

**BETONARME YAPILARIN ÇEVRESEL TİTREŞİM VERİLERİ
KULLANILARAK DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Musa YETKİN
131115103

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Programı: Mekanik

Danışman: Prof. Dr. Yusuf CALAYIR

OCAK-2016

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONARME YAPILARIN ÇEVRESEL TİTREŞİM VERİLERİ KULLANILARAK
DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

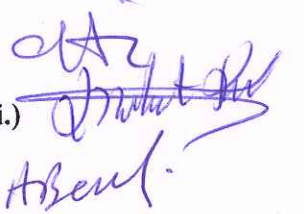
Musa YETKİN

131115103

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Aralık 2015

Tezin Savunulduğu Tarih : 8 Ocak 2016

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Yusuf CALAYIR (Fırat Üni.)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Muhammet KARATON (Fırat Üni.)
Yrd. Doç. Dr. Ahmet BENLİ (Bingöl Üni.)



OCAK – 2016

ÖNSÖZ

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

“Betonarme Yapıların Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Dinamik Davranışının İncelenmesi” isimli tez çalışmasına başlamamda ve çalışmamın tüm aşamalarında benimle yakından ilgilenen, değerli bilgileri ile beni yönlendiren, benden her türlü desteği ve yardımı esirgemeyen, kendisiyle çalışmaktan onur duyduğum ve her konuda kendisini örnek alacağım kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Yusuf CALAYIR'a minnet ve şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

Çalışmam sırasında önemli tenkit ve yardımlarını esirgemeyen, değerli görüş ve bilgilerini benimle paylaşan değerli Hocalarım Doç. Dr. Orhan ÇAKAR, Doç. Dr. Muhammet KARATON, Yrd. Doç. Dr. Erkut SAYIN ve Arş. Gör. Dr. Hümeysra Şahin'e teşekkür ederim. Ayrıca öğrenim hayatı boyunca bana emeği geçen tüm hocalarımı saygıyla anar, kendilerine minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Tez çalışmamın her aşamasında yanımda olup desteğini bir an olsun esirgemeyen abim ve dostum Hakan ERKEK'e, ölçümler esnasında desteği olan arkadaş ve kardeşim Burak YILDIZ ve Dursun BAKIR'a teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca bana her türlü desteği veren babam Cihan YETKİN başta olmak üzere tüm aileme müteşekkir olduğumu belirtmek isterim. Bu çalışmanın, yeni çalışmalara ışık tutmasını ve cennet vatanı Ülkemize faydalı olmasını dilerim.

Musa YETKİN
ELAZIĞ - 2016

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	VII
SEMBOLLER LİSTESİ	VIII
KISALTMALAR LİSTESİ	X
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Konunun Önemi	1
1.2. Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	3
1.3. Mevcut Çalışmanın Kapsamı.....	8
2.TEORİK MODAL ANALİZ YÖNTEMİ.....	10
2.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler	10
2.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler	12
3. DENEYSEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİ	15
3.1. Geleneksel Modal Analiz Yöntemi	15
3.2. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi	16
3.2.1. Operasyonel Modal Analiz Yönteminin Uygulama Alanları	17
3.2.2. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile Ölçüm ve Frekans Tepki Fonksiyonu	17
3.2.3. Operasyonel Modal Analiz Yönteminde Yapılan Hatalar	19
3.2.4. Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilme Yöntemleri	22
3.2.5. Ölçüm Araçları	23
3.2.5.1. Titreştiriciler	23
3.2.5.1.1. Sarsıcılar	23
3.2.5.1.2. Darbe Çekiçleri	24
3.2.5.2. İvmeölçerler	25
3.2.5.3. Veri Toplama Sistemi	27
3.2.6. Modal Parametrelerin Kontrolü	28
3.2.6.1. Modal Güvence Kriteri (MGK)	29

4. SONLU ELEMAN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ.....	31
5. SAYISAL UYGULAMA.....	33
5.1. Modelin Özellikleri	33
5.2. Yapının Analitik Olarak Dinamik Karakteristiklerinin Bulunması.....	34
5.2.1. Başlangıç Analitik Modelin Oluşturulması	35
5.2.1.1. Bölme Duvarların Yapı Davranışına Etkisi.....	36
5.2.2. Başlangıç Analitik Modelin Modal Analiz Sonuçlarının Alınması.....	38
5.3. Yapının Deneysel Olarak Dinamik Karakteristiklerinin Bulunması	39
5.3.1. Deneysel Ölçüm Düzeneginin Oluşturulması	39
5.3.2. Deneysel Ölçümün Gerçekleştirilmesi	41
5.3.2. Deneysel Ölçüm Sonuçlarının Alınması	43
5.4. Analitik Modelin Güncellenmesi	44
5.5. Güncellenmiş Analitik Modelin Dinamik Karakteristiklerinin Bulunması.....	45
5.6. Güncellenmiş Analitik Model ile Deneysel Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	46
6. SONUÇLAR.....	48
KAYNAKLAR.....	49
ÖZGEÇMİŞ	56

ÖZET

Binalar, köprüler ve barajlar gibi birçok mühendislik yapıları işlevleri gereği bulundukları bölgedeki toplumların sosyal ve iktisadi hayatlarında büyük bir öneme sahiptirler. Bu yapıların uzun süreli hizmet verebilmeleri, bunların dinamik davranışlarının iyi bilinmesine, gerektiğinde onarım ve güçlendirilmelerinin yapılmasına bağlıdır. Yapıların dinamik karakteristikleri ya da modal parametreleri (doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları), dinamik davranışlarını belirlemede/tahmin etmede önemli araçlardır. Günümüzde teorik ve deneysel yöntemler kullanılarak yapıların dinamik karakteristikleri belirlenebilmektedir.

Bu çalışmada; Elazığ ili Doğukent mahallesinde betonarme olarak inşa edilen Karabulut Sitesi A bloğunun çevresel titreşim verileri kullanılarak dinamik karakteristikleri (doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları) belirlenmiş ve yapının sonlu eleman modeli güncelleştirmesi yapılmıştır. Önce proje verileri kullanılarak başlangıç analitik modeli oluşturulmuş ve buna bağlı olarak yapının dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Daha sonra Operasyonel Modal Analiz yöntemi ile yapının gerçek dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel yöntem çözümleri karşılaştırılarak, yapının sonlu eleman modeli güncelleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme Yapı, Dinamik Karakteristikler, Çevresel Titreşim Verileri ve Sonlu Eleman Modeli Güncellenmesi

SUMMARY

Investigation of Dynamic Behaviors of Reinforced Concrete Structures by Using Environmental Vibration Data

Many engineering structures such as buildings, bridges and dams have a great importance for social and economical lives of the societies living nearby due to their functionalities. The long-term usage of these structures depends on knowing dynamic behaviours of these structures sufficiently well, and their repair & retrofit when needed. Dynamic characteristics or modal parameters of structures (natural frequencies, mode shapes and damping ratios) are important means to determine/estimate their dynamic behaviors. Currently, theoretical and experimental methods are used to determine such dynamic characteristics of structures.

In this study, the dynamic characteristics of Karabulut Apartments A Block, built as reinforced concrete in the Doğukent neighborhood in Elazığ, are determined by use of environmental vibration data. Then, finite element model of this building is updated. Initial analytical model of the building is first created by using project data and dynamic characteristics of the building are determined based on it. Next, real dynamic characteristics of the building are experimentally obtained by using Operational Modal Analysis Method. The analytical model of the building is updated by comparing the results of numerical and experimental methods.

Key Words: Reinforced Concrete Structure, Dynamic Characteristics, Environmental Vibration Data and Updated Finite Element Model.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1. Geleneksel Modal Analiz Yöntemi	16
Şekil 3.2. Operasyonel Modal Analiz yöntemi	16
Şekil 3.3. Tipik bir Operasyonel Modal Analiz Yöntemi düzeneği	16
Şekil 3.4. Çeşitli tiplerdeki sarsıcılar	24
Şekil 3.5. Basit bir darbe çekici.....	24
Şekil 3.6. Farklı modellerdeki darbe çekiçleri	25
Şekil 3.7. Piezoelektrik tipi ivmeölçerin iç mekanizması	26
Şekil 3.8. KB12VD tipi tek eksenli ivmeölçer	26
Şekil 3.9. OROS-OR36 Çok Kanallı Gürültü ve Titreşim Analizörü	28
Şekil 5.1. Karabulut Sitesi A Blok	34
Şekil 5.2. Karabulut Sitesi A Blok Normal kat mimari planı	34
Şekil 5.3. Kolon ve kiriş çubuk elemanları	35
Şekil 5.4. Perde ve döşeme kabuk elemanları	35
Şekil 5.5. Başlangıç analitik modeldeki beton sınıfı	36
Şekil 5.6. Duvarı temsil eden eşdeğer diyagonal basınç çubuğu örneği	37
Şekil 5.7. Yapının sonlu eleman modeli	38
Şekil 5.8. Başlangıç analitik modeli kullanılarak elde edilen ilk dört mod şekli	39
Şekil 5.9. Sistemin geometrisi ve ivmeölçer yönleri	40
Şekil 5.10. Levha yardımıyla yapıya tutturulan KB12VD tipi ivmeölçerler	41
Şekil 5.11. Parametreler Paneli	41
Şekil 5.12. Ölçüm düzeneği	42
Şekil 5.13. Çıkış sinyal genliği.....	42
Şekil 5.14. Çıkış sinyallerine ait spektral yoğunluk matrisi.....	43
Şekil 5.15. Modal Gösterge Fonksiyonundan seçilen frekanslar	43
Şekil 5.16. Seçilen frekanslara ait mod şekilleri	44
Şekil 5.17. Güncellenmiş analitik modeldeki beton sınıfı	45
Şekil 5.18. Güncellenmiş analitik modeli kullanılarak elde edilen ilk dört mod şekli	46
Şekil 5.19. Analitik ve deneysel sonuçlar ile bulunan ilk dört frekansa ait her bir mod için modal ötelenmeler	47

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Frekans ve zaman tanım alanlarına dayalı yöntemler	22
Tablo 3.2. KB12VD tipi tek eksenli ivmeölçere ait bazı özellikler.....	26
Tablo 3.3. OROS-OR36 Çok Kanallı Gürültü ve Titreşim Analizörü'nün Özellikleri.....	28
Tablo 5.1. Başlangıç analitik modele ait ilk dört frekans	39
Tablo 5.2. Analizlerde kullanılan 8 ivmeölçerin teknik özelliği	40
Tablo 5.3. Frekans ve sönüm oranı değerleri.....	43
Tablo 5.4. Başlangıç analitik model ve deneysel sonuçların karşılaştırılması	44
Tablo 5.5. Güncellenmiş analitik modeldeki ilk dört moda ait frekanslar	45
Tablo 5.6. Güncellenmiş analitik model ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	46

SEMBOLLER LİSTESİ

a_{duvar}	: Çubuk genişliği
A	: Gerçek değerli sabit
A_1	: Keyfi sabit
A_2	: Keyfi sabit
B	: Gerçek değerli sabit
c	: Viskoz sönüm katsayısı
$\mathbf{c}$	: Sönüm matrisi
E_c	: Çerçeve betonun elastisite modülü
E_{duvar}	: Dolgu duvar elastisite modülü
f_{aj}	: j. modun analitik frekansları
f_{dj}	: j. modun deneysel frekansları
g	: Yerçekimi ivmesi
h_{duvar}	: Dolgu duvar yüksekliği
h_k	: Kolon boyu
Hz	: Hertz
I_k	: Kolon atalet momenti
k	: Yanal rijitlik
$\mathbf{k}$	: Rijitlik matrisi
m	: Yapı kütlesi
$\mathbf{m}$	: Kütle matrisi
N	: Serbestlik derecesi
$p(t)$	: Dinamik dış kuvvet
$\mathbf{p}(t)$	: Kuvvet vektörü
$q_n(t)$	: n. modun koordinatları
r_{duvar}	: Dolgu duvar köşegen uzunluğu
t_{duvar}	: Dolgu duvar kalınlığı
$u(t)$	: Yer değiştirme
$\dot{u}(t)$	: Hız
$\ddot{u}(t)$	: İvme

$\mathbf{u}(t)$	: Yer değiştirme vektörü
$\dot{\mathbf{u}}(t)$	: Hız vektörü
$\ddot{\mathbf{u}}(t)$	: İvme vektörü
V	: Volt
ω_n	: Sönümsüz hale ait doğal frekans
ω_D	: Sönümlü hale ait doğal frekans
δ_f	: Doğal frekanslar arasındaki fark yüzdesi
θ	: Köşegenin yatay ile olan açısı
λ_1	: Öz değer
λ_2	: Öz değer
λ_{duvar}	: a_{duvar} hesabında kullanılan bir sabit
λ_T	: Öz değer vektörü
ϕ_n	: Mod şekli
ψ_a	: Analitik mod şekli
ψ_a^T	: Analitik mod şeklinin transpozesi
ψ_d	: Deneysel mod şekli
ψ_d^T	: Deneysel mod şeklinin transpozesi
ζ	: Sönüm oranı

KISALTMALAR LİSTESİ

ADTF	: Ani Darbe Tepki Fonksiyonu
ÇSD	: Çok serbestlik dereceli
FTF	: Frekans Tepki Fonksiyonu
MGK	: Modal Güvence Kriteri
OMA	: Operasyonel Modal Analiz
TSD	: Tek serbestlik dereceli

1. GİRİŞ

1.1. Konunun Önemi

Binalar, köprüler ve barajlar gibi birçok mühendislik yapıları işlevleri gereği bulundukları bölgedeki toplumların sosyal ve iktisadi hayatlarında büyük bir öneme sahiptirler. Bu yapıların uzun süreli hizmet verebilmeleri, bunların dinamik davranışlarının iyi bilinmesine, gerektiğinde onarım ve güçlendirilmelerinin yapılmasına bağlıdır. Deprem, sel, patlama, çarpma, kullanılan malzemenin dayanım ömrünü tamamlaması gibi(ömrünü tamamlamış) birçok nedenden dolayı bu yapıların kullanımı zorlaşabilir veya kullanım dışı kalması gibi durumlar meydana gelebilir. Bu da durumlar ise hem can kayıplarına hem de büyük maddi zararlara neden olabilmektedir [1]. Bu gibi sebepleri göz önüne aldığımızda önemli mühendislik yapılarının takip edilmesi ve yapısal davranışlarındaki olası değişikliklerin ve sebeplerin ortaya konulması gerekmektedir.

Mevcut yapıların dinamik etkiler altındaki davranışını belirlerken birçok belirsizlik ile karşılaşmaktadır. Bunun yanı sıra dinamik davranış etkileyen parametrelerde de belirsizliklerin olması yapının gerçek dinamik davranışının belirlenmesini daha da zorlaştırmaktadır. Yapıların dinamik karakteristikleri ya da modal parametreleri (doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları), dinamik davranışlarını belirlemede/tahmin etmede önemli araçlardır. Günümüzde teorik ve deneysel yöntemler kullanılarak yapıların dinamik karakteristikleri belirlenebilmektedir.

Sonlu Elemanlar Yönteminde yapıya ait malzeme özelliklerinden sınır şartlarına kadar birçok kabul yapılarak yapıya ait bir analitik model oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu model gerçek modele her ne kadar yakın olsa da tam anlamıyla yapıyı temsil edememektedir. Bu yüzden deneysel yöntemler ile teorik modeller arasında kontrol mekanizması olmalıdır. Deneysel yöntemlerin teorik modellemelere bağlı olarak doğrulanmasındansa, teorik modeller deneysel yöntemler kullanılarak doğrulanmalıdırlar. İnsanların yaşam alanları olan yapıların dinamik karakteristiklerini deneysel yöntemler kullanarak belirlerken uygulamanın kolaylığı, ölçüm yapılırken yapının normal kullanışlılığının devam edebilmesi, ucuz maliyet gibi sebeplerden dolayı teorik yöntemin doğrulayıcısı olan deneysel yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır [2].

Teknolojinin hızlı ilerleyişi, gelişen bilgi ve bu sayede üretilen elektronik cihazlar canlı varlıkların davranışlarının kolayca gözlenmesine imkân sağladığı gibi, yapıların davranışlarının da gözlenmesine imkân sağlamaktadır [3,4]. Sismik düzeydeki titreşimleri ölçme yeteneğine sahip olan ivmeölçerler yardımıyla alınan ivme sinyallerinin analiz edilmesi ve elde edilen sonuçların farklı durumlar için karşılaştırılması ile yapının davranışında herhangi bir değişiklik olup olmadığı belirlenebilmektedir. Bu amaçla yaygın olarak kullanılan yöntem Deneysel Modal Analiz yöntemidir [1]. Birçok mühendislik alanında uygulama alanı olan deneysel modal analiz çalışmalarının temelleri 1940'lı yıllara dayanmaktadır. Bu yıllarda demiryolu raylarındaki hasarları belirleyebilmek amacıyla balyozlarla raylara vurularak oluşturulan titreşimlerin gözlemlenmesi, uçaklardaki titreşimin doğru olarak belirlenmesi gibi çalışmalarla dinamik karakteristiklerin deneysel olarak belirlenmesi metodunun temelleri atılmıştır. O zamanlar, dinamik kuvvetleri ölçen dönüştürücüler basit seviyelerde olduğundan çoğunlukla pratik olmayan ve zaman alan analog yaklaşımlar kullanılırken, 1960'lı yıllarda sayısal bilgisayarların ve Hızlı Fourier Dönüşümlerinin geliştirilmesi ile birlikte, deneysel modal analizin modern çağı başlamıştır [5]. Burada kullanılan yöntemin esası, yapıya bir titreşim verilip ve yapıda bu titreşime karşı oluşan tepkiyi etki-tepki prensibine benzer olarak ölçmeye dayanmaktadır. Yapıyı titreştiren etkinin bilinip bilinmemesine göre deneysel modal analiz uygulamaları; Geleneksel Modal Analiz ve Operasyonel Modal Analiz olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

Geleneksel Modal Analiz yönteminde; yapıya uygulanan etkinin bilinmesi gerekmektedir. Etki değerinin bilinmesi gerektirdiğinden Zorlanmış Titreşim Testi olarak da adlandırılmaktadır. Bu yöntemde yapı dinamik davranışı, tepki değerlerine ait spektral fonksiyonların etki değerine ait spektral fonksiyona oranlanmasıyla bulunmaktadır.

Operasyonel Modal Analiz yönteminde; yapıya uygulanan etkinin bilinmesine gerek olmadan yapının rüzgâr, taşıt yükü, insan hareketi gibi rastgele çevresel etkiler altında titreştirildiği varsayılarak, yapı dinamik karakteristikleri tepki sinyallerinin spektral yoğunluk fonksiyonlarının gerek zaman gerekse frekans tanım alanında değerlendirilmesiyle belirlenebilmektedir. Rastgele çevresel titreşimlerden yararlanıldığı için Çevresel Titreşim Testi olarak da adlandırılmaktadır.

Deneysel yöntemler ve teorik olarak elde edilen dinamik karakteristikler arasında büyük oranda farklılıklar yoksa ($\text{oran} \leq 5-10\%$), teorik olarak elde edilen dinamik karakteristiklerin yapının mevcut durumunu yansıttığı kabul edilmekte ve çeşitli yükleme

koşulları altında ileri dinamik analizleri gerçekleştirilmektedir. Eğer bu oran farkı büyükse (oran>%5–10), teorik olarak elde edilen dinamik karakteristiklerin yapının mevcut durumunu yansıtmadığı kabul edilmektedir. Bu durumda teorik ve deneysel dinamik karakteristikleri istenen sınırlar içerisinde birbirine yaklaştırmak için model, yapının sonlu eleman modelinde yapılan kabuller, yapının kütlesi, malzeme özellikleri ve sınır şartları gözden geçirilerek yapının mevcut durumunu yansıtacak bir biçimde güncellenmelidir. Bu işleme Sonlu Eleman Model İyileştirmesi adı verilmektedir [6-8]. Modeli iyileştirilen yapının dinamik analizleri gerçekleştirilerek dinamik davranışı daha gerçekçi bir biçimde belirlenmektedir.

1.2. Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Çevresel titreşim, bir yapının normal koşullar altındaki titreşim deneyi olarak kabul edilir. Bütün yapılar, sürekli olarak çevresel titreşimlerin etkisi altındadırlar. Etki kuvvetleri çoğunlukla kaydedilmezler veya çevresel titreşimi kullanan dinamik ölçüm boyunca ölçülemezler. Çünkü bu titreşim kaynaklarının ilgili frekanslarda bir etki verip vermediği, belirli bir frekans alanındaki etkinin ne kadar üniform olduğu veya değişmeyen etkinin nasıl oluştuğu bilinemez. Belirli bir dış tahrik ile yapı titreştirildiğinde bile (zorlanmış titreşim), dışarıdan gelen dış tahrikleri üreten çevresel titreşim kaynakları mevcut olmaktadır [5]. Bir yapının güvenliğini belirlerken, çevresel titreşimlerin kullanımının yapıyı titreştirmede daha iyi bir araç olması, bu tür titreşim deneylerini zorlanmış titreşim deneyine göre daha cazip bir alternatif olarak sunmaktadır. Çevresel titreşimin kullanıldığı dinamik deneyler sırasında sismik titreşimler haricindeki dış tahrik etkiler genellikle kaydedilmez veya ölçülemezler. Çevresel titreşimin kullanımı yapının çevresel titreşimlere karşı gerçek davranışının belirlenmesi için güzel bir fırsat sunar.

Türker [9], yapmış olduğu çalışmada, mevcut bir betonarme yapı temelini 20 kat küçülterek tasarlayıp, kum çakıl ve kil-silt karışımı 3 farklı zemin üzerine oturarak operasyonel modal analizini gerçekleştirmiştir. Her bir zemin koşulu için temel üzerine 9 adet tek eksenli “z” yönünde ölçüm alan ivmeölçer yerleştirip, 0-100Hz frekans aralığında 10 dakikalık ölçüm almıştır. Yapılan ölçümler sonucunda en düşük frekansları kil-silt karışımı zeminde görürken, 1.moddaki en yüksek frekansın çakıllı zeminde meydana geldiğini, modal sönüm oranlarının her bir zemin grubu için 2. ve 3. modlarda diğer modlara göre daha yüksek olduğunu tespit etmiştir.

Ventura vd. [10], Kanada’da bulunan Heritage Court Tower isimli 15 katlı betonarme yapının çevresel şartlar altındaki hareketini ölçmeye çalışmışlardır. Deneysel çalışmada sekiz kanallı bir sistem yardımıyla tüm katlardan ölçüm alarak yapının ilk altı frekansını ve bu frekanslara ait mod şekillerini bulmuşlardır. Yapıyı FEMtools programıyla modelleyerek frekans ve mod şekillerini deneysel sonuçlarla kıyaslamışlardır. Sonuç farklılıklarını azaltabilmek için sonuçlar arasında korelasyon yaparak analitik modeli güncellemişlerdir.

Boru vd. [11], 1975 Deprem Yönetmeliğine göre tasarlanmış bir binanın dinamik karakteristiklerini teorik ve deneysel modal analiz yöntemleriyle belirlemişlerdir. Deneysel modal analiz ile yapının dinamik karakteristiklerini belirlerken binadan alınan çevrel titreşim kayıtları ve geliştirilmiş frekans tanım alanında ayrıştırma yöntemini kullanmışlardır. Teorik analizlerde yapıyı SAP 2000 sonlu eleman paket programı ile modellemişlerdir. Deneysel analizlerde üç eksenli sekiz adet ivmeölçer kullanarak 30 dakika kayıt almışlardır. Sonuçları incelediklerinde ilk üç modda yakın değerler elde etmişlerdir. Yapısal elemanların elastisite modüllerini iteratif olarak değiştirerek teorik dinamik karakteristikleri güncellemişlerdir.

Bayraktar vd. [12], farklı inşa aşamalarındaki üç betonarme binanın dinamik karakteristiklerini deneysel modal analiz yöntemiyle elde etmişlerdir. Birinci doğal frekansı standartlarda kullanılan yaklaşık yöntemlerle hesaplayarak buldukları deneysel sonuçlar ile kıyaslamışlardır. Ölçüm sonuçları ile yaklaşık yöntemler farklılıklar göstermiştir. Bunun sebebi olarak; ölçümü gerçekleştirilen binaların komşu binalarla etkileşim içerisinde olmasının ortaya çıkardığı ekstra rijitlik ile binalardaki tuğla ve sıvanın oluşturduğu rijitlik artışının etkili olduğunu düşünmüşlerdir.

Bayraktar vd. [13] yaptıkları çalışmada betonarme bir köprü olan Kömürhan Köprüsü’nün analitik ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristiklerini karşılaştırmışlardır. Malzeme özellikleri ve sınır şartlarında güncellemeye giderek köprü’nün mevcut durumunu yansıtan sonlu eleman modelini elde etmişlerdir.

Cunha vd. [14], Lizbondaki Vasco de Gama köprüsünün çevresel şartlar altındaki titreşimini ölçmeye çalışmışlardır. Altı adet üç eksenli ivmeölçerden ikisini referans ivmeölçer dördünü hareketli ivmeölçer kabul ederek, 0-50Hz frekans aralığında her bir ölçüm için 16 dakikalık sonuçlar almışlardır. Buldukları sonuçları Frekans Alanında Ayrıştırma ve Stokastik Alt Uzay Belirleme yöntemleriyle işleyerek birbiriyle

kıyaslamışlardır. Her iki metot için frekansları ve mod şekillerini düzgün bulabilirken sönüm oranlarını elde edememişlerdir.

Votsis vd. [15], Kıbrıs'ta bulunan Nicholas Katedrali ve Mamas Kilisesinin dinamik karakteristiklerini belirleyebilmek için çevresel titreşim verilerini kullanmışlardır. Sonlu eleman modeli sonuçlarıyla deneysel sonuçları karşılaştırarak, yapıların malzeme karakteristiklerini güncelleştirmişlerdir.

Bayraktar vd. [16], Trabzon ilinde bulunan İskenderpaşa camisi minaresinin dinamik karakteristiklerini (doğal frekanslarını, mod şekillerini ve sönüm oranlarını) operasyonel modal analiz yöntemini kullanarak belirlemişlerdir. Deneysel ölçümlerde dört adet üç eksenli ivmeölçer kullanarak ilk yedi modu elde etmişlerdir. Teorik analizlerde ANSYS paket programını kullanmışlardır. Deneysel sonuçlar ile teorik sonuçlar arasında oluşan farklılıkların sınır şartları, malzeme özellikleri ve malzemenin tahrip oluşundan kaynaklanabileceğini düşünerek analitik modelde iyileştirmeye gitmişlerdir. İyileştirilen modele deprem ivmesi vererek dinamik analizlerini yapmışlardır.

D'Ambrisi vd. [17], İtalya'da yapılmış olan tarihi Soncino çan kulesinin dinamik karakteristiklerini belirlemiş ve yapıyı sismik açıdan değerlendirmişlerdir.

Cunha vd. [18], geliştirdikleri bir program ile betonarme bir yapının çevresel şartlar altındaki titreşimini ölçerek, geçmişte bu yapıdan aldıkları sonuçlarla kıyaslamışlardır. Deneysel çalışmalarında sekiz adet ivmeölçerin ikisini referans kabul ederek ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Yapıya ait ilk on iki modu 0-12Hz arasında elde ettikleri frekans ve mod şekillerini sunmuşlardır. Geçmişte yapmış oldukları çalışma ile benzer sonuçlar elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Türker vd. [19], betonarme bir köprü olan Ali Çetinkaya köprüsünün dinamik karakteristiklerini operasyonel modal analiz yöntemiyle belirlemişlerdir. Yapıyı analitik olarak SAP2000 sonlu eleman paket programında modellemişlerdir. Yapının dinamik karakteristiklerini operasyonel modal analiz yöntemiyle belirleyerek başlangıç analitik modelini güncellemişlerdir. Güncellenen model üzerinde çeşitli analizler yapmışlardır.

Bartoli vd. [20], tarihi Torre Grossa çan kulesinin statik ve dinamik davranışını belirlemeye çalışmışlardır. Yapının malzeme özelliklerini tespit edebilmek için yapıdan karot örnekleri almış ve yerinde basınç deneyi yöntemini kullanmışlardır. İki adet sarsıcı ve yedi adet ivmeölçerden oluşan data toplama sistemi ile yapının frekans ve mod şekillerini belirlemişlerdir. Ölçümler sonrasında ilk altı modu belirlemiş ve bu modları analitik olarak buldukları değerlerle karşılaştırmışlardır. Yapının sonlu eleman modelini ANSYS

programıyla oluşturmuşlardır. Analitik modelde kullanılan elastisite modülünü deneysel sonuçlara göre güncellemişlerdir.

Bayraktar vd. [21], tarihi yapıların deprem güvenliklerini operasyonel modal analiz yöntemiyle belirleyebilmek için, Osmanlı köprüsünün, İskenderpaşa camii minaresinin ve Ayasofya kulesinin teorik analizlerini ANSYS paket programını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalarında operasyonel modal analiz yöntemini kullanmışlardır. Verilerin işlenip dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde ise Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma ve Stokastik Altalan Belirleme yöntemlerini kullanmışlardır. Analitik ve deneysel modal analiz sonuçlarını karşılaştırdıklarında mod şekillerinin uyumlu olup, doğal frekansların farklı olduğunu görmüşlerdir. Deneysel ölçüm sonuçlarına göre bu tarihi yapıların sonlu eleman modellerini güncellemişlerdir. Tarihi yapıların dinamik analizleri için 1992 yılında meydana gelen Erzincan depreminin ERZİKAN/ERZ-NS bileşeninin pik değeri 0.515g olan ivme kaydını, yapılara birinci mod hareketi doğrultularında uygulamış ve seçilen deprem kaydı için deprem güvenliklerini belirlemişlerdir.

Choi vd. [22], Güney Kore’de bulunan Ulchin nükleer enerji santralinin deneysel analizlerini operasyonel modal analiz yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. Yapının analitik modelini ABAQUS paket programıyla oluşturup, deneysel ölçümlerini ise altı ivmeölçer yardımıyla 0-50Hz arasında alarak buldukları sonuçları kıyaslamışlardır. Yapının elastisite modülünü güncelleyerek sonuçlar arasında yakınsama sağlamışlardır.

Başpolat vd. [23], Türkiye’deki en yüksek baraj olan Deriner barajının dinamik karakteristiklerini (doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları) operasyonel modal analiz yöntemini kullanarak bulmaya çalışmışlardır. Barajın büyüklüğü ve ivmeölçer sayısının sınırlı oluşu nedeniyle bir ivmeölçeri referans noktası kabul ederek ölçüm yapmışlardır. Ölçümler neticesinde; ilk beş frekansı, bu frekanslara ait mod şekillerini ve sönüm oranlarını elde etmişlerdir.

Azenha vd. [24], kompozit bir kirişin elastisite modülünü tespit edebilmek için, kirişi analitik olarak modelleyip kirişe statik yükleme uygulamışlardır. Operasyonel modal analiz yöntemi yardımıyla deneysel ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Analitik ve deneysel sonuçları birbiriyle karşılaştırmışlardır. Kirişin imalatının farklı günlerinde ayrı ayrı bu metotları uygulamışlardır. Buldukları sonuçların doğruluğunun kontrolü için ölçümleri iki defa yapmışlardır. Ölçümler neticesinde analitik ve deneysel sonuçlar benzerlik

göstermiştir. Mesnet koşullarının analitik modeldeki gibi tasarlanabildiği takdirde daha uygun sonuçlar elde edilebileceği düşünülmüşlerdir.

Soyoz vd. [25], Boğaziçi Üniversitesi kampüsündeki bir eğitim binasının çevresel titreşim testlerini; güçlendirme öncesi, güçlendirme esnası ve güçlendirme sonrası olmak üzere gerçekleştirmişlerdir. Güçlendirme yapıldıktan sonra yapının zorlanmış titreşim testlerini yaparak buldukları sonuçları çevresel titreşim test sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır.

Hashim vd. [26], şiddetli yağışlar sonrası oluşan toprak kaymasından etkilenen betonarme bir yapının hasarlı iken ve hasar gören çevre kirişlerinde güçlendirme yapıldıktan sonraki durumu için operasyonel modal analizlerini yapmışlardır. Ölçümleri yetmiş sekiz ayrı noktadan, üç ivmeölçeri referans kabul ederek toplamda yedi ivmeölçer yardımıyla, 0-60Hz frekans aralığında, her bir ölçüm 600s olmak üzere 19 farklı ölçümde gerçekleştirmişlerdir. Yapıyı analitik olarak DIANA paket programı yardımıyla hasarlı ve hasarsız olarak modellemiş ve modele ait modal analiz sonuçlarını deneysel sonuçlarla kıyaslamışlardır. İlk üç frekans ve mod şekli arasında yakınlık gözlerken, dördüncü modda yakınsama sağlayamamışlardır.

Osmancikli vd. [27], iki adet prefabrik yapının çevresel şartlar altındaki davranışını deneysel olarak belirlemeye çalışmışlardır. İlk çalışmalarında Trabzon-Rize karayolu üzerindeki prefabrik yaya üst geçitini incelemişlerdir. Çalışmalarında sekiz adet ivmeölçerin ikisini referans noktası kabul ederek ölçümü üç defada tamamlamışlardır. Yapının ilk üç frekansını ve bu frekanslara ait mod şekillerini elde ederek buldukları sonuçları oluşturdukları analitik model ile kıyaslamışlardır. İkinci çalışmalarında Trabzon-Esiroğlu mevkiindeki prefabrik bir yapıyı incelemişlerdir. Yapının ilk beş frekansını ve bu frekanslara ait mod şekillerini elde ederek oluşturdukları analitik model ile kıyaslamışlardır. Her iki yapı için bağlantı noktalarındaki rijitliği değiştirerek analitik modelde güncellemeye gitmişlerdir.

Ventura vd. [28], 52 ve 54 katlı birbirine yakın mesafedeki iki binanın deneysel modal analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Yapılara Northridge depremini uygulayıp, bu yapıların benzer bir deprem hareketine karşı nasıl bir davranış gösterecekleri hakkında bilgi sahibi olmaya çalışmışlardır. Her iki yapının ilk altı mod ve sönüm oranlarını elde etmişlerdir. İki yapıda mod şekilleri benzerlik göstermemiştir.

Altunışık vd. [29], çelik otoyol köprülerinin sonlu eleman modelleri ve operasyonel modal analiz çalışmaları kapsamında Samsun ili Ayvacık ilçesinde bulunan Eynel

köprüsünü incelemişlerdir. Ölçümlerde çevresel etki olarak trafik, rüzgâr yükü ve yaya trafiğini kullanmışlardır. Köprünün analitik modelini proje verilerine göre oluşturmuş ve modal analiz sonucunda ilk üç frekans değerini, bu frekanslara ait mod şekillerini ve sönüm oranlarını elde etmişlerdir. Deneysel dinamik karakteristikler elde edilirken Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma ve Stokastik Altalan Belirleme Yöntemini kullanmışlardır. Deneysel analizlerde kullanılan yöntemlerle elde edilen sonuçlar benzerlik gösterirken, bu sonuçlar ile analitik sonuçlar arasında farklılıklar olduğunu tespit etmişlerdir.

Vivo vd. [30], Kourou kasabasındaki Vega uydu fırlatıcısının zorlanmış ve çevresel titreşim hareketini incelemişlerdir. Zorlanmış titreşim ile yapılan ölçümlerde yapının beş ayrı seviyesine iki adet tahrik elemanı ile dış tahrik uygularken bir ivmeölçer yardımı ile bu sonuçları kaydetmişlerdir. İlk iki modun birbirine çok yakın olduğunu gözlemlemişlerdir.

Çalık vd. [31], yaptıkları çalışmada Trabzon ilindeki Hacı Kasım Muhittin Camii taş minaresinin restorasyonunu yapabilmek için analitik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Minarenin malzeme özelliklerini deneysel yollarla (Tek eksenli basınç deneyi, özgül ağırlık deneyi, absorpsiyon deneyi) belirleyerek başlangıç sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır. Deneysel analizlerde çevresel şartlardan yararlanmışlardır. Deneysel sonuçlara göre sonlu eleman modelinde iyileştirmeye gitmişlerdir. İyileştirilen model üzerinde çeşitli analizler gerçekleştirerek restorasyon aşaması için birtakım öneriler geliştirmişlerdir.

1.3. Mevcut Çalışmanın Kapsamı

Operasyonel Modal Analiz yöntemi küçük makine parçalarının titreşim analizlerinden büyük mühendislik yapılarındaki titreşimlerin analizine kadar çok geniş ölçekli bir alanda kullanılmaktadır. Genel olarak bu yöntem; yapıların proje aşamasında yapılan kabullerin uygulamada sağlanıp sağlanmadığının belirlenmesinde, teorik analiz sonuçları ile karşılaştırılarak sonlu eleman modellerinin güncelleştirilmesinde, teorik analizlerin yapılamadığı veya zorlanıldığı yerlerde dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde, hasar görmüş yapıların durumlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Tez kapsamında, betonarme bir yapının çevresel titreşimler altındaki davranışına göre dinamik karakteristikleri belirlenerek, yapının gerçekçi analitik modelini yansıtan sonlu eleman modeli oluşturulmaya çalışılmıştır.

Tez altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, konunun önemi, literatür çalışmaları ve mevcut çalışmanın kapsamı yer almıştır. İkinci bölümde; titreşimin temelini oluşturan teorik modal analiz yöntemi açıklanmıştır. Üçüncü bölümde; deneysel modal analiz yönteminin tanımı, uygulama alanları, ölçümler esnasındaki hatalar, ölçüm araçları ve modal parametrelerin kontrolü açıklanmıştır. Dördüncü bölümde; deneysel modal analiz sonuçlarına göre sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesi hakkında bilgi verilmiştir. Beşinci bölümde; sayısal uygulama anlatılmıştır. Sayısal uygulamada, Elazığ ili Doğukent Mahallesi Ada:1771 Parsel:17 üzerine Bodrum+5 kat ve her katta 2 daire olarak iki blok halinde inşa edilen, Karabulut sitesinin A bloğunun teorik ve deneysel analizleri yapılmıştır. Altıncı bölümde ise; tezden elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2. TEORİK MODAL ANALİZ YÖNTEMİ

Yapıların dinamik karakteristikleri olan doğal frekanslarının, mod şekillerinin ve sönüm oranlarının belirlenmesi için yapılan teorik ve deneysel çalışmalara modal analiz yöntemi denir. Modal analiz yöntemi teorik ve deneysel modal analiz yöntemi olmak üzere ikiye ayrılır. Titreşim teorisinin bilinmesi halinde modal analiz yöntemi daha kolay anlaşılacaktır. Yapıya uygulanan dış yükler ve başlangıç şartlarına göre (başlangıç yer değiştirmesi ve/veya başlangıç hızı) o yapının gösterdiği tepkiye o yapının titreşimi denir. Titreşimler serbest ve zorlanmış titreşim olmak üzere iki çeşittir. Bir başlangıç şartı verilip sonra serbestçe salınımına bırakılan sistemlerde oluşan titreşime serbest titreşim, değişen dış yükler sisteme uygulandığında oluşan titreşime ise zorlanmış titreşim adı verilir [32].

2.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

Bir yapının şekil değişimine direnç özellikleri tanımlanırken, eylemsizlik özelliklerini temsil etmek için gerekenden daha fazla serbestlik gerekir. Yalnız zorlama yönünde hareket etmek üzere kısıtlanmış tek katlı bir çerçeveyi göz önüne alırsak; statik çözümleme sırasında çerçevenin yanal rijitliğini belirlemek için, yanal ötelenme ve iki düğüm noktasının dönmelerinden oluşan üç serbestliği hesaba katmak gerekir. Buna karşın, dinamik çözümleme için kütle tek bir noktada, genellikle de çatı seviyesinde toplanmış olarak idealleştirildiğinde, yapının yalnızca yanal öteleme olarak bir serbestliği olur. Bu nedenle bu tip modellere tek serbestlik dereceli (TSD) sistem denir [33].

Dinamik dış kuvvet $p(t)$ etkisinde doğrusal elastik davrandığı varsayılan tek katlı idealleştirilmiş bir çerçevenin yer değişimini gösteren $u(t)$ değişkenini yöneten hareket denklemi Denklem (2.1)'de verilmiştir. Denklemdaki m kütleyi, c viskoz sönüm katsayısını, k yanal rijitliği temsil etmektedir.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'deki ifadede $p(t) = 0$ kabul edildiğinde sönümlü TSD sistemlerin serbest titreşim denklemi olan Denklem (2.2) elde edilir.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (2.2)$$

Bu denklem m 'ye bölündüğünde,

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 u = 0 \quad (2.3)$$

bağıntısına ulaşılır. $\omega_n = \sqrt{k/m}$ olduğu üzere,

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (2.4)$$

olarak tanımlanır. Denklem (2.5), Denklem (2.3)'de kullanılırsa;

$$u = a e^{\lambda t} \quad (2.5)$$

$$(\lambda^2 + 2\zeta\omega_n\lambda + \omega_n^2) a e^{\lambda t} = 0 \quad (2.6)$$

elde edilir; bu bağıntının her t değeri için sağlanabilmesi,

$$\lambda^2 + 2\zeta\omega_n\lambda + \omega_n^2 = 0 \quad (2.7)$$

olmasını gerektirir. Karakteristik denklem olarak bilinen Denklem (2.7)'nin iki kökü vardır:

$$\lambda_{1,2} = \omega_n \left(-\zeta \pm i\sqrt{1 - \zeta^2} \right) \quad (2.8)$$

Bu kökler, $\zeta < 1$ için karmaşık sayı olurlar. Denklem (2.3)'ün genel çözümü,

$$u(t) = A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 e^{\lambda_2 t} \quad (2.9)$$

biçimindedir; Denklem (2.8)'deki ifadeler sonrasında çözüm,

$$u(t) = e^{-\zeta\omega_n t} (A_1 e^{i\omega_D t} + A_2 e^{-i\omega_D t}) \quad (2.10)$$

biçimini alır. Burada A_1 ve A_2 katsayıları göstermektedir. ω_D ise sönümlü hale ait açısıl frekans olup,

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.11)$$

denklemini ile tanımlanabilir. Denklem (2.10)'daki parantez içi terim trigonometrik fonksiyonlar türünden yazıldığında,

$$u(t) = e^{-\zeta\omega_n t} (A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t) \quad (2.12)$$

bağıntısına ulaşılır. Henüz belirlenmemiş olan A ve B katsayıları gerçek değerlidir ve başlangıç koşullarına bağlı olarak,

$$A = u(0) \quad (2.13)$$

$$B = \frac{\dot{u}(0) + \zeta\omega_n u(0)}{\omega_D} \quad (2.14)$$

biçiminde hesaplanabilir. Yukarıdaki A ve B Denklem (2.12)'de konduğunda

$$u(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left[u(0) \cos \omega_D t + \frac{\dot{u}(0) + \zeta\omega_n u(0)}{\omega_D} \sin \omega_D t \right] \quad (2.15)$$

eşitliği elde edilir.

2.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

ÇSD sistemlerin serbest titreşimi denklemi

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (2.16)$$

formundadır. Klasik sönümlü sistemlerin, sönümsüz sistemler ile aynı modlara sahip olduğu yaklaşımından hareketle burada sönümsüz sistemlerin frekans ve modlarının belirlenmesi irdelenecektir [33].

ÇSD sönümsüz bir sistemin serbest titreşim denklemi,

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (2.17)$$

bağıntısı ile verilebilir.

Serbestlik derecesi N olan bir sistem için Denklem (2.17)'de $\mathbf{m}$ kütle matrisi, $\mathbf{k}$ rijitlik matrisidir.

Sönümsüz sistemin çözümü şu şekilde tanımlanabilir:

$$\mathbf{u}(t) = q_n(t) \phi_n \quad (2.18)$$

Buradaki mod şekli (titreşim biçimi) ϕ_n zaman içinde sabit kalır. Yer değişimi tepkilerinin zaman içinde nasıl değiştikleri, aşağıdaki basit harmonik fonksiyonla tanımlanır:

$$q_n(t) = A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t \quad (2.19)$$

Buradaki A_n ve B_n katsayıları, sistemi harekete geçiren başlangıç koşullarından belirlenir. Denklem (2.18) ve (2.19) birleştirildiğinde,

$$\mathbf{u}(t) = \phi_n (A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t) \quad (2.20)$$

elde edilir; ancak ω_n ve ϕ_n henüz bilinmemektedir.

$\mathbf{u}(t)$ için öngörülen bu çözüm Denklem (2.17)'de kullanıldığında,

$$[-\omega_n^2 \mathbf{m} \phi_n + \mathbf{k} \phi_n] q_n(t) = \mathbf{0} \quad (2.21)$$

bağıntısı bulunur. Bu bağıntının sağlanması için ya $q_n(t) = 0$ olmalıdır ki bu durumda $\mathbf{u}(t) = \mathbf{0}$ olur ve dolayısıyla sistem hareketsiz durur ya da doğal frekans ve modları (ω_n ve ϕ_n) aşağıdaki koşulu sağlamaları gerekir:

$$\mathbf{k} \phi_n = \omega_n^2 \mathbf{m} \phi_n \quad (2.22)$$

Bu cebirsel denkleme *matris özdeğer problemi* denir. Rijitlik ve kütle matrisleri ($\mathbf{k}$ ve $\mathbf{m}$) bilindiğinden, burada istenen ω_n^2 değerinin ve ϕ_n vektörünün belirlenmesidir.

Denklem (2.22) için çözüm geliştirmek üzere aşağıdaki yazım kullanılabilir:

$$[\mathbf{k} - \omega_n^2 \mathbf{m}] \phi_n = \mathbf{0} \quad (2.23)$$

Bu gösterimden anlaşılaçağı gibi, N sayıda ϕ_{jn} bileşeni ($j = 1, 2, \dots, N$) için aynı sayıda türdeş cebir denklemi bulunmaktadır. Bu denklem takımı için aşıkâr çözüm $\phi_n = \mathbf{0}$ olur, ancak bu sonuç, hareketsizliğı ifade ettiğinden aranan çözüm değildir. Hareketli çözüm ancak,

$$\det[\mathbf{k} - \omega_n^2 \mathbf{m}] = 0 \quad (2.24)$$

olursa mümkündür. Determinant açılırsa, ω_n^2 değişkeninde N 'inci derece bir çokterimli elde edilir. Denklem (2.24), *karakteristik denklem* ya da *frekans denklemi* olarak anılır. Yapının kütle ve rijitlik matrisleri olan $\mathbf{m}$ ve $\mathbf{k}$ hem simetrik hem de kesin-artı matrisler olduklarından, bu denklemden ω_n^2 için N tane gerçek ve artı değerli kök bulunur. $\mathbf{k}$ matrisinin kesim-artılığı, rijit cisim hareketinin kısıtlandığı tüm sistemlerde geçerlidir.

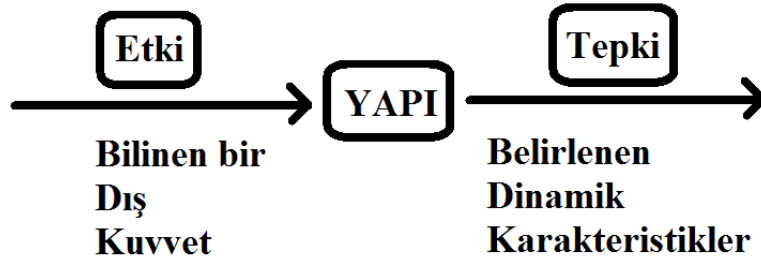
Denklem (2.24)'ün kökleri olan N tane ω_n^2 'den titreşim frekansları ω_n 'ler [$n = 1, 2, \dots, N$] belirlenir ve bunlar geleneksel olarak $\omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_N$ biçiminde küçükten büyüğe doğru sıralanır. Karakteristik denklemin köklerine *özdeğerler*, *karakteristik değerler* ya da *olağan değerler* de denir. Bir doğal frekans ω_n bilindiğinde, Denklem (2.23) kullanılarak ona karşılık gelen ϕ_n vektörlerinin kesin genlikleri değil, yalnız N sayıda ϕ_{jn} bileşeninin [$j = 1, 2, \dots, N$] birbirlerine oranları bulunabilir; bu oranlar mod şeklinin görünümünü tanımlar. N serbestlik dereceli sistemin N doğal titreşim frekansına karşılık gelen N tane bağımsız ϕ_n vektörü vardır; bunlara *doğal titreşim modu* ya da *doğal titreşimin mod şekli* denir. Bu vektörler, *özvektörler*, *karakteristik vektörler* ya da *olağan modlar* olarak da bilinir. *Doğal sıfatı*, bu titreşim özelliklerinin serbest titreşime ait olduklarını vurgulamak için kullanılır ve bu özellikler yalnız kütle ve rijitlik özelliklerine dayanır. n altsimgesi modun sayısını belirtir ve birinci [$n = 1$] moda *temel mod* denir [33].

3. DENEYSEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİ

Titreşim, yapıların başlangıç şartları ve uygulanan dış yükler altındaki davranışlarıdır. Temel olarak, serbest ve zorlanmış titreşim olmak üzere iki tür titreşim bulunmaktadır [34]. Serbest titreşim, yapıdaki başlangıç şartları altında oluşurken, bu titreşim yapıdaki sönümün etkisiyle bir süre sonra sonlanır. Bu tür titreşimde, temel frekans en küçük frekans olup, genellikle yapıdaki en etkili frekanstır. Eğer yapıya dışardan bir yük uygulanırsa bu titreşimin adı zorlanmış titreşim olur. Dış yükün sürekli etkimesi durumunda yapıda titreşim olmaya devam eder. [1]. Deneysel Modal Analizin hangi yöntem ile (zorlanmış ve çevresel titreşim testi) gerçekleştirileceği, ölçülmesi planlanan yapının hacimsel büyüklüğü, çevresel koşulların durumu gibi birtakım sebeplere bağlı olarak belirlenmektedir. Küçük veya orta hacimli yapıların dinamik karakteristikleri belirlenirken darbe çekici kullanılarak zorlanmış titreşim yapılabilmektedir. Çekiç testinde yapıya büyüklüğü bilinen bir kuvvet etkitildiği için yapıdaki titreşim sinyalleri ile ortamdaki titreşim sinyalleri rahatlıkla ayırt edilebilmektedir. Dolayısıyla, ölçüm sonuçları sağlıklı bir şekilde belirlenebilmektedir. Eğer düşünülen yapı hacimsel olarak büyük (köprü, baraj vb.) ise yapıda titreşim oluşturmak ciddi zorlukları ve maliyeti beraberinde getirecek ve belki yapıyı bütün olarak titreştirmek imkânsız olacaktır [35]. Bu durumda yapının dinamik karakteristiklerini belirleyebilmek için çevresel koşullardan yararlanmak zorunlu hale gelecektir. Çünkü çevresel etkiler yapıyı bir bütün olarak etkilemekte ve yapı genel olarak titreşmektedir. Gerçek yapıyı temsil edecek dinamik karakteristikleri belirlemek için bu durumlar göz önüne alınarak en uygun deneysel yöntem seçilmelidir [36]. Burada titreşimin bilinip bilinmemesine göre kullanılacak yöntem Geleneksel ve Operasyonel Modal Analiz yöntemi diye ikiye ayrılmaktadır.

3.1. Geleneksel Modal Analiz Yöntemi

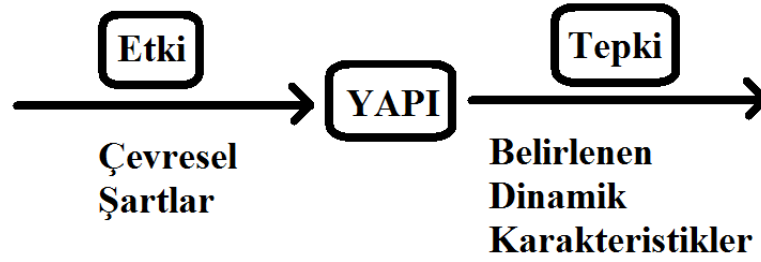
Geleneksel Modal Analiz yönteminde yapıya etkiyen titreşimler bilinmekte ve bu yüzden yapıya etkiyen titreşimlerin genliği de (buna bağlı olarak zamanla değişimi) bilinmektedir (Şekil 3.1).



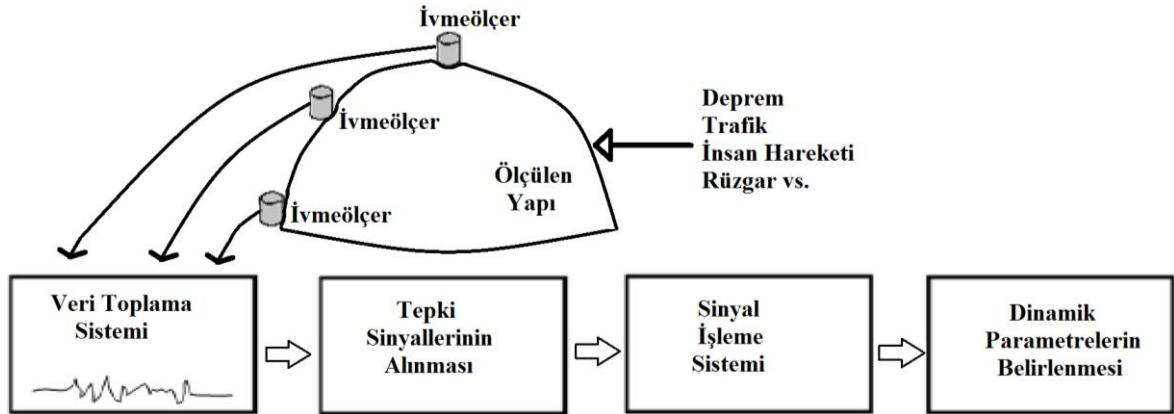
Şekil 3.1. Geleneksel Modal Analiz Yöntemi

3.2. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi

Operasyonel Modal Analiz yönteminde yapıya etkiyen titreşimler çevresel etkiler altında oluşmakta ve bu yüzden yapıya etkiyen titreşimlerin genliği (buna bağlı olarak zamanla değişimi de) bilinmemektedir (Şekil 3.2). Çevresel titreşimler; yer sarsıntıları, deprem, rüzgâr, insan etkisi ya da trafik ile olabilmektedir [34]. Tipik bir Operasyonel Modal Analiz Yöntemi düzeneği Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Operasyonel Modal Analiz yöntemi



Şekil 3.3. Tipik bir Operasyonel Modal Analiz Yöntemi düzeneği

3.2.1. Operasyonel Modal Analiz Yönteminin Uygulama Alanları

Deneysel Modal Analiz yöntemi ile ilgili ilk çalışmalar 1940'lı yıllarda uzay ve astronomi bilimlerinde, daha sonra havacılık, otomotiv, makine sektörlerinde gerçekleştirilmiştir [35]. 1980'li yıllarda Zorlanmış Titreşim Yöntemi, 1990'lı yıllarda ise Çevresel Titreşim Yöntemi inşaat mühendisliği yapılarında kullanılmaya başlanmıştır [36,37]. Günümüzde Operasyonel Modal Analiz yöntemi küçük makine parçalarının titreşim analizlerinden büyük mühendislik yapılarındaki titreşimlerin analizine kadar çok geniş ölçekli bir alanda kullanılmaktadır [1].

Genel olarak bu yöntem; yapıların proje aşamasında yapılan kabullerin uygulamada sağlanıp sağlanmadığının belirlenmesinde, teorik analiz sonuçları ile karşılaştırılarak sonlu eleman modellerinin güncelleştirilmesinde, teorik analizlerin yapılamadığı veya zorlandığı yerlerde dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde, hasar görmüş yapıların durumlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır [38]. Yapısal dinamik değiştirmeler de modal analizlerin uygulama alanı içerisinde olup, bu yöntemde yapıya kütle ve yayların eklenip çıkarılmasıyla yapının dinamik özelliklerinin nasıl değiştiği incelenmektedir. Diğer bir uygulama alanı ise karmaşık yapıların teorik analizinde de kullanılan yapısal ayırma-birleştirmedir. Bu işlemde yapı alt elemanlara bölünür ve her bir alt eleman için matematik model oluşturulur. Yapının her bir alt elemanı belirli kurallara göre birleştirilerek ana yapının dinamik karakteristikleri belirlenmeye çalışılır. Dinamik karakteristiklerin doğru olarak bulunabilmesi için Frekans Tepki Fonksiyonlarının (FTF) doğru olarak elde edilmesi gerekir.

3.2.2. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile Ölçüm ve Frekans Tepki Fonksiyonu

Gürültü yapılarda olumsuz etkiler bırakabilmektedir. Bunu önleyebilmek için yapıda oluşan titreşimlerin işleme yönteminin seçiminin doğru bir biçimde yapılması gerekmektedir. Yapılan ölçümler neticesinde elde edilen sonuçların geçerli olabilmesi için sistemin bir bütün ve sürekli olduğu, malzeme özellikleri, sınır şartları gibi değerlerde herhangi bir değişiklik olmadığı, sistemin davranışında zamanla değişim olmadığı, titreşimlerin küçük olduğu bu yüzden de yapının lineer davranış sergilediği şeklinde birtakım kabuller yapılmaktadır [39]. Yapıda oluşan titreşimlere verilen tepkiler frekans ve zaman alanında işlenerek dinamik karakteristikler belirlenebilmektedir.

Ölçümlerin doğru bir biçimde gerçekleştirilebilmesi için uygulamacıların hem kullanılan yöntem hem de ölçülecek yapı davranışı hakkında genel mühendislik bilgisine sahip olması ve ölçüm sisteminin oluşturulması gerekmektedir. Ölçüm sisteminin hazırlanmasında ve uygulanmasında şu hususlara dikkat edilmelidir.

- Ölçülecek yapı (bina, köprü, baraj) tespit edilmelidir.
- Kullanılacak Deneysel Modal Analiz Yöntemi belirlenmelidir. Zorlanmış Titreşim Yöntemi veya Çevresel Titreşim Yönteminden hangisinin yapıya uygun olduğuna karar verilmelidir.
- Yapının frekans değerleri, mod şekilleri hakkında ön bilgiye sahip olunmalı. Bu bilgiler yapının sonlu eleman analizi ile yaklaşık olarak belirlenebilir.
- Yapının tahmini frekans değerleri aralıklarına göre ölçümlerde kullanılacak ivmeölçer tipi seçilmeli.
- Olması beklenen modal hareketlere göre ivmeölçerlerin kaç adet ve nerelere hangi yönde yerleştirileceğine karar verilmeli. Eğer ivmeölçer noktaları olması gereken sıklıkta değilse yapının tüm mod şekilleri elde edilemeyebilir. İvmeölçer noktaları ile sonlu eleman modelindeki serbest düğüm noktaları mümkün olduğu kadar örtüştürülmeye çalışılmalıdır. Modların analitik ve deneysel olarak karşılaştırılabilmesi için önemli olan bu esas, ivmeölçer sayısının eksik oluşu halinde referanslı ölçümler gerçekleştirilerek sağlanmalıdır. Ayrıca ölçümler esnasında ivmeölçerlerin yapıyla tam bağlı olması, yönlenmesinin doğru yapılması, yağmurdan, manyetik alandan ve darbelerden korunması gerekmektedir.
- Sinyallerin toplanacağı veri toplama sistemi ayarları yapılmalı (model ve ivmeölçer bağlantıları oluşturulmalı vb.) [1].
- Yapıya yerleştirilen ivmeölçerler veri toplama sistemine tanıtılmalı, frekans aralığı ve ölçüm süresi belirlenmelidir. Ölçüm alınması düşünülen yapının frekans aralığı ve ölçüm süresi sonlu eleman analizinden tespit edilerek, aralık dışındaki ortam ve gürültü sinyallerinin etkisi azaltılmalıdır [7].
- Ölçümler alınmaya başlanmadan önce, ivmeölçerlerin veri toplama sistemine sinyal aktarıp aktarmadığı/aktaramadığı kontrol edilmelidir.
- Ölçümler bittikten sonra, veri toplama sistemindeki ham sinyaller frekans veya zaman ortamında işlenerek, yapının doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları belirlenmektedir.

Titreşim ölçümleri alınırken yapının tepki fonksiyonu farklı formlarda ifade edilebilmektedir.

- Frekans tepki fonksiyonu (FTF),
- Ani darbe tepki fonksiyonu (ADTF),
- Geçirgenlik,
- Tepki spektrumu.

Yapının dinamik karakteristikleri belirlenirken tepki terimi genellikle yer değiştirme, hız ve ivme cinsinden birisi olmaktadır.

Frekans Tepki Fonksiyonu, çok geniş bir alanda kullanılan ve titreşim verilerinden elde edilen bir fonksiyondur. Bu fonksiyon uygulanan kuvvet ile yapının tepkisi arasındaki lineer ilişkiyi vermektedir. Bu fonksiyon, kuvvetin uygulandığı ve tepkinin alındığı noktaya göre noktasal, frekans ve çapraz FTF olarak adlandırılmaktadır.

Ani Darbe Tepki Fonksiyonu, sisteme birim genlikli ani bir darbe uygulanması ve sonrasında yapının zaman geçmişi hakkında bilgi edinmek olarak tanımlanabilir. Ani darbeden kasıt, belirlenilen aralıkta sistemin herhangi bir titreşim periyodundan daha kısa zaman içerisinde uygulanan kuvvettir. ADTF'nin yorumlanması birtakım zorluklar içerdiğinden daha çok FTF kullanılmaktadır. ADTF'ye Fourier dönüşümü uygulanarak FTF elde edilebilmektedir.

Geçirgenlik, FTF'ye benzemekte olup, aradaki hesap yöntemi bakımından birbirinden farklıdır. Çünkü bu yöntem iki noktanın tepkilerinin birbirine oranına göre hesaplamaları yapmaktadır.

Tepki spektrumu, hareketli bir sistemden elde edilmekte olup, yapının dinamik karakteristikleri hakkında önemli bilgiler verebilir [40].

Yapının dinamik karakteristiklerini içeren FTF rezonans frekanslarında sivri tepelere sahip olmaktadır. Ancak bazen iki rezonans tepesi arasında ters-rezonans (anti-resonance) denilen sivri çukurlar da görülebilmektedir.

3.2.3. Operasyonel Modal Analiz Yönteminde Yapılan Hatalar

Deneyisel analizler yapılırken kullanıcı veya ortam kaynaklı olarak bazı hatalar yapılmaktadır. Bunlardan bazıları şöyledir;

- İvmeölçer kütlelerinin etkileri,
- Mesnetleme (sınır koşullarının sağlanamaması),

- İvmeölçerlerin tam olarak sabitlenememesi,
- Yapı-titreştirici etkileşimi,
- Parazitler (Gürültü vs.),
- İvmeölçerlerin karakteristikleri (frekans aralığı, yapıya tutturulma biçimi vs.),
- Yapının doğrusal olmayan davranışları,
- Yapıdaki kararsızlıklar.
- Deneysel verilerin kullanıcı kaynaklı yanlış analiz edilmesi.

Ölçüm sırasında yapıya tutturulan ivmeölçerler, yapıda bir yük artımına sebep olmakta ancak bu yük artımı genellikle ihmal edilmektedir. İvmeölçer kütlelerinin etkisi özellikle doğru frekans ölçümlerinin istendiği durumlarda önem arz etmektedir. Bir sistem üzerine bağlanan bir ivmeölçer o sistemin dinamik özelliklerini bozmakta ve doğal frekansların kaymasına neden olmaktadır. Teorik olarak doğal frekansın değeri, yay katsayısının kütleye oranının kareköküdür. Buna göre ivmeölçerin kütlesi yapının periyodunu artıracaktır. İvmeölçerin kütlesi arttıkça periyot asıl değerinden ciddi bir biçimde uzaklaşacaktır. Bu durum deneysel verilerin doğruluğunu azaltır ve özellikle yapısal değişim tekniklerinde tahmin edilemeyecek hatalara neden olur. Ayrıca ivmeölçerlerin yapıya bağlandığı noktalar da önemlidir. Çünkü ivmeölçerin koyulduğu nokta bir modun düğüm noktası ise ilgili modda ivmeölçer kütlelerinin hiç bir etkisi olmayacaktır. Ancak, ivmeölçerin koyulduğu nokta bir modun en büyük genlikli noktasıysa o zaman bu modda ivmeölçerin kütlesi doğru frekans ölçümünü etkileyecektir. O yüzden ivmeölçer kütlelerinin etkisi her bir mod için farklı etkiler oluşturacaktır [40]. Yapı üzerinden referanslı ölçümler alınacağı zaman, ivmeölçerler her ölçüm için farklı bir yere taşınacağından her ölçümde ivmeölçerin kütle etkisi farklı olacaktır.

Yapıdaki yük artımı hafif ve narin yapılarda yapılan ölçümlerde önemli olmaktadır. Örneğin baraj, köprü, bina vs. gibi büyük yapılara tutturulan bir ivmeölçerin kütlelerinin etkisi ihmal edilebilir fakat küçük ve hafif olan yapılarda ivmeölçerin kütlesi önem arz etmektedir. Laboratuvarda yapılan küçük çaplı çalışmalarda (prototip model, çelik çerçeve vb.) ivmeölçer kütlelerinin etkisinden söz edilebilmektedir.

Yapılan ölçümlerin dinamik karakteristikleri tam olarak yansıtabilmesi için sınır şartlarının doğru modellenmesi gerekmektedir. Laboratuvar ortamında incelenen yapılar çoğunlukla zemin üzerinde veya serbest sınır şartlarında test edilirler. Zemin üzerinde test edilen yapılar civatalar yardımıyla zemine tutturulduğu zaman ankastre özelliği tam olarak sağlanamamış ve az da olsa bir esneklik kalmış olacaktır. Yani tam rijitlik sağlanamayacak

ve yapı bazı hareketlere serbest kalacaktır. Ayrıca testin tekrar edilmesi istenildiğinde, cıvataların önceki deneydeki ile eşit miktarda sıkılma ihtimali çok az olup testin tekrarlanabilirliği kalmayacaktır. Büyük hacimli (baraj, köprü, bina vs.) yapılarda mesnetleme etkisi gerçekte sağlanamadığında, ölçümler mevcut hal için yapı ve analitik modelde değişikliğe gidilerek yapının gerçek hali ortaya koyulmaya çalışılmaktadır.

Büyük hacimli yapılarda en çok tercih edilen dış tahrik sistemi sarsıcılar, modal testte bir yapıya kuvvet uygulamak amacıyla en çok kullanılan tahrik sistemlerinden biridir. Uygulanan kuvvetin yapıya tek bir doğrultuda iletilmesi istenmektedir. Ancak yapı titreşirken meydana gelen eğilme hareketi yüzünden istenmeyen yönlerdeki kuvvet veya momentlerin yapıya aktarılması olabilmektedir. Bunu önleyebilmek için yapı ve sarsıcı arasında kuvvet iletim yönünde rijitlik büyük olmalıdır.

Çevre koşulları, elektronik cihazlar vs. sebeplerden ötürü hemen hemen her deneyde var olan parazitler, FTF kalitesini olumsuz olarak etkileyen en önemli faktörlerden biridir. İvmeölçer bağlantıları, kablolardaki bükümler ve hasarlar, elektrik kablolarında meydana gelen manyetik alan, kısa devre akımları ve yükselticiler ölçüm elemanlarından kaynaklanan parazitlerdir. Analog sinyallerin sayısal sinyallere dönüştürülmesi, cihazın dinamik aralığı (sayısal hassasiyet) ise veri toplama cihazından kaynaklanan parazitlerdir. Çevreden gelen parazitler ise; olumsuz deney ortamı (sıcaklık ve nem gibi), çevredeki radyo frekans dalgaları, yakın çevrede çalışan diğer cihazlar ve zeminde meydana gelen titreşimlerdir. Deney ortamının mümkün olduğu kadar çevresel etkilerden arındırılması, kaliteli cihaz ve aletlerin kullanılması, iyi yalıtımlı kabloların kullanılması, düzgün bir şekilde bükümsüz olarak tutulması ve bağlantılarının sağlam olması, olabilecek şase akımlarının önlenmesi halinde bu parazitlerin etkisi azaltılmış ve kaliteli sonuçlar elde edilmiş olacaktır. Fiziki koşullar ve cihaz özellikleri her ne kadar itina ile ayarlanarak ölçümler alınsa bile parazitlerden tamamen kurtulmak mümkün olmamaktadır.

Bu hatalar her ne kadar engellenmeye çalışılsa da modal analizden kaynaklı bazı sınırlamalar olabilmektedir. Yapıda bütün noktalardan ölçüm alınamaması, yapıya pratik olarak moment uygulanamaması, açısal hareketlerin ölçülmesindeki zorluklar ve frekans ölçüm aralığının sınırlı olmasıdır [40,41].

3.2.4. Dinamik Karakteristiklerin Elde Edilme Yöntemleri

Operasyonel Modal Analiz yönteminde etkinin değeri bilinmemekte ve belirli noktalardan alınan ölçümlerin değerine göre tepki fonksiyonu belirlenmektedir. Bu yüzden literatürde Operasyonel Modal Analiz yöntemine Sadece Tepki Modal Analizi de denmektedir [42]. Ölçüm alınan noktalardan elde edilen titreşimlerin frekans ve zaman tanım alanında algoritmalara sahip yöntemlerde işlenmesi ile dinamik karakteristikler elde edilmektedir [43]. Frekans tanım alanındaki yöntemler, her bir noktada ölçülen sinyalin analizine ve sinyaller arasındaki korelasyon esasına dayanmaktadır. Bunlar, parametrik olmayan yöntemler olarak da isimlendirilmektedir. Zaman tanım alanındaki yöntemler ise her bir noktada oluşan sinyalin zamanla değişimine veya korelasyon fonksiyonlarıyla model uydurmaya dayanmaktadır. [36]. Her iki yöntemin matematik tabanları benzer olup denklem indirgeme teknikleri ve matris oluşturma biçimleri değişerek, birbirlerine göre bazı farklılıklar/üstünlükler bulunmaktadır. Zaman tanım alanında yapılan çözümlerde, gürültüden oluşan sinyaller daha kolay fark edilmekte, sızıntı ve filtreleme işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Birbirine yakın olan frekans değerlerinin tespitinde zaman tanım alanı yöntemini kullanmak daha avantajlı olmaktadır. Her iki yöntem kullanılış maksadına göre sıklıkla tercih edilmektedir. Literatürde frekans ve zaman tanım alanlarına dayalı pek çok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları Tablo 3.1’de gösterilmektedir.

Tablo 3.1. Frekans ve zaman tanım alanlarına dayalı yöntemler

Tanım Alanı	Yöntem
Frekans	Piklerin Seçilmesi
	Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma
	Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma
	Polimax
Zaman	Rastgele Azaltım
	Tekrarlanan
	Maksimum Olasılık
	Stokastik Altalan Belirleme

Bu tez kapsamında kullanılan OMA yazılımı başka herhangi bir programa gereksinim duymadan sinyalleri kendi içinde frekans ve zaman tanım alanında işlemektedir. Deneylerde OMA yazılımının zaman tanım alanından (Time Domain) yararlanılmıştır.

3.2.5. Ölçüm Araçları

Geçmiş bölümlerde bahsedildiği üzere deneysel modal analiz etkinin sayısal değerinin bilinip bilinmesine göre iki gruba ayrılmaktadır. Yapıyı bilinen ve değeri ölçülebilen bir etki ile titreştirme ve yapının bu etkilere karşı gösterdiği tepkiyi ölçme işlemlerine Deneysel Modal Analiz Yöntemi denirken, yapının çevresel şartlar altında titreşmesi ve sadece yapı tepkilerinin ölçülebildiği yöntemde Operasyonel Modal Analiz yöntemi denir. Bu bölümde her iki yöntemde kullanılan ölçüm araçlarından bahsedilmektedir.

3.2.5.1. Titreştiriciler

Deneysel Modal Analiz yönteminde, yapıları titreştirmek amacıyla iki çeşit etkiden yararlanılmaktadır. Bu etkiler ya çevresel (doğal) ya da yapay kaynaklıdır. Çevresel etkiler deprem, yaya hareketi, rüzgâr, dalga hareketi ve taşıt trafik yüklerinden oluşurken; yapay titreştiriciler olarak sarsıcılar, sarsma tablaları ve darbe çekiçleri tercih edilmektedir. Yapıca büyük ve rijit betonarme yapı, baraj, köprü gibi mühendislik yapılarının deneysel ölçümlerinde daha çok çevresel etkiler dikkate alınmaktadır. Hem çok sayıda darbe çekici vb. titreştiricilerin kullanılması hem uygulanabilirlik hem de ölçüm maliyetini arttıracığından doğal kaynaklı titreştiricilerden yararlanmak daha mantıklı olmaktadır. Yapay titreştiriciler genellikle hacimce daha küçük ve çevresel etkilerin daha az olduğu yapılarda değerlendirilmektedir.

3.2.5.1.1. Sarsıcılar

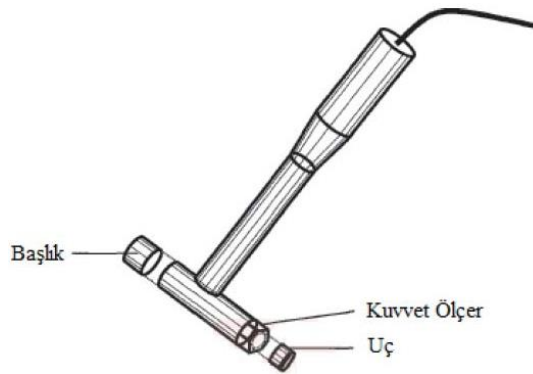
Çoğunlukla arazi üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarda mühendislik yapılarını titreştirmek amacıyla kullanılmaktadırlar. Yapıya ankastre monte edilerek doğru güç aktarımı sağlanması gereken bu cihazlar ölçüm süresince yapı ile sürekli temas halinde olmalıdır. Sarsıcının mekanik özellikleri ölçüm alınacak yapının türü ve frekans aralığına göre değişebilmektedir. Yapıda farklı dalga hareketleri istenilen 3 yön içinde uygulanabilmektedir. Sarsıcılar; elektro-manyetik, elektro-hidrolik ve mekanik olarak üçe ayrılmaktadır. Şekil 3.4’de çeşitli tiplerdeki sarsıcılar gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Çeşitli tiplerdeki sarsıcılar

3.2.5.1.2. Darbe Çekiçleri

Yapıların titreştirilmesinde çokça kullanılan diğer bir yöntem olan darbe çekiçleri, daha ziyade orta ölçekli mühendislik yapıları veya laboratuvar modellerinin titreştirilmesinde kullanılmaktadır. Darbe çekiçleri, başlığı ve ucu değiştirilerek farklı frekans seviyelerinde titreşimler üreten bir çekiçten ibarettir. Betonarme, çelik, yığma vb. yapılarda malzeme özelliği değişkenlik gösterdiğinden darbe çekici yumuşak, orta ve sert başlıklar kullanılarak yapı titreştirilmektedir. Yaygın olarak kullanılan bir darbe çekici Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Basit bir darbe çekici

Yapıya uygulanan kuvvet, çekicinin ucuna yerleştirilen kuvvetölçerlerle ölçülür ve ölçülen kuvvetin yapıya uygulanan kuvvete eşit olduğu kabulü yapılır. Uygulanan kuvvetin

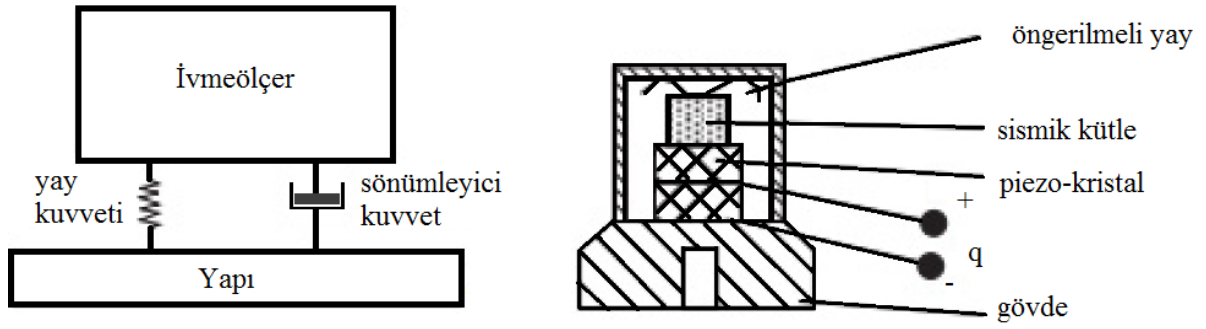
büyüklüğü, çekicin başlığının kütlesine ve vurulma andaki hızına bağlı olarak tespit edilebilir. Çekiç başlığının kütlesi değiştirilerek istenilen kuvvet uygulanabilmektedir. Çekiç testlerinde bazı zorluklar vardır. Bu zorluklar her bir darbenin birbiriyle aynı veya ona yakın olması ve kuvvetin yüzeyin normali doğrultusunda uygulanması gerekliliği olarak söylenebilir. Ayrıca, çekiçle vurulduktan sonra çekicin geri tepmemesi gerekir, yani her ölçüm için yapıya bir kez vurmak gerekir [3]. Farklı modellerdeki darbe çekiçleri Şekil 3.6’da görülmektedir.



Şekil 3.6. Farklı modellerdeki darbe çekiçleri [44]

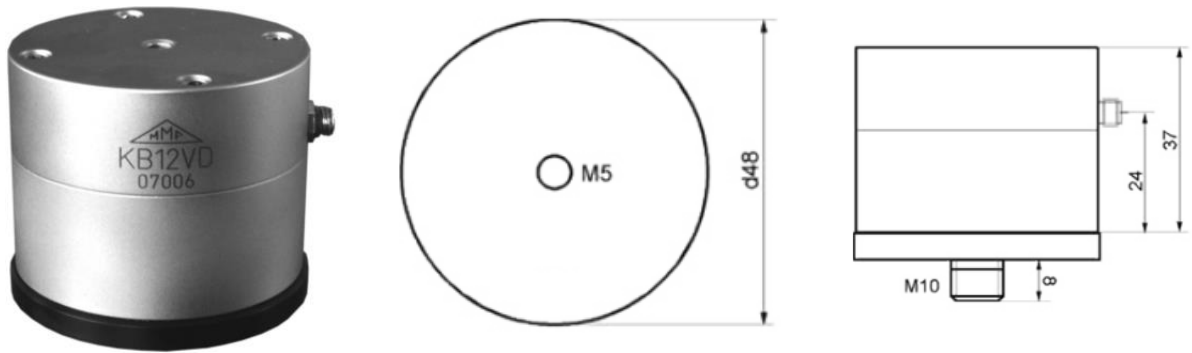
3.2.5.2. İvmeölçerler

Deneysel Modal Analiz yöntemi ile yapıdaki titreşimleri ölçmedeki en önemli hususlardan biri de yapının türüne ve frekans aralığına göre uygun ivmeölçerleri seçmektir. Pek çok ivmeölçer türü mevcut olup, yapısal titreşimlerin ölçümünde genellikle piezoelektrik ivmeölçerler tercih edilmektedir. Sinyal sağlayıcı ya uzaktan kontrol edilir ya da ivmeölçerin içerisine yerleştirilir. Piezoelektrik ivmeölçerler okuma ve kaydetme yapabilen ancak analiz ekipmanlarına bağlanılmaya gereksinim duyan araçlardır. Harici güç kaynağına ihtiyaç duymamaları, hareket eden parçalarının olmaması, gürültüden etkilenme dereceleri çok düşük olmaları ve geniş bir frekans ölçüm aralığına sahip olmaları diğer ivmeölçerlere göre avantajlı yönleridir. Piezoelektrik sensörler temel doğal frekansı 1’den büyük ölçümler için uygundur [45]. Şekil 3.7’de görüldüğü gibi bu tip ivmeölçerler, kütle-yay-sönümleyici sisteminden oluşmaktadır [36]. İvmeölçerlerin içerisinde sinyali taşınabilir voltaj sinyaline çeviren bir sinyal koşullayıcı devre bulundurmaktadır. Bu sayede üretilen sinyal veri toplama ünitesine aktarılmaktadır [7].



Şekil 3.7. Piezoelektrik tipi ivmeölçerin iç mekanizması

Tez kapsamında, ölçümlerde KB12VD tipi tek eksenli ivmeölçerler kullanılmış olup, bu ivmeölçerlerin dış görünüşü Şekil 3.8’de ve teknik özellikleri ise Tablo 3.2’de verilmektedir.



Şekil 3.8. KB12VD tipi tek eksenli ivmeölçer [46]

Tablo 3.2. KB12VD tipi tek eksenli ivmeölçere ait bazı özellikler [47]

Frekans Aralığı (Hz)	0.08-260
Hassasiyet (mV/g)	10000
Maksimum İvme (g)	± 0.6
Çalışma Sıcaklığı (°C)	-20 ile +80 arası
Ağırlık (gram)	150
Yükseklik (mm)	37
Çap (mm)	48

Tablo 3.2’deki özellikler kullanılan ivmeölçerlerin ölçebileceği maksimum ve minimum frekans aralığını, hassasiyet ivmeölçerlerin yerçekimi ivmesiyle orantılı üretebileceği elektrik gücünü, maksimum ivme değeri elektrik sinyali bozulmadan veya kaybolmadan ivmeölçerlerin ölçebileceği ivme genliği aralığını, çalışma sıcaklığı ise ivmeölçerlerin sağlıklı sinyal üretebileceği maksimum ve minimum ortam sıcaklığını göstermektedir.

Ölçüm işleminde önemli olan diğer bir husus ivmeölçerin bağlandığı yer ve bağlanma şeklidir. İvmeölçeri ölçülecek sisteme tuttururken vidalı, yapışkanlı vb. birkaç farklı yöntem kullanılmaktadır. Her bir tutturma yönteminin avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Bu yüzden, ölçülecek yapı ve kullanılacak ivmeölçer türüne göre uygun bağlantı düzeni oluşturulmalıdır [48]. Bu tez kapsamında kullanılan KB12VD tipi ivmeölçerler çelik bir levhaya tutturulup levha da yapıya dübellere yardımıyla tutturularak ölçümler yapılmıştır.

3.2.5.3. Veri Toplama Sistemi

İvmeölçerlerin yapıdan aldıkları sinyaller doğrudan ya da bazı koşullama programlarından geçirildikten sonra veri toplama sistemine aktarılıp, bu sinyaller ölçüm geometrisine bağlı olarak derlenmektedir. Aktarılan sinyaller işlenmemiş olup içerisinde ortam gürültülerini (insan sesi, rüzgâr sesi vb.) barındırmaktadır. Bu da yapıya ait karakteristiklerin doğru bir biçimde belirlenmesini engellemektedir. Veri toplama sistemi kendi içerisinde sinyal koşullama işlemini gerçekleştirerek sonuçlara; düşük seviyedeki sinyallerin kalitesini arttırmak, ortam gürültülerinden kaynaklı sinyallerin etkisini azaltmak, istenmeyen sinyalleri filtrelemek, ivmeölçerlerin davranışlarını kontrol etmek gibi faydalar sağlamaktadır. Uygulanan işlemlerden en önemlisi ise istenmeyen sinyallerin filtrelenmesi olayıdır. Çünkü sinyaller düşük bir hızda ölçülürse yüksek frekans içeriğine sahip sinyaller, düşük frekanslara sahipmiş gibi algılanacak ve yapılan ölçüm hatalı olacaktır.

Bu tez çalışmasında, gerçekleştirilen deneysel ölçümlerde OROS-OR36 Çok Kanallı Gürültü ve Titreşim Analizörü kullanılmıştır (Şekil 3.9). Bu cihazın veri toplama ünitesi 16 kanallı ivmeölçer giriş devresine, ayrıca zorlanmış titreşim testlerinde darbe çekicinden gelen etki sinyallerini belirlemek için kuvvet sensörü girişine sahiptir. OROS-OR36 Çok Kanallı Gürültü ve Titreşim Analizörüne ait teknik özellikler Tablo 3.3’de verilmiştir.

İvmeölçerler yardımıyla alınan sinyallerin işlenmesi ile mevcut yapının dinamik karakteristikleri belirlenmektedir. Sinyaller veri toplama sisteminde koşullama işlemine tabi tutularak bilgisayar ortamına aktarılır. Sinyal işleme geliştirilen özel yazılımlar ya da mevcut programın içindeki yazılımlar yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Sinyaller bilgisayara zaman ortamında aktarılıp, istenildiğinde Fourier serileri kullanılarak frekans ortamına geçiş sağlanabilmektedir.



Şekil 3.9. OROS-OR36 Çok Kanallı Gürültü ve Titreşim Analizörü

Tablo 3.3. OROS-OR36 Çok Kanallı Gürültü ve Titreşim Analizörü'nün Özellikleri [49]

Giriş Sayısı	16
DC Kanallar	4 Blok
Filtreleme	Mevcut
Çıkış	DC 40 kHz- ±10V aralığı
Harici hard disk	60 Gb
Ağırlık	5.2 kg
Boyutlar (w,h,d)	114 x 280 x 350 mm

3.2.6. Modal Parametrelerin Kontrolü

İki modal modelin birbiriyle uyumlu olup olmadığının anlama konusundaki en yaygın ve basit yaklaşım, doğal frekanslarının karşılaştırılmasıdır. Doğal frekanslar arasında denklem (3.1)'deki gibi bir fark yüzdesi tanımlanabilir.

$$\delta_f = \frac{|f_{dj} - f_{aj}|}{f_{dj}} \quad (3.1)$$

Burada f_{dj} ve f_{aj} sırasıyla j. modun deneysel ve analitik frekanslarıdır.

Analizciler, grafiksel olarak mod şekillerini ve direkt olarak frekans değerlerini karşılaştırarak modellerin uyumu hakkında genel bir bilgiye sahip olmaktadır.

Modal parametrelerin kontrolü, yapılan analizlerin doğruluğunun ispatı ve kalitesinin değerlendirilmesi için gerekli olan bir işlemdir. Yapılacak bu kontroller sayesinde en iyi modal model oluşturulabilecektir. Günümüzde bu kontrolleri gerçekleştirebilmek için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bu tekniklerden bazıları; modal güvence kriteri (MGK),

frekans tepki fonksiyonu matrislerinin sentezlenmesi, modal faz doğruduşlığı ve stabilite diyagramları olarak sıralanabilir. Tez kapsamında modal güvence kriteri kullanıldığı için bu teknik açıklanmıştır.

3.2.6.1. Modal Güvence Kriteri (MGK)

Modal güvence kriteri (MGK) daha çok, farklı yöntemler kullanılması ile oluşan mod şekillerinin kıyası ya da bir yöntem kullanılarak oluşan mod şekillerinin doğruluğunun belirlenmesinde kullanılır. MGK'nin aşağıdaki gibi daha birçok kullanım amacı mevcuttur:

- Deneysel modal modellerinin geçerliliği,
- Analitik modal modelleri ile korelasyon (mod eşleştirme),
- Analitik ve deneysel modal modelleri arasında eşleştirme matrisi,
- İşletim yanıt vektörleri ile korelasyon,
- Analitik ve deneysel modal modelleri arasında eşleştirme matrisi,
- Modal vektör hata analizi,
- Modal vektör ortalama,
- Deneysel modal vektör tamamlama ve/veya genişletme,
- Modal parametre tahmin algoritmalarında modal vektör tutarlılığı/stabilite,
- Tekrarlanan ve sözde tekrarlanan köklerin tespiti,
- Yapısal arıza/hasar tespiti,
- Kalite kontrol değerlendirmeleri,
- Optimum ivmeölçer yerleştirme [50].

İki mod şekli arasındaki modal güvence kriteri Denklem (3.2)'deki gibi ifade edilir [48].

$$MGK(\psi_a, \psi_d) = \frac{|\psi_a^T \psi_d|^2}{(\psi_a^T \psi_a)(\psi_d^T \psi_d)} \quad (3.2)$$

Burada; ψ_a analitik ve ψ_d deneysel mod şeklini ifade etmektedir. Analitik ve deneysel mod şekilleri birebir aynı ise MGK değeri 1 olmalı, farklı ise bu değer 1'den küçük olmalıdır. MGK değeri hesaplanırken şu hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir:

- Her iki modelin mod şekilleri aynı sayıda eleman içermelidirler.
- İvmeölçerler bırakılan noktaların her iki modelde de karşılığı olmalıdır.

- Modal vektörlerde normalleştirme yapılarak birbirleri ile kıyaslanabilecek formata getirilmelidirler.

Modlar arasında uygun bir eşleşme olursa, MGK matrisinin köşegenlerinin yüksek değerleri (>0.9) iyi bir korelasyonu ve 0.05 den düşük olan değerleri de korelasyon sağlanamamış olan modları gösterir [5].

4. SONLU ELEMAN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Yapılar deprem, rüzgâr, trafik yükü gibi çeşitli dinamik etkilere maruz kalmaktadır. Yapıların dinamik yükler etkisi altında ayakta kalabilmeleri için çeşitli tedbirlerin alınması gerekmektedir. Uygun tedbirlerin alınması mevcut yapıların dinamik davranışlarının iyi bilinmesine bağlıdır. Yapının dinamik karakteristikleri (doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları) mod birleştirme yöntemi ile dinamik davranışı belirlemede kullanılırken, aynı zamanda analitik modelin doğruluğunun kontrolünde de yardımcı olmaktadır. Yapıların projelerinden elde edilen bilgilerin yanı sıra arazi üzerinde yapılan ölçümler dikkate alınarak; malzeme özellikleri, sınır şartları ve eleman boyutları belirlenip; bu bilgiler yardımıyla oluşturulan sonlu eleman modellerinin modal analizleri neticesinde dinamik karakteristikler analitik olarak bulunmaktadır. Dikkate alınan bu karakteristikler, yapıdaki çatlama, yorulma, mesnet çökmesi ve inşaat sırasındaki işçilik hataları gibi nedenlerden dolayı beklenen değerlerinden uzaklaşmış olabilmektedir [2]. Analitik yöntemler yardımıyla bulunan dinamik karakteristikler, yapıların deprem davranışlarını belirlerken doğru olmayan analiz sonuçları vereceği düşünülmektedir. Deneysel yöntemler ise yapının mevcut durumu üzerine uygulandığından, elde edilen dinamik karakteristikler yapının o andaki mevcut durumunu yansıtmaktadır. Analitik çözümlerin deneysel yöntemler kullanılarak doğrulanması ile daha gerçekçi sonuçlar elde edilecektir.

Betonarme yapıların geometrileri karmaşık bileşenler içerebilmektedir. Taşıyıcı sistemlerde bu durumla pek karşılaşılmasa da dekoratif olan ve mimari detaylar içeren elemanlarda bu daha fazla olmaktadır. Görsel estetiğin daha ön plana çıktığı bazı betonarme yapılarda yapının analizlerinde bu elemanların doğru modellenmesi gerekmektedir. Bu yüzden modellemede elemanlar doğrusal parçalara bölünerek ve mimari detaylar sadeleştirilerek gerçek eleman geometrileri oluşturulmalıdır. Geometrik idealleştirmeler yapılırken; yapı elemanlarının gerçek şekil ve konumlarına uygun olması, farklı analitik modeller arasından yapı davranışını en iyi hangi modelin temsil ettiğini belirleyebilmek için çok alternatifli çözümler uygulanması dikkat edilmesi gereken noktalardan biridir [51].

Sonlu eleman modelinin güncellenmesi deneme-yanılma ve optimizasyon tekniği olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Modelde güncelleştirme yapılırken, belirsizliklerde (malzeme özellikleri, sınır şartları, bilinmeyen kesit boyutları vs.) yeniden bir veya birçok

kez düzenleme yapılarak yapının mevcut halini temsil eden model elde edilmektedir. Eğer bu belirsiz parametrelerin düzenlenmesi ile model iyileştiriliyorsa Deneme-Yanılma Yöntemi kullanılmış olmaktadır. Deneme-Yanılma Yöntemine benzeyen Optimizasyon Yönteminde ise belirsiz olan parametreler için belirli aralıkta değerler tanımlanır ve bu her değer için ayrı ayrı yapılan analizler sonucu model güncellenmektedir. Yapılan her bir analiz sonucu deneysel verilerle karşılaştırılarak, deneysel verilere en yakın değerler için sonlu eleman modeli düzenlenmektedir. Bu da yapının mevcut durumunu en iyi temsil eden sonlu eleman modeli olmaktadır [39].

5. SAYISAL UYGULAMA

Tez çalışmasının bu bölümünde, yapıların mevcut durumlarını tespit edebilmek ve sonuçları değerlendirebilmek amacıyla deneysel ölçümler gerçekleştirilip, iki aşamada güncel analitik model elde edilmiştir. Deneysel ölçümler, 5 katlı bir betonarme yapıda yapılan uygulama ile gösterilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, sırasıyla başlangıç analitik model oluşturulmuş, çevresel titreşimler altında ölçümler yapılmış, başlangıç analitik model deneysel ölçüm verilerine göre güncellenmiş ve güncel analitik model elde edilmiştir. Deneysel ölçümlerdeki hesap adımlarının ayrıntıları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

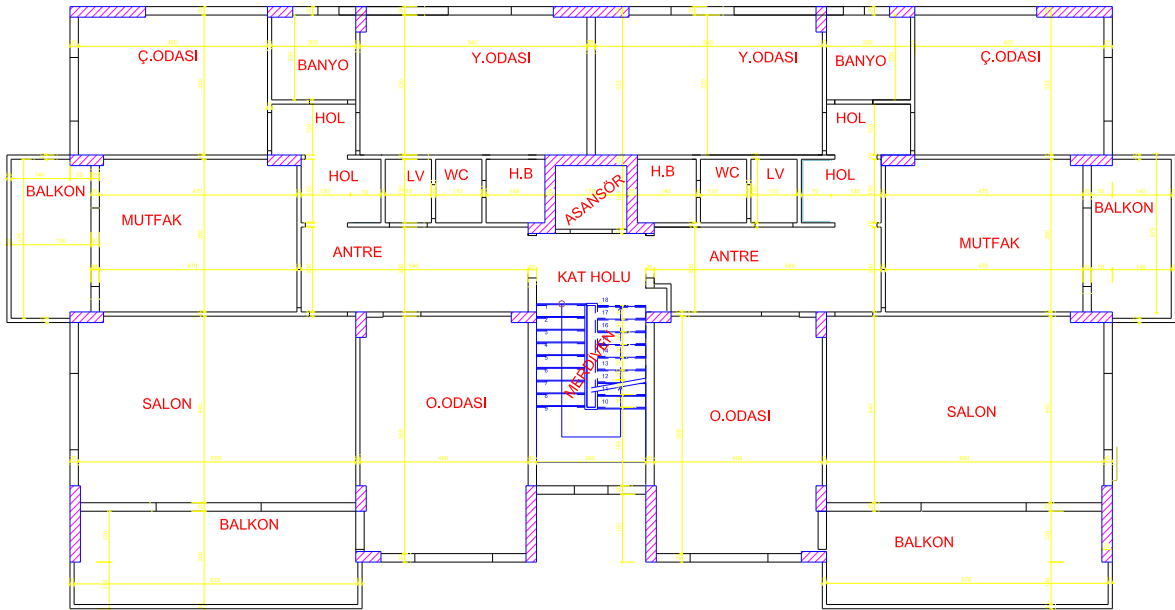
- Başlangıç analitik model oluşturulur. Frekans ve mod şekilleri belirlenir.
- Çevresel şartlar altındaki ölçümler gerçekleştirilir.
- Başlangıç analitik model güncellenir.
- Deneysel ölçümlerin alındığı düğüm noktaları ile analitik modeldeki o düğüm noktaları eşleştirilir.
- Deneysel ve analitik ölçümlerdeki mod şekilleri görsel olarak karşılaştırılır.
- Frekans değerleri arasındaki yakınlık/uzaklık oranı belirlenir.
- Şekil fonksiyonlarına bağlı olarak modal güvence kriteri bulunur.
- Yapının mevcut durumu göz önüne alınarak güncelleme yapılır.
- Güncellenen modele bağlı olarak, değerlendirme ve istenilen hesaplar yapılır.

5.1. Modelin Özellikleri

Tez kapsamında, Elazığ ili Doğukent Mahallesi Ada:1771 Parsel: 17 üzerine Bodrum+5 kat ve her katta 2 daire olarak iki blok halinde inşa edilen, Karabulut sitesinin A bloğunun (Şekil 5.1, 5.2), teorik ve deneysel analizleri yapılmıştır.



Şekil 5.1. Karabulut Sitesi A Blok



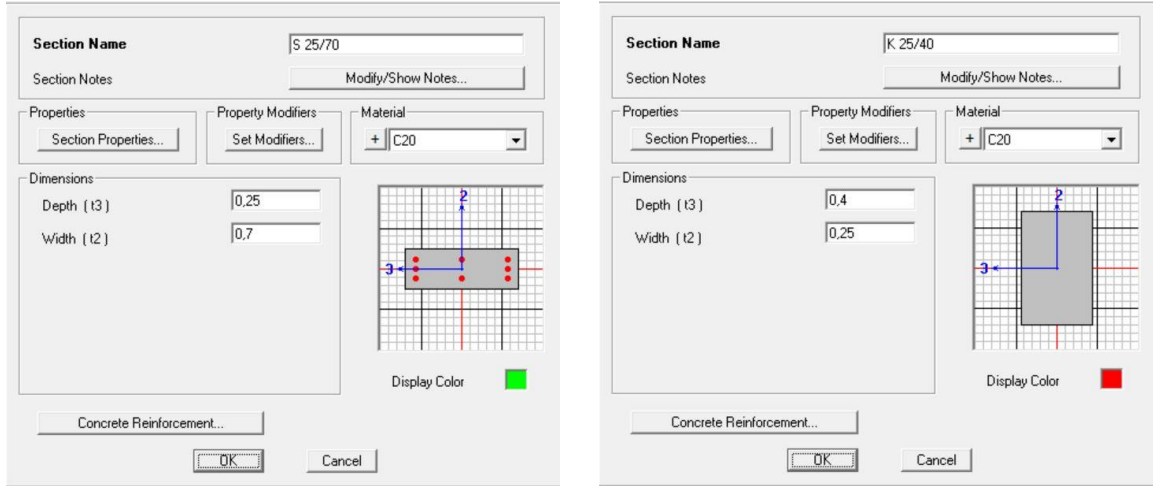
Şekil 5.2. Karabulut Sitesi A Blok Normal kat mimari planı

5.2. Yapının Analitik Olarak Dinamik Karakteristiklerinin Bulunması

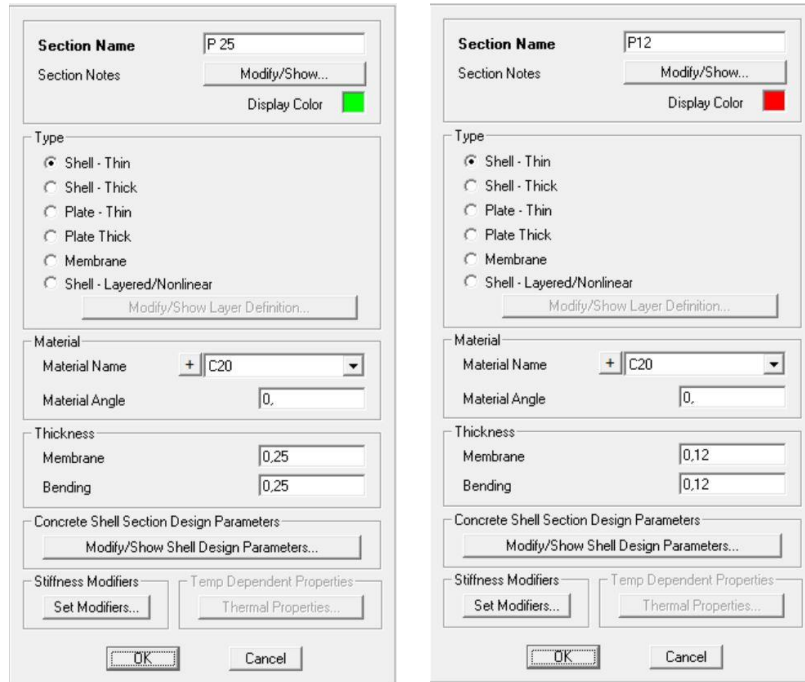
Deneysel ölçümünün gerçekleştirilmesi planlanan betonarme yapının başlangıç analitik modeli oluşturularak modelin frekans ve mod şekilleri elde edilir. Güncellenmemiş bu model ışığında, deneysel ölçümler ile bulunan frekans ve mod şekillerinin doğruluğu hakkında bilgi sahibi olunur.

5.2.1. Başlangıç Analitik Modelin Oluşturulması

Betonarme yapının analitik modeli SAP2000 sonlu eleman paket programı ile oluşturulmuştur [52]. Sistemdeki kolon ve kiriş elemanlar çubuk (frame) elemanlarla, perdeler kabuk (shell) elemanlarla modellenmiştir. Döşemeler rijit diyafram olarak kabul edilmiştir. Kullanılan eleman tipleri Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de sunulmuştur.



Şekil 5.3. Kolon ve kiriş çubuk elemanları



Şekil 5.4. Perde ve döşeme kabuk elemanları

Başlangıç analitik modelde beton sınıfı, proje beton sınıfı ile aynı olarak C20 alınmıştır. (Şekil 5.5).

General Data

Material Name and Display Color: C20

Material Type: Concrete

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 23563,122

Mass per Unit Volume: 2402,7696

Units: N, m, C

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 2,800E+10

Poisson's Ratio, U: 0.2

Coefficient of Thermal Expansion, A: 9,900E-06

Shear Modulus, G: 1,167E+10

Other Properties for Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, f'c: 25000000

☐ Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

☐ Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Şekil 5.5. Başlangıç analitik modeldeki beton sınıfı

Yapının sonlu eleman modeli oluşturulurken 592 adet çubuk, 1736 adet kabuk eleman kullanılmıştır. Duvarların yapı davranışını etkilediği düşünülerek, bu elemanların etkisi eşdeğer diyagonal basınç çubuklarıyla yapının sonlu eleman modelinde dikkate alınmıştır.

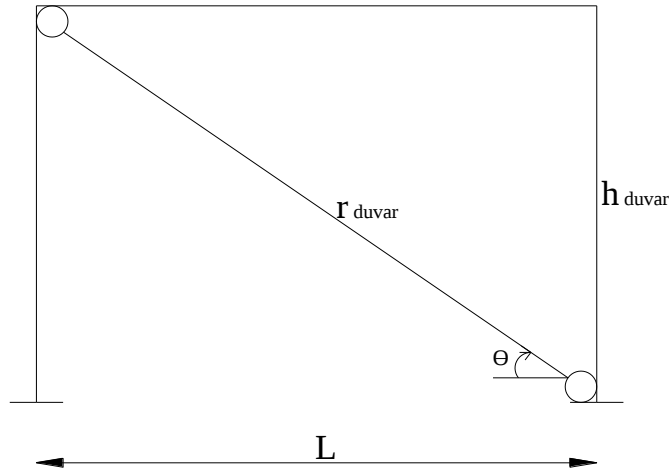
5.2.1.1. Bölme Duvarların Yapı Davranışına Etkisi

Yapı sistemlerinin analizlerinde, duvarların genellikle taşıyıcı özelliklerinin olmadığı düşünülür ve depreme karşı tasarımda sadece kütle olarak göz önüne alınırlar. Bunun nedeni olarak; duvar malzemelerinin dayanımlarının çok değişken olması ve duvar dayanımına önemli katkısı olan iççiliğinin çok değişken ve güvenilirmez olması görülmüştür [53]. Fakat bütün duvarların deprem yükleri karşısında taşıma güçlerine ulaşana kadar perde duvar gibi davranış sergilediği, betonarme çerçeveli yapılarda kolonlar arasındaki duvarların sınırlı da olsa yatay yük taşıma gücü olduğu belirlenmiştir.

Duvarların çerçevelerle etkileşimi, yapının yatay yükler altındaki yük taşıma kapasitesi, rijitlik, sönüm ve titreşim periyodu gibi başlıca kavramlar bakımından yapı sistemlerinin

davranışını olumlu ve/veya olumsuz yönde etkilediği pek çok araştırmacı tarafından tespit edilmiştir [54,59]. Ancak bu etkiler; duvarların içerdiği boşluklar, üstündeki sıva ve kaplama malzemeleri, kolon ve kirişlere olan bağlantısı gibi birçok değişkene bağlıdır. Bu yüzden duvarların gerçek durumunu yansıtan modelleme kolay bir biçimde yapılamamaktadır [60].

Çerçeve sistem ve duvar etkileşiminde yatay yük seviyesinin düşük değerleri için, betonarme çerçeve ve duvar birlikte hareket etmektedirler. Sistemde yatay deformasyonlar arttıkça, çerçeve eğilme modunda hareket etmek isterken duvar buna engel olmaktadır. Artan yükler altında çerçeve ve duvar birleşiminde açılmalar meydana gelmektedir. Bu açılmalar ilk başta çekme çaprazındaki karşılıklı iki köşe civarında bir bölgede başlamakta ve yük seviyesi arttıkça genişlemektedir. Basınç yükü taşıyan bu bölge, dış yükler etkisindeki çerçeve sistemlerin lineer olmayan statik çözümlenmesinde birçok araştırmacı tarafından eşdeğer bir sanal çubuk ile temsil edilmiştir [61,70]. Duvarı temsil eden eşdeğer diyagonal basınç çubuğu örneği Şekil 5.6’da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Duvarı temsil eden eşdeğer diyagonal basınç çubuğu örneği

Eşdeğer diyagonal basınç çubuğunun malzeme özellikleri ve geometrisi için pek çok çalışma yapılmıştır. Tez kapsamında diyagonal basınç çubukları 2007 Deprem Yönetmeliğinin öngördüğü şekilde modellenmiştir. Söz konusu çubukların elastisite modülü 5000 MPa ve birim hacim ağırlığı $1,5 \times 10^{-5}$ MPa olarak kabul edilmiştir. Duvar kalınlığı projedeki haliyle dış ve iç duvarlar için sırasıyla 25 ile 15 cm alınmıştır. Çubuk genişliği 2007 Deprem Yönetmeliğinin [71] önerisi doğrultusunda

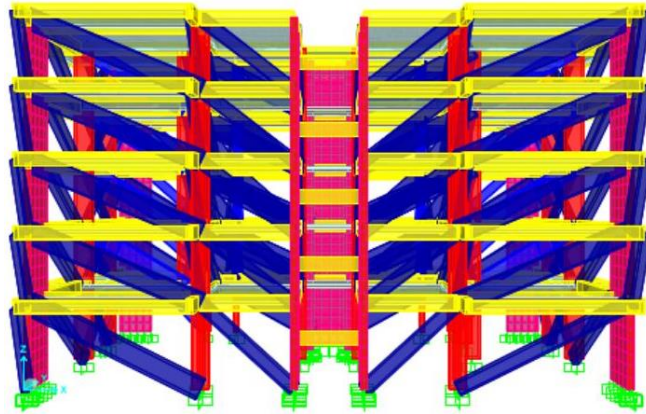
$$a_{duvar}=0.175(\lambda_{duvar} h_k)^{-0.4} r_{duvar} \quad (5.1)$$

denklemleriyle elde edilmiştir. Burada a_{duvar} çubuk genişliğini (mm) , h_k kolon boyunu (mm), r_{duvar} dolgu duvar köşegen uzunluğunu (mm) temsil etmektedir. λ_{duvar} katsayısı ise

$$\lambda_{duvar}=\left[\frac{E_{duvar} t_{duvar} \sin 2\theta}{4E_c I_k h_{duvar}}\right]^{\frac{1}{4}} \quad (5.2)$$

eşitliği ile verilmektedir. Burada E_{duvar} ve E_c dolgu duvar ve çerçeve betonu elastisite modüllerini, t_{duvar} ve h_{duvar} dolgu duvar kalınlığı ve yüksekliğini (mm), I_k kolon atalet momentini (mm⁴) ve θ ise ilgili köşegenin yatay ile yaptığı açiyı göstermektedir.

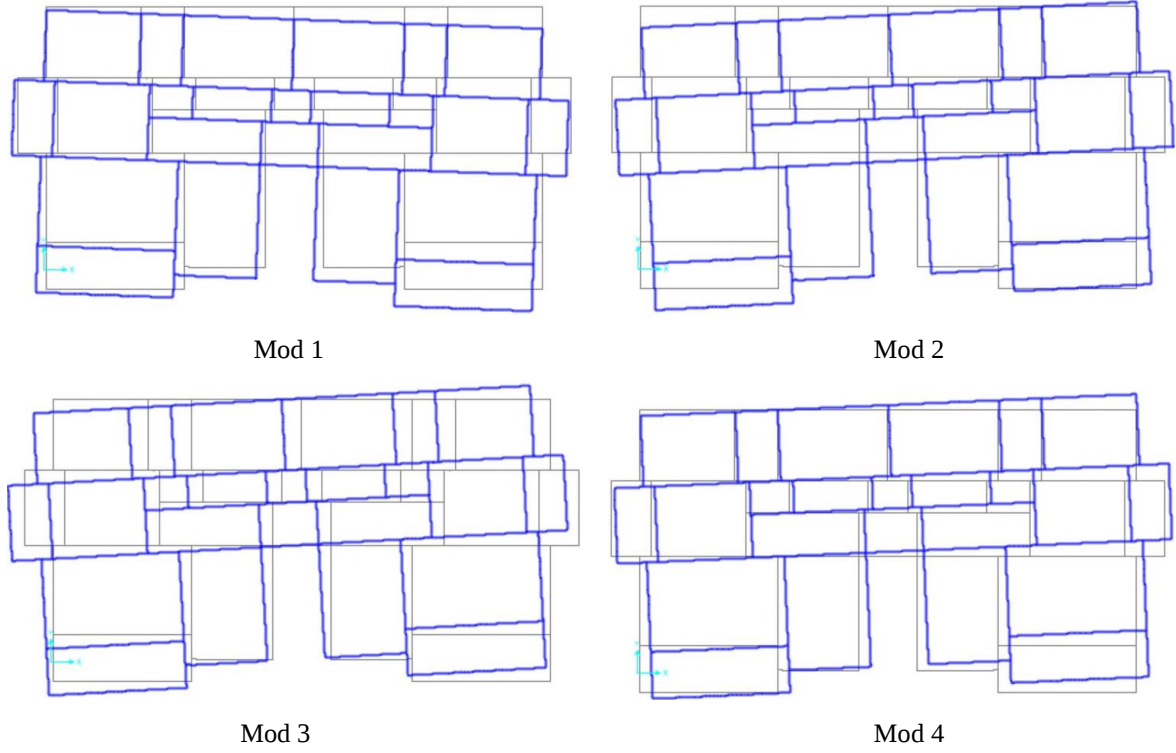
Tez kapsamında, yapının doğrusal titreşim analizinde yapının simetrisine uygun olarak, duvarların etkisini temsil eden bu eşdeğer diyagonal çubuklar yerleştirilmiştir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. Yapının sonlu eleman modeli

5.2.2. Başlangıç Analitik Modelin Modal Analiz Sonuçlarının Alınması

Başlangıç analitik modeli kullanılarak yapılan modal analizden elde edilen ilk dört frekans ve bu frekanslara ait mod şekilleri sırasıyla Şekil 5.8 ve Tablo 5.1’de sunulmuştur.



Şekil 5.8. Başlangıç analitik modeli kullanılarak elde edilen ilk dört mod şekli

Tablo 5.1. Başlangıç analitik modele ait ilk dört frekans

Frekans Numarası	Frekans Değerleri (Hz)
1	2,9
2	3,01
3	3,71
4	8,93

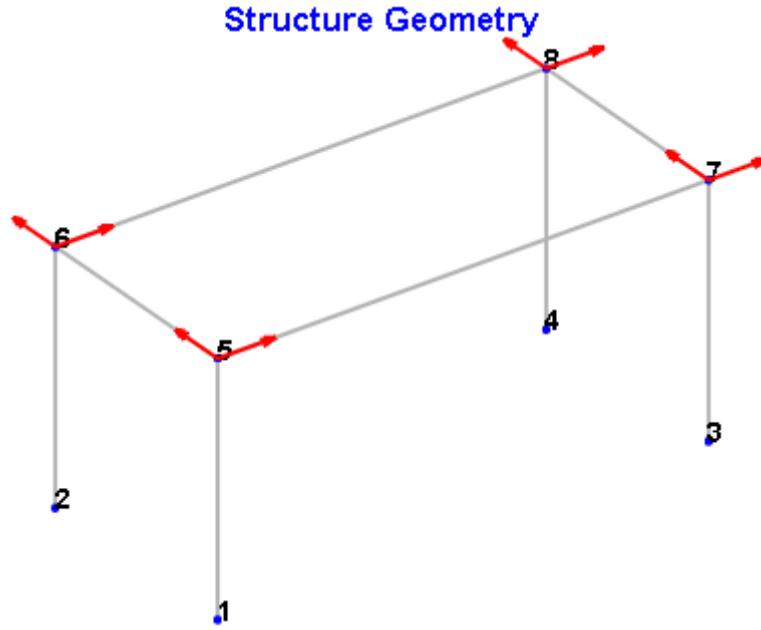
5.3. Yapının Deneysel Olarak Dinamik Karakteristiklerinin Bulunması

Yapının gerçek dinamik karakteristiklerini yansıtan değerler, deneysel olarak yapılan ölçümler ile elde edilmiştir.

5.3.1. Deneysel Ölçüm Düzeneklerinin Oluşturulması

Yapının deneysel ölçümlerinde OMA yöntemi uygulanmıştır. Ölçümler sadece yapının 4. katında yapılmıştır. Bu katta ölçüm yerleri döşeme üzerinde binanın dört köşesine yakın noktalar olarak seçilmiştir. Her bir noktaya “x” ve “y” yönlerinde olmak üzere iki

ivmeölçer yerleştirilerek, toplamda 8 adet ivmeölçer kullanılarak referanssız ölçüm gerçekleştirilmiştir. Sistemin geometrisi ve ivmeölçer yönleri Şekil 5.9’da sunulmuştur.



Şekil 5.9. Sistemin geometrisi ve ivmeölçer yönleri

Analizlerde kullanılan 8 ivmeölçerin teknik özelliği Tablo 5.2’de sunulmuştur.

Tablo 5.2. Analizlerde kullanılan 8 ivmeölçerin teknik özelliği

Etiket Numarası	Hassaslık (v/g)
13031	9.695
13032	9.285
13033	9.368
13034	9.179
13035	9.234
13037	9.884
13038	9.248
13039	9.278

KB12VD tipi ivmeölçerler çelik bir levhaya, levha da yapıya dübeller yardımıyla tutturularak ölçümler yapılmıştır (Şekil 5.10)



Şekil 5.10. Levha yardımıyla yapıya tutturulan KB12VD tipi ivmeölçerler

5.3.2. Deneysel Ölçümün Gerçekleştirilmesi

Yapının operasyonel modal analizleri esnasında çevresel faktör olarak insan hareketi ve trafik etkisinden yararlanılmıştır. Bu etkiler altındaki yapının ön testleri (sonlu eleman modeli çözümleri ve yerinde geniş frekans aralığına bağlı ölçümler) yapıldıktan sonra, ölçüm frekans aralığı ve süresi vs. parametreleri belirlenmiştir. İlgili parametreler paneli Şekil 5.11’de gösterilmiştir.

Freq Start	Freq Range	Spectral Lines	Sampling Time	Overlap	Average Type	Average No	Window Type
0 Hz	10 Hz	1601	160.00 s	0 %	Peak hold	3	Uniform

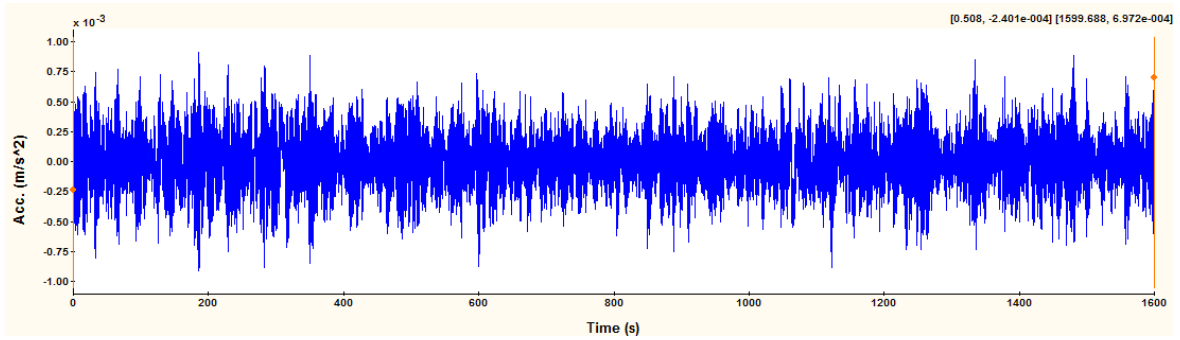
Şekil 5.11. Parametreler Paneli

Parametreler panelinden de anlaşılabacağı üzere, her bir ölçüm 160 saniye olmak üzere ölçümler üç kere tekrarlanarak 480 saniyede gerçekleşmiştir. Ölçüm düzeneğine dair fotoğraf Şekil 5.12’de sunulmuştur.

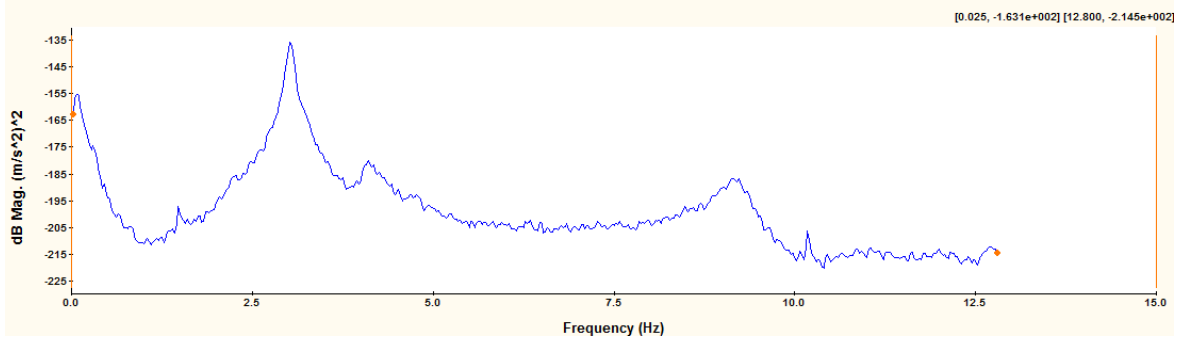


Şekil 5.12. Ölçüm düzeneği

Ölçümlerden alınan ham sinyallerin işlenmesi ile dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Sinyaller işlenirken, çıkış sinyal genliğinde düzensiz artışlar/azalışların olmaması, alınan sinyallerde gürültü titreşiminin olmadığını göstermektedir (Şekil 5.13). Çıkış sinyallerine ait spektral yoğunluk matrisi ise modların hangi piklerde oluştuğu hakkında ön bilgi verecektir (Şekil 5.14).



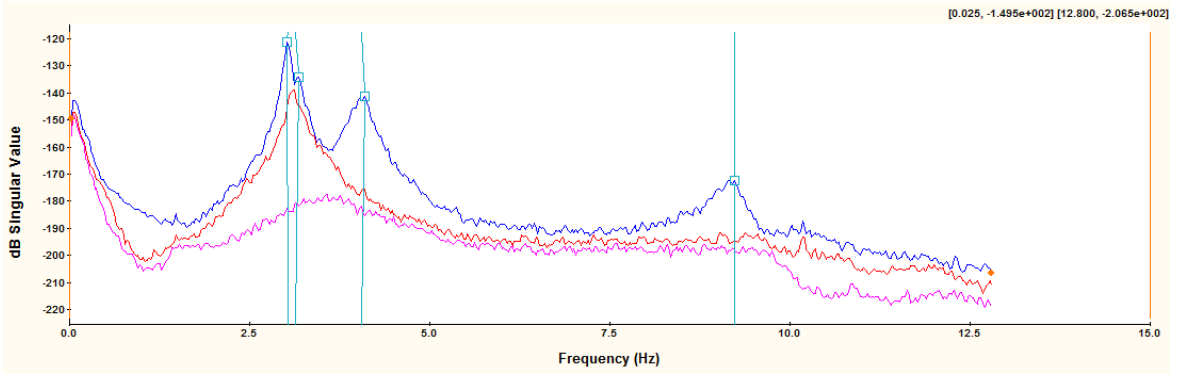
Şekil 5.13. Çıkış sinyal genliği



Şekil 5.14. Çıkış sinyallerine ait spektral yoğunluk matrisi

5.3.2. Deneysel Ölçüm Sonuçlarının Alınması

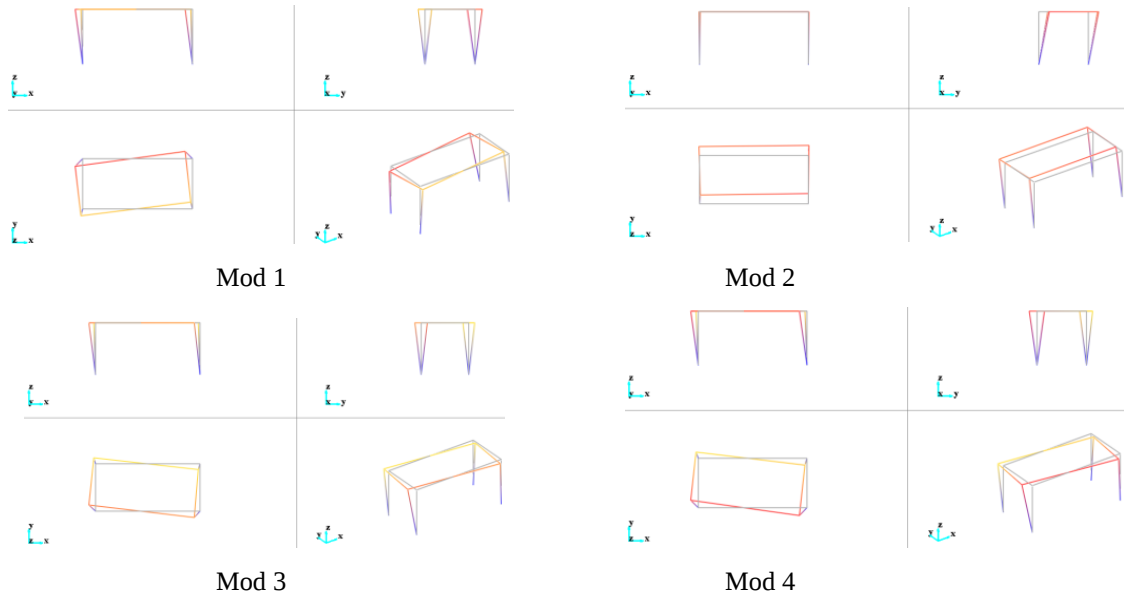
Ölçümlerden bulunan ham sinyaller işlenerek Modal Gösterge Fonksiyonu oluşturulmuştur. Bu fonksiyon yardımıyla frekanslar seçilmiş ve mod şekilleri elde edilmiştir. Modal gösterge fonksiyonundan seçilen frekanslar Şekil 5.15’de, frekans ve sönüm oranı değerleri Tablo 5.3’de ve bu frekanslara ait mod şekilleri Şekil 5.16’da, sunulmuştur.



Şekil 5.15. Modal Gösterge Fonksiyonundan seçilen frekanslar

Tablo 5.3. Frekans ve sönüm oranı değerleri

Frekans Numarası	Frekanslar (Hz)	Sönüm Oranları (%)
1	3,03	1,42
2	3,13	2,41
3	4,05	3,10
4	9,23	2,52



Şekil 5.16. Seçilen frekanslara ait mod şekilleri

Başlangıç analitik model çözümleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında (Tablo 5.4); frekans değerleri arasında büyük oranda yaklaşıklık olmasına rağmen, mod şekillerinin birbiriyle uyuşmadığı MGK değerlerinden görülmektedir. Bu sebeple başlangıç analitik modelin güncellenmesi gerekmektedir.

Tablo 5.4. Başlangıç analitik model ve deneysel sonuçların karşılaştırılması

Frekans Numarası	Teorik Frekanslar (Hz)	Deneysel Frekanslar (Hz)	Yaklaşıklık (%)	MGK (%)
1	2,9	3,03	95,710	36,740
2	3,01	3,13	96,166	11,740
3	3,71	4,05	91,605	77,740
4	8,93	9,22	96,855	71,360

5.4. Analitik Modelin Güncellenmesi

Bir önceki kısımda başlangıç analitik modele ait frekans değerlerinin deneysel sonuçlara yakın olmasına rağmen, mod şekillerinin farklı çıkması özellikle 1. ve 2. modların çok farklı olması yapı başlangıç modelinin güncelleştirilme gerekliliğini ortaya koymuştur. Henüz kullanımda olmayan yapının kütlesi büyük ölçüde bellidir. Yapının rijitliğinde belirsizlik daha çok söz konusudur. Rijitliği etkileyen faktörler; beton sınıfı,

eleman boyutları ve sınır şartları olarak sıralanabilir. Burada beton malzemesi sınıfının güncelleştirilmesi yapılmıştır.

Yapıdan imalat sırasında alınan küp numuneler üzerinde yapılan deneyler, dökülen beton sınıfının C25 olduğunu göstermiştir. Bu yüzden başlangıç analitik modeldeki beton malzeme özelliği C25 olarak değiştirilerek model güncellenmiştir. (Şekil 5.17).

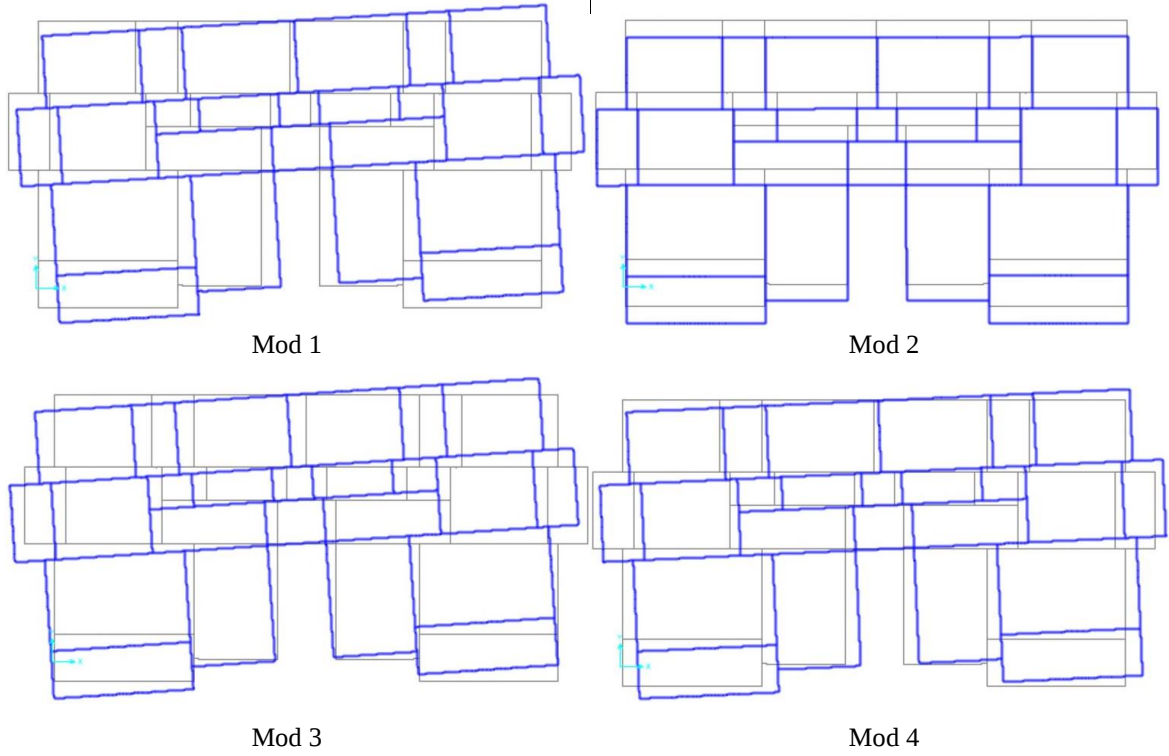
Şekil 5.17. Güncellenmiş analitik modeldeki beton sınıfı

5.5. Güncellenmiş Analitik Modelin Dinamik Karakteristiklerinin Bulunması

Güncellenmiş analitik modelin modal analizi gerçekleştirilmiş, elde edilen ilk dört frekans ve bu frekanslara ait mod şekilleri sırasıyla Tablo 5.5 ve Şekil 5.18’de sunulmuştur.

Tablo 5.5. Güncellenmiş analitik modeldeki ilk dört moda ait frekanslar

Frekans Numarası	Frekans Değerleri (Hz)
1	2,95
2	3,05
3	3,76
4	9,07



Şekil 5.18. Güncellenmiş analitik modeli kullanılarak elde edilen ilk dört mod şekli

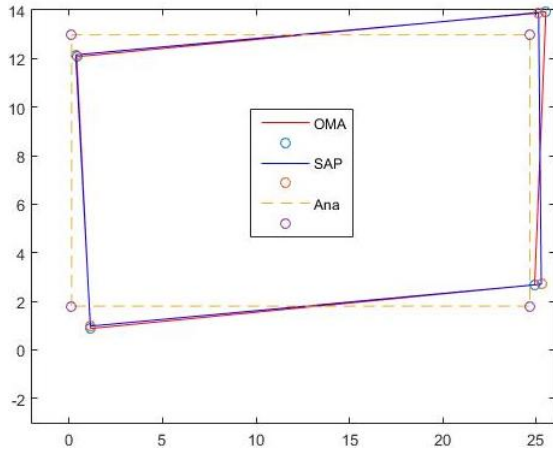
5.6. Güncellenmiş Analitik Model ile Deneysel Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

Güncellenmiş analitik model çözümleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında (Tablo 5.6); frekans değerleri başlangıç analitik model çözümlerine göre deneysel sonuçlara daha fazla yaklaşmıştır. Analitik ve deneysel mod şekillerinin birbiriyle uyduğu modların MGK değerlerinden açıkça görülmektedir.

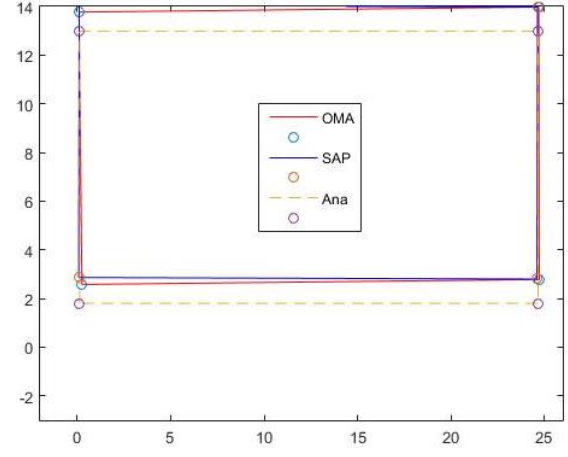
Tablo 5.6. Güncellenmiş analitik model ile deneysel sonuçların karşılaştırılması

Frekans Numarası	Deneysel Frekanslar (Hz)	Teorik Frekanslar (Hz)	Yaklaşıklık (%)	MGK (%)
1	3,03	2,95	97,360	94,339
2	3,13	3,05	97,444	96,498
3	4,05	3,76	92,840	93,405
4	9,22	9,07	98,373	91,130

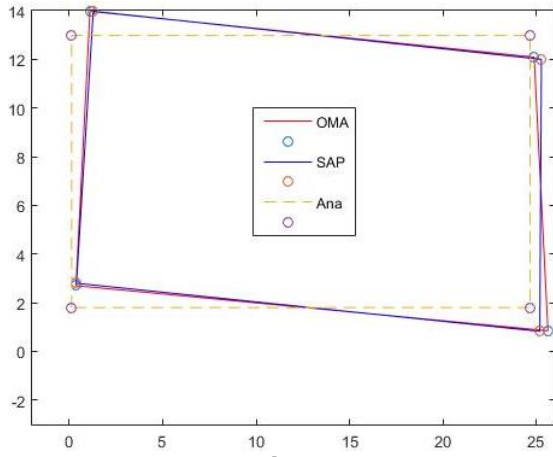
Referanssız olarak gerçekleştirilen ölçüm, yapının dördüncü kat döşemesinin yaklaşık köşe noktalarından alınmıştır. Analitik ve deneysel sonuçlar ile bulunan ilk dört frekansa ait her bir mod için ölçüm alınan noktaların modal ötelenmeleri üst üste çizilmiştir (Şekil 5.19).



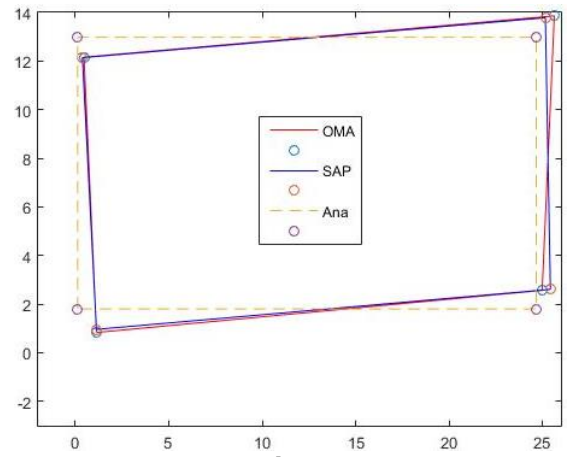
Mod 1



Mod 2



Mod 3



Mod 4

Şekil 5.19. Analitik ve deneysel sonuçlar ile bulunan ilk dört frekansa ait her bir mod için modal ötelenmeler

6. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında betonarme bir yapının Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi kullanılarak dinamik karakteristikleri belirlenmiş ve sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapının analitik modeli SAP2000 sonlu eleman paket programı ile oluşturulup, malzeme parametrelerinin belirlenmesinde proje verileri baz alınmıştır. Analitik modelin modal analizi yapılarak dinamik karakteristikler bulunmuş, ilk dört frekans 2,9-8,93Hz aralığında elde edilmiştir.

Deneysel ölçümler için OROS-OR36 Çok Kanallı Gürültü ve Titreşim Analizörü kullanılmıştır. İlk dört frekans 3,03-9,22Hz aralığında ve bu frekanslara ait sönüm oranları %1,42-3,10 aralığında bulunmuştur.

Başlangıç analitik model çözümleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında; frekans değerleri arasında büyük oranda yaklaşıklık olmasına rağmen, mod şekillerinin birbiriyle uyuşmadığı modların MGK değerlerinden görülmüştür.

Yapının kütlesi büyük ölçüde belli olduğundan, rijitliğinde belirsizlik daha çok söz konusudur. Rijitliği etkileyen faktörler; beton sınıfı, eleman boyutları ve sınır şartları olarak sıralanabilir. Yapıdan imalat sırasında alınan küp numunelerin deney sonuçlarına bağlı olarak, beton malzemesi sınıfının C25 olduğu görülerek beton sınıfı güncellenmesi yapılmıştır. Güncellenmiş modelin modal analiz çözümlerinden ilk dört frekans 2,95-9,07Hz aralığında elde edilmiştir.

Güncellenmiş analitik model ile deneysel ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında ilk dört frekansa ait değerler ile mod şekilleri arasında büyük bir uyum olduğu görülmüştür. Frekans değerleri arasındaki yaklaşıklık %92,840-98,373 arasında belirlenmiştir. Mod şekillerine ait MGK değerleri %91,130-96,498 arasında hesaplanmıştır.

Gerçekleştirilen OMA yöntemiyle çeşitli yapılarda olduğu gibi betonarme yapılarda da deneysel dinamik karakteristiklerin elde edilebileceği ve gerçek yapıları en iyi şekilde temsil edecek sonlu eleman modellerinin oluşturulabileceği uygulamalı olarak gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

1. **Türker, T.**, 2011. Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Hasar Durumlarının Tespiti Ve Değerlendirilmesi, *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
2. **Turan, F.N.**, 2012. Dengeli Konsol Betonarme Köprülerin Dinamik Karakteristiklerinin Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
3. **Türker, T.**, 2005. Çelik Çerçeve Sistemlerin Dinamik Karakteristiklerinin Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
4. **Rainieri, C., and Fabbrocino, G.**, 2011. Operational modal analysis for the characterization of heritage structures, *Geofizika*, 28.1 (2011): 109-126.
5. **Şahin, A.**, 2009. Yapıların Deneysel ve Operasyonel Modal Analizleri İçin Sayısal Sinyal İşleme, Dinamik Karakteristik Belirleme ve Sonlu Eleman Model İyileştirme Yazılımları: SignalCAD - ModalCAD – FemUP, *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon
6. **Modak, S.V., Kundra, T.K., and Nakra, B.C.**, 2002. Comparative Study of Model Updating Methods Using Experimental Data, *Computers and Structures*, 80, 5-6, 437-447.
7. **Sevim, B.**, 2010. Kemer Barajların Dinamik Davranışlarının Sonlu Eleman ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi, *Doktora Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
8. **Mendes, P., Baptista, M.A., Agostinho, L., Lagomarsino, S., and Costav, J.P.**, 2005. Structural and dynamic analysis of N. Sra. do Carmo church, *Proceedings EUROODYN2005, Structural Dynamics*, 311-318, Lagos Portugal.
9. **Türker, T.**, 2014. Ambient Vibration Test Of Building Base Slab For Different Ground Conditions, *Measurement*, vol.52, pp.77-84.
10. **Ventura, C., Brinker, R., Dascotte, E., and Anderson, P.**, 2001. FEM Updating of the Heritage Court Building Structure, *Proceedings of the 19th International Modal Analysis Conference*, pp. 324-330, Kissimmee.

11. **Boru, E.O., ve Kutanis, M.,** 2015. Çevrel titreşim kayıtları kullanılarak yapı dinamik parametrelerinin belirlenmesi, *SAÜ Fen Bil Dergisi*, ISSN:1301-4048, Cilt. 19, pp. 59-66.
12. **Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C., Sevim, B., ve Özcan, M.,** 2010. Binaların dinamik parametrelerinin operasyonel modal analiz yöntemiyle belirlenmesi, *İmo Teknik Dergi*, pp. 5185–5205.
13. **Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., ve Domaniç, A.,** 2009. Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi, *Teknik Dergi (SCI)*, 20(2), 4675-4700.
14. **Cunha, A., Caetano, E., Brincker, R. and Andersen, P.,** 2004. Identification from the Natural Response of Vasco da Gama Bridge, *Proc. 22nd Int. Modal Analysis Conference*, Deaborn, USA.
15. **Votsis, R.A., Kyriakides, N., Chrysostomou, C., Tantele, E., and Demetriou, T.,** 2012. Ambient vibration testing of two masonry monuments in Cyprus. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 43, pp. 58-68.
16. **Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C., ve Türker, T.,** 2007. Tarihi Yığma Minarelerin Deprem Güvenliklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, *Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 1*, pp.415-428, Ankara, Türkiye.
17. **D’Ambrisi, A., Mariani, V., and Mezzi, M.,** 2012. Seismic assessment of a historical masonry tower with nonlinear static and dynamic analyses tuned on ambient vibration tests, *Engineering Structures*, 36, pp. 210-219.
18. **Cunha A., Caetano E., and Moutinho C.,** 2000. Ambient Vibration Data Analysis Of Heritage Court Tower. Contribution Of University Of Porto To IMAC Benchmark, *IMAC XVIII - 18th International Modal Analysis Conference*, vol.52, pp.1075-1080.
19. **Türker, T., and Bayraktar, A.,** 2014. Structural Safety Assessment Of Bowstring Type Rc Arch Bridges Using Ambient Vibration Testing And Finite Element Model Calibration, *MEASUREMENT*, vol.59, pp.33-45.
20. **Bartoli, G., Betti, M., and Giordano, S.,** 2013. In Situ Static and Dynamic Investigations on the Torre Grossa Masonry Tower, *Engineering Structures*, 52, pp. 718-733.

21. **Bayraktar, A., Altunişik, A.C., Sevim B., Türker T., ve Birinci F.,** 2010. Tarihi Yapıların Deprem Güvenliklerinin Tahribatsız Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, *İMO İstanbul*, cilt.98, ss.10-20.
22. **Choi, S., Park, S., Hyun, C.H., Kim, M.S., and Choi, K.R.,** 2010. Modal Parameter Identification Of A Containment Using Ambient Vibration Measurements, *Nuclear Engineering and Design*, 240, pp.453-460.
23. **Başpolat, E., Bayraktar, A., Başağa, H.B., ve Türker, T.,** 2013. Deriner Beton Kemer Barajının Deneysel Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi, 2. *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, ss.1-10, Hatay, Türkiye.
24. **Azenha, M., Magalhaes, F., Faria, R., and Cunha, A.,** 2010. Measurement of concrete E-modulus evolution since casting: A novel method based on ambient vibration, *Cement and Concrete Research*, 40, pp. 1096-1105.
25. **Soyoz, S., Taciroglu, E., Orakcal, K., Nigbor, R., Skolnik, D., Lus, H., and Safak, E.,** 2013. Ambient and Forced Vibration Testing of a Reinforced Concrete Building before and after Its Seismic Retrofitting, *J. Struct. Eng.* 139, *SPECIAL ISSUE: Real-World Applications for Structural Identification and Health Monitoring Methodologies*, 1741–1752.
26. **Hashim, H., Ibrahim, Z., and Abdul Razak, H.,** 2013. Dynamic characteristics and model updating of damaged slab from ambient vibration measurements, *Measurement*, Volume 46, Issue 4, pp. 1371-1378.
27. **Osmancikli, G., Bayraktar, A., Türker, T., Uçak, Ş., and Mosallam, A.,** 2015. Finite Element Model Calibration Of Precast Structures Using Ambient Vibrations, *Construction and Building Materials*, (93) 10-21.
28. **Ventura, C., Laverick, B., Brincker, R., and Andersen, P.,** February 3-6, 2003. Comparison of Dynamic Characteristics of Two Instrumented Tall Buildings, *In Proceedings of IMAC-21: A Conference on Structural Dynamics*, (pp. 236-242), The Hyatt Orlando, Kissimmee, Florida.
29. **Altunişik, A.C., Bayraktar, A., Sevim, B., and Özdemir, H.,** 2011. Experimental And Analytical System Identification of Eynel Arch Type Steel Highway Bridge, *Journal of Constructional Steel Research*, (67), 1912-1921.
30. **Vivo, A.D., Brutti, C., and Leofanti, J.L.,** 2013. Modal shape identification of large structure exposed to wind excitation by operational modal analysis technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, (39), pp. 195–206.

31. **Çalık, İ., Demirtaş, B., Bayraktar, A., ve Türker, T.,** 2012. Yığma Taş Minarelerin Analitik Ve Deneysel Yöntemlerle Güvenliğinin Belirlenmesi: Trabzon Muhittin Camii Minaresi Örneği, *Vakıflar Dergisi*, cilt.38, ss.121-139.
32. **Birinci, F.,** 2010. Taş Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
33. **Chopra, A.K.,** 2006. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Third Edition, Prentice Hall, USA.
34. **Heerah, A.R.P.,** 2009. Field Investigation of Fundamental Frequency of Bridges Using Ambient Vibration Measurements, *Master of Engineering*, McGill University Montreal, Canada.
35. **Chauhan, S.,** 2008. Parameter Estimation and Signal Processing Techniques for Operational Modal Analysis, *PhD Dissertation*, University of Cincinnati, Ohio, USA.
36. **Ramos, J.L.F.,** 2007. Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, *PhD Dissertation*, Minho University, Portugal.
37. **Ortigão, A., and Martins, C.J.,** 2012. An Characterization of Jacket-Type Offshore Structure by Operational Modal Analysis, *Blucher Mechanical Engineering Proceedings 1.1*, 3913-3926.
38. **Altunışık, A.C.,** 2010. Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
39. **Uçak, Ş.,** 2012. Tarihi Yığma Kubbelerin Dinamik Davranışlarının Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
40. **Çakar, O.,** 2003. Titreşim Testlerinden Elde Edilen Verilerin Kalitesinin İyileştirilmesi, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
41. **Karakan, E.,** 2008. Estimation of Frequency Response Function for Experimental Modal Analysis, *Master of Engineering*, İzmir Institute of Technology, Graduate School of Engineering and Science, İzmir.
42. **Zhang, L., Brincker, R., ve Andersen, P.,** 2002. An Overview of Operational Modal Analysis: Major Development and Issues, *B&K Technical Paper*, 152-161.

43. **Brincker, R., Ventura, C.E. and Andersen, P.,** 2003. Why Output-Only Modal Testing is a Desirable Tool for a Wide Range of Practical Applications, *Proceedings of 21st International Modal Analysis Conference on Structural Dynamics*, Kissimmee, Orlando, USA.
44. **URL-1,** http://www.dta.com.tr/pcb_darbe_cekici.htm. 17 Aralık 2015.
45. **Cantieni, R.,** 2005. Experimental methods used in system identification of civil engineering structures. *In Proceedings of 1st int operational modal analysis conference (IOMAC)*, pp. 249-60.
46. **URL-2,** http://marmatek.com/wp-content/uploads/2014/03/MMF_KB12-KB12VD-KS48C_Datasheet.pdf. 17 Aralık 2015.
47. **URL-3,** http://marmatek.com/urunler/mm_f_kb12vd-sismik-ivme_sensoru/. 17 Aralık 2015.
48. **Ewins, D.J.,** 2000. Modal Testing: Theory, Practice and Application, *Research Studies Press Ltd.,* England.
49. **URL-4,** http://marmatek.com/urunler/oros_or36_analizor/. 17 Aralık 2015.
50. **Allemang, R.J.,** 2003. The modal assurance criterion—twenty years of use and abuse, *Sound and vibration*, 37.8: 14-23.
51. **Dabanlı, Ö.,** 2008. Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
52. **SAP2000 V15.1.0,** 2013, Structural Analyses Software CSI.
53. **Bayülke, N.,** 2003. Betonarme Yapının Dolgu Duvarı, *TMH – Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 426/4.
54. **Govindan, P., Lakshmipaty, M., and Santhakumar, A.R.,** 1986. Ductility of Infilled Frames, *A.C.I. Journal*, pp. 567-576.
55. **Vintzeleou, E.,** 1989. Infilling of Reinforced Concrete Frames as a Strengthening Intervention, *Seminar on the Assesment and Redesign of Reinforced Concrete Structures*, İzmir.
56. **Negro, P., and Verzeletti, G.,** 1996. Effect of Infills on the Global Behaviour of R/C Frames:Energy Considerations from Pseudo-synamic Tests. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.25, No.7, pp. 753- 773.
57. **FEMA-178,** 1989. A Handbook for Seismic Evaluation of Existing Buildings (Preliminary), *Earthquake Hazards Reduction Series*, 47.

58. **Zarnic, R., and Tomasevic, M.,** 1995. Modelling of Response of Masonry Infilled Frame, *10th European Conference on Earthquake Engineering*, Rotterdam.
59. **Yüksel, İ.,** 2008. Betonarme Binaların Deprem Sonrası Acil Hasar Değerlendirmeleri, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 260- 276.
60. **Öktem, O.,** 2003. Betonarme Çerçeve Sistemlerin Lineer Olmayan Hesabı ve Dolgu Duvarların Modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
61. **Smith, B.S., and Carter, C.,** 1969. A Method of Analysis for Infilled Frames, *Institution of Civil Engineers*, Vol. 44, pp. 31-48.
62. **Fiorato, A.E., Sözen, M.A., and. Gamble, W.L.,** 1970. An Investigation of the Interaction of Reinforced Concrete Frames with Masonry Filler Walls Univ. Of Illinois, *Civ. Eng. Studies Struct. Res.*, Series No.370.
63. **Klinger, R.E., and Bertero, V.,** 1976. Infilled Frames in Earthquake-Resistant Construction, *Earthquake Engineering Research Center*, Report No. EERC 76-32, University of California, Berkeley.
64. **Meli, R., and Bazan, E.,** 1980. Seismic Analysis Of Structures with Masonary Walls. Proceedings of Seventh World Conference on Earthquake Engineering, pp. 633-640.
65. **Liau, T.C., and Kwan, K.H.,** 1985. Initied Plastic Analysis for Infilled Frames, *ASCE, Journal of Structural Division*, Vol. 111, No. 7, pp. 1427-1448.
66. **Sayın, B.,** 2003. Mevcut Betonarme Yapıların Yeni Deprem Yönetmeliğine Göre Projelendirilmesi ve Güçlendirilmesi Teknikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
67. **Çağlayan, E.,** 2006. Betonarme Çerçevelerin Yatay Yüklere Göre Analizinde Dolgu Duvar Etkisinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
68. **Tetik, D.,** 2007. Dolgu Duvarların Betonarme Yapıların Serbest Titreşimine Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
69. **Karasu, T.O., Erdem, R.T., Demir, A., ve Bağcı, M.,** 2011. Yumuşak Kat Düzensizliği Bulunan Betonarme Bir Binaının Performansının İncelenmesi. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7, 2, 61-69.

70. **Kaushik, H.B., Rai, D.C., and Jain, S.K.,** 2008. A Rational Approach to Analytical Modelling of Masonry Infills in Reinforced Concrete Frames Buildings, *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
71. **Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik,** 2007, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

Musa YETKİN, 1991 yılında Mardin’de doğmuştur. İlköğrenimini Hatay Mustafa Kemal İlköğretim Okulunda, ortaöğrenimini Elazığ Mustafa Kemal İlköğretim Okulunda ve lise öğrenimini ise Elazığ Harput Kolejinde tamamlamıştır. 2009 yılında girdiği Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden 2013 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl yüksek lisans eğitimine başlamış ve 2014 yılında Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümüne araştırma görevlisi olarak atanmıştır.

Yazar, halen Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.