonlu elemanlar modeli, sınır koşullarını değiştirilerek analitik ve deneysel olarak hesaplanmış ve dinamik özellikler arasındaki farkların en aza indirgenmesiyle güncellenmeye çalışılmıştır.

Analitik model güncelleme yöntemine dayalı çalışmayı çelik-beton kompozit yapı modeli üzerinde Chellini vd. (2010) yapmıştır. Yaptıkları çalışmada analitik modelin güncellenmesinde kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki birleşim değerleri değişken olarak seçilmiştir.

Bayraktar vd. (2010a), çalışmalarında tarihi yapıların deprem güvenliklerini analitik ve deneysel yöntemler kullanarak belirlemek amacıyla tarihi bir köprü, tarihi bir minare ve tarihi bir kule seçip bu yapıların dinamik karakteristiklerini Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile elde etmeye çalışmışlardır. Deneysel ölçümlerden elde edilen ve sonlu eleman modellerinden alınan dinamik karakteristikler karşılaştırıp yapıların mevcut durumunu yansıtacak bir şekilde sonlu eleman model iyileştirilmesi üzerinde çalışmışlardır. Tarihi yapıların deprem güvenlikleri iyileştirilmiş sonlu eleman modellerini kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmadan tarihi yapıların deprem davranışlarının belirlenmesi için kullanılan sonlu eleman modellerinin hasarsız deneysel yöntemler kullanılarak iyileştirilmesinin önemi açıklık kazanmıştır. Ayrıca bu yöntemlerin tarihi yapıların güvenliklerinin belirlenmesinde güvenle kullanılabilceği sonucu elde edilmiştir.

Brownjohn vd. (2010), laboratuvar ortamında inşa ettikleri bir köprü modeli üzerinde Duyarlılığa Bağlı Model Güncelleme Yöntemi yardımıyla köprünün yapısal durumunu incelemiştir. Köprünün sonlu eleman modelinin göstereceği davranışın belirsiz parametrelerin doğru seçilmesine bağlı olduğu ve bu durumun sağlanamaması halinde güncellenen sonlu eleman modelinin yapının gerçek davranışına uzak olacağına özellikle değinilmiştir. Laboratuvar modellerinde Deneysel Modal Analiz Yöntemi uygulanarak hasarlı ve hasarsız dinamik karakteristikler alınmıştır. Sonlu eleman yöntemiyle de sayısal ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler üzerinde duyarlılık analizi de yapılmıştır. Bu sayede güncellenen sonlu eleman modeli üzerinde hasar durumları açıkça ortaya çıkmıştır.

Birinci (2010), taş kemer köprülerin dinamik karakteristiklerinin deneysel ve teorik olarak belirlenmesini ve Operasyonel Modal Analiz Yöntemi yardımıyla köprülerin sonlu eleman modellerini iyileştirilmesi üzerine çalışmasını gerçekleştirmiştir. Bu çalışma için Şenyuva ve Osmanlı köprülerini seçilerek sonlu eleman modelleri ANSYS programında oluşturularak teorik analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu köprülerin dinamik karakteristikleri Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile belirlenmiştir. Elde edilen teorik ve deneysel analiz sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki farkları en aza indirecek şekilde sonlu eleman model iyileştirmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda, uygun ölçüm cihazları kullanılarak gerçekleştirilen Operasyonel Modal Analiz Yöntemi'nin, karmaşık geometrik ve malzeme özelliklerine sahip taş kemer köprülerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde ve sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesinde güvenle kullanılabileceği sonucu elde edilmiştir.

Fotia vd. (2012), istatistiksel model güncelleme yöntemini İtalya'daki tarihi bir yapının performansını belirlemek için çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Belirsiz parametre olarak elastisite modülü ve birim hacim ağırlığı sonlu eleman model güncellemesinde parametre olarak seçilmiştir. Çalışmalarında yaptıkları analizlerde homojen olmayan malzeme karakteristikleri kullanmışlardır. Daha sonra dinamik karakteristikler birbirleriyle kıyaslanmıştır. Değerlendirilen bu sonuçlar güncellenmiştir. Bu sayede tarihi yapının yapısal davranışı hakkında bilgi edinilmiştir.

Liu ve Duan (2012), yaptıkları çalışmada Çin'de bir öngerilmeli beton köprü modelini güncellemek için bulanık sonlu elemanlar yöntemi önermişlerdir. Çalışma sonucunda ise modal frekanslar arasında ortalama %5 hata miktarıyla istenilen değerler elde edilmiştir.

Baştürk (2013), Bursa’da yer alan yedi adet tarihi minarede yapmış olduğu çalışma kapsamında incelemeye çalışmıştır. İncelenen minarelerin geometrik özellikleri, malzeme özellikleri ve yapım teknikleri hakkında bilgiler verilmiş ve dinamik karakteristikler Çevresel Titreşim Testleri ile değerlendirilmiştir. Minarelerin sonlu eleman modelleri oluşturduktan sonra malzeme özelliklerinde ve mesnetlenme koşullarında güncelleme yapılarak sonlu eleman analizlerinden alınan sonuçlar deneysel ölçüm sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Sanayei ve Rohela (2014), optimizasyon tekniklerini kullanarak Parametre Belirleme Sistemi (PARIS) adında otomatik model güncelleme yapmak için Matlab programında yeni bir yazılım geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu yazılım SAP2000 sonlu eleman analiz programıyla eş zamanlı çalışma imkânı sağlayabilmektedir. Üç farklı yapı için hasarsız durum ve çeşitli hasar durumları üzerinde çalışmalar sürdürülmüştür.

Arslan ve Durmuş (2014), yapmış oldukları çalışmada düzlem ve tuğla dolgu çerçevelerin analitik modellenmesi, modal testi ve sonlu elemanlar modeli güncellemesi üzerine çalışmışlardır. Çerçevelerin iki boyutlu sonlu elemanlar modeli tasarım verileri dikkate alınarak SAP2000 yazılımını kullanarak bir sonlu elemanlar modeli üzerinde gerçekleştirilip frekanslar ve mod şekilleri gibi modal parametreler elde edilmiştir. Ortam titreşim testi, çerçevelerin doğal uyarımı ve Operasyonel Modal Analiz yardımıyla yapılmıştır. Analitik ve deneysel dinamik sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmış ve bazı farklılıkların olduğu görülmüştür. Çerçevelerin sonlu elemanlar modelinde malzeme özellikleri ve sınır koşulları gibi belirsiz parametreler üzerinde yapılan değişikliklerle modal özellikler arasındaki farkları en aza indirmeye çalışılıp bu şekilde model güncellenmiştir.

Boru ve Kutanis (2015), çalışmalarında Sakarya’da bulunan Yan Sokak Apartmanının dinamik parametrelerini Teorik ve Deneysel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak belirlemeye çalışmışlardır. Deneysel Modal Analiz ile yapının dinamik parametrelerinin belirlenmesinde binadan alınan Çevresel Titreşim Kayıtları ve GFTAA yöntemi kullanılarak parametreler belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında hazırlanan sonlu eleman modeli kullanılarak binanın mevcut durumunu ile benzerlik gösterdiği görülmüştür. Yapılan çalışma sonucunda yapının dinamik karakteristiklerini tahribatsız bir biçimde elde etmek zor değildir. Mevcut yapının gerçek durumunu öğrenmek için sonlu eleman modeli güncelleme çalışmalarıyla olumlu sonuçlara ulaşılmaktadır.

Sanayei vd. (2015), yapılan çalışmada sonlu elemanlar modelinde rijitlik ve kütle parametrelerinin aynı anda tahmininde çoklu yanıt parametre kestirimini kullanan yeni bir

yöntem sunmuşlardır. Çalışmalarında laboratuvar ortamında hazırlanan çelik köprü modeli hazırlamışlardır. Bu model üzerinde Çevresel Titreşim Testi ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Köprü modelinin sonlu eleman modelini otomatik olarak güncellemek için Çok Tepkili Yapısal Parametre Tahmin Yöntemini kullanmışlardır. Hem rijitlik hem de kütle parametreleri eleman seviyesinde aynı anda güncellenmiştir.

Ercan ve Nuhoğlu (2015), çalışmalarında üç açıklıklı tarihi kemer köprüünün statik ve dinamik yapısal özelliklerini tahribatlı ve tahribatsız yöntemlerle incelemişlerdir. İzmir Çeşme'de birinci derece deprem bölgesinde bulunan bir köprüyü seçip şiddetli bir depremde göstereceği davranışı araştırmışlardır. Köprüünün zemin yapısı ve iç parametreleri belirlendikten sonra üç boyutlu katı modeli modellenmiştir. Köprüden tahribatlı yöntemlerle numuneler alıp üzerinde testler gerçekleştirmişlerdir. Yapının dinamik karakteristikleri Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile elde edilmiştir. Elde edilen deneysel ve teorik analiz sonuçları değerlendirilip iyileştirilen model üzerinde davranış spektrumu analizi yapılarak köprüünün deprem performansı üzerinde fikir elde etmişlerdir.

Osmancikli vd. (2015), yapmış oldukları çalışmada prefabrik yapıların ortam titreşim testi sonuçlarına bakılarak sonlu elemanlar modeli kalibrasyonu üzerinde çalışmışlardır. İnceleme için iki prefabrik yapı, bir üst geçit ve prekast üretim tesisi seçilerek bunların ilk sonlu elemanlar modeli SAP2000 kullanılarak hazırlanmıştır. Analiz sonucu başlangıçtaki dinamik özellikler elde edilmiştir. Deneysel ölçümler Operasyonel Modal Analiz Yöntemi aracılığıyla ortam titreşimleri altında yapılmıştır. Daha sonra dinamik özellikler deneysel olarak belirlenmiştir. Modal parametreleri Geliştirilmiş Frekans Alanı Ayrışma ve Stokastik Altalan Belirleme yöntemleriyle tarafından toplanan sinyallerden elde edilmiştir. Çalışmanın sonunda ise analitik ve deneysel dinamik özellikler birbirleri ile kıyaslanmıştır. Yapıların ilk sonlu elemanlar modeli bağlantı derzlerinin sertlik katsayılarının değiştirilmesi ile güncellenmesi sağlanmıştır.

McDonald (2016), yapmış olduğu çalışmada model güncelleme, sonlu elemanlar modellerinin kalibre edilmesinin ve fiziksel olarak anlamlı parametrelerin muhafaza edilmesinin önemini kanıtlamıştır. Bu amaç için köprüde öngörülen sismik davranış üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu sonucunu çıkarmıştır. Yapısal sağlık izleme programının mevcut ve gelecekteki araştırmalar için çok önemli olduğu da özellikle vurgulanmıştır.

1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında, malzeme özelliğini belirlemek için kullanılan geleneksel yöntemlerin ötesinde test edilen malzemeye hasar vermeden istenilen parametreleri elde etmek amacıyla Çevresel Titreşim Testi verileri kullanılarak bir yöntem geliştirilmeye çalışılmıştır. Seçilen model üzerinden elde edilen sonuçlar değerlendirilmeye çalışılmıştır. Bu amaca ulaşabilmek amacıyla, bu çalışma hem donanım geliştirilmesi hem de yazılım aşamasından oluşmaktadır. Donanım kısmında yapıdan ölçüm almayı sağlayacak basit bir titreşim ölçüm sistemi kurulmuştur. Donanım kısmı temel olarak; sensör, titreştirici ve veri toplama ünitesinden oluşmaktadır. Yazılım aşamasında ise ölçülen sinyallerden yapısal parametreleri belirlemek amacıyla yazılım kısmı oluşturulmuştur. Yazılım kısmı Matlab (Matlab, 1999) ortamında hazırlanan program ve arayüzden oluşmaktadır. Bu kısımlar oluşturulduktan sonra seçilen model üzerinde ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte deneysel ve teorik elde edilen değerleri karşılaştırabilmek amacıyla modelin Sonlu Eleman Yöntemiyle de teorik analizleri yapılmıştır. Literatüre katkı sağlayacağı düşünülen bu tez çalışması, temel olarak dört bölümden oluşmaktadır.

Genel Bilgiler bölümünde, konu ile ilgili genel bilgiler, literatürde yapılan çalışmalar verilmekte ve konunun önemi belirtilmektedir. Bu bölümde, çalışmanın deneysel kısmını içeren; Deneysel Modal Analiz, deneysel ölçüm yöntemleri, bu yöntemlere ait formülasyonlar, ölçüm ekipmanları ve sinyal işleme; tez çalışmasının analitik kısmını içeren; Sonlu Eleman Yöntemi, model oluşturulması, bu yönteme ait formülasyonlar ve tez çalışmasında malzeme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kalibrasyon kısmını içeren; model kalibrasyonunun temel unsurlarını ve işlem adımlarını içeren bilgilere yer verilmektedir.

Yapılan Çalışmalar bölümünde, tez çalışmasında kullanılacak donanım ve yazılım kısımlarından oluşan ölçüm sisteminden, kullanılan malzemelerin özelliklerinden, bu malzemelere ait sonlu eleman modelinin oluşturulmasına, bu malzemelerden alınan titreşimlerin frekans bileşenlerinin program üzerinden alınabilmesi için arayüz programına yer verilmektedir. Bu amaçla, seçilen çelik modelin malzeme özelliklerini belirlemeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar; Çevresel Titreşim Testi, sonlu eleman model aktarımı ve model kalibrasyonu olmak üzere üç kısma ayrılmaktadır.

Üçüncü Bölüm başlığı olan Bulgular ve İrdemeler bölümünde, çelik model için deneysel ve teorik analiz sonuçlarından elde edilen dinamik karakteristik verilerine, bu

verilerin karşılaştırılmasına ve bu modeller için istenilen malzeme özellikleri sonuçlarına yer verilmektedir.

Dördüncü Bölüm olan Sonuçlar ve Öneriler bölümünde, ulaşılan bilgiler toparlanmış, elde edilen sonuçlar verilmiş ve gelecek çalışmalara yol gösterebilecek bazı öneriler sunulmuştur. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş takip etmektedir.

1.4. Deneysel Yöntemlerle Modal Analiz

Deneysel Modal Analiz (DMA) Yöntemi, yapıda oluşan titreşimlerden yararlanarak yapıya ait dinamik karakteristiklerin deneysel olarak belirlenmesini amaçlayan ve literatürde çokça karşımıza çıkan tahribatsız bir yöntemdir. Bu yönteme ait teorik bilgilerin artması ve bilgisayar teknolojisinin geliştiği günümüzde, DMA yöntemi mühendislik yapılarında çokça karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntemdeki en önemli hususlardan biri, temel titreşim biçimlerinin doğru olarak bilinip bilinmemesidir. Burada yapıya ya da elemana uygulanan titreşimler biliniyorsa Geleneksel Modal Analiz, bilinmiyorsa Operasyonel Modal Analiz adı altında analiz edilmektedir (Türker, 2005).

1.4.1. Ölçüm Yöntemleri

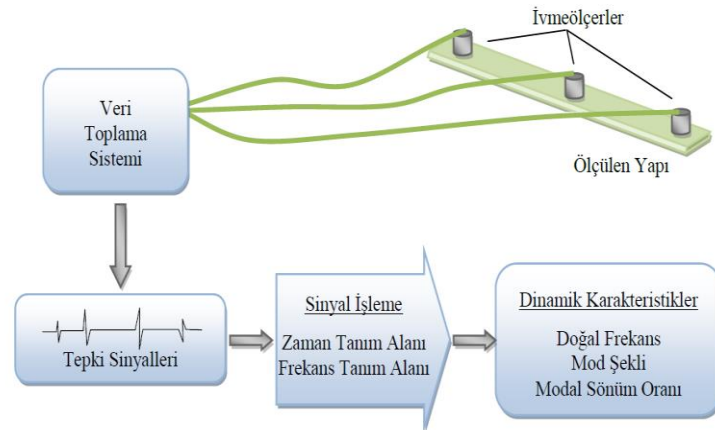
DMA yöntemi daha önceden de açıklandığı gibi Çevresel Titreşim ve Zorlanmış Titreşim Yöntemleri olarak iki gruba ayrılmaktadır. Bu yöntemlerden hangisinin kullanılacağı ölçülecek yapının veya elemanın büyüklüğü ve çevresel koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Belirtilen koşullar dikkate alınarak yapı için en uygun yöntem belirlenmelidir.

1.4.1.1. Çevresel Titreşim Yöntemi

Operasyonel Modal Analiz Yöntemi olarak da bilinen Çevresel Titreşim Yöntemi'nde yapı veya eleman çevresel etkilerle titreştirilmekte ve bu etkiler çerçevesinde yapının etkilere vermiş olduğu tepkiler ölçülmektedir. Bu yöntemde etki kuvveti ölçülememektedir. Bu sebeple literatürde Sadece Tepki Modal Analizi olarak da adlandırılabilmektedir. (Zhang vd., 2002; Brincker vd., 2003). Bu yöntemde, ölçümü yapılacak yapının dinamik

karakteristikleri yapının ya da elemanın belirli noktalarından alınan titreşimlerle değerlendirilmektedir. Bu durumda elemanın dinamik karakteristikleri frekans ve zaman tanım alanında algoritmalara sahip yöntemlerle elde edilmektedir. Bu yöntemlerin matematik tabanları aynıdır sadece veri işleme ve denklem çözme teknikleri ile matris dizilişleri birbirinden farklıdır. Bu belirtilen iki yöntemin birbirine karşı bariz bir üstünlük sağlamamasına rağmen farklılıklarından söz edilebilmektedir. Frekans tanım alanındaki yöntem (parametrik olmayan yöntem), her bir noktada ölçülen sinyalin analizine ve bu sinyaller arası korelasyona bağlıdır. Bu yöntemde gürültü rahatlıkla ayırt edilebilir olup filtreleme işlemi kolayca yapılabilmektedir. Ayrıca bu yöntemde birbirine yakın frekans değerleri daha kolay bir şekilde fark edilebilmektedir (Ramos, 2007). Piklerin Seçilmesi Yöntemi, Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi, Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi ve Polimaks yöntemleri frekans tanım alanındaki başlıca yöntemlerdir. Zaman tanım alanındaki yöntemde ise her bir noktada sinyalin zaman geçmişine ve korelasyon fonksiyonlarıyla model uydurmaya bağlıdır. Rastgele Azalım Yöntemi, Rekürsif Teknikler, En Büyük Olabilirlik Yöntemleri ve Stokastik Altalan Belirleme yöntemleri zaman ortamındaki başlıca yöntemlerdir (Ramos, 2007).

Bu tez çalışması çerçevesinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda Çevresel Titreşim Testi Yöntemi kullanılmıştır (Şekil 1.1.). Ölçümü gerçekleştirilen yapının ya da elemanın dinamik karakteristiklerini belirlemek için frekans ortamı kapsamında bulunan Piklerin Seçilmesi Yöntemi uygulanmıştır.



Şekil 1.1. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi'ne ait ölçüm sistemi (Türker, 2011)

1.4.1.2. Zorlanmış Titreşim Yöntemi

Bu yöntem yapı ya da eleman bilinen ve ölçülebilen bir etki yardımıyla (darbe çekici, sarsma tablası vb.) titreştirildikten sonra bu yapının ona verdiği tepkilerin ölçülmesine dayanan bir yöntemdir. Bu titreşim türünde yük yapıya etki ettiği sürece devam etmektedir (Ewins, 1995).

1.4.2. Çevresel Titreşim Testi Yöntemi'ne Ait Formülasyonlar

1.4.2.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) Yöntemi

GFTAA yöntemi kullanımı kolay olan Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (FTAA) yönteminin genişletilmiş durumudur. Bu yöntemde, spektral yoğunluk fonksiyonundan hesaplanan tekil değer ayırıştırma grafiklerindeki piklerin seçilmesiyle modlar belirlenir. FTAA yöntemi, Hızlı Fourier Dönüşümü'nden (FFT) tek bir frekans hattının kullanımına dayalı olduğundan, belirlenen doğal frekansın kesinliği FFT'nin çözünürlüğüne dayanmaktadır. FTAA yönteminde yapının sönüm oranları belirlenememesine rağmen GFTAA yönteminde, belirlenen doğal frekansların ve mod şekillerinin kesinliği artırılmakta, sönüm oranları da ayrıca belirlenebilmektedir (Jacobsen vd., 2006).

GFTAA yönteminde, bir titreşim pikinin etrafında tanımlanan tek serbestlik dereceli Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu (GSY), Ters Ayırık Fourier Dönüşümü kullanılarak zaman tanım alanına geri dönüştürülebilir özelliğine sahiptir. Doğal frekans zamana bağlı sıfır geçiş sayısının belirlenmesiyle, sönüm ise tek serbestlik dereceli normalize edilmiş oto korelasyon fonksiyonunun logaritmik azalışıyla belirlenebilmektedir (Jacobsen vd., 2006).

1.4.2.2. Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi

SAB yöntemi korelasyon veya spektruma ihtiyaç duymadan doğrudan zaman verileriyle çalışan, zaman tanım alanına dayalı bir yöntemdir. Bu yöntem dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için elverişlidir (Overschee ve Moor, 1996; Peeters ve Roeck, 2000; Peeters, 2000; Yu ve Ren, 2005). Bu yöntemde yapı sisteminin dinamik davranışı lineer, sabit katsayılı ikinci derece diferansiyel denklem olarak aşağıda verilmektedir.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{F(t)\} \quad (1.1)$$

Burada; [M], [C], [K] sırasıyla sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir. F(t) titreşim kuvvetini, $\{u(t)\}$, $\{\dot{u}(t)\}$ ve $\{\ddot{u}(t)\}$ ise zamana bağlı yer değiştirme, hız ve ivme vektörlerini ifade etmektedir (Yu ve Ren, 2005).

1.4.3. Ölçüm Ekipmanları

1.4.3.1. Sensörler (Algılayıcılar)

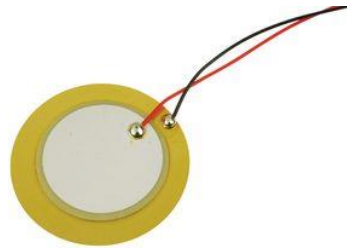
Sensörler, insan vücudundaki duyu organları olarak düşünülebilirler. İnsan duyularının algılayabileceği çevresel değişiklikleri (titreşim, basınç, sıcaklık vb.) elektronik ortamlarda algılayabilmek için kullanılan cihazlara sensör denir. Diğer bir adı algılayıcı olan sensörler yaşadığımız bu fiziksel dünyada geliştirilen elektronik cihazların çevre ile uyumlu bir şekilde çalışabilmeleri için en temele elemanlar arasında yer almaktadır.

Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile yapılacak olan ölçümlerde, yapıda ya da elemanda meydana gelecek titreşimleri ölçmek amacıyla ivmeölçerlerden oldukça yararlanılmaktadır. Bu aletler yapılara yapıştırıcı bir madde, mıknatıs veya vida gibi çeşitli yöntemlerle monte edilip kullanılabilirler. Bu bağlanma yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları vardır. En uygun bağlanma sistemi dikkatlice seçilmelidir. Elemanda oluşacak titreşimlere karşı elektrik voltajının üretilmesini sağlamak ve bunun taşınabilir voltaj sinyali olarak veri toplama ünitesine transfer etmek ivmeölçerlerin başlıca görevlerindedir. İvmeölçerler, ölçümü yapılacak yapının ya da elemanın büyüklüğüne ve ölçümün amacına göre seçilebilmektedirler (Uçak, 2012) (Şekil 1.2.). Bu işlemler uygulanırken ölçümü yapılacak sistem için yeterli hassasiyete sahip olan ivmeölçer tercihi çok önemli bir husustur. Ölçüm için ivmeölçer seçiminde temel olarak; ölçüm frekans aralığı, maksimum ivme değeri, hassasiyet, çalışma sıcaklığı, ağırlığı gibi özellikler dikkate alınmaktadır (Türker, 2011).



Şekil 1.2. B&K4507 ve B&K8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler (Türker, 2011)

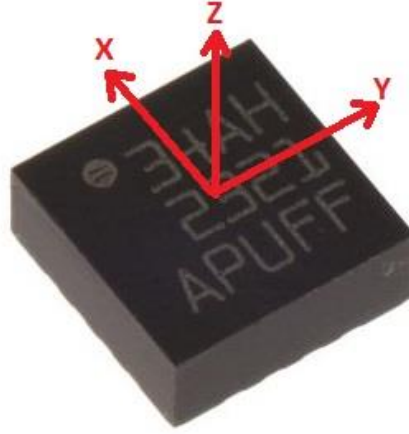
Piezo sensörler, üzerine dik bir şekilde kuvvet uygulandığında elektrik enerjisi üreten sensörlerdir (Şekil 1.3.). Yani tek bir boyutta uygulanan kuvveti elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Piezo sensörler malzeme üzerine yapıştırıldıktan sonra malzeme titreştirilince bu titreşim piezo sensörleride titreştirmektedir. Bu titreşim sonucunda piezo sensör elektriksel bir sinyal üretmektedir. Böylece yapı üzerinde meydana gelen fiziksel titreşimler piezo sensörler sayesinde işlenmek üzere elektriksel sinyallere dönüştürülmektedir. Bu sensörlerden ayrıca analog sinyaller alınmaktadır. Buna ilaveten tek kanaldan sinyalleri de üst üste atabilmektedirler.



Şekil 1.3. Piezo elektrik sensör

Titreşim verilerinin elde edilmesinde kullanılan diğer sensör tipi aşağıda da verilen ve bir çip olarak tasarlanan 3 eksenli ivmeölçerlerdir. Bu ivmeölçerler X, Y ve Z eksenlerinde meydana gelen titreşimleri elektriksel sinyallere dönüştürebilmektedir. Elektriksel dönüşüm işleminden sonra üç eksene de ait titreşim verileri ayrı ayrı elde edilebilmektedir. 3 eksenli ivmeölçerlere bakıldığında dijital ve analog olarak ikiye ayrıldıkları görülmektedir. Dijital ivmeölçerler 3 eksene ait aldıkları titreşim verilerini kendi içerisinde bulunan analog dijital

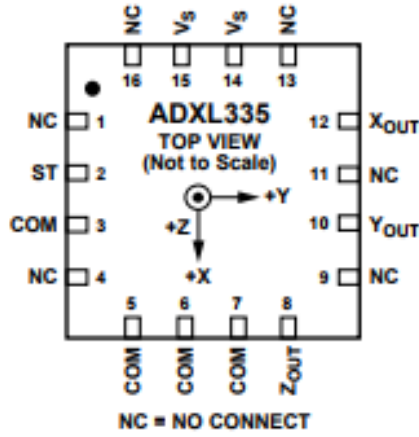
dönüştürücü yardımı ile sayısal verilere dönüştürmektedir. Daha sonra gerekli işlemci ve algoritmalar yardımı ile bu ivmeölçer üzerinden sayısal veriler belli protokoller kullanılarak okunabilmektedir. Analog ivmeölçerler ise 3 eksene ait titreşim verilerini elektriksel sinyale dönüştürdükten sonra direkt olarak dışarı aktarmaktadır. Dışa aktarılan bu titreşim verileri harici bir analog dijital dönüştürücü yardımı ile sayısala dönüştürülüp bilgisayara aktarılabilir. Analog ve dijital ivmeölçerler karşılaştırılacak olursa birbirlerine göre üstünlükleri olduğu görülmektedir. Dijital ivmeölçerler dönüşüm işlemini kendi içerisinde yaptıkları için dış ortama dijital veri aktarmaktadırlar. Bu dijital veriler kablolar yardımı ile alınırken dış ortamdaki şebeke gürültülerinden ve elektromanyetik gürültülerden çok fazla etkilenmemektedirler. Bu bakımdan analog ivmeölçerlere oranla daha az gürültüye sahip veriler sağlamaktadır. Ancak içerisinde bulunan analog dijital dönüştürücünün düşük bit derinliği ve kullandığı protokolün yavaşlığı nedeniyle istenilen örnekleme frekanslarında çalışmayabilmektedir. Ayrıca verilerin ivmeölçer üzerinden alınması için harici bir işlemcinin kullanılması ve bilgisayar ile haberleşebilmesi için ayrı bir algoritma geliştirilmelidir. Diğer taraftan analog ivmeölçerlere bakıldığında çıkış sinyalleri sürekli sinyaller olduğundan dijital ivmeölçerlerdeki analog dijital dönüştürücünün düşük bit derinliğinden etkilenmemektedir. Dış ortamda kullanılan ve ses kartında mevcut olan yüksek bit derinlikleri sayesinde daha doğru ölçümler yapılabilmektedir. Ayrıca verilerin alınması için analog ivmeölçere enerjinin verilmesi yeterli olmaktadır. 3 eksene ait titreşim verileri elektriksel olarak 3 ayrı kanaldan sürekli olarak verilebilmektedir. Bu nedenle kullanımı dijital ivmeölçerlere göre daha kolay olmaktadır. Analog ivmeölçerin dijital ivmeölçerlere göre dezavantajı çıkışından alınan analog verilerin dış ortamdaki gürültülerden etkilenmesidir. Bu sorun da analog ivmeölçer ile veri toplama devresi arasında ekranlı kablolar kullanılarak halledilebilmektedir (Şekil 1.4.).



Şekil 1.4. Üç eksenli ivmeölçer çipi

Yapılan bu tezde pin yapısı aşağıdaki şekilde verilen Analog Devices firmasına ADXL335 analog ivmeölçer çipi kullanılmıştır (Şekil 1.5.). Kullanılan bu ivmeölçerin özellikleri şu şekilde sıralanabilir;

- Üç eksende ölçüm yapabilme,
- Küçük ve alçak bir profile sahip olma,
- Düşük güç tüketimi,
- Tek bir kaynak ile düşük gerilim ile çalışabilme (Bilgisayar üzerinden USB ile olabilir),
- Sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklılık,
- İstenilen frekans değerlerine bağlı olarak harici kapasiteler ile çıkışın ayarlanabilmesidir.



Şekil 1.5. ADXL335 analog ivmeölçer pin yapısı

1.4.3.2. Titreştirici

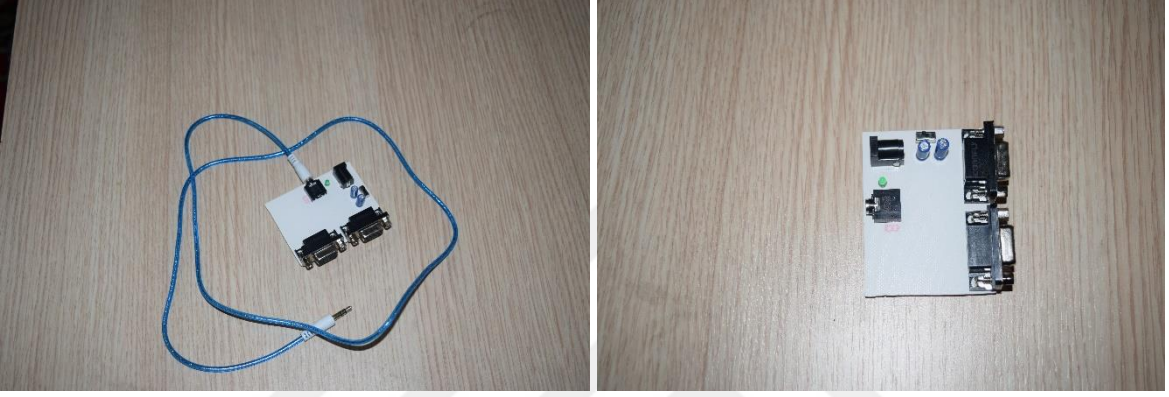
Deneyisel Modal Analiz Yöntemi'yle yapı ya da ölçüm alınacak elemanda doğal (trafik yükü, yaya yükü, rüzgâr, patlatma etkisi, dalga gibi birçok doğal ve çevresel etki) ve yapay (darbe çekici, sarsma tablası ya da sarsıcılar) olmak üzere iki farklı titreşim meydana getirilebilmektedir. Doğal veya yapay titreştiricilerin hangisinin uygulanacağı yapının büyüklüğüne göre değerlendirilmektedir. Bu çalışmada doğal titreşimlerden faydalanılmak için Çevresel Titreşim Testi Yöntemi (Operasyonel Modal Analiz) seçilmiştir. Bu çalışmada rastgele üretilen titreşimler kullanılmıştır.

1.4.3.3. Veri Toplama Ünitesi

Veri toplama ünitesi yapı ya da ölçümü yapılacak elemandan ivmeölçerler vasıtasıyla alınan titreşimlerin elektrik sinyallerine dönüştürüldükten sonra bu sinyallerin ilgili bilgisayar programına transfer etmek için kullanılan sistemdir. Bu sistem iki kısımdan oluşmaktadır. Birincisi, veri toplama ünitesi, ikincisi ise koşullanan sinyallerin aktarıldığı bilgisayar alanıdır. Sinyallerin koşullanması, yapının dinamik karakteristiklerinin tam olarak belirlenebilmesine engel olan istenmeyen frekansların filtrelenmesi ya da sinyallere belirli özelliklerin ortaya çıkabilmesini sağlamak için yapılan işlemlerdir. İstenmeyen sinyaller, belirlenen frekans ölçüm aralığı haricindeki yüksek frekans sinyalleridir. Eğer sinyaller

düşük bir hızda ölçülüyorsa yüksek frekans içeriğine sahip sinyaller, düşük frekanslara sahipmiş gibi görülmekte ve yapılan ölçüm hatalı sonuçlar vermektedir.

B&K3560 tipi on yedi kanallı gibi değişik türde veri toplama üniteleri bulunmakla beraber yapılan bu tez çalışmasında hazır bir veri toplama ünitesi kullanılmamıştır. Bunun yerine yapılan çalışmaya uygun iki kanallı bir veri toplama ünitesi tasarımı yapılarak üretilmiştir. Tezde kullanılan veriler tasarlanan bu üniteden elde edilmiştir (Şekil 1.6.).



Şekil 1.6. Veri toplama ünitesi

1.4.4. Sinyal İşleme

Çevresel Titreşim Testi Yöntemi'nde, yapıların ya da elemanların dinamik karakteristiklerinin belirlenebilmesi için ivmeölçerlerden alınan sinyallerin veri toplama ünitesine aktarıldıktan sonra bu sinyallerin işlenmesi gerçekleştirilmektedir. Bu işlem sinyallerin veri toplama ünitesinde sinyal koşullama yapıldıktan sonra bilgisayar ortamına transfer edilmesiyle başlamaktadır. Sinyal işleme bilgisayar ortamında gerçekleştirilen özel yazılımlar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Sinyaller, bilgisayar ortamına zaman tanım alanında aktarılmasına rağmen hem pratik sebeplerden hem de hesaplama gereksinimlerinden dolayı sinyal işleme uygulaması frekans tanım alanı kullanılarak yapılması genellikle tercih edilmektedir. Zaman tanım alanındaki sinyallerin frekans tanım alanına aktarılmasının işleminde Fourier serilerinden yararlanılmaktadır. Fourier dönüşümü temelde bir sinyalin sinüs ve kosinüslerin toplamı şeklinde ifade edilme işlemidir. Sinüs ve kosinüs işaretleri içerisinde bir tek frekans bileşeni bulundurmaktadır (Yanik vd., 2017a). Bu bilgi ışığında bir sinyalin sinüs ve kosinüslerin toplamı şeklinde ifade edilmesi, o sinyalin içerisinde hangi frekans bileşenlerini içerdiği konusunda bir bilgi sağladığı görülmektedir

(Yanik vd., 2017b). Bu nedenle bir sinyalin frekans analizinin yapılması esnasında Fourier dönüşümünden yararlanılmaktadır (Fessler, 2004). $u(t)$ ile gösterilen periyodik bir sinyal sonsuz Fourier serisine açıldığında,

$$u(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \right] \quad (1.2)$$

şeklindedir (Ramos, 2007). Buradaki a_0 , a_n , b_n sırasıyla;

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T} \int_0^T u(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

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

$$u_k = u(t_k) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi k}{N} n\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi k}{N} n\right) \right], \quad k=1,2,\dots,N \quad (1.4)$$

şeklindedir. Buradaki a_0 , a_n , b_n sırasıyla;

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N u_k \\ a_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_k \cos \frac{2\pi nk}{N} \\ b_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_k \sin \frac{2\pi nk}{N} \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Sinyal işleme sırasında bazı sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Bu sorunların en önemlisi sinyal periyodunun tam katlı olmamasından yani sinyalin periyodik olmamasından kaynaklanan sızıntı hatasıdır. Bu sorunu azaltmak için ya ölçüm süresi uzun tutulmalı ya da pencereleme yöntemleri kullanılmalıdır. Pencereleme yöntemleri sinyal periyodunu tam katlı hale getirmeyi sağlayan bir yöntemlerdir (Heylen vd., 2007; Ramos, 2007).

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda ivmeölçerler ve tasarlanan veri toplama ünitesi yardımıyla elde edilen veriler kullanılan bilgisayarın ses kartı kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Ses kartından verilerin alınmasında ve alınan verilerin işlenmesi Matlab (Matlab, 1999) programı ve Matlab programının ayrı bir birimi olan Matlab GUI programları kullanılarak yapılmıştır. Matlab (Matlab, 1999) programı verilerin işlenmesinde, Matlab GUI ise görsel arayüzün hazırlanmasında kullanılmıştır.

1.4.4.1. Sinyal Türleri

1.4.4.1.1. Rastgele Sinyaller

Zamana bağlı periyodik bir fonksiyonun eşit olarak ayrılmış frekanslardaki sinüsoidal bileşenlerin bir toplamı olarak gösterilebileceği 18. yüzyılın sonlarında J.B. Fourier tarafından kanıtlanmıştır (Heylen vd., 2007).

$$g(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} G(k\Delta f) e^{j2\pi k\Delta f t} \quad (1.6)$$

Buradaki katsayılar aşağıda irdelenmiştir (Heylen vd., 2007).

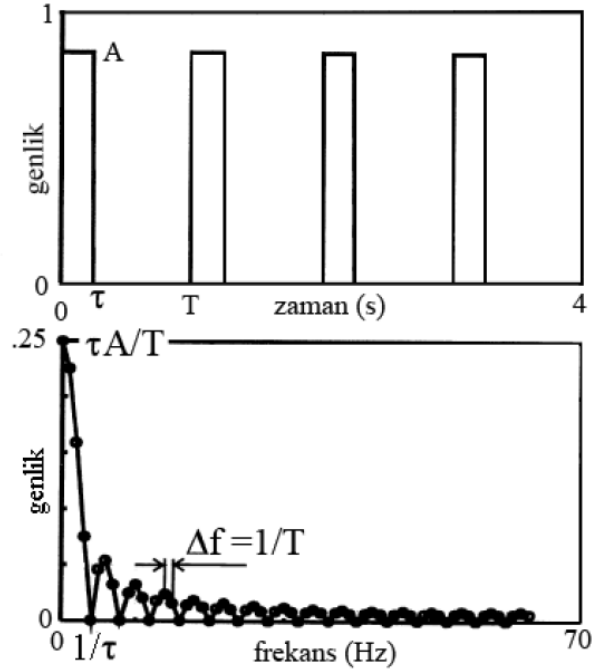
$$G(k\Delta f) = \left(\frac{1}{T}\right) \int_{-T/2}^{+T/2} g(t) e^{-j2\pi k\Delta f t} dt \quad (1.7)$$

Denklemden t zamanı, k frekans adımlarını sayan tam sayıyı, Δf frekans aralığını ya da frekans çözünürlüğünü $\Delta f = \frac{1}{T}$, $j = \sqrt{-1}$ değerini ve T periyodu göstermektedir.

$G(k\Delta f)$ değerler kümesi, $g(t)$ ters Fourier dönüşümüdür. Periyodu T olan, blok genişliği τ olan ve genliği A olan periyodik bir dikdörtgen sinyal serisi göz önüne alındığında;

$$G(k\Delta f) = \tau A \Delta f (\sin \pi k t \Delta f) \pi k \tau \Delta f \quad (1.8)$$

şeklindedir. Şekil 1.7’de bu spektrumun genliğini pozitif frekans ekseninde gösterir. Spektrumun negatif kısmı simetriktir (Heylen vd., 2007).



Şekil 1.7. Dikdörtgen sinyal serisi ve genlik spektrumu (Heylen vd.,2007)

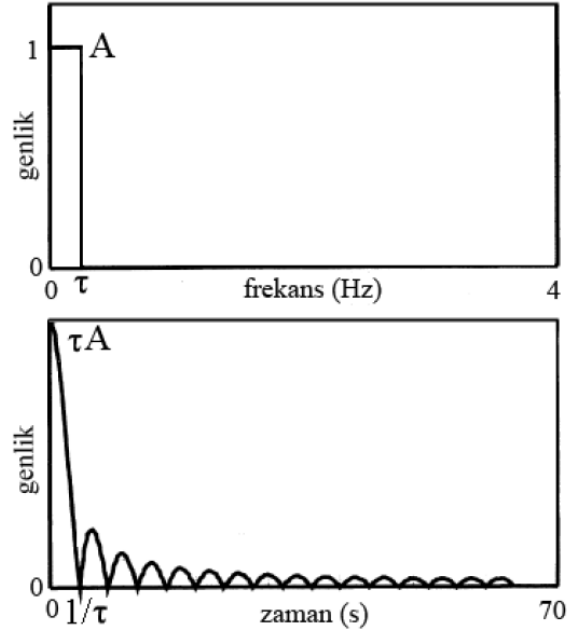
1.4.4.1.2. Periyodik Olmayan Sinyaller

Periyodik olmayan sinyaller anlık ve rastgele sinyaller gibi sonsuz periyoda sahip fonksiyonlardır. Denklem (1.6) ve Denklem (1.7)’de T , Denklem (1.9)’daki gibi sonsuza yaklaştırılırsa, Fourier dönüşümün ifadesi Denklem (1.10)’daki gibi bulunur (Heylen vd., 2007).

$$g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(f) e^{j2\pi ft} .df \quad (1.9)$$

$$G(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) e^{-j2\pi ft} .dt \quad (1.10)$$

$g(t)$ ters Fourier dönüşümü $G(f)$ ise ileri Fourier dönüşümü olarak adlandırılmaktadır. Bu periyodik olmayan fonksiyonlar için spektrum süreklidir. Şekil 1.8’de bir dikdörtgen sinyalin zaman ve ona karşılık gelen frekans fonksiyonu gösterilmektedir (Heylen vd., 2007).



Şekil 1.8. Periyodik olmayan dikdörtgen sinyal ve genlik spektrumu (Heylen vd., 2007)

1.4.4.1.3. Örneklemeli Zaman Fonksiyonları

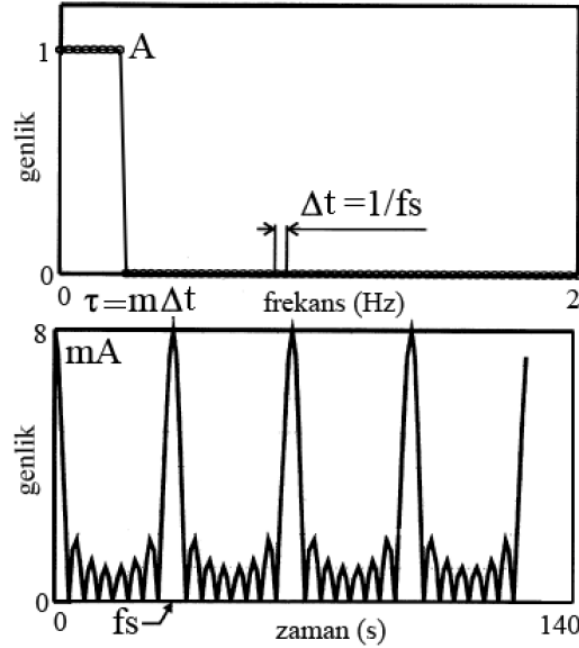
Sayısal bilgisayarlarda zaman verisini sürekli örneklemek gerekmektedir. Gerçek zaman verisinin, zamanda eşit uzaklıktaki ve ayırık noktalardaki değerler serisi ile

oluşmaktadır. Bu fikirden yola çıkarak Fourier dönüşümü için aşağıdaki denklemler elde edilir (Denklem 1.11 ve 1.12) (Heylen vd., 2007).

$$g(n\Delta t) = \left(\frac{1}{f_s}\right) \int_{-f_s/2}^{+f_s/2} G(f) \cdot e^{j2\pi f n \Delta t} \cdot df \quad (1.11)$$

$$G(f) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} g(n\Delta t) \cdot e^{-j2\pi f n \Delta t} \quad (1.12)$$

Denklemlerdeki; n zaman örneklerini sayan tam sayı, Δt zaman örnekleme aralığı, f_s örnekleme frekansını belirtmektedir. Örneklemenin dikdörtgen bir titreşime uygulanmasının ardından oluşan sonuç Şekil 1.9'da gösterilmektedir (Heylen vd., 2007).



Şekil 1.9. Örnekleme dikdörtgen sinyal ve genlik spektrumu (Heylen vd., 2007)

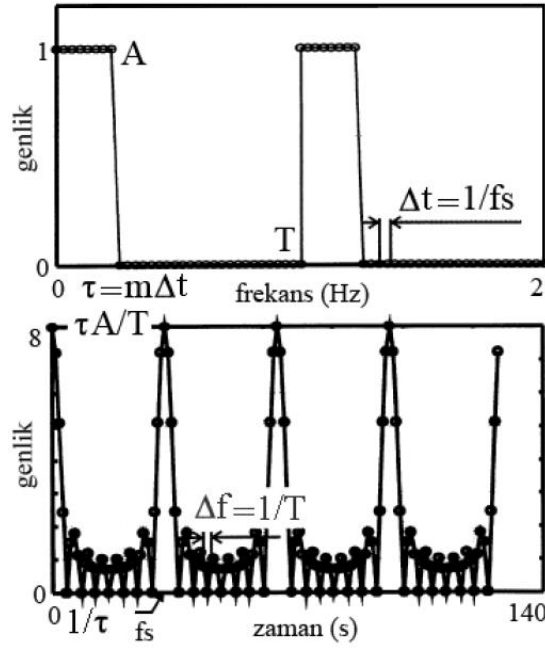
1.4.4.1.4. Örneklemeli Zaman ve Frekans Dönüşümü

Zaman sinyali sonsuz süreye kadar ölçülemez. Sinyalin belirlenen bir kısmının seçilmesi gerekmektedir. Sonrasında seçilen sinyalin periyodik bir zaman fonksiyonu vererek T periyodu ile kendini tekrarladığı düşünülmektedir. Spektrum böyle durumlarda ayırık olmaktadır. Sinyal örneklemeli periyodik tekrarlanma kabulünün kombinasyonu ayırık Fourier dönüşüm çiftinin tamamlanması ile neticelenmektedir (Denklem 1.13 ve 1.14) (Heylen vd., 2007).

$$g(n\Delta t) = \sum_{k=0}^{N_s-1} G(k\Delta f) \cdot e^{j2\pi nk/N_s} \quad (1.13)$$

$$G(k\Delta f) = \left(\frac{1}{N_s} \right) \sum_{k=0}^{N_s-1} g(n\Delta t) \cdot e^{-j2\pi nk/N_s} \quad (1.14)$$

Denklemlerdeki N örnek sayısıdır. $T=N_s\Delta t$ ve $f_s=N_s\Delta f$ şeklinde ifade edilmektedir. Ayırık Fourier dönüşümünün dikdörtgen titreşim örneği üzerindeki uygulaması Şekil 1.10'da verilmektedir.



Şekil 1.10. Örnelemeli periyodik dikdörtgen sinyal ve genlik spektrumu (Heylen vd., 2007)

1.4.4.2. Sinyal İşlemede Kullanılan Analiz Parametreleri

Sayısal sinyal işlemede kullanılan analiz parametreleri aşağıda verilmektedir (Heylen vd., 2007);

- ✓ T (zaman periyodu): Fourier çözümleyicisinde 2'nin bir üssü ile sınırlandırılan N_s örneklerinin alındığı zaman periyodudur.

$$T = N_s \Delta t = \frac{1}{\Delta f} \quad (1.15)$$

ile hesaplanır.

- ✓ f_s (örnekleme frekansı): Sayısal sinyali elde etmek için analog sinyalin dönüştürmede kullanılan örnekleme ve sayısallaştırma miktarıdır.

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} = N_s \Delta f \quad (1.16)$$

ile hesaplanır.

- ✓ Δt (zaman örnekleme aralığı): Örnekleme sinyalinin zaman aralığıdır.

$$\Delta t = \frac{T}{N_s} = \frac{1}{f_s} \quad (1.17)$$

ile hesaplanır.

- ✓ Δf (frekans aralığı): Frekans sinyalindeki aralıktır.

$$\Delta f = \frac{1}{T} = \frac{f_s}{N_s} \quad (1.18)$$

ile hesaplanır.

- ✓ f_{max} (maksimum frekans): Sinyalde bulunan maksimum frekanstır.
- ✓ N_s (zaman örnek sayısı): Frekans çizgilerinin toplam sayısını ifade etmektedir.

$$N_s = \frac{T}{\Delta t} = \frac{f_s}{\Delta f} \quad (1.19)$$

şeklinde bulunur.

1.4.4.3. Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilmesi

Yapıların dinamik karakteristikleri olarak bilinen doğal titreşim frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları belirlenirken deneysel ve teorik olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır. Deneysel yöntemde, yapı titreştirilerek doğal frekanslar, mod şekilleri ve

sönüm oranları elde edilirken teorik yöntemde yapının kütle, rijitlik ve sönüm özellikleri kullanılarak doğal frekanslar ve mod şekilleri belirlenmektedir (Türker, 2011). Bu tez çalışması kapsamında frekans değerlerini elde etmek için piklerin seçilmesi yöntemi kullanılacaktır.

Tasarlanan veri toplama kartı ile alınan çevresel titreşimler elektriksel sinyallere dönüştürülerek bilgisayar ortamına aktararak sayısal hale dönüştürülmektedir. Bilgisayar ortamına aktarılan bu sayısal sinyaller içerisinde farklı frekans bileşenlerini bulundurmaktadır. Bu frekans bileşenlerinin analizini yapabilmek için zaman uzayında kaydedilen sinyalleri frekans uzayına dönüştürmek gerekmektedir. Bu dönüşüm işlemi için FFT yöntemi kullanılmaktadır. FFT dönüşümü sayesinde zaman uzayında kaydedilen sinyalin tüm frekans bileşenleri bulunabilmektedir. Sinyale FFT dönüşümü uygulandığında elde edilen veriler o sinyalin zaman uzayındaki eşitliğini temsil etmektedir. Yapılar üzerinden elde edilen çevresel titreşim sinyallerine FFT dönüşümü uygulandığında titreşim sinyallerinin içerisinde bir sürü frekans bileşeni olduğu görülmektedir. FFT dönüşümü uygulanan titreşim sinyallerinde frekans bileşenlerinin sinyal içerisindeki baskınlığına göre genlikleri de değişmektedir. Kaydedilen titreşim sinyalleri içerisinde birçok frekans bileşeni olmasına rağmen bazı frekans bileşenleri daha baskın olduğundan genlikleri diğer frekans bileşenlerine oranla daha büyüktür. Genliği büyük olan bu frekans bileşenleri yapının kendi titreşim frekanslarını temsil etmektedir. Yapılan bu çalışmada da yapı üzerinden titreşim sinyalleri alınarak bilgisayar ortamına aktarılmış, FFT dönüşümü yapılarak baskın frekans değerleri bulunmuştur. Bu baskın frekans değerlerinin daha doğru bir şekilde seçilebilmesi için FFT dönüşümünden sonra bu frekans bileşenleri bilgisayarda fare aygıtı kullanılarak el ile seçilmiştir. Bu işlemde maksimum frekans bileşeni arasında kalacak şekilde iki nokta seçilmektedir. Bu seçimden sonra geliştirilen algoritma ile maksimum frekans bileşeni otomatik olarak bulunmaktadır.

1.5. Sonlu Eleman Yöntemiyle Modal Analiz

1.5.1. Sonlu Eleman Modeli Oluşturulması

Sonlu eleman modeli yapıyı temsil etmek amacıyla oluşturulan modeldir. Bir modelde sonsuz tane nokta bulunmaktadır. Bu noktaları analiz etmek zaman kaybı oluşturmakta ve oluşacak denklemlerin çözülmesini zorlaştırmaktadır. Sonlu Eleman Yöntemi'nde analizler

sonsuz sayıda noktası bulunan bir modelin sonlu sayıda parçalara ayrılması sonucu yapılmaktadır. Yapının gerçek davranışına yakın en yakın davranışı temsil etmek için model ne kadar fazla sayıda sonlu parçaya bölünürse alınan sonuçların da bir o kadar iyi olduğu görülmektedir. Ama model ne kadar parçaya ayrılırsa oluşacak işlem hacmi de o kadar artmaktadır. Ayrıca, belirli bir aralıktan sonra elde edilen sonuçlarda önemli bir değişme olmamaktadır. Bu sebeple, yapılan modelin sonlu eleman sayısını yapıyı en iyi şekilde temsil etmeli ve optimal seviyede olmasına dikkat edilmelidir. Eğer belirtilen öneriler dikkate alınmazsa sonlu eleman modelin hassas sonuç vermeyeceği kabul edilmektedir (Zienkiewicz, 2000). Buna ilaveten, Sonlu Eleman Yöntemi ile modellenecek yapının gerçek davranışını temsil edecek eleman seçimine de dikkat edilmelidir.

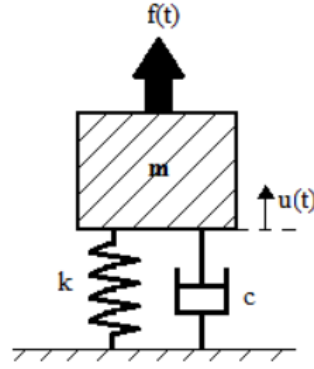
1.5.2. Modal Analiz Formülasyonları

Modal analizin teorik olarak gerçekleştirilmesinde yapıya ait kütle ve rijitlik özellikleri kullanılmaktadır. Bu şekilde doğal frekanslar ve mod şekilleri belirlenebilmektedir. Tek ve çok serbestlik dereceli sistemler için formülasyonlar aşağıda verilmektedir.

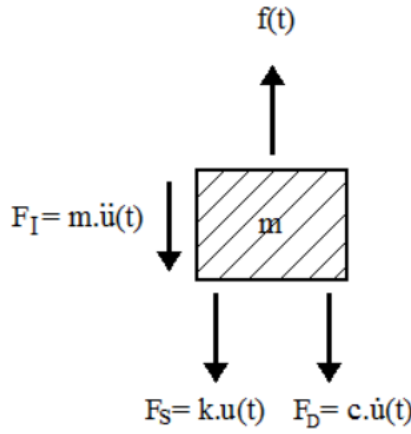
1.5.2.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

Yapılar çok serbestlik dereceli sistemlerdir. Buna rağmen bu sistemler tek serbestlik dereceli sistemlerin süperpozisyonu olarak düşünülüp hesaplanmaktadır. Bu sebepten dolayı öncelikle Tek Serbestlik Dereceli Sistemlerde frekans davranış fonksiyonlarının elde edilmesi oldukça önemlidir.

Bir serbestliğe sahip en basit sistemlere Tek Serbestlik Dereceli Sistemler (TSDS) denir ve tek serbestlik dereceli bir sistemin analitik modeli Şekil 1.11'de verilmektedir (Chopra, 1995; 2006). Bu analitik model kullanılarak oluşturulan matematik model Şekil 1.12'de verilmektedir.



Şekil 1.11. Tek serbestlik dereceli bir sistemin analitik modeli



Şekil 1.12. Tek serbestlik dereceli bir sistemin matematik modeli

Şekil 1.10'daki serbest cisim diyagramı üzerinden denge denklemi yazılırsa,

$$F_I + F_D + F_S = f(t) \quad (1.20)$$

Denklemi elde edilmektedir. Buradaki denklemde verilen F_I atalet kuvveti, F_D sönüm kuvveti, F_S yaydaki elastik değişimden dolayı yayda oluşan kuvvettir. Yukarıdaki denklemde ifadeler yerlerine yazılırsa aşağıdaki (1.21) denklemi elde edilmektedir.

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = f(t) \quad (1.21)$$

Buradaki denklemde m , c ve k sırasıyla yapının kütesini, sönümünü ve rijitliğini, $\ddot{u}(t)$ yapının ivmesini, $\dot{u}(t)$ yapının hızını $u(t)$ yapının yer değiştirmesini ve $f(t)$ ise yapıya uygulanan kuvveti ifade etmektedir.

Sönümsüz tek serbestlik dereceli bir sistemin hareket denklemini elde etmek için (1.21) denkleminde $c=0$ yazılırsa denklem (1.22), yapının serbest titreşim yaptığı düşünülürse denklem (1.23) elde edilir.

$$m\ddot{u}(t) + ku(t) = f(t) \quad (1.22)$$

$$m\ddot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (1.23)$$

Bu denklem çözülürse;

$$k - \omega^2 m = 0 \text{ ve } \omega = \sqrt{k/m} \quad (1.24)$$

ω sönümsüz doğal açısal frekans denklem (1.24) ile elde edilir.

Yapının zorlanmış sönümsüz titreşim yaparsa hareket denklemini, (1.22) denklemini gibidir. Bu denklemin çözümünde;

$$\begin{aligned} f(t) &= Fe^{i\omega t} \\ u(t) &= Ue^{i\omega t} \end{aligned} \quad (1.25)$$

olarak kabul edilip ve (1.23) denkleminde yerine yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$(k - \omega^2 m)Ue^{i\omega t} = Fe^{i\omega t} \quad (1.26)$$

Buradaki u yer değiştirmeyi, f uygulanan kuvveti, t zamanı ve i karmaşık sayı sembolünü göstermektedir. Bu denklem kullanılarak, zorlanmış titreşim yapan sönümsüz bir yapının frekans davranış fonksiyonu $H(\omega)$ denklem (1.26) daki gibidir.

$$H(\omega) = \frac{u}{f} = \frac{1}{k - \omega^2 m} \quad (1.27)$$

Yapının viskoz sönümlü olması durumunda analitik model; kütle, sönüm ve rijitlik elemanlarından oluşup hareket denklemi (1.22) deki gibidir. Serbest titreşim durumunda ise hareket denklemi denklem (1.28) deki gibidir.

$$m \ddot{u}(t) + c \dot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (1.28)$$

Bu denklemin çözümü için;

$$u(t) = Ue^{st} \quad (1.29)$$

olduğu kabul edilip düzenlenirse,

$$ms^2 + cs + k = 0 \quad (1.30)$$

ile düzenlenir ve bu denklem çözülürse;

$$s_{1,2} = \left(-\frac{c}{2m}\right) \mp \frac{\sqrt{c^2 - 4km}}{2m} \quad (1.31)$$

$$s_{1,2} = (-\omega)\xi \mp i\omega\sqrt{1-\xi^2} = (-\omega)\xi \mp i\omega_d$$

olarak hesaplanmaktadır. Buradaki ω sönümsüz doğal açısal frekansı, ω_d sönümlü doğal açısal frekansı ve ξ ise sönüm oranına karşılık gelmektedir.

$$\omega_d = \omega\sqrt{1-\xi^2} \quad (1.32)$$

$$\xi = \frac{c}{c_r} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (1.33)$$

şeklindedir. Buradaki c_{cr} kritik sönümü göstermektedir. Bu şekilde elde edilen $s_{1,2}$ değerleri (1.40) denklemindeki yer değiştirme ifadesinde yerine yazılırsa denklem (1.34) elde edilir.

$$u(t) = Ue^{(-\omega\xi \mp i\omega\sqrt{1-\xi^2})t} = Ue^{-\omega\xi t} e^{i(\omega\sqrt{1-\xi^2})t} \quad (1.34)$$

Bu denklemdeki $\omega\xi$ gerçekte kısım, $\omega\sqrt{1-\xi^2}$ sanal kısım ifade etmektedir.

Yapının zorlanmış titreşim yaptığı düşünülürse hareket denklemi (1.22) deki gibidir. Bu denklemin çözümü için;

$$\begin{aligned} f(t) &= Fe^{i\omega t} \\ u(t) &= Ue^{i\omega t} \end{aligned} \quad (1.25)$$

İfadeler yerlerine yazılırsa;

$$(-\omega m + i\omega c + k)Ue^{i\omega t} = Fe^{i\omega t} \quad (1.36)$$

denklemi elde edilir. Bu denklemden zorlanmış titreşim yapan viskoz sönümlü bir yapının frekans davranış fonksiyonu $H(\omega)$ aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$H(\omega) = \alpha(\omega) = \frac{1}{(k - \omega^2 m) + i\omega c} \quad (1.37)$$

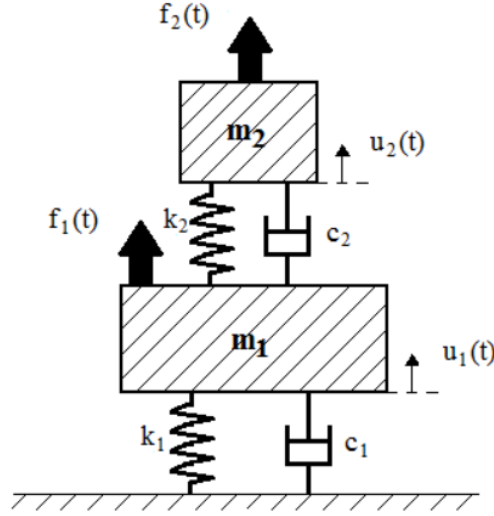
Frekans davranış fonksiyonu $H(\omega)$ 'nın genlik $|\alpha(\omega)|$ ve faz açısı θ_α ;

$$\begin{aligned} |\alpha(\omega)| &= \frac{|(U)|}{|(F)|} = \frac{1}{\sqrt{(k - \omega^2 m)^2 + (\omega c)^2}} \\ \angle \alpha(\omega) &= \angle U - \angle F = \text{tg}^{-1}(-\omega c / (k - \omega^2 m)) = -\theta_\alpha \end{aligned} \quad (1.38)$$

denklemleri ile elde edilmektedir.

1.5.2.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

Gerçekte sistemlerin çoğu çok serbestlik derecelidir. Tek serbestlik dereceli sistemlerin titreşimindeki skaler değerlerin yerini, çok serbestlik dereceli sistemlerde vektörel ve matris büyüklükler alır (Chopra, 2006). İki serbestlik dereceli bir sistemin analitik modeli Şekil 1.13'te verilmektedir. Hareket denklemi aşağıdaki gibidir.



Şekil 1.13. İki serbestlik dereceli bir sistemin analitik modeli

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{f(t)\} \quad (1.39)$$

Burada, $[M]$ kütle matrisini, $[C]$ sönüm matrisini, $[K]$ rijitlik matrisini, $\{u(t)\}$, $\{\dot{u}(t)\}$, $\{\ddot{u}(t)\}$ ve $\{f(t)\}$ sırasıyla yer değiştirme vektörünü, hız vektörünü, ivme vektörünü ve kuvvet vektörünü ifade etmektedir. Sistemde sönüm olmaması durumunda hareket denklemi;

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{f(t)\} \quad (1.40)$$

ile ifade edilmektedir. Yapının dinamik karakteristikleri olarak adlandırılan doğal frekans ve mod şekilleri belirleyebilmek için yapının serbest titreşim yaptığı varsayılırsa bu durumdaki hareket denklemi;

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = 0 \quad (1.41)$$

şeklindedir. Bu denklemi çözebilmek için;

$$\{u(t)\} = \{U\}e^{i\omega t} \quad (1.42)$$

olduğu kabul edilir (Petyt, 1990). Denklem (1.42) ifadesi, (1.41) ifadesinde yerine yazılırsa;

$$([K] - \omega^2 [M])\{U\}e^{i\omega t} = \{0\} \quad (1.43)$$

denklemi elde edilir. Bu denklemin sıfırdan farklı çözümü için;

$$\det|[K] - \omega^2 [M]| = 0 \quad (1.44)$$

belirtilen determinantın sıfıra eşit olması gerekmektedir. Denklem (1.44) ifadesinin çözümünden n serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal açısal frekans (öz vektör) $(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n)$ elde edilmektedir. Elde edilen frekansların sıralanmasından sonra elde edilen ek küçük frekans temel frekans olarak adlandırılır. Bu temel frekansa karşılık gelen mod şekli ise (öz vektör) temel mod şekli olarak isimlendirilmektedir (Petyt, 1990).

Normalleştirilmiş mod şekilleri aşağıdaki denklem yardımıyla elde edilebilmektedirler (Petyt, 1990).

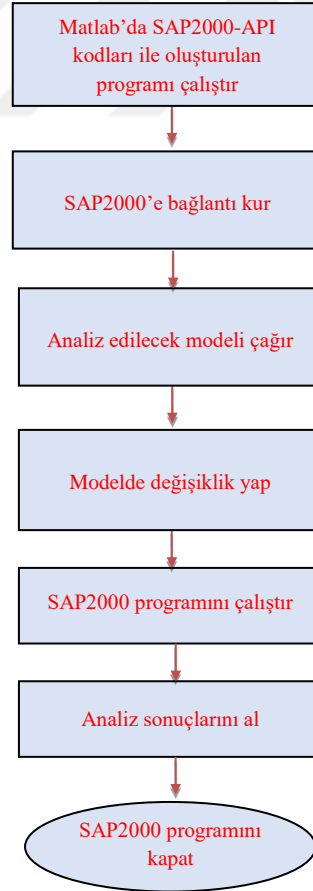
$$\{\phi\} = \frac{1}{\sqrt{m_r}} \{\psi\}_r \quad (1.45)$$

Burada, m_r r. moda ait genelleştirilmiş kütle matrisine karşılık gelen ifadeyi göstermektedir.

1.5.3. SAP2000 Programıyla Tekrarlı Analizler (Application Program Interface)

SAP2000 sonlu eleman programının Uygulama Programlama Arayüzü (API), kullanıcıların sorunlarını çözmek için kolaylık sağlayan bir araçtır. Seçilen herhangi bir parametreyi herhangi bir programda SAP2000’de tekrarlı koşturmayı sağlamaktadır. Bir bilgisayar dilinde yazılmış kullanıcı kodları, SAP2000-API kullanılarak yürütülebilmeyi sağlamaktadır (SAP2000, 2008). SAP2000-API ile ilgili detaylı dokümantasyon, SAP2000_API_Documentation.chm adlı SAP2000 kurulumu ile birlikte gerekli tüm bilgileri içermektedir.

Bu çalışmada, çelik elemanın sonlu elemanlar analizi SAP2000 (SAP2000, 2008) tarafından gerçekleştirilmiştir. Ardından, elemanların elastisite modülleri SAP2000’den Matlab’da yazılan API kodları üzerinden alınmıştır (Dede, 2017). SAP2000 yazılımının kullanımı için bir akış şeması Şekil. 1.14’te verilmiştir.



Şekil 1.14. Matlab’da oluşturulan arayüz için akış şeması

API kullanmanın faydaları aşağıda verilmektedir.

- ✓ Sonlu eleman analizi için bir bilgisayar kodu yazmak gerekli değildir.
- ✓ Yapının türünün (2B, 3B, kafes, çerçeve, katı, düzlem gibi) ne olduğu önemli değildir.
- ✓ Yapının büyüklüğü önemli değildir.
- ✓ Bir döngü kullanarak yapının ağırlığını hesaplamak için gerekli değildir.
- ✓ Bir pencere ekranında yapılar kolaylıkla modellenmektedir.
- ✓ Malzeme özelliklerinin kolay atanmasını sağlamaktadır.
- ✓ Yapının üyesine bir kesit alanı atamak kolaylaşmaktadır.
- ✓ Yapının boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu kolay uygulanmaktadır.
- ✓ Amaç fonksiyonunun değerini hesaplamak için SAP2000 yazılımını kolaylıkla çağırmaı sağlamaktadır (Dede, 2017).

1.6. Model Kalibrasyon Yöntemiyle Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Model kalibrasyon yöntemi, yapıdan alınan deneysel ve analitik verilerin işlenip gerekli işlemler yapılmasından sonra elemanın istenilen malzeme özelliklerinin elde edilmeye çalışılmasıdır.

1.6.1. Temel Unsurları

Başlangıç analitik model, elemanın sınır şartlarından malzeme özelliklerine kadar birçok kabulü içerisinde barındıran ve eleman ya da yapıdan alınan rölevelerden elde edilen malzeme ve kesit özelliklerine bakılarak oluşturulan analitik modeldir. Eleman ya da yapının analitik model üzerinde malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki değişimler dikkate alınarak yapılan model kalibrasyonunda yapının ya da elemanın hasarsız durumu göz önüne alınarak yapılan kalibre işlemidir ve bu işlemde başlangıç analitik modelinde değişiklikler yapıp deneysel ve analitik bulgular arasında arasındaki farkın en aza indirgenmesine dayanmaktadır (Türker, 2011).

1.6.2. İşlem Adımları

Model kalibrasyon yöntemiyle malzeme özellikleri belirlenirken aşağıdaki işlem adımları takip edilebilir.

- ✓ Deneysel ve analitik dinamik karakteristiklerin belirlenmesi,
- ✓ Dinamik karakteristiklerin karşılaştırılması,
- ✓ Amaç fonksiyonlarının tanımlanması,
- ✓ Değişkenlerin belirlenmesi,
- ✓ Değişim aralığının tayin edilmesi,
- ✓ Yakınsama kriterinin tanımlanması.

1.6.2.1. Deneysel ve Analitik Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Bu çalışmada dinamik karakteristik (doğal frekans, mod şekli, sönüm oranı) olarak doğal frekanslar kullanılmıştır.

1.6.2.2. Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması

Test edilecek sistemin frekansları deneysel ve analitik olarak belirlenmektedir. Daha sonra doğal frekanslar karşılaştırılmaktadır. Doğal frekansların karşılaştırılması için bir amaç fonksiyonu oluşturulmaktadır.

1.6.2.3. Amaç Fonksiyonlarının Belirlenmesi

Yapının ya da elemanın deneysel ve analitik olarak elde edilen dinamik karakteristik değerleri arasında farklılık olması durumunda oluşturulan analitik model üzerinde değişiklik yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Yapılacak olan değişimler elemanın doğal frekanslarında farklı etkilere sebep olacağı aşikâr olacaktır. Bu sebeple deneysel ve analitik olarak belirlenen dinamik karakteristikler arasında bir amaç fonksiyonu tanımlanarak farklılıklar en aza indirgenmeye çalışılacaktır. Analitik model üzerinde uygulanan düzenlemeler istenilen seviyede olmalıdır.

Yapılan bu tez çalışmasında amaç fonksiyonu frekanslar arasındaki farklılıklar dikkate alınarak yapılmıştır. Bu belirlenen amaç fonksiyonu doğrultusunda deneysel ve analitik frekans sonuç değerlerinin arasındaki farkın en az olması amaçlanarak işlemler yapılmıştır.

1.6.2.4. Değişkenlerin Belirlenmesi

Yapıyı ya da elemanı analitik olarak modellerken birçok parametre karşımıza çıkmaktadır. Bu parametreler elastisite modülü, kütle yoğunluğu, poisson oranı, kesit özellikleri, atalet momenti, kesit alanı ve sınır şartları (sabit, yaylı, ankastre mesnet) gibi parametreler olarak sayılabilmektedir. Bu tez çalışmasında, seçilen çelik modelin malzeme özellikleri için başlıca belirleyici ve değişim parametresi olarak elastisite modülü seçilmiştir.

1.6.2.5. Değişim Aralığının Tayin Edilmesi

Parametre seçiminden sonra bu parametrenin değişim aralığının seçimi de önemli bir husustur. Bu seçim yapılırken de modelin gerçekte var olan durumunu yansıtacak en iyi aralık tayin edilmelidir. Ayrıca bu aralık belirlenirken mühendislik öngörülerine de özenle dikkat edilmelidir (Blakely, 1984). Seçilen parametreye bağlı olarak değişim aralığının da değişeceği aşikardır (Vanhonacker, 1980; Teughels ve Roeck, 2003; Lord vd., 2003).

1.6.2.6. Yakınsama Kriterinin Tanımlanması

Yakınsama kriteri, doğal frekanslar ve mod şekillerine bağlı birçok kriter tarafından tanımlanan ve otomatik model güncelleme esnasında iteratif çözüm yapılmadan önce hangi şartlar göz önüne alınarak iterasyonun yapılacağını gösteren kriter olarak bilinmektedir. İteratif çözüm, yakınsama kriteri değerine yaklaşıncaya kadar bir döngü halinde devam etmekte olan bir çözümdür. Bu kriterler genel olarak mod şekilleri için Ortalama Modal Güvence Kriteri ve Ağırlıklı Mutlak Modal Yer Değiştirme, doğal frekanslar için Ağırlıklı Nispi Fark ve Ağırlıklı Mutlak Nispi Fark ve kütle özellikleri için Ağırlıklı Mutlak Modal Kütle Kriteri olarak sıralanabilmektedir (Allemang ve Brown, 1982).

Ağırlıklı Nispi Fark Kriteri (ANF): Deneysel ve analitik frekanslar arasındaki göreceli farklılıkların ortalamasını ifade eden bu kriter,

$$YK = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{R_i} \frac{\Delta f_i}{f_i} \quad (1.46)$$

şeklindedir. Burada, YK yakınsama kriterini, C_{R_i} istenen hata oranını, f_i frekans değerini ve n ise mod sayısını ifade etmektedir.

Ağırlıklı Mutlak Nispi Fark Kriteri (AMNF): Deneysel ve analitik frekanslar arasındaki mutlak farklılığın ortalamasını dikkate alan bu kriter,

$$YK = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{R_i} \frac{|\Delta f_i|}{f_i} \quad (1.47)$$

ifade edilmektedir.

Ortalama Modal Güvence Kriteri Değeri (OMGK): Deneysel ve analitik olarak hesaplanmış modal güvence kriterinin ortalama değerleri göz önüne alan bu kriter,

$$YYK = \frac{1}{C_R} \sum_{i=1}^N (1 - C_{R_i} MGK_i) \quad (1.48)$$

$$C_R = \sum_{i=1}^N C_{R_i} \quad (1.49)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Ağırlıklı Mutlak Modal Yer Değiştirme Kriteri (AMMY): Deneysel ve analitik mod şekil bileşenlerinin göreceli farklılıklarının ortalaması dikkate alan bu kriter,

$$YK = \frac{1}{C_R} \sum_{i=1}^N C_{R_i} \frac{\Delta \phi_i}{\phi_i} \quad (1.50)$$

$$C_R = \sum_{i=1}^N C_{R_i} \quad (1.51)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Ağırlıklı Mutlak Modal Kütle Kriteri (AMMK): Deneysel ve analitik modelin kütleleri arasındaki mutlak farkını dikkate alan bu kriter,

$$YK = \frac{1}{C_R} \sum_{i=1}^M C_{R_i} m_i \quad (1.52)$$

$$C_R = \sum_{i=1}^M C_{R_i} \quad (1.53)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Rölatif Fark Kriteri: Gerçek değer ile hesaplanan frekans değerleri farkının gerçek frekans değere bölünmesiyle elde edilen hata oranıdır. Denklem (1.54) te gösterilmiştir.

$$R.H = \frac{f_d - f_a}{f_d} \quad (1.54)$$

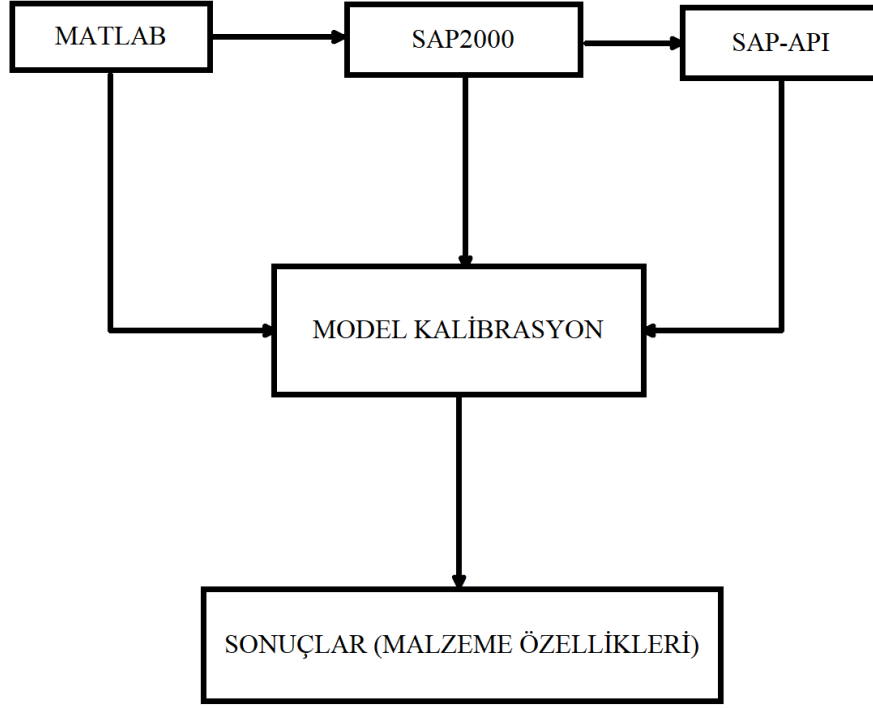
Bu çalışmada istenilen değerleri bulmak için rölatif hata denklemi kullanılmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu bölümde yapı elemanlarının malzeme özelliklerini belirlemek için deneysel ve analitik çalışmalar yapıp seçilen model üzerinde gerekli kalibrasyon işlemleri yapılmıştır. Deneysel kısımda kullanılacak ekipmanlar ve donanımlar için donanım ve yazılım kısımlarından oluşan ölçüm sistemine, incelenen yapı elemanlarının özelliklerine, bu elemana ait sonlu eleman modelinin oluşturulmasına yer verilmektedir. Daha sonra bu yapı elemanından alınan titreşimlerin frekans bileşenlerinin program üzerinden alınabilmesi için arayüz programına yer verilmektedir. Bu amaçla, seçilen çelik modelin malzeme özelliklerini belirlemeye yönelik gerekli görülen çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar; Çevresel Titreşim Testi, Sonlu Eleman Model Aktarımı ve Model Kalibrasyonu olmak üzere üç kısma ayrılmaktadır. Bu amaçla, model için sırasıyla başlangıç analitik modeli oluşturulmuş, hasarsız durumu temsil ettiği kabul edilen model üzerinde çevresel titreşimler altında modelin ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra başlangıç analitik modeli hasarsız deneysel ölçüm verilerine göre kalibre edilerek malzeme özellikleri belirlenmiştir.

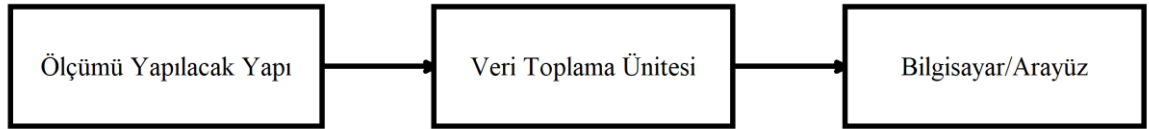
Bu tez çalışmasında, deneysel ölçümlerin yapılabilmesi ve analitik modelin kalibrasyonuna yönelik yazılımlar oluşturulmuştur. Hazırlanan yazılımlarda Matlab platformunda grafik kullanıcı arayüzü GUI özelliğinden faydalanılmıştır. Yapılan bu çalışmaların genel sistematığı blok diyagram şeklinde Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Genel sistem sistematığı

2.2. Ölçüm Sistemi Oluşturulması

Bu tezde yapılar üzerinden ölçümlerin yapılması için gerekli olan ölçüm sistemi 3 temel başlık altında toplanabilir. Sistemin akış diyagramı Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Ölçüm sistemi akış diyagramı

Ölçüm sistemi oluşturulurken ölçümü yapılacak yapı mesnetlenir. Bu işlemten sonra, yapının titreşimlerini algılayacak olan sensörler belirli aralıklarla yerleştirilmektedir. Sensörler, geliştirilen veri toplama donanımına bağlanmaktadır. Bu işlemten sonra sensörlerden gelen titreşim verilerini işleyecek olan donanımın çıkışı işlenen titreşim verilerini bilgisayar ortamına aktarmak üzere aux kablosu kullanılarak bilgisayarın ses kartı girişine bağlanmaktadır. Böylece ölçüm sisteminin tüm fiziksel bağlantıları tamamlanmıştır.

Son olarak bilgisayar ortamında titreşim sinyallerinin alınması için geliştirilen arayüz programı açılarak gerekli ayarlamalardan sonra ölçüm işlemleri yapılabilmektedir.

2.2.1. Donanım Kısmı

Donanım kısmı yapılar üzerinden titreşim verilerini algılayarak işleyip bilgisayar ortamına aktarmak için kullanılan ekipmanların tümüdür. Donanım kısmını oluşturan ögelere genel olarak bakıldığında sensör kısmı ve veri toplama kartı olarak iki alt başlık altında toplanabilir.

2.2.1.1. Sensör

Bu tezde ölçümü yapılacak yapının titreşimlerini elektronik ortamda algılayabilmek için sensör kullanılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda üç eksenli analog ivmeölçer kullanılmasına karar verilmiştir. Üç eksenli analog ivmeölçerler X, Y ve Z eksenlerinde meydana gelen titreşimleri içerisindeki yarı iletken teknolojisi sayesinde algılayarak analog ve sürekli bir sinyal olarak dış ortama iletebilmektedir. Üç eksenli analog ivmeölçer çiplerinde herhangi bir mekanik birim bulunmamaktadır. Bu nedenle dayanıklı bir yapıya sahiptirler ve dış ortamdan kaynaklanan fiziki değişimlerden çok fazla etkilenmezler. Ayrıca mekanik bir yapıya sahip olmadıkları için kullanıma bağlı olarak meydana gelebilecek bir yıpranma da söz konusu değildir.

Bu tez çalışmasında kullanılan üç eksenli analog ivmeölçer modülü Şekil 2.3'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ivmeölçer modülü üzerinde 6 adet pin bulunmaktadır. Bu pinlerden Positive Supply Voltage (VCC) pini USB yardımıyla modüle bağlanan 5 volt gerilimin uygulandığı pindir. Negative Supply Ground (GND) pini ise referans ucunu yani toprak ucunu temsil etmektedir. X, Y ve Z uçları ise eksenlerde meydana gelen titreşimlerin analog çıkışlarının yapıldığı pinlerdir. Self Test (ST) pini ivmeölçerde herhangi bir eksene bakmaksızın tüm eksenlerdeki titreşimleri toplayıp çıkış olarak verdiği pindir. Bu pinler 5 damarlı ve ekranlı kablo yardımı ile veri toplama kartına aktarılmıştır. Ekranlı kabloların kullanılma nedeni ise Faraday kafesi yapısı ile açıklanabilir (URL-1). Faraday kafesinde elektriksel iletkenliğe sahip metaller kullanılmaktadır. Bir yapı bu metaller ile tamamen kaplandığında elektromanyetik bir zırh görevi görmektedir. Yani dışarıdaki elektromanyetik

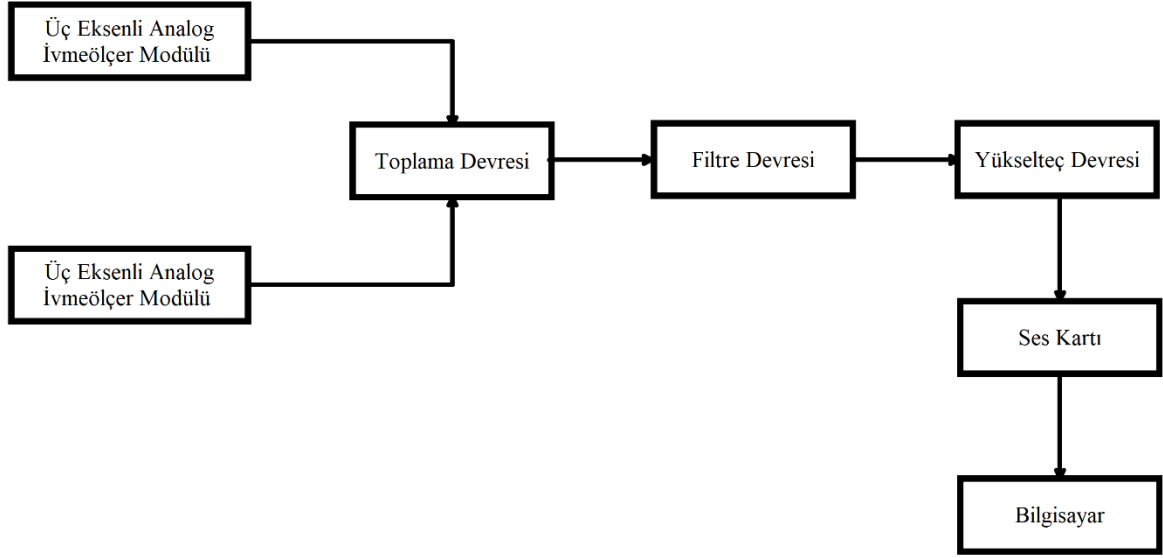
dalgalar içeri girememekte, içerideki elektromanyetik dalgalar ise dışarı çıkamamaktadır. Bu sayede dış ortamdaki şebeke gürültüsü titreşim verilerinin iletiildiği kabloları etkilememektedir.



Şekil 2.3. ADXL335 üç eksenli analog ivmeölçer modülü

2.2.1.2. Veri Toplama Kartı Tasarlanması

Geliştirilen sistemin en önemli kısmını veri toplama kartı oluşturmaktadır. Sistemin bu kısmı titreşim verilerinin alınıp işlenerek bilgisayar ortamına aktarılmasını sağlayan kısımdır. Üç eksenli analog ivmeölçerlerden gelen ve elektriksel sinyallere dönüştürülen titreşim verileri veri toplama kartı ile toplanarak işlenmektedir. Analog olarak işlenen bu veriler tekrar analog olarak bilgisayar ortamına aktarılarak bilgisayarın işleyebileceği sayısal verilere dönüştürülmektedir. Bu nedenle veri toplama kartı sistemin fiziksel ortam ile bilgisayar arasındaki bağlantısını oluşturmaktadır. Geliştirilen kartın blok diyagramı aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 2.4.).



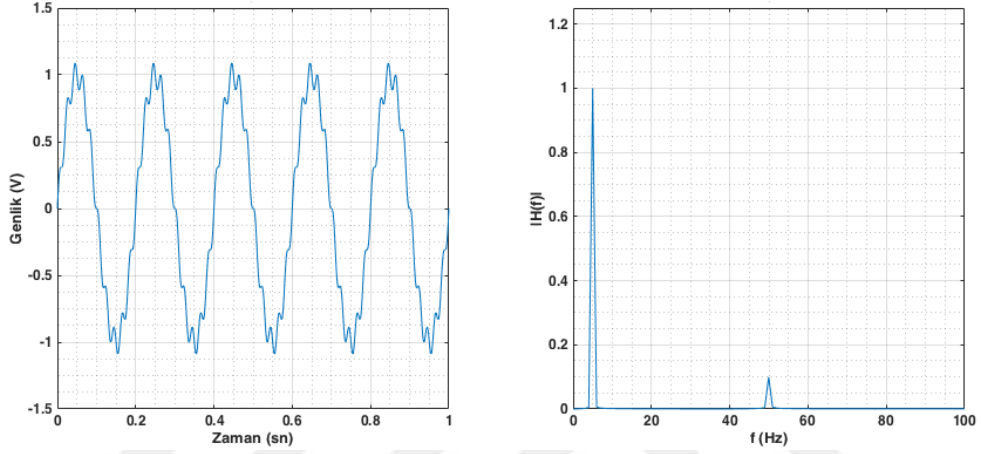
Şekil 2.4. Veri toplama kartı blok şeması

Şekil 2.4'te şeması verilen veri toplama kartında üç eksenli analog ivmeölçer modülleri dışarıdan bağlanmaktadır. Maksimum iki adet ivmeölçer bağlanabilen veri toplama kartında ivmeölçerlerin Z eksenindeki titreşim verileri kullanılmıştır. Alınan titreşim verileri donanımsal olarak işlenerek çıkışa aktarılmaktadır.

Veri toplama kartının toplama devresinde iki farklı yere yerleştirilen iki farklı analog ivmeölçerden gelen elektriksel sinyallerin toplama işlemleri yapılmaktadır. Geliştirilen sistemde frekans analizi yapıldığı göz önünde bulundurulduğunda, yapı üzerinde farklı yerlere yerleştirilen analog ivmeölçerlerden gelen titreşim verilerinin toplama işlemine tabii tutulmaları bu sinyallerin frekans içeriklerinde herhangi bir kayba veya değişime neden olmamaktadır. Fourier dönüşümünden de bilindiği üzere farklı frekanslara sahip iki sinyal toplanıp bu sinyallere Fourier dönüşümü uygulandığında sinyallere ait frekans bilgileri ayrı ayrı olarak elde edilebilmektedir. Bu nedenle yapının farklı yerlerinde baskın olan farklı frekans bileşenlerini algılamak amacıyla iki adet analog ivmeölçer kullanılarak bu sensörlerden gelen veriler toplama devresi yardımı ile toplanarak tek bir sinyal haline getirilmektedirler. Ayrıca analog ivmeölçerlerden gelen düşük genlikteki sinyaller toplama devresi yardımı ile küçük bir ön yükseltme işlemine tabii tutulmaktadır.

Analog ivmeölçerler ile veri toplama kartı arasında gerçekleşen kablolu bağlantıda her ne kadar ekranlama tekniği kullanılsa da dış ortamdan gelen elektromanyetik gürültülerden etkilenmektedir. Bu etkilenme sonucunda yapının asıl titreşim frekans bilgilerini içeren sinyallere dış ortamlardan alınan gürültülerin frekans bilgileri de karışmaktadır. Bu nedenle

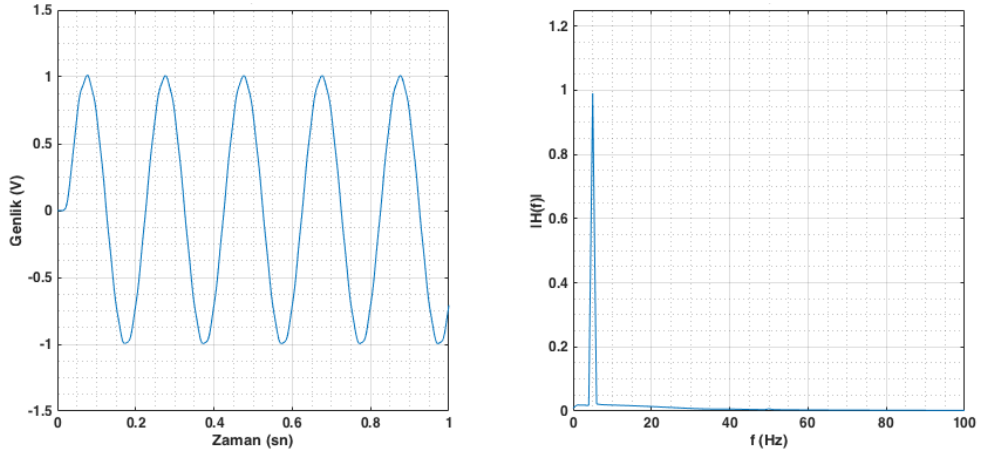
titreşim sinyallerini bozucu etkiye sahip olan bu sinyallerin elde edilen sinyalden kaldırılması amacıyla filtre devreleri kullanılmıştır. Filtre devreleri yardımıyla asıl sinyal ait frekans bilgileri sinyal içerisinde kalırken gürültü olarak görülen sinyaller sinyal üzerinden süzülerek atılmaktadır. Bu etkiyi aşağıdaki şekilde verilen simülasyon sonuçları ile görmek mümkündür (Şekil 2.5 ve Şekil 2.6.). Yapılan simülasyon işlemi gerçekleştirilen donanım kısmının matematiksel modellenmesi ile elde edilmiştir.



a) Gürültülü işaret

b) İşarete ait FFT grafiği

Şekil 2.5. Gürültülü işaret ve bu işarete ait FFT grafiği



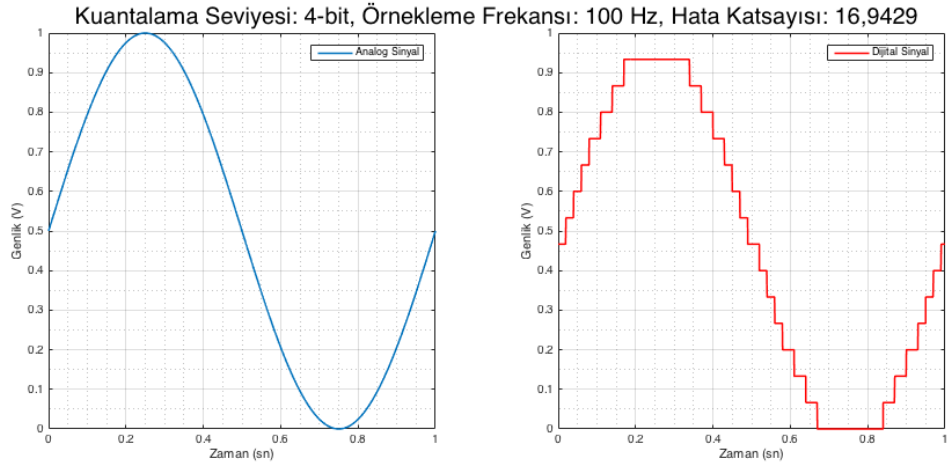
a) Filtrelenmiş işaret

b) İşarete ait FFT grafiği

Şekil 2.6. Filtrelenmiş işaret ve bu işarete ait FFT grafiği

Şekil 2.5'te filtrenin etkisini görebilmek için 5Hz frekansa sahip gürültülü bir sinüzoidal sinyal oluşturulmuştur. Bu sinyale ait FFT dönüşümü ise yanındaki grafikte verilmiştir. FFT grafiğine bakıldığında 5Hz frekansa sahip olan sinüzoidal sinyale 50Hz şebeke gürültüsünün karıştığı görülmektedir. Bu gürültü ana sinyal üzerinde bozulmalara neden olmaktadır. Ana sinyalden bu gürültüyü süzmek için filtre devreleri kullanılmaktadır. Tasarlanan veri toplama kartında 2. dereceden 30Hz köşe frekansına sahip Butterworth filtre kullanılmıştır. Bu filtrenin matematiksel karşılığına ait transfer fonksiyonunun katsayıları Matlab ortamında hesaplanarak devrede kullanılan filtreye denk olacak şekilde sayısal bir filtre tasarlanmıştır. Tasarlanan bu filtre yine Matlab ortamında oluşturulan 5Hz frekansa sahip ve içerisine 50Hz şebeke gürültüsü karıştırılmış sinüzoidal bir sinyale uygulandığında Şekil 2.5'teki grafiklere ulaşılmıştır. Şekil 2.6 incelendiğinde, sol taraftaki "a" şekli filtrelenmiş sinyalin zaman uzayındaki son halini, sağ taraftaki "b" şekli ise bu sinyalin FFT dönüşümü sonucunda frekans uzayında elde edilmiş halini göstermektedir. Şekil 2.5 ve Şekil 2.6 incelendiğinde, filtreler sayesinde ana sinyal içerisine karışmış olan farklı frekanslara sahip gürültülerin süzölebileceği görülmektedir. Kullanılan Butterworth filtrenin tek dezavantajı Şekil 2.6'da da görüldüğü üzere sinyalde faz kaymasına neden olmasıdır. Ancak bu tezin çalışma alanı frekans uzayında olduğu için faz kayması göz ardı edilebilmektedir. Gerçekleştirilen veri toplama kartında da maksimum 1kHz frekans ölçüleceği düşünülerek bu frekansların üzerini süzecek bir filtre tasarlanmıştır. 50Hz gürültüsü ise donanımsal olarak değil yazılımsal olarak Matlab ortamında çeltik (notch) bir filtre olarak opsiyonel olarak hazırlanmış olup şebeke gürültüsü olduğu zaman program üzerinde açılıp kapatılabilme özelliğine sahiptir.

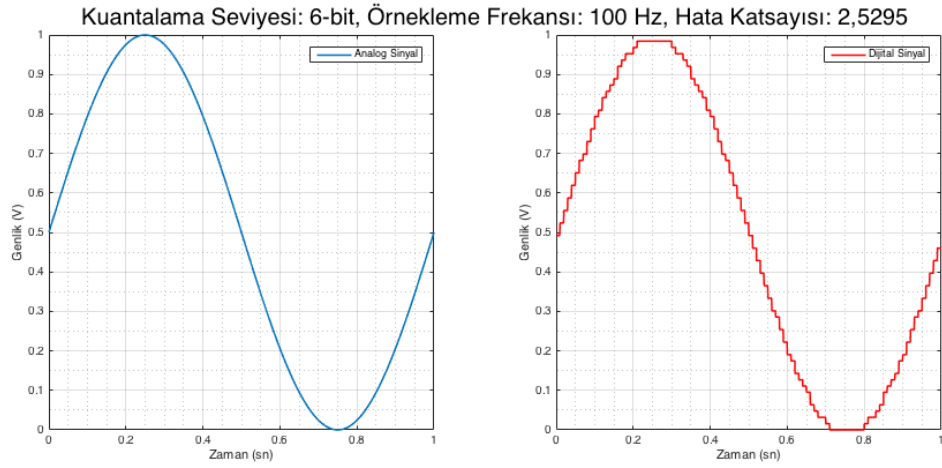
Veri toplama kartının diğer kısmı yükselteç devresidir. Bu devre analog ivmeölçerlerden gelen ve elektriksel sinyale dönüşmüş olan düşük genlikli titreşim sinyallerinin genliğini artırmaktadır. Düşük genlikli sinyallerin genliğini artırma işlemi sinyallerin daha doğru bir şekilde sayısal ortama aktarılmasını ve kolay bir şekilde işlenebilmelerini sağlamaktadır. Bu nedenle tasarlanan veri toplama kartında yükselteç devresi de kullanılmıştır. Ayrıca tasarlanan yükselteç devresi sabit bir yükseltme katsayısına sahip değildir. Devre üzerine yerleştirilen potansiyometre sayesinde yükseltme katsayısı değiştirilerek farklı yapılarda daha doğru sonuçlar alabilmek mümkün olmaktadır. Yükseltme işlemi analog olarak yapıldığı için sinyalde herhangi bir bozulma da meydana gelmemektedir. Ayrıca ayarlanabilir yükseltme katsayısı sayesinde düşük çözünürlüklere sahip bilgisayarlarda da kolayca kullanılabilirlik sağlanmıştır (Şekil 2.7, 2.8 ve 2.9.).



a) Analog sinyal

b) Örneklenmiş sinyal

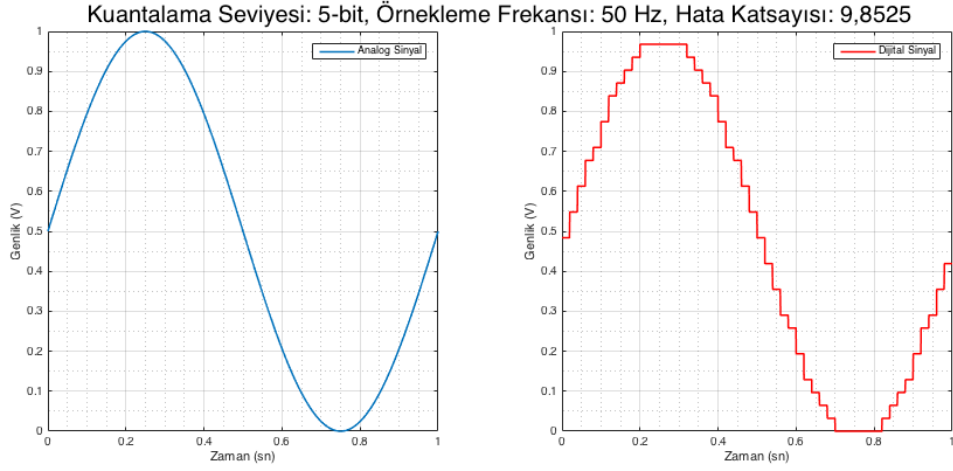
Şekil 2.7. Kuantalama seviyesinin dijital sinyal üzerindeki etkisi



a) Analog sinyal

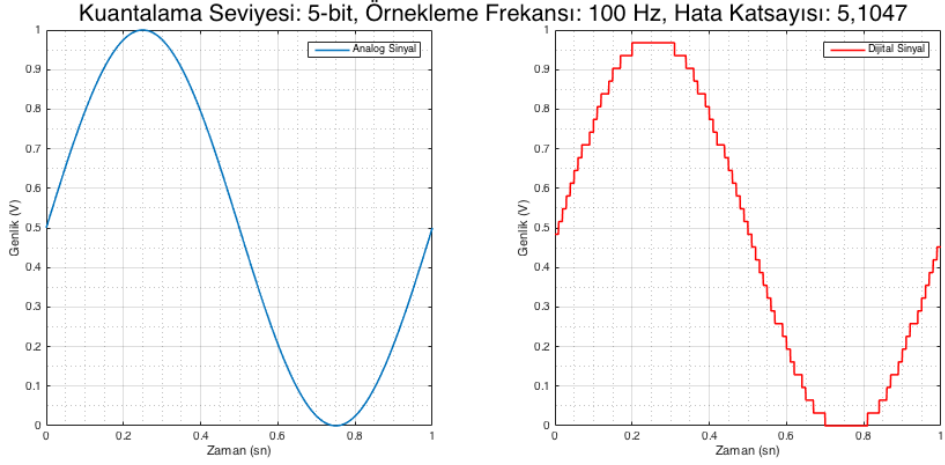
b) Örneklenmiş sinyal

Şekil 2.8. Kuantalama seviyesinin dijital sinyal üzerindeki etkisi



a) Analog sinyal

b) Örneklenmiş sinyal



c) Analog sinyal

d) Örneklenmiş sinyal

Şekil 2.9. Örnekleme frekansının dijital sinyal üzerindeki etkisi

Sistemin diğer bir katmanı olan ses kartı yapı üzerinden alınarak işlenen analog veriyi sayısalaya dönüştürerek bilgisayar ortamında işlenebilecek bir hale dönüştürmesi için kullanılmıştır. Bunun için kullanılan ses kartı 24-bit çözünürlükte kuantalamaya ve 192kHz örnekleme frekansına sahiptir. Kuantalama seviyesinin ve örnekleme frekansının analog sinyali sayısal sinyale dönüştürmedeki etkileri Matlab ortamında yapılan simülasyon sonucunda Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'deki grafikler elde edilmiştir. Şekil 2.7 incelendiğinde örnekleme frekansı 100Hz'de sabit tutulurken kuantalama seviyesi değiştirilmiştir. Şekil 2.7'nin (a) kısmında sol tarafta bulunan sinyal 1Hz frekansa sahip analog sinyali temsil etmektedir. Sağ kısmındaki grafik ise bu analog sinyalin 4-bit kuantalama seviyesine ve 100Hz örnekleme frekansına sahip bir ses kartı ile örneklenmiş halini göstermektedir. Şekil

2.7'nin (b) kısmında ise sol tarafta bulunan sinyal yine 1Hz frekansa sahip analog sinyali temsil etmektedir. Sağ kısmındaki grafik ise bu analog sinyalin 6-bit kuantalama seviyesine ve 100Hz örnekleme frekansına sahip bir ses kartı ile örneklenmiş halini göstermektedir. Şekil 2.7'nin (a) ve (b) grafikleri görsel olarak incelendiğinde kuantalama seviyesi arttıkça sayısal sinyalin analog sinyale daha çok benzediği görülmektedir. Ayrıca aşağıdaki formül yardımı ile bu iki grafiğin hata katsayıları hesaplanarak (a) grafiğinde 16.9429, (b) grafiğinde ise 2.5295 olarak bulunmuştur. Bu değerlerden de görüldüğü üzere kuantalama seviyesinin artması sayısal sinyali analog sinyale daha çok yakınlaştırarak hata oranını düşürmektedir.

$$\text{Hata} = \sum_{i=1}^N (A_{n_i} - A_{\text{kuant}_i})^2 / 1000 \quad (2.1)$$

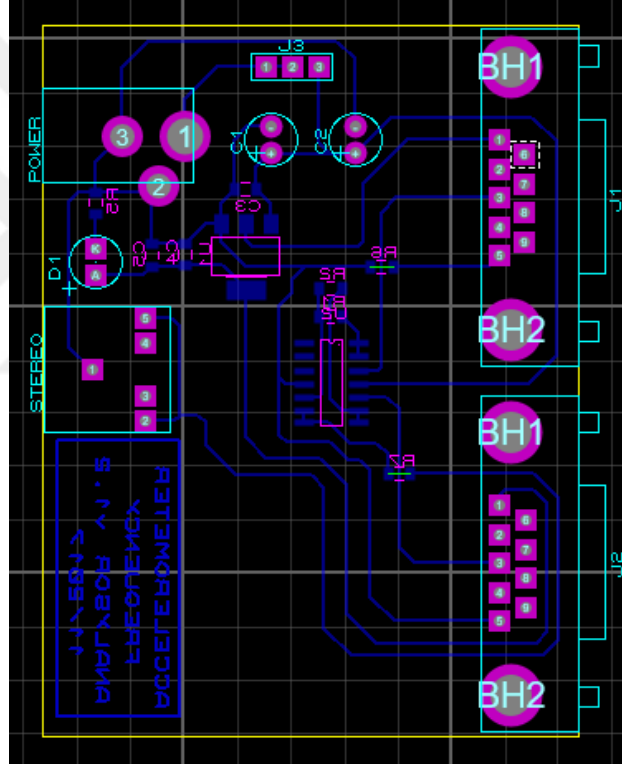
Bu formülde A_n analog sinyali, A_{kuant} ise kuantalanmış sinyali temsil etmektedir. Bu sinyallerin birebir farkı alınarak kareleri alınmaktadır ve elde edilen bu değerler toplanarak hata katsayısı bulunmuştur. N ise analog sinüs sinyalini oluşturan dizinin eleman sayısını temsil etmektedir. Elde edilen hata katsayıları 1000 sayısına bölünerek bu değerler okunaklı bir hale getirilmiştir. Ayrıca analog sinyal ile kuantalanmış sinyalin farkı alındıktan sonra karesi alınarak gelebilecek herhangi bir negatif değer etkisi ortadan kaldırılmıştır.

Şekil 2.9 incelendiğinde, kuantalama seviyesi 5-bit'te sabit tutulurken örnekleme frekansı değiştirilmiştir. Şekil 2.9'un (a) kısmında sol tarafta bulunan sinyal 1Hz frekansa sahip analog sinyali temsil etmektedir. Sağ kısmındaki grafik ise bu analog sinyalin 5-bit kuantalama seviyesine ve 50Hz örnekleme frekansına sahip bir ses kartı ile örneklenmiş halini göstermektedir. Şekil 2.9'un (b) kısmında ise sol tarafta bulunan sinyal yine 1Hz frekansa sahip analog sinyali temsil etmektedir. Sağ kısmındaki grafik ise bu analog sinyalin 5-bit kuantalama seviyesine ve 100Hz örnekleme frekansına sahip bir ses kartı ile örneklenmiş halini göstermektedir. Şekil 2.9'un (a) ve (b) grafikleri görsel olarak incelendiğinde örnekleme frekansı arttıkça sayısal sinyalin analog sinyale daha çok benzediği görülmektedir. Ayrıca aşağıdaki formül yardımı ile bu iki grafiğin hata katsayıları hesaplanarak (a) grafiğinde 9.8525, (b) grafiğinde ise 5.1047 olarak bulunmuştur. Bu değerlerden de görüldüğü üzere örnekleme frekansının artması sayısal sinyali analog sinyale daha çok yakınlaştırarak hata oranını düşürmektedir. Örnekleme frekansının ve kuantalama seviyesinin yüksek seçilmesi daha doğru sonuçların alınmasını sağlamasına rağmen bu

değerlerin büyük seçilmesi FFT algoritmasında ve verilerin sayısal olarak işlenmesinde işlem yükünü artırmaktadır. Dolayısıyla bu değerler makul seviyelerde seçilmelidir.

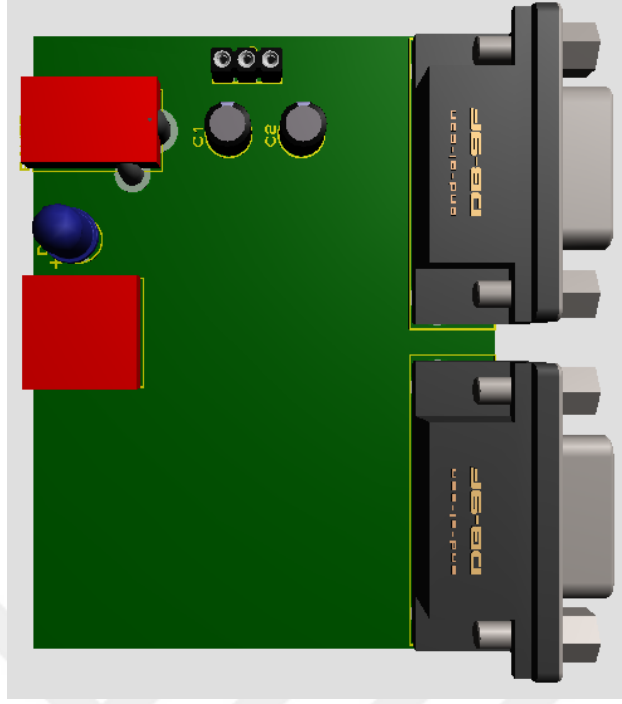
Veri toplama kartının son adımı olan bilgisayar ise Matlab kodunun bulunduğu ve matematiksel işlemlerin, FFT'nin ve grafik arayüzünün bulunduğu birimi temsil etmektedir. Ayrıca malzeme üzerinden alınan frekans değerlerinin çıktıları da bilgisayar üzerinden kullanıcıya aktarılmaktadır.

Geliştirilen veri toplama kartının tasarımı ve baskı devrenin çizimi PROTEUS 8 (Proteus, 2017) programı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.4'te blok şeması verilen veri toplama kartı PROTEUS 8 (Proteus, 2017) programı ile Şekil 2.10'daki gibi tasarlanmıştır.

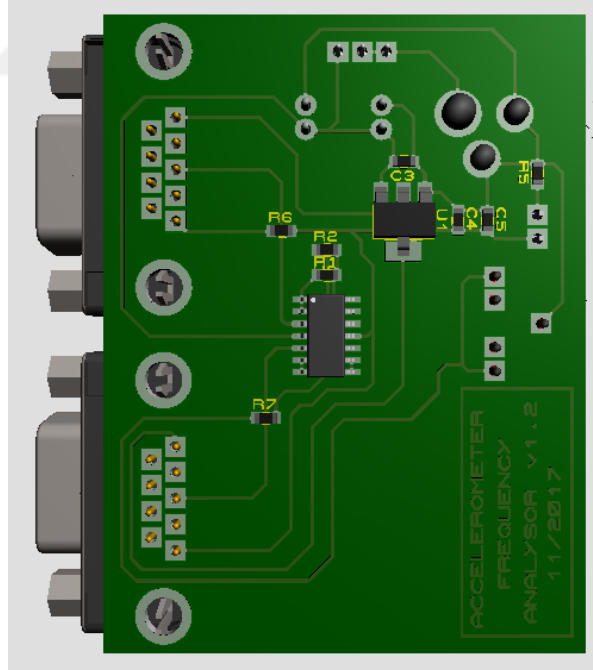


Şekil 2.10. PROTEUS 8 (Proteus, 2017)'de tasarlanan veri toplama kartı

PROTEUS 8 programında tasarımı yapılan veri toplama kartının üstten ve alttan görünüşleri yine PROTEUS 8 programı ile modellenip Şekil 2.11 ve Şekil 2.12'de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

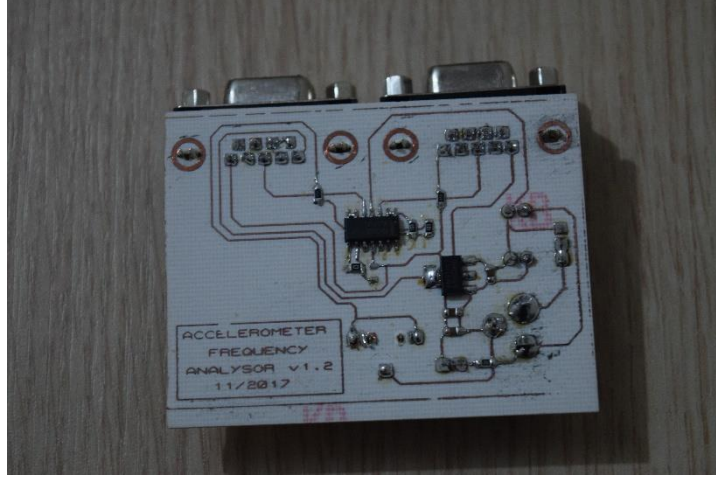


Şekil 2.11. Veri toplama kartı üstten görünüşü



Şekil 2.12. Veri toplama kartı alttan görünüşü

Yapılan tasarım sonucunda üretilen veri toplama kartının son hali bakır plaket üzerinde gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen veri toplama kartının son hali Şekil 2.13'te verilmiştir.



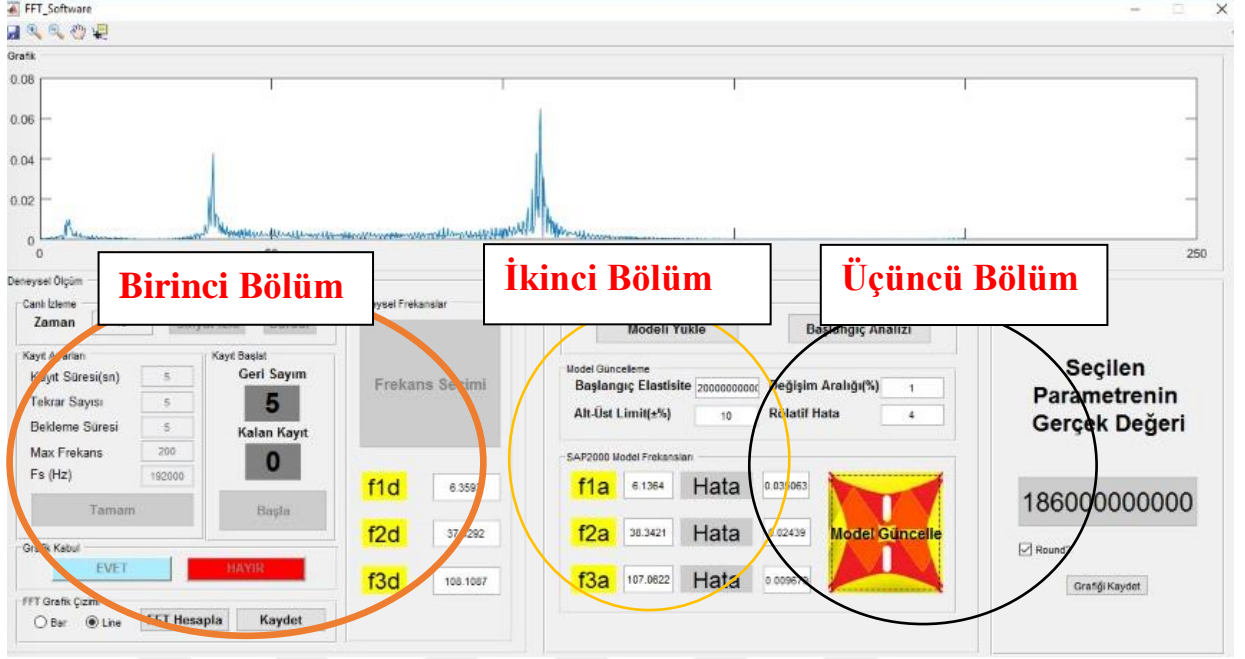
Şekil 2.13. Bakır plaket üzerinde veri toplama kartı

2.2.2. Yazılım Kısmı

Sinyal işleme yazılım paketleri oldukça fazla üretilmektedir. Ancak bir araştırmacı için ticari yazılımların birçoğunda belli belirsiz sıkıntılar olmaktadır. Örnek olarak daha önce oluşturulan bu yazılımlara geliştirilen algoritmaları eklemek genellikle zordur. Matlab programı vasıtasıyla özgün ve amaca yönelik fonksiyonlar yazılarak istenen yazılım Matlab platformunda oluşturulabilmektedir.

2.2.2.1. Model Kalibrasyon Arayüz Programın Oluşturulması

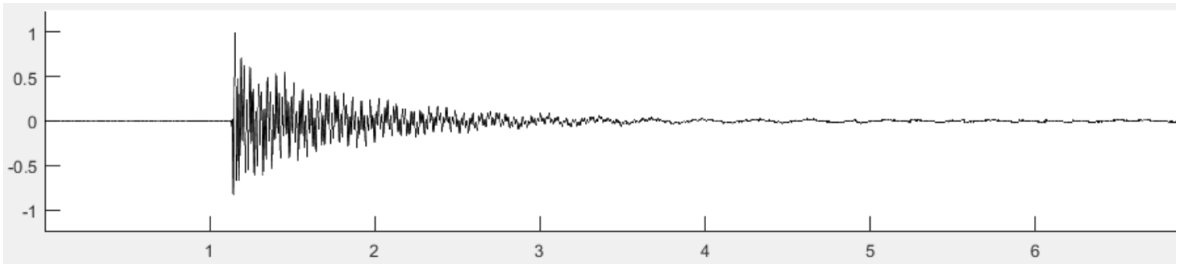
Seçilen çelik modelin malzeme özelliklerini belirlemek için yapılacak işlemler için bu seçilen modelden alınan sinyallerin işlenmesi gerekmektedir. Bu işlemler için çeşitli programlar mevcut olmakla birlikte bu tez çalışmasında Matlab ortamında hazırlanan program vasıtasıyla sonuçlar elde edilmiştir. İstenilen amaç doğrultusunda elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak seçilen modelin istenilen özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla oluşturulan Matlab ortamında oluşturulan arayüz programı üç farklı bölüme ayrılarak elde edilecek sonuçların daha dikkatli bir şekilde incelenmesi ve karşılaştırılması amaçlanmıştır (Şekil 2.14.). Bu kısımlar aşağıda detaylı olarak incelenecektir.



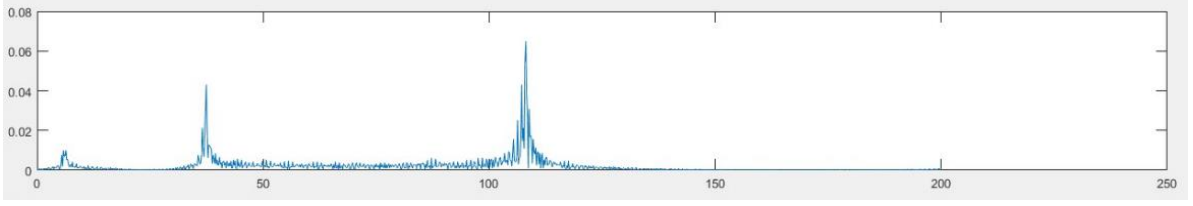
Şekil 2.14. Matlab ortamında oluşturulan ölçüm ve kalibrasyon arayüzü

2.2.2.1.1. Deneysel Modal Analiz Kısım (Birinci Bölüm)

Birinci bölüm, arayüzde yer alan ve aşağıda verilen kısım yapı üzerinden alınan titreşim verilerinin ve bu titreşim verilerinin FFT dönüşümlerinin çizdirildiği grafik ekranıdır. Bu ekran sayesinde ses kartı üzerinden alınan sayısal titreşim verileri grafiksel olarak bu ekrana aktarılmaktadır. Sinyal örneği Şekil 2.15'te gösterilmiştir. Sinyalin FFT dönüşümünün çizildiği grafik Şekil 2.16'da verilmiştir.

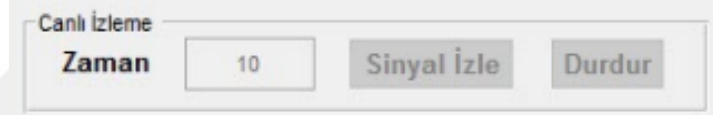


Şekil 2.15. Titreşim sinyali örneği



Şekil 2.16. FFT dönüşümünün çizildiği grafik

Arayüzde canlı izleme olarak adlandırılan kısımda zaman değeri girildikten sonra ve sinyal izle butonuna basıldıktan sonra grafik ekranında gerçek zamanlı olarak ses kartından gelen veriler çizdirilmektedir. Bu kısmın yapılma nedeni sensörler yapı üzerine bağlandıklarında bu bağlantıların sağlıklı olup olmadığını kontrol etmektir. Sensör bağlantıları yapıldıktan sonra bu kısım sayesinde sinyaller gerçek zamanlı olarak inceleyerek sensörlerin istenilen çıkışları verip vermedikleri kontrol edilmektedir (Şekil 2.17.).



Şekil 2.17. Sinyalin gerçek zamanlı olarak incelenmesini sağlayan durum

Arayüzde kayıt ayarları olarak tanımlanan kısımda kayıttan önce girilmesi gereken bazı bilgiler yer almaktadır. Bu bilgiler kayıt süresi, tekrar sayısı, bekleme süresi, maksimum frekans ve f_s yani örnekleme frekansıdır. Kayıt süresi, kaydın başlayıp yapının titreştirilip bu titreşimin sönümlenmesi için gerekli olan tahmini sürenin saniye cinsinden değeridir. Geliştirilen arayüz kayıt süresi olarak girilen süre kadar kayıt aldıktan sonra kayıt işlemini durdurmaktadır. Tekrar sayısı, kayıt süresi girilen kayıttan kaç tane yapılacağını göstermektedir (Şekil 2.18.). Kaydın bu şekilde gerçekleştirilmesinin nedeni her kayıttaki yapının farklı noktalarına darbe uygulayarak baskın frekansların daha iyi bir şekilde yakalanmasını sağlamak içindir. Tekrar sayısı kadar kayıt yapıldıktan sonra arka planda veriler birleştirilerek bir bütün olarak analizi yapılmaktadır. Bekleme süresi olarak tanımlanan kısımda ise iki kayıt arasında yapının kararlı hale gelmesi için beklenmesi gereken süre girilmektedir. Maksimum frekans değeri olarak girilen kısımda belirlenen frekans değeri sinyaller alınıp FFT dönüşümleri yapıldıktan sonra gösterilecek olan frekans spektrumunda maksimum değeri temsil etmektedir. Normalde alınan verilerin FFT

dönüşümleri yapıldığında maksimum frekans değeri örnekleme frekansının yarısıdır. Ancak analizi yapılacak olan yapının frekans değerlerinin daha net olarak gözükebilmesi için daha düşük frekans aralığının görüntülenmesi gerekebilir. Bu nedenle böyle bir seçenek tasarlanan arayüze eklenmiştir. Örnekleme frekansı olarak girilen değer ise ses kartı üzerinden kaydedilecek olan verinin bir saniyedeki örnekleme sayısını temsil etmektedir. Bu değer ne kadar büyük olursa zaman eksenindeki çözünürlük o kadar hassaslaşmış olur. Ancak bu değer çok büyük seçilmesi FFT dönüşümü esnasında işlem yükünü artırmaktadır. Bu nedenle bu değer makul bir seviyede seçilmelidir. En düşük olarak ölçümü yapılacak yapının maksimum frekans bileşeninin iki katı olacak şekilde seçilmelidir. Ancak bu tam sınır değeridir. Bunun yerine 3 veya 4 katı olacak şekilde seçilebilir. Maksimum frekans değeri ise en fazla örnekleme frekansının yarısı olabilmektedir. Bunun nedeni Nyquist teoremi ile açıklanabilir (Eyer ve Bartholdi, 1999).

Kayıt Ayarları	
Kayıt Süresi(sn)	5
Tekrar Sayısı	5
Bekleme Süresi	5
Max Frekans	200
Fs (Hz)	192000
Tamam	

Şekil 2.18. Kayıt ayarları ekranı

“Kayıt başlat” olarak tanımlanan ve aşağıda verilen kısım kayıt ayarları girilip tamam butonuna basıldıktan sonra aktif olmaktadır. Bu kısım tamamen ölçüm esnasında kullanıcıyı bilgilendirmek amaçlıdır. Geri sayım kısmında bekleme süresi olarak girilen sürenin geri sayımı yapılmaktadır. Kalan kayıt kısmında ise tekrar sayısı olarak girilen değerden itibaren her kaydı sayarak kaç kayıtın kaldığını göstermektedir. Kayıt ayarları yapılıp tamam butonuna basıldıktan sonra kayıt başlat kısmı aktif hale gelerek kayıt ayarlarında girilen değere göre ayarlanmaktadır. Daha sonra bu birim altındaki başla butonu ile kayıt işlemi başlamaktadır. İlk olarak geri sayım işlemi yapılmaktadır. Daha sonra kayıt süresi kadar kayıt yapıldıktan sonra kalan kayıt değeri bir azaltılmaktadır. Bu işlem kalan kayıt değeri sıfır olana kadar devam etmektedir (Şekil 2.19.).



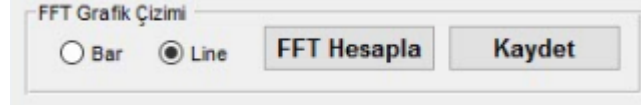
Şekil 2.19. Kalan kayıt sayısını gösteren ekran

Grafik kabul biriminde kayıt süresi kadar kayıt işlemi yapıldıktan sonra grafik ekranında görülen sinyalin kabul edilip edilmeyeceğinin seçildiği kısımdır. Eğer grafik kabul edilirse titreşimin gerçekleştiği aralığın seçimi için seçenek sunulmaktadır ve kalan kayıt değeri bir azaltılmaktadır. Eğer alınan veri kabul edilmez ise aynı kayıt tekrar yapılmaktadır. Bu işlemde kalan kayıt değeri değişmemektedir (Şekil 2.20.).



Şekil 2.20. Grafik kabul şeması

Kalan kayıt değeri sıfır olduğunda yani tüm kayıt işlemleri bittikten sonra Şekil 2.20'de gösterilen FFT grafik çizimi birimi aktif hale gelmektedir. Bu birimde bar ve line olmak üzere iki seçenek bulunmaktadır. Bu seçenekler çizilecek olan FFT grafiğinin çizgilerden mi çubuklardan mı oluşacağını belirlemek amacıyla koyulmuştur. Bu seçeneklerden biri seçilip FFT Hesapla butonuna basıldıktan sonra alınan veriler işlenerek FFT grafikleri hesaplanmaktadır ve hesaplanan FFT verileri grafik ekranında çizdirilmektedir (Şekil 2.21.). Ayrıca Kaydet butonu sayesinde alınan veriler ".txt" formatında kaydedilip Operasyonel Modal Analiz (OMA, 2006) programında da analiz edilebilmektedir.



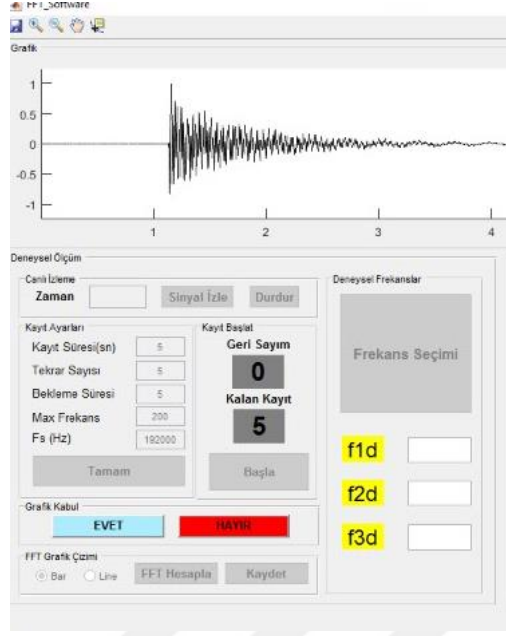
Şekil 2.21. FFT grafik çizimi

FFT Hesapla butonuna basılıp FFT grafiği çizdirildikten sonra Şekil 2.22’de verilen deneysel frekanslar birimi aktif hale gelmektedir. Bu birimde frekans seçimi butonuna basılarak baskın olan frekans değerlerinden ilk üçü seçilebilmektedir (Şekil 2.22.). Seçilen frekans değerleri de f1d, f2d ve f3d olarak kutulara yazdırılmaktadır.



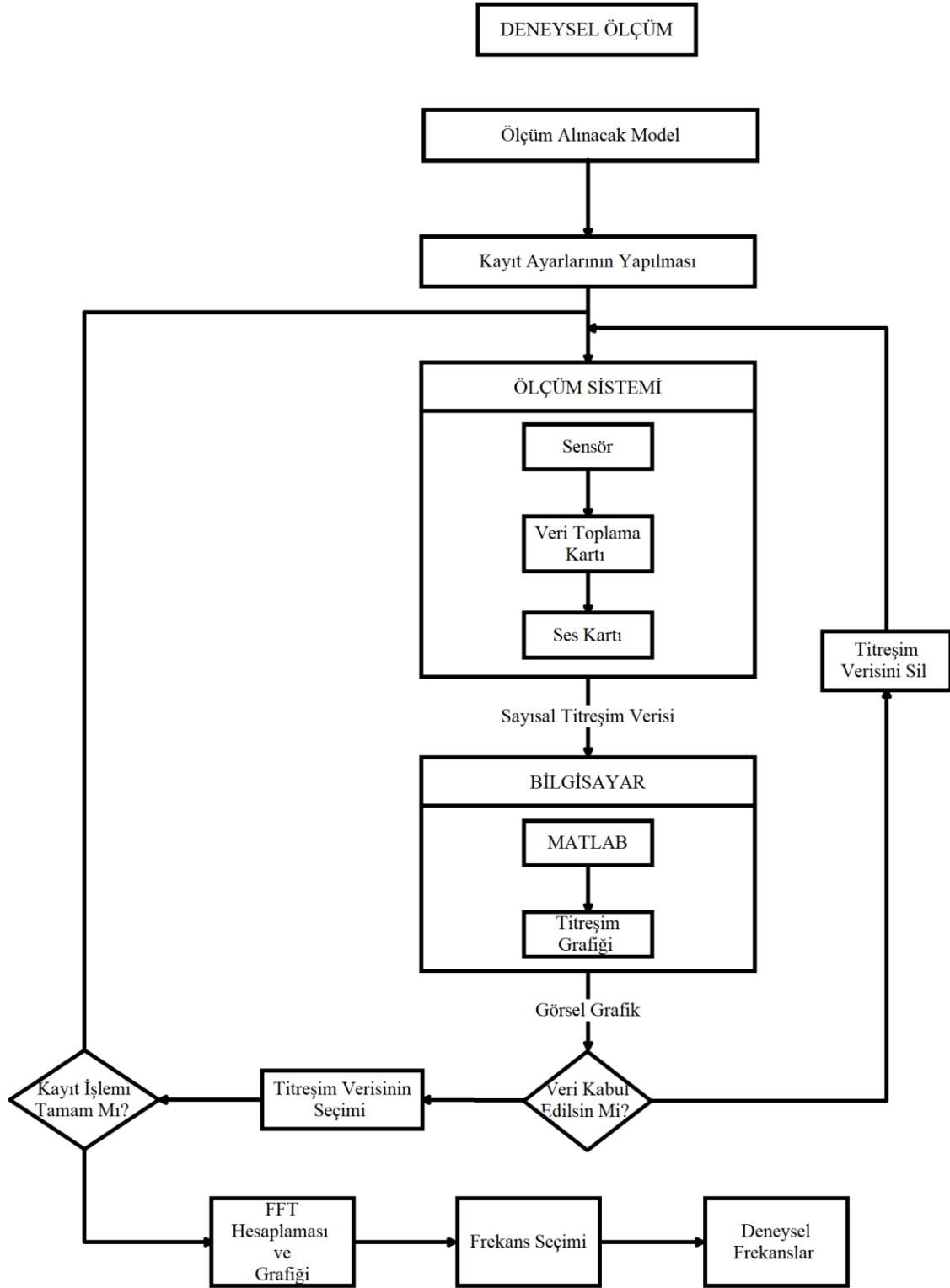
Şekil 2.22. Frekans seçimi ekranı

Seçilen çelik modelin deneysel sonuçlarını almak için oluşturulan deneysel ölçüm kısmıdır. Burada seçilen modelin frekans değerleri Çevresel Titreşim Testi yardımıyla belirlenmektedir. Bu bölümdeki yazılan programda kayıt süresi, tekrar sayısı, bekleme süresi, maksimum frekans ve örnekleme frekansı komutları yer almaktadır. Bu komutlar girildikten sonra sinyalleri almak için modele yumuşak bir çekiç yardımıyla vurulmasıyla eleman titreştirilmektedir. Daha önceden tasarlanan ölçüm düzeneği ve eleman üzerine yerleştirilen ivmeölçerler yardımıyla birlikte bu alınan sinyaller bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Daha sonra ise test edilen modelin frekans bileşenleri FFT dönüşümü ile birlikte deneysel sonuçları bulunmuştur (Şekil 2.23.).



Şekil 2.23. Deneysel Modal Analiz kısmı

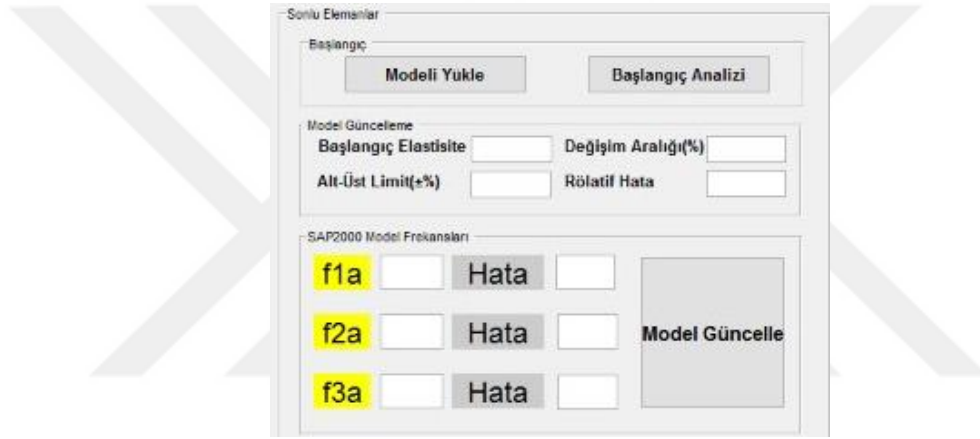
Yapılan işlemler sistematik olarak blok diyagram halinde aşağıdaki Şekil 2.24'te sunulmuştur.



Şekil 2.24. Deneysel ölçüm blok diyagramı

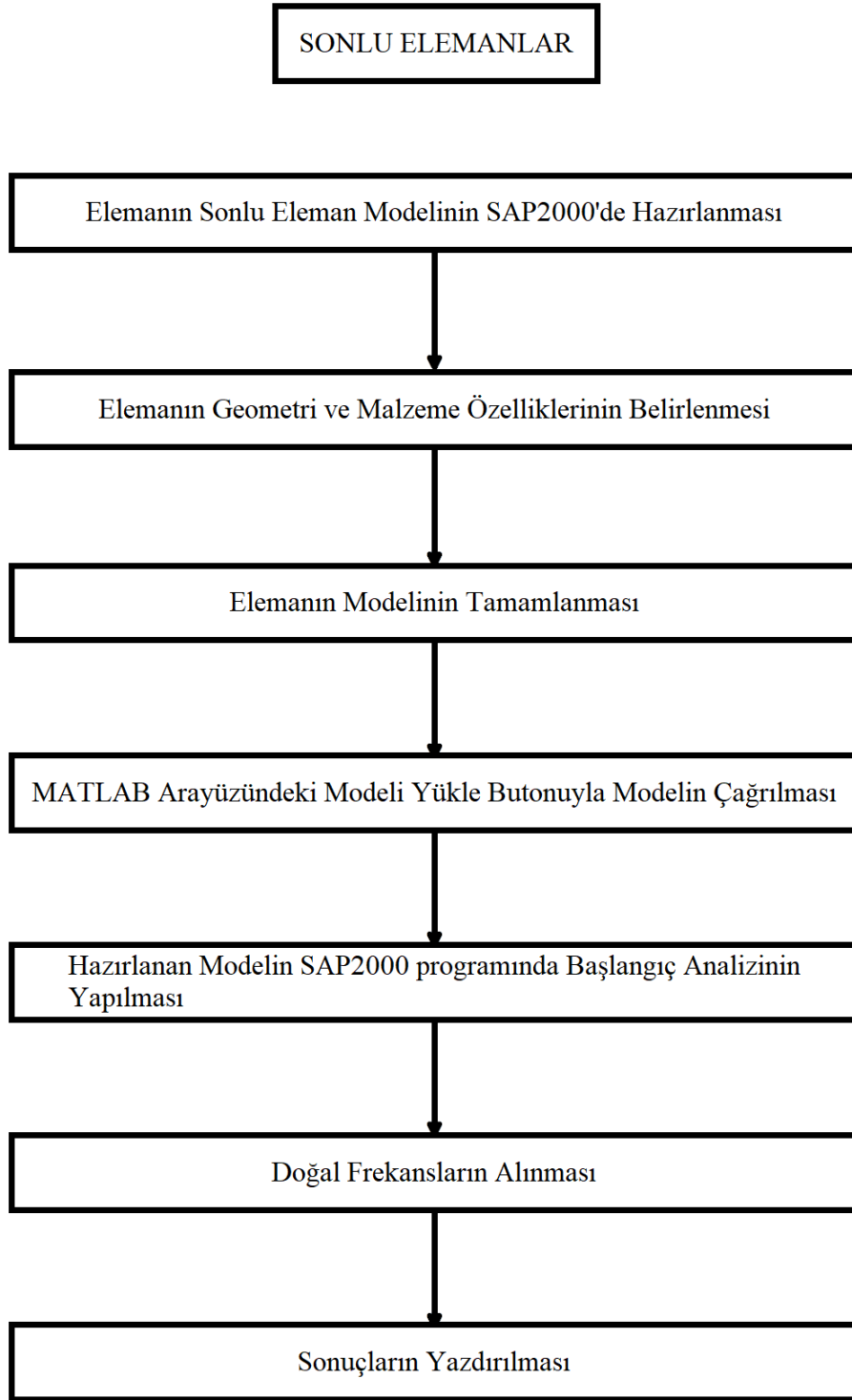
2.2.2.1.2. Sonlu Eleman Modelleme Kısmı (İkinci Bölüm)

İkinci bölüm olan Sonlu Eleman kısmında ölçülecek elemanın SAP2000 programında modeli daha önceden oluşturularak arayüzdeki komut vasıtasıyla çağırıldıktan sonra gerekli analizleri yapılmaktadır. Oluşturulan modelin frekans değerleri SAP2000 paket programı yardımıyla başlangıç analitik modal analizi yapılarak belirlenmektedir. Belirlenen bu frekans bileşenleri otomatik olarak Matlab ortamındaki arayüze aktarılarak incelenmektedir (Şekil 2.25). Bu tez çalışmasında analizi yapılan modelin sadece ilk üç frekansı dikkate alınarak değerlendirilmeye çalışılmıştır.



Şekil 2.25. Sonlu Eleman model aktarım ekranı

Yapılan işlemler sistematik olarak blok diyagram halinde aşağıdaki Şekil 2.26'da sunulmuştur.



Şekil 2.26. Sonlu elemanlar blok diyagramı

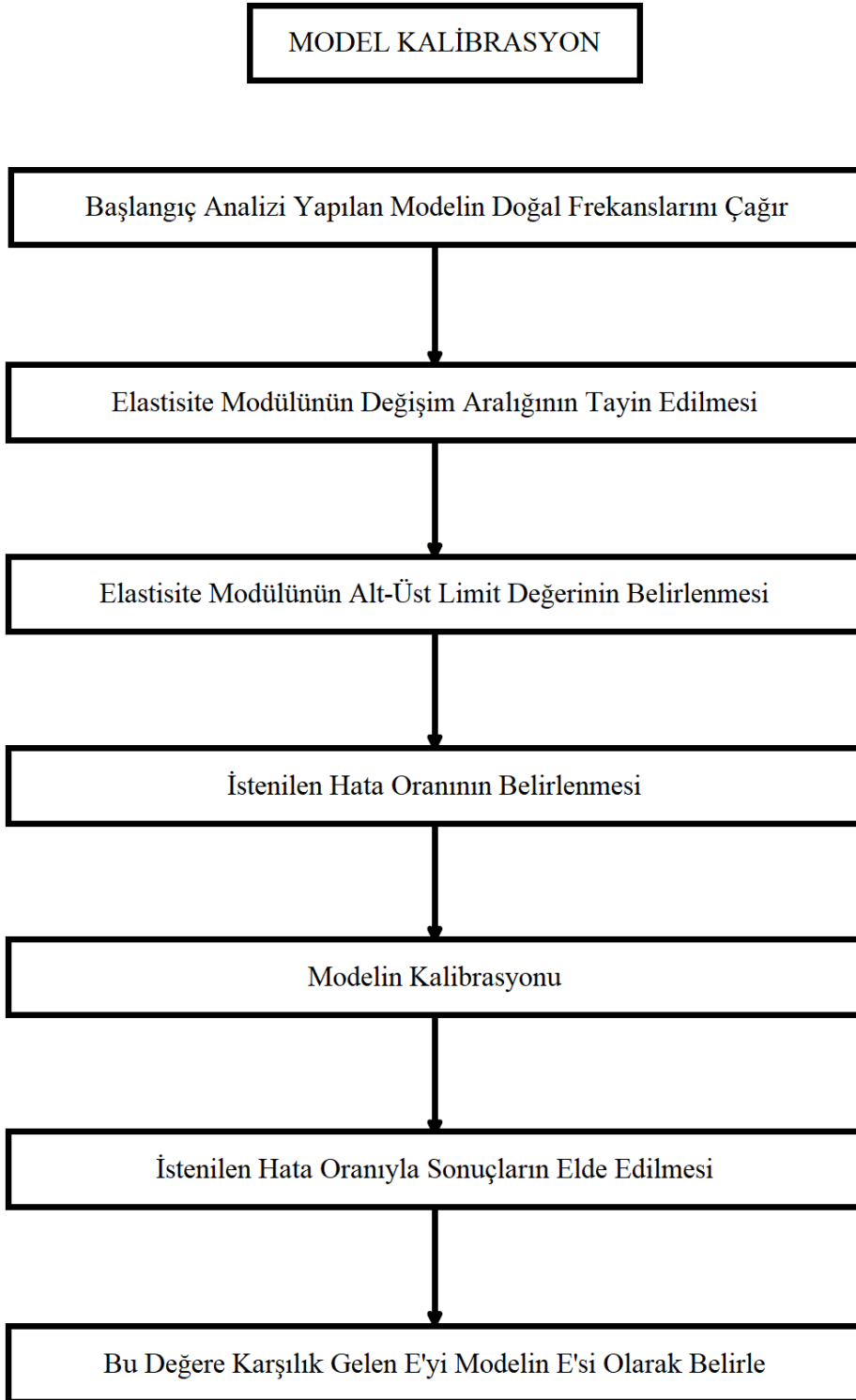
2.2.2.1.3. Model Kalibrasyon Kısmı (Üçüncü Bölüm)

Üçüncü bölüm olan Model Kalibrasyon kısmı, deneysel ve analitik olarak modelden elde edilen frekans değerleri arasındaki farkı azaltma işlemine dayanmaktadır. Seçilen değişim parametresi ile seçilen her bir elemanın malzeme özelliğinin gerçek değerine en yakın değerin bulunması amaçlanmaktadır. Bu işlemi yaparken analiz edildikten sonra bulunan analitik frekans bileşenlerinin ölçüm sonucu bulunan deneysel frekans bileşenlerine yakınlığı son derece önemli olduğundan kalibre işlemine dikkat edilmiştir. Model kalibre edilirken değişim parametresi olarak seçilen elastisite modülünün başlangıç değeri otomatik olarak SAP2000 programından Matlab ortamındaki arayüze aktarılmaktadır (Şekil 2.27). Daha sonra parametrenin değişim aralığı, alt-üst limit değerleri ve hata miktarının ne kadar olacağı programa girilerek kalibre etme işlemi yapılmaktadır. Deneysel ve analitik frekans değerleri arasındaki fark istenilen seviyeye geldiğinde ise kalibre etme işlemi durmakta ve seçilen malzemenin elastisite modülü sonuç kısmına otomatik olarak yazılmaktadır.

The image shows two side-by-side screenshots of a software interface for model calibration. The left screenshot shows the 'Model Güncelleme' (Model Update) window. It has a 'Başlangıç' (Start) section with buttons for 'Modeli Yükle' (Load Model) and 'Başlangıç Analizi' (Start Analysis). Below this, there are input fields for 'Başlangıç Elastisite' (2000000000), 'Değişim Aralığı (%)' (1), 'Alt-Üst Limit (±%)' (20), and 'Relatif Hata' (2). A section titled 'SAP2000 Model Frekansları' (SAP2000 Model Frequencies) lists three frequencies: f1a (6.07), f2a (37.9276), and f3a (105.9048), each with a 'Hata' (Error) field. A 'Model Güncelle' (Update Model) button is visible. The right screenshot shows the 'Sonuç' (Result) window. It displays the 'Seçilen Parametrenin Gerçek Değeri' (Selected Parameter's Real Value) as 18200000000. There is a 'Round?' checkbox and a 'Grafik Kaydet' (Save Graph) button.

Şekil 2.27. Model kalibrasyon kısmı

Yapılan işlemler sistematik olarak blok diyagram halinde aşağıdaki Şekil 2.28'de sunulmuştur.

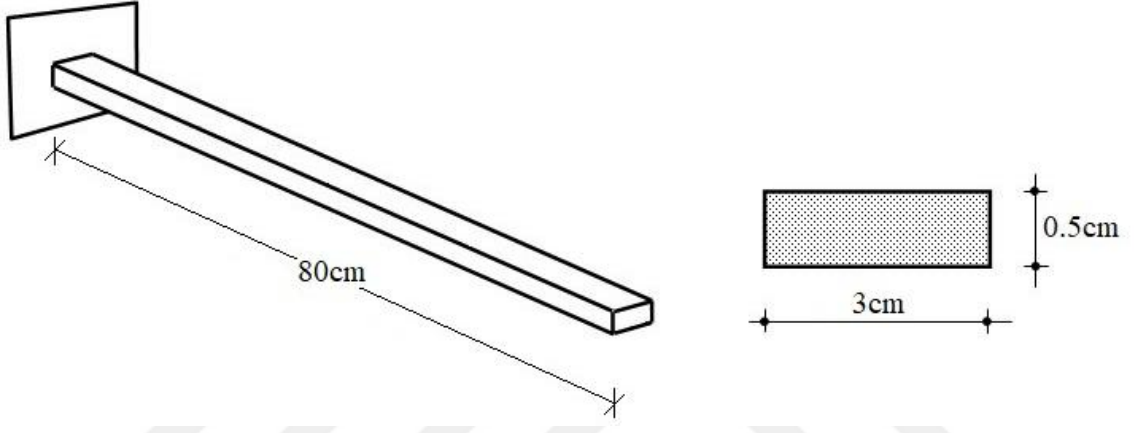


Şekil 2.28. Model kalibrasyon blok diyagramı

2.3. Çelik Model Uygulaması

2.3.1. Geometrik Özellikleri ve Sınır Şartları

Konsol kiriş olarak seçilen çelik model dikdörtgen dolu kesitli çelik profilden oluşmaktadır. 3.0cm*0.5cm kesitli konsol modelin toplam uzunluğu 80cm'dir. Şekil 2.29'da çelik konsol kiriş modeline ait geometrik özellikler üç boyutlu olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.29. Çelik konsol kiriş modele ait üç boyutlu görünüm ve boyutlar

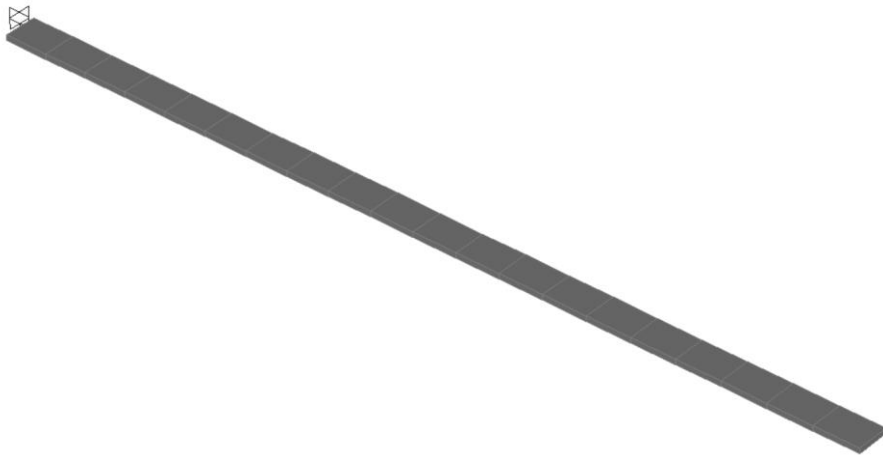
Çelik konsol kirişin bir ucu serbest, diğer ucu ise ankastre mesnetli olacak şekilde incelenmiştir. Mesnetlenme bağlantısı, çelik konsol çubuk bir ucunun sabit bir platforma iki adet mengene yardımıyla bağlanmasıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.30.).



Şekil 2.30. Ölçümü yapılan çelik konsol model ve mesnet bağlantısı

2.3.2. Başlangıç Sonlu Eleman Modeli

Çelik konsol kiriş modeli, SAP2000 (SAP2000, 2008) programından yararlanılarak Sonlu Eleman Yöntemiyle (SEY) analitik olarak modellenmiştir. Daha sonra modelin modal analizi yapılmıştır. Modelin bir ucundaki mesnet şartları tamamen tutulu (ankastre) olarak kabul edilmiş, diğer ucu serbest bırakılmıştır. Konsol kirişi temsil etmek amacıyla oluşturulan analitik model Şekil 2.31’de verilmektedir.



Şekil 2.31. Çelik konsol kirişin sonlu eleman modeli

Analitik modelin, konsol kirişin gerçek davranışını temsil edebilmesi için model farklı sayıda elemanlara bölünmüştür. Meşh yakınsaması dikkate alınarak analitik model 20 eşit parçaya bölünmüş ve bu durumda elde edilen sonuçların yeterli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çelik konsol kirişe ait analitik modelin oluşturulmasında kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.1’de sunulmuştur.

Tablo 2.1. Çelik modele ait malzeme özellikleri ve değerleri

Malzeme Özelliği	Değeri
Elastisite Modülü (N/m ²)	2.0*10 ¹¹
Birim Kütle (kg/m ³)	7697.286
Kesit Alanı (m ²)	1.5*10 ⁻⁴
Kesit Atalet Momenti (m ⁴)	0.3125*10 ⁻⁹
Poisson Oranı	0.25

Başlangıç analitik model üzerinde gerçekleştirilen modal analizden elde edilen ilk üç doğal frekans değeri Tablo 2.2’de sunulmaktadır.

Tablo 2.2. Çelik konsol kirişe ait başlangıç analitik modelden elde edilen doğal frekanslar

Mod Numarası	Frekans (Hz)
1	6.36
2	39.75
3	111.00

2.3.3. Arayüz Programı Yardımıyla Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Oluşturulan arayüz programı yardımıyla malzeme özelliklerini belirleyebilmek amacıyla öncelikle titreşim testler yapılarak doğal frekanslar belirlenmiştir. Daha sonrasında da SAP2000 programında teste tabi tutulmuştur.

2.3.3.1. Çevresel Titreşim Testi

Çevreden gelen titreşim ve rastgele oluşturulan titreşimler altında çelik konsol modelin Çevresel Titreşim Testi ile ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çelik konsol kiriş eleman üzerinde

gerçekleştirilen deneysel ölçümde toplam iki adet üç eksenli ivmeölçerler kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. İvmeölçerler düşey doğrultudaki tepkileri ölçecek şekilde model üzerine yerleştirilmiştir. Bu yerleştirme işlemi belirli aralıklarla yapılmıştır. Şekil 2.32’de çelik konsol kiriş model için oluşturulan ölçüm düzeneği gösterilmektedir.

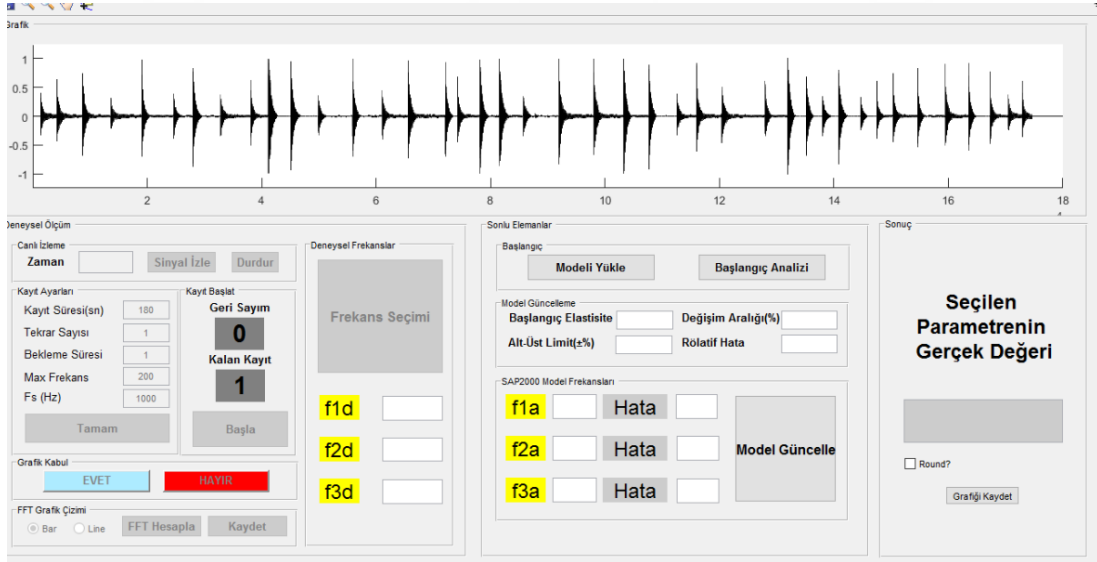


Şekil 2.32. Çelik konsol kiriş model için oluşturulan ölçüm düzeneği

Oluşturulan ölçüm sistemi bir saniyede 192000 veri alma özelliğine sahiptir. Çelik konsol model üzerinde gerçekleştirilen ölçümde örnekleme frekans aralığı 0-1000Hz olarak seçilmiştir. Saniyede 192000 Hertze kadar da örnek alınabilmektedir. Kayıt süresi 180 saniye bir ölçüm olarak seçilmiştir. İşlemden alınacak farklı kayıtların sayısı 1, modelin titreştikten sonra sönümlenmesi için de bekleme süresi 1sn olacak şekilde yapılmıştır. Deneysel ölçüm sırasında ivmeölçerlerden gelen sinyaller veri toplama kartında toplandıktan sonra arayüz programında eşzamanlı olarak Fourier dönüşümleri ile birlikte bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Daha sonra FFT dönüşümü yapılmıştır. Alınan sinyal örneği Şekil 2.33’te verilmektedir.

Bu işlemler yapılırken filtreleme işlemi de veri toplama ünitesi yardımıyla sinyaller alındıktan sonra gerçekleştirilebilmektedir. Çelik konsol kiriş üzerinde gerçekleştirilen

ölçümlerde doğal frekanslar elde edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla Matlab programında yazılan program ve arayüz kullanılmıştır. Elde edilen sinyaller işlendikten sonra hazırlanan Matlab ortamına aktarılmıştır. Aktarılan bu sinyaller hazırlanan GUI (Graphical User Interface) üzerinde bulunan FFT hesapla ile grafiğe dönüştürülmeye çalışılmıştır. Dönüştürme işlemi tamamlandıktan sonra frekanslar grafik olarak elde edilmiştir. Daha sonra grafik üzerinde bulunan bu frekanslar Piklerin Seçilmesi Yöntemi kullanılarak rakamsal olarak elde edilmiştir. Bu yöntem kullanılarak çelik konsol giriş elemanın deneysel ölçüm frekansları elde edilmiştir. Çevresel titreşim verileri kullanılarak elde edilen bu frekanslar program üzerinde bulunan hücrelere aktarılması sağlanmıştır.



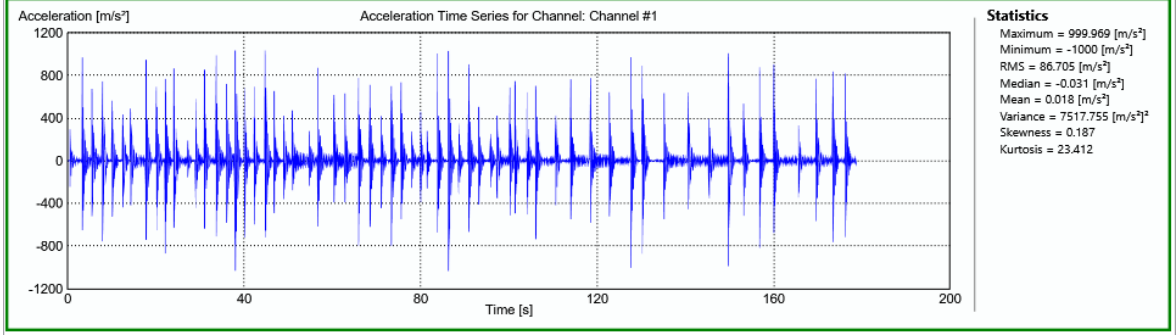
Şekil 2.33. Çelik modelden alınan sinyal örneği

Çelik konsol modelde gerçekleştirilen ölçümden elde edilen sinyallerin işlenmesi sonucunda alınan ilk üç frekans değerleri Tablo 2.3'te verilmektedir.

Tablo 2.3. Çelik konsol girişine ait deneysel ölçümlerden elde edilen doğal frekanslar

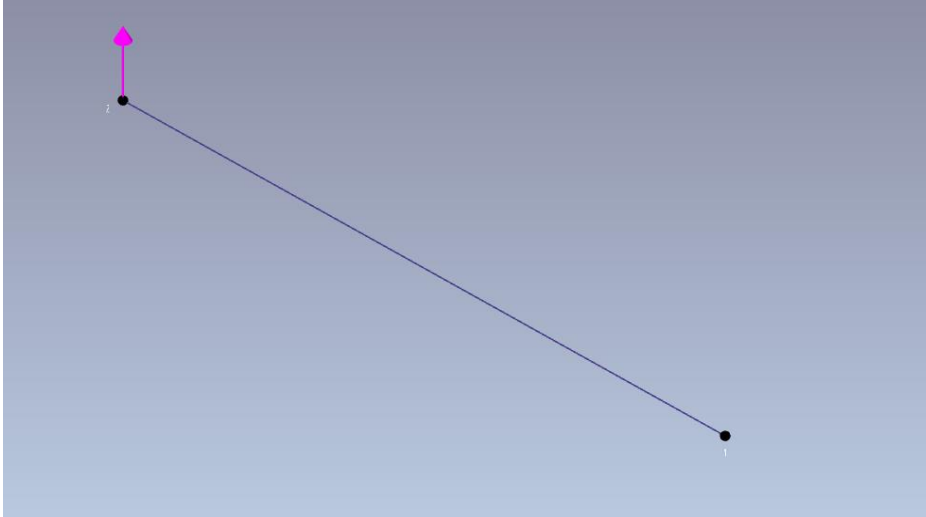
Mod Numarası	Frekans (Hz)
1	6.02
2	37.40
3	107.99

Ayrıca, elde edilen sinyaller Operasyonel Modal Analiz (OMA, 2006) programında analiz edilerek doğal frekanslar ve sönüm oranları bulunmaya çalışılmıştır. Elde edilen frekansların birbirleriyle uyumlu olduğu ortaya çıkmıştır. Alınan sinyal örneğinin Operasyonel Modal Analiz (OMA, 2006) programına aktarılmış hali Şekil 2.34'te sunulmuştur.



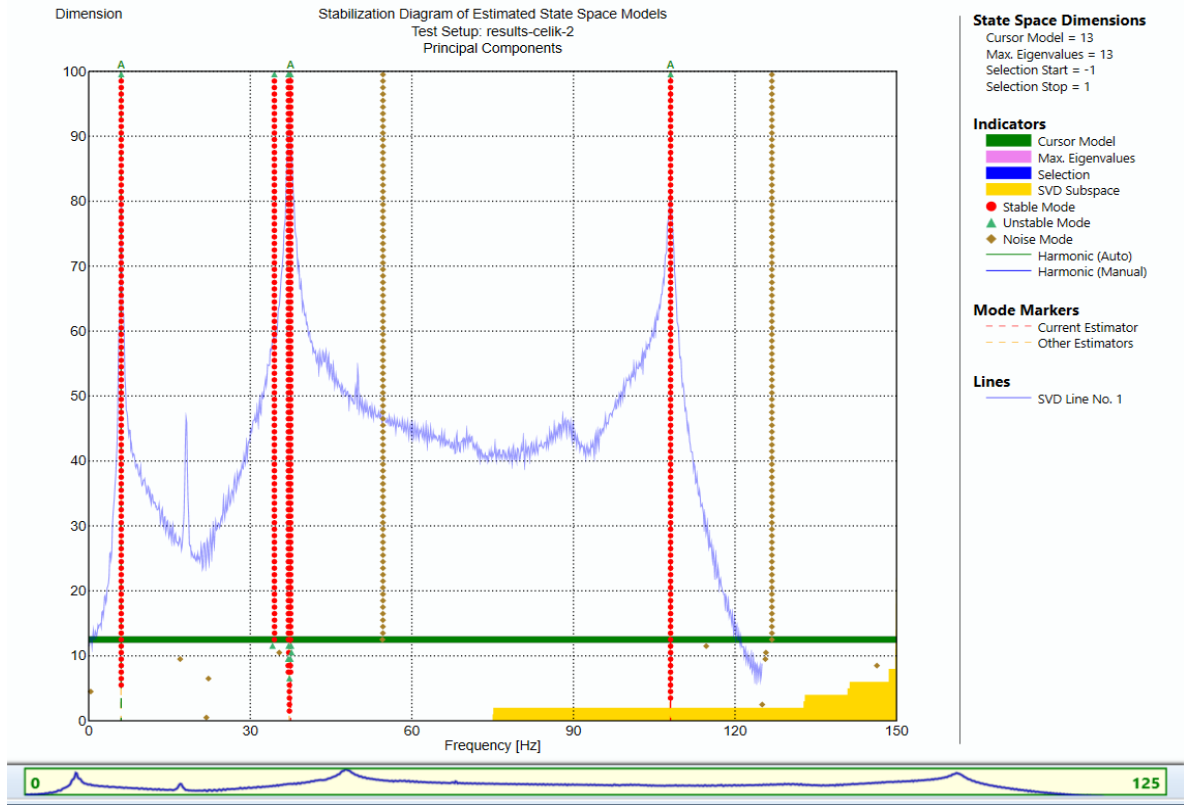
Şekil 2.34. Operasyonel Modal Analiz (OMA, 2006) programına aktarılan sinyal örneği

Bu programda ölçüm için hazırlanan temsili model ve ivmeölçer yerleşimi Şekil 2.34'te verilmektedir.



Şekil 2.35. İvmeölçerlerin yerleştirilme yönü

Çelik model için elde edilen sinyallerin SSI-PC komutu yardımıyla işlenmesiyle elde edilen frekans değerlerini gösteren şema Şekil 2.36'da verilmektedir.



Şekil 2.36. OMA yazılımı ile elde edilen kararlılık diyagramı

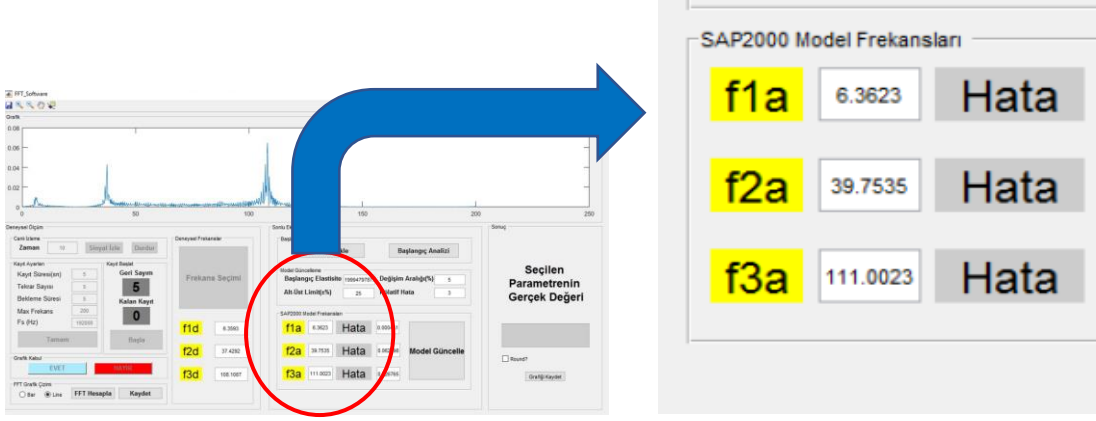
Programdan elde edilen frekans ve sönüm değerleri Tablo 2.4'te sunulmuştur.

Tablo 2.4. Çelik konsol modelin OMA programında elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

Mod Numarası	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı [%]
1	6.02	1.20
2	37.49	1.06
3	108.03	0.45

2.3.3.2. Sonlu Eleman Model Aktarımı

Matlab programında oluşturulan arayüz (GUI) de “sonlu eleman” bölümü olarak daha önce hazırlanan kısma çelik konsol giriş modelin analitik frekans değerleri yazdırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla programda bulunan ‘Modeli Yükle’ butonuna basılarak Matlab ortamına SAP2000 programında daha önceden hazırlanan model çağırılmıştır. Model çağırıldıktan sonra ‘Başlangıç Analiz’ butonuna basılarak modelin başlangıç doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Bu değerler otomatik olarak ilgili kısma yazdırılmıştır (Şekil 2.37.).



Şekil 2.37. Sonlu Eleman Yöntemi sonucu elde edilen başlangıç frekans değerleri

2.3.3.3. Model Kalibrasyonu

Çelik konsol kiriş modele ait başlangıç analitik modelin oluşturulması sırasında malzeme özelliklerinde ve sınır şartlarında kabuller yapılmıştır. Malzeme özelliklerindeki kabul elastisite değeri verilen standartlardadır. Sınır şartlarında ise yapılan kabul çelik konsol kirişin bir ucunun mesnet birleşimi ankastre olarak tanımlanması olarak söylenebilir.

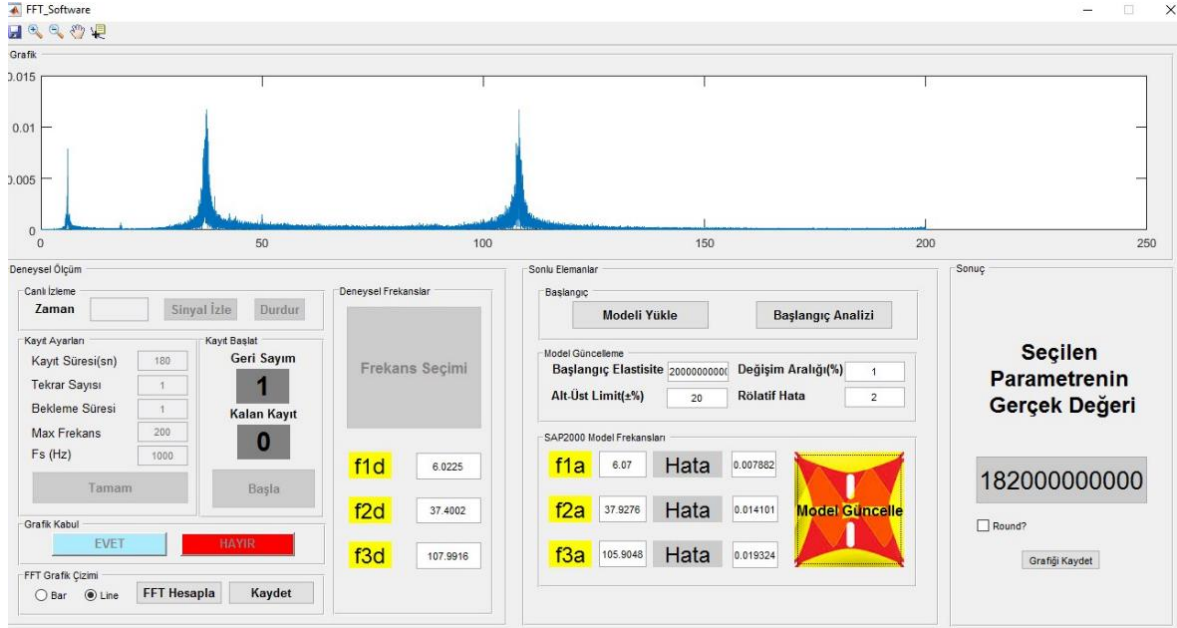
Elde edilen deneysel ve analitik çalışma sonuçlarına bakıldığında elde edilen frekans değerleri arasında farklılık olduğu görülmüştür (Tablo 2.5.). Bu amaçla bu farklılıkların en aza indirgenmesi gerekmektedir. Değişim parametresi olarak elastisite modülünün seçilerek deneysel ve analitik frekans değerleri yakınsanmaya çalışılmıştır. Yapılan birçok çalışmada başlangıç modelin kalibre edilmesinde elastisite değerindeki değişimin dikkate alınmasının etkin olduğu görülmektedir. Bu nedenle frekanslar arasındaki oluşabilecek farklılıkların malzeme özelliklerinde bir değişim olduğunu göstermektedir.

Tablo 2.5. Konsol kiriş modelin deneysel ve başlangıç analitik frekansları

Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)		Fark* (%)
	Deneysel	Analitik	
1	6.02	6.36	5.65
2	37.40	39.75	6.28
3	107.99	111.00	2.79

*Fark değeri mutlak değerce hesaplanmıştır.

Bu nedenle, çelik konsol kirişin başlangıç modelinin kalibre edilmesinde elastisite modülünün değeri değişken olarak dikkate alınmıştır. Bu amaçla başlangıç analitik modeldeki elastisite değerinde değişim aralığı %1, elastisite modülünün alt-üst limiti %20 ve frekanslar arasındaki hata miktarı %2 olarak varsayılarak işlemler gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.38.).



Şekil 2.38. Çelik modelin başlangıç modelinin kalibre edilmesine ait ekran görüntüsü

Yapılan iterasyonlar neticesinde izin verilen yakınsama kriteri sağlanmış ve elde edilen elastisite değeri için doğal frekanslar elde edilmiştir. Başlangıç modelin elastisite değerindeki değişim dikkate alınarak gerçekleştirilen kalibrasyon neticesinde elde edilen değerler Tablo 2.6'da verilmektedir.

Tablo 2.6. Konsol kiriş modelin deneysel ve kalibre edilmiş başlangıç analitik frekansları

Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)		Fark* (%)
	Deneysel	Analitik	
1	6.02	6.07	0.83
2	37.40	37.93	1.42
3	107.99	105.90	1.94

*Fark değeri mutlak değerce hesaplanmıştır.

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

Çalışmanın bu bölümünde laboratuvar ortamında oluşturulan model üzerinde Deneysel Modal Analiz ölçümünden ve aynı model üzerinde SAP2000 programı vasıtasıyla Sonlu Elemanlar Yöntemi'yle yapılan modal analizden elde edilen doğal frekanslar değerlerine yer verilmiştir. Daha sonra elde edilen bu değerler karşılaştırılmış ve oluşan farklılıklar belirlenmiştir. Bu farklılıkları gidermek için sonlu eleman modelinde kalibrasyon işlemiyle doğal frekanslardaki fark en aza indirgenmiştir. Çelik konsol modelin elastisite modülünü belirlemek için istenilen değişim miktarındaki ulaşılması beklenen seviyeye geldiğinde elastisite modülü seçilmiştir. Bu şekilde seçilen modelin istenilen malzeme özellikleri belirlenmiştir.

3.1. Çelik Model İçin Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Çelik kirişe ait deneysel ve teorik modal analiz sonuçları elde edilmiştir. Çelik kirişe ait modelde sırasıyla sinyal işleme, deneysel analiz, sistem modelinin oluşturulması, sonlu eleman model analizi ve sonlu eleman model kalibrasyon adımları gerçekleştirilerek gerekli sonuçlar irdelenmiştir. Ayrıca deneysel ölçüm sonuçları Operasyonel Modal Analiz programından elde edilen sonuçlarda kontrol edilmiştir.

Deneysel ölçümler amacıyla özgün bir ölçüm sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan veri toplama kartı ile alınan çevresel titreşimler elektriksel sinyallere dönüştürülerek bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bilgisayar ortamındaki sinyallerin FFT dönüşümü yapılarak baskın frekans değerleri bulunmuştur. Ölçüm sonucunda elde edilen dinamik karakteristik değerleri olan doğal frekans değerleri sırasıyla 6.02, 37.40 ve 107.99Hz olarak elde edilmiştir. Ayrıca sinyal işleme programında elde edilen doğal frekanslar da sırasıyla 6.02, 37.49 ve 108.03Hz olarak bulunmuştur. Sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

SAP2000 paket programı kullanılarak yapılan analiz sonucunda bulunan teorik dinamik karakteristik değerleri elde edilmiştir. Çelik konsol kirişe ait Sonlu Eleman Yöntemi'nden başlangıç analizinden elde edilen doğal frekanslar değerleri sırasıyla 6.36, 39.75 ve 111.00Hz olarak elde edilmiştir.

Çelik konsol kiriş için deneysel ölçüm sonuçları oluşturulan ölçüm düzeneği vasıtası ile elde edilmiştir. Teorik ölçüm sonuçları ise Sonlu Eleman Yöntemi ile alınmıştır. Çelik kirişe ait deneysel ve teorik modal analiz sonuçları bulunduktan sonra elde edilen değerler arasında karşılaştırma yapılmıştır. Bulunan bu değerler arasında farklılıkların olduğu tespit edilmiştir (Tablo 3.1.).

Tablo 3.1. Çelik konsol kiriş model için deneysel ve başlangıç analitik frekansları

Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)		Fark* (%)
	Deneysel	Analitik	
1	6.02	6.36	5.65
2	37.40	39.75	6.28
3	107.99	111.00	2.79

Deneysel ve teorik olarak elde edilen doğal frekans farklılıklarını gidermek için model kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Değişim olarak mesnet şartlarının ve diğer geometrik özellikleri dikkate alınabilmektedir. Fakat bu çalışmada, elastisite modülü değişim parametresi olarak elastisite modülünün seçilerek bu frekans değerleri arasındaki farkın azaltılması amaçlanmıştır. Bu amaç için belirli bir amaç fonksiyonu belirlenmiş ve bu bilgiler ışığı altında istenilen sonuçlara ulaşılmıştır. Daha sonra önceden oluşturulan bu model kalibre edilerek çelik konsol kirişin elastisite modülünün gerçeğe en yakın değeri belirlenmiştir (Tablo 3.2.).

Tablo 3.2. Konsol kiriş modelin deneysel ve kalibre edilmiş analitik frekansları

Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)		Fark* (%)
	Deneysel	Analitik	
1	6.02	6.07	0.83
2	37.40	37.93	1.42
3	107.99	105.90	1.94

*Fark değeri mutlak değerce hesaplanmıştır.

Çelik modelin başlangıç analitik modelin kalibre edilmesi sonucunda frekanslar arasındaki ortalama fark %4.91'den %1.4'e kadar düşürülebilmektedir.

3.1.1. Çelik Modelin Elastisite Modülünün Belirlenmesi

Çelik konsol kiriş için yapılan ölçümler sonucunda deneysel ve teorik frekans değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler model kalibrasyonu kısmından sonra birbirine yakınsanmaya çalışılmıştır. Bu yakınsama işlemi malzemenin elastisite modülündeki değişimlerden faydalanarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler sonucunda malzemenin gerçeğe en yakın olan elastisite modülü değeri elde edilmiştir (Tablo 3.3.).

Tablo 3.3. Çelik model için elde edilen elastisite modülü

Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)		Fark* (%)	Belirlenen Elastisite Modülü (N/m ²)
	Deneysel	Analitik		
1	6.02	6.07	0.83	1.82*10 ¹¹
2	37.40	37.93	1.42	
3	107.99	105.90	1.94	

*Fark değeri mutlak değerce hesaplanmıştır.

Çelik modelin elastisite değeri $2.0 \cdot 10^{11} \text{N/m}^2$ değerinden $1.82 \cdot 10^{11} \text{N/m}^2$ değerine indirilmiştir. Alınan sonuçlar değerlendirildiğinde frekans arasındaki uyum, elastisite modülündeki %9 değiştirilmesi sonucunda elde edilmiştir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde inşa edilecek yapılarda değişik türde yapı malzemeleri kullanılmaktadır. Bu yapı malzemeleri, kullanım amacına göre değişiklik göstermektedir. Kullanılan malzemelerin özellikleri de farklı olmakla birlikte yapısal olarak da değişkenlik göstermektedir. Ülkemizde son yıllarda inşaat mühendisliği alanında inşa edilen yapılarda malzeme özelliklerini belirlemek için farklı farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları yapıya hasar verirken bazıları ise yapıya herhangi bir hasar vermemektedir. Gelişen teknolojiyle birlikte testler yapıya ya da elemana hasar vermeden yapılabilecek hale gelmiş olup bu yöntemler daha çok tercih edilmektedir.

Bu tez çalışmasında, Çevresel Titreşim Testi ve Sonlu Eleman Yöntemi kullanılarak seçilen bir yapı elemanının deneysel ve analitik dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Uygulama amacıyla çelik konsol kiriş model seçilmiştir. Seçilen bu elemanın deneysel ölçümleri Çevresel Titreşim Testi yardımıyla yapılmıştır. Bunu gerçekleştirmek amacıyla deneysel ölçüm için ihtiyaç duyulan bir ölçüm sistemi tasarlanmış ve imal edilmiştir. Ölçüm sistemi donanım ve yazılım olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Ölçüm sistemindeki donanım kısmı sensör, titreştirici ve veri toplama ünitesinden oluşmaktadır. Yazılım kısmı ise ölçülen sinyallerden yapısal parametreleri belirlemek amacıyla Matlab ortamında hazırlanan program ve arayüzden oluşmaktadır. Donanım ve yazılımlar oluşturulduktan sonra model üzerine ölçüm sistemi kurulmuş ve gerekli ölçümler yapılarak doğal titreşim frekansları belirlenmiştir. Daha sonra seçilen elemanın SAP2000 programı kullanılarak sonlu eleman modeli hazırlanmıştır. Oluşturulan analitik model üzerinde modal analizler yapılarak doğal titreşim frekansları hesaplanmıştır. Elde edilen deneysel ve analitik doğal frekanslar kıyaslanarak farklılıklar ortaya konulmuştur. Farklılıkları azaltmak amacıyla değişim parametresi olarak elastisite modülü seçilerek, sonlu eleman model kalibrasyonu yöntemiyle elastisite modülünün gerçek değeri belirlenmiştir. Sonlu eleman model kalibrasyonu işlemi, Matlab programında geliştirilen yazılım aracılığıyla SAP2000 programının API özelliğini kullanarak elastisite modülü değiştirilerek programın tekrarlı koşturulmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle ölçümler için özgün bir ölçüm sistemi geliştirilmiştir.

- Sonlu elemanın model kalibrasyonu için, “Çevresel Titreşim Testi, Sonlu Eleman Analiz ve Model Kalibrasyon”undan oluşan bir arayüz programı geliştirilmiştir.
- Çelik modelin Deneysel Modal Analizi sonucu elde edilen doğal frekansları incelendiğinde, birinci frekansın 6.02Hz, ikinci frekansın 37.40Hz ve üçüncü frekansın 107.99Hz olduğu belirlenmiştir.
- Çelik modelin Sonlu Eleman Analizi sonucu elde edilen doğal frekansları incelendiğinde, birinci frekansın 6.36Hz, ikinci frekansın 39.75Hz ve üçüncü frekansın 111.00Hz olduğu analiz sonucu belirlenmiştir.
- Çelik model için elde edilen deneysel ve analitik çalışma sonuçlarına bakıldığında frekans değerleri arasında farklılık olduğu belirlenmiştir. Frekanslar arasındaki ortalama fark %4.91’dir. Çelik modelin frekans değerleri arasındaki farklılıklar kalibre işlemi uygulanması suretiyle en aza indirilmeye çalışılmıştır. Kalibre işleminden sonra frekans değerleri arasındaki ortalama fark %1.4’e kadar indirilmiştir. Kalibre edilen çelik elemanın doğal frekanslar değerlerine bakıldığında, birinci frekansın 6.07Hz, ikinci frekansın 37.93Hz ve üçüncü frekansın 105.90Hz olduğu görülmüştür. Çelik modelin elastisite modülü başlangıçta $2.0 \cdot 10^{11} \text{N/m}^2$ iken model kalibrasyon işlemi sonucunda $1.82 \cdot 10^{11} \text{N/m}^2$ olarak belirlenmiştir.

Tüm bu veriler ışığında, yapısal elemanlardan alınan sinyallerin titreşim analizleri sonuçlarına bağlı olarak sonlu eleman model kalibrasyon yönteminin yapısal elemanların malzeme özelliklerini tanımlamada güçlü bir araç olduğu söylenebilir. Önerilen yöntemin en önemli özelliklerinden biri, yapıların hasar görmeden test edilebilmesidir. Ayrıca oluşturulan ölçüm sistemini öne çıkaran özellik açık ve geliştirilebilir bir nitelikte olmasıdır. Yazılımı ve arayüzü geliştirilebilir olduğundan istenilen kodlar ve komutlar eklenilip çıkartılmaya olanak sağlamaktadır. Alınan ham sinyaller istenilen şekilde kaydedilip farklı programlarda kullanılabilir. Dolayısıyla programın doğruluğu da test edilebilmektedir. Ölçüm sisteminin donanım kısmında oluşturulan veri toplama ünitesi, gelişime açık olup istenilen sayıya kadar sensör eklenebilir. Geliştirilen veri toplama kartı, bilgisayarın mikrofon girişine direkt olarak aux girişiyle bağlandığı için bilgisayarın ses kartı özelliğinden faydalanmakta ve ilave bir donanıma ihtiyaç duyulmamaktadır. Açık ve geliştirilebilir bir sistem olması gelecekteki çalışmalar için de faydalı olacaktır.

Çalışmayla ilgili gelecek çalışmalara ışık tutabilecek bazı öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Geliştirilen programa elastisite modülünün yanı sıra sınır şartları gibi bazı değişim parametreleri ilave edilerek kalibrasyon işleminin genişletilmesi faydalı olacaktır.
- Yapılan tez çalışması baz alınarak, yapısal elemanların malzeme özelliklerinin yapıya herhangi bir hasar vermeden yerinde alınacak ölçümlerle belirlenmesine yönelik sistemler geliştirilebilecektir.



5. KAYNAKLAR

- Adnan, N., A., 2017. Assessment the Strength of Column and Beam at Religious Building Structure by Using Non-Destructive Test. In MATEC Web of Conferences, Nisan, Malaysia, 103: 02028.
- Ahn, E., Kim, H., Sim, S., H., Shin, S., W. ve Shin, M., 2017. Principles and Applications of Ultrasonic-Based Nondestructive Methods for Self-Healing in Cementitious Materials. *Materials*, 10, 3, 278.
- Albayrak, S., Çavdar, A. ve Bingöl, Ş., Beton Basınç Dayanımının Yapay Sinir Ağları ile Tahmini. <http://e-arsiv.gumushane.edu.tr/xmlui/handle/123456789/245>, Erişim Tarihi: 02.01.2015.
- Allemang, R., J. ve Brown, D., L., 1982. A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis, 1st, IMAC, Orlando, Florida, USA.
- Allemang, R., J., 1994. Vibrations: Analytical and Experimental Modal Analysis, UCSDRL-CN, 20, 263, 662.
- Allemang, R., J., 1999. Vibrations: Experimental Modal Analysis, UC-SDRL-CN, 20, 263, 663-664.
- Arslan, M., E. ve Durmuş, A., 2014. Modal Testing and Finite Element Model Calibration of In-Filled Reinforce Concrete Frames. *Journal of Vibration and Control*, 20, 13, 1946-1959.
- Ashory, M., R., 1999. High Quality Modal Testing Methods, Doktora Tezi, Imperial Colledge of Science, Technology and Medicine, University of London, London, England.
- Baptista, M., A., Mendes, P., Afilhado, A., Agostinho, L., Lagomarsino, S. ve Mendes, L., 2004. Ambient Vibration Testing at N. Sra. Do Carmo Church in Lagos, International Seminar Structural Analysis of Historical Constructions, Padova.
- Baştürk, M., H., 2013. Bursa Tarihi Yığıma Minarelerinin Dinamik Davranışlarının Modal Analiz Yöntemi ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye.
- Bayraktar, A. ve Türker, T., 2005-a. Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile Düzlem Çerçevelerin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Deprem Sempozyumu Kocaeli, Türkiye, Bildiriler Kitabı: 1035-1041.
- Bayraktar, A. ve Türker, T., 2005-b. Finite Element Modelling and Experimental Modal Testing of Steel Structures, The 1st International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC2005), Copenhagen, Denmark, Bildiriler Kitabı: 374-380.

- Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Türker, T. ve Sevim, B., 2007a. Elektrik İletim Kablolarının Çelik Direklerin Dinamik Karakteristiklerine Etkisinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile Belirlenmesi, 2. Çelik Yapılar Ulusal Sempozyumu, Mayıs, Eskişehir, Bildiriler Kitabı: 58-65.
- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A., C. ve Sevim, B., 2007b. Düzlem Kafes Taşıyıcı Sistemlerin Operasyonel Modal Analizi, 2. Çelik Yapılar Ulusal Sempozyumu, Mayıs, Eskişehir, Bildiriler Kitabı: 273-281.
- Bayraktar A., Türker T., Sevim B. ve Altunışık A., C., 2007c. Evaluation of Blasting Effects on Masonry Buildings by Operational Modal Analysis, International Colloquium on Seismic Design and Retrofit of Masonry Structures, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Sevim, B., Türker, T., Ateş, Ş. ve Adanur, S., 2007d. Determination of Earthquake Behaviour of Highway Bridges by Operational Modal Analysis, International Earthquake Symposium, Kocaeli, Türkiye.
- Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Türker, T. ve Sevim, B., 2007e. Tarihi Köprülerin Deprem Davranışına Sonlu Eleman Model İyileştirmesinin Etkisi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, Ekim, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 29-39.
- Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Türker, T., Sevim, B. ve Ateş, Ş., 2007f. Karayolu Köprülerinin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, 1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu, Kasım, Antalya, Bildiriler Kitabı: 355-364.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A., C. ve Türker, T., 2008a. Analytical and Operational Modal Analyses of Turkish Style RC Minarets for Structural Identification, Experimental Techniques, 33, 2, 65 – 75
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A., C., Türker, T. ve Adanur, S., 2008b. Determination of Blast Vibration Effects on the Dynamic Behaviour of the Highway Bridges using Modal Testing, Eighth International Congress on Advances in Civil Engineering, Eastern Mediterranean University, Famagusta, KKTC (ACE08-158), 3, 557-565.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A., C., Türker, T., Adanur, A. ve Akköse, M., 2008c. Finite Element Model Updating of Fluid-Structure Interaction Systems using Operational Modal Analysis, 5th International Engineering and Construction Conference (IECC'5), Irvine, ABD.
- Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Birinci, F., Sevim, B. ve Türker, T., 2009. Finite-Element Analysis and Vibration Testing of a Two-Span Masonry Arch Bridge. Journal of Performance of Constructed facilities, 24, 1, 46-52.
- Bayraktar, A., Türker, T., Sevim, B., Altunışık, A., C., ve Yıldırım, F., 2009. Modal Parameter Identification of Hagia Sophia Bell-Tower Via Ambient Vibration Test. Journal of Nondestructive Evaluation, 28, 1, 37-47.

- Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Sevim, B., Türker, T. ve Birinci, F., 2010a. Tarihi Yapıların Deprem Güvenliklerinin Tahribatsız Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, İstanbul Bülten, 107, 12-22.
- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A., C., Sevim, B., Şahin, A. ve Özcan, D., M., 2010b. Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi. Teknik Dergi, 21, 104.
- Bayraktar, A., Türker, T. ve Altunışık, A., C., 2015a. Yapı Sağlığı İzleme Sistemlerinin Farklı Taşıyıcı Sistemli Uzun Açıklıklı Tarihi Köprülere Uygulanması, 3.Köprüler Viyadükler Sempozyumu, Mayıs, Bursa, Bildiriler Kitabı: 291-301.
- Bayraktar, A., Türker, T. ve Altunışık, A., C., 2015b. Experimental Frequencies and Damping Ratios for Historical Masonry Arch Bridges, Construction and Building Materials, 75, 234–241.
- Bendat, J., S. ve Piersol, A., G., 1971. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Bendat, J., S. ve Piersol, A., G., 1980. Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Birinci, F., 2010. Taş Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Blakely, K., D. ve Walton, W., B., 1984. Selection of Measurement and Parameter Uncertainties for Finite Element Model Revision, Proc. 3rd. IMAC, Orlando, Florida.
- Boru, E., O. ve Kutanis, M., 2015. Çevrel Titreşim Kayıtları Kullanılarak Yapı Dinamik Parametrelerinin Belirlenmesi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 19, 1, 59-66.
- Brebels, A. ve Bollen, B., 2014. Non-Destructive Evaluation of Material Properties as Function of Temperature by the Impulse Excitation Technique. National Seminar and Exhibition on Non-Destructive Evaluation.
- Brencich, A. ve Sabia, D., 2008. Experimental Identification of a Multi-Span Masonry Bridge: The Tanaro Bridge, Construction and Building Materials, 22, 2087–2099.
- Brincker, R., Ventura, C., E. ve Andersen, P., 2003. Why Output-Only Modal Testing is A Desirable Tool for A Wide Range of Practical Applications, Proceeding of the 21st International Modal Analysis Conference (IMAC XXI), Kissimmee, Florida.
- Brownjohn, J., M. ve Xia, P., Q., 2000. Dynamic Assessment of Curved Cable-Stayed Bridge by Model Updating. Journal of Structural Engineering, 126, 2, 252-260.

- Brownjohn, J., M., W., 1997. Vibration Characteristics of a Suspension Footbridge, Journal of Sound and Vibration, 202, 1, 29-46.
- Brownjohn, J., M., W., Magalhaes, F., Caetano, E. ve Cunha, A., 2010. Ambient Vibration Re-Testing and Operational Modal Analysis of the Humber Bridge, Engineering Structures, 32, 2003-2018.
- Brughmans, M., Lembregts, F. ve Furini, F., 1995. Modal Test on the Pininfarina Concept Car Body "ETHOS 1", MSC 1995 World User's Conference Proc, 5.
- Cardoso, M., Sampaio, R., A., C., Souza, R., M. ve Silva, E., 2015. Operational Modal Analysis of Road-Rail Bridge, MATEC Web of Conference, 24.
- Ceballos, M., A., Car, E., J., Prato, C., A. ve Alvarez, L., M., 1998. Experimental and Numerical Determination of the Dynamic Properties of the Reactor Building of Atucha II NPP, Nuclear Engineering and Design, 182, 93-106.
- Chang, C., C. ve Chang, T., Y., P. ve Zhang, Q, W, 2001. Ambient Vibration of Long-Span Cable-Stayed Bridge, Journal of Bridge Engineering, 6, 1, 46-53.
- Chellini, G., Roeck, G., D., Nardini, L. ve Salvatore, W., 2010. Damage Analysis of A Steel-Concrete Composite Frame by Finite Element Model Updating, Journal of Constructional Steel Research, 66, 398-411.
- Chen, X., Omenzetter, P. ve Beskhyroun, S., 2014. Calibration of the Finite Element Model of a Twelve-Span Prestressed Concrete Bridge Using Ambient Vibration Data, 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, July, La Cité, Nantes, France.
- Chopra, A., K., 1995. Dynamics of Structures, Prentice Hall International, Toronto.
- Chopra, A., K., 2006. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Third Edition, Prentice Hall, USA, 4th Edition, 995p.
- Christaras, B., Auger, F. ve Mosse, E., 1994. Determination of the Moduli of Elasticity of Rocks. Comparison of the Ultrasonic Velocity and Mechanical Resonance Frequency Methods with Direct Static Methods. Materials and Structures, 27, 4, 222-228.
- Craig, R., R., 1981. Structural Dynamics: An Introduction to Computer Methods, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Çankaya, G., Arslan, H., M. ve Ceylan, M., 2013. Görüntü İşleme ve Yapay Sinir Ağları Yöntemleri ile Betonun Basınç Dayanımının Belirlenmesi, Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi 1, 1. ISSN: 2147-9364 (Elektronik).
- Çolakoğlu, A. ve Köksal, Ö., 2000. Savunma Sistemlerinde Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Doğal Frekans Analizi, Aselsan Dergileri, 55.

- Dally, J., W., Riley, W., F. ve McConnell, K., G., 1984. Instrumentation for Engineering Measurements, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Dede, T., 2017. Jaya Algorithm for the Optimization of 2d Truss Structures Using SAP2000 and Matlab, 2nd International Conference on Advanced Engineering Technologies, Eylül, Bayburt, Türkiye, 953-959.
- Dos Santos, J., P., L., Amaral, P., M., Diogo, A., C. ve Rosa, L., G., 2013. Comparison of Young's Moduli of Engineered Stones Using Different Test Methods. In Key Engineering Materials , 548, 220-230). Trans Tech Publications.
- Drelich, R., Gorzelańczyk, T., Pakuła, M. ve Schabowicz, K., 2015. Automated Control of Cellulose Fibre Cement Boards with A Non-Contact Ultrasound Scanner. Automation in Construction, 57, 55-63.
- El Aal, A., A. ve Nabawy, B., S., 2017. Implications of Increasing the Ferruginous Cement on the Physical and Mechanical Properties of the Cambro-Ordovician Wajid Sandstone in Southwest Saudi Arabia: Applications for Construction Purposes. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1-20.
- El Mir, A. ve Nehme, S., G., 2017. Repeatability of the Rebound Surface Hardness of Concrete with Alteration of Concrete Parameters. Construction and Building Materials, 131, 317-326.
- Ercan, E. ve Nuhoglu, A., 2015. Üç Açıklıklı Tarihi Yiğma Köprünün Yapısal Davranışının Belirlenmesi, 3.Köprüler Viyadükler Sempozyumu, Mayıs, Bursa, Bildiriler Kitabı: 92-105.
- Ewins, D., J., 1995. Modal Testing: Theory and Practice, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Eyer, L. and Bartholdi, P., 1999. Variable Stars: Which Nyquist Frequency, Astronomy And Astrophysics Supplement Series, 135, 1, 1-3.
- Farrar, C., R. ve Doebling, S., W., 1997. Lessons Learned from Applications of Vibration-Based Damage Identification Methods to Large Bridge Structures, Proc. of the International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA, Bildiriler Kitabı: 351-370.
- Fattahi, H., 2017. Applying Soft Computing Methods to Predict the Uniaxial Compressive Strength of Rocks from Schmidt Hammer Rebound Values. Computational Geosciences, 1-17.
- Fessler, J., 2004. FFT Algorithms (Student Version).
- Fotia, D., Diaferio, M., Giannoccaro, N. ve Mongelli, M., 2012. Ambient Vibration Testing, Dynamic Identification and Model Updating of a Historic Tower, NDT&E International, 47, 88-95.

- Friswell, M., J. ve Mottershead J., E., 1995. Finite Element Model Updating In Structural Dynamics, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, 286 s.
- Gibson, R., F., 2000. Modal Vibration Response Measurements for Characterization of Composite Materials and Structures. Composites science and technology, 60, 15, 2769-2780.
- Göge, D., Sinagius, M., Füllekrug, U. ve Link, M., 2005. Detection and Description of Non-Linear Phenomena in Experimental Modal Analysis via Linearity Plots, International Journal of Non-Linear Mechanics, 40, 27-48.
- Guan, H., 2006. Vibration-Based Structural Health Monitoring of Highway Bridges, Doktora Tezi, University of California, San Diego, USA.
- Gupta, P., K., Khaudhair, Z., A. ve Ahuja, A., K., 2016. A New Method for Proportioning Recycled Concrete. Structural Concrete, 17, 4, 677-687.
- Gürbüz, G., 2006. Sayısal Titreşim Modellerinin Deneysel Verilerle Güncellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Hermans, L. ve Auweraer, H., V., D., 1999. Modal Testing and Analysis of Structures under Operational Conditions: Industrial Applications, Mechanical Systems and Signal Processing, 13, 2, 193-216.
- Heylen, W., Lammens, S. ve Sas, P., 2007. Modal Analysis Theory and Testing, Leuven Katholieke Universtiy, Department of Mechanical Engineering, Leuven, Belgium.
- 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, Bildiriler Kitabı: 3129-3141.
- Jaishi, B. ve Ren, W., X., 2005. Structural Finite Element Model Updating Using Ambient Vibration Test Results, Journal of Structural Engineering, ASCE, 131, 617-628.
- Jolliffe, I., T., 1986. Principal Component Analysis, Springer-Verlag New York, Inc.
- Jung, J., Kozeschnik, E., Han, S., H., ve De Cooman, B., C., 2012. Analysis of the Mechanical Properties of N-Added CMn Structural Steel by the Impulse Internal Friction Technique. Metallurgical and Materials Transactions A, 43, 12, 4587-4600.
- Kammer, D., C., 2005. Sensor Set Expansion for Modal Vibration Testing, Mechanical Systems and Signal Processing, 19, 4, 700-713.
- Karahasan, O., Ş., 2017. Betonarme Binaların Dinamik Davranışına Lifli Polimer Kompozit Malzeme Etkisinin Deneysel ve Analitik Yöntemlerle Belirlenmesi, Yüksek

Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.

- Karakan, E., 2008. Estimation of Frequency Response Function for Experimental Modal Analysis, Yüksek Lisans Tezi, İzmir Institute of Technology, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Karakul, H., 2017. Investigation of Saturation Effect on the Relationship Between Compressive Strength and Schmidt Hammer Rebound. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1-10.
- Karaton, M., Aksoy, H., S., Sayın, E. ve Calayır, Y., 2017. Nonlinear Seismic Performance of A 12th Century Historical Masonry Bridge Under Different Earthquake Levels. Engineering Failure Analysis, 79, 408-421.
- Kaya, H., 2004. Experimental Modal Analysis Of A Steel Grid Frame, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Kömür, M., A. ve Deneme, İ., Ö., 2015. Simetrik ve Simetrik Olmayan Üç Boyutlu Çelik Yapıların Operasyonel Modal Analizi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5, 1, 64-72.
- Kömür, M., A., İbrahim, Ö., D. ve Yerli, H., R., 2015. Düzlem Çelik Çerçeve Sistemlerin Operasyonel Modal Analizi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30, 2, 73-79.
- Kudu, F.N., Uçak, Ş., Osmancıklı, G., Türker, T. ve Bayraktar, A., 2015. Estimation of Damping Ratios of Steel Structures by Operational Modal Analysis Method, Journal of Constructional Steel Research, 112, 61-68.
- Lai, G., T., Mazlan, N., A., Nadzir, M., S., M. ve Rafek, A., G., 2017. Uniaxial Compressive Strength of Antarctic Peninsula Rocks: Schmidt Hammer Rebound Test. Sains Malaysiana, 46, 5, 677-684.
- Lawson, C., L. ve Hanson, R., J., 1974. Solving Least Squares Problems, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Liu, Y. and Duan, Z., 2012. Fuzzy Finite Element Model Updating of Bridges by Considering the Uncertainty of the Measured Modal Parameters. Science China Technological Sciences, 1-9.
- Ljung, L., 1987. System Identification: Theory for the User, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Lord, J., F., Ventura, C., E., Dascotte, E., Brincker, R. ve Anderson, P., 2003. FEM Updating Using Ambient Vibration Data From a 48 Storey Building in Vancouver British Columbia Canada, The 32nd International Congress And Exposition On Noise Control Engineering, Jeju International Convention Center, Segowipo, Korea.

- Maeck, J. ve Roeck, G., D., 2000. Experimental and Numerical Modal Analysis of a Concrete High Speed Train Railway Bridge, Proceedings of International Symposium on Modern Concrete Composites and Infrastructure (MCCI2000), Beijing, China, Bildiriler Kitabı: 61-68.
- Mantena, P., R., 1996. Frequency Domain Vibration Analysis for Characterizing the Dynamic Mechanical Properties of Materials. Paper presented at 1996 Annual Conference, Washington, District of Columbia. <https://peer.asee.org/6064>.
- Matlab, 1999. Mathworks Inc, MATLAB User Guide, Natick, MA.
- McDonald, S., 2016. Operational Modal Analysis, Model Updating, and Seismic Analysis of A Cable-Stayed Bridge, Doctoral dissertation, University of British Columbia.
- Mottershead, J., E. and Friswell, M., I., 1993. Model Updating in Structural Dynamics: A Survey. Journal of Sound and Vibration, 167, 347-375.
- OMA, 2006. Operational Modal Analysis, Release 4.0. Structural Vibration Solution A/S, Denmark.
- Osmancikli, G., Bayraktar, A., Türker, T., Uçak, Ş., ve Mosallam, A., 2015. Finite element Model Calibration of Precast Structures Using Ambient Vibrations. Construction and Building Materials, 93, 10-21.
- Otnes, R., K. ve Enochson, L., 1972. Digital Time Series Analysis, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Overschee, P., V. ve Moor, B., D., 1996. Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation and Applications, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Pavic, A. ve Reynolds, P., 2002. Modal Testing of a 34 m Catenary Footbridge, 20th International Modal Analysis Conference (IMAC XX), Los Angeles, California, USA.
- Pavic, A., Pimentel, R, L. ve Waldron, P., 1998. Instrumented Sledge Hammer Impact Excitation: Worked Examples, 16th International Modal Analysis Conference (IMAC XVI), Sandra Barbara, CA, USA, Bildiriler Kitabı: 929-935.
- Peeters, B. ve Roeck, G., D., 2000. Reference Based Stochastic Subspace Identification in Civil Engineering, Inverse Problems in Civil Engineering, 8, 47-74.
- Peeters, B., 2000. System Identification and Damage Detection in Civil Engineering, Doktora Tezi, K.U, Leuven, Belgium.
- Petyt, M., 1990. Introduction to Finite Element Vibration Analysis, Cambridge University Pres, Cambridge.

- Proteus, Beechcroft House 21 Hardy Grange Grassington North Yorkshire BD23 5AJ, <https://www.labcenter.com/contact>, 20.04.2017.
- Ramos, J., L., F., S., 2007. Damage Identification on Masonry Structures Based On Vibration Signatures, Doktora Tezi, University of Minho, Portugal.
- Ren, W. -X., Zhao, T. ve Harik, I. E., 2004a. Experimental and Analytical Modal Analysis of Steel Arch Bridge, Journal of Structural Engineering, 130, 7, 1022-1031.
- Ren, W. -X., Harik, I., E., Blandford, G., E., Lenett, M. ve Baseheart, T., M., 2004b. Roebling Suspension Bridge. II: Ambient Testing and Live-Load Response, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 9, 2, 119-126.
- Ren, W. -X., Zatar, W. ve Harik, I., E., 2004c. Ambient Vibration-Based Seismic Evaluation of a Continuous Girder Bridge, Engineering Structures, 26, 5, 631-640.
- Reynolds, P., Pavic, A. ve Prichard, S., 2002. Dynamic Analysis and Testing of a High Performance Floor Structure, International Conference on Structural Dynamic Modelling-Test, Analysis, Correlation and Validation, Maderia Island, Portugal, Bildiriler Kitabı: 339-346.
- Reynolds, P., A. ve Ibrahim, Z., 2004. A Remote Monitoring System for Stadia Dynamics, Proceedings of the ICE: Structural and Buildings, Bildiriler Kitabı: 385-393.
- Ruotolo, R., Sorohan, S. ve Surace, C., 2000. Analysis of the Behavior of a Three-Dimensional Truss Structure, European COST F3 Conference on System Identification and Structural Health Monitoring, Madrid, İspanya, 169-178.
- Sanayei, M. ve Rohela, P., 2014. Automated Finite Element Model Updating of Full-Scale Structures with Parameter Identification System (PARIS), Advances in Engineering Software, 67, 99-110.
- Sanayei, M., Khaloo, A., Gül, M. ve Çatbaş, N., 2015. Automated Finite Element Model Updating of a Scale Bridge Model using Measured Static and Modal Test Data, Engineering Structures, 102, 66-79.
- SAP2000, 2008. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures Inc, Berkeley, California, USA.
- Schwarz, B., J. ve Richardson, M., H., 1999. Experimental Modal Analysis, Vibrant Technology, Inc., Jamestown, California.
- Strang, G., 1988. Linear Algebra and Its Applications, Third Edition, Harcourt Brace Jovanovich Publishers, San Diego.
- Şahin, A., 2009. Yapıların Deneysel ve Operasyonel Modal Analizleri İçin Sayısal Sinyal İşleme, Dinamik Karakteristik Belirleme ve Sonlu Eleman Model İyileştirme Yazılımları, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.

- Şanlıtürk, K., Y. ve Çakar, O., 2004. Noise Elimination from Measured Frequency Response Functions, Mechanical Systems and Signal Processing, 19, 615-631.
- Taleghani, B., K. ve Pappa, R., S., 1996. Finite-Element Vibration Analysis and Modal Testing of Graphite Epoxy Tubes and Correlation between the Data, National Aeronautics and Space Administration Langley Research Center, Hampton, Virginia.
- Tarinejad, R., Ahmadi, M., T. ve Harichandran, R., S., 2014. Full Scale Experimental Modal Analysis of an Arch Dam: The First Experience in Iran, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 61, 188-196.
- Teughels, A. ve Roeck, G., D., 2003. Damage Assessment of the Z24 Bridge by FE Model Updating, Key Engineering Materials, 245-246, 19-26.
- Topçu, B., İ., Uygunoğlu, T. ve İnce, H., H., 2010. Hafif Beton Basınç Dayanımının Yapay Sinir Ağlarıyla Tahmini, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6, 1, 19-29s., e-ISSN:1305-631X.
- Torres, W., Almazan, J.L., Sandoval, C. ve Boroschek, R., 2017. Operational Modal Analysis and FE Model Updating of the Metropolitan Cathedral of Santiago, Chile, Engineering Structures, 143, 169-188.
- Tse, F., S., Morse, I., E. ve Hinkle, R., T., 1978. Mechanical Vibrations: Theory and Applications, Second Edition, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Türker, T., 2005. Çelik Çerçeve Sistemlerin Dinamik Karakteristiklerinin Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- Türker, T., 2011. Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Hasar Durumlarının Tespiti ve Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- Türker, T., Bayraktar, A., Kocaman, İ. ve Çoruhlu, B., 2015. Ölçekli Yığma Taş Kemer Köprü Modelinin Dinamik Davranışının Deneysel ve Analitik Olarak İncelenmesi, 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, Ekim, Erzurum, Bildiriler Kitabı: 113-126.
- Uçak, Ş., 2012. Tarihi Yığma Kubbelerin Dinamik Davranışlarının Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
- URL-1, <https://www.gamry.com/assets/Application-Notes/Faraday-Cage.pdf>. 30.11.2017
- Vanhonacker, P., 1980. The Use of Modal Parameters of Mechanical Structures In Sensitivity Analysis, System Synthesis And System Identification Methods, Ph.D. Dissertation, 80D04, Mechanical Engineering Department, K.U. Leuven.

- Wang, X., Ross, R., J., Hunt, M., O., Erickson, J., R. ve Forsman, J., W., 2005. Low Frequency Vibration Approach for Assessing Performance of Wood Floor System, Wood and Fiber Science, 37, 3, 371-378.
- Wojcicki, Z., Kostecki, S. ve Grosel, J., 2016. Operational Modal Analysis of Weir on Odra River in Poland, Procedia Engineering, 153, 874-881.
- Wu, J., J., 2004. Finite Element Modelling and Experimental Modal Testing of a Three Dimensional Framework, International Journal of Mechanical Sciences, 46, 1245-1266.
- Yao, S., Wright, J., R., Pavic, A. ve Reynolds, P., 2002. Forces Generated When Bouncing or Jumping on a Flexible Structure, International Conference on Noise and Vibration (ISMA2002), Leuven, Belgium, Bildiriler Kitabı: 563-572.
- Yanik, Y., Türker, T., Yildirim, Ö. and Dede, T., 2017a. Material Properties Identification of Structural Elements by Model Updating Method, Eurasian Journal of Engineering Sciences and Technology, 1, 45-53.
- Yanik, Y., Türker, T., Yildirim, Ö. and Dede, T., 2017b. Material Properties Identification of Structural Elements by Model Updating Method, International Conference on Civil and Environmental Engineering, Mayıs, Nevşehir, Türkiye, Bildiriler Kitabı: 2-10.
- Yu, D., J. ve Ren, W., X., 2005. EMD-Based Stochastic Subspace Identification of Structures from Operational Vibration Measurements, Engineering Structures, 27, 1741-1751.
- Zhang, L., Brincker, R. ve Andersen, P., 2002. An Overview of Operational Modal Analysis: Major Development and Issues, B&K Technical Paper, 152-161.
- Zienkiewicz, O., C., 2000. The Finite Element Method, McGraw Hill Book Company.
- Zoidis, N., V., Tatsis, E., N., Manikas, E., D. ve Matikas, T., E., 2016. In-Situ Testing Using Combined NDT Methods for the Technical Evaluation of Existing Bridge. Proceedings of the 6th International Conference on Emerging Technologies in Nondestructive Testing. Pages 299-305.

ÖZGEÇMİŞ

Yusuf YANIK 1991 yılında Trabzon ilinin Vakfıkebir ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kemaliye İlköğretim Okulu ve Vakfıkebir Anadolu Lisesi'nde 2009 yılında tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde "Lisans" eğitimi almaya hak kazandı. Lisans eğitimini 07/06/2014 tarihinde tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda "Yüksek Lisans" eğitimine başladı ve 2017 yılında Araştırma Görevlisi olarak atandı. Yusuf YANIK, iyi derecede İngilizce bilmekte ve halen anılan görevine devam etmektedir.

- **Yanik Y.**, Türker T., Yildirim Ö., Dede T., 2017. Material Properties Identification of Structural Elements by Model Updating Method, Eurasian Journal of Engineering Sciences and Technology, vol.1, pp.45-53.
- **Yanik Y.**, Türker T., Çoruhlu B., 2017. Tarihi Taş Kemer Köprülerde Hasar Nedenleri ve Onarım Teknikleri, 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu, Trabzon, Türkiye, 2-4 Kasım 2017, pp.391-400.
- Çoruhlu B., Türker T., **Yanik Y.**, Bayraktar A., 2017. Tarihi Taş Kemer Köprülerin Modal Davranışlarının Köprü Boyutlarına Bağlı Olarak Tahmin Edilmesi, 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu, Trabzon, Türkiye, 2-4 Kasım 2017, pp.381-390.
- **Yanik Y.**, Türker T., Yildirim Ö., Dede T., 2017. Material Properties Identification of Structural Elements by Model Updating Method, International Conference on Civil and Environmental Engineering, Nevşehir, Türkiye, 8-10 Mayıs 2017, pp.2-10.