

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GÜÇLENDİRME YAPILACAK BETONARME BİR BİNANIN OPERASYONEL  
MODAL ANALİZ TEKNİĞİ İLE DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN  
BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AYÇA AKBAŞ

TEZ DANIŐMANI  
DR. ÖĞR. ÜYESİ ÖZLEM ÇALIŞKAN

BİLECİK, 2023  
10557994

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GÜÇLENDİRME YAPILACAK BETONARME BİR BİNANIN OPERASYONEL  
MODAL ANALİZ TEKNİĞİ İLE DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN  
BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AYÇA AKBAŞ

TEZ DANIŐMANI  
DR. ÖĞR. ÜYESİ ÖZLEM ÇALIŞKAN

BİLECİK, 2023

10557994

## BEYAN

“Güçlendirme Yapılacak Betonarme Bir Binanın Operasyonel Modal Analiz Tekniği ile Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi” adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğunu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
<b>DESTEK ALINMIŞTIR</b>	<input type="checkbox"/>	<b>DESTEK ALINMAMIŞTIR</b>	<input checked="" type="checkbox"/>
<b>Destek alındı ise;</b>			
<b>Destekleyen kurum;</b>			
<b>Desteğin Türü</b>		<b>Proje Numarası</b>	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;..... .....			
<b>ETİK KURUL onayı var ise;</b>			
<b>ETİK KURUL karar tarih/sayı:</b>		...../..... .....	

Ayça AKBAŞ

Tarih

...../...../2023

İmza

## ÖN SÖZ

Bu tez çalışmamın yürütülmesi sırasında, çalışmamın tüm aşamalarında desteğini ve yönlendirmelerini esirgemeyen, olumlu tavrı ile beni cesaretlendiren, bilgi birikimi ile çalışmama farklı açılardan bakmamı sağlayan, beraber çalışmaktan ve her zaman öğrencisi olmaktan gurur duyduğum değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Özlem ÇALIŞKAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Lisans eğitimim süresince betonarme derslerinde bilgi ve birikimi ile bizleri donatan, bizlere etik ve ahlak kavramını her fırsatta hatırlatan, her şeyden önce merhametli ve vicdanlı mühendisler olmamız yolunda bizlere ilham veren ve 5 Haziran 2019 tarihinde aramızdan ayrılan, öğrencisi olmaktan onur duyduğum değerli hocamız Prof. Dr. Ahmet TOPÇU'ya minnetlerimi sunarım.

Ayrıca tez çalışmam boyunca benden manevi ve teknik desteklerini esirgemeyen değerli meslektaşlarım Serhat AKBAŞ ve Osman Murat KAYA'ya teşekkür ederim.

Son olarak tüm hayatım boyunca benim yanımda olan, aldığım kararları her zaman destekleyen, sadece bu çalışma sürecinde değil tüm hayatım boyunca beni cesaretlendiren ve motive eden annem Özlem AKBAŞ'a ve babam Mehmet AKBAŞ'a sonsuz şükranlarımı sunar, teşekkür ederim.

**Ayça AKBAŞ**

**2023**

## ÖZET

### GÜÇLENDİRME YAPILACAK BETONARME BİR BİNANIN OPERASYONEL MODAL ANALİZ TEKNİĞİ İLE DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Bu tez çalışmasında güçlendirme işlemi yapılacak betonarme yapının dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla çevresel titreşim testi olarak da bilinen Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada deneysel olarak bu yöntemin seçilmiş olmasındaki en büyük etkenlerden biri uygulanması sırasında bilinen bir etki veya diğer adıyla tahrik kuvvetine ihtiyaç duyulmamasıdır. Operasyonel Modal Analiz Yönteminde tahrik kuvvetleri yerine çevresel etkilerden (trafik, yaya hareketleri, gürültü vb.) yararlanılmaktadır. Çok katlı veya kompleks yapıların tahrik kuvvetleri ile titreştirilmesi oldukça zor bir işlem olduğundan bu tip yapılarda da Operasyonel Modal Analiz Yöntemi sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca bu yöntem uygulanırken yapıların uzun süre hizmete kapatılmasına gerek kalmamakta ve günlük hayatta aksaklıklara neden olmamaktadır. Bu durum da yöntemin tercih edilebilirliğini önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu çalışmada kullanılan betonarme yapının güçlendirme işleminin öncesinde duvarlarının yıkım-söküm işlemlerinin yapılmamış olduğu durumu için projesine uygun olarak üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli üzerinde SAP2000 programı ile teorik modal analiz uygulanarak yapının dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Daha sonra Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile dinamik karakteristikler deneysel olarak da elde edilerek teorik analizden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Elastisite modülü değişimi yöntemi kullanılarak sonlu eleman modeli iyileştirilmiştir. Aynı işlemler duvarların yıkım-söküm işlemleri sonrasında da tekrarlanmıştır. Çalışma sonucunda Operasyonel Modal Analiz Yönteminin güçlendirme işlemleri öncesi betonarme yapılarda duvarların yıkım-söküm işlemlerinin öncesi ve sonrasında kullanılmasının; yapının sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesi için gerekli ve önemli olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Dinamik Karakteristikler, Dinamik Davranış, Operasyonel Modal Analiz, Onarım ve Güçlendirme.

## ABSTRACT

### DETERMINING THE DYNAMIC CHARACTERISTIC OF A STRENGTHENED RC STRUCTURE WITH OPERATIONAL MODAL ANALYSIS TECHNIQUE

In this thesis study, the Operational Modal Analysis Method, also known as environmental vibration testing, was used to determine the dynamic characteristics of a reinforced concrete structure undergoing strengthening operations. One of the main reasons for selecting this method in the study is that it does not require a known effect or, in other words, an excitation force during its application. Instead of excitation forces, the Operational Modal Analysis Method utilizes environmental effects such as traffic, pedestrian movements, noise, etc. Due to the complexity and difficulty of exciting multi-story or complex structures using excitation forces, the Operational Modal Analysis Method is frequently preferred in such structures. Furthermore, this method does not necessitate long-term closure of structures during its application, thus avoiding disruptions in daily life. This significantly enhances the feasibility of the method. Prior to the strengthening operations of the reinforced concrete structure used in this study, a three-dimensional finite element model was created according to its design, assuming that the walls were not demolished or removed. The dynamic characteristics of the structure were obtained by applying theoretical modal analysis using the SAP2000 program on the created three-dimensional finite element model. Subsequently, the dynamic characteristics were experimentally obtained using the Operational Modal Analysis Method and compared with the results obtained from the theoretical analysis. The finite element model was improved using the method of changing the elastic modulus. The same procedures were repeated after the demolition and removal of the walls. As a result of the study, it was determined that the use of the Operational Modal Analysis Method before and after the demolition and removal of walls in reinforced concrete structures undergoing strengthening operations is necessary and important for improving the finite element models of the structures.

**Keywords:** Dynamic Characteristics, Dynamic Behavior, Operational Modal Analysis, Repair and Strengthening.

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET .....	ii
ABSTRACT .....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ .....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
1.GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	4
3. OPERASYONEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİ.....	41
3.1. Teorik Modal Analiz Yöntemi .....	42
3.1.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler .....	44
3.1.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler .....	48
3.2. Deneysel Modal Analiz Yöntemi .....	50
3.2.1. Deneysel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Ölçüm Ekipmanları.....	53
3.2.1.1. Titreştiriciler & Sarsıcılar .....	53
3.2.1.2. İvmeölçerler .....	54
3.2.1.3. Veri Toplama Üniteleri ve Sinyal İşleme .....	56
3.3. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi.....	59
3.3.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma Yöntemi.....	60
3.3.2. Stokastik Altalan Belirleme Yöntemi.....	61
3.3.3. Sonlu Eleman İyileştirme Yöntemleri.....	63
3.3.4. Operasyonel Modal Analiz Yönteminde Yapılan Kabuller.....	65
3.3.5. Operasyonel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Yazılımlar .....	66
3.3.5.1. SAP2000 (Structural Analysis Program).....	66

3.3.5.2. ARTEMIS .....	68
<b>4. SAHA ÇALIŞMALARI .....</b>	<b>70</b>
<b>4.1. Betonarme Yapıya Ait Genel Bilgiler .....</b>	<b>70</b>
<b>4.2. Yapılan Çalışmalar .....</b>	<b>75</b>
<b>4.2.1. Betonarme Yapının Güçlendirme Öncesi Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması .....</b>	<b>75</b>
<b>4.2.2. Betonarme Yapının Güçlendirme Öncesi Teorik Modal Analizleri .....</b>	<b>81</b>
<b>4.2.3. Betonarme Yapının Güçlendirme Öncesi Operasyonel Modal Analizi .....</b>	<b>84</b>
<b>4.2.4. Betonarme Yapının Güçlendirme Öncesi Deneysel Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi .....</b>	<b>86</b>
<b>4.2.5. Betonarme Yapının Güçlendirme Öncesi Deneysel ve Teorik Olarak Elde Edilen Dinamik Karakteristiklerinin Karşılaştırılması .....</b>	<b>88</b>
<b>4.2.6. Betonarme Yapının Sonlu Eleman Modellerinin İyileştirilmesi.....</b>	<b>89</b>
<b>5.SONUÇ .....</b>	<b>92</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>102</b>

## TABLULAR LİSTESİ

Sayfa

<b>Tablo 4.1.</b> Betonarme yapının yıkım-söküm işlemleri öncesi elde edilen teorik dinamik karakteristikleri.....	81
<b>Tablo 4.2.</b> Betonarme yapının yıkım-söküm işlemleri sonrası elde edilen teorik dinamik karakteristikleri.....	82
<b>Tablo 4.3.</b> Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi öncesi Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle elde edilen dinamik karakteristikleri .....	86
<b>Tablo 4.4.</b> Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi sonrası Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle elde edilen dinamik karakteristikleri .....	87
<b>Tablo 4.5.</b> Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi öncesi Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle elde edilen dinamik karakteristiklerin teorik analiz yöntemi ile elde edilen dinamik karakteristikler ile karşılaştırılması .....	88
<b>Tablo 4.6.</b> Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi sonrası Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle elde edilen dinamik karakteristiklerin teorik analiz yöntemi ile elde edilen dinamik karakteristikler ile karşılaştırılması .....	89
<b>Tablo 4.7.</b> Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi öncesi Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle elde edilen dinamik karakteristiklerin iyileştirilmiş sonlu eleman modelinden teorik analiz yöntemi ile elde edilen dinamik karakteristikler ile karşılaştırılması .....	90
<b>Tablo 4.8.</b> Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi sonrası Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle elde edilen dinamik karakteristiklerin iyileştirilmiş sonlu eleman modelinden teorik analiz yöntemi ile elde edilen dinamik karakteristikler ile karşılaştırılması .....	91

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Modal Analiz yönteminin başlıklar halinde incelenmesi.....	42
Şekil 3.2. Uzaydaki bir cismin üç eksenle yapacağı ötelenme ve dönmeler.....	43
Şekil 3.3. Tek serbestlik dereceli sistemlerin analitik modeli .....	44
Şekil 3.4. Tek serbestlik dereceli sistemlerin serbest cisim diyagramı .....	45
Şekil 3.5. Çok serbestlik dereceli sistemlerin analitik modeli .....	48
Şekil 3.6. Geleneksel Deneysel Yöntem ile yapıların dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi .....	51
Şekil 3.7. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile yapıların dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi .....	52
Şekil 3.8. Sarsıcı örneği .....	54
Şekil 3.9. Farklı boyutta darbe çekiçleri ve başlıkları.....	54
Şekil 3.10. SENSEBOX70x3 tipi üç eksenli ultra hassas sismik ivmeölçer .....	55
Şekil 3.11. TESTBOX2010 serisinden 16 kanallı veri toplama ünitesi ve sinyal işleme ekipmanı .....	58
Şekil 3.12. Operasyonel Modal Analiz Yönteminin ölçüm aşamaları .....	59
Şekil 4.1. Betonarme yapıya ait bilgiler.....	70
Şekil 4.2. Betonarme yapının görüntüsü .....	71
Şekil 4.3. Betonarme yapı ön cephe görünüş .....	71
Şekil 4.4. Betonarme yapı arka cephe görünüş .....	72
Şekil 4.5. Betonarme yapı sağ yan görünüş .....	72
Şekil 4.6. Betonarme yapı sol yan görünüş.....	73
Şekil 4.7. Betonarme yapının bodrum kat planı.....	73
Şekil 4.8. Betonarme yapının zemin kat planı .....	74
Şekil 4.9. Betonarme yapının 1-2 ve 3. normal kat planı.....	74
Şekil 4.10. Betonarme yapının bodrum kat kalıp planı.....	75

<b>Şekil 4.11.</b> Betonarme yapının zemin kat kalıp planı .....	76
<b>Şekil 4.12.</b> Betonarme yapının 1-2 ve 3. normal kat kalıp planı.....	76
<b>Şekil 4.13.</b> Betonarme yapının SAP2000 yapısal analiz programında oluşturulan aksları.....	77
<b>Şekil 4.14.</b> Donatı özellikleri .....	78
<b>Şekil 4.15.</b> Beton malzeme özellikleri .....	78
<b>Şekil 4.16.</b> Betonarme yapının üç boyutlu sonlu eleman modeli.....	79
<b>Şekil 4.17.</b> Betonarme yapının zemin kat yıkım-söküm planı .....	80
<b>Şekil 4.18.</b> Betonarme yapının 1,2 ve 3. normal kat yıkım-söküm planı.....	80
<b>Şekil 4.19.</b> Betonarme yapının yıkım-söküm işlemleri öncesi 1.Mod şekli .....	81
<b>Şekil 4.20.</b> Betonarme yapının yıkım-söküm işlemleri öncesi 2.Mod şekli .....	82
<b>Şekil 4.21.</b> Betonarme yapının yıkım-söküm işlemleri sonrası 1.Mod şekli .....	83
<b>Şekil 4.22.</b> Betonarme yapının yıkım-söküm işlemleri sonrası 2.Mod şekli .....	83
<b>Şekil 4.23.</b> İvmeölçerin tüm katlarda konulduğu bölge .....	84
<b>Şekil 4.24.</b> Sabitlenmiş ivmeölçerin görseli.....	85
<b>Şekil 4.25.</b> Veri toplama ünitesi .....	85
<b>Şekil 4.26.</b> Betonarme yapıda yıkım-söküm işlemi öncesinde yapılan Operasyonel Modal Analiz Yönteminde sinyal işleme sonrası ölçüm sonuçları.....	86
<b>Şekil 4.27.</b> Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi öncesi Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle elde edilen mod şekli .....	87
<b>Şekil 4.28.</b> Betonarme yapıda yıkım-söküm işlemi sonrası yapılan Operasyonel Modal Analiz Yönteminde sinyal işleme sonrası ölçüm sonuçları .....	87
<b>Şekil 4.29.</b> Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi sonrası Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle elde edilen mod şekli .....	88
<b>Şekil 4.30.</b> Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi öncesi deneysel yöntem sonuçlarına göre iyileştirilmiş sonlu eleman modeli ve 2.mod şekli .....	90
<b>Şekil 4.31.</b> Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi sonrası deneysel yöntem sonuçlarına göre iyileştirilmiş sonlu eleman modeli ve 2.mod şekli .....	91
<b>Şekil 5.1.</b> Çalışma kapsamında gerçekleştirilen analiz aşamaları ve işlem adımları.....	92

<b>Şekil 5.2.</b> Analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	93
--------------------------------------------------------------	----

## 1. GİRİŞ

Barınma ihtiyacı tüm canlılar için ortak ve yaşamları boyunca devam eden en temel ihtiyaçlar arasında yer almaktadır. Barınma ihtiyacı kadar bu ihtiyacın güven ile karşılanması da önem arz etmektedir. Doğadaki her canlı barınma ihtiyacını karşılamak amacıyla kendi doğası ve yetenekleri dahilinde kendine farklı materyallerden yaşam alanları yapmıştır. İnsanlık tarihine bakıldığında; insanlar, barınma ihtiyaçlarını gidermek amacı ile çeşitli doğal veya yapay materyallerden yararlanmışlar ve bu materyalleri yüksek mukavemetli olanlar arasından seçmişlerdir. İlk olarak doğanın kendilerine sunduğu imkanlardan yararlanmışlardır. Doğadan elde ettikleri malzemelere geometrik şekiller vererek bu malzemeleri yaşam alanları inşa etmede kullanmışlardır. Ancak gelişen teknoloji ve bu teknolojinin getirdiği imkanlarla birlikte yapıların inşasında kullanılan malzemeler de gelişmiştir. Doğanın sunduğu imkanlar yerini gelişen teknoloji ve makineleşen sistemler ile üretilen yapı malzemelerine bırakmıştır. Beton ve çeliğin kompozit birleşiminden elde edilen betonarme yapıların keşfi ile günümüzde inşaat mühendisliği yapılarının inşasında en çok kullanılan bu gelişmiş malzemeler beton ve çeliktir. Gelişen teknoloji ve değişen taleplerle insanlar yalnız barınma amacı ile değil pek çok amaca hizmet edecek farklı türde yapıların inşasında da beton ve çelik kullanmışlardır (Zhang vd., 2010: 1227).

İnşaat mühendisliği yapılarından biri olan betonarme yapıların tasarımı ve statik projeleri güvenilirlik, ekonomiklik ve estetiklik ilkelerine göre yapılmaktadır. Taşıyıcı elemanların üzerlerine etkiyen yükler yapı içerisinde dolaşmadan sistematik bir şekilde (döşemelerden kirişlere, kirişlerden kolonlara ve kolonlardan temele olacak şekilde) temele aktarılmalıdır. Betonarme yapıların servis ömürleri boyunca güvenle hizmet verebilmesi gerekmektedir. Ancak yapıların servis ömürlerini olumsuz yönde etkileyen ve hasar görmelerine neden olan; deprem, sel, patlama, yapının inşasında kullanılan malzemelerin dayanım ömürlerini tamamlamış olmaları gibi birçok etken bulunmaktadır. Özellikle ülkemiz gibi deprem bölgesinde yer alan ülkelerde bu etkilerden biri olan deprem nedeniyle oldukça büyük ölçüde can ve mal kayıpları yaşanmaktadır (Yetkin, 2016:1).

Türkiye coğrafik konumu açısından değerlendirildiğinde dünyanın en önemli deprem kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya deprem kuşağında bulunmaktadır. Türkiye'nin üzerinde bulunduğu Anadolu Plakası; kuzeyde Avrasya Plakası, güneyde Afrika ve Arap Plakası, doğuda Doğu Anadolu Bloğu ve batıda Ege Bloğu tarafından çevrilmiştir. Kuzey Anadolu Fay Hattı, Doğu Anadolu Fay Hattı ve Batı Anadolu Fay Hattı olmak üzere 3 adet fay hattına sahiptir. Ülkemizin deprem tarihine bakıldığında bu 3 fay hattının da tarih boyunca büyük depremler

ürettiği ve bu büyük depremler nedeniyle büyük ölçüde can ve mal kayıpları yaşandığı görülmektedir. Ülkemizde mevcut yapı stokları incelendiğinde bu yapı stoğunun büyük bir bölümü betonarme yapılardan oluşmaktadır. Bu nedenle betonarme yapıların tasarım ve projelendirilmeleri aşamalarında depreme dayanıklı yapı tasarımı ilkeleri göz ardı edilmemelidir. Betonarme yapıların projelendirilmeleri esnasında ekonomiklik ilkesi de göz ardı edilemeyeceğinden, yapıların statik tasarımları azaltılmış deprem yükü yöntemine göre yapılmaktadır. Yapıların deprem etkisi altında sünek davranış göstereceği kabul edilmektedir. Bu yöntem ile tasarlanarak inşa edilen yapıların deprem etkisi altında lineer ötesi davranış göstereceği ve hasar alacağı kaçınılmaz bir durumdur. Bu nedenle betonarme yapıların deprem etkisi altında göstereceği dinamik davranışların önceden belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu davranışların belirlenebilmesi yapıların dinamik karakteristikleri olarak bilinen mod şekilleri, sönüm oranları ve doğal frekanslarının bilinmesi ile mümkün olmaktadır (Güneş, 2017:1).

Yapıların servis ömrünün, güvenliğinin bilinmesi ve ilerleyen zamanlarda karşılaşılabilecek belli başlı yükler altındaki davranışlarının önceden analiz edilebilmesi; doğal afetler veya çevresel etkilerden kaynaklanacak can ve mal kayıplarını önlenmesi, kültürel miraslar olan önemli tarihi yapıların korunması ve diğer nesillere aktarılması, karayolu ulaşımında kullanılan yapıların güvenliğinin sağlanması, yapıların durabilitesinin artırılması, yapıların onarım ve güçlendirme ihtiyacı olup olmadığının belirlenmesi ve meydana gelebilecek kayıpların önceden engellenebilmesi için oldukça önemli bir kavram olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu davranışların analiz edilmesi ve bilgisayar ortamında yapıların gerçeğine en yakın modellerinin oluşturularak dinamik davranışlarının tespit edilebilmesi için Modal Analiz yönteminden yararlanılmaktadır. Gelişen teknoloji ve imkanlar ile, özellikle son 20 yıl içerisinde Modal Analiz yöntemi, mühendislik yapılarının dinamik karakteristikleri olarak bilinen parametrelerin belirlenmesinde, iyileştirilmesinde ve optimize edilmesinde sıklıkla kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. Modal Analiz yöntemi; yapıların doğal frekanslarının, sönüm faktörlerinin ve mod şekillerinin deneysel ve matematiksel metotlar aracılığı ile belirlenerek, belirlenen bu veriler ışığında yapıların dinamik davranışlarının elde edilmesi sürecidir (Fu & He, 2001).

Yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılan deneysel modal analiz yöntemleri arasında uygulama kolaylığı, diğer yöntemlere göre düşük maliyetli olması ve yapı temel etkileşimli çözüm yönleri ile en çok tercih edilen yöntemlerden biri Operasyonel Modal Analiz yöntemidir. Operasyonel Modal Analiz Yönteminin uygulanması sırasında yapının kullanıma kapatılması gerekmemekte ve yapı çalışır vaziyette iken gerekli ölçümler

ivmeölçerler aracılığı ile alınabilmektedir. Bu sayede Operasyonel Modal Analiz Yönteminin uygulanması esnasında günlük hayatta aksamalar oluşmamaktadır. Yapı üzerinden direkt ölçüm alınabilen bir yöntem olduğundan ve yöntem içerisinde; malzeme özellikleri, başlangıç değerleri, sınır şartları gibi parametrelerin değişmediği kabul edildiğinden yapının tahribatlı veya tahribatsız malzeme testleri yapılması, temel çukuru açılması gibi detaylı çalışmalar minimuma inmektedir. Operasyonel Modal Analiz Yönteminin bu avantajları sayesinde zaman tasarrufu sağlanmakta ve doğruluk derecesi yüksek, kesine yakın sonuçlar elde edilmektedir (Güneş, 2017:3).

Bu tez çalışmasında Deneysel Modal Analiz yönteminin alt dallarından biri olan, çevresel titreşim testi olarak da bilinen Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile güçlendirme yapılacak betonarme bir binanın dinamik davranışının belirlenmesi amaçlanmıştır. Güçlendirme işlemi yapılacak betonarme binanın güçlendirme işlemi öncesi; duvarların yıkım-söküm işlemleri öncesi ve yıkım-söküm işleri sonrası durumları için olmak üzere dinamik karakteristikleri Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile belirlenmiştir. Yapının bu iki durumunun sonlu eleman modelleri bilgisayar ortamında SAP2000 yapısal analiz programı ile modellenerek modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Operasyonel Modal Analiz Yönteminden elde edilen sonuçlar doğrultusunda yapının sonlu eleman modelleri iyileştirilmiştir. Analiz sonuçları karşılaştırılarak betonarme yapının dinamik davranışları belirlenmeye çalışılmıştır.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Flesch vd., (2004) yaptıkları çalışmada inşaat mühendisliğinde bazı görevleri yerine getirmesi amacıyla yapılar üzerinde yerinde yapılan çevresel titreşim testi olarak bilinen Operasyonel Modal Analiz Yöntemi, bu yöntemden elde edilen dinamik parametreler ışığında yapı sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesi ve bu iyileştirme sayesinde dijital ortamda yapıların analiz edilebilmesi üzerinde çalışmışlardır. Çalışmacılar Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ve yöntem sayesinde yapıların sonlu eleman iyileştirmelerinin yapılarak analiz edilebilmelerini yenilikçi bir yaklaşım olarak görmüşler ve bu yaklaşımı göstermeyi amaçlamışlardır. Operasyonel Modal Analiz Yönteminin ve yapı modellerinin gerçeğe en yakın hale getirilmesinin yapıların kendisi için de gerekliliğini ortaya koymuşlardır. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi önemli binaların veya yaşam hattı yapılarının depreme dayanıklılığının değerlendirilmesi, demiryolu köprülerinin birlikte çalışabilirlik kontrollerinin ve hizmet verilebilirlik kontrollerinin yapılması, yapıların sağlık izleme ve güvenlik denetiminin yapılması ve yapıların maruz kaldığı titreşim oranının koruması gibi amaçlarda kullanılmak üzere gerekli bir yöntem olduğunu vurgulamışlardır. Çalışmalarının temel amacını ise ortam titreşimlerinin yapısal tanımlama için kullanılıp kullanılmayacağı veya zorlamalı titreşim testlerinin gerekli olup olmadığı sorusuna yanıt bulmak olarak belirtmişlerdir.

Cunha ve Caetano (2005) yaptıkları çalışmada deneysel modal analiz yöntemlerinin evrim süreci üzerinde çalışmışlardır. Girdi-çıkı yöntemi olarak da bilinen, uygulaması sırasında tahrik kuvvetlerine ihtiyaç duyulan Geleneksel Deneysel Modal Analiz Yönteminden yalnızca çıktı yöntemi olarak bilinen, tahrik kuvveti uygulamasına ihtiyaç duyulmayan çevresel titreşim testi Operasyonel Modal Analiz Yöntemine kadar olan süreci uygulamalar ile incelemişlerdir. Geleneksel Deneysel Modal Analiz Yönteminin uygulamasının tahrik kuvvetleri uygulanması gerekçesiyle inşaat mühendisliği yapılarında her zaman elverişli olmadığını, Operasyonel Modal Analiz Yönteminde böyle bir zorunluluk bulunmamasından dolayı yöntemin uygulanabilme kolaylığını vurgulamışlardır. Ayrıca yapıların sonlu eleman modellerinin güncellenmesinde deneysel yöntemlerin kullanılmasının önemine değinmişlerdir. Çalışmalarının sonunda, deneysel modal analiz yöntemlerinin çalışma sırasında yapılan uygulamalar ile doğruluklarının ve verimliliğinin belirlendiğini vurgulamışlardır. Deneysel modal analiz yöntemlerinin ve özellikle yenilikçi bir yöntem olan Operasyonel Modal Analiz Yönteminin; yapıların sonlu eleman modellerinin korelasyon analizinde, güncellenmelerinde ve doğrulanmalarında güvenle kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca başlangıçta hasar görmemiş yapıların zaman içerisinde hasar meydana gelebilecek bölümlerinin belirlenmesinde,

yapı sağlıklarının izlenmesinde ve deprem analizlerinin yapılmasında da Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ve diğer deneysel modal analiz yöntemlerinin kullanılmasının güvenli sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Peeters vd., (2005) yaptıkları çalışmada Operasyonel Modal Analiz Yönteminin inşaat mühendisliği, havacılık ve otomotiv alanındaki endüstriyel uygunluğunu literatürde bulunan vaka geçmişleri üzerinden araştırmışlardır. Çalışmalarında inşaat mühendisliği alanında Operasyonel Modal Analiz Yönteminin Yapısal Sağlık İzleme (SHM) alanında kullanılabilirliğini İsviçre’de bulunan Z24-Köprüsü verilerini kullanarak incelemişlerdir. Z-24 köprüsünün modal parametrelerini, köprüye Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulanarak dinamik karakteristiklerinin elde edildiği daha önce yapılmış bir çalışmadan almışlardır. SIMCES uygulaması çerçevesinde köprünün modal parametrelerini test etmişlerdir. Daha sonraki aşamada stokastik alt uzay tanımlaması ve PolyMAX’ten gelen stabilizasyon diyagramlarını karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında inşaat mühendisliği alanında ikinci olarak o tarihte bir yıldan uzun süredir bulunan Sheffield Üniversitesi, Bradford City Futbol Kulübü’nün evi olan Bradford ve Bingley Stadyumu’ndaki Midland Road Stand’ın izlemesini yapmışlardır. Veri toplama işlemine futbol maçından 1 saat önce başlamışlar ve farklı kitle senaryoları üzerinde araştırma yapmışlardır. Çalışmalarının bu aşamasında tribünlerin kalabalık etkisi altındaki dinamik performanslarını incelemeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla 4 saat süren bir titreşim kaydı yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, Operasyonel Modal Analiz Yönteminin gelişmiş parametre tahmin algoritmaları, yüksek kaliteli veri toplama sistemleri, ticari yazılım uygulamaları ve bu durumlarla yakından ilgili endüstriyel uygulamalar ile geliştiğini ve olgun bir duruma ulaştığını vurgulamışlardır.

Benedettini vd., (2005) yaptıkları çalışmada İtalya’da Provincia di Teramo bölgesinde bulunan Aprati (açıklık 68,5m), Frattoli (açıklık 31,8m), Morrice-S.Giovanni (açıklık 28,4m), Montefino (47.3m açıklık), Valle Castellana (açıklık 27,2m) ve Villa Passo (açıklık 58.2m) köprülerinin yıllar içindeki yapısal koşullarını izlemek amacıyla deneysel modal analiz yöntemlerini kullanmışlardır. Çalışmalarında Geleneksel Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile çevresel titreşim testi olarak da adlandırılan Operasyonel Modal Analiz Yönteminin kullanımını karşılaştırmışlardır. Deneysel modal analiz yöntemlerini kullandıktan sonra bu deneysel modal analiz sonuçlarına göre bu altı köprünün sonlu eleman iyileştirmesini yaparak köprülerin sismik yükler vb. gibi sık olmayan yükleme koşulları altındaki analitik analizlerini yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda çalışmada kullanılan köprülerin analizlerinde kullanılan yöntemlerin araştırmasının halen devam ettiğini belirtmişlerdir.

Savov ve Wenzel (2005) yaptıkları çalışmada yeni bir dalga analizi sistemi üzerinde çalışmışlardır. Hasar tespiti ve hasarın yerinin belirlenmesinde Operasyonel Modal Analiz Yönteminin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Hasar tespiti ve hasarın yerinin belirlenmesi amacıyla çalışır vaziyetteki yapıya Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulamadan önce referans alacakları hasarsız yapı örneği olarak üç katlı ve kesmeye dayanıklı çelik çerçeveyi gürültü sistemi ile uyararak analiz etmişlerdir ve böylelikle hasarsız yapıdan alanın ölçüm verilerini elde etmişlerdir. Hasarsız yapıdan alınan verilere dalga analizi ayrıştırması yapmışlardır. Çalışmalarının ikinci aşaması olarak ise gerçek bir yapının öngermeli betonarme kirişe Operasyonel Modal Analiz Yöntemini uygulamışlardır. Bu şekilde hasar tespiti ve ileride meydana gelebilecek muhtemel hasar tahminlerini yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda sundukları bu teknik ile hasar tespiti ve hasar kaynaklarının belirlenebileceğini belirtmişlerdir.

Büke (2006) yaptığı çalışmada, Operasyonel Modal Analiz Yöntemine uyarlanmış 3 adet zaman bölgesinin uygulanabilirliğini ve kullanılabilirliğini araştırmıştır. Araştırması sırasında, laboratuvar ortamında test edilmesi mümkün olmayan gerçek yapılar üzerine Operasyonel Modal Analiz Yönteminin uygulanması amacıyla bilgisayar kodları geliştirmiştir. Kodları yazarken MATLAB uygulaması kullanmıştır. İlk olarak seçtiği 3 adet zaman bölgesinin bilgisayar ortamında programlanmasını yapmıştır. Daha sonra bu 3 adet zaman bölgesinden ikisini seçerek bir laboratuvar düzeneği aracılığı ile test etmiştir. Çalışmasının sonunda, zaman tanımlı algoritmaların yüksek sönümlü ağır yapılar için güvenilir olmadığı sonucuna varmıştır. Operasyonel Modal Analiz sonucu elde edilen mod şekillerinin normalize olmadığını ve kuvvet tepkileri beraberinde normalizasyonunun yapılması gerektiği önerisinde bulunmuştur. Harmonik uyarımdan kaynaklanan matematiksel modları belirlemek için başka çalışmalar yapılabileceğini belirtmiştir.

Chia (2007) yaptığı çalışmada mekanik yapılar içinde çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO) uygulamaları için kör sistem belirleme (BSI) adını verdiği bir Operasyonel Modal Analiz Yöntemi geliştirmiştir. Çalışmasının sonucunda BSI sisteminin yapısal sistemlere uygulanmasının metodolojik gereksinimlere bağlı olduğunu belirtmiştir. Bu metodolojik gereksinimleri; geçici tepkiler, çözüm yayılımı için başlangıç değerlerinin mevcudiyeti ve uzamsal bilgi olarak sıralamıştır. Ayrıca bu metodun uygulanabileceği potansiyel mekanik yapı sistemleri olarak; kaynaklı raylar üzerinde seyahat eden trenleri, köprülerde araba geçişlerini ve nakliye konteynırlarını taşımak için kullanılan raya monte portal vinçleri önermiştir. Bunlara ek olarak geçici yanıtlara duyulan ihtiyacın, tekniğin uygulama kapsamını sınırlayacağını belirtmiştir. Bununla birlikte, bir genlik modülasyonuna veya bir dizi örtüşen patlamaya benzer

şekilde, zaman yanıtında tekrar eden tepe ve dip bölümlerinin olduğu durumlarda bu durumun engellenebileceği varsayımını yapmıştır. Üstel bir pencere uzunluğunun uygun uygulaması, her bölümün ayrı bir gerçekleştirme olarak ele alındığı böyle bir yanıt sinyalinin bölümlerini çıkarmak için kullanılabileceğini belirtmiştir. Bu kaynakların (örneğin bir dizi borudaki bir pompa) bahsettiği tepki süresi profilini indükleyen herhangi bir yapıya uygulanabileceğini vurgulamıştır. Çoklu girdi durumunda, aynı periyodikliğe sahip kaynaklarla bir durum bulmanın zor olacağı kanısına varmıştır.

Fabbrocino vd., (2007) yaptıkları çalışmada Operasyonel Modal Analiz Yönteminin bazı teorik yönlerini gözden geçirmişlerdir. Özellikle, mühendisler ve mimarlar tarafından sinyal işleme konularında sıklıkla kullanılan LabView Virtual Instruments gibi iyi bilinen araçlar tarafından verilen fırsatları vurgulamayı amaçlayan frekans alanı ve zaman alanı yöntemlerine odaklanmışlardır. Gerçek bir yapı olan Napoli'deki Mühendislik Okulu Kulesi'ne kaydedilen verilere dayalı olarak bir uygulamayı kısaca rapor etmiş ve farklı yazılım mimarilerinin hesaplama çabasının bir değerlendirmesi sunmuşlardır. Çalışmasında Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma yönteminin Operasyonel Modal Analiz metodu içerisinde uygulamasını LabView programı ile analiz etmişlerdir. Çalışmasının sonucunda performansları sürdürmek, yükseltmek ve ek özellikler sunmak için yazılımın dikkatlice tasarlanmasının gerekliliğini vurgulamışlardır.

Raineri vd., (2007) yaptıkları çalışmada Napoli'nin Mostra D'Oltremare bölgesinde yer alan Uluslar Kulesi gibi ilgili tarihi betonarme binaların modal parametrelerinin değerlendirilmesi için Operasyonel Modal Analiz Yönteminin kullanımı araştırmışlardır. Bunun için Uluslar Kulesi'nin geometrik karakteristiğini yapısal ve yapısal olmayan elemanlar açısından tam olarak tanımlamak için geometrik inceleme yapmışlardır. Yapısal şemanın ve yapı elemanlarındaki çelik donatının tanımlanmasını amaçlayan yapısal inceleme işleminin ardından beton ve çeliğin mekanik özelliklerinin değerlendirilmesine yönelik malzemelerle ilgili araştırma işlemini gerçekleştirmişlerdir. Yapıya Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulayarak dinamik karakteristikleri elde etmişlerdir. Analiz sonrasında yapının sabit yükler ve deprem yüklemesi durumunda yapısal tepkinin değerlendirilmesi yaparak çalışmalarını tamamlamışlardır. Operasyonel Modal Analiz Yönteminin tarihi yapılarda modal parametrelerin belirlenmesi ve yapı sağlığının izlenmesindeki yeri ve önemini vurgulamışlardır.

Schmidt (2007) yaptığı çalışmada Almanya'da bulunan İkiz Çan Kuleleri'nin dinamik davranışlarının deneysel ve sayısal olarak belirlenmesini araştırmıştır. İkiz Çan Kulelerinin modal parametrelerinin deneysel olarak elde edilmesi sırasında Operasyonel Modal Analiz

Yöntemini kullanmıştır. Sayısal analiz kısmında yapıların Sonlu Eleman Modellerini oluşturmuştur. Oluşturduğu sonlu eleman modellerinin güncellenmesinde ve iyileştirilmesinde Operasyonel Modal Analiz Yönteminden elde ettiği sonuçları kullanmıştır. Çalışmasında Operasyonel Modal Analiz Yöntemi sonuçları ile iyileştirme sonrası sonlu eleman modellerinin örtüştüğünü belirtmiştir. Ancak çanların çalınıp çalınmaması gibi durumları elde aldığında, çanların çalındığı durumdaki dinamik davranışın kullanılan metodoloji kapsamında tam olarak belirlenemediğini belirtmiştir. Gelecek çalışmalara yönelik çanların çalınması durumundaki dinamik davranışların belirlenmesi amacıyla yeni bir metodoloji oluşturulması gerektiği önerisini sunmuştur.

Fanning vd., (2007) yaptıkları çalışmada Dublin'in merkezinde, Liffey Nehri üzerinde yakın zamanda inşa edilmiş bir yaya köprüsü olan Sean O'Casey Köprü'sünün dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılan Geleneksel Deneysel Modal Analiz Yöntemi ve yenilikçi bir yöntem olan, çevresel titreşim testi olarak da adlandırılan Operasyonel Modal Analiz Yöntemlerinin kullanılmasının sonuçlarını karşılaştırmışlardır. İlk olarak Sean O'Casey Köprüsü'ne geleneksel deneysel yöntem olan Geleneksel Deneysel Modal Analiz Yöntemini uygulamışlardır. Bu yöntemi uygulamak için titreştirici ve sarsıcılardan yararlanmışlardır. Ölçüm sonucunda elde ettikleri dinamik karakteristikleri kaydetmişlerdir. Daha sonraki aşamada aynı köprü'nün gürültü, yaya trafiği vb. durumlardaki çevresel etkiler altında Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle dinamik karakteristiklerini belirlemişlerdir. Operasyonel Modal Analiz Yönteminden elde ettikleri sonuçları da kaydederek geleneksel deneysel yöntemden elde ettikleri sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonuçları eşliğinde her iki yöntemin avantajlarını ve dezavantajlarını bildirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda her iki yöntemden elde edilen dinamik karakteristik değerlerinin nispeten birbiri ile örtüştüğü ancak ekonomiklik açısından bakıldığında Geleneksel Deneysel Modal Analiz Yönteminde kullanılan ekipmanların maliyetlerinin yüksek olduğunu ve bu gerekçe ile Operasyonel Modal Analiz yönteminin kullanılmasının daha avantajlı olduğunu belirtmişlerdir. Her iki yöntemin de kendine ait avantaj ve dezavantajları bulunsa da, Operasyonel Modal Analiz Yönteminin hem tahrik kuvvetlerine ihtiyaç duymaması sebebiyle yapılarda olası hasarlar meydana getirmediğini hem de kompleks ve büyük inşaat mühendisliği yapılarının sarsıcılar aracılığıyla titreştirilmelerinin zor olması gerekçesiyle Operasyonel Modal Analiz Yönteminin kullanılmasının ekonomik ve yapı sağlığı açısından daha avantajlı olduğunu belirtmişlerdir.

Bayraktar vd., (2007) yaptıkları çalışmada Trabzon ilinin Akçaabat ilçesinde yapımı devam eden bir çatı sistemini ele almışlardır. Kafes taşıyıcı sisteme sahip olan bu çatının dinamik karakteristiklerini hem teorik hem de deneysel olarak belirlemişlerdir. Deneysel yöntem olarak Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarını üç aşamada gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın ilk kısmında bu çatının analitik modellemesini oluşturarak modal analiz yöntemi ile dinamik karakteristiklerini elde etmişlerdir. Çalışmanın ikinci kısmında Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile çatının dinamik karakteristiklerini deneysel olarak elde etmişlerdir. Çalışmanın üçüncü ve son aşamasında ilk iki aşamada elde ettikleri sonuçları karşılaştırarak iki yöntem arasındaki sonuç farklılıklarının nedenlerini araştırmışlardır. Operasyonel Modal Analiz ile dinamik karakteristikleri, Frekans Alanında Ayırıştırma Yöntemi titreşim tekniği ile elde etmişlerdir. Ölçüm işlemini tek eksenli ivmeölçeri ref olarak belirttikleri referans noktasında tutarak, 2 adımda ve her adımda 4 adet üç eksenli ivmeölçerin uygulama yerlerini değiştirerek yapmışlardır. Ölçümler sırasında çatıyı dışarıdan uyguladıkları kuvvet ile titreştirmişlerdir. Çalışma sonucunda her 2 ölçümden elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Sonuçlardaki farklılığın sebebi olarak ise analitik modellemede yapılan kabuller ile gerçekteki durum ile örtüşmediğini düşündüklerini öne sürmüşlerdir. Buna örnek olarak, modellemede ankastre olarak kabul edilen kolonların gerçekte cıvatalı çelik levhalar ile bağlandığı görselleri vermişlerdir. Ayrıca kullanımda olan çatının bağlantı elemanlarındaki hasarların modellemeye aktarılmadığını belirtmişlerdir. Yani diğer bir deyişle çalışma sonucunda malzeme ve sınır şartları bakımından yapılan kabuller ile gerçekte mevcut olan durumların örtüşmemesinin, sonuçlarda farklılıklar meydana getirdiği görüşünü ortaya koymuşlardır. Çalışma sonucu olarak ise malzeme ve sınır şartları kabullerinin gerçeğe uygun olarak modellenmesinin 2 deney yöntemi arasında uyum oluşturabileceğini belirtmişlerdir. Mevcut farklı kabullerden dolayı Operasyonel Modal Analiz Yönteminde elde edilen frekanslardan, teorik analiz yönteminden elde edilen frekans değerlerinin daha yüksek olduğunu vurgulamışlardır.

Rainieri (2008) yapıların sismik korunmaları ve yapısal sağlık izlenimlerinde Operasyonel Modal Analiz Yönteminin kullanılması üzerinde çalışmıştır. Çalışmasında Operasyonel Modal Analiz teknikleri ve bu tekniklerin yapıların sismik korunmasına yönelik uygulamalarını araştırmıştır. Çalışmasının ilk bölümünde Operasyonel Modal Analiz Yöntemine dair teorik bilgiler vermiştir. Benzer deneysel modal analiz yöntemleri ile Operasyonel Modal Analiz Yöntemini karşılaştırmıştır. Benzerlikleri ve farklılıkları sunmuştur. Operasyonel Modal Analiz Yönteminin yapıldığı yapılar ve ölçüm sonuçları hakkında bilgiler

vermiştir. Gürültü kaynaklı bozulan ölçümlerin sonuçlarının, güvenilirliğinin artırılmasına yönelik bir tanımlama sürecini açıklamıştır. Çalışmasının ikinci bölümünde bazı örnek olay incelemelerini aktarmıştır. Yapıların sismik korunmasında Operasyonel Modal Analiz Yönteminin rolünü hem deneysel testler hem de sayısal modellemeler üzerinden aktarmıştır. Mevcut çalışma sonucunda Operasyonel Modal Analiz Yönteminin inşaat mühendisliği yapılarında kullanımının yanı sıra Operasyonel Modal Analiz Yönteminin potansiyelini artıracak bir gelişme olarak yapı sağlığı izleme alanında kullanımını sunmuştur. Kapsamlı literatür incelemeleri sonucunda sismik alanda Operasyonel Modal Analiz Yönteminin uygulamalarına dikkat çekmiştir. Yapıların sismik alandaki korunmalarında kullanılan Operasyonel Modal Analiz Yönteminin tarihi ve miras yapıların korunması üzerindeki önemini de vurgulamıştır.

Kuyumcuoğlu (2008) yaptığı çalışmada, Operasyonel Modal Analiz Yönteminin uygulama alanları ve uygulanabilirliğini saptamak amacıyla farklı materyal veya malzemeler üzerinde uygulanması üzerinde çalışmıştır. Bu amaçla çalışma öncesinde konu ile alakalı önceden yapılmış çalışmaları belirlemek üzere bir literatür çalışması yapmıştır. Bu literatür taramasından elde ettiği teorik bilgilerin pratikte uygulanabilirliğini anlamak amacıyla deneysel çalışmalar yapmıştır. Çalışmasına başlarken literatür taramasının tamamlanmasının ve yorumlanmasının ardından ilk aşama olarak MATLAB programı üzerinde bir yazılım geliştirmiştir. Geliştirdiği bu yazılımın kontrollerini yapmak ve çalışabilirliğini sınamak amacıyla literatür taramasından elde ettiği sonucu bilinen ve farklı elemanlar üzerinde yapılan çalışmaların deneylerini yapmış, yazılımın doğru çalışması adına düzenlemelerde bulunmuştur. Bu düzenlemelerin ardından çalışır durumdaki bir çamaşır makinesi üzerinde bu analiz yöntemini uygulamıştır. Makinenin sonlu eleman modelini oluştururken I-DEAS programını kullanmıştır. Dinamik simülasyon programı olarak ise ADAMS yazılımını kullanmıştır. Çalışmada hem geleneksel yöntem olan tahrik kuvveti uygulanarak yapılan modal analiz yöntemi hem de çalışma şartlarında modal analiz yöntemi olarak bilinen Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulanarak belirlenen dinamik karakteristikleri karşılaştırmıştır. Çamaşır makinesinde yaptığı deneyi uygulamadan önce bir yapı üzerinde, düz bir kiriş elemanda, düz bir plakta bu analizleri uygulayarak karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda ise Operasyonel Modal Analiz Yönteminin yapılarda ve uygun ortam hazırlandığında uygulanabilir olduğu ancak çamaşır makinesi gibi dönme etkili yapılarda sonuçlar her ne kadar tatmin edici olsa da bu dönel etkinin dinamik karakteristikleri belirlemeyi zorlaştırdığı sonucuna varmıştır.

Raineri vd., (2009) yaptıkları çalışmada deprem mühendisliği ve yapısal sağlık izleme (SHM) alanında Operasyonel Modal Analiz Yönteminin kullanımının uygunluğunu araştırmışlardır. Yapıların sismik performanslarının değerlendirilmesi ve işletme koşullarında dinamik davranışlarının karakterizasyonunu analiz ederek deneysel testler ile sonlu eleman modellemesi arasındaki etkileşimi karşılaştırmak amacıyla; ilk olarak Napoli'deki tarihi bir betonarme yapının sismik kırılabilirliğinin değerlendirilmesini amaçlayan bir sonlu eleman model güncelleme uygulaması için deneysel sonuçları Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle elde etmişlerdir. Bu analizler sonucunda ilk yapının dinamik analizleri ile güvenilir bir sismik kırılabilirlik değerlendirmesini amaçlayan temsili bir model elde etmek için dinamik analizlerin gerekliliğini belirtmişlerdir. İkinci olarak yapıların hasar değerlendirmesi için modal parametre tanımlanmasının rolüne odaklanmışlardır. Napoli'deki Mühendislik Okulu Ana Binasına Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulamışlardır. Operasyonel Modal Analiz Yöntemine dayalı otomatik mod tanımlama tekniklerinin potansiyelinin yüksek olduğunu belirtmişler ve bu potansiyeli daha da arttırmak amacıyla algoritmalar önermişlerdir. Çalışma sonucunda önerdikleri algoritmanın geliştirilme sürecinde olsa da umut verici olduğunu belirtmişlerdir.

Agneni vd., (2009) yaptıkları çalışmada Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile modal parametrelerin belirlenmesinde doğru sönüm oranlarının belirlenmesi amacıyla korelasyon tekniklerinin kullanımını araştırmışlardır. Korelasyon tekniklerinin Operasyonel Modal Analiz Yönteminde kullanılması amacıyla iki adet konsol giriş ve bir adet helikopter kanadının analizini gerçekleştirmişlerdir. Konsol girişlerin gürültü ortamında uyarımı sağlanarak Operasyonel Modal Analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu sayede modal parametreleri elde ederek korelasyon teknikleri ile tahmini sönüm değerini belirlemişlerdir. İkinci olarak çalışır vaziyette olan ve rüzgâr yükü ile uyarılan bir helikopter kanadının da Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle modal parametrelerini belirlemişlerdir. Modal parametrelerini ve korelasyon teknikleri ile sönüm oranını hesaplamışlardır. Çalışmalarının sonunda sundukları sonuçların, Operasyonel Modal Analiz Yönteminde korelasyon tekniklerinin sunduğu olasılıkları doğruladığını belirtmişlerdir. Çalışmada kullandıkları yaklaşımı, Güç Spektral Yoğunluklarının tahmini yoluyla geliştirmişlerdir. Hem basit yapılarda (konsol girişler olarak) hem de daha önemli olanlarda (bir helikopter kanadı olarak) önerdikleri bu yaklaşımın, çok eşleştirilmiş modlar durumunda da sönüm oranı tahminlerinde bazı zorluklar gözlemlediklerini vurgulamışlardır. Önerdikleri korelasyon ile özellikle düşük frekans modları için sönüm oranının fazla tahmin edilmesi sağlanacağını belirtmişlerdir. Bu etkinin, gerçek korelasyon fonksiyonunu çarpan üçgensel fonksiyondan kaynaklandığını belirtmişler; korelasyon

fonksiyonu değerlendirmesinde uzun zaman dizileri kullanılarak bu hatanın önemli ölçüde azaltılabileceği tahmininde bulunmuşlardır. Sönüm oranlarının daha fazla tahmin edilmesinin, dinamik tepkinin değerlendirilmesinde ağır bir yanıtıcı faktör olduğunu ve bu nedenle sönüm oranlarının gerçek değerini tahmin etmek için bazı kriterlerin elde edilmesinin oldukça önemli olduğunu vurgulamışlardır.

Gentile vd., (2009) yaptıkları çalışmada İtalya'nın Lombardiya bölgesine bağlı Varese ilinde bulunan bir komün olan Aracisate'de bulunan San Vittore Collegiata Kilisesi'nin Çan Kulesinin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ve sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi amacıyla Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmışlardır. Kule üzerinde sırasıyla Haziran 2007 ve Haziran 2008'de iki Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile çevresel testi yapmışlardır. Her iki testte de 15 tek eksenli WR 731A piezoelektrik ivmeölçer ve 16 kanallı bir veri toplama sistemi kullanmışlardır. Her test için, iki farklı ortam titreşimi verisi serisi kaydetmişlerdir. İlk seride, ortam uyarımını sadece rüzgâr ve mikro titreşimler vasıtasıyla sağlamışlardır. İkinci seride, çanları çalarak ses ile uyarılma sağlamışlardır. Frekans Alanında Ayırıştırma (FAA) Yöntemi ve Stokastik Alt Alan Belirleme (SAAB) Yöntemleri ile ortam titreşim verilerinden modal parametrelerin çıkarılması işlemini gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre SAP2000 programı ile yapının sonlu eleman modelinin iyileştirmesini yapmışlardır. Çalışmanın sonuçlarını listelemişler ve ortotropik elastisite varsayımının, yığma taş yapılar modellenirken daha uygun olabileceği önerisinde bulunmuşlardır.

Grosel vd., (2009) yaptıkları çalışmada büyük bir endüstriyel yapının bakır işlerinde kullanılan ısı geri dönüşüm jeneratörlerinin çalışır vaziyette iken dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla teorik modal analiz, geleneksel deneysel yöntem olan Geleneksel Deneysel Modal Analiz ve çevresel titreşim testi olarak bilinen Operasyonel Modal Analiz Yöntemlerini kullanarak bu üç yöntemin karşılaştırmalarını yapmışlardır. Yapının teorik analiz kısmında SAP2000 programı ile yapının sonlu eleman modelini 6000'den fazla serbestlik dereceli bir model oluşturarak analiz etmişlerdir. Daha sonra yapıya Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulamışlardır. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi sırasında 2 tanesi referanslı ölçüm olmak üzere 6 kanallı ve toplamda 72 noktada ölçüm yapmışlardır. Son olarak darbe çekiçleri yardımı ile yapıya Geleneksel Deneysel Modal Analiz Yöntemi uygulamışlardır. Yapı oldukça büyük olduğundan tahrik kuvvetleri kullanılarak bu tür büyük ve kompleks yapıların titreştirilme işleminin zor olduğunu belirtmişlerdir. Geleneksel Deneysel Modal Analiz Yöntemi sırasında tahrik kuvveti uygulamasına en yakın ivmeölçerlerin aşırı yüklendiğini belirtmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda büyük endüstriyel yapılar için bu üç yöntemin

uygulanabilirliğini karşılaştırmışlardır. Her üç yöntem ile ilgili avantaj ve dezavantajlar olduğunu belirtmişler ancak Operasyonel Modal Analiz Yönteminin harmonik uyarımlar dışında diğer yöntemlere göre daha başarılı bir yöntem olduğunu vurgulamışlardır. Geleceğe yönelik olarak büyük endüstriyel yapılar için Operasyonel Modal Analiz Yönteminin uygulanmasının geliştirilmesi önerisinde bulunmuşlardır.

Birinci (2010) yüksek lisans çalışmasında taş kemer köprülerin dinamik özelliklerini teorik ve deneysel olarak belirlemeyi ve sonlu eleman modellerini Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile iyileştirmeyi amaçlamıştır. Çalışmada, Rize ili Çamlıhemşin ilçesindeki Şenyuva ve Osmanlı köprülerini kullanmıştır. Yüksek lisans tez çalışmasını dört bölüme ayırmıştır. İlk bölümde dinamik karakteristiklerin belirlenmesinin önemi ve önceki çalışmalara değinmiştir. İkinci bölümde kullandığı sayısal ve deneysel yöntemleri anlatmış ve köprüler hakkında ayrıntılı bilgiler vermiştir. Üçüncü bölümde, ANSYS programını kullanarak köprülerin sonlu eleman modellerini oluşturmuş ve teorik modal analizini yapmıştır. Dördüncü bölümde Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak köprülerin dinamik karakteristiklerini belirlemiştir. Çalışmasının sonucunda, teorik analiz ve Operasyonel Modal Analiz sonuçlarını karşılaştırarak oluşturduğu sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesi gerektiği sonucuna varmıştır. Sonlu eleman iyileştirme işleminin sonrasında elde ettiği sonuçlara göre Operasyonel Modal Analiz Yönteminin taş kemer köprüler gibi karmaşık yapılar için güvenle kullanılabilceği belirtmiştir.

Özcan (2010) doktora tez çalışmasında, yapıların patlatma kaynaklı doğrusal olmayan davranışları deneysel yöntemlerle belirlemiştir. Çalışmasında, betonarme ve yığma taşıyıcı sistemine sahip olan hem bina hem de köprü örnekleri kullanmıştır. Bu yapı örneklerinin patlatma anındaki zemin ve yapı titreşim verilerini almıştır. Patlatma hasarının tahmin kriterlerinin belirlenmesi amacıyla bölgeye ait 64 adet patlatma kaydı verisi kullanmıştır. Yapılara ait dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. Çalışmasında yapıların sonlu eleman modellerini ANSYS programı ile oluşturmuştur. Çalışmasının birinci bölümünde çalışmaya ait literatür taramasını sunmuştur. İkinci bölümde yapılara ve zeminlere ait deneysel ölçümleri, teorik analizleri ve Operasyonel Modal Analizleri içeren çalışmalarını ve uygulamaları sunmuştur. Üçüncü bölümde hasar tahmin kriterlerinin belirlenmesini, teorik ve Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile elde edilen sonuçlar ışığında yapıların sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesini, önceden elde ettiği patlatma kaynaklı veriler ışığında bu etkinin malzemeler üzerindeki doğrusal olmayan dinamik davranışlarına yer verdiği bulguları sunmuştur. Operasyonel Modal Analiz kısmının

tamamlanmasının ardından yapıların sonlu eleman modelleri üzerinde analitik dinamik karakteristikleri belirlemiştir. Sonlu eleman modellerinin oluşturulmasında ANSYS programını kullanmıştır. Sonlu eleman modellerinin analitik dinamik analiz sonuçları ile Operasyonel Modal Analiz sonuçlarını karşılaştırarak yapılara ait sonlu eleman modellerini iyileştirmiştir. Son bölüm olan dördüncü bölümde ise çalışma sonuçlarını sunmuş ve ileride yapılacak çalışmalara dair önerilerde bulunmuştur. Sevim (2010), doktora tezi çalışması kapsamında kemer barajların dinamik davranışlarının sonlu eleman ve deneysel modal analiz ile belirlenmesini, laboratuvar ortamında inşa edilen küçük ölçekli TİP-1 barajı ve mevcut bir baraj olan Berke Barajı üzerinde uygulamıştır. Berke Barajı'nın dinamik karakteristiklerini Sonlu Elemanlar Yöntemi ile belirlemiştir. Berke Barajı Sonlu Eleman Modelinde ise gövde için 760 adet SOLID45 elemanı, temel için 7000 adet SOLID45 elemanı ve rezervuar için 5700 adet FLUID80 elemanı kullanmıştır. Kullanılan bu elemanlar 8 düğüme sahip olup, X, Y ve Z ekseninde yer değiştirme serbestliği bulunmaktadır. Çalışma sonucunda Berke Barajı'nın analitik ve deneysel dinamik karakteristikleri arasında fark olması sebebiyle, barajın sonlu eleman modelini bu sonuçlara göre iyileştirmiştir. Çalışma sonucu olarak ise deneysel modal analiz yönteminin kemer barajlarda dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde etkili bir işlevi olduğu kanısına varmıştır.

Kaya ve Şafak (2011) yaptıkları çalışmada Yapısal Sağlık İzleme (SHM) alanında; Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ve Geleneksel Deneysel Modal Analiz Yöntemi gibi deneysel modal analiz yöntemlerinin uygulanması sırasında gerçek zamanlı mod tanımlama tekniği geliştirmişlerdir. Bu tekniğin uygulanması için KOERI-MIDS isimli bir bilgisayar yazılımı geliştirmişlerdir. Yazılımın çalışma doğruluğunun denetlenmesi işlemini ise İstanbul'da bulunan ve çeşitli depremler ile zarar görmüş olan Ayasofya Müzesi üzerinde uygulamışlardır. Yazılımın doğruluğunun denetlenmesi ve müzenin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla hasarsız yöntem olması sebebiyle Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda geliştirmiş oldukları yazılımı, İstanbul'da 1500 yıllık tarihi bir yapı olan Ayasofya Müzesi'nden kaydedilen ortam titreşim verileriyle test etmişlerdir. Geliştirdikleri yazılım ile yapının modal özelliklerini gerçek zamanlı olarak başarılı bir şekilde tespit ettiklerini belirtmişlerdir. Ayasofya testinin sonuçlarını daha önce farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda geliştirdikleri yazılım olan KOERI-MIDS sonuçlarının önceki çalışmaların sonuçlarıyla iyi bir uyum içinde olduğunu gösterdiğini belirtmişlerdir.

López vd. (2011) yaptıkları çalışmada lamine cam kirişlerin dinamik davranışlarını belirlemek amacıyla hem analitik modal analiz yöntemini hem de Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmışlardır. Lamine cam kirişlerin Ross, Kerwin ve Ungar'ın analitik modeli ve bir sonlu eleman modeli ile dinamik karakteristiklerini analitik olarak belirlemişlerdir. Daha sonra analitik yöntemlerden elde ettikleri sonuçları doğrulamak amacı ile lamine cam kirişlere farklı sıcaklıklarda Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulamışlardır. Çalışma sonucunda analitik yöntemden elde ettikleri sonuçlar ile Operasyonel Modal Analiz Yönteminden elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Doğal frekanslar için analitik ve sayısal tahminleri ile Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile elde ettikleri deneysel değerlerin iyi bir uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir.

Foti vd. (2011) yaptıkları çalışmada İtalya'da bulunan L'Aquila Üniversitesi'nin Mühendislik Fakültesinde bulunan ve hasar gördüğü bildirilen A yapısının hasar tespiti ve bu hasardan sonra yapının dinamik davranışlarının belirlenmesi amacıyla Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmışlardır. Bunun için Mühendislik Fakültesinde bulunan A binasının ivmeölçerler yardımı ile ivme değerlerini ölçmüşlerdir. Eş zamanlı olarak SAP2000 programı ile birlikte yapının sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır. Daha sonra yapının modal parametrelerini Gelişmiş Frekans Alanında Ayırıştırma (GFAA) Yöntemi ile belirlemişlerdir. Operasyonel Modal Analiz Yönteminden elde ettikleri modal parametreler ışığında yapının sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi ve güncelleştirilmesini yapmışlardır. Güncelledikleri ve iyileştirdikleri sonlu eleman modeli aracılığı ile program üzerinden analitik analiz yaparak yapının aldığı hasar sonrası oluşacak dinamik davranışlarını belirlemişlerdir. Yöntemin geleceğe yönelik umut verici olduğunu ancak halen üzerinde çalışılması gereken bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

Cappelini vd., (2011) İtalya'nın Milano kentinde bulunan Gothic Katedral olan Duomo Katedrali'nin Yapısal Sağlığının İzlenmesi (SHM) ve modal parametrelerinin belirlenerek bu tarihi yapıyı korumak amacıyla Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmışlardır. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile gözlem yapmayı, çürüme olgusunu incelemeyi ve izlenmeyi, yerleşme ve zamanın anıta zarar vermesini önleyen bir çözüm geliştirmeyi amaçlamışlardır. Ayrıca Duomo Katedrali'nin ana kulesi olarak değerlendirilen Guglia Maggiore'nin restorasyon planı için Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmışlardır. Bunun için Guglia Maggiore Kulesi'nin 4 farklı seviyesinde, X ve Y yönlerinde, ivmeölçerler aracılığı ile ölçümler yapmışlardır. Bu ölçümleri geçerli yapı parametrelerini en doğru şekilde elde etmeyi amaçlayarak birkaç gün boyunca tekrarlamışlardır. Operasyonel Modal Analiz

Yöntemi ile yaptıkları ölçümler sırasında rüzgâr yükü ve gece-gündüz etkisi vb. durumları dikkate almışlardır. Çalışmaları sonunda doğal frekansların gündüz-gece koşullarından etkilendiğini, bazı durumlarda mod şekillerinin tanımlama yönteminden ve titreşim seviyesinden etkilendiğini belirtmişlerdir. Daha geniş bir koşul yelpazesine sahip olmak ve dolayısıyla sistem davranışının daha iyi bir tanımına sahip olmak için daha fazla ölçüm yapılması gerektiği önerisinde bulunmuşlardır.

Beyen ve Kutanis (2011) yaptıkları çalışmada Operasyonel Modal Analiz Yönteminden elde edilen sonuçlar ile geleneksel deneysel yöntem olarak bilinen Geleneksel Deneysel Modal Analiz Yönteminin bir alternatifi olan Geleneksel Deneysel Modal Analiz Yönteminden elde edilen sonuçların karşılaştırmasını yapmışlardır. Saha deneylerinden kaydettikleri gerçek test verilerini kullanarak giriş gürültüsünün değerlendirmesini yapmışlar, girişin gücü ve sonuçlara etkisini incelemişlerdir. Operasyonel Modal Analiz Yönteminde harmonik uyarılar olması durumunda, yapıdaki tüm yapı elemanlarının ve rijit diyafram döşemelerinin aynı harmonik girdiye maruz kalacağını varsayarak sözde modların etkilerini ortadan kaldırmak için kat transfer fonksiyonları önermişlerdir. Her iki deneysel yöntemden elde ettikleri sonuçların doğruluk ve fiziksel yorumlamalarını yapabilmek açısından çapraz kontrol edilmesini amaçlamışlardır. Böyle bir karşılaştırmalı çalışma için, Marmara Bölgesindeki uygun binalar üzerinde bir dizi ölçüm yapmışlardır. Örnek olay yapısı olarak ise 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sırasında yapım aşamasında olan 5 katlı betonarme (RC) çıplak çerçeveli bir apartmanı seçmişlerdir. Bu apartmanın bazı kolonlarında küçük hasarları kontrol etmişlerdir. Çalışma sonucunda çevresel şartlar ve zorlanmış titreşim durumları için elde ettikleri transfer fonksiyonlarını, gerçek giriş çıkış çiftlerinden tahmin ederek önerdikleri transfer fonksiyonları ile karşılaştırmışlardır.

Turan (2012) çalışmasında dengeli konsol betonarme karayolu köprülerinin dinamik karakteristiklerini belirlemek amacı ile deneysel modal analiz ve analitik çalışma yöntemlerini kullanmıştır. Deneysel modal analiz yöntemi olarak Operasyonel Modal Analiz Yöntemini seçmiştir. Analitik çalışma kısmında ise Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanmıştır. Çalışmanın uygulama aşamasını dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen Berta Köprüsü üzerinde gerçekleştirmiştir. Çalışmasını 4 bölüm olarak gruplandırmıştır. İlk bölümde yapıların dinamik karakteristiklerine ve elde edilme yöntemlerine ilişkin teorik bilgiler vermiştir. Ayrıca dengeli konsol yapılar ve Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile ilgili detaylı bilgilere de ilk bölümde yer vermiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde çalışmada kullanılan Berta Köprüsü hakkında genel bilgilere yer vererek SAP2000 programı ile köprünün sonlu eleman modelini oluşturmuştur.

Sonlu eleman modelini oluştururken toplam 208 düğüm noktası ve 97 çubuk eleman kullanmıştır. Modelleme sırasında köprü tabliyesini ve köprü ayaklarını 6 adet serbestlik derecesine sahip çubuk elemanlar kullanarak modellemiştir. Köprünün modellenmesinin ardından sonlu elemanlara bölme işlemini gerçekleştirmiştir. Oluşturduğu sonlu eleman modeli üzerinden dinamik karakteristikleri elde etmiştir. Köprünün sonlu eleman modeli üzerinden uygulanan bu analitik analiz sırasında köprünün yalnızca kendi ağırlığını kullanmıştır. Bu analiz sonucunda köprünün ilk beş doğal frekansını 0.394-1.310Hz aralığında elde etmiştir. Daha sonra köprüye Operasyonel Modal Analiz uygulamıştır. Berta Köprüsü'nün Operasyonel Modal Analiz işlemi sırasında ekipman olarak; minimum frekans aralığı ve hassasiyeti 0.1-1500 Hz ve 10 V/g olan B&K 8340 tipi tek eksenli sismik ivmeölçerler, dizüstü bilgisayar, tek eksenli sinyal kabloları ve ivmeölçerleri köprüye sabitlemede kullanılacak olan vidalama aparatları kullanmıştır. İvmeölçerlerden elde edilen sinyalleri B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesinde birleştirerek PULSE ve OMA yazılımına aktarmıştır. Ölçüm 20dk sürmüştür. Ölçümleri iki adımda referanslı olarak tek çevresel titreşim testi şeklinde yapmış ve çevresel etki olarak rüzgâr ile yaya etkilerini dikkate almıştır. Dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemlerini kullanmıştır. Bunlardan elde ettiği dinamik karakteristikler doğrultusunda; malzeme özellikleri (elastisite modülü ve yoğunluk değişimi ile), sınır şartları (sınır şartlarının iyileştirilmesi) ve diğer etkilere (perde duvarı yükünün iyileştirilme sırasında eklenmesi) göre sonlu eleman modelinin iyileştirmesini yapmıştır. Çalışmasının üçüncü bölümünde ikinci bölümde yapılan analiz ve analitik işlemlerin sonuçlarını ve değerlendirmelerini sunmuştur. Sonlu eleman modelinin iyileştirmeden önceki analitik ve deneysel frekanslar arasında %2-11 aralığında bir fark bulurken iyileştirme işleminin tamamlanmasının ardından bu farkın %0.2-6 seviyesine çekildiğini belirtmiştir. Çalışmasının son bölümünde ise sonuç ve önerileri ile yaralandığı kaynakları belirtmiştir.

Osmancıklı (2012) yaptığı çalışmada, prefabrik yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde analitik ve deneysel yöntemler kullanarak, Operasyonel Modal Analiz Yönteminin kullanıldığı deneysel yöntem sonuçlarına göre yapıların sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesini amaçlamıştır. Bu amaca bağlı olarak 5 bölüm olarak hazırladığı tez çalışmasının ilk bölümünde analitik ve deneysel olarak dinamik karakteristikleri belirleme yöntemlerine, prefabrik yapılar hakkında genel bilgilere; prefabrik yapıların dünyadaki emsalleri ve gelişme süreçlerine, prefabrik yapıların kullanım alanları, avantajları, dezavantajları, prefabrik yapıları oluşturan elemanlar ve bu elemanların detayları gibi teorik

bilgilere yer vermiştir. Ayrıca bu teorik bilgilerin görsellerini sunmuştur. Çalışmasının ikinci bölümünde seçtiği prefabrik bir sanayi yapısı olan Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi ve prefabrik bir üst geçit olan C-1 üstgeçidi yapıları üzerinde analitik ve deneysel uygulamalar yapmıştır. İlk olarak SAP2000 programı ile yapıların sonlu eleman modellerini oluşturmuştur. Oluşturduğu bu sonlu eleman modelleri üzerinde program aracılığıyla analitik analiz yaptırmış ve teorik dinamik karakteristikleri elde etmiştir. Daha sonra yapılara deneysel analiz yöntemlerinden Operasyonel Modal Analiz uygulaması yapmıştır. Operasyonel Modal Analiz Yöntemini uygularken çevresel etkiler olarak yaya-trafik hareketleri ve rüzgâr etkilerini kullanmıştır. Operasyonel Modal Analiz uygulaması sonrasında dinamik karakteristikleri belirlemek amacıyla Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemlerini kullanmıştır. Çalışmasının üçüncü bölümünde; teorik ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristiklerin karşılaştırılması sonucunda çıkan farklı değerlere göre, deneysel yöntemden elde edilen sonuçları dikkate alarak sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesini yapmıştır. Çalışmasının dördüncü bölümünde sonuç ve önerileri listelemiştir.

Wang (2012) yaptığı çalışmada modal gerinim enerjisi korelasyonu kullanılarak çelik kafes köprülerin yenilikçi hasar değerlendirmesini yaparken, çelik köprünün dinamik karakteristiklerini belirlemek ve sonlu eleman modelinin iyileştirmesini ve güncellemesini yapmak amacıyla Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. Sınırlandırdığı elemanlar üzerinde uyguladığı Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile bu elemanların doğal frekans ve mod şekillerini belirlemiştir.

Baştürk (2013), yaptığı tez çalışmasında Bursa ilinde bulunan tarihi yığma minarelerin dinamik davranışlarının incelenmesinde Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. Çalışma kapsamında 7 adet minare incelemiştir. Analiz yöntemleri beraberinde bulunan frekansların yapıların deprem davranışlarındaki etkisi üzerinde durmuştur. Bu etkiyi belirlemek amacı ile deprem yönetmeliğinden yararlanmıştır. Çalışma sonucunda ise kesit alanının rijitlik üzerindeki etkisinin büyük olduğu sonucuna varmıştır.

Zhivaev ve Boldyrev (2013) yaptıkları çalışmada güçlendirilmiş buz arenası stand yapısının teorik ve deneysel araştırmalarının sonuçlarını Operasyonel Modal Analiz yoluyla sunmuşlardır. Deneysel çalışmanın bir parçası olarak, doğal salınımların neden olduğu stand yapısı titreşimlerinin ivme ölçümlerini Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir. Teorik araştırmaları sırasında analitik analiz için ANSYS 11 programı ile yapının sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır. Stand yapısının dinamik özelliklerini

hesaplamak için kirişlerin davranışını ve stand detaylarını incelemişlerdir. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulanması sırasında bu alanda kalabalığın hareketine konu olan kalıcı tribünler için dinamik performans gereksinimlerini kullanmışlardır. Bu gereksinimleri alanda yapılan konserlerde bir kalabalığın müzik eşliğinde ritmik olarak hareket etmeleri (zıplayarak, dönerek) veya bir kalabalığın farklı spor etkinlikleri sırasında zıplarken, müzik eşliğinde zamanında sallanırken veya alkışlarken ritmik olarak hareket edebilecekleri olarak belirtmişlerdir. Ani sıçrama ve oturma gibi hareketlerin dinamik yüklere neden olabileceğini, koşan bir insan kalabalığının da bu yapıya dikey ve yanal dinamik yükler yükleyebileceğini göz önünde tutmuşlardır. Çalışmaları sonucunda deneysel ve analitik modal analizleri karşılaştırmışlardır. Bu güçlendirilmiş yapının herhangi bir spor faaliyeti, konser vb. etkinlik için kısıtlanmasının gerekmediğini ancak çalışmada standart yükler olarak izleyici hareketleri ile yapıyı analiz ettikleri için çalışılan bu yapının güvenli kullanımını sağladığını belirtmişlerdir. Kolon temelinin farklı oturması veya tribün yapısının aşırı yüklenmesi durumu ile karşılaşırsa yapının güvenlik sağlamadığını vurgulamışlardır.

Grappasonni vd., (2013) yaptıkları çalışmada Yapıların Sağlık İzleme (SHM) alanında Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılırken sayısal bir model dikkate alınmadan, işlemler sırasında birkaç sensörün ölçümünden tüm sistemin tepkisini tanımlayan yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Frekans alanında formüle ettikleri yöntemi, deneysel bir yapı üzerinde test etmişlerdir. Tam alan dinamik yanıt yaklaşımı adını verdikleri bu yöntemlerinin sağlamlığını, tek boyutlu yapılar için sayısal ve deneysel örneklerle değerlendirmişlerdir. Yaklaşımlarının, sayısal simülasyonlarla elde ettikleri beklenen değerleri veya Lazer Taramalı Doppler Vibrometre tarafından toplanan hız alanının kapsamlı ölçümleriyle sonuçlarını karşılaştırarak doğrulamışlardır. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi sırasında alüminyum konsol kullanmışlardır. Analizler sonucunda önerdikleri metodolojiyi sayısal simülasyonlara ve deneysel araştırmalar ile doğrulamışlardır. Önerdikleri metodolojinin güncellenmiş bir sayısal modelin yokluğunda yapısal sağlık izleme uygulamaları için uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Bergua vd., (2013) yaptıkları çalışmada laboratuvarında test ettikleri iki kiriş yapısının ölçekleme faktörlerini, Geleneksel Deneysel Modal Analiz ve Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile belirlemişlerdir. Deneysel işlemler sırasında içi boş dikdörtgen kutu kesit şeklinde çelik konsol kirişler kullanmışlardır. Deneysel Modal Analiz Yönteminde yapıları harekete geçirmek için bir darbe çekici kullanırlarken, Operasyonel Modal Analiz Testinde çevresel etkileri kullanmışlardır. Her iki tekniğin sağladığı sonuçları sunmuşlar ve elde ettikleri sonuçların doğruluklarını analiz etmişlerdir. Çalışma sonucunda İyi bir kütle değiştirme

stratejisi kullanıldığında, Operasyonel Modal Analiz Yönteminin mod şekillerini ölçeklendirmek için iyi bir teknik olduğu belirtmişlerdir.

Toydemir (2014) Sivas-Ankara Demiryolu hattında bulunan 5 adet köprünün deprem performansının spektral analizini incelemek amacıyla bu çalışmayı yapmıştır. Çalışmasında kullandığı köprülerin analitik ve deneysel analizleri sonucunda bulduğu dinamik karakteristiklerini karşılaştırmıştır. Çalışmada deneysel analiz olarak Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. Analitik analiz kısmında köprülerin modellenmesinde LARSA 4D BRIDGES Series paket programını kullanarak köprülerin sonlu eleman modellerini oluşturmuştur. Oluşturulan modellerin, kullandığı program aracılığıyla, mod şekillerini elde etmiştir. Daha sonra köprülere Operasyonel Modal Analiz Yöntemini uygulamıştır. Yöntem uygulanırken tek eksenli ve iki eksenli ivmeölçerler kullanmıştır. İvmeölçerlerden alınan sinyallerin aktarılması amacıyla veri toplama ünitesinden yararlanmıştır. Ayrıca çalışmasında sinyaller üzerinde Lineer Trendlerin Kaldırılması fonksiyonu ve 0.5-10 Hz frekans aralığı için Butterworth Bandpass filtre kullanmıştır. Filtrelerden elde ettiği sinyalleri Structural Vibration Solutions firması tarafından üretilen Artemis isimli Operasyonel Modal Analiz yazılım programı ile incelemiştir. Analiz sırasında dinamik karakteristiklerin elde edilmesi amacıyla Frekans Ortamında Ayrıştırma (FOA) Yöntemini kullanmayı tercih etmiştir. Ölçümlerin tamamlanıp dinamik karakteristiklerin elde edilmesinin ardından analitik yöntemle belirlenen dinamik karakteristikler ile deneysel yöntem ile belirlenen dinamik karakteristikleri karşılaştırmıştır. Daha sonra köprüler üzerinde doğrusal elastik analiz işlemi uygulamıştır. Köprülerin deprem performansını değerlendirirken DBYBHY 2007 yönetmeliğini kullanmıştır. Ayrıca DBYBHY 2007 yönetmeliğine ek olarak Kıyı ve Liman Yapıları, Demiryolları, Hava Meydanları İnşaatlarında İlişkin Deprem Teknik Yönetmeliği (2008)'ndeki etki/kapasite oranlarından yararlanmıştır. Köprülerin spektral analizi ve zaman tanım alanında deprem analizi tamamlandıktan sonra sonuçları liste halinde sunmuştur.

Demirtaş (2014) yaptığı çalışmada çok katlı betonarme binaların dinamik karakteristiklerinin hesaplanmasında Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ve Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanmıştır. Çalışmasının amacını, yakın fay yer hareketlerine göre izolatörlü ve izolatörsüz deprem davranışlarının araştırılması olarak belirtmiştir. Çalışmasında bodrum kat ile 17 kata sahip, yüksekliği 47.6m olan bir yapı örneği seçmiştir. Çalışmasının amacına göre; seçtiği 17 katlı betonarme yapının ilk olarak SAP2000 programı ile sonlu eleman modelini oluşturmuştur. Oluşturduğu sonlu eleman modeli aracılığı ile dinamik karakteristikleri elde etmiştir. Daha sonra yapıya uygulanan Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulamış ve

Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) Yöntemi ile elde ettiği dinamik karakteristikleri analitik yöntemden elde ettiği dinamik karakteristikler ile karşılaştırarak çıkan fark doğrultusunda malzeme özellikleri ve sınır şartlarını dikkate alarak sonlu eleman modelinin iyileştirilmesini yapmıştır. Sonlu eleman iyileştirmesinin ardından yapı gerçeğine en yakın modeli belirlemiştir. İyileştirme ve model belirleme aşamasından sonra çalışma amacı olan yakın fay hareketlerine göre izolatörlü ve izolatörsüz etkileri araştırmak adına modele izolatör eklentisi yapmıştır. Yapı modelinin izolatörlü ve izolatörsüz durumda deprem hareketlerini incelemiştir. Çalışma sonucunda çok katlı betonarme binaların tasarımında yakın fay hareketlerinin öneminin göz ardı edilmemesi gerektiğini ve ayrıca Operasyonel Modal Analiz Yönteminin çok katlı betonarme yapılarda güvenle uygulanabilir olduğunu vurgulamıştır.

Kömür vd., (2015) yaptıkları çalışmada Operasyonel Modal Analiz Yöntemini laboratuvar ortamında oluşturdukları küçük ölçekli düzlem çelik çerçeve sistemler üzerinde uygulamışlardır. Çalışma kapsamında tek katlı-tek açıklıklı ve üç katlı-tek açıklıklı düzlem çelik çerçeve sistemler kullanmışlardır. Başlangıç olarak bu sistemlerin SAP2000 programı üzerinde sonlu eleman modellerini oluşturmuşlardır. Oluşturdukları bu sonlu eleman modellerinin dinamik karakteristiklerini nümerik analiz yöntemi ile elde etmişlerdir. Sonrasında yapılan Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile elde ettikleri dinamik karakteristikleri ise nümerik analiz sonucunda elde ettikleri dinamik karakteristikler ile karşılaştırmışlardır. Çalışma kapsamında deneysel aşamada Operasyonel Modal Analiz Yöntemini uygularken, frekans alanında ayırıştırma yöntemine başvurmuşlardır. Çalışma sonuçları değerlendirildiğinde ivmeölçer ağırlıklarının ihmal durumunda bu sistemlerin sonlu eleman analizleri ile operasyonel modal analiz sonuçlarında farklılıklar olduğu ancak sonlu eleman modellerine ivmeölçer ağırlıkları eklenerek analiz yapıldığında iki analizin sonuçlarının birbiri ile örtüştüğünü saptamışlardır. Bu durumdan yola çıkılarak bu tip düzlem çelik çerçeve analizlerinde ivmeölçerlerin ağırlıklarının dinamik karakteristiklerin belirlenmesindeki önemi göz önüne alınarak, daha küçük ağırlıklı ivmeölçerlerin kullanılması önerisinde bulunmuşlardır.

Koçak vd., (2015) çalışmalarında Ankara-Sivas yolu üzerinde bulunan, tek açıklıklı bir demiryolu köprüsü olan, DGK175 köprüsünün dinamik karakteristiklerini, Operasyonel Modal Analiz ve Sayısal Analiz Yöntemi ile belirlemişlerdir. Üzerinden 2 adet yüksek hızlı tren hattı geçen bu köprünün, Ankara yönünde hareketli, Sivas istikametinde ise sabit mesnetli olarak yük aktardığını belirtmişlerdir. Çalışmanın Operasyonel Modal Analiz kısmında tek eksenli ve

iki eksenli olmak üzere 2 adet ivmeölçer kullanmışlardır. İvmeölçerlerden aldıkları sinyallerini veri toplama cihazları aracılığıyla birleştirerek tek bir dosya halinde kaydetmişlerdir. Çalışmaları kapsamında sinyaller üzerinde Lineer Trendlerin Kaldırılması fonksiyonu ve 0.5 – 10 Hz frekans aralığı için Butterworth Bandpass filtre kullanmışlardır. Ayrıca modal analizden elde edilen frekans sonuçlarında da 0.5 Hz altı frekansları ve 10 Hz üstü frekansları elimine etmişlerdir. Bu eliminasyon işlemi için ise Butterworth Bandpass Filtresi kullanmışlardır. Filtreden geçen elimine edilmiş bu sinyalleri Structural Vibration Solutions firması tarafından üretilen Artemis Modal isimli Operasyonel Modal Analiz Paket programı ile incelemişlerdir. Operasyonel Modal Analizi, FOA (Frekans Ortamında Ayrışım) Yöntemi ile uygulamışlardır. Çalışmanın sayısal modelleme kısmında köprüyü TCDD 2.Bölge Müdürlüğü'nden alınan projelerin verileri ile Larsa4D isimli paket programı ile modellemişlerdir. Modelleme işlemini yapının tüm proje verileri ile birebir olarak yapmışlardır. Modelleme sonucu Larsa4D isimli program ile sayısal analiz ile yapının periyotlarını bulmuşlardır. Daha sonra ivme ölçerler ve Artemis programı yardımıyla Operasyonel Modal Analiz yaparak sonuçları karşılaştırmışlardır. Sonuçların birbirine çok yakın çıktığını hesaplanan periyotlar arasında %0.12-%2.69'luk bir fark olduğunu vurgulamışlardır. Bu yakınsaklığın sonucunu ise sayısal modellemenin başarılı olduğu yönünde değerlendirmişlerdir. Bu yakınsama için ise; köprünün proje verilerine uygun olarak yapıldığı ve köprünün yakın zamanda yapılmasından dolayı malzemelerde yorulma hasarlarının henüz oluşmadığı sonucuna varmışlardır.

Boru (2015) yaptığı çalışmada DBYBHY 2007'ye göre 17 Ağustos 1999 Marmara Depremi'ni geçirmiş hasarsız, az hasarlı ve hasarlı olmak üzere seçtiği 8 bina üzerinde deprem performans analizi yapmıştır. Çalışmasında öncelikle seçtiği binaların SAP2000 ve ProBina Orion programları ile sonlu eleman modellerini hazırlamıştır. Hazırladığı modellerden yine aynı programlar aracılığıyla yapıların dinamik karakteristiklerini elde etmiştir. Modelleri, bu binaların gerçek binaların davranışlarına en yakın hale getirecek sonlu eleman model iyileştirmesini yapabilmek amacıyla yapıları Operasyonel Modal Analiz Yöntemini uygulamıştır. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile ARTEMIS programında Geliştirilmiş Frekans Tanım Aralığı Ayrıştırma Yöntemi kullanımı sonucunda elde ettiği dinamik karakteristikler ile analitik olarak bilgisayar programları aracılığıyla elde ettiği dinamik karakteristikleri karşılaştırmıştır. Karşılaştırma sonucunda sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesini ve güncellemesini yapmıştır. Çalışmasının ilerleyen aşamasında hem sonlu eleman iyileştirmesi yapılmamış hem de sonlu eleman iyileştirmesi yapılmış binalar için, DBYBHY 2007'ye göre doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan performans

değerlendirme yöntemlerini kullanarak bina performans analizlerini incelemiştir. Çalışmasının sonucunda sonlu eleman iyileştirmesi yapılmış binaların doğrusal elastik olmayan yöntemle yapılan performans analizlerinin gerçek sonuçlarla daha uyumlu olduğunu vurgulamıştır. Çalışması sonucunda öneri olarak; Türkiye Deprem Yönetmeliği 7.bölümünde yer alan binalardan bilgi toplanması kısmına sonlu eleman modellerinin kalibre edilmesi şartının getirilmesi gerekliliğini sunmuştur.

Hökeleli (2015) yaptığı çalışmada Manisa İlinde bulunan Hafsa Sultan Camii'nin ve minaresinin deprem davranışının belirlenmesini amaçlamıştır. Bu amaç doğrultusunda camii'nin dinamik karakteristiklerini analitik ve deneysel yöntemler ile belirlemiştir. Analitik yöntem olarak sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Çalışmada ilk olarak Hafsa Sultan Camii'nin hasar tespiti, taşıyıcı eleman ve malzeme deneylerini yapmıştır. Yapılan tespitler doğrultusunda AutoCad ve ABAQUS programları ile yapının sonlu eleman modelini oluşturmuştur. Oluşturduğu sonlu eleman modelinden teorik olarak dinamik karakteristikleri elde etmiştir. Daha sonra yapıya Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulayarak elde ettiği dinamik karakteristiklere göre yapının sonlu eleman modelinin iyileştirmesini yapmıştır. Yapının deprem davranışını belirlemek amacıyla 1999 Kocaeli Depremi Düzce ili ivme kayıtlarını kullanarak Zaman Tanım Alanında doğrusal deprem analizi yapmıştır. Önceden yaşadığı deprem ile hasar geçmişi olan bu caminin çatlak olan noktalarını esas alarak deprem davranışlarını sunmuştur.

Rizo-Patron (2016) dönen bir konsol kirişe, yüksek hızlı görüntü korelasyonu kullanarak Operasyonel Modal Analiz uygulamıştır. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi sonucunda dönen konsol kirişin dinamik karakteristiklerini belirlemiştir. Sabit yapıların aksine dönen yapıların hem modelleme aşamasında hem de analizlerinde zorluklar olduğunu belirtmiştir. Dönen sistemler modellenirken dönme ataletinin hesaba katılması gerektiğini vurgulamıştır. Analitik yöntemden elde ettiği sonuçlar ile deneysel sonuçları karşılaştırmıştır. Karşılaştırdığı sonuçlar neticesinde Operasyonel Modal Analiz Yönteminin dönen yapılar üzerinde güvenle kullanılabilen bir yöntem olduğunu belirtmiştir. Operasyonel Modal Analiz Yönteminin dönen yapılar üzerinde kullanılmasının umut verici olduğunu belirtmiş, araştırma-geliştirme ve yöntem sonuçlarının doğruluğunu arttırmak için önerilerde bulunmuştur.

McDonald (2016) yaptığı çalışmada Kuzey Amerika'da bulunan en uzun kablolu köprü olan ve dünya sıralamasında ikinci en geniş köprü olarak bilinen Port Mann Köprüsü'nün modal parametrelerinin belirlenmesinde ve sonlu eleman modelinin iyileştirilmesinde Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. İyileştirdiği sonlu eleman modeline ve başlangıçta

hazırladığı güncellenmemiş modele SAP2000 programı ile Time History Analiz uygulayarak köprünün belirli yer hareketlerine göre her iki durum için sismik analizini yapmıştır. Operasyonel Moda Analiz Yöntemi öncesinde sonlu eleman modelinden elde ettiği sonuçlar ile yöntem sonrası iyileştirilmiş, güncellenmiş yöntemden elde ettiği sonuçları karşılaştırmıştır. Model güncellemesinin bir yer hareketinden kaynaklanan kuvvet veya yer değiştirmede artışa ve başka bir yer hareketinden kaynaklanan kuvvet veya yer değiştirmede azalmaya neden olabileceğini belirtmiştir.

Yetkin (2016) çalışmasında Elazığ İlinin Doğukent mahallesinde bulunan Karabulut Sitesi A bloğunun dinamik karakteristiklerini elde etmek ve sonlu eleman modelini iyileştirmek amacıyla Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. Çalışmasında bodrum kat ve +5kat olan betonarme yapıyı proje verilerine uygun olarak SAP2000 programı ile modellemiştir. Modelleme aşamasında 592 adet çubuk ve 1736 adet kabuk eleman kullanmıştır. Modelleme işlemini Türkiye Deprem Yönetmeliği 2007'nin belirlediği sınırlara uygun olarak hazırlamıştır. Oluşturduğu yapı sonlu eleman modelinden yapı dinamik karakteristiklerini SAP2000 programı aracılığı ile analitik olarak elde etmiştir. Daha sonra yapıya, yapı köşelerine konmak suretiyle x ve y yönlerinde olmak üzere 8 adet ivmeölçer kullanarak referanssız ölçüm ile Operasyonel Modal Analiz uygulamıştır. Operasyonel Modal Analiz sonucunda elde ettiği dinamik karakteristikler ile analitik olarak elde ettiği dinamik karakteristikleri karşılaştırarak, Operasyonel Modal Analizden elde ettiği dinamik karakteristiklere göre yapının sonlu eleman modelini iyileştirmek amacı ile analitik modeli güncellemiştir. Güncellediği modelden yeniden elde ettiği dinamik karakteristiklerin Operasyonel Modal Analiz Yönteminden elde ettiği dinamik karakteristikler ile yakınsadığını vurgulamıştır. Çalışma sonucunda Operasyonel Modal Analiz Yönteminin betonarme yapılarda kullanımının güvenli olduğu sonucuna varmıştır.

Kurt (2016) çalışmasında Ordu ili Ordu-Ulubey yolunda bulunan Şıhlar Köyündeki Sarpderesi üzerinde bulunan tarihi Osmanlı döneminin son kısımlarına (19.yüzyıl) dayanan Tarihi Sarpdere Köprüsü'nün dinamik karakteristiklerini elde etmiştir. Dinamik karakteristikleri elde ederken analitik yöntem olarak Sonlu Elemanlar Yöntemini, deneysel yöntem olarak ise Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. Çalışmanın ilk kısmında mevcut köprü ölçekli olarak küçültülerek gerçek modelin yaklaşık %8'i boyutunda deneylerin uygulanması amacıyla gerçeğine yakın malzeme özellikleri ile laboratuvar ortamında hazırlamıştır. Hazırlanan bu modelin AUTOCAD çizimlerini yaparak, ANSYS programında sonlu eleman modeli oluşturmuştur. Oluşturduğu modelin analitik analizi sonucunda dinamik

karakteristiklerini elde etmiştir. Operasyonel Modal Analiz aşamasında ise laboratuvar ortamında hazırlanan köprü üzerinde 12 adet ivmeölçer yardımıyla deneysel analiz gerçekleştirilerek ARTEMIS yazılımı ile Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) Yöntemiyle dinamik karakteristikleri elde etmiştir. Hem analitik hem deneysel yol ile elde edilen dinamik karakteristikleri karşılaştırarak yapının sonlu eleman modelinin yalnız sınır şartlarına göre iyileştirmesini yapmıştır. Yaptığı iyileştirme sonucu tekrar analitik analiz yapmıştır. Bu analiz sonucunda analitik ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristiklerden mod şekillerinin uyumlu olduğunu gözlemlemiştir.

Mert (2016) çalışmasında yapıların dinamik karakteristiklerini belirlemek ve güçlendirme yapılan yapılarda yapılan güçlendirme işleminin dinamik karakteristikleri nasıl etkilediğini incelemek amacıyla Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. Çalışmasının başında malzeme deneyleri ile referans yapılar inşa etmiştir. İnşa ettiği bu referans yapılara sarsma tablası aracılığıyla deprem etkisi vermiştir. Bu yükleme işlemi sonrasında yapılara güçlendirme uygulaması yapmıştır. Güçlendirme uygulaması öncesi ve sonrasında Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanarak yapıların dinamik karakteristiklerini elde ederek karşılaştırmalarını yapmıştır.

Yavuzer (2016) yaptığı çalışmada İstanbul İli, Eyüp İlçesinde bulunan Zal Mahmud Paşa külliyesinin yapısal davranışını ve geçmiş deprem hasarlarının incelemesini yapmıştır. Örnek caminin dinamik karakteristiklerinin elde edilmesinde Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. 20 farklı noktada kullandığı 3 eksenli ivmeölçerler ile ölçüm işlemini gerçekleştirmiştir. ARTEMIS yazılımı ile dinamik karakteristikleri elde etmiştir. Daha sonra caminin sonlu eleman modelinin oluşturulmasında AutoCAD yazılımı ile ABAQUS yazılımını kullanmıştır. Oluşturduğu sonlu eleman modeline modal analiz uygulamıştır. Çalışmasında DBYBHY 2007'ye göre tanımlanan Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemini kullanmıştır. Çalışma sonucunda deneysel ve analitik yöntemden elde edilen dinamik karakteristikleri karşılaştırmıştır. Karşılaştırdığı bu karakteristiklere göre sonlu eleman modelinin güncellenmesi gerektiğini belirtmiştir.

Özkul (2016) çalışmasında İzmir'in Tire ilçesinde bulunan 1894 yılında inşa edilmiş ve zaman içerisinde yalnızca minaresi ayakta kalabilmiş olan, Rahmanlar Camii Minaresinin deprem performansının deneysel yöntem olan Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle belirlenmesini amaçlamıştır. Bu amaç doğrultusunda öncelik olarak minare üzerinde malzeme deneyleri gerçekleştirmiştir. Minareyi oluşturan moloz-kesme taşların sertlik değerini belirlerken yerinde yapılan tahribatsız Schmidt Çekici deneyi uygulamıştır. Daha sonra yapıyı

oluşturan taşlardan karot örneği alarak basınç deneyine tabii tutmuştur. Harç için kullanacağı basınç mukavemeti değerini ise literatürlerden almıştır. Zemin özelliklerini o bölgede bulunan bir işletme adına yapılmış zemin etüdü raporlarından yararlanarak belirlemiştir. Gerçekleştirdiği deney sonuçlarından ve zemin etüdü raporlarından elde ettiği malzeme ve zemin verileri doğrultusunda minarenin bilgisayar ortamında modellemesini yapmıştır. Modelleme aşamasında AutoCAD programında çizimini gerçekleştirdiği yapının, ABAQUS programında sonlu eleman modelini oluşturmuştur. Oluşturduğu sonlu eleman modeli üzerinde yaptığı analiz ile dinamik karakteristikleri elde etmiştir. Bu teorik analiz yardımıyla belirlenen mod şekilleri doğrultusunda, sonlu eleman modelinin iyileştirmesinin yapılması amacıyla yapıya uygulanacak olan Operasyonel Modal Analiz Yönteminde kullanılacak ivmeölçerlerin yerleştireceği noktaları belirlemiştir. 14 adet tek eksenli ivmeölçer kullanımı ile yapıya Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulamıştır. İvmeölçerlerden elde ettiği frekansları 16 kanallı TextBox 2010 veri toplama ünitesinde birleştirerek, Artemis yazılımına aktarmıştır. Artemis programında işlenen sinyalleri ise OMA 2006 yazılım programına aktararak dinamik parametreleri elde etmiştir. Bu minarede her biri 30-40dk süren 3 adet ölçüm yapmıştır. Test sonuçları tamamlandığında minarenin dinamik karakteristiklerini Stokastik Alt Alan Belirleme (SAAB) Yöntemiyle elde etmiştir. Analitik ve deneysel yöntem ile elde ettiği dinamik karakteristikleri karşılaştıran çalışmacı, farklar olduğunu görmüştür. Bu farklar doğrultusunda deneysel yöntemden elde ettiği dinamik karakteristikleri referans alarak; malzeme özellikleri ve sınır şartları ile sonlu eleman modelinin iyileştirmesini yapmıştır. Yapının deprem güvenliğinin ve deprem davranışının belirlenmesi adına iyileştirilen sonlu eleman modeli üzerine; Türkiye Ulusal Kuvvetli Yer Hareketi Veri Tabanı (KYHDATA)'dan aldığı veriler ile birlikte, 3 Şubat 2002'de meydana gelen 6.5 büyüklüğündeki Afyon-Çay depremi ile 17 Ağustos 1999'da meydana gelen 7.4 büyüklüğündeki Düzce depremi verilerinin analizini yapmıştır. Her iki depreme göre meydana gelen yapı davranışlarını çalışmasında sunmuştur. Çalışma sonucunda yığma yapılarda en önemli parametrelerden birinin Elastisite Modülü olduğunu vurgulamıştır. Ayrıca deprem analizleri sonucuna göre, yapı kültürel değerinin korunması adına yapı performans seviyesinin her iki deprem için sağlamadığını belirtmiştir.

Güneş ve Anıl (2017) Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile yığma yapıların dinamik davranışlarının belirlenmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında ele alınan Ankara ilinin Çankaya ilçesine bağlı ve Maltepe Semtinde bulunan 5 katlı yığma yapının dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde hem nümerik analiz yöntemine hem de Operasyonel Modal Analiz Yöntemine başvurmuşlardır. Nümerik analizi ise sonlu elemanlar

yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir. Operasyonel Modal Analiz Yöntemini uygularken kullandıkları ivmeölçerleri, SENSEBOX70x3 tipi üç eksenli ve çok hassas sismik ivmeölçerler olarak belirtmişlerdir. Veri toplama ünitesi olarak ise TESTBOX2010 serisinden 16 kanallı veri toplama ünitesi seçmişlerdir. Bodrum, zemin, 1, 2 ve 3 normal kattan oluşan 5 katlı yapının Operasyonel Modal Analizi sırasında kullandıkları iki adet ivmeölçeri bina merdiven döşemesi sahanlığına yerleştirmişlerdir. Bu ölçümlerde zemin katı referans olarak kabul etmişlerdir. Bodrum kat dışındaki katlarda ise x, y, z doğrultularında olmak üzere toplamda 4 adet referanslı ölçüm yapmışlardır. Çalışma sonucunda ise yapının sonlu eleman analizi ile Operasyonel Modal Analiz sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda sonlu eleman iyileştirmesi yapılırken iyileştirme parametresi olarak malzemenin elastisite modülünü seçmişlerdir. Çalışmanın olumlu sonuçlarını birçok yönden ele alarak listelemiş ve bu listedeki en önemli noktalardan biri olarak ise yönetmeliklerde Operasyonel Modal Analiz Yöntemini de içeren bir düzenleme yapılması gerektiği önerisini sunmuşlardır.

Erol (2017) çalışmasında TCDD köprüsünün dinamik karakteristiklerinin elde etmek amacıyla analitik analiz yöntemi olarak Sonlu Elemanlar Yöntemi ve deneysel analiz yöntemi olarak ise Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. TCDD 39+646 köprüsünün SAP2000 programı ile sonlu eleman modelini oluşturmuştur. Oluşturduğu modele program aracılığı ile modal analiz yaparak köprünün dinamik karakteristikleri olan mod şekilleri ve doğal frekans değerlerini elde etmiştir. Bu analiz sonucunda sonlu eleman iyileştirmesi yapılmamış model üzerinde oluşan sehim ve etkiyen momentleri incelemiştir. Daha sonra köprünün deneysel analizini Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile yapmıştır. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi sırasında çevresel etkiler olarak; tren yükü, rüzgâr ve yaya hareketlerini kullanmıştır. Operasyonel Modal Analiz sonucunda Stokastik Alt Alan Belirleme (SAAB) Yöntemiyle köprüye ait dinamik karakteristikleri elde etmiştir. Analitik ve deneysel analizlerden elde edilen dinamik karakteristikleri karşılaştırarak köprünün sonlu eleman modelinin iyileştirmesini yapmıştır. Sonlu eleman iyileştirme sırasında malzeme özellikleri iyileştirmesi ve sınır şartlarının iyileştirmesi yöntemlerini kullanmıştır. İyileştirme sonucu elde edilen dinamik karakteristikler ile deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristiklerin uyumlu olduğunu belirtmiştir. Çalışma sonucunda öneri olarak; analitik ve deneysel yöntemlerle elde edilen dinamik karakteristiklerin farklı çıkması durumunda sonlu eleman iyileştirmesi yapılması gerekliliğini sunmuştur.

Gani (2017) yaptığı çalışmada Tarihi Davutpaşa Kışlası olarak bilinen ve günümüzde Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa Kampüsü bünyesinde Fen-Edebiyat Fakültesi olarak

kullanılan yapının dinamik karakteristiklerini elde ederken Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. Yapının analitik analizi için modellenmesi aşamasında malzeme ve zemin deneyleri yapmıştır. Yapı geometrisinin modellenmesi amacıyla yerinde ölçümler yaparak yapının rölöve planını çıkarmıştır. Daha sonra malzeme ve zemin özellikleri ile rölöve planına göre ETABS programı ile yapının sonlu eleman modelini oluşturmuştur. Modelleme işleminin ardından oluşturduğu sonlu eleman modeline sınır şartlarını ve yük aktarımlarını tanımlamıştır. Yığma yapının malzeme kabullerini yaparken DBYBHY 2007'nin Bölüm 5'te yer alan koşullarını kullanmıştır. Nümerik analiz yardımıyla yapının dinamik karakteristiklerini ETABS sonlu elemanlar programı ile elde etmiştir. Sonraki aşama olarak ise yapıya Operasyonel Modal Analiz uygulaması yapmıştır. Bu analiz uygulaması için yapı koridorları boyunca her 15-30m aralıklarla ivmeölçerler yerleştirmiştir. X ve Y yönlerinde kayıt almıştır. İvmeölçerler 14 kanaldan titreşim verileri toplamıştır. Operasyonel Modal Analiz için 4 adet tek eksenli ve 5 adet çift eksenli ivmeölçer kullanmıştır. Yapı uzunluğunun fazla olması nedeniyle referanslı olarak yapılan ölçümü 7 adımda tamamlamıştır. Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle dinamik karakteristikleri elde ederken Artemis Modal programını kullanmıştır. Artemis Modal programından alınan verileri Geliştirilmiş Frekans Alanında Ayrıştırma Yöntemi kullanarak dinamik karakteristiklerden olan tarihi binaya ait mod şekillerini belirlemiştir. Analitik yöntemden elde ettiği dinamik karakteristikleri Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile elde ettiği dinamik karakteristikler ile karşılaştırarak sonuçların uyumlu olduğunu belirtmiştir. Ancak dinamik analizde 5.mod ile Operasyonel Modal Analizden elde edilen modun uyumlu olduğu sonucu ile nümerik yöntemde yapı hâkim modunun 1.mod değil 5.mod kabulü yapılması gerektiğini belirtmiştir. Sonraki aşamada bu kabule göre yapının sonlu eleman modeline TDY 2007'ye göre yatay ve düşey deprem yükü analizi yapmıştır. Deprem yükü analizi sırasında mevcut yapıda bulunan hasarları göz ardı etmemiştir.

Aslay (2017) çalışmasında 1939 Erzincan Depremi nedeniyle apsis kısmının yıkıldığı iddia edilen Değirmenliköy Kilisesi'nin gerçek yıkılma sebebini irdelemiştir. Buna bağlı olarak kilisenin rölöve çalışmasını yapmıştır. Rölöve çalışmasının ardından malzeme özelliklerini tayin etmek amacıyla literatürden ve deneysel yöntemlerden yararlanmıştır. Kilisenin sonlu eleman modelini SAP2000 programıyla yapının mevcut halini yani apsisli olmayan durumu ve apsisin bulunduğu durumu olarak 2 farklı şekilde modellemiştir. Yapının mevcut durum modeli üzerinde yapılan teorik analiz ile dinamik karakteristiklerini elde etmiştir. Daha sonra yapıya Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulamıştır. Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle elde

ettiği dinamik karakteristikleri analitik olarak elde ettiği dinamik karakteristikler ile karşılaştırmıştır. Karşılaştırma sonucunda çıkan farkların giderilmesi ve gerçeğe uyum sağlama amacıyla Operasyonel Modal Analiz Yönteminden elde ettiği dinamik karakteristikleri referans alarak yapının sonlu eleman modelini iyileştirmiştir. Sonlu eleman iyileştirmesi yaparken malzeme özellikleri ve sınır şartları değişimini kullanmıştır. İyileştirilmiş sonlu eleman modeline SAP2000 programı ile deprem yükü aktarımı yapmıştır. 1939 Erzincan Depremi verileri bulunmadığından 1992 Erzincan Depremi verilerini kullanmıştır. Yük aktarımını TDY 2007'ye uygun olarak yapmıştır. SAP2000 programı ile yapılan statik ve dinamik analizler sonucunda yapı apsisinin depreme bağlı olarak yıkılmadığını ancak yapıda apsis hasarı bulunması nedeniyle yıkılmış olabileceği sonucuna varmıştır. Ancak farklı tarihteki deprem verilerinden yararlanıldığıının unutulmaması gerektiğini vurgulamıştır.

Güneş (2017), yaptığı çalışmada yığma bir yapının dinamik karakteristiklerini, nümerik analiz ve deneysel yöntemler ile belirlemiştir. Çalışmada binaya ait dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde sonlu elemanlar yönteminden, deneysel çalışmalarda ise Operasyonel Modal Analiz Yönteminden yararlanmıştır. Çalışmada OMA yöntemini kullanma sebebinin bu yöntemin çevresel etkilerin oluşturduğu dinamik tepkileri hesaplama prensibine dayanıyor olması olarak belirtmiştir. Çalışma sırasında çevresel tepkileri ölçmek amacıyla yığma binaya ivmeölçerler yerleştirmiş ve bu ölçümlerden alınan değerler veri toplama ünitesi aracılığı ile taşınabilir bilgisayara aktarmıştır. Yığma binanın başlangıç sonlu eleman olarak, çubuk ve kabuk elemanlar yardımı ile modellenmesinde SAP2000 programını kullanmıştır. Çalışma sonucunda yığma binalarda hesaplanan bu parametrelerden yola çıkılarak bu tip binalarda hasar tespiti hakkında önemli noktalar üzerinde durmuştur. Yapı deprem davranışı, hasar ve onarım durumu hakkında tavsiyelerde bulunmuştur.

Cara vd., (2017) yaptıkları çalışmada İtalya'da bulunan Pedro G'omez Bosque yaya köprüsünün dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde Geleneksel Deneysel Modal Analiz Yöntemi ve Operasyonel Modal Analiz Yönteminden elde edilen sonuçları karşılaştırmıştır. Geleneksel Deneysel Modal Analiz Yönteminde tahrik kuvveti olarak elektro dinamik sarsıcılar kullanmışlardır. Operasyonel Modal Analiz işlemleri sırasında çevresel etkilerden yararlanmışlardır. Her iki deneysel yöntemi tamamlamalarının ardından, her iki veri setinden modal parametreleri tahmin etmek için beklenti-maksimizasyon algoritmasına dayalı; Deneysel Modal Analiz Yöntemi ve Operasyonel Modal Analiz Yöntemi sistem tanımlama algoritmaları kullanmışlar ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Çalışmalarının sonucunda her iki yöntemden de

elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olduğunu ve test sonuçlarının birbirlerini tamamlayarak kontrol edilebilme imkânı verdiklerini belirtmişlerdir.

Poprawa vd., (2017) yaptıkları çalışmada Polonya'da Tczew yakınlarındaki Vistula nehrini geçen on açıklıklı çift hatlı kafes demiryolu köprüsünün sonlu eleman modelinin güncellemesinde Operasyonel Modal Analizin kullanmışlardır. Köprünün sonlu eleman modelinin doğrulaması için, geçen trenlerin neden olduğu yer değiştirme zaman geçmişleriyle birlikte Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanarak çıkardıkları modal modeli kullanmışlardır. Doğruladıkları sayısal model aracılığı ile; mevcut trafik güvenliğini ve köprüdeki hat hız sınırını yükseltme olasılığı sorusuna cevap vermek için kapsamlı dinamik analizler yapabilmelerinin mümkün kılındığını belirtmişlerdir. Açıklık yer değiştirmelerinin ve ivmelerinin ölçümlerini, Operasyonel Modal Analiz Yöntemi sayesinde köprüyü normal demiryolu trafiği için kesintiye uğratmalarına gerek kalmadan yapmışlardır. Bu yönü ile Operasyonel Modal Analiz Yönteminin bu tür yapı işlevine son verilmemesi gereken durumlar için doğru çözüm olduğunu belirtmişlerdir.

Ercan vd., (2017) yaptıkları çalışmada Türkiye'nin Manisa ilinde bulunan Hafsa Sultan Camii'ne ait tarihi minare üzerinde; minarenin sonlu eleman modelini güncellemek amacıyla Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmışlardır. Minarenin 3 boyutlu katı modelinin geliştirmek amacıyla; minaredeki ölçüleri, kusurları ve malzeme bozulmalarını detaylı olarak ölçüm yaparak tespit etmişlerdir. Minarenin malzeme özelliklerini değerlendirmek için tahribatsız ve tahribatlı muayene yöntemlerini uygulamışlardır. Yapının teorik modal analizini; ABAQUS FE programında yapının Sonlu Eleman Modelini oluşturarak yapmışlardır. Daha sonra Operasyonel Modal Analiz Yöntemini uygulamışlar ve yapının dinamik karakteristiklerini belirlemişlerdir. Minarenin ortam titreşim ölçümlerinden elde ettikleri sonuçları minarenin sonlu eleman modelini güncellemek için kullanmışlardır. Doğal frekanslar ve buna karşılık gelen mod şekilleri hem teorik hem de deneysel modal analizlerden belirlemişler ve birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Analizleri karşılaştırmalarının sonucunda mod şekilleri arasında iyi bir uyum olduğunu ancak doğal frekanslar arasında farklılıklar gözlemlediklerini belirtmişlerdir. Model güncellemesini yaparken, değişen malzeme parametreleri ve sınır koşulları kullanmışlardır. Son olarak minarenin daha gerçekçi sonlu elemanlar modeli ortaya koymuşlardır.

Dabanlı (2017) yaptığı çalışmada 1748-1755 yılları arasında İstanbul'da inşa edilen Nuru Osmaniye Camii'nin dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi için yapıda özel bir

düzenlemeye ihtiyaç duymadan, test cihazlarının kurulumundan sonra kısa süreli kayıtlar almıştır. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi sırasında GPS ile senkronize olan 24 kanallı veri toplama ünitesinden 2 adet ve 3 eksenli kuvvet-dengeli ivmeölçerlerden 7 adet kullanmış ve verileri 200 örnekleme hızı ile kaydetmiştir. Operasyonel Modal Analiz sonucunda yapıdan elde ettiği kayıtların Fourier ve güç spektrumu analizi ile yapının her iki ana eksenini doğrultusunda ilk üç modu ve karşılık gelen frekanslarını elde etmiştir.

Mironov vd., (2017) yaptıkları çalışmada tipik endüstriyel yapıların, Yapısal Sağlık İzlemesi (SHM) alanında Operasyonel Modal Analiz Yönteminin tekniklerinin optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Operasyonel Modal Analiz Yönteminin uygulanması sırasında herhangi bir tahrik kuvvetine gerek olmaması gerekçesi ile bu yöntemi seçmişlerdir. İncelenecek yapı olarak, özel olarak tasarladıkları, tam olarak çalışır durumda bir rüzgâr jeneratörü ölçekli modelini kullanmışlardır. Entegre piezo film deformasyon sensör ağını, komütasyon modülü ve DAQ sistemi ile donatmışlardır. İlk olarak, yaklaşık bir sonlu eleman modeli yaklaşımı kullanarak yapıyı analiz etmişlerdir. Bu aşamadan sonra tam ölçüm Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ve ardından hazırladıkları multi-patch ile tekrar optimize ettikleri Operasyonel Modal Analiz Yöntemini uygulamışlardır. Analizler sonucunda tahmini mod şekilleri ve belirsizlikleri karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri mod şekillerinin istatistiksel analizini, mod şekillerinin ölçümler arasındaki dağılımını hesaplayarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda modal parametre tahmin sonuçlarının, verilerin ölçülme şeklinden (tam veya çoklu yama) etkilenmiş olabileceğini belirtmişler, gelecek çalışmalara yönelik öneri ve tavsiyelerde bulunmuşlardır.

Özdoğan (2018) yaptığı çalışmada Erzurum ili Yakutiye ilçesi Kadana Mahallesi'nde bulunan Kadana Camii'nin dinamik karakteristiklerinin elde edilmesinde analitik yöntem ile Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. Çalışmanın amacı Schmidt Çekici yöntemi ile malzeme özellikleri belirlenerek modellenen yapıların dinamik karakteristiklerinin analitik ve deneysel sonuçlarının uyumlu olup olmadığını irdelemektir. Yapının analitik analizi için modellenmesi adına rölövesini çıkarmıştır. Rölöve çıkarma işleminin ardından malzeme özelliklerini deneysel olarak ve literatür ile elde etmiştir. Yapıyı SAP2000 programı ile modellemiştir. Yapının modellemesini makro modelleme tekniği ile oluşturmuştur. Program aracılığı ile yapıya teorik modal analiz uygulaması yaparak dinamik karakteristiklerini elde etmiştir. Daha sonra yapının 4 köşesine yerleştirilen 8 adet tek eksenli ivmeölçer ile Operasyonel Modal Analiz uygulaması yapmıştır. İvmeölçerlerden alınan verileri Artemis Modal Pro (2017) programına aktarmıştır. Frekans Alanında Ayrıştırma Yöntemi ile dinamik

karakteristikleri elde etmiştir. Çalışma sonucunda analitik ve deneysel dinamik karakteristikleri karşılaştırılarak Schmidt Çekici Yönteminin geliştirilmesi adına daha çok tarihi yapıda uygulanarak değerlendirilmesi sonucuna varmıştır.

Bulgur (2018) yaptığı çalışmada Yıldız Teknik Üniversitesi, Davutpaşa Yerleşkesinde bulunan Otağ-1 Hümayun tarihi binasının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile modellemesini oluştururken Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. İlk olarak yapının gerçek dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla Operasyonel Modal Analiz Yönteminden yararlanmıştır. Bunun için tek ve çift eksenli ivme ölçerler kullanmıştır. 10-15 dakikalık 3 ölçüm sonucunda ilk olarak Artemis paket programında ivmeölçer yerleştirilme koordinatlarını girerek bina geometrisini oluşturmuştur. Ardından ölçüm verileri ile Artemis Modal programına bu verileri aktararak Frekans Ortamın Ayırıştırma (FOA) Yöntemiyle dinamik karakteristikleri elde etmiştir. Daha sonra yapının nümerik analizi için ETABS programını kullanmıştır. Yapının ETABS programı üzerinde sonlu eleman modelini oluşturmuştur. Program aracılığı ile oluşturduğu üç boyutlu sonlu eleman modeline nümerik analiz uygulayarak dinamik karakteristikleri elde etmiş ve bu dinamik karakteristikleri Operasyonel Modal Analizden elde ettiği dinamik karakteristikler ile kıyaslamıştır. Çıkan sonuçların birbiri ile uyumlu olduğunu gözlemlemiştir. Çalışmasının son aşamasında oluşturduğu ve doğruluğunu kıyaslama ile teyit ettiği sonlu eleman modeline TDY2007'e göre deprem hesabı yaparak deprem yükü analizi yapmıştır. Yaptığı bu deprem analizi sonucunda gözlemlerine göre çalışma sonucu olarak yapının onarım ve güçlendirme ihtiyacı olduğunu vurgulamıştır.

Youssouf (2018) yaptığı çalışmada tarihi bir yığma yapı örneğini oluşturan duvarların düzlem dışı deprem etkileri için hasar limitlerinin irdelenmesinde, yapı dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi ve elde edilen dinamik karakteristiklere göre sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi aşamasında Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. İyileştirdiği sonlu eleman modeli üzerinde duvar analizlerini yapmıştır. Bunun için çalışmada İzmir'in Selçuk ilçesinde bulunan İsabey Camii'ni ele almıştır. Yapının malzeme deneylerinin ardından ABAQUS programı üzerinde yapının sonlu eleman modelini oluşturmuştur. Daha sonra oluşturduğu bu sonlu eleman modelini iyileştirmek amacıyla Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. Operasyonel Modal Analiz işlemi sırasında 16 kanallı 16-bit hassasiyetli veri toplama ünitesi ile 12 adet kuvvet dengeli ivmeölçer kullanmıştır. Operasyonel Modal Analiz yazılımı olarak ARTEMIS yazılımını kullanarak dinamik karakteristikleri elde etmiştir. Analitik ve deneysel yöntemler ile elde ettiği dinamik

karakteristikleri karşılaştırarak sonlu eleman modelinin iyileştirmesini yapmıştır. İyileştirilmiş sonlu eleman modeli üzerinde duvar analizlerini uygulamıştır.

Xie (2018) çalışmasında Operasyonel Modal Analiz Yönteminin çoklu kurulumlar ile uygulanması sırasında farklı test konfigürasyonlarının neden olabildiği farklı belirsizlik seviyelerini tanımlamayı, bu belirsizlikleri nicel olarak değerlendirmeyi ve yönetmeyi amaçlamıştır. Belirsizlik hesaplamasında, kısıtlamalara tabi bir fonksiyonun Hessian'ını türetmek için teorik bir çerçeve geliştirmiştir. Bayesian sistem tanımlamasına dayalı olarak geliştirdiği teoriyi, arka kovaryans matrisini türetmek için kullanmıştır. Önerdiği teoriyi sentetik veriler kullanarak doğrulamıştır. Geliştirdiği teoriyi sekiz katlı bir ofis binası ve bir asma yaya köprüsü üzerinde çoklu kurulum saha testleri olarak uygulamıştır. Tanımlama belirsizliklerini, belirsizlik yasası kullanarak hesaplamış ve değerlendirmiştir.

Alpaslan (2019) yaptığı çalışmada Tarihi Sarpdere Köprüsü'nün deneysel yöntemlerle dinamik karakteristiklerini belirleyerek; laboratuvar ortamında küçük bir boyutunu inşa ettiği tarihi köprü ile aynı özellikleri taşıyan yapıya meydana gelmesi muhtemel hasarlar vererek yapının bu hasarlar karşısında dinamik davranışlarında meydana gelen değişimlerin incelenmesiyle, gerçek yapıdaki hasar bölgesinin yerinin araştırılmasını amaçlamıştır. Bu amaç doğrultusunda gerçek Sarpdere Köprüsü'ne Operasyonel Modal Analiz Yöntemini uygulayarak yapının gerçek dinamik karakteristiklerini elde etmiştir. Laboratuvar ortamında küçük ölçekli olarak modellenen köprüye de Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulayarak prototip yapının dinamik karakteristiklerini de elde ederek karşılaştırmıştır. Bunlara eş zamanlı olarak bu iki köprünün analitik analizlerini de yapmak amacıyla sonlu eleman modellerini oluşturmuştur. Analitik ve deneysel analizlerden elde ettiği sonuçlardan çıkan farklara göre sonlu eleman iyileştirmesini yapmıştır. Sonlu eleman iyileştirmesini tamamlamasının ardından köprü hasar tespiti analizlerini yapmıştır.

Sarıça (2019) çalışmasında yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde çevresel titreşim testi olarak bilinen Operasyonel Modal Analiz Yönteminde kullanılacak bir bilgisayar programı yazımı üzerinde çalışmıştır. Program yazımında Polonya'nın Czestochowa şehrindeki bir köprüye ait dataları kullanmıştır. Artemis Modal Analiz programı ile elde edilen bu dataların düzenlenmesini yapmıştır. Değerleri düzenledikten sonra grafiksel olarak sunulma aşamasında Python programlama dilini kullanmıştır. Tepki spektrumları ve matrislerin oluşturulmasında Matlab programından yararlanmıştır. Dataların çözümlenmesi için Frekans Alanında Ayırıştırma algoritmasının Peak-Picking yöntemi ile analizini yapmıştır. Programın hazırlanmasının ardından Manisa Muradiye Cami'nin Operasyonel Modal Analiz

Yöntemi ile dinamik karakteristiklerini hazırladığı program ile elde etmiştir. Çalışma sonucunda %99'a kadar yakın sonuçlar elde edildiğini vurgulamıştır.

Altıok (2019) yaptığı çalışmada Manisa'da bulunan tarihi Lala Mehmet Paşa Camii ve İbrahim Çelebi Camii yapılarına ait minarelerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde deneysel yöntem olarak Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. Minarelerin çizimlerini AutoCad programında yaparak ABAQUS CE programında sonlu eleman modellerini oluşturmuştur. Sonlu eleman modellerine nümerik analiz uygulayarak dinamik karakteristiklerini elde etmiştir. Daha sonra minarelerin Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile elde ettiği dinamik karakteristiklerini nümerik yöntemden elde ettikleri ile karşılaştırmış, çıkan farklara göre sonlu eleman iyileştirmelerini yapmıştır. Her minare için 3 adet sonlu eleman modeli oluşturmuştur. Bunları başlangıç sonlu eleman modeli, iyileştirilmiş malzeme parametrelili sonlu eleman modeli ve iyileştirilmiş malzeme parametreleriyle yapı-zemin etkileşimi incelenmesi adına oluşturduğu model olarak sıralamıştır. Her üç modele de doğrusal ve doğrusal olmayan zaman tanım alanlı analizler uygulayarak sonuçlarını karşılaştırmıştır. Çalışma sonuçları beraberinde önerilerini sunmuştur.

Girgin (2019) çalışmasında Uşak ili sınırları içerisindeki Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) tarafından işletilmekte olan; yüz yılı aşkın süredir hizmet altındaki Basmane–Dumlupınar güzergâhındaki 199+325 çelik demiryolu köprüsünün sonlu eleman modelini iyileştirmek amacıyla Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. Köprü üzerindeki çevresel titreşim verilerini ivmeölçerler yardımıyla toplamış ve köprünün modal parametrelerini Operasyonel Modal Analiz Yöntemlerini kullanarak belirlemiştir. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi sonucunda güncellediği modal parametreler vasıtasıyla hasar tespiti, hasar bölgesi veya yeri ve hasar miktarının tespit edilebileceğini belirtmiştir. Gelecekte meydana gelebilecek herhangi bir doğa olayının meydana getirebileceği hasarların tahmininde de bu parametrelerin kullanılabilirliğini vurgulamıştır. Köprünün analitik analizi ve sonlu eleman modellemesi sırasında SAP2000 yapısal analiz programını kullanmıştır. Çalışmacı, çalışma kapsamında çelik köprü analizi yapmış ve çalışmasının sonunda bu yöntemin diğer köprü türleri için de kullanılabilir olduğunu belirtmiştir.

Chang (2019), Operasyonel Modal Analiz Yöntemi sırasında alınan ölçümlerden gürültü vb. gibi ölçümü yanıltıcı verilerin çıkarılması ve yararlı olan ham bilginin elde edilmesi üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışmada yararlı verilerin ayıklanması hususunda Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) olarak bilinen yöntemin üç boyutlu hali olarak bilinen 3B-DIC yöntemini kullanmıştır. Çalışmasında 3B-DIC yöntemi ile elde edilen büyük miktarda veri ile

baş edilebilmesi amacıyla seyrek temsil algoritmaları oluşturmuştur. Yer değiştirme ölçümünün nüanslarını koruma ve görüntü ayrıştırmasının kompaktlığını koruma yeteneğine sahip yöntemler geliştirmeyi amaçlamıştır. Yer değiştirme haritalarının 3D-DIC ölçümünden özlü ve temsili bir ayrıştırması amacıyla K-SVD algoritmasına ve CS yöntemine dayanan iki kullanışlı sıkıştırma yöntemi geliştirmiştir. Çalışması sonucunda geliştirdiği algoritmalar ve CS teorisi ile SD yönteminin entegrasyonunun, ölçülen verilerden temel bilgileri çıkarmak için yeni bir yol sunacağını belirtmiştir.

Desjardins (2019), Titreşime Dayalı Yapısal Sağlık İzleme Yöntemi (VBSHM) ve Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile inşaat mühendisliği yapılarının yapısal sağlık izlemesinin (SHM) yapılması üzerinde çalışmıştır. Çalışmasında ölçümleri gerçekleştirmek üzere Kanada'da bulunan Konfederasyon Köprüsü'nü kullanmıştır. Çalışmasında Konfederasyon Köprüsü üzerinde bulunan ışık direklerinde rüzgar olayları nedeniyle meydana gelen büyük genlikli titreşimlerin önlenmesi için sönümlenme çözümü geliştirmeyi amaçlamıştır. Bu amaç ile ışık direklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile modal parametrelerini belirlemiştir. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi sırasında çevresel etkiler sebebiyle meydana gelen titreşimleri ölçmek için dört adet üç eksenli kablosuz ivmeölçer kullanmıştır. Ölçümlerin sonuçlarını test etmek amacı ile laboratuvar ortamında yapı elemanlarını modellemiş ve analizlerini yapmıştır. Çalışmasının sonucunda çalışır vaziyetteki köprü ışık direklerinin kalan tahmini hizmet ömrü ve yorulma miktarını belirlemiştir. Bu tip çalışmaların gelecekte güven ile uygulanabilmesi için daha fazla benzer nitelikte çalışma yapılması gerektiğini vurgulamıştır.

Friis vd., (2019) yaptıkları çalışmada korelasyon güdümlü Operasyonel Modal Analiz Yöntemlerinin elasto-mükemmel plastik doğrusal olmayan sistemi eşdeğer (en iyi doğrusal) veya en azından uygun bir şekilde doğrusal olarak tahmin etme yeteneğini değerlendirmişlerdir. Basit bir T-şekilli çelik yapının sonlu eleman modelinin tepesine bir Jenkins elemanı ekleyerek analiz için uygun bir sayısal test yatağı kurmuşlardır. İki Operasyonel Modal Analiz Yöntemi tabanlı yöntemin doğrusal modal parametre tahmin performansı, sonuçları eşdeğer bir doğrusal sistemin teorik olarak türetilmiş tahminleriyle karşılaştırarak değerlendirmişlerdir. Değerlendirmelerini, elasto-mükemmel plastik davranış sergileyen sistemin 500 Monte Carlo doğrusal olmayan sayısal simülasyonuna dayandırmışlardır. Çalışmaları sonunda; Operasyonel Modal Analiz Yöntemlerinin, ilgili frekans ve sönüm tahminlerinde bir sapma ile incelenen simülasyon sistemi için güvenilir sonuçlar sağladığını bulmuşlardır. Elde ettikleri teorik ve Operasyonel Modal Analiz Yöntemi tabanlı tahminlerle bağlantılı olarak hem zaman hem de

frekans alanında sentezlenmiş yanıtların bir analizine dayanarak, korelasyon fonksiyonlarının tahmininin en uygun lineer sistemin bir tahminini geliştirmediğini gözlemlemiştir.

Gentile ve Saisi (2019) yaptıkları çalışmada Operasyonel Modal Analiz tabanlı Yapısal Sağlık İzleme'nin (SHM) tarihi yapılar, kuleler ve katedraller gibi hem nispeten basit hem de çok karmaşık binalara uygulamasını; 13y.y'da inşa edilen Gabbia Kulesi, 11.y.y'da inşa edilen Chiesa Collegiata di San Vittore Çan Kulesi ve 1386-1813 yılları arasında inşa edilen Milano Katedrali yapıları üzerinde uygulamalı olarak araştırmışlardır. Her üç yapıya da Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulayarak yapıların dinamik karakteristiklerini belirlemiştir. Üç tarihi kulenin sürekli dinamik izlemesinin seçilmiş sonuçlarını rapor etmişlerdir. İnceledikleri tarihi kulelerde frekans değişiklikleri üzerinde farklı sıcaklık kaynaklı; malzemelerin termal genişemesinin neden olduğu yüzeysel çatlakların ve küçük duvar süreksizliklerinin kapanması nedeniyle artan sıcaklıkla doğal frekansların artması, donma koşulu çevresinde azalan sıcaklıkla modal frekansların hızlı ve önemli artışı, eğik yapısal elemanlar tarafından uygulanan itme artışı veya metalik bağların gevşemesi gibi yerel düzeyde artan sıcaklığın etkileri gibi etkiler gözlemlemiştir.

Yücel (2020) yaptığı çalışmada herhangi bir ikaz kuvveti uygulanmasına ihtiyaç duyulmayan Operasyonel Modal Analiz Yöntemini bir dizel gemi jeneratörü üzerinde uygulanmasının sonuçlarını ele almıştır. Çalışmada yöntem uygulanırken jeneratör seti kaidelerinden sökülmediği ve çalışma şartlarında analiz edildiğini vurgulamıştır. Bu çalışmanın, yöntemin uygulama alanı bakımından ilk olma niteliği taşıdığını vurgulamıştır. Çalışma kapsamında, 2 ivmeölçer ve 4 kanallı bir analizör kullanılmasının tüm modal parametrelerin belirlenmesi bakımından yeterli olduğunu belirtmiştir. Çalışma sonucunda ise geleceğe dönük bir bakış açısı ile bu sistemin sonlu eleman analizinin de yapılmasının ve bu analiz sonuçları ile Operasyonel Modal Analiz sonuçlarının karşılaştırılmasının faydalı olacağı önerisinde bulunmuştur.

Akbaş (2020) çalışmasında iki betonarme binada bağ kirişlerinin etkilerinin araştırılmasında; İstanbul ilinde 1976 yılında inşa edilen, A ve B Bloklarından oluşan, ikiz ve kat seviyelerinde bağ kirişleriyle birbirine bağlı betonarme binalar üzerinde Operasyonel Modal Analiz ve Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanmıştır. Çalışmanın başında yapıları laboratuvar ortamında gerçek ölçekli ve bağ kirişli olarak modellemiştir. Modellenen yapılar üzerinde her biri için ayrı olmak koşuluyla Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulamış ve sonlu eleman modellerini oluşturmuştur. Daha sonra bağ kirişlerini kırarak yapılara tekrar Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulamış ve yeniden sonlu eleman modellerini oluşturmuştur. Bağ

kirişli ve bağ kirişlerinin kırılmasından sonra elde edilen dinamik karakteristikleri hem analitik olarak hem deneysel olarak karşılaştırmıştır.

Şahin (2020) yaptığı çalışmada kauçuk izolatörlü yapıların soğuk hava koşulları etkisi altındaki modal davranışlarını araştırmak amacıyla; Erzurum şehrinde bulunan, toplam 386 adet kauçuk izolatör üzerinde inşa edilmiş olan Erzurum Bölge Eğitim ve Araştırma Hastanesi'nin incelemesini yaparken Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. Yapının SAP2000 programıyla sonlu eleman modelini oluşturarak analitik analizini gerçekleştirmiştir. Sonrasında yapıya farklı sıcaklıktaki hava şartlarında Operasyonel Modal Analiz uygulamıştır. Her iki analiz türünden de elde ettiği sonuçları karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda hava sıcaklığındaki 10<sup>0</sup>C düşüş sonucunda kauçuk izolatör rijitliğinde %32.8'lik bir artış olduğunu ve yapının 1.periyodunda %13 azalma gözlemlendiğini belirtmiştir.

Savaş (2020) yaptığı çalışmada çok katlı betonarme yapıların yapım kalitesi kontrolünün değerlendirilmesinde Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. Çalışmasında yapımı yeni tamamlanan çok katlı bir betonarme yapının tahribatsız malzeme deneylerinin yapılmasının ardından, proje verileri ve malzeme deneyleri doğrultusunda SAP2000 programı ile sonlu eleman modelini oluşturmuştur. Oluşturduğu sonlu eleman modelinin teorik analizini yaparak yapının dinamik karakteristiklerini elde etmiştir. Daha sonra yapıya Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulamış, elde ettiği dinamik karakteristikleri analitik yöntem ile elde ettiği dinamik karakteristikler ile karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda imal edilen yapı hâkim periyodunun, statik projeden hesaplanan değerden %40 daha küçük olduğunu, Operasyonel Modal Analiz Yönteminin yapıların yapım kalitesinin değerlendirilmesinde kullanılabilir bir yöntem olduğunu belirtmiştir.

Okuyucu (2020) yaptığı çalışmada tek katlı ve projesi olmayan bir betonarme binanın dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. Tek katlı betonarme yapının dinamik davranışlarını yerinde belirlemek amacıyla Operasyonel Modal Analiz Yöntemini uygulamadan önce yapının projesi bulunmadığından yerinde incelemeler yaparak yapının rölövesini çıkarmış, donatı tespit cihazları ile taşıyıcı sistemin donatı haritasını belirlemiş, tahribatlı ve tahribatsız yöntemler ile yapının malzeme özelliklerini belirlemiştir. Yerinde incelemeler sonucu taşıyıcı sistemini, donatı haritasını ve malzeme özelliklerini belirlediği yapının SAP2000 programı ile sonlu eleman modelini oluşturmuştur. Yapı üzerinde belirlediği noktalara ivmeölçerler yerleştirerek Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulamıştır. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi sırasında kaydettiği

titreşim verilerini veri toplama üniteleri yardımıyla ARTEMIS MODAL PRO yazılımına aktarmıştır. Çalışmasının sonucunda deneysel ve teorik sonuçları karşılaştırmıştır.

Zhu (2020) çoklu kurulumlar ve çoklu modlar ile Bayes Operasyonel Modal Analiz Yöntemi üzerinde çalışmıştır. Zhu, çalışmasında; Bayes perspektifinden çoklu kurulumlar ve çoklu (muhtemelen yakın) modlarla Operasyonel Modal Analiz Yönteminin teorisine, hesaplama algoritmasına ve pratik uygulamasına katkıda bulunmayı amaçlamıştır. Bu amaç ile çok sayıda çok dereceli serbestlik sistemleri için bile pratik uygulamaya izin veren Beklenti-Maksimizasyon algoritmasına dayalı, hızlı yinelemeli bir prosedür geliştirmiştir. Önerilen teori ve algoritmaları, sentetik ve laboratuvar verilerine dayalı olarak doğrulamıştır ve ardından saha testlerindeki pratik zorlukların araştırıldığı üç tam ölçekli ortam titreşim testine uygulamıştır. Aynı zamanda çalışmacı, veri kanallarının gürültüsünün yerinde özelliklerini belirlemeyi amaçlayan alet gürültü kalibrasyonu sorununa da çalışması ile katkıda bulunmuştur. Önerdiği yöntemi, sentetik ve laboratuvar verilerine dayanan bir dizi araştırma ile doğrulamıştır.

Yetkin vd., (2021) Operasyonel Modal Analiz Yönteminde referanslı ve referanssız ölçümlerin karşılaştırılması için yaptıkları çalışmada Elâzığ ilinde bulunan Sait Koç Cami'nin minaresini kullanmışlardır. Üç farklı ölçüm kullanılan bu çalışmada referanslı ve referanssız ölçüm sonuçları listelenmiştir. Birinci ölçümde minarenin düşey eksenini boyunca 4 farklı ölçüm seviyesi belirlenmiş ve her bir seviyede 2 ivmeölçer kullanmışlardır. Bu 2 ivmeölçerden birini x diğeri ise y seviyesinde ölçüm yapacak şekilde planlamışlardır. 4 farklı seviyenin her bir seviyesinde 2 olmak üzere toplamda 8 ivmeölçer kullanmışlardır. Ölçüm ise 0 – 10 Hz frekans aralığında ve 320s'de gerçekleştirmişler ve referanssız ölçüm tekniğinden yararlanmışlardır. İkinci ölçümde ise referanslı ölçüm tekniğine başvurmuşlardır. Bu ölçümde ise minarenin en üst noktasına yerleştirilen ve referans olarak alınan 2 ivmeölçeri sabit tutmuşlardır. Bunlar haricinde kullanılan 2 ivmeölçer ise her defasında, başlangıçta 4 seviye olarak belirlenen seviyelerde ayrı ayrı bulunmak şartı ile, kaydırılarak 3 aşamalı ölçüm yapmışlardır. Bu ölçümde toplamda 4 ivmeölçer kullanmışlardır. İlk ölçümde olduğu gibi 0 – 10 Hz frekans aralığında gerçekleştirdikleri bu ölçümü 960s'de tamamlamışlardır. Son olarak üçüncü ölçümde minarenin en üst noktasına yerleştirilen 2 ivmeölçer ile referanssız ölçüm yapmışlardır. 0 – 10 Hz frekans aralığında yapılan bu ölçümü ise 320s'de tamamlanmışlardır. Çalışmalarında Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmış ve tahrik kuvveti uygulamamışlardır. Ölçümleri sonucunda elde ettikleri ham verilerin işlenmesini sağlayarak spektral yoğunluk fonksiyonlarını her ölçüm için ayrı olarak elde etmişlerdir. Bu fonksiyonlar yardımı ile minarenin frekanslarını belirlenmiş ve karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda ise minare gibi

narin yapıların dinamik parametrelerinin belirlenmesinde deneysel olarak yapılacak referanslı ve referanssız ölçümlerin güvenli sonuç vermesi adına, ölçümler yapılırken minarelerin en üst kotuna ek olarak farklı seviyelerinde de ölçüm yapılmasının gerekliliğini belirtilmişlerdir.

Toydemir (2021) çalışmasında yığma ve betonarme binalarda duvar boşluklarının rijitlik üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla deneysel analiz yöntemi olan Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. Çalışmasında bir adet yığma ve bir adet betonarme binanın ilk olarak sonlu eleman modellerini oluşturmuştur. Nümerik analiz ile yapıların dinamik karakteristiklerini elde etmiştir. Daha sonra yapılara Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulayarak elde ettiği dinamik karakteristikleri nümerik yöntemden elde ettiği dinamik karakteristikler ile kıyaslamıştır. Kıyaslama sonucunda sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesinin ardından yığma ve dolgu duvarların modellemesini yaparak analiz işlemini gerçekleştirmiştir. Sonuçları karşılaştırarak önerilerini sunmuştur.

Erkek (2021) yaptığı çalışmada Adana ilinde bulunan Adana Büyük Saat Kulesi üzerinde Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. Bunun için ilk olarak yapının sonlu eleman modelini oluşturmuştur. Oluşturduğu sonlu eleman modelinin analitik analizini yaparak dinamik karakteristiklerini elde etmiştir. Daha sonra yapıya Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulayarak dinamik karakteristikleri deneysel olarak elde etmiştir. Deneysel ve analitik yöntemden elde ettiği sonuçları karşılaştırmıştır. Karşılaştırma sonucunda çıkan farklılara göre sonlu eleman modelini iyileştirmiştir. İyileştirilen sonlu eleman modelinin statik itme ve deprem etkisindeki zaman tanım alanı analizlerini gerçekleştirmiştir. Zaman tanım analizleri sonucunda 4 farklı deprem dikkate almış ve her bir depremin iki yatay bileşenini TBDY 2018'de bulunan DD-2 ve DD-3 deprem düzeyli tasarım spektrumlarına göre ölçeklendirerek yapıya uygulamıştır. Aynı depremlerin yatay bileşenlerini 90<sup>0</sup> döndürerek yapıya tekrar uygulamış ve sonuçları değerlendirmiştir.

Aydın (2021) yaptığı çalışmada çelik köprülerde diyagonal elemanların dinamik parametreler üzerindeki etkisini araştırmak için Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. Bunun için laboratuvar ortamında deneysel çalışmalarda kullanmak için diyagonal elemanlı ve diyagonal elemansız şekilde kullanılacak çelik köprü modellemesi yapmıştır. Laboratuvarda oluşturduğu bu model çelik köprünün hem diyagonal eleman bulunan durumu için hem de diyagonal eleman bulunmayan durumu için köprüye Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulamıştır. Her iki durumdan elde ettiği dinamik karakteristikleri karşılaştırmıştır. Çalışmasının sonucunda yaptığı ölçümlerde diyagonal elemanlarla güçlendirilmiş çelik köprü ile diyagonal eleman bulundurmeyen çelik köprünün Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle

elde edilen ve ilk 5 moda karşılık gelen değerlerini karşılaştırarak diyagonal elemanların çelik köprüler üzerindeki etkilerini incelemiştir.

Günday (2021) çelik yapılar üzerindeki kablo elemanların dinamik parametreleri üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. Deneysel çalışma kısmında laboratuvar ortamında çelik deney düzenekleri oluşturmuştur. Oluşturduğu bu düzeneklerin hem kablo ile güçlendirilmiş durumları hem de kablosuz durumları için Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle dinamik parametrelerini elde ederek karşılaştırmıştır. Çalışmasının sonucunda kablo elemanlar ile çelik yapıların güçlendirilmesinin olumlu sonuçlar getirdiğini belirtmiştir.

Kalybek (2022) yaptığı çalışmada açık erişim alanında mevcut olan tüketici sınıfı kamera ve görüntü işleme algoritmalarına dayalı titreşim izleme sistemlerinin Deneysel Modal Analiz Yöntemleri ile belirlenmesi ve sonlu eleman güncellemelerinin bu yöntemlere dayalı olarak yapılması üzerine çalışmıştır. Çalışmasında kamera tabanlı titreşim sistemlerinin performanslarının değerlendirmede hem Geleneksel Deneysel Modal Analiz Yöntemini hem de Operasyonel Modal Analiz Yöntemini kullanmıştır. Belirlediği köprü modelinin kamera tabanlı titreşim izleme sistemleri ile modal parametrelerinin belirlenmesini araştırırken, Deneysel Modal Analiz Yöntemini uygulamak amacıyla köprünün laboratuvar ortamında test düzeneğini oluşturmuştur. Oluşturduğu test düzeneğine titreştiriciler ve darbe çekiçleri ile tahrik kuvvetleri uygulayarak modal parametreleri belirlemiştir. Geleneksel yöntemden belirlediği parametreleri değerlendirmek amacıyla çalışır vaziyetteki köprüye Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulayarak modal parametrelerini belirlemiştir. Çalışmasının sonucunda elde ettiği modal parametreleri karşılaştırarak köprünün Sonlu Eleman Modelinin iyileştirilmesini yapmıştır. Çalışmasının sonucunda; başarılı uygulamaları hassasiyet, uyarma kuvvetinin doğası ve sinyal ve görüntü işleme ile ilgili bir dizi konunun dikkate alınmasının gerekliliğini vurgulamıştır. Araştırdığı sistemlerin modal analiz ve sonlu eleman modeli güncellemesine olanak tanıyan yüksek kaliteli veriler sağlayabileceği sonucuna varmıştır. Elde ettiği bulgulara dayalı olarak, mühendislik uygulamalarında araştırdığı yöntemlerin uygulanmasına yardımcı olarak kamera tabanlı titreşim izleme sistemlerinin kullanımına yönelik önerilerde bulunmuştur.

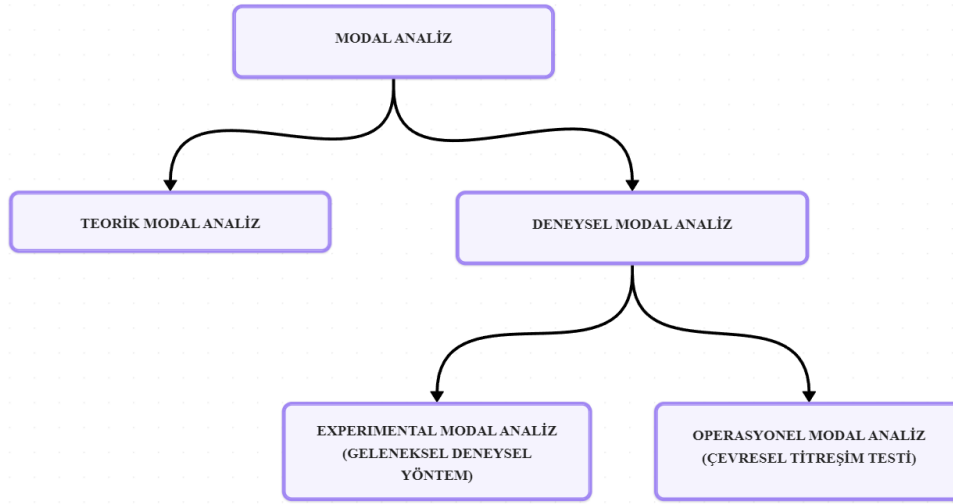
### 3. OPERASYONEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİ

Barınma ihtiyacı, neredeyse tüm canlı türleri için en önemli temel ihtiyaçlar arasında yer almaktadır. İnsanlık tarihine bakıldığında; insanların barınma ihtiyaçlarını gidermek amacı ile çeşitli doğal veya yapay materyallerden yararlandıkları ve bu materyalleri yüksek mukavemetli olanlar arasından seçtikleri gözlenmektedir. Çünkü barınma ihtiyacı kadar bu ihtiyacın güvenle karşılanması da önem arz etmektedir. Çimento ve çeliğin kompozit birleşiminden oluşan betonarme yapıların keşfi ile günümüzde bu ihtiyacın giderilmesinde en çok kullanılan malzemeler beton ve çelik olmuştur. Gelişen teknoloji ve değişen talepler ile birlikte insanlar yalnızca barınma ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla değil birçok farklı amaca hizmet edecek farklı türde yapılar inşa etmeye başlamışlardır (Zhang vd., 2010). Mühendislik yapıları olarak genellenebilecek bu yapıların en önemli inşa edilme prensibi; planlanan servis ömrü süresince güvenle hizmet verebilmeleridir. Ancak mühendislik yapılarının fonksiyonelliğini azaltarak planlanan servis ömürlerini ve güvenle hizmet verebilmelerini etkileyen bazı parametreler bulunmaktadır. Başlangıçta inşa edilen yapı elemanlarının özelliklerinin ve kondisyonlarının deprem, hava koşulları, patlama vb. gibi doğal etkiler altında kaldıklarında değişim göstermeleri, servis ömürleri boyunca maruz kaldıkları yüklerden dolayı meydana gelen mukavemet değişimleri, kimyasal etkilerden kaynaklanan değişimler, yapı malzemelerinin üretiminde veya servisleri sırasında meydana gelen değişimler bu parametreler arasında yer almaktadır (Poukhonto, 2001).

Yapıların servis ömrünün, güvenliğinin bilinmesi ve ilerleyen zamanlarda karşılaşılabilecek belli başlı bazı yükler altındaki davranışlarının önceden analiz edilebilmesi; doğal afetler veya çevresel etkilerden kaynaklanacak can ve mal kayıplarının önlenmesi, kültürel miraslar olan önemli tarihi yapıların korunması ve diğer nesillere aktarılması, karayolu ulaşımında kullanılan yapıların güvenliğinin sağlanması, yapıların durabilitesinin artırılması, yapıların onarım ve güçlendirme ihtiyacı olup olmadığının belirlenmesi ve meydana gelebilecek kayıpların önceden engellenebilmesi için oldukça önemli bir kavram olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu davranışların analiz edilmesi ve bilgisayar ortamında yapıların gerçeğine en yakın modellerinin oluşturularak dinamik davranışlarının tespit edilebilmesi için Modal Analiz Yönteminden yararlanılmaktadır. Gelişen teknoloji ve imkanlar ile özellikle son 20 yıl içerisinde Modal Analiz Yöntemi, mühendislik yapılarının dinamik karakteristikleri olarak bilinen parametrelerin belirlenmesinde, iyileştirilmesinde ve optimize edilmesinde sıklıkla kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. Literatüre bakıldığında Modal Analiz

yönteminin ilk olarak 1940'lı yılların başında, hava araçlarının dinamik davranışlarını daha iyi anlamak amacıyla uygulanan bir yöntem olduğu görülmektedir (Mohanty ve Rixen, 2004).

Modal Analiz Yöntemi; dinamik karakteristikleri olarak bilinen mod şekilleri, sönüm oranları ve doğal frekans değerlerinin deneysel ve matematiksel metotlar acılığı ile belirlenerek, bu veriler ışığında yapıların dinamik davranışlarının elde edilmesi sürecidir (Fu ve He, 2001). Modal Analiz Yöntemi, Teorik Modal Analiz ve Deneysel Modal Analiz Yöntemi olarak iki alt başlıkta incelenmektedir. Şekil 3.1'de Modal Analiz Yönteminin alt başlıkları verilmektedir.

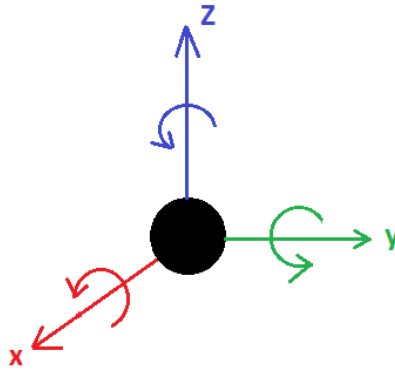


Şekil 3.1. Modal Analiz Yönteminin alt başlıkları

### 3.1. Teorik Modal Analiz Yöntemi

Mühendislik yapılarının dinamik karakteristikleri olarak bilinen mod şekilleri, sönüm oranları ve doğal frekans değerlerinin belirlenmesi amacı ile teorik ve deneysel modal analiz yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Teorik Modal Analiz Yöntemi günümüzde bilgisayarlar ve yapısal analiz paket programları kullanılarak uygulanmaktadır. Teorik Modal Analiz Yönteminin hesaplama aşamasında; yapının gerçeğine en yakın olan ve çözümlemeyi kolaylaştıran matematiksel modelinin oluşturulması gerekmektedir. Bu şekilde oluşturulan basitleştirilmiş modele “analitik model” adı verilir. Yapıların analitik modelleri oluşturulurken 2 temel modelleme prensibi uygulanmaktadır. Bu prensiplerden ilki; sistemin sonsuz serbestlik derecesine sahip olduğu kabulü ile oluşturulan sürekli modeldir. İkinci model ise; sistemin toplam kütesinin noktasal kütleler ile gösterilerek toplu kütleli bir sistem oluşturulmasına yönelik olan ve sistemin sonlu sayıda serbestlik derecesinde sahip olduğu kabulüne dayanan ayırık-parametrelili (toplu kütleli) modeldir. Ayırık-parametrelili sistemlere örnek olarak; tek serbestlik ve çok serbestlik dereceli sistemler verilebilir (Güneş, 2017:30).

Tek veya daha fazla kütlelen meydana gelen sistemlerde, sistemin hareketini inceleyebilmek için gereken en az sayıdaki bağımsız ötelenme veya dönme yönlerine sistemin serbestlik yönleri, bunların sayısına da serbestlik derecesi adı verilmektedir. Örneğin; uzayda rijit bir cisim ele alındığında bu rijit cismin birbirine dik 3 eksen boyunca ötelenme ve bu eksenlerin çevresinde yapacağı dönme hareketlerinin hiçbirinde herhangi bir kısıtlama bulunmuyorsa bu cismin serbestlik derecesi altı kabul edilebilir (Yerlici ve Luş, 2014). Şekil 3.2’de bu cismin ötelenme ve dönme eksenlerine örnek verilmiştir. Bir sistemin serbestlik derecesi artırılarak sistem davranışı daha hassas bir şekilde belirlenebilmektedir. Ancak bu derecenin çok fazla artırılmasının hesap hacmini de o ölçüde arttıracığı ve artan hesap hacmi ile hata miktarının da artabileceği dikkat edilmesi gereken önemli bir noktadır (Celep, 2014). Bu nedenle yapılar tek dereceli serbestlik sistemine sahip olmasalar dahi hesaplamaların kolaylaştırılması açısından süperpozisyon prensibi esas alınarak tek dereceli sistemler gibi hesap edilmektedir.



**Şekil 3.2.** Uzaydaki bir cismin üç ekseninde yapacağı ötelenme ve dönmeler

Yapıların analitik modellerinin oluşturulmasının ardından sistemlerin dinamik davranışının elde edilmesinde, Newton’ın ikinci yasası, D’Alambert kuvvetlerinin de göz önüne alındığı virtüel iş ilkesi ve gerilme-şekil değiştirme bağlantıları gibi fiziki kurallar kullanılmasıyla; analitik model, diferansiyel denklemler oluşturularak matematiksel bir dil ile ifade edilmekte ve çözümlenmektedir. Sürekli sistem kabulünün kullanıldığı durumlarda kısmi türevli diferansiyel denklemler, ayrık-parametrelili sistem kabulünün kullanıldığı çözümlenme durumlarında adi diferansiyel denklem takımları ortaya çıkmaktadır. Analitik modelin bu şekilde matematiksel bir dil ile ifade edilmesi durumuna matematik model adı verilmektedir. Matematik modellerinin oluşturulması sonrasında bu denklem sistemleri çözüme ulaştırılarak sistemlerin dinamik karakteristikleri belirlenmektedir (Güneş, 2014:30).

Yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde Teorik Analiz Yönteminin çözüm aşamaları;

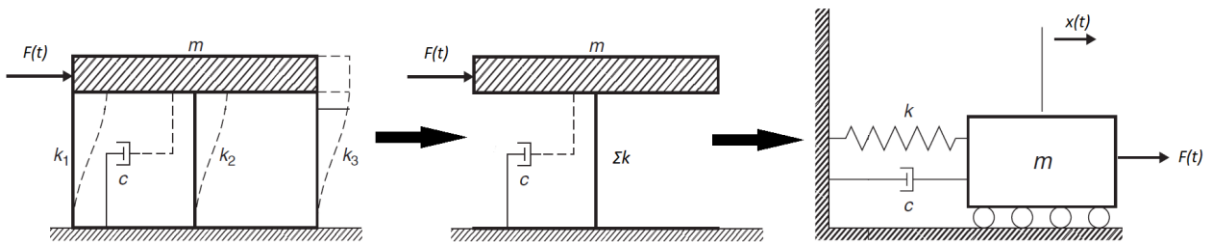
- ✓ Sisteme en uygun olacak analitik modelin seçilmesi
- ✓ Seçilen analitik modelin fizik kurallarına göre matematik modelinin oluşturulması
- ✓ Oluşturulan matematik model ile elde edilecek diferansiyel denklem takımlarının titreşim durumu da göz önüne alınarak çözülmesi ile yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi

şeklinde sıralanabilir.

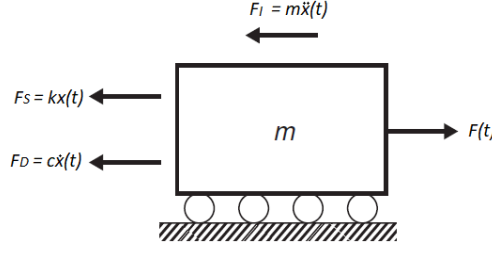
Teorik Modal Analiz Yönteminin iyi anlaşılabilmesi için, Modal Analiz Yöntemi titreşime dayalı bir yöntem olduğundan, titreşim konusunun da iyi bilinmesi gerekmektedir. Serbest titreşim ve zorlanmış titreşimler taşıyıcı sistemin en önemli iki dinamik davranışını temsil etmektedir. Serbest titreşimde sistem hareketi öngörülen başlangıç şartlarının sonucunda meydana gelmektedir. Zorlanmış titreşimde ise hareket sisteme etkiyen dış yüklerden meydana gelmekte veya mesnet yer değiştirmelerinden kaynaklı olarak ortaya çıkmaktadır (Celep, 2014).

### 3.1.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

Serbestlik bir sistemin yapabileceği dönme ve ötelenme hareket kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Serbestlik derecesi ise sistemin dönme ve ötelenme yapabileceği yönlerin sayısını ifade etmektedir. Tek serbestlik dereceli sistemlerde sistemin yalnızca bir yönde dönme ve ötelenme yapabileceği kabul edilmektedir. Bu sistemler basit bir yay modeli ile gösterilmekte ve toplu kütle yaklaşımı ile çözülmektedir. Öte yandan çok serbestlik dereceli sistemlerin çözümlerinde de sistemler tek serbestlik dereceli sistemlere dönüştürülebilmekte veya sistemlerin belirli noktalarının tek serbestlik dereceli sistem davranışı göstereceği kabulü yapılarak birden fazla tek serbestlik dereceli sistemin ortak çözümünden yararlanılmaktadır. Tek serbestlik dereceli sistemlerin analitik modeli Şekil 3.3'te ve serbest cisim diyagramı Şekil 3.4'te verilmektedir (Anderson ve Naeim, 2012:16).



Şekil 3.3. Tek serbestlik dereceli sistemlerin analitik modeli



**Şekil 3.4.** Tek serbestlik dereceli sistemlerin serbest cisim diyagramı

Sistemlerin fizik kurallarına göre dengede olduğu kabul edilmektedir. Şekil 3.4'teki serbest cisim diyagramı kullanılarak tek serbestlik dereceli sistemin denge denklemleri yazıldığında;

$$F_I + F_D + F_S = F(t) \quad (3.1)$$

denklemleri elde edilmektedir. Bu denklemde  $F_I$  atalet kuvvetini,  $F_D$  sönüm kuvvetini,  $F_S$  ise yayda oluşan elastik kuvveti göstermektedir. (3.1) denkleminde gerekli değerler yerine yazıldığında elde edilecek hareket denklemleri;

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (3.2)$$

olarak ifade edilmektedir. (3.2) denkleminde  $m$  kütle,  $c$  sönüm oranını ve  $k$  ise yapının rijitlik kat sayısını göstermektedir. Denklemindeki  $x$  yapının yer değiştirmesini,  $\dot{x}$ 'in birinci türevi anlamına gelen hızı ve  $\ddot{x}$  değeri yapının hızını ve  $\ddot{x}$ 'in ikinci türevi anlamına gelen ivmesini belirtmektedir. Bu parametrelerinin toplamına eşit olan  $F(t)$  değeri ise yapıya uygulanan kuvvettir. Bu tip sistemlerin çözümlerinde sistemin sönümlü olup olmamasına göre  $c$  değeri yerine konarak sönümlü ve sönümsüz durumlar için hareket denklemleri elde edilmektedir. Örneğin sönümsüz bir tek serbestlik dereceli sistemin hareket denklemleri elde edilmek istendiğinde  $c$  değeri sıfır olur ve bu durumda hareket denklemleri;

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (3.3)$$

şeklinde yazılmaktadır. Yapının sönümsüz ve serbest titreşim yaptığı kabul edildiğinde yapıya uygulanan bir kuvvet bulunmadığı kabulü yapılacağından  $F(t) = 0$  olacaktır (Chopra, 2007). Denklem (3.3)'te bu değer yerine konulduğunda hareket denklemleri;

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (3.4)$$

elde edilmektedir. Bu denklem için başlangıçtaki (3.2) denkleminde sınır koşulları olan yer değiştirme  $x$ , hız  $\dot{x}$  denklemleri  $t=0$  anında 0 kabul edilerek sistem çözüme ulaştırıldığında;

$$x(t) = C e^{st} \quad (3.5)$$

denklemleri elde edilip denklem (3.4)'te yerine yazıldığında;

$$x(t) = C e^{st}$$

$$\dot{x}(t) = C s e^{st}$$

$$\ddot{x}(t) = C s^2 e^{st}$$

$$C e^{st}(ms^2 + k) = 0$$

$C \neq 0$ ,  $e^{st} \neq 0$  olduğundan,

$$(ms^2 + k) = 0$$

$s_{1,2} = \pm i \sqrt{\frac{k}{m}}$  değerleri elde edilir. Elde edilenlerden hareketle;

$$k - \omega^2 m = 0 \quad (3.6)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.7)$$

denklemlerinden sönümsüz sistemin doğal açısal frekansı ( $\omega_n$ ) değeri elde edilir. Denklem (3.3)'ün genel çözümü yapıldığında hareket denklemleri;

$$x_1(t) = C_1 e^{s_1 t} = C_1 e^{i\omega_n t} \quad (3.8)$$

$$x_2(t) = C_2 e^{s_2 t} = C_2 e^{-i\omega_n t} \quad (3.9)$$

olarak elde edilir. Bu denklemlerde görülen C değerleri sistemin integrali alınarak yapılan çözümlerden gelen keyfi sabitlerdir. Sistemin lineer olduğu kabulü yapıldığında sistemin davranış denklemi;

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) = C_1 e^{i\omega_n t} + C_2 e^{-i\omega_n t} \quad (3.10)$$

olarak elde edilmektedir. Denklem (3.10) için aşağıda denklem (3.11) ve (3.12)'de verilen Euler formülleri;

$$e^{i\omega_n t} = \cos(\omega_n t) + i \sin(\omega_n t) \quad (3.11)$$

$$e^{-i\omega_n t} = \cos(\omega_n t) - i \sin(\omega_n t) \quad (3.12)$$

uygulandığında sistemin yer değiştirmesi elde edilmektedir. Bu durumda sistemin yer değiştirme denklemi;

$$x(t) = (C_1 + C_2) \cos(\omega_n t) + i(C_1 - C_2) \sin(\omega_n t) \quad (3.13)$$

olarak elde edilmektedir. Çözüm kolaylığı sağlamak amacı ile denklem (3.13)'teki  $(C_1 + C_2)$  değişkeni bir A değişkenine ve i.  $(C_1 - C_2)$  değişkeni bir B değişkenine atandığında;

$$x(t) = A \cdot \cos(\omega_n t) + B \cdot \sin(\omega_n t) \quad (3.14)$$

denklemini elde edilir. A ve B yeni gerçek integrasyon sabitleri olarak kabul edilir ve başlangıç koşullarına göre belirlenecek değerlerdir. Bu denklemde  $\cos(\omega_n t)$  ve  $\sin(\omega_n t)$  değerleri harmonik kuvvetleri göstermektedir. Buradan hareket ile serbest titreşimin bir harmonik titreşim hareketi olduğu söylenebilir. (3.14) denklemine başlangıç koşulları uygulanarak denklem düzenlendiğinde;

$$x_{(0)} = x_0$$

$$\dot{x}_{(0)} = \dot{x}_0$$

$A = x_0$  ,  $B = \frac{\dot{x}_0}{\omega_n}$  olarak bulunur. Bu değerler hareket denkleminde yerine yazıldığında sistemin hareket denklemini;

$$x(t) = A \cdot \cos(\omega_n t) + B \cdot \sin(\omega_n t) = x_0 \cdot \cos(\omega_n t) + \frac{\dot{x}_0}{\omega_n} \cdot \sin(\omega t) \quad (3.15)$$

olarak elde edilir. Yapının serbest titreşim yerine zorlanmış sönümsüz titreşim yaptığı durumlarda hareket denklemini (3.3) denkleminde verildiği şekildedir. Denklem (3.3)'ün çözümü için;

$F_t = F_e^{i\omega t}$  ,  $X_{(t)} = X_e^{i\omega t}$  olarak kabul edildiğinde bu değerler denklem (3.3)'de yerine yazılıp düzenlenir. Bu düzenlemeler yapıldığında;

$$(k - \omega^2 m)X_e^{i\omega t} = F_e^{i\omega t} \quad (3.16)$$

denklemini elde edilmektedir. Denklem (3.16)'da verilen değerlerde X değeri yer değiştirmeye, F değeri uygulanan kuvvete, t değeri zamana ve i değeri kompleks sayı değerine karşılık gelmektedir. Bu denklem aracılığı ile zorlanmış titreşim yapan sönümsüz bir yapının davranış fonksiyonu;

$$H_w = \frac{X}{F} = \frac{1}{k - \omega^2 m} \quad (3.17)$$

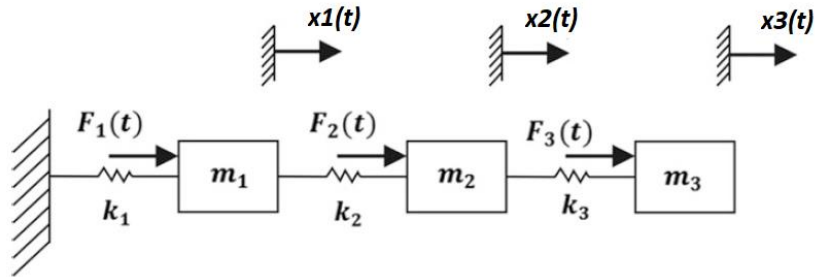
denklemini olarak elde edilir.

### 3.1.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

Gerçek sistemler, çözümlene yapılıırken kolaylık sağlanması amacıyla tek serbestlik dereceli sistemlere dönüştürülseler de çok serbestlik dereceli sistemlerdir. Çok serbestlik dereceli sistemlerde serbestlik derecesi, bir hareket denklemi ve buna karşılık gelen doğal frekans değerleri ile ifade edilmektedir. Tek serbestlik dereceli sistemlerin titreşimindeki skaler değerlerin yerini, çok serbestlik dereceli sistemlerde vektörel ve matris büyüklükler almaktadır. Çok serbestlik dereceli sistemlerin genel hareket denklemi (Chopra, 2007);

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (3.18)$$

denklemi ile ifade edilmektedir. Denklem (3.18)'de  $[M]$  değeri sistemin kütle matrisine,  $[C]$  değeri sistemin sönüm matrisine ve  $[K]$  değeri sistemin rijitlik matrisine karşılık gelmektedir.  $\{\ddot{x}(t)\}$  değeri sistemin zamana bağlı ivme vektörüne,  $\{\dot{x}(t)\}$  değeri sistemin hız vektörüne,  $\{x(t)\}$  değeri sistemin yer değiştirme vektörüne ve  $\{F(t)\}$  değeri sistemin kuvvet vektörüne karşılık gelmektedir (Chopra, 2007). Şekil 3.5'te çok serbestlik dereceli sistemlerin analitik modeli verilmektedir (Mario ve Young, 2019:175).



Şekil 3.5. Çok serbestlik dereceli sistemlerin analitik modeli

Sistemde veya yapıda sönüm olmadığı kabulü yapıldığında sistemin genel hareket denklemi kütle ve rijitlik terimleri ile ifade edilmektedir. Sönümsüz sistemlerin genel hareket denklemi, Denklem (3.18)'de sönümü ifade eden C değerinin 0 olduğu kabulü ile;

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (3.19)$$

bağıntısına dönüşmüş olur. Sistemin serbest titreşim yaptığı kabul edildiğinde sisteme etkileyen yükler sıfır olacağından, denklem (3.19)'da  $\{F(t)\}$  değeri de sıfır olacaktır. Bu durumda serbest titreşim yapan sistemin hareket denklemi;

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (3.20)$$

olacaktır. Denklem (3.20)'nin çözümünde basit harmonik hareket dikkate alındığında;

$$\{x(t)\} = \{A\}\sin(\varphi + \omega t) \quad (3.21)$$

denklemi elde edilmektedir. Denklem (3.21)'de  $\{A\}$  değeri zamana bağlı olmayan bir genlik vektörüdür. Denklem (3.20) ve (3.21)'de verilen değerler Denklem (3.19)'da yerine konularak denklem çözümü yapıldığında;

$$-\omega^2[M]\{A\}\sin(\varphi + \omega t) + [K]\{A\}\sin(\varphi + \omega t) = \{0\} \quad (3.22)$$

denklemi elde edilmektedir. Denklem (3.22)'den  $\sin(\varphi + \omega t)$  parametresi çıkarılıp denklem yeniden düzenlendiğinde;

$$[[K] - \omega^2[M]]\{A\} = \{0\} \quad (3.23)$$

denklemi elde edilir. Denklem (3.23)  $[M]^{-1}$  ile çarpılırsa öz değer denklemi;

$$[[D] - \lambda[I]]\{A\} = \{0\} \quad (3.24)$$

olarak bulunmaktadır. Burada;

$$[D] = [M]^{-1}[K] \quad (3.25)$$

bağıntısı kullanılır.  $[I]$  değeri birim diyagonal matrisine ve  $\lambda^2 = \omega^2$  öz değerlere karşılık gelmektedir. Denklem (3.20)'nin sıfırdan farklı çözümü için;

$$|[K] - \omega^2[M]| = 0 \quad (3.26)$$

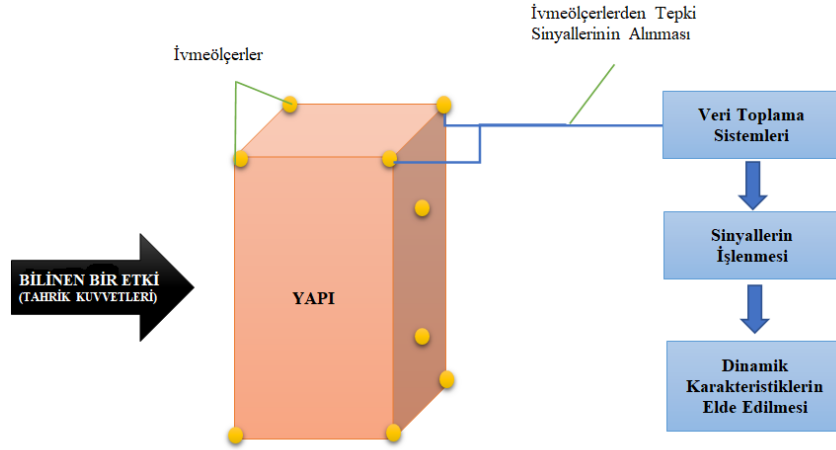
denklemi kullanılmaktadır. Denklem (3.26)'nın çözümünden  $n$  serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal açısız frekans veya diğer adı ile öz vektör ( $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$ ) değerleri elde edilmektedir. Burada elde edilen her bir doğal frekans değerine karşılık yapının almış olduğu şekle mod şekli adı verilmektedir. Elde edilen doğal frekans değerleri küçükten büyüğe doğru sıralandığında elde edilen en küçük frekans değeri temel frekans değeridir. Temel frekansa karşılık gelen mod şekli ise temel mod şekli olarak adlandırılmaktadır. Her  $\lambda$  öz değer vektörüne karşılık gelen bir  $A$  öz vektörü veya mod şekli Denklem (3.23) ile belirlenmektedir. Bu işlemlerin sonucunda elde edilen modal vektörlerin normalleştirilmesi yapılarak  $\{\emptyset\}$  modal vektörleri ve  $[\Phi]$  modal matrisi Denklem (3.27)'deki gibi oluşturulmaktadır (Chopra, 2007; Bayraktar, Birinci, Altunışık, Türker ve Sevim, 2009).

$$[\Phi]_{n \times n} = [\{\emptyset\}_1 \{\emptyset\}_2 \dots \{\emptyset\}_n] \quad (3.27)$$

### 3.2. Deneysel Modal Analiz Yöntemi

Yapıların dinamik karakteristikleri olarak bilinen mod şekilleri, sönüm oranları ve doğal frekans değerlerinin belirlenmesinde Teorik Analiz Yöntemleri yeterli olmamaktadır. Teorik Analiz Yöntemleri sırasında veya yapısal analiz programları aracılığı ile modellenen yapılardan elde edilen dinamik karakteristiklerin, yapıların gerçek durumunda veya çalışır vaziyetteki hallerinde sahip oldukları dinamik karakteristikler ile örtüşmesi gerekmektedir. Yapılar teorik olarak modellenirken bazı kabuller yapılmaktadır. Bu nedenle gerçek dinamik karakteristiklerin tam anlamıyla elde edilmesi ve teorik yöntemden elde edilen sonuçlar doğrultusunda yapı modellerinin iyileştirilebilmesi, yapıların dinamik davranışlarının gerçek davranışa en yakın olarak belirlenebilmesi için Teorik Modal Analiz ile Deneysel Modal Analiz Yönteminin de kullanılması gerekir. Bu sayede her iki yöntemden elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir ve yapı modelleri yöntemin uygun gördüğü kabuller ışığında iyileştirilebilir.

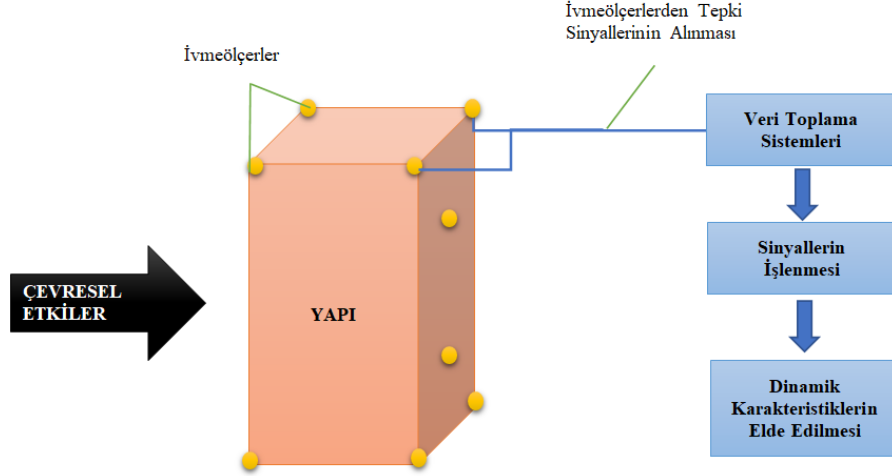
Deneysel Modal Analiz Yöntemi sırasında yapının belirli bölümlerine yerleştirilen ivmeölçerler aracılığı ile yapıların titreşim sinyalleri ölçülmektedir. Bu ölçümlerden elde edilen veriler bilgisayar yazılım programları kullanılarak belirli yöntemlere göre ayrıştırılmakta ve yapının dinamik karakteristikleri elde edilmektedir. Yapılardan ivmeölçerler ile ölçüm alınması aşamasında yapılar üzerine etkiyen dış etkilere göre; Deneysel Modal Analiz Yöntemi kendi içinde ikiye ayrılmaktadır. Bu yöntemlerden ilki Geleneksel Deneysel Modal Analiz yöntemidir. Bu yöntemde yapıdan ivmeölçerler ile sinyal ölçümü alınırken yapı titreştiriciler, sarsıcılar, darbe çekiçleri vb. ekipmanlar kullanılarak titreştirilir. Ekipmanların oluşturduğu bu kuvvetlere tahrik kuvvetleri denmektedir. Geleneksel Deneysel Yöntemin uygulanması sırasında bu tahrik kuvvetlerine ihtiyaç duyulmaktadır ve etki-tepki prensibi esas alınarak ölçümler yapılmaktadır. Bu etki-tepki prensibi doğrultusunda sonuçlar değerlendirilerek yapının dinamik karakteristikleri elde edilmektedir. Şekil 3.6'da Geleneksel Deneysel Yöntem ile yapıların dinamik karakteristiklerinin elde edilmesinin işlem adımları verilmektedir.



**Şekil 3.6.** Geleneksel Deneysel Yöntem ile yapıların dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi

Geleneksel Deneysel Yöntem de oldukça yaygın kullanılan Deneysel Modal Analiz yöntemlerinden biridir. Ancak bu yöntemde yapının titreştirilmesi için tahrik kuvvetlerine ihtiyaç duyulduğundan bu yöntem ile yapıların zarar görme olasılığı da bulunmaktadır. Özellikle korunması gereken tarihi yapıların bilinen bir etki ile titreştirilmesi her zaman olumlu sonuçlar doğurmayabilir. Titreştirici veya sarsıcı ekipmanların üreteceği etkinin yapılarda aşırı yükleme durumuna neden olması da olası bir durumdur. Yapılara uygulanan yapay kuvvetlere ve mevcut ortamın uyarma kaynaklarına (çevresel etkiler) güvenmek zorunda kalınması da başlıca zorluklardan biri olmaktadır. Geleneksel Deneysel Yöntemde ortam kaynaklarını ölçmek oldukça zor bir işlemdir. Bu nedenle yapılara yapay bir tahrik kuvveti uygulanmasına ihtiyaç duyulmayan, tahrik kuvveti olarak yalnızca çevresel etkilerin ölçümü ile çalışan Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılmaya başlanmıştır (Turan, 2012). Operasyonel Modal Analiz Yönteminin inşaat mühendisliği yapılarının dinamik karakteristiklerinin elde edilmesinde oldukça başarılı bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır. Binalar, köprüler vb. büyük ölçekli ve kompleks inşaat mühendisliği yapılarının, herhangi bir tahrik kuvvetine gerek kalmadan ve yapılar çalışır vaziyette iken gerekli ölçümler yapılarak yapıların devre dışı bırakılması zorunluluğu olmadan dinamik karakteristiklerinin elde edilmesine imkân sağlayan bir yöntem olduğu görülmektedir (Peeters vd., 2015). Geleneksel Deneysel Analiz Yöntemi etki-tepki prensibini esas alırken Operasyonel Modal Analiz Yöntemi tepki prensibi üzerine şekillenmektedir. Bu tepkiler ise hava şartları, trafik, doğal afetler, patlama etkileri, gürültü vb. çevre koşulları olmaktadır. Bu sayede yapının tam anlamı ile çalışır vaziyetteki dinamik karakteristikleri elde edilmektedir (Osmancıklı, 2012:42). Operasyonel Modal Analiz Yönteminde yapıların en çok zorlamaya maruz kalan veya hassas olarak nitelendirilebilecek

bölümlerine yerleştirilen ivmeölçerler aracılığı ile tepki sinyalleri ölçülmektedir. Ölçülen bu sinyaller veri toplama ünitelerine aktarılmaktadır. Veri toplama ünitelerinde bilgisayar yardımı ile elde edilen sinyaller işlenmekte ve yapının dinamik karakteristikleri elde edilmektedir. Şekil 3.7'de Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile yapıların dinamik karakteristiklerinin elde edilmesinin işlem adımları verilmektedir.



**Şekil 3.7.** Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile yapıların dinamik karakteristiklerinin elde edilmesi

İvmeölçerlerden elde edilen tepki sinyallerinin işlenmesi yapılırken zaman veya frekans tanım alanları kullanılmaktadır. Sinyal işleme işlemleri sırasında kullanılan değişken zaman olduğunda Zaman Tanım Alanında Ayırıştırma Metodu olarak adlandırılan yöntem kullanılmaktadır. Literatüre göre zaman tanım alanında ayırıştırma yöntemleri arasında en çok bilinen ve kullanılan yöntem Stokastik Altalan Belirleme Yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Zaman tanım alanında ayırıştırma yöntemlerinde sinyaller arası zamanlar ve bu zamanlar arasında bir bağlantı oluşturulması esas alınmaktadır (Koçak vd., 2015). Sinyal işleme işlemi sırasında kullanılan yöntemde değişkenin frekans olduğu durumda Frekans Alanında Ayırıştırma yöntemi olarak adlandırılan yöntem kullanılmaktadır. Literatüre göre frekans alanında ayırıştırma yöntemleri arasında en çok kullanılan iki yöntem Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma ve Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemleridir (Güneş, 2017:38). Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemlerinde sinyal frekansları detaylı analiz edilerek sinyallerin sayısal bağıntıları oluşturulmaktadır.

### **3.2.1. Deneysel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Ölçüm Ekipmanları**

Deneysel Modal Analiz yönteminde kullanılan ölçüm ekipmanları; titreştiriciler & sarsıcılar, ivmeölçerler, veri toplama sistemleri ve sinyal işleme üniteleridir. Titreştirici veya sarsıcıların kullanımı yalnızca geleneksel deneysel yöntem olarak bilinen ve ölçüm işlemleri sırasında tahrik kuvvetlerine ihtiyaç duyan Geleneksel Deneysel Modal Analiz Yönteminde kullanılır. Bu ekipmanların kullanımları sırasında yapılar servise kapatılmakta ve ölçüm işlemleri o şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu durum günlük hayatta aksamalara neden olmaktadır. Öte yandan Operasyonel Modal Analiz Yönteminde tahrik kuvvetlerine ihtiyaç bulunmamakta ve çevresel etkilerden yararlanılmaktadır. Bu nedenle yapılar ölçüm sırasında çalışır vaziyette olduklarından yapıların servis durumu olumsuz yönde etkilenmemektedir. İvmeölçerler ve veri toplama sistemleri her iki deneysel yöntemde de kullanılmaktadır.

#### **3.2.1.1. Titreştiriciler & Sarsıcılar**

Deneysel Modal Analiz Yönteminde yapılar bilinen tahrik kuvvetleri veya çalışır durumlarında çevresel etkiler nedeniyle titreştirilmektedir. Tahrik kuvvetleri veya diğer bir adı ile zorlama ile titreştirme yöntemi yalnızca Geleneksel Deneysel Modal Analiz Yönteminde kullanılmaktadır. Geleneksel Deneysel Modal Analiz Yönteminde en yaygın kullanılan titreştirici veya sarsıcılar shakers olarak adlandırılan özel sarsma ekipmanları ve darbe çekiçleridir. Operasyonel Modal Analiz Yönteminde ise titreşim yaratacak etki yalnızca; taşıt trafiği, yaya trafiği, deprem, rüzgâr, dalga gibi çevresel etkilerdir. Özellikle büyük ölçekli yapıların titreştirilmesi oldukça zor olduğundan köprüler, viyadükler, çok katlı yapılar gibi yapılarda titreştirici veya sarsıcılar kullanılmamaktadır. Küçük veya orta ölçekli mühendislik yapılarında titreştirici veya sarsıcıların kullanımı daha yaygındır. Yapıları yapay etki ile titreştirme yönteminde seçilecek ekipmanlar yapı rijitliği ve hacimsel büyüklüğüne uygun olarak seçilmektedir. Yapının hacimsel büyüklüğü ve rijitliğin artması, titreştirme için gereken ekipman sayısını da artıracığından ölçüm maliyetlerinde artışa neden olmaktadır. Titreştirici veya sarsıcı ekipmanlar yapıya ankastre olarak monte edilmektedir. Şayet bu ekipmanlar yanlış monte edilecek olur ise yapılarda hasar bırakmaları söz konusu olabilmektedir. Şekil 3.8’de bir sarsıcı örneği verilmektedir (Osmancıklı, 2012:42).



**Şekil 3.8.** Sarsıcı örneği

Darbe çekiçleri, sarsıcılar ile karşılaştırıldığında daha ekonomiktirler ve kullanımları da daha kolaydır. Bu nedenle uygulamalarda avantaj oluşturdıklarından sıklıkla tercih edilmektedirler. Darbe çekiçleri uygulamada; genliği ve zamanla değişimi bilinmeyen rastgele titreşimler için ve ölçülebilen büyüklüklerdeki titreşimler için kullanılmaktadırlar. Darbe çekiçleri; yapıya farklı etkilerde darbe uygulayabilmeleri için yumuşak, orta ve sert başlıklara sahiptirler. Şekil 3.9’da farklı boyutta darbe çekiçleri ve başlıklarına dair örnek verilmektedir (Güneş, 2017;60).



**Şekil 3.9.** Farklı boyutta darbe çekiçleri ve başlıkları

### **3.2.1.2. İvmeölçerler**

Yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde deneysel modal analiz yöntemi kullanıldığında, yapılarda meydana gelen titreşimleri ölçmek için ivmeölçerler kullanılmaktadır. Çeşitli ivmeölçer tipleri bulunmaktadır. Ancak uygulamalarda en sık kullanılan ivmeölçer tipi pizoelektrik ivmeölçerlerdir. Uygulamalarda kullanılacak ivmeölçer sayısının ve ivmeölçer tipinin doğru seçilmesi, ölçümlerden elde edilecek sonuçların doğruluğu açısından da önem teşkil etmektedir. Çünkü yapıya uygun olmayan ivmeölçer seçimi yapılması ölçüm sırasında kaliteli sinyaller elde edilmesini de engelleyebilmektedir (Altunışık, 2010).

İvmeölçerlerin çalışmaya uygun bir şekilde seçilmesi için bazı kriterler bulunmaktadır. Bu kriterler; frekans aralığı, hassasiyet, maksimum ivme değeri ve çalışma sıcaklığı

değerleridir. Frekans aralığı ivmeölçerlerin ölçebileceği maksimum ve minimum frekans aralığını ifade etmektedir. Hassasiyet değeri ise ivmeölçerlerin yerçekimi ivmesi ile orantılı olacak şekilde üretebilecekleri elektrik gücünü ifade etmektedir. Maksimum ivme değeri, ivmeölçerlerin elektrik sinyalleri bozulmayan veya kaybolmadan ölçebileceği en büyük ivme genliğine karşılık gelmektedir. Çalışma sıcaklığı ise ivmeölçerlerin sağlıklı sinyal üretebilecekleri maksimum ve minimum sıcaklıkları ifade etmektedir. İvmeölçerlerin tiplerine göre hassasiyetleri de değişmektedir. Uygulamada her zaman yüksek hassasiyetli ivmeölçerler kullanmak sağlıklı sonuçlar vermeyebilir. Bunun nedeni yüksek hassasiyetli ivmeölçerlerin ağırlığının ve büyüklüğünün de artmasıdır. Bu durum narin yapılarda ölçüm işlemini zorlaştırmakta ve sonuçların güvenilirliğini tehlikeye atmaktadır (Türker, 2011). Ayrıca düşük frekanslı veya rijit yapılarda yüksek hassasiyetli ivmeölçerler, yüksek frekansa sahip daha sünek kabul edilen yapılarda ise düşük hassasiyetli ivmeölçerler seçilmesi gerekmektedir (Altunışık, 2010).

Bu tez çalışmasında örnek betonarme yapı üzerinde Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile sinyal ölçümleri yapılırken SENSEBOX70x3 tipi üç eksenli ultra hassas sismik ivmeölçerler kullanılmıştır. Bu ivmeölçerler betonarme yapının ölçüm yapılan katlarında belirlenen bölgelere yerleştirilmiştir. Şekil 3.10'da çalışmada kullanılan SENSEBOX70x3 tipi üç eksenli ultra hassas sismik ivmeölçerin görseli verilmektedir.



**Şekil 3.10.** SENSEBOX70x3 tipi üç eksenli ultra hassas sismik ivmeölçer

Çalışmada kullanılan SENSEBOX70x3 tipi üç eksenli ultra hassas sismik ivmeölçerlerin kullanım avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- ✓ Yüksek Hassasiyet: Bu ivmeölçer, ultra hassas ölçümler yapabilen bir cihazdır. Sismik ivmeölçer olarak, ölçümleri deprem, volkanik aktivite, çöküntü, yer altı suyu hareketleri gibi doğal afetlerin kaynaklarının tespitinde kullanılabilir. Hassas ölçümler yapabilmesi nedeniyle, ivmeölçerlerin kullanım alanı oldukça geniştir.

- ✓ Yüksek Frekans Hassasiyeti: SENSEBOX70x3 tipi üç eksenli ultra hassas sismik ivmeölçer, 1Hz'den 1kHz'e kadar olan frekans aralığında yüksek hassasiyetle ölçüm yapabilmektedir. Bu özellik, yüksek frekanslı sismik hareketlerin tespiti için önemlidir.
- ✓ Yüksek Hızda Ölçüm: Bu ivmeölçer, 8000 örnek/saniye hızında ölçüm yapabilmektedir. Yüksek hızda ölçüm yapılabilmesi sayesinde, hızlı değişimlerin tespitinde kullanılabilir.
- ✓ Küçük Boyut: SENSEBOX70x3 tipi üç eksenli ultra hassas sismik ivmeölçer, küçük boyutlu bir cihazdır. Bu sayede, taşınması ve kullanması kolay olmaktadır. Ayrıca, yerleştirme açısından da çok yönlü bir kullanım sağlamaktadır.
- ✓ Dijital Arayüz: Bu ivmeölçer, dijital arayüzü sayesinde, ölçümleri doğrudan bir bilgisayara aktarabilmektedir. Bu özellik, ölçümleri daha hızlı ve kolay bir şekilde analiz etmeyi sağlamaktadır.
- ✓ Güvenilirlik: SENSEBOX70x3 tipi üç eksenli ultra hassas sismik ivmeölçer, yüksek güvenilirlik ve dayanıklılık özelliklerine sahiptir. Bu nedenle, uzun süreli ölçümler yapmak için güvenilir bir seçenektir.

### **3.2.1.3. Veri Toplama Üniteleri ve Sinyal İşleme**

Deneyisel Modal Analiz Yönteminde ivmeölçerler aracılığı ile yapılan ölçümlerin ilk olarak gönderildiği kısım veri toplama üniteleridir. İvmeölçerlerden veri toplama ünitelerine aktarılan ham sinyallerin veri toplama üniteleri ile ölçüm geometrileri dikkate alınarak derlenmekte ve bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. Veri toplama üniteleri tarafından derlenerek bilgisayar ortamına aktarılan bu sinyallerin işlenmesi de yine bilgisayar programları aracılığı ile yapılmaktadır. İvmeölçerlerden elde edilen sinyaller ham olduğundan yani diğer bir deyişle ortamdaki gürültülerden (insan, rüzgâr, derece sesleri vb.) oluştuğundan veri toplama sistemlerinin en önemli işlevi sinyal koşullamadır. Sinyal koşullama sayesinde gürültü sinyallerinin etkileri azaltılabilmektedir. İstenmeyen sinyaller de sinyal koşullama sayesinde filtrelenebilir. Düşük seviyeli sinyallerin kalitesini arttırmak, ivmeölçerlerin elektrik gücünü ayarlayabilmek ve ivmeölçer davranışlarını kontrol edebilmek için de sinyal koşullama yöntemleri kullanılmaktadır. Sinyal koşullamanın bu olumlu etkilerinden en önemlisi istenmeyen sinyallerin filtrelenmesi durumudur. Çünkü istenmeyen sinyaller belirli bir frekans ölçüm aralığı dışında kalmaktadır ve yüksek frekans değerine sahiplerdir. Eğer düşük bir hızda ölçüm işlemi yapılıyorsa, yüksek frekans içeriğine sahip olan bu istenmeyen sinyaller düşük

frekansa sahip gibi algılanabilmektedir ve bu durum da ölçüm sonuçlarının doğruluk ve güvenilirliğini tehlikeye atmaktadır (Türker, 2011).

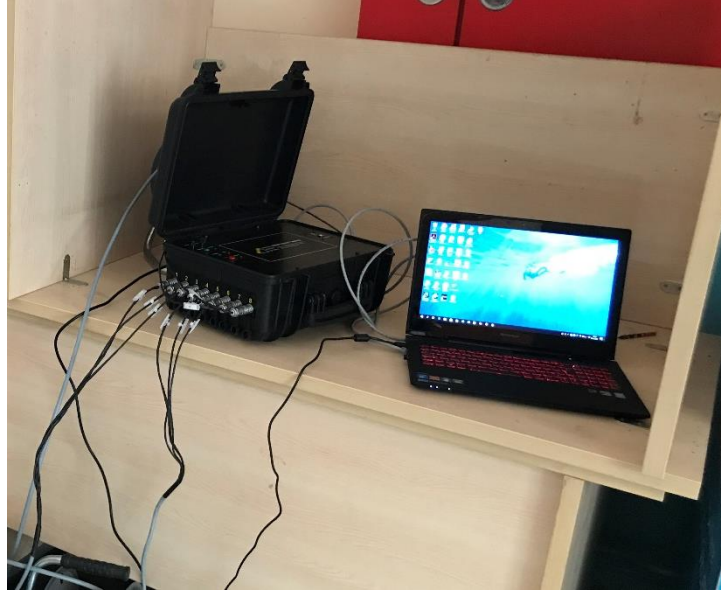
Yapıların dinamik karakteristiklerinin doğru olarak belirlenebilmesi ivmeölçerlerden alınan sinyallerin doğruluğuna bağlı olmaktadır. İvmeölçerlerden alınan bu sinyaller veri toplama ünitesine aktarılmakta ve burada sinyal koşullama işlemlerine tabi tutularak bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. Bilgisayarlarda kullanılan özel yazılımlar aracılığı ile sinyal işleme işlemleri yapılmaktadır. Sinyaller bilgisayar ortamına zaman tanım alanındaki yöntemler aracılığı ile aktarılmaktadır. Pratik sebepler ve hesaplama gereksinimlerine göre frekans tanım alanına dönüştürülmektedirler. İvmeölçerlerden alınan ve veri toplama ünitelerine aktarılan sinyaller periyodik sinyaller değildir. Bu nedenle sinyal işleme aşamasında bazı sızıntı hataları olarak tanımlanan problemler yaşanabilmektedir. Bu hataların minimuma indirilmesi için ölçüm sistemi uzatılmalı veya pencereleme yöntemlerinden yararlanılmalıdır (Osmancıklı, 2012:46)

Bu tez çalışmasında, betonarme yapıdan ivmeölçerler ile elde edilen sinyallerin toplanması aşamasında TESTBOX2010 serisinden 16 kanallı veri toplama ünitesi kullanılmıştır. Çalışmada seçilen bu veri toplama ünitesinin avantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- ✓ Yüksek Kanal Sayısı: Bu ünite, aynı anda 16 farklı veri kanalını toplama yeteneğiyle diğer veri toplama cihazlarına göre daha yüksek bir kanal sayısına sahiptir. Bu özellik, çok kanallı veri toplama uygulamalarında büyük bir avantaj sağlamaktadır.
- ✓ Yüksek Örnekleme Hızı: Testbox2010 serisi veri toplama üniteleri, yüksek örnekleme hızlarına sahiptir. Bu sayede, verilerin daha hızlı toplanması ve işlenmesi mümkündür. Örnekleme hızı, özellikle yüksek frekanslı verilerin toplanması durumunda önemlidir.
- ✓ Yüksek Hassasiyet: Testbox2010 serisi veri toplama üniteleri, yüksek hassasiyet özellikleri sayesinde, ölçümlerin doğruluğunu artırır. Bu özellik, özellikle hassas ölçümler gerektiren uygulamalarda önemlidir.
- ✓ Esnek Bağlantı Seçenekleri: Bu ünite, farklı cihazlara bağlanmak için esnek bağlantı seçenekleri sunar. Ethernet, USB, RS232, RS485 gibi farklı protokollerle bağlanılabilmektedir. Bu özellik, farklı uygulama senaryolarına uygunluk sağlar.

- ✓ Kolay Kullanım: Testbox2010 serisi veri toplama üniteleri, kullanımı kolay arayüzleri sayesinde kullanıcıların veri toplama ve analiz işlemlerini daha kolay bir şekilde gerçekleştirmelerini sağlamaktadır.
- ✓ Uygun Fiyat: Testbox2010 serisi veri toplama üniteleri, yüksek özellikleri ve performansı ile uygun fiyatlı bir seçenek sunmaktadır. Bu nedenle, farklı bütçelere sahip kullanıcılar için ideal bir seçenek olabilmektedir.

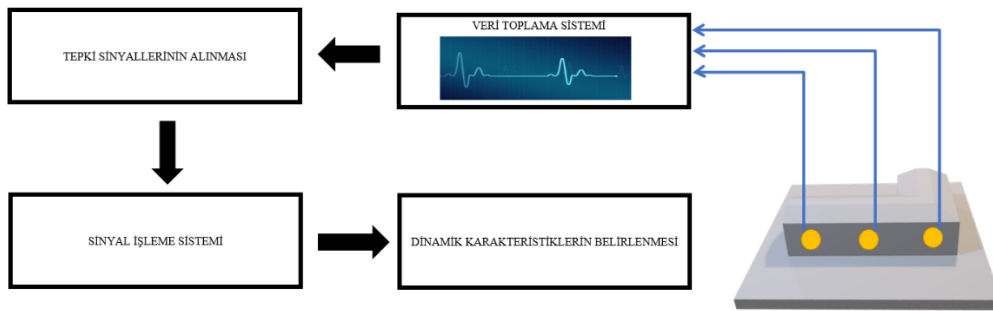
Şekil 3.11’de TESTBOX2010 serisinden 16 kanallı veri toplama ünitesi ve sinyal işleme aşamasında kullanılan ekipmanların görseli verilmektedir.



**Şekil 3.11.** TESTBOX2010 serisinden 16 kanallı veri toplama ünitesi ve sinyal işleme ekipmanı

### 3.3. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi

Operasyonel Modal Analiz Yöntemi, yapıların dinamik karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesinde tahrik kuvvetlerine ihtiyaç duyulmayan, yapı çalışır vaziyette iken ölçüm alınmasına olanak veren ve bu sayede günlük hayatta da aksamalara neden olmayan Deneysel Modal Analiz yöntemlerinden biridir. Yöntem, uygulanması sırasında yapıya dışarıdan bilinen bir etki veya tahrik kuvveti uygulanmasına gerek olmadığından, bu etkiler ile titreştirilmesi mümkün olmayan büyük ölçekli mühendislik yapılarında, çok katlı binalarda, korunması gereken ve bu tahrik kuvvetlerinin kullanılması ile zarar görebileceğinden endişe edilen kültürel miras kabul edilen yapılarda, onarım-güçlendirme ihtiyacı belirlenecek yapılarda ve yapı sağlığı izlenmesi alanında sıklıkla tercih edilmektedir. Operasyonel Modal Analiz Yönteminde tahrik kuvvetlerinin yerini çevresel etkiler almaktadır. Diğer bir deyiş ile yapı gündelik hayatta maruz kaldığı rüzgâr, taşıt trafiği, yaya trafiği, dalga, deprem vb. doğal etkiler ile titreştirilir. Titreştirilen yapı üzerinden alınan ölçüm işlem adımlarının kalan kısmı geleneksel deneysel yöntem ile hemen hemen aynıdır. Bu ivmeölçerler aracılığı ile belirlenen süre boyunca yapının titreşim sinyalleri ölçülmektedir. İvmeölçerlerden alınan sinyal verileri veri toplama ünitelerine aktarılmaktadır. Veri toplama üniteleri aracılığı ile alınan tepki sinyalleri sinyal işleme sistemlerine aktararak yapıların dinamik karakteristikleri elde edilmektedir. Şekil 3.12’de Operasyonel Modal Analiz Yönteminin ölçüm aşamaları verilmektedir.



Şekil 3.12. Operasyonel Modal Analiz Yönteminin ölçüm aşamaları

Operasyonel Modal Analiz Yönteminin kullanımı oldukça geniş bir alana yayılmaktadır. 1940’lı yılların başlarında ilk olarak hava araçlarında ve makine parçalarının titreşim analizlerinde kullanılan yöntem, günümüzde inşaat mühendisliği yapılarında onarım-güçlendirmeden yapı sağlığı izlenmesine kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Operasyonel Modal Analiz Yönteminin uygulama aşamasında yapıların kapatılmamasına gerek kalmaması ve günlük hayatta aksamalara neden olmaması da yöntemin en çok tercih edilme sebepleri

arasında yer almaktadır. Ayrıca Geleneksel Deneysel Yöntem ile kıyaslandığında Operasyonel Modal Analiz Yönteminde maliyetli titreştiriciler kullanılmasına gerek olmadığından maliyeti de daha düşüktür (Sevim, 2010).

### 3.3.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi

Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi (GFTAA) ve Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (FTAA) yöntemleri frekans ortamına dayalı yöntemlerdir. GFTAA yöntemi FTAA yöntemi ile kıyaslandığında daha gelişmiş bir yöntemdir. GFTAA yönteminde doğal frekanslar ve mod şekillerin elde edilebildiği gibi modal sönüm oranları da belirlenebilmektedir (Güneş,2017:23). Ancak GFTAA yöntemi piklerin seçilmesi ile uygulanan bir yöntem olduğundan bazı dezavantajları bulunmaktadır. Piklerin seçiminin subjektif olması ve objektif olmaması sonuçların doğruluğu ve güvenilirliği açısından tehlike oluşturmaktadır. Sönüm değeri de maksimum genliğe göre belirlenmektedir. Bu nedenle pik seçimi ile belirlenecek maksimum genliğin doğruluğu ve güvenilirliği sönümü de doğrudan etkileyeceğinden; sönüm değeri ve sönüm tahminlerinin güvenilirliği ve doğruluğunu da azaltmaktadır. Tüm bu avantaj ve dezavantajlarına rağmen GFTAA yöntemi modal analiz uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir sinyal işleme yöntemidir (Osmancıklı,2012:48). Bu yöntemin tepki kuvvetleri (çevresel etkiler veya tahrik kuvvetleri) altındaki bağıntısı;

$$G_{yy}(j\omega) = H(j\omega) * G_{xx}(j\omega) H(j\omega)^T \quad (3.28)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Osmancıklı,2012:48). Denklem (3.28)'de  $G_{xx}(j\omega)$  değeri etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk (GSY) fonksiyonunu,  $G_{yy}(j\omega)$  değeri tepki sinyalinin GSY fonksiyonunu ve  $H(j\omega)$  değeri frekans davranış fonksiyonu değerine karşılık gelmektedir. Ayrıca \* parametresi ifadelerin kompleks eşleniğini ve T değeri ise ifadelerin transpozisini belirtmektedir. Matematiksel düzenlemeler yapıp tepki sinyalinin GSY fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formuna dönüştürüldüğünde;

$$H(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (3.29)$$

fonksiyonu elde edilmektedir. Denklem (3.29)'da; n değeri mod sayısına,  $\lambda_k$  değeri kutup fonksiyonuna ve  $R_k$  değeri artık değer fonksiyonuna karşılık gelmektedir. Bu denklem üzerinde gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra;

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[ \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] G_{xx}(j\omega) \left[ \frac{R_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{R_s^*}{j\omega - \lambda_s^*} \right]^H \quad (3.30)$$

denklemleri elde edilmektedir. Denklem (3.30)'da  $s$  değeri tekil değeri,  $H$  değeri ise kompleks eşleniği ve transpozeyi belirtmektedir. Bu denklemde matematiksel ifadeler sadeleştirildiğinde tepki sinyali için GSY fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda;

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{A_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{B_k}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{B_k^*}{-j\omega - \lambda_k^*} \quad (3.31)$$

şeklinde elde edilmektedir. Denklem (3.31)'de  $A_k$  değeri tepki sinyalinin GSY fonksiyonuna ait  $k$  artık değer matrisini göstermektedir. GFTAA yönteminde ilk adım GSY matrisini belirlemektir. Artık frekanslarda tepki sinyali GSY'nin tahmini  $\omega = \omega_i$  olarak bilinmekte ve sonra tekil değer ayrışım matrisi alınarak ayrıştırılmaktadır. Buna göre denklem (3.31);

$$G_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^H \quad (3.32)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $U_{ij}$  tekil vektörleri,  $U_i = [U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{im}]$  tekil vektörleri içeren bütün matrisi,  $S_{ij}$  skaler tekil değerleri ve  $S_i = [S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{im}]$  skaler tekil değerleri içeren diyagonal matrisi ifade etmektedir. Denklem (3.32)'de verilen GSY fonksiyonunda, pik değer yapan noktalar doğal frekansları temsil etmektedir. Pik noktaları oluşturan tekil vektörler ise cismin veya yapının doğal şekillerine karşılık gelmektedir (Osmancıklı, 2012:49).

### 3.3.2. Stokastik Altalan Belirleme Yöntemi

Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi zaman tanım alanında doğrudan çalışarak veri vermektedir. Bu yöntemde spektral dönüşüme veya korelasyona ihtiyaç duyulmamaktadır. SAB yöntemi, gürültüden oluşan olumsuz etkilere müdahale yapılmasına olanak veren bir yöntem olduğundan; dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde uygun ve elverişli bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Güneş, 2017:25). Bu yöntemde dikkate alınan formülasyon ve bağıntılar hareket denkleminde bağıntı olarak ifade edildiğinde;

$$[M]\{\ddot{U}_{(t)}\} + [C]\{\dot{U}_{(t)}\} + [K]\{U_{(t)}\} = \{R_{(t)}\} = [B]\{U_{(t)}\} \quad (3.33)$$

denklemleri elde edilmektedir. Denklem (3.32)'de  $[M]$  değeri sistemin kütle matrisini,  $[C]$  değeri sistemin sönüm matrisini ve  $[K]$  değeri ise sistemin rijitlik matrisini ifade etmektedir.  $R_{(t)}$  titreşim kuvvetine,  $\ddot{U}_{(t)}, \dot{U}_{(t)}, U_{(t)}$  ise zamana bağlı yer değiştirme, hız ve ivme vektörlerine karşılık gelmektedir. Kuvvet vektörünü simgeleyen  $R_{(t)}$ , ortamdaki verileri ifade eden  $B$  matrisi ve  $U_{(t)}$  vektörü cinsinden de ifade edilebilmektedir. Dinamik denge denklemi olan denklem (3.33) titreşen bir yapının davranışını temsil edebilmektedir. Ancak bu hali ile SAB Yöntemine uygun değildir. Bu nedenle denklem (3.33) SAB Yöntemine daha uygun bir form olarak bilinen ayrık-zaman stokastik durum-uzay modeline dönüştürülmektedir. Durum-Uzay modeli kontrol

teorisinden üretilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus bu modelin inşaat mühendisliği yapıları arasında viskoz sönüme sahip olan yapıların dinamik karakteristiklerinin hesaplanmasında kullanılacak bir yöntem olmasıdır (Osmancıklı, 2012:50). Bu düzenlemelerin ardından dinamik hareket denklemi denklem (3.33);

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= \begin{pmatrix} U_{(t)} \\ \dot{U}_{(t)} \end{pmatrix} \\ A_* &= \begin{pmatrix} 0 & I_{n_2} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{pmatrix} \\ B_* &= \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}B \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$

denklem (3.34)'teki bağıntılar kullanılarak;

$$\dot{x}(t) = A_*x(t) = B_*u(t) \quad (3.35)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (3.35)'de  $A_*$  değeri durum matrisine,  $B_*$  değeri veri matrisine ve  $x(t)$  değeri durum vektörüne karşılık gelmektedir.

Çevresel titreşim testlerinde, ölçümler sırasında yapıların bütün serbestliklerini ölçmek her zaman mümkün olmamaktadır. Bu nedenle durum-uzay vektörünün eleman sayısı, sistemin durumunu tanımlayan bağımsız değişkenlerin sayısına eşit olmaktadır. Gözlem denklemi;

$$y(t) = C_*x(t) + D_*u(t) \quad (3.36)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (3.36)'da  $C_*$  değeri sistem davranış matrisine ve  $D_*$  değeri doğrudan iletim matrisine karşılık gelmektedir. Denklem (3.35) ve (3.36) sürekli-zaman belirli durum-uzay modelini oluşturmaktadırlar. Bu anlatımda “sürekli zaman” tanımlaması ile ifadelerin herhangi bir  $t \in \mathbb{N}$  anında değerlendirilebileceği anlamına gelmektedir. Ancak ölçümler  $k \Delta t$  ( $k \in \mathbb{N}$ ) şeklindeki ayrık zamanlarda gerçekleştirilmektedir. Ölçümler sırasında örnekleme süresi ve ortamdaki gürültü; sinyal verilerini her zaman etkilemektedir. Örneklemeler sonrasında durum-uzay modeli;

$$\left. \begin{aligned} X_{k+1} &= A_*X_k + B_*u_k \\ y_k &= C_*X_k + D_*u_k \end{aligned} \right\} \quad (3.37)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (3.37)'de  $x_k = x(k\Delta t)$  ayrık zaman durum vektörünü,  $u_k$  ise belirgin etki sinyal vektörünü ifade etmektedir. Gerçek çevresel etkiler altında yapılan ölçümler, yapıya ve dış ortamdaki gürültüye ait sinyalleri içermekte olduğundan denklem (3.37)'ye stokastik gürültü bileşenleri eklediğinde belirli-stokastik durum uzay modeli;

$$\left. \begin{aligned} X_{k+1} &= A_*X_k + B_*u_k + W_k \\ y_k &= C_*X_k + D_*u_k + V_k \end{aligned} \right\} \quad (3.38)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (3.38)'de  $W_k$  modeldeki belirsizlikleri ve hatalar nedeni ile işlenen gürültü sinyallerini,  $V_k$  değeri ise ivmeölçer hatalarından kaynaklanan gürültü sinyallerini ifade etmektedir. Her iki vektörde değeri ölçülemeyen sinyallerden oluştuğundan, bu durumda etkisi olmayan beyaz gürültü ve kovaryans matrisleri;

$$E_* \left[ \begin{pmatrix} W_p \\ V_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_q^T & V_q^T \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad (3.39)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (3.39)'da  $E_*$  beklenen değer operatörüne,  $\delta_{pq}$  değeri ise Kronecker delta değerine karşılık gelmektedir. Kronecker delta değeri iki değişkenli bir fonksiyon olarak;

$$\delta_{pq} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } p = q \\ 0, & \text{eğer } p \neq q \end{cases} \quad (3.40)$$

denklem (3.40)'ta olduğu gibi ifade edilmektedir. SAB yönteminde yapıların dinamik davranışları, normal çevresel koşullarda belirlenmektedir. Bu durumda denklem (3.38)'de verilen sinyal verisi  $u_k$  değerini gürültü terimleri olan  $w_k$  ve  $v_k$  değerlerinden ayırt etmek mümkün olmamaktadır. Bu nedenle  $u_k$  değeri  $w_k$  ve  $v_k$  cinsinden yazılıp yapının ayrık-zaman stokastik durum-uzay modeli;

$$\left. \begin{aligned} X_{k+1} &= A_* X_k + W_k \\ Y_k &= C_* X_k + V_k \end{aligned} \right\} \quad (3.41)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (3.41), operasyonel koşullardan dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde zaman-tanım alanının temelini oluşturmaktadır (Osmancıklı, 2012:52).

### 3.3.3. Sonlu Eleman İyileştirme Yöntemleri

Yapıların etki altında gösterdikleri dinamik davranışlar, yapıların dinamik karakteristikleri olarak bilinen mod şekilleri, sönüm oranları ve doğal frekans değerlerine bağlı olarak belirlenebilmektedir. Günümüz teknolojisi ile yapıların dinamik karakteristikleri belirlenirken, yapısal analiz programları aracılığı ile yapıların proje verileri dikkate alınarak eleman boyutları, malzeme özellikleri ve sınır şartları gibi faktörlere göre oluşturulan; sonlu eleman modellerinin modal analizi sonucunda belirlenmektedir. Teorik analizler sırasında bazı kabuller yapılmaktadır. Bu kabuller başlangıç ve sınır şartlarının değişmediği, malzeme özelliklerinin değişmemesi vb. gibi kabullerdir. Ancak günlük hayatta yapıların malzeme özelliklerinde meydana gelen değişimler, yapıların imalatı sırasında işçilik kaynaklı hatalar olması, yapı malzemelerinin zamanla dayanımlarını yitirmesi, yapıların maruz kaldığı farklı

yüklemeler nedeniyle taşıyıcı elemanlarda oluşan çatlamlar, yorulmalar, mesnet çökmeleri gibi nedenlerden ötürü teorik analiz sonuçları proje verilerinden zaman içerisinde uzaklaşabilmektedir. Bu nedenle yapıların etki altındaki dinamik davranışlarının belirlenmesinde, analitik olarak elde dinamik karakteristiklerin kullanılması sonuçların doğruluk ve güvenilirliğini tehlikeye atmaktadır. Bu nedenle yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde Teorik Analiz Yöntemleri ile Deneysel Analiz Yöntemlerinin de kullanılması gerekmektedir. Deneysel Modal Analiz Yöntemleri direkt olarak çalışır vaziyetteki yapılar üzerinde uygulandığından teorik analiz sonuçlarının doğrulanmasına yardımcı olmaktadır (Türker, 2011; Sevim,2010).

Yapıların sonlu eleman modellerinin oluşturulup, yapısal analiz programları aracılığı ile teorik analizinin gerçekleştirilmesi ile elde edilen dinamik karakteristikler, deneysel yöntemler ile elde edilen dinamik karakteristiklerle karşılaştırılmaktadır. Bu aşamada sonuçlar arasındaki farklılıkların da doğru değerlendirilmesi gerekmektedir. Teorik analizler ve deneysel analizlerden elde edilen dinamik karakteristiklerin farklı olması genellikle malzeme özellikleri, kesit özellikleri ve sınır şartları gibi etkilerden kaynaklanmaktadır. Teorik analiz ve deneysel analizden elde edilen dinamik karakteristikler arasındaki farkın %5-10 civarında olması normal kabul edilebilmekte ve teorik analizden elde edilen dinamik karakteristiklerin yapının mevcut durumunu yansıttığı kabul edilmektedir (Türker, 2011). Ancak bu farkın değerinin %10'dan büyük olması teorik analizden elde edilen dinamik karakteristiklerin yapının mevcut durumunu yansıtmadığı anlamına gelmektedir. Bu karşılaştırma sayesinde sonuçlar arasındaki farklar minimum seviyeye indirilmekte ve yapıların sonlu eleman modelleri iyileştirilmektedir.

Yapıların sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesi için iki farklı yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler Deneme-Yanıma Yöntemi ve Optimizasyon Yöntemidir (Şahin, 2009). Bu tez çalışmasında malzeme özellikleri, sınır şartları gibi koşulların yeniden düzenlenmesi esasına dayanan Deneme-Yanıma yöntemi kullanılarak yapı modelinin sonlu eleman iyileştirmesi yapılmıştır. Bu nedenle yapı malzemelerinin elastisite modülü değiştirilmiştir. Optimizasyon Yöntemi de Deneme-Yanıma Yöntemi ile aynı temele dayanmaktadır. Her iki yöntemde de malzeme özellikleri ve sınır şartları gibi parametreler yeniden düzenlenmektedir. Ancak Optimizasyon Yönteminde tanımlanan belli bir aralıktaki bütün değerler için sonlu eleman modeli tek tek analiz edilmektedir. Bu analizler sonucunda elde edilen teorik değerler ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmakta ve deneysel verilere en yakın sonucu veren parametreler kullanılarak yeniden sonlu eleman modeli oluşturulmaktadır. Elde edilen bu modele ise iyileştirilmiş sonlu eleman modeli denmektedir (Osmancıklı, 2012:54).

### 3.3.4. Operasyonel Modal Analiz Yönteminde Yapılan Kabuller

Operasyonel Modal Analiz Yönteminin minimal boyuttaki makine parçalarından, devasa büyüklüklerdeki mühendislik yapılarına kadar birçok alanda kullanıldığı bilinmektedir. İnşaat mühendisliğinde Operasyonel Modal Analiz Yöntemi;

- ✓ Yapıların inşasının tamamlanmasının ardından, projelendirme kısmında planlanan dinamik karakteristikleri sağlayıp sağlamadığının kontrol edilmesi,
- ✓ Yapıların onarım-güçlendirme ihtiyacının olup olmadığının belirlenmesi,
- ✓ Hasarlı yapıların deprem etkisi altındaki davranışlarının belirlenmesi,
- ✓ Yapıların performans analizlerinin yapılması,
- ✓ Yapı sağlığının izlenmesi,
- ✓ Tarihi yapıların veya korunması gereken yapıların hasar tespitlerinin yapılmasında ve deprem etkisi altında davranışlarının tespit edilmesi,
- ✓ Davranış tespiti yapabilmek için, projelerine göre oluşturulan yapı sonlu eleman modellerinin deneysel sonuçlara göre güncellenmesi,
- ✓ Yapıların gerçek davranışlarının analiz edilmesi,
- ✓ Onarım-güçlendirme yapılan yapılarda onarım-güçlendirme etkisinin gözlemlenmesi,

vb. amaçlar ile kullanılan güncel bir Deneysel Modal Analiz Yöntemidir (Fu ve He, 2001; Kuyumcuoğlu, 2008; Yücel, 2021).

Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile yapıların dinamik karakteristiklerinin elde edilmesinde bazı kabuller yapılmaktadır. Bu kabuller;

- ✓ Malzeme özellikleri ve sınır şartlarının değişmediği,
- ✓ Yapı bütünlüğünün ve sürekliliğinin korunduğu,
- ✓ Ölçümlerde çevresel etkilerden meydana gelecek titreşimlerin küçük olduğu,
- ✓ Yapının lineer davrandığı,
- ✓ Yapı rijitliğini bozacak etki gücüne sahip titreşimlerin kullanılmasının doğru sonuçlara ulaştırmayacağı,
- ✓ Yapının herhangi bir bölümündeki davranış şeklinin tüm yapıyı temsil edeceği,

kabulleri olarak sıralanmaktadır (Kuyumcuoğlu, 2008; Osmancıklı, 2012; Aslay, 2017).

### **3.3.5. Operasyonel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Yazılımlar**

Yapıların dinamik karakteristiklerinin elde edilerek dinamik davranışlarının belirlenmesinde Teorik Modal Analiz ve Deneysel Modal Analiz yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Her iki analiz sonucu da karşılaştırılarak yapıların sonlu eleman modelleri iyileştirilmekte ve bilgisayar ortamında dinamik davranışları belirlenmektedir. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi aşamasında çalışır vaziyetteki yapılardan ivmeölçerler aracılığı ile alınan tepki sinyallerinin veri ünitelerine aktarılması ve sinyal işleme işlemlerinin ardından yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi aşamasında bilgisayar programlarından yararlanılmaktadır. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ve Teorik Analiz Yöntemi sırasında kullanılan birçok bilgisayar yazılımı bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan betonarme yapının teorik modal analiz kısmında sonlu eleman modelinin oluşturulması ve analiz edilmesinde SAP2000 yapısal analiz programı kullanılmıştır. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile dinamik karakteristikler deneysel olarak elde edilirken ARTEMIS yazılımı kullanılmıştır.

#### **3.3.5.1. SAP2000 (Structural Analysis Program)**

SAP2000 (Structural Analysis Program) bir yapısal analiz ve tasarım yazılımıdır. Bu program, çeşitli yapısal elemanlar, malzemeler ve yükler için analiz ve tasarım yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. SAP2000, statik ve dinamik analiz yapabilme, malzeme özelliklerini ve kesit boyutlarını hesaplayabilme, zemin- yapı etkileşimini hesaplayabilme, doğrusal olmayan malzemeleri modelleyebilme, tasarım optimizasyonu yapabilme, yapısal hasar tespiti ve tahribatsız testleri analiz edebilme gibi özelliklere sahiptir. Bunlara ek olarak, çeşitli standartların yanı sıra, yerel ve uluslararası yapı tasarım standartlarını da desteklemektedir. Bu standartlar arasında ACI, AISC, ASCE, Eurocode, BS gibi uluslararası standartlar ile Türkiye'de kullanılan TS, TS EN ve Yönetmelikler gibi yerel standartlar yer almaktadır. Kullanım kolaylığı ve sezgisel arayüzü nedeniyle özellikle inşaat mühendisleri tarafından sıklıkla tercih edilmektedir. SAP2000'nin temel özellikleri arasında aşağıdaki özellikler yer almaktadır:

- ✓ Statik ve dinamik analiz yapabilme: SAP2000, yapısal elemanların statik ve dinamik analizlerini gerçekleştirebilmektedir. Bu sayede, yapıların deprem, rüzgâr ve diğer yükler altında davranışlarını analiz edebilmeyi mümkün kılmaktadır.
- ✓ Malzeme özelliklerini ve kesit boyutlarını hesaplayabilme: SAP2000, çeşitli malzemelerin özelliklerini (örneğin betonun dayanımı veya çeliğin elastik

modülü) hesaplayabilmekte ve yapı elemanları için uygun kesit boyutlarını belirleyebilmektedir.

- ✓ Zemin-yapı etkileşimini hesaplayabilme: SAP2000, zemin-yapı etkileşimini hesaplayarak yapıların temel taşıyıcı sistemlerinin davranışını analiz edebilmektedir.
- ✓ Doğrusal olmayan malzemeleri modelleyebilme: SAP2000, doğrusal olmayan malzemelerin (örneğin plastik deformasyon gösteren çelik) davranışını modelleyebilmektedir.
- ✓ Tasarım optimizasyonu yapabilme: SAP2000, kullanıcının belirli bir tasarım kriteri altında yapı elemanlarının boyutlarını optimize etmesine olanak tanımaktadır.
- ✓ Yapısal hasar tespiti ve tahribatsız testleri analiz edebilme: SAP2000, yapısal hasar tespiti için kullanılan çeşitli tahribatsız testleri analiz edebilmekte ve yapıların güçlendirilmesi veya onarımı için önerilerde bulunabilmektedir.
- ✓ SAP2000, kullanıcı dostu arayüzü, hızlı analiz özellikleri ve geniş tasarım standartları desteği nedeniyle inşaat mühendisleri tarafından tercih edilmektedir.
- ✓ Program, ACI, AISC, ASCE, Eurocode, BS gibi uluslararası standartları ve Türkiye'de kullanılan TS, TS EN ve Yönetmelikler gibi yerel standartları da desteklemektedir.

SAP2000, yapısal analiz ve tasarım için birçok avantaj sunmaktadır. Yazılımın avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- ✓ Kullanım kolaylığı: SAP2000, kullanıcı dostu bir arayüze sahiptir ve kullanımı kolaydır. Bu nedenle, inşaat mühendisleri ve öğrenciler tarafından tercih edilmektedir.
- ✓ Geniş tasarım standartları desteği: SAP2000, çeşitli uluslararası ve yerel tasarım standartlarını desteklemektedir. Bu sayede kullanıcıların farklı ülkelerdeki farklı tasarım gereksinimlerine uygun tasarımlar yapabilmesine olanak vermektedir.
- ✓ Hızlı analiz özellikleri: SAP2000, yüksek hızlı analiz özellikleri sunmaktadır. Programın bu özelliği sayesinde büyük ve karmaşık yapıların analizleri daha kısa sürede gerçekleştirilebilmektedir.
- ✓ Malzeme özellikleri ve kesit boyutlarının hesaplanması: SAP2000, çeşitli malzemelerin özelliklerini ve yapı elemanları için uygun kesit boyutlarını

hesaplayabilmektedir. Bu özelliğin kullanılması ile yapıların dayanıklılığı ve güvenliği artırılabilir.

- ✓ Zemin-yapı etkileşimi hesaplaması: SAP2000, zemin-yapı etkileşimini hesaplayarak yapıların temel taşıyıcı sistemlerinin davranışını analiz edebilmektedir. Bu davranış analizi sayesinde yapıların deprem gibi doğal afetlere karşı dayanıklılığı artırılabilir.

Sonuç olarak, SAP2000 yapısal analiz ve tasarım yazılımları arasında popüler bir yazılımdır ve geniş bir kullanım alanı sunmaktadır. Diğer yapısal analiz programlarıyla kıyaslandığında, SAP2000'nin kullanım kolaylığı, hızlı analiz özellikleri ve malzeme özelliklerinin hesaplanması gibi avantajları bulunmaktadır.

### 3.3.5.2. ARTEMIS

İlk olarak 1999 yılında Aalborg Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü tarafından geliştirilmiş, Ambient Response Testing ve Modal Identification Software'in kısaltması olan ARTEMIS yazılımı, Operasyonel Modal Analiz Yöntemi için geliştirilmiş bir yazılımdır. ARTEMIS, yapının doğal titreşimlerini elde etmek için yapıya uygulanan gerçek zamanlı yükleme verilerini analiz etmekte ve yapının dinamik özelliklerini belirlemektedir. ARTEMIS, yapıların sağlık değerlendirme ve güçlendirme tasarımı gibi uygulamalar için de kullanılmaktadır.

ARTEMIS yazılımının temel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

- ✓ Veri toplama: ARTEMIS, yapısal analiz için gerekli olan gerçek zamanlı yükleme verilerini toplamaktadır. Ölçüm sırasında yapılara yerleştirilen sensörler aracılığıyla titreşim verileri elde edilmektedir.
- ✓ Sinyal işleme: Veri toplandıktan sonra, ARTEMIS, yapıya uygulanan titreşim yüklerini analiz edebilmekte ve yapının doğal frekansları, modları ve sönüm oranları gibi dinamik özelliklerini belirlemektedir.
- ✓ Sağlık değerlendirme: ARTEMIS, yapıların sağlık değerlendirme için kullanılmaktadır. Yapıların titreşim analizi ile hasar tespiti yapılır ve hasar seviyesi belirlenir.
- ✓ Güçlendirme tasarımı: ARTEMIS, yapıların güçlendirme tasarımı için de kullanılmaktadır. Hasarlı yapıların güçlendirme yöntemleri belirlenir ve tasarımı yapılır.

ARTEMIS, Operasyonel Modal Analiz Yöntemi için tasarlanmış bir yazılımdır ve yapısal analiz alanında kullanılan diğer yazılımlardan farklı özelliklere sahiptir. ARTEMIS, gerçek zamanlı veri toplama, dinamik özelliklerin belirlenmesi, sağlamlık değerlendirmesi ve güçlendirme tasarımı gibi özellikler sunmaktadır. Bu nedenle, ARTEMIS, yapının doğal davranışlarının belirlenmesi için etkili bir yazılımdır. ARTEMIS yazılımının avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- ✓ Gerçek zamanlı veri toplama: ARTEMIS, gerçek zamanlı veri toplama özelliği sayesinde yapıya uygulanan yüklemelerin anlık ölçümlerini alabilmektedir. Bu özellik sayesinde yapıların dinamik özellikleri daha doğru bir şekilde belirlenebilmektedir.
- ✓ Kullanım kolaylığı: ARTEMIS yazılımı, kullanımı kolay bir arayüze sahiptir. Veri toplama, işleme ve sonuçlarının analizi gibi işlemler, yazılımın kullanıcı dostu arayüzü sayesinde hızlı ve kolay bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.
- ✓ Esneklik: ARTEMIS, farklı tipteki yapılar için kullanılabilir. Bu özellik sayesinde, farklı türde yapıların doğal frekansları ve modları belirlenebilmektedir.
- ✓ Sağlamlık değerlendirmesi ve güçlendirme tasarımı: ARTEMIS, sağlamlık değerlendirmesi ve güçlendirme tasarımı gibi uygulamalar için de kullanılabilir. Bu sayede, yapıların hasar tespiti ve güçlendirme ihtiyaçları belirlenebilmektedir.
- ✓ Maliyet etkinliği: ARTEMIS, yapılarda yapısal analiz için geleneksel yöntemlerden daha ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Veri toplama, işleme ve sonuçlarının analizi için gereken zaman ve maliyet, diğer yöntemlere göre daha düşüktür.
- ✓ Yüksek Doğruluk: ARTEMIS yazılımı, yapıların doğal titreşim özelliklerini yüksek bir doğrulukla belirleyebilmektedir. Bu sayede, yapıların gerçek davranışları daha doğru bir şekilde tahmin edilebilmektedir.

Bu avantajlar, ARTEMIS yazılımının yapısal analiz için etkili bir araç olduğunu göstermektedir.

## 4. SAHA ÇALIŞMALARI

### 4.1. Betonarme Yapıya Ait Genel Bilgiler

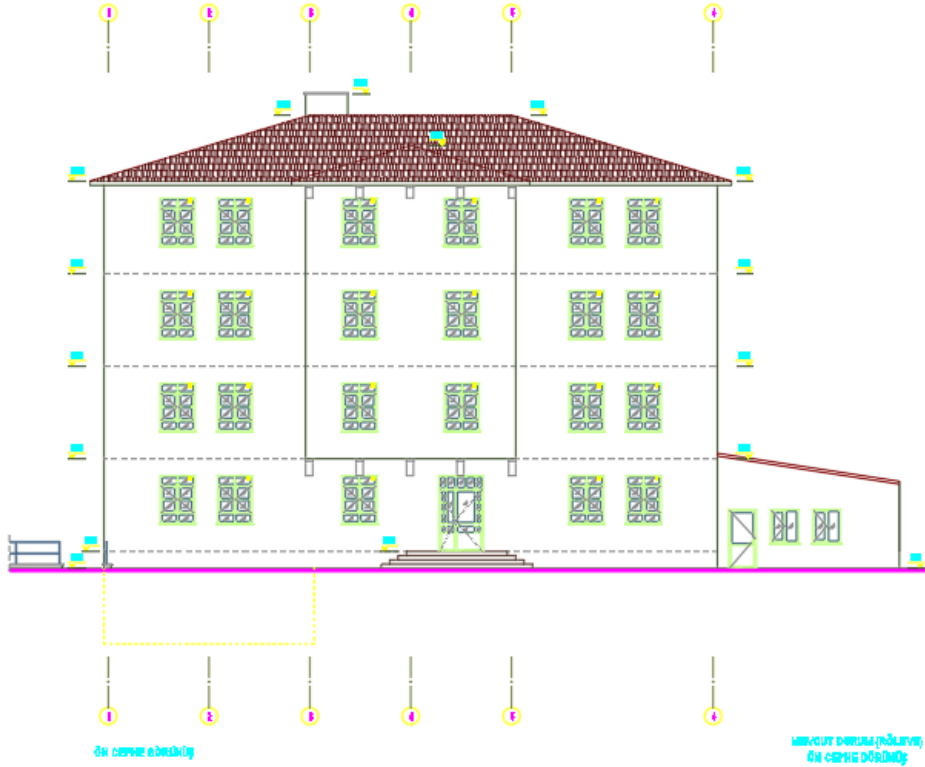
Söz konusu betonarme bina Bilecik ilinde bulunmaktadır. Sahada yüklenici firmalar tarafından yapılan rölöve çalışmalarına göre; yapı, bodrum + zemin + 3 normal kat olmak üzere toplam 5 kattan meydana gelmektedir. Söz konusu betonarme yapının x yönündeki açıklık değeri 21.9 m ve y yönündeki açıklık değeri 15.7 m olup yapı dikdörtgen formundadır. Yapının taşıyıcı sistemini oluşturan yapı elemanlarının dağılımları simetriktir. Yapının tüm katlarında kat yüksekliği sabit olup 3.30 m'dir. Yapının bulunduğu zeminin yerel zemin sınıfı Deprem Bölgelerinde Yapılacak Bina Hakkında Yönetmelik (DBYBHY-2007)'e göre Z3'tür ve zemin emniyet gerilmesi kat sayısı 1.50 kg/cm<sup>2</sup>'dir. Ayrıca yapının beton dayanımı  $f_{ck} = 11.0$  MPa'dır. Yapının döşeme kalınlıkları her katta sabit ve 15 cm'dir. Yapının güçlendirme işlemi için hazırlanan güçlendirme projesine göre yapının belirli bölümlerinde iç ve dış duvarlar yıkılarak, beton dayanımı  $f_{ck} = 30.0$  MPa olan C30 betonu ile inşa edilen güçlendirme perdeleri kullanılmıştır. Bu çalışmada söz konusu betonarme yapının güçlendirme öncesi dinamik karakteristikleri deneysel olarak Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile belirlenmiştir. Teorik analiz ile dinamik karakteristiklerinin belirlenme aşamasında ise SAP2000 yapısal analiz programı kullanılmıştır. Şekil 4.1'de Betonarme yapıya ait bilgiler, Şekil 4.2'de Betonarme yapının görüntüsü, Şekil 4.3-4.6'da betonarme yapının cephelerine göre mimari görünüşleri ve Şekil 4.7-4.9'da betonarme yapının mimari planları verilmiştir.

BETONARME YAPIYA AİT BİLGİLER	
KAT ADEDİ	Bodrum + Zemin + 3 Normal Kat
X YÖNÜ AÇIKLIK DEĞERİ	21.9 m
Y YÖNÜ AÇIKLIK DEĞERİ	15.7 m
YAPI FORMU	Dikdörtgen
KAT YÜKSEKLİĞİ	3.30 m ( Her katta sabit)
YEREL ZEMİN SINIFI	Z3 (DBYBHY 2007)
	ZD (TBDY 2018)
ZEMİN EMNİYET GERİLMESİ	1.50 kg/cm <sup>2</sup>
BETON DAYANIMI ( $f_{ck}$ )	11.0 MPa
BETON SINIFI	C11
DÖŞEME KALINLIĞI	15 cm (Sabit)

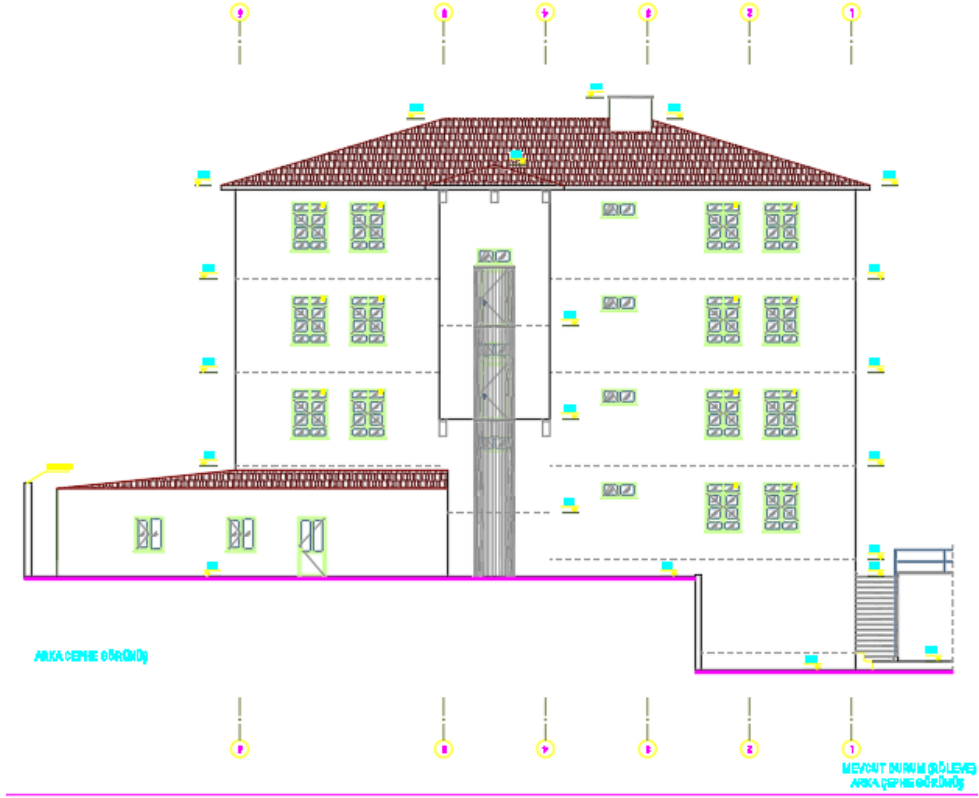
Şekil 4.1. Betonarme yapıya ait bilgiler



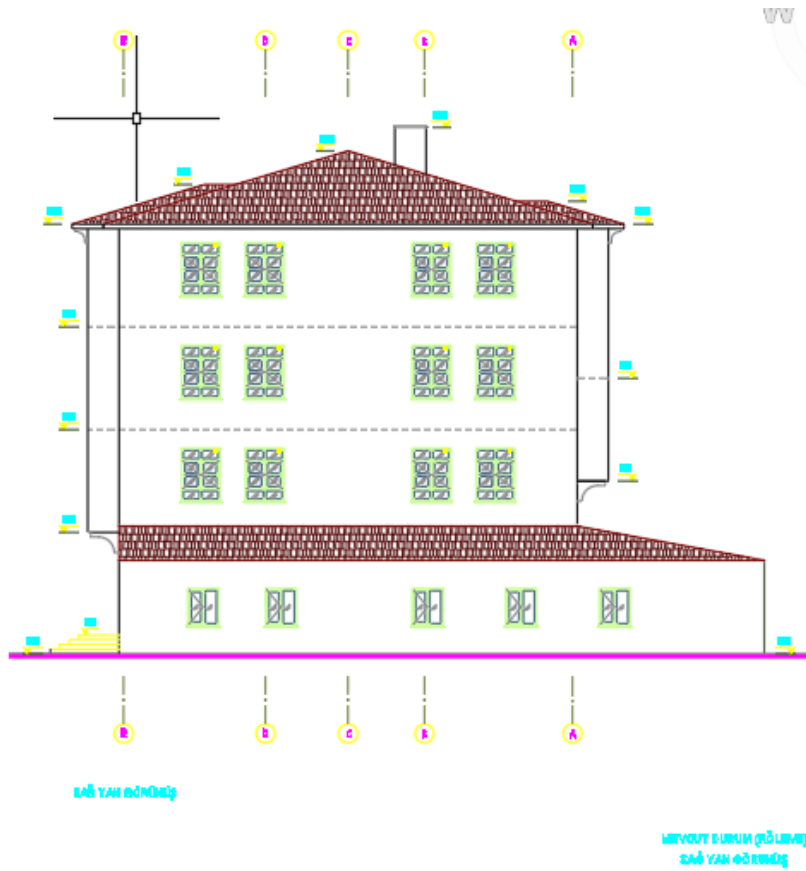
Şekil 4.2. Betonarme yapının görüntüsü



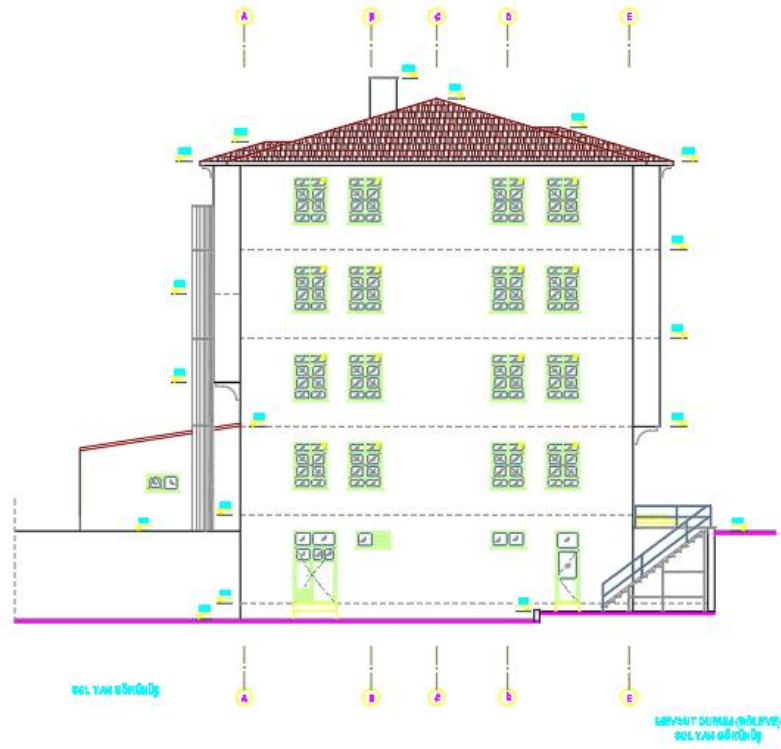
Şekil 4.3. Betonarme yapı ön cephe görünüşü



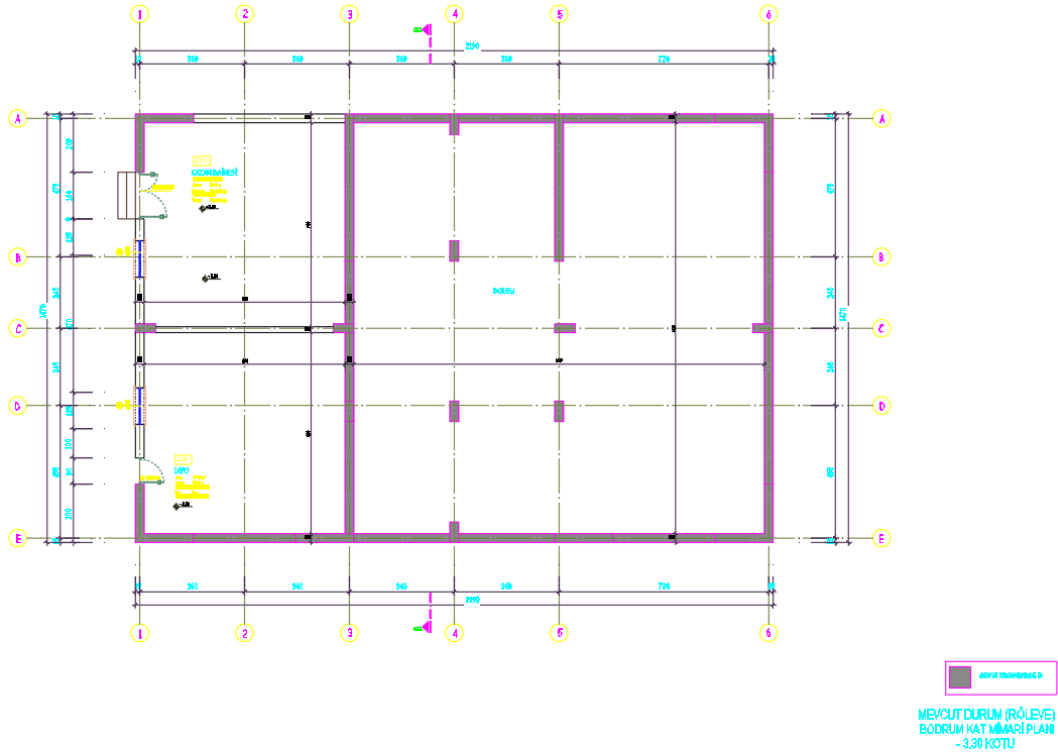
Şekil 4.4. Betonarme yapı arka cephe görünüşü



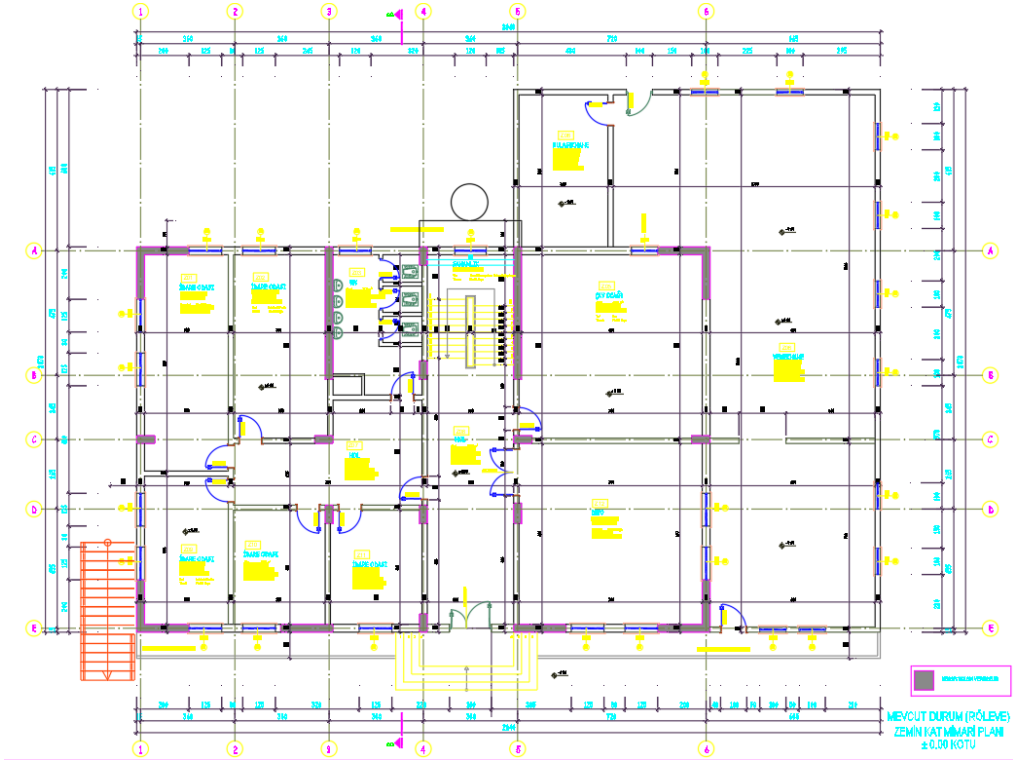
Şekil 4.5. Betonarme yapı sağ yan görünüşü



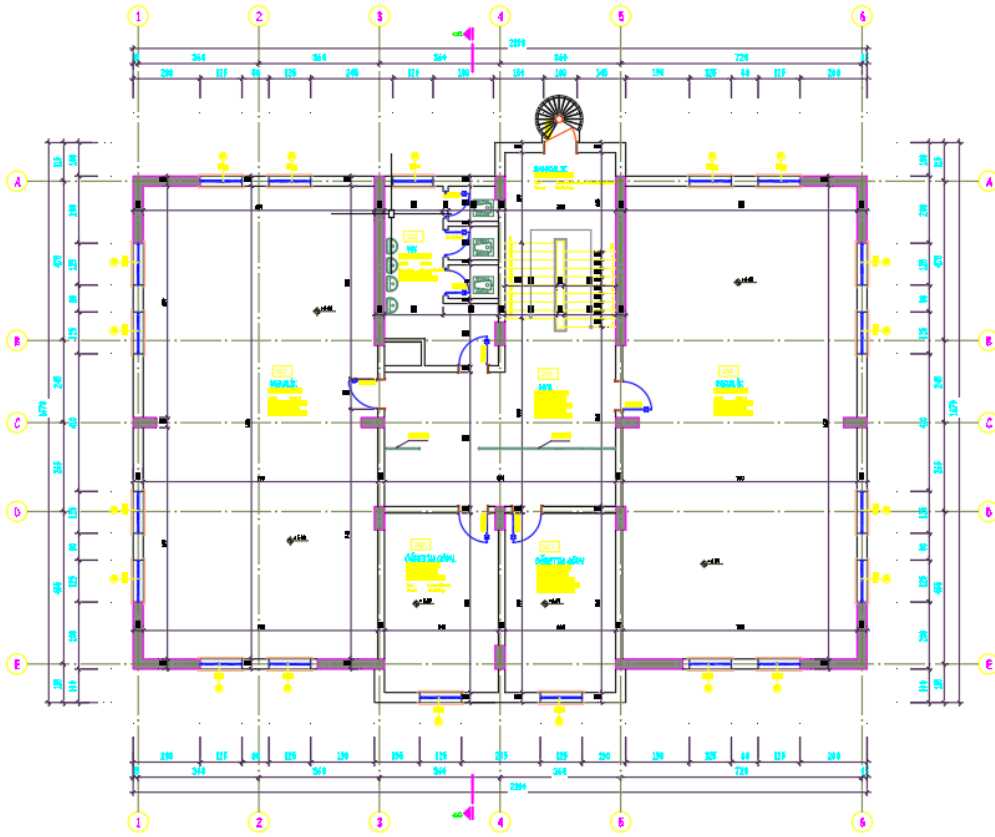
Şekil 4.6. Betonarme yapı sol yan görünüş



Şekil 4.7. Betonarme yapının bodrum kat planı



Şekil 4.8. Betonarme yapının zemin kat planı



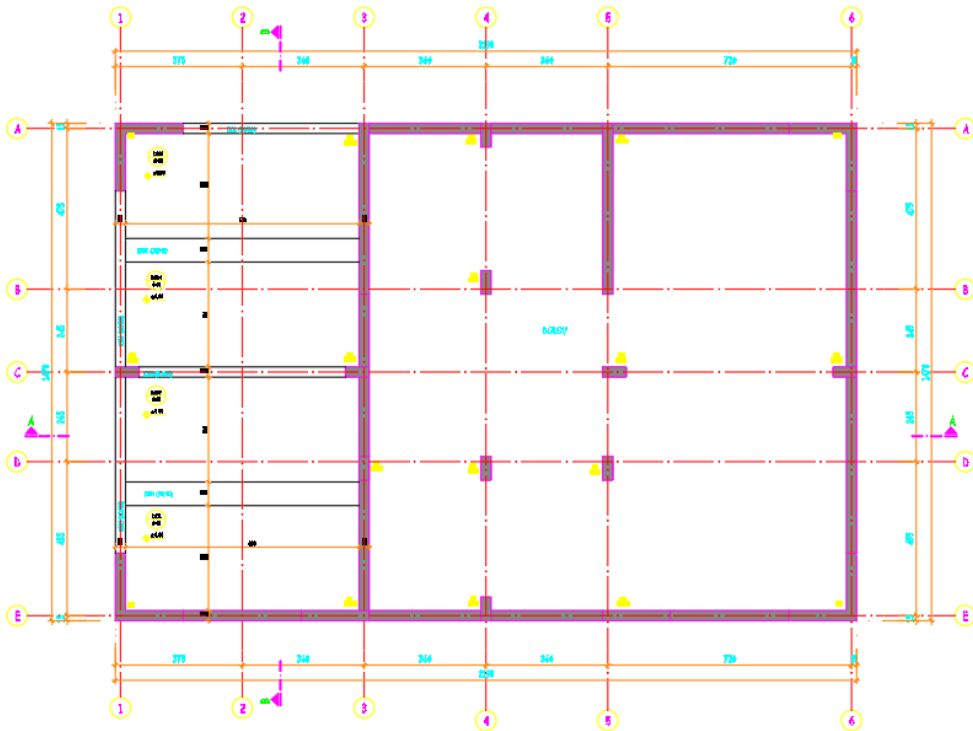
Şekil 4.9. Betonarme yapının 1-2 ve 3. normal kat planı

## 4.2. Yapılan Çalışmalar

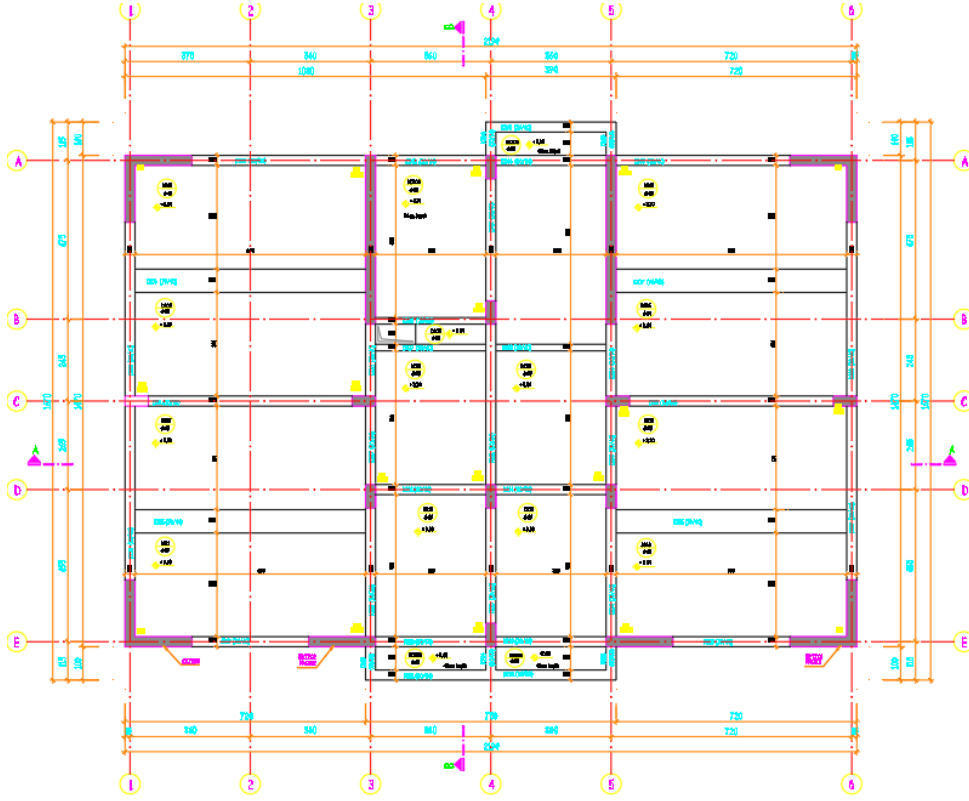
### 4.2.1. Betonarme Yapının Güçlendirme Öncesi Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması

Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile elde edilen dinamik karakteristiklerin Teorik Modal Analiz Yönteminden elde edilen sonuçlar ile örtüşmesi gerekmektedir. Bu nedenle de yapıların Sonlu Eleman Modellerinin doğru oluşturulması çok önemlidir. Deneysel Yöntemden elde edilen sonuçlar ile Teorik Yöntemden elde edilen sonuçların birbirine yakınsaması veya ıraksaması durumları, sonlu eleman modelinin doğru olarak oluşturulup oluşturulmaması ile yakından ilgili olmaktadır.

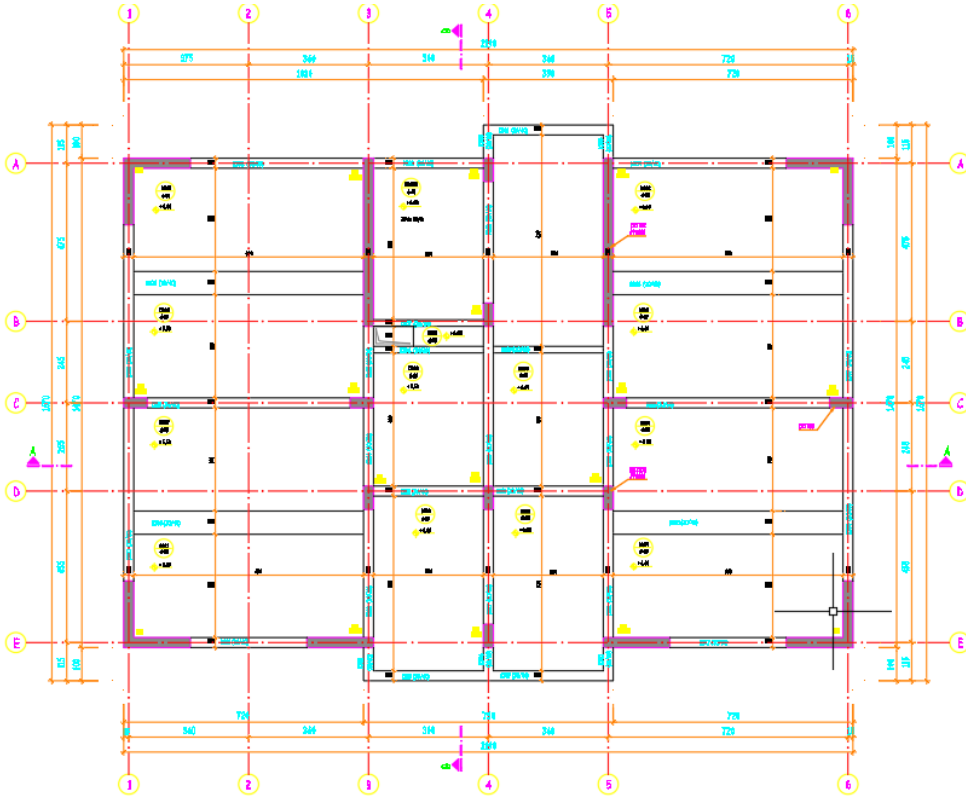
Bu çalışmada betonarme yapının üç boyutlu sonlu eleman modelinin oluşturulmasında ve teorik olarak Modal Analizinin yapılmasında SAP2000 Yapısal Analiz Programının v23.0 sürümü kullanılmıştır. Yapının taşıyıcı elemanlarının modellenmesinde yüklenici firmanın oluşturduğu statik rölöve planlarından yararlanılmıştır. Şekil 4.10-4.12’de statik rölöve planları verilmiştir.



Şekil 4.10. Betonarme yapının bodrum kat kalıp planı



Şekil 4.11. Betonarme yapının zemin kat kalıp planı

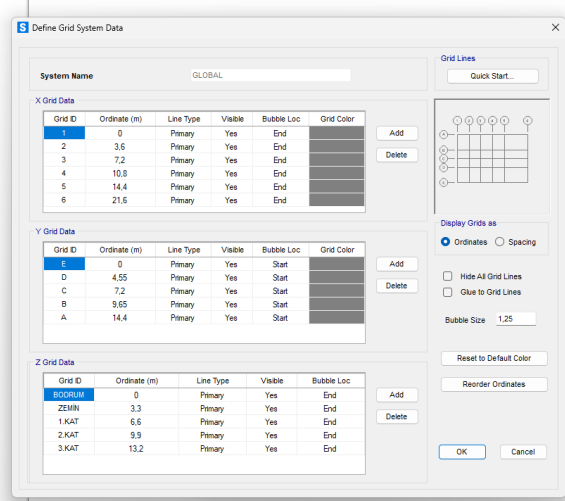
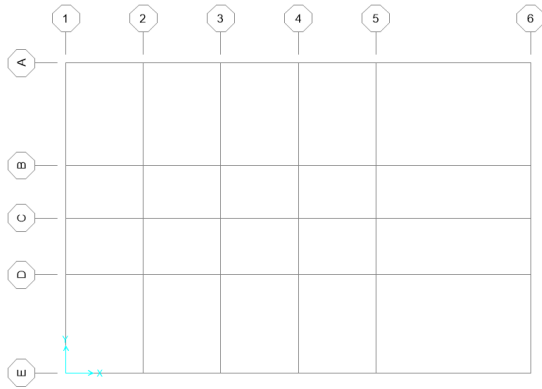


Şekil 4.12. Betonarme yapının 1-2 ve 3. normal kat kalıp planı

Betonarme yapının kirişlere etkiyen duvar yükleri ve döşeme yükleri Şekil 4.4'te verilen mimari rölöve planlarından yararlanılarak verilmiştir. Yapının üç boyutlu sonlu eleman modelinin oluşturulmasında modelleme aşamaları;

- ✓ Betonarme yapının akslarının oluşturulması,
- ✓ Malzeme özelliklerinin tanımlanması,
- ✓ Taşıyıcı elemanların kesitlerinin belirlenmesi,
- ✓ Malzeme özelliklerinin taşıyıcı eleman kesitlerine atanması,
- ✓ Taşıyıcı elemanların çizimlerinin kalıp planlarına uygun olarak gerçekleştirilmesi,
- ✓ Yapıya etkiyen sabit ve hareketli yüklerin tanımlanması (kiriş ve döşeme yükleri),
- ✓ Belirlenen yüklerin yapıya aktarılması,
- ✓ Yapının sonlu elemanlara bölünmesi,

şeklinde planlanmış ve bu plan doğrultusunda oluşturulmuştur. Yapının aksları programda yer alan "Grid Only" seçeneği ile oluşturulmuştur. Şekil 4.13'te yapının SAP2000 v23.0 programı ile oluşturulan aksları ve ölçüleri verilmiştir.



**Şekil 4.13.** Betonarme yapının SAP2000 yapısal analiz programında oluşturulan aksları

Betonarme yapının C11 betonu ile inşa edilmiş olduğu bilinmekte olduğundan programda beton sınıfı C11 olarak belirlenmiş ve C11 betonuna ait malzeme özellikleri kullanılmıştır. Donatı olarak ise programda tanımlı olan "Rebar" sınıfından yararlanılmıştır. Şekil 4.14 ve 4.15'te programa girilen malzeme özellikleri verilmiştir.

**S** Material Property Data

**General Data**

Material Name and Display Color: Rebar

Material Type: Rebar

Material Grade:

Material Notes: Modify/Show Notes...

**Weight and Mass**

Weight per Unit Volume: 0,

Mass per Unit Volume: 0,

**Units**: KN, m, C

**Uniaxial Property Data**

Modulus Of Elasticity, E: 2,000E+08

Poisson, U: 0,

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1,170E-05

Shear Modulus, G:

**Other Properties For Rebar Materials**

Minimum Yield Stress, Fy: 420000,

Minimum Tensile Stress, Fu: 500000,

Expected Yield Stress, Fye: 420000,

Expected Tensile Stress, Fue: 500000,

Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Şekil 4.14. Donatı özellikleri

**S** Material Property Data

**General Data**

Material Name and Display Color: C11

Material Type: Concrete

Material Grade: C11

Material Notes: Modify/Show Notes...

**Weight and Mass**

Weight per Unit Volume: 25,

Mass per Unit Volume: 2,5493

**Units**: KN, m, C

**Isotropic Property Data**

Modulus Of Elasticity, E: 27000000,

Poisson, U: 0,2

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1,000E-05

Shear Modulus, G: 11250000,

**Other Properties For Concrete Materials**

Specified Concrete Compressive Strength, Fc: 11000,

Expected Concrete Compressive Strength: 11000,

Lightweight Concrete

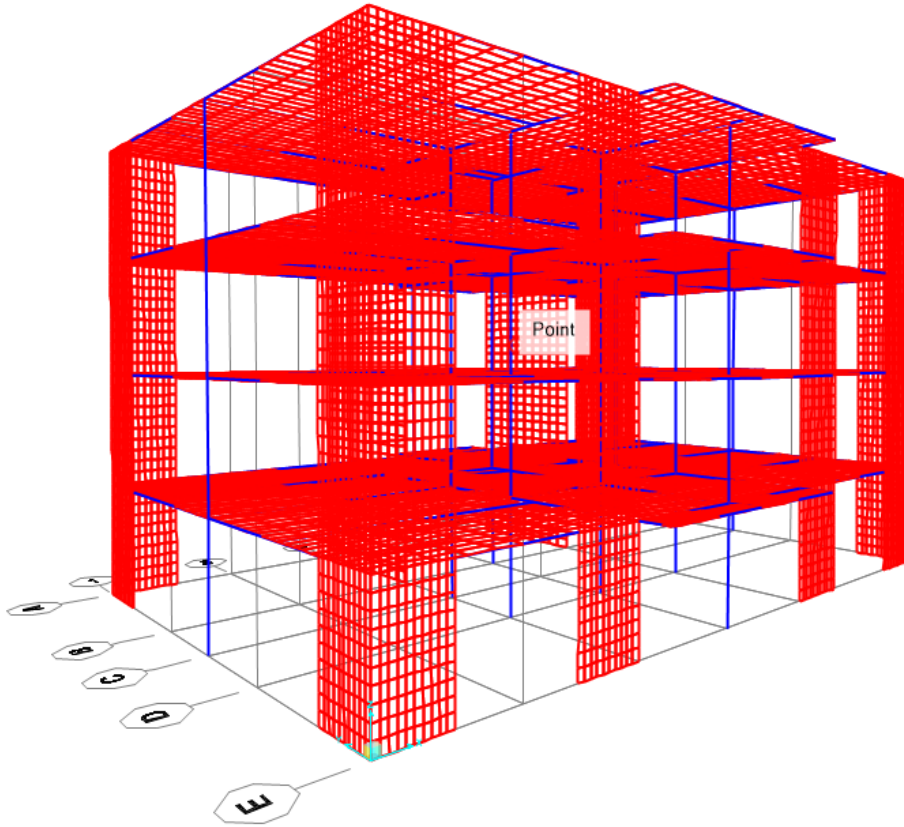
Shear Strength Reduction Factor:

Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Şekil 4.15. Beton malzeme özellikleri

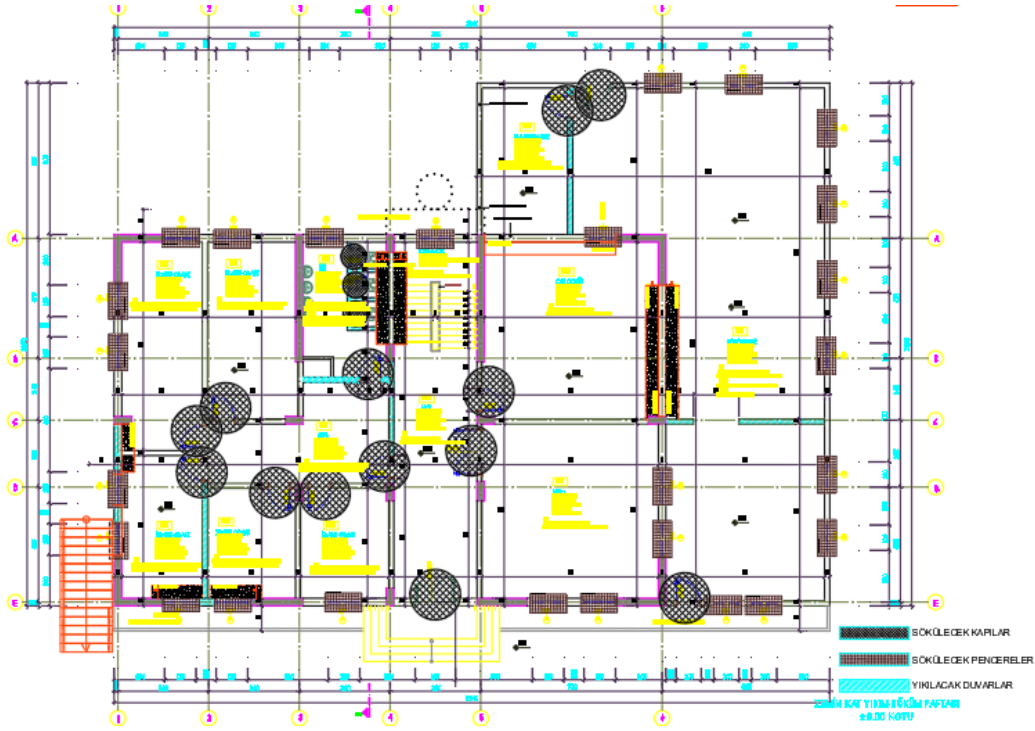
Malzeme özellikleri girilirken donatılı beton ağırlığı  $25 \text{ kN/m}^3$  olarak girilmiş ve bu yüzden donatı ağırlığı 0 olarak kabul edilmiştir. Taşıyıcı eleman kesitleri belirlenirken “Define” menüsü kullanılarak “Frame Sections” ve “Area Sections” seçenekleri ile kesit özellikleri tanımlanmıştır. Kiriş ve kolonlar “Frame Sections” seçeneği ile çubuk eleman olarak tanımlanırken perde ve döşemeler “Area Sections” seçeneği ile kabuk eleman olarak tanımlanmıştır. Betonarme yapının üç boyutlu sonlu eleman modeli toplamda 191 çubuk eleman ve 111 kabuk eleman kullanılarak oluşturulmuştur. Malzeme özellikleri oluşturulan taşıyıcı eleman kesitlerine atanmıştır. Dış duvar ve iç duvar yükleri, duvarlarının tuğla olduğu kabulü ile yönetmeliklerden alınan değerler doğrultusunda dış ve iç duvarlar yapıya kütle olarak aktarılmıştır. Betonarme yapının modellenmesi bu şekilde tamamlandıktan sonra “Edit” menüsünden “Edit Areas” seçeneğinde yer alan “Divide Areas” seçeneği seçilerek yapı 20 cm ara ile sonlu elemanlara bölünmüştür. Tüm bu işlemlerin tamamlanmasının ardından betonarme yapının, oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 4.16’da verilmiştir.



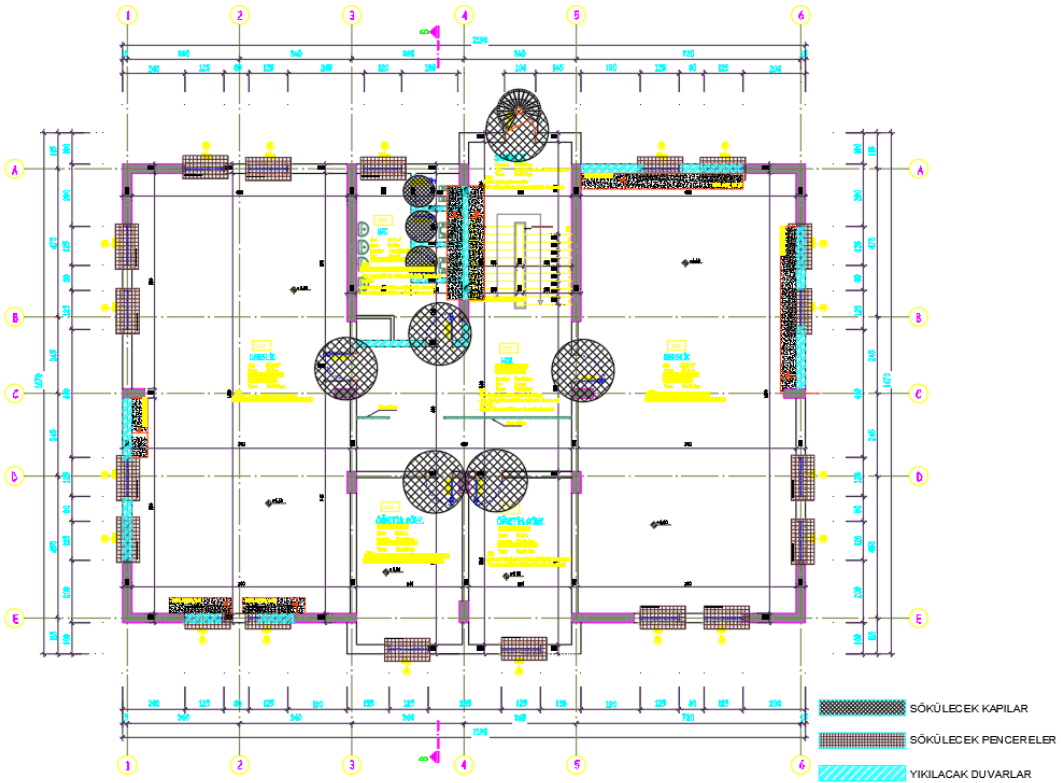
**Şekil 4.16.** Betonarme yapının üç boyutlu sonlu eleman modeli

Bu şekilde yapının güçlendirme hazırlığı öncesi ilk durumuna ait sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Sonraki aşamada aynı işlem adımları kullanılarak, yüklenici firmanın oluşturduğu güçlendirme projesinin uygulanma aşamasından önce yapılacak olan yıkım ve

söküm işlemleri doğrultusunda; yıkılması gereken duvarlar, yıkım-söküm projelerinden belirlenerek, söz konusu yıkılacak duvarların kütleleri yapı üzerinden kaldırılmıştır. Şekil 4.17 ve 4.18’de betonarme yapının güçlendirme öncesi yıkım ve söküm planları verilmiştir.



Şekil 4.17. Betonarme yapının zemin kat yıkım-söküm planı



Şekil 4.18. Betonarme yapının 1,2 ve 3. normal kat yıkım-söküm planı

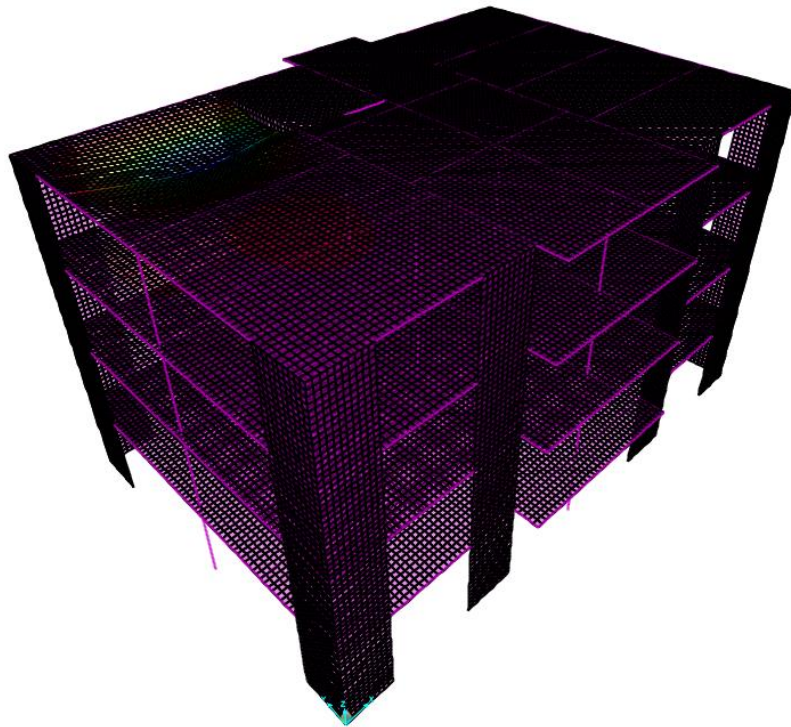
Bu projeler dikkate alınarak, yapının güçlendirme işlemi öncesi duvar yüklerinin bulunduğu ve yıkım-söküm işlemlerinden sonra duvar yüklerinin kaldırıldığı durumları iki farklı sonlu eleman modeli oluşturularak teorik analizleri yapılmıştır.

#### 4.2.2. Betonarme Yapının Güçlendirme Öncesi Teorik Modal Analizleri

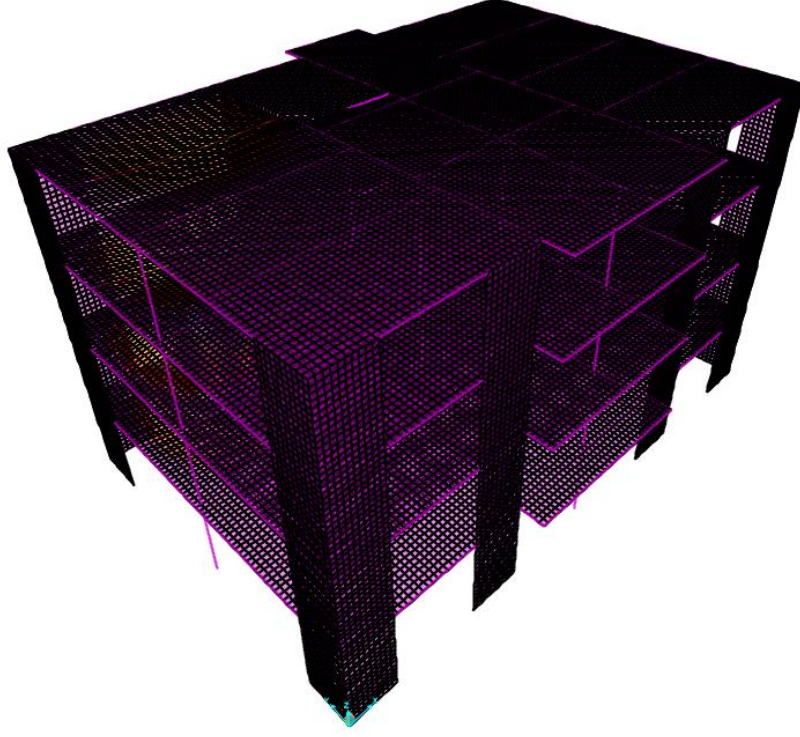
Betonarme yapının duvar yüklerinin olduğu ve duvar yüklerinin kaldırıldığı durumların teorik modal analizi SAP2000 programının v23.0 sürümü ile gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonucunda yapının duvar yüklerinin olduğu durumda Teorik Modal Analiz ile elde edilen dinamik karakteristikleri Tablo 4.1’de ve bu modlara karşılık gelen mod şekilleri Şekil 4.19 ve 4.20’de verilmiştir.

**Tablo 4.1.** Betonarme yapının yıkım-söküm işlemleri öncesi elde edilen teorik dinamik karakteristikleri

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Modal Davranış
1.	11,649	0,085	Düşey
2.	12,076	0,082	Düşey



**Şekil 4.19.** Betonarme yapının yıkım-söküm işlemleri öncesi 1.Mod şekli

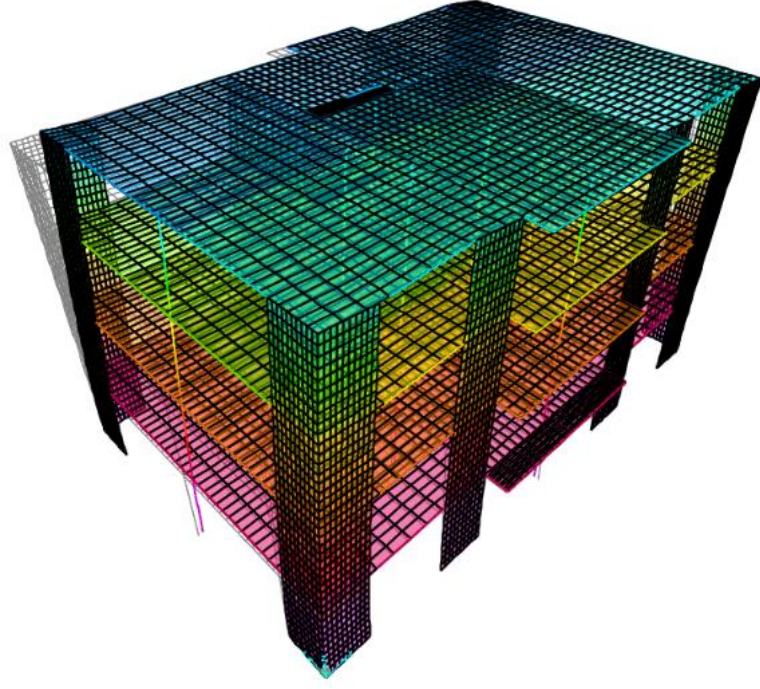


**Şekil 4.20.** Betonarme yapının yıkım-söküm işlemleri öncesi 2.Mod şekli

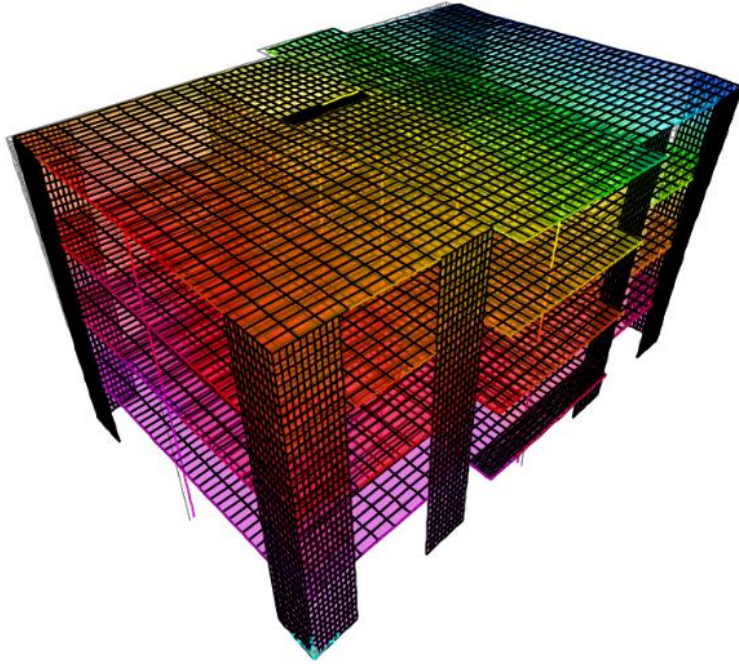
Betonarme yapının duvar yüklerinin kaldırıldığı durumda teorik modal analiz ile elde edilen dinamik karakteristikleri ise Tablo 4.2’de ve bu modlara karşılık gelen mod şekilleri Şekil 4.21 ve 4.22’de verilmiştir.

**Tablo 4.2.** Betonarme yapının yıkım-söküm işlemleri sonrası elde edilen teorik dinamik karakteristikleri

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Modal Davranış
1.	2,721	0,367	Yanal
2.	4,382	0,228	Boyuna



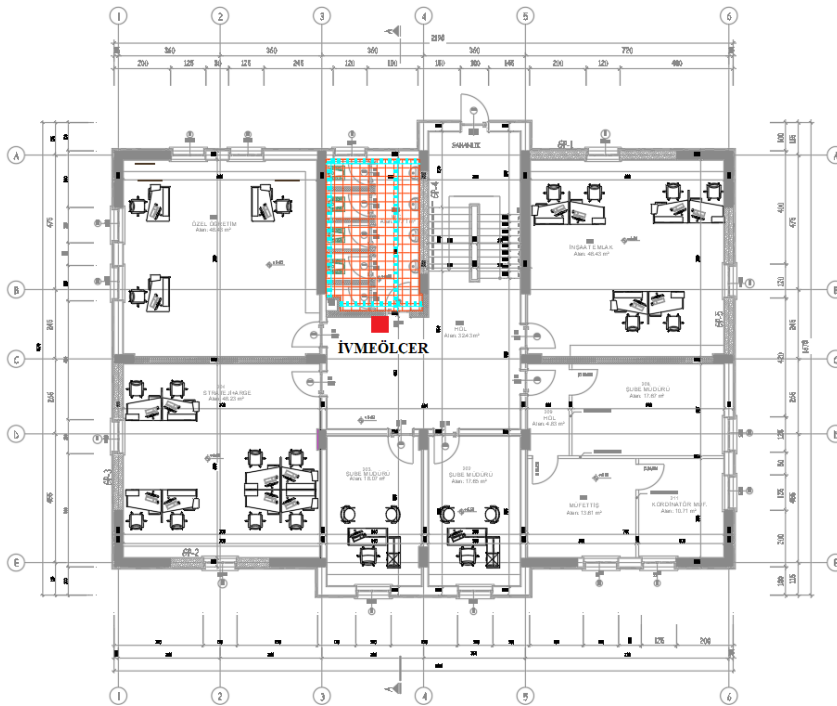
Şekil 4.21. Betonarme yapının yıkım-söküm işlemleri sonrası 1.Mod şekli



Şekil 4.22. Betonarme yapının yıkım-söküm işlemleri sonrası 2.Mod şekli

### 4.2.3. Betonarme Yapının Güçlendirme Öncesi Operasyonel Modal Analizi

Bu çalışmada bodrum+zemin+3 adet normal kattan oluşan betonarme yapının dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde deneysel yöntem olarak Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılmıştır. Yapının güçlendirme işlemi öncesinde, hem duvarların yıkılmamış olduğu ilk durumu hem de yıkım-söküm işlemlerinin tamamlanmasının ardından ikinci durumu için Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Bunun için yapıya ilk olarak ivmeölçerler Şekil 4.23'te mimari plan üzerinde gösterildiği şekilde yerleştirilmiş ve yerleştirilen ivmeölçerler Şekil 4.24'te gösterildiği şekilde sabitlenmiştir. Ölçümler yapılırken zemin kat, 1.kat ve 2.kat'a ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Daha sonra 1.kattaki ivmeölçer üçüncü kata çıkarılmıştır. Bodrum kat haricindeki tüm katlarda, X, Y ve Z yönlerinde iki ölçüm yapılmıştır. Bu şekilde tüm katların ölçümleri tamamlanmıştır. Betonarme binadan Operasyonel Modal Analiz ile toplanan verilerin örnekleme frekansı 0-200 Hz aralığındadır. Ölçüm süresince ivmeölçerlerden elde edilen ham sinyaller ve Şekil 4.25'te verilen 16 kanallı TESTBOX2010 serisine ait veri toplama ünitesinde birleştirilen sinyaller bilgisayarda işlenmek üzere TESTLABNETWORK yazılımına aktarılmıştır. Sinyaller işlendikten sonra elde edilen titreşim verileri ARTEMIS yazılımında analiz edilerek betonarme binaya ait dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Aynı işlemler yıkım-söküm işlemlerinin tamamlanmasının ardından yenilenmiş ve yapının yıkım-söküm işlemleri sonrası dinamik karakteristikleri de Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle elde edilmiştir.



Şekil 4.23. İvmeölçerlerin tüm katlarda konulduğu bölge



Şekil 4.24. Sabitlenmiş ivmeölçerin görseli



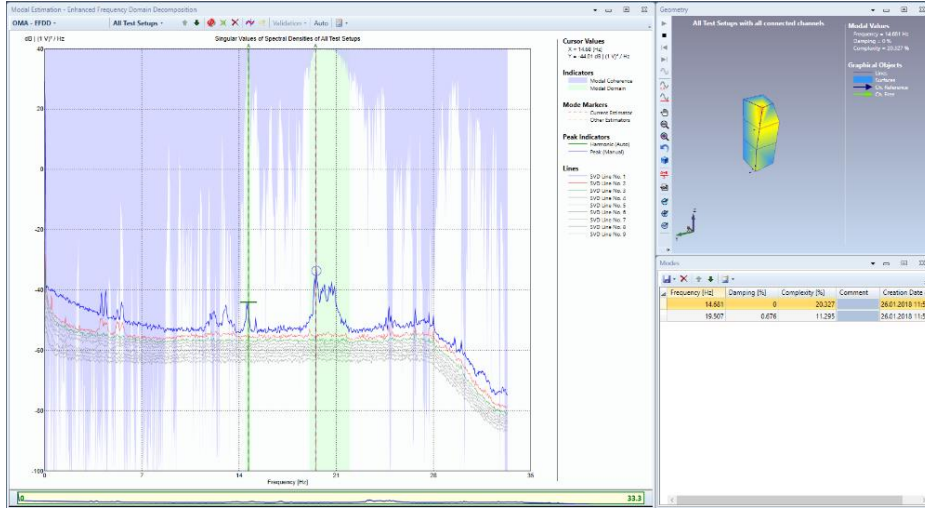
Şekil 4.25. Veri toplama ünitesi

#### 4.2.4. Betonarme Yapının Güçlendirme Öncesi Deneysel Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

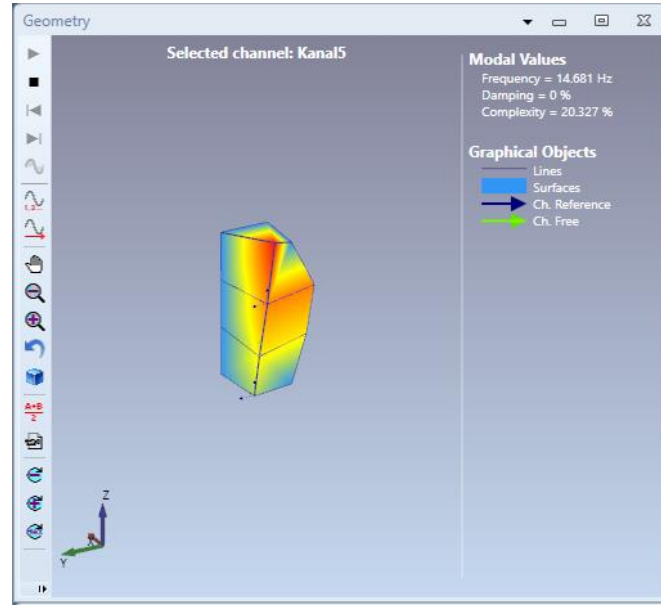
Ölçüm ve sinyal işleme işlemlerinin tamamlanmasının ardından betonarme yapının yıkım-söküm işlemleri öncesi ve sonrası durumlarına ait dinamik karakteristikleri deneysel olarak elde edilmiştir. Yıkım-söküm işlemi öncesi betonarme yapının Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile elde edilen dinamik karakteristikleri Tablo 4.3'te ve ölçüm sonuçlarının görseli Şekil 4.26'da verilmiştir. Betonarme yapının ilk ölçüme göre elde edilen mod şekli ise Şekil 4.27'de verilmiştir.

**Tablo 4.3.** Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi öncesi Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle elde edilen dinamik karakteristikleri

Frekans (Hz)	Periyot (s)	Sönüm Oranı (%)
14,861	0,067	0
19,507	0,00005	0,676



**Şekil 4.26.** Betonarme yapıda yıkım-söküm işlemi öncesinde yapılan Operasyonel Modal Analiz Yönteminde sinyal işleme sonrası ölçüm sonuçları

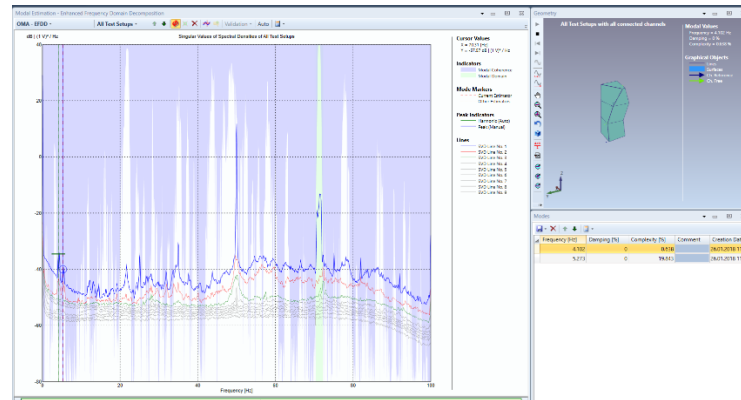


**Şekil 4.27.** Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi öncesi Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle elde edilen mod şekli

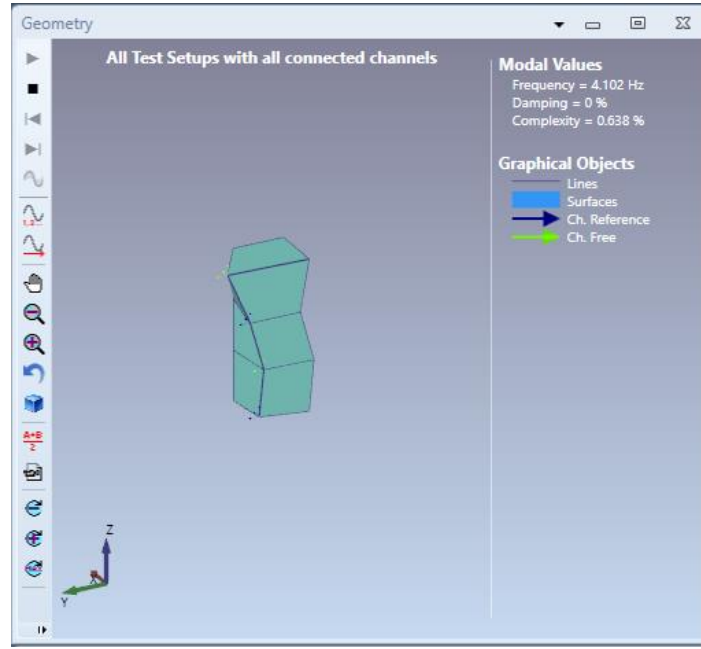
Yıkım-söküm işlemi sonrası betonarme yapının Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile elde edilen dinamik karakteristikleri Tablo 4.4'te ve ölçüm sonuçlarının görseli Şekil 4.28'de verilmiştir. Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi sonrası yapılan ölçüme göre elde edilen mod şekli ise Şekil 4.29'da verilmiştir.

**Tablo 4.4.** Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi sonrası Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle elde edilen dinamik karakteristikleri

Frekans (Hz)	Periyot (s)	Sönüm Oranı (%)
4,102	0,243	0
5,273	0,189	0



**Şekil 4.28.** Betonarme yapıda yıkım-söküm işlemi sonrası yapılan Operasyonel Modal Analiz Yönteminde sinyal işleme sonrası ölçüm sonuçları



**Şekil 4.29.** Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi sonrası Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle elde edilen mod şekli

#### 4.2.5. Betonarme Yapının Güçlendirme Öncesi Deneysel ve Teorik Olarak Elde Edilen Dinamik Karakteristiklerinin Karşılaştırılması

Betonarme yapının teorik yöntem ile deneysel yöntemden elde edilen dinamik karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre; yıkım-söküm işlemleri öncesinde betonarme yapının teorik olarak elde edilen dinamik karakteristikleri ve deneysel yöntem ile elde edilen dinamik karakteristikleri karşılaştırıldığında, deneysel yöntemden elde edilen dinamik karakteristiklerin SAP2000 programı ile teorik olarak elde edilen dinamik karakteristiklerde 2.mod şekline yakınsadığı görülmektedir. Buna göre Tablo 4.5'te yıkım-söküm işlemi öncesi betonarme yapının deneysel ve teorik yöntem ile elde edilen dinamik karakteristikleri verilmektedir.

**Tablo 4.5.** Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi öncesi Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle elde edilen dinamik karakteristiklerin teorik analiz yöntemi ile elde edilen dinamik karakteristikler ile karşılaştırılması

Teorik Analiz		
Frekans (Hz)	Periyot (s)	Sönüm Oranı (%)
12,076	0,082	0
Operasyonel Modal Analiz		
Frekans (Hz)	Periyot (s)	Sönüm Oranı (%)
14,861	0,067	0

Bu değerler incelendiğinde SAP2000 programında 2.mod şekline karşılık gelen frekans değerinin Operasyonel Modal Analiz yöntemi ile elde edilen frekans değerine yakınsadığı görülmektedir. Ancak neredeyse %18.73'lük bir fark söz konusudur. Teorik Analiz Yöntemiyle elde edilen mod şekli ile, deneysel yöntemden elde edilen mod şekli kıyaslandığında mod şekillerinin uyduğu görülmektedir. Her iki yöntem arasındaki farkın %10'dan fazla olması göz önüne alındığında Sonlu Eleman Modelinin tam anlamıyla yapının gerçek davranışını yansıtmadığı görülmektedir. Bu nedenle Sonlu Eleman Modelinin, yapının gerçek davranışını yansıtacak şekilde iyileştirilmesi gerekmektedir.

Betonarme yapının yıkım-söküm işlemleri sonrasında teorik ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikleri karşılaştırıldığında buradaki yakınsamanın daha fazla olduğu görülmektedir. Tablo 4.6'da her iki yöntemden elde edilen dinamik karakteristiklerin karşılaştırılması verilmiştir. Deneysel yöntemden elde edilen dinamik karakteristikler ve mod şekli SAP2000 programındaki 2.mod şekline karşılık gelmektedir. Dinamik karakteristikler arasında yaklaşık olarak %6.38'lik bir fark söz konusudur. Bu farkın %10'dan küçük olması göz önüne alındığında yapının sonlu eleman modelinin doğru olarak modellendiği ve yapının gerçek davranışını yansıttığı sonucuna varılmaktadır.

**Tablo 4.6.** Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi sonrası Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle elde edilen dinamik karakteristiklerin teorik analiz yöntemi ile elde edilen dinamik karakteristikler ile karşılaştırılması

Teorik Analiz		
Frekans (Hz)	Periyot (s)	Sönüm Oranı (%)
4,382	0,228	0
Operasyonel Modal Analiz		
Frekans (Hz)	Periyot (s)	Sönüm Oranı (%)
4,102	0,243	0

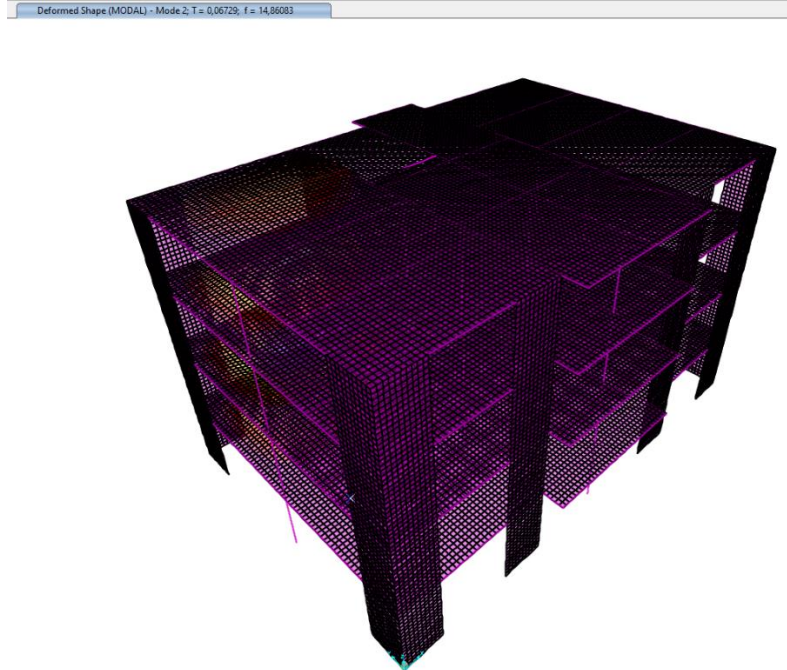
#### 4.2.6. Betonarme Yapının Sonlu Eleman Modellerinin İyileştirilmesi

Deneysel yöntemden elde edilen dinamik karakteristikler ile teorik yöntemden elde edilen dinamik karakteristikler karşılaştırıldığında, betonarme binanın yıkım-söküm işlemleri öncesi elde edilen dinamik karakteristiklerinde %18.73'lük bir fark gözlemlenmektedir. Ancak yıkım-söküm işlemi sonrasında elde edilen dinamik karakteristikler karşılaştırıldığında bu farkın %6.38'e düştüğü gözlemlenmiştir. Yıkım-söküm işlemleri sonrasında elde edilen değerler göz önüne alındığında; yapının yapı-zemin etkileşiminden çok fazla etkilenmediği, yapının betonunun homojen özellikte olduğu ve yapıda herhangi bir taşıyıcı eleman hasarı, yapı elemanlarında çatlak vb. problem yaratacak herhangi bir durum olmadığı sonucuna

varılmıştır. Her iki durumda da mod şekillerinin uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada sonlu eleman iyileştirme yöntemi olarak Elastisite Modülü kullanılmıştır. Malzemelerin Elastisite Modülü deneme yanılma yöntemi ile değiştirilmiş ve yapının sonlu eleman modeli gerçeğine en uygun hale getirilmiştir. Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi öncesi C11 betonunun 27 GPa olan elastisite modülü 42.77 GPa olarak güncellenerek elde edilen yeni dinamik karakteristiklerin neredeyse %100 uyumlu olduğu, aralarındaki farkın %0.0014'e düştüğü görülmektedir. Tablo 4.7'de iyileştirme sonrası elde edilen teorik dinamik karakteristikler ile Operasyonel Modal Analiz Yönteminden elde edilen dinamik karakteristiklerin karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 4.30'da sonlu eleman modeli iyileştirilen, yıkım-söküm işlemi öncesi betonarme yapının 2.mod şekli verilmiştir.

**Tablo 4.7.** Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi öncesi Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle elde edilen dinamik karakteristiklerin iyileştirilmiş sonlu eleman modelinden teorik analiz yöntemi ile elde edilen dinamik karakteristikler ile karşılaştırılması

Teorik Analiz		
Frekans (Hz)	Periyot (s)	Sönüm Oranı (%)
14,8608	0,067	0
Operasyonel Modal Analiz		
Frekans (Hz)	Periyot (s)	Sönüm Oranı (%)
14,8610	0,067	0



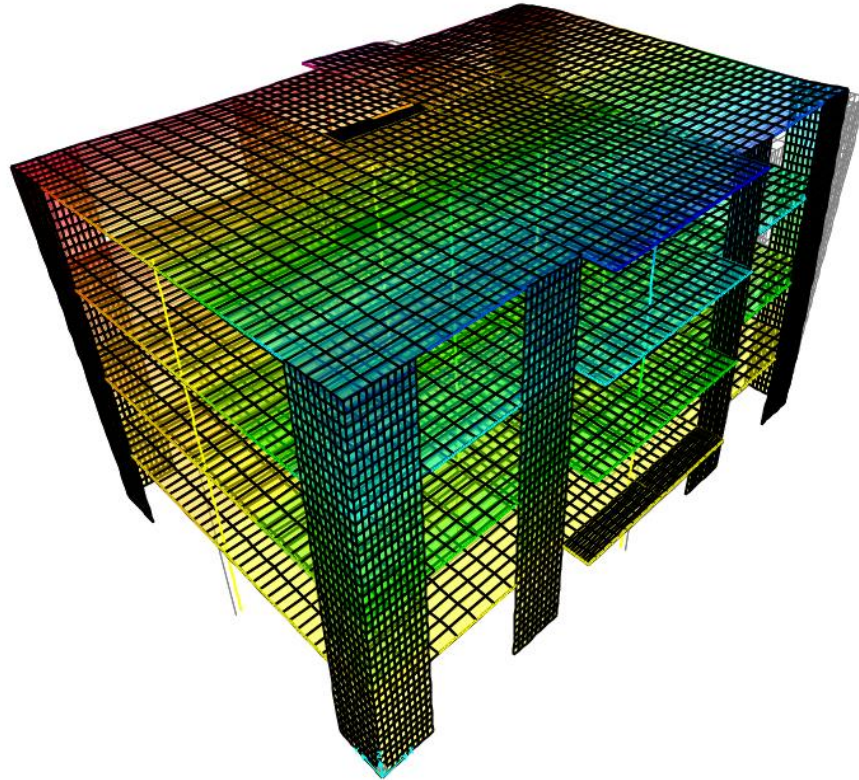
**Şekil 4.30.** Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi öncesi deneysel yöntem sonuçlarına göre iyileştirilmiş sonlu eleman modeli ve 2.mod şekli

Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi sonrası C11 betonunun 27 GPa olan elastisite modülü 23.655 GPa olarak güncellenerek elde edilen yeni dinamik karakteristiklerin neredeyse %100 uyumlu olduğu görülmektedir. Tablo 4.8’de iyileştirme sonrası elde edilen teorik dinamik karakteristikler ile Operasyonel Modal Analiz Yönteminden elde edilen dinamik karakteristiklerin karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 4.31’de sonlu eleman modeli iyileştirilen, yıkım-söküm işlemi sonrası betonarme yapının 2.mod şekli verilmiştir.

**Tablo 4.8.** Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi sonrası Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle elde edilen dinamik karakteristiklerin iyileştirilmiş sonlu eleman modelinden Teorik Analiz Yöntemi ile elde edilen dinamik karakteristikler ile karşılaştırılması

Teorik Analiz		
Frekans (Hz)	Periyot (s)	Sönüm Oranı (%)
4,102	0,243	0
Operasyonel Modal Analiz		
Frekans (Hz)	Periyot (s)	Sönüm Oranı (%)
4,102	0,243	0

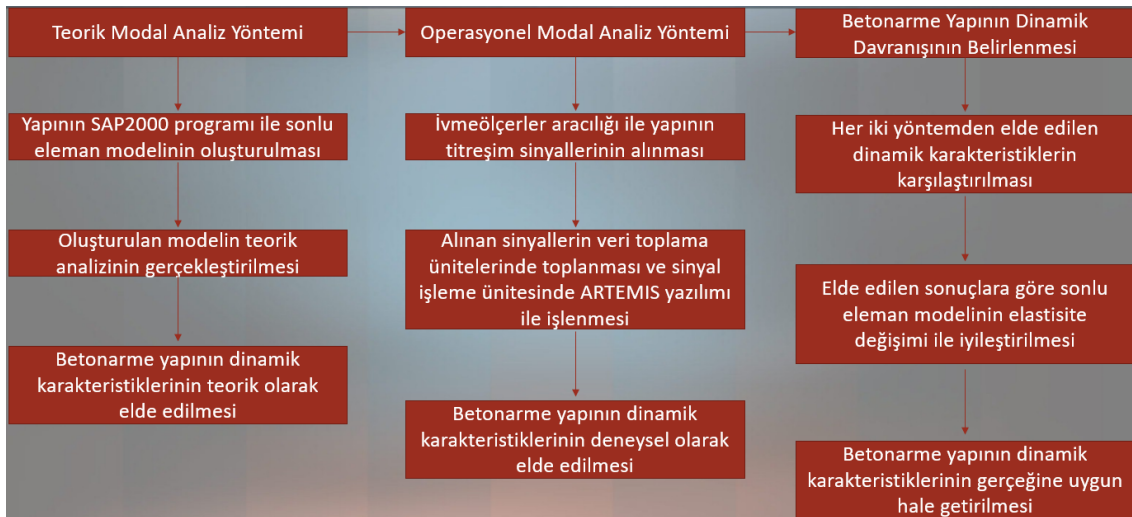
Deformed Shape (MODAL) - Mode 2; T = 0,24377; f = 4,1023



**Şekil 4.31.** Betonarme yapının yıkım-söküm işlemi sonrası deneysel yöntem sonuçlarına göre iyileştirilmiş sonlu eleman modeli ve 2.mod şekli

## 5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında güçlendirme işlemi yapılacak betonarme yapının güçlendirme öncesi; ilk olarak duvarların yıkım-söküm işlemleri öncesi 3 boyutlu sonlu eleman modelleri SAP2000 yapısal analiz programı ile oluşturulmuştur. Oluşturulan sonlu eleman modeli üzerinde yine aynı program aracılığı ile teorik modal analiz gerçekleştirilerek yapının dinamik karakteristikleri teorik olarak elde edilmiştir. Deneysel yöntem olarak Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılmış ve yapının dinamik karakteristikleri deneysel olarak elde edildikten sonra sonlu eleman modeli deneysel yöntemden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Gözlemlenen farklar doğrultusunda yapının ilk durumu için sonlu eleman modeli Elastisite Modülü değişimi yöntemi ile iyileştirilerek gerçeğine yakın hale getirilmiştir. Daha sonra betonarme yapının güçlendirme işlemi öncesi duvarların yıkım-söküm işlemleri sonrası yeniden sonlu eleman modeli aynı program ile oluşturulmuş ve duvar yükleri kaldırıldıktan sonra yeniden teorik modal analizi program aracılığı ile yapılarak dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Betonarme yapı üzerinde yıkım-söküm işlemleri sonrası Operasyonel Modal Analiz Yöntemi uygulanarak yeniden dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar ile teorik analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Gözlemlenen farklılıklar doğrultusunda sonlu eleman modeli yine Elastisite Modülü değişimi yapılarak iyileştirilmiştir. İyileştirilen sonlu eleman modeli gerçek dinamik davranışı temsil edecek en uyumlu hale getirilmiştir. Şekil 5.1’de çalışmada gerçekleşen analiz aşamaları ve işlem adımları sırası verilmektedir.



**Şekil 5.1.** Çalışma kapsamında gerçekleştirilen analiz aşamaları ve işlem adımları

Bu aşamalar sırasında gözlemlenen en önemli unsurlardan biri; teorik analiz yöntemi ile deneysel analiz yöntemi sonuçları karşılaştırılırken duvarların yıkım-söküm işlemi sonrasında elde edilen verilerin birbirleri ile daha uyumlu olduğu yönündedir. Bunun nedeni

yıkım-söküm işlemi öncesinde var olan duvarların yapıya kütle olarak etki ettirilmesidir. Sonlu eleman iyileştirmesinin ardından elde edilen teorik dinamik karakteristikler ile deneysel dinamik karakteristiklerin ve mod şekillerinin uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 5.2’de Teorik Modal Analiz Yöntemi, Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ve Sonlu Eleman İyileştirme Yöntemi uygulanarak elde edilmiş olan tüm sonuçlar verilmektedir.

SONLU ELEMAN MODELİ İYİLEŞTİRME İŞLEMİ ÖNCESİ						
TEORİK MODAL ANALİZ YÖNTEMİ				OPERASYONEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİ		
Betonarme Yapının Yıkım-Söküm İşlemleri Öncesi Elde Edilen Teorik Dinamik Karakteristikleri				Betonarme Yapının Yıkım-Söküm İşlemleri Öncesi Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Elde Edilen Dinamik Karakteristikleri		
Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Modal Davranış	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Sönüm Oranı (%)
1.	11,649	0,085	Düsey	14,861	0,067	0
2.	12,076	0,082	Düsey	19,507	0,00005	0,676
Betonarme Yapının Yıkım-Söküm İşlemleri Sonrası Elde Edilen Teorik Dinamik Karakteristikleri				Betonarme Yapının Yıkım-Söküm İşlemleri Sonrası Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Elde Edilen Dinamik Karakteristikleri		
Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Modal Davranış	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Sönüm Oranı (%)
1.	2,721	0,367	Yanal	4,102	0,243	0
2.	4,382	0,228	Boyuna	5,273	0,189	0
SONLU ELEMAN MODELİ İYİLEŞTİRME İŞLEMİ SONRASI						
TEORİK MODAL ANALİZ YÖNTEMİ				OPERASYONEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİ		
Betonarme Yapının Yıkım-Söküm İşlemleri Öncesi Elde Edilen Teorik Dinamik Karakteristikleri				Betonarme Yapının Yıkım-Söküm İşlemleri Öncesi Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Elde Edilen Dinamik Karakteristikleri		
Frekans (Hz)	Periyot (s)	Sönüm Oranı (%)		Frekans (Hz)	Periyot (s)	Sönüm Oranı (%)
14,8608	0,067	0		14,861	0,067	0
Betonarme Yapının Yıkım-Söküm İşlemleri Sonrası Elde Edilen Teorik Dinamik Karakteristikleri				Betonarme Yapının Yıkım-Söküm İşlemleri Sonrası Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Elde Edilen Dinamik Karakteristikleri		
Frekans (Hz)	Periyot (s)	Sönüm Oranı (%)		Frekans (Hz)	Periyot (s)	Sönüm Oranı (%)
4,102	0,243	0		4,102	0,243	0

**Şekil 5.2.** Analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Analiz sonuçları karşılaştırıldığında duvarların yıkım-söküm işlemleri öncesinde Teorik Modal Analiz Yönteminden elde edilen sonuçlar ile Operasyonel Modal Analiz Yönteminden elde edilen sonuçlar arasında yaklaşık olarak %18.3’lük bir fark gözlemlenmektedir. Gözlemlenen bu farkın en önemli nedenlerinden biri duvarların yapıya kütle olarak etki ettirilmesi ve bu nedenle rijitliklerinin hesaba katılmamış olmasından kaynaklanmaktadır. Farkın %10’dan büyük olması yapının Sonlu Eleman Modelinin gerçek davranışı tam anlamıyla yansıtmadığı ve bu nedenle iyileştirmesi gerektiği sonucunu doğurmuştur. İyileştirilen Sonlu Eleman Modeli sonrasında her iki yöntemden elde edilen sonuçlar yeniden karşılaştırıldığında iyileştirilmiş Sonlu Eleman Modelinin yapının çalışır vaziyetteki davranışını temsil ettiği görülmektedir. Duvarların yıkım-söküm işlemleri sonrasında analiz sonuçları incelendiğinde iyileştirme yapılmadan önce sonuçlar arasındaki farkın %6.38’e düştüğü görülmektedir. Aradaki farkın %10’dan düşük olması göz önüne alındığında Sonlu Eleman Modelinin iyileştirme işlemi öncesinde dahi yapının çalışır vaziyetteki durumunu yansıttığı ve modelleme işleminin doğru yapıldığı sonucuna varılabilir. Ayrıca Teorik Modal Analiz sonuçları ile Operasyonel Modal Analiz Yöntemi sonuçları arasındaki bu farkın az olması;

- ✓ Yapının yapı-zemin etkileşiminden çok fazla etkilenmediğini,
- ✓ Yapının betonunun homojen olduğunu,

- ✓ Yapıda herhangi bir taşıyıcı eleman hasarı, çatlak veya herhangi bir taşıyıcı eleman problemi olmadığını,
- ✓ Yapı malzemelerinde yorulma olmadığını göstermektedir.

Çalışmada deneysel yöntem olarak Operasyonel Modal Analiz Yöntemi seçilmiştir. Bunun başlıca nedeni uygulanabilirliğinin kolay olması ve zaman tasarrufu sağlamasıdır. Ayrıca bu yöntemde yapı; ölçüm sırasında servisten mahrum edilmediğinden günlük hayatta uzun süreli aksamalara da neden olmamıştır. Ek olarak, diğer deneysel yöntem ile kıyaslandığında sarsıcı vb. ekipmanlar kullanılmadığından ve bu ekipmanların maliyetlerinin yüksek olması açısından bakıldığında; daha ekonomik bir ölçüm olanağı verdiği de söylenebilir. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi sırasında yapıya bilinen tahrik kuvvetleri uygulanması gerekmediğinden, bu tahrik kuvvetlerinin yapıda potansiyel hasar bırakabileceği gibi durumların da önüne geçilmiştir. Operasyonel Modal Analiz Yönteminin güçlendirme işlemi yapılan betonarme yapılar üzerinde uygulanabilir bir ölçüm sistemi olduğu da anlaşılmıştır. Ölçüm süresi bakımından ele alındığında Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ölçümleri genel olarak 30-60 dakika aralığında sürmektedir. Bu da yöntemin avantajları arasında yer almakta ve uygulanabilirliğini arttırmaktadır.

Çalışma sonuçları genel olarak aşağıdaki gibi maddeler halinde sıralanabilir:

- ✓ Operasyonel Modal Analiz Yöntemi hem uygulanabilirliği açısından hem de ekonomik açıdan oldukça elverişli bir yöntemdir.
- ✓ Operasyonel Modal Analiz Yönteminde yapılan; başlangıç ve sınır şartlarının sabit olduğu, malzeme özelliklerinin değişmediği vb. kabuller, analiz işlemleri sırasında yadsınmamalı ve göz önüne alınmalıdır.
- ✓ Operasyonel Modal Analiz Yönteminin uygulanması sırasında yapılar hizmete uzun süre kapatılmadığından servis süresinde bir negatif durum olmamakta ve günlük hayatta aksamalara neden olmamaktadır. Bu nedenle rahatlıkla her yapıda, özellikle karayolu vb. günlük hayatta kapatılmaması gereken yapı türlerinde de rahatlıkla kullanılabilir bir yöntemdir. Ancak yine de ek bir öneri olarak; Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile ölçüm sırasında yapının servise kapatılması günlük hayatta aksamalara neden olmuyorsa, ölçüm hassasiyeti açısından yapının serviste olmadığı esnada ölçüm yapılması sonuçların hassasiyetini olumlu yönde etkileyebilir.

- ✓ Operasyonel Modal Analiz Yöntemi öncesinde oluşturulan sonlu eleman modelleri ile elde edilen dinamik karakteristikler deneysel yöntemden elde edilen dinamik karakteristikler ile karşılaştırılmalı ve iyice incelenerek sonlu eleman iyileştirmeleri uygun iyileştirme yöntemi seçilerek yapılmalıdır.
- ✓ Teorik analizler sırasında kullanılan yapısal analiz programlarının yön tahlilleri ve teorik analiz sırasında yaptığı kabuller analiz öncesinde detaylı olarak araştırılmalıdır.
- ✓ Operasyonel Modal Analiz Yönteminden elde edilen dinamik karakteristikler ile teorik analiz yönteminden elde edilen dinamik karakteristikler arasında belirli bir oranda fark oluşabileceği ve bu farkın en temel sebepleri arasında ise Operasyonel Modal Analiz Yönteminin çevresel etkileri (örneğin gürültü) baz aldığı olabileceği unutulmamalıdır. Sinyal işleme işlemleri her ne kadar titizlik ile yapılsa da bu tür etkilerin sonuçlar da farklılıklar oluşturabileceği unutulmamalıdır. Ayrıca yapının projelerine göre modellenen sonlu eleman modelleri ile yapının inşası sırasında meydana gelebilecek farklılıklar, aksaklıklar veya işçilik hataları vb. etkenlerin de sonuçlar da farklılıklar oluşturabileceği bilinmelidir.
- ✓ Çalışma sonucunda ve literatüre bakıldığında; Operasyonel Modal Analiz Yönteminin betonarme yapılarda daha etkili sonuçlar verdiği görülmektedir. Çok kompleks olmayan yapılarda yapılan ölçümlerin güvenilir sonuçlar verdiği çalışma sonucunda da açıkça görülmüştür.
- ✓ Güçlendirme işlemi yapılacak betonarme yapılarda güçlendirme işlemi öncesi ve sonrası farkların tespit edilebilmesi ve daha doğru sonuçlara ulaşılabilmesi için her iki durum için ve bu uygulamalar arasında yapıda meydana gelen değişiklikler (örneğin bu çalışma bazında duvarların yıkım-söküm işlemleri için de analiz yapılmıştır) detaylı olarak analiz edilmeli ve sonuçlar bu şekilde karşılaştırılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Agneni, A., Crema, L. B., & Coppotelli, G.** (2010). Output-only analysis of structures with closely spaced poles. *Mechanical systems and signal processing*, 24(5), 1240-1249.
- Akbaş, T.** (2020). *İki Betonarme Binada Bağ Kirişleri Etkisinin Operasyonel Modal Analiz ve Sonlu Eleman Yöntemleriyle Belirlenmesi*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Marmara Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Alpaslan, E.** (2019). *Tarihi Yığma Köprü Hasarlarının Analitik Model ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi*. (Yayınlanmış Doktora Tezi). Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Altıok, T.Y.** (2019). *Tarihi Minarelerin Dinamik Özelliklerinin Deneysel ve Nümerik Yöntemler ile Araştırılması*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Anderson, J. C., & Naeim, F.** (2012). *Basic Structural Dynamics*. John Wiley & Sons.
- Aslay, S.E.** (2017). *Erzincan Değirmenliköy Kilisesi'nin 1939 Erzincan Depremi Davranışının Apsis Hasarı Üzerinden İncelenmesi*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Aydın, H.** (2021). *Çelik Köprülerde Diyagonal Elemanların Dinamik Parametrelere Etkisinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile Belirlenmesi*. (Yayınlanmış Doktora Tezi). Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Samsun.
- Baştürk, M.H.** (2013). *Bursa Tarihi Yığma Minarelerinin Dinamik Davranışlarının Modal Analiz Yöntemi ile İncelenmesi*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Bayraktar A. vd.,** (2007). Düzlem Kafes Taşıyıcı Sistemlerin Operasyonel Modal Analizi, *Çelik Yapılar Ulusal Sempozyumu*, 6.Oturum, Kongre Sempozyum Bildiriler Kitabı, (ss. 273-337), Trabzon, Türkiye.
- Benedettini, F. vd.,** (2005, April). Arch bridges in Provincia di Teramo: tests, identification and numerical models. In *1st International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC)* (pp. 225-236).
- Bergua, P. vd.,** (2013). *Modal scaling of beam structures by operational and classical modal analysis*. In *5th International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC 2013* (pp. 1-10).

- Beyen, K., & Kutanis, M.** (2011, May). Comparison of the Results Inferred from OMA and IEMA. In 4th international operational modal analysis conference (pp. 9-11).
- Birinci, F.** (2010). *Taş Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Boru, E.** (2015). *Yapı Tanı Teknikleri ile Sonlu Eleman Modelleri Güncellenmiş Binaların Deprem Performans Analizi*. (Yayınlanmış Doktora Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Bulgur, M.** (2018). *Tarihi Binalarda Titreşim Ölçümü ve Tarihi Binaların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul,
- Büke, F.** (2006). An Investigation On The Application Of Operational Modal Analysis (Master's thesis, Middle East Technical University).
- Cappellini, A. M. C. vd.,** (2011). Operational modal Analysis of the “Guglia Maggiore” of the “Duomo” in Milano. In *4th International Operational Modal Analysis Conference IOMAC 2011* (pp. 1-8).
- Cara, J., Magdaleno, A., & Lorenzana, A.** (2017). Input/output versus output only modal analysis of a stress-ribbon footbridge. In *IOMAC 2017–7th International Operational Modal Analysis Conference*.
- Chang, Y. H.** (2019). *Compression of Full-field Data for Operational Modal Analysis based on Shape Descriptors and Compressed Sensing*. The University of Liverpool (United Kingdom).
- Chia, W. L.** (2007). *Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Blind System Identification For Operational Modal Analysis Using The Mean Differential Cepstrum (MDC)* (Doctoral dissertation, PhD thesis, University of New South Wales, Sydney, Australia).
- Chopra, A. K.** (2007). *Dynamics of Structures*. Pearson Education India.
- Cunha, Á., & Caetano, E.** (2005). From input-output to output-only modal identification of civil engineering structures. In *1st International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC)*.

- Dabanlı, Ö.** (2017). Operational Modal Analysis of Nur-u Osmaniye Mosque in İstanbul. In *7th International Operational Modal Analysis Conference*. (pp. 261-264).
- Demirtaş, B.** (2014). *Çok Katlı Betonarme Binaların Deneysel Dinamik Karakteristiklerinin ve Yakın Fay Yer Hareketi Etkisindeki İzolatörlü Davranışlarının Belirlenmesi*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Desjardins, S. L.** (2019). *Structural health assessment of bridges by long-term vibration monitoring and automated operational modal analysis* (Doctoral dissertation, Carleton University).
- Ercan, E. vd.,** (2017). Finite Element Model Updating Of A Historical Minaret Via Operational Modal Analysis. In *7th International Operational Modal Analysis Conference*. (pp. 142-145).
- Erkek, H.** (2021). *Yığma Yapıların Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Deprem Davranışının İncelenmesi: Adana Büyük Saat Kulesi Örneği*. (Yayınlanmış Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Erol, O.** (2017). *39+646 Çelik Demiryolu Köprüsünün Sonlu Eleman Modelinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Fanning, P. vd.,** (2007). Sean O'casey Bridge: Comparison Of Operational & Traditional Modal Analysis Test Results. In *Proceedings of the 2nd International Operational Modal Analysis Conference*. Copenhagen, Denmark (pp. 293-298).
- Flesch, R. G. vd.,** (2004). Dynamic in-situ Measurements, FE-Modelling and Model-Updating–Innovative Tools in Civil Engineering. In *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference*, Copenhagen, Denmark (pp. 93-104).
- Foti, D. vd.,** (2011, May). Output-only structural identification of the Engineering Faculty Edifice A at L'Aquila. In *Conference Proceeding of the 4th International Operational Modal Analysis Conference IOMAC 2011* (pp. 9-11).
- Friis, T. vd.,** (2019). Operational modal analysis based linear system identification of systems with elasto-perfectly-plastic nonlinear behavior. In *Proceedings of the 8th International Operational Modal Analysis Conference*, (pp. 481-488).
- Fu, Z. F., & He, J.** (2001). *Modal Analysis*. Elsevier.

- Gani, E.** (2017). *Tarihi Davutpaşa Kışlası'nın Dinamik Ölçüm Destekli, Yatay ve Düşey Yükler Altında Analizi*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gentile, C. vd.,** (2009). Operational Modal Analysis and FE modelling of a masonry tower. In *3rd International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC'09)* (pp. 499-506). Brescia.
- Gentile, C., & Saisi, A.** (2019). OMA-based structural health monitoring of historic structures. In *8th International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC 2019* (pp. 671-688). International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC).
- Girgin, Ö.** (2019). *Operational Modal Analysis and Finite Element Model Updating Of An In-Service Steel Railroad Bridge*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Grappasonni, C. vd.,** (2013). Using OMA for full-field dynamic response identification. In *5th International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC 2013* (pp. 1-8).
- Grosel, J. vd.,** (2009). The identifications of modal parameters of a large industrial structure. In *Proceedings of The 3rd International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC)*, Ancona, Italy.
- Günday, F.** (2021). *Çelik Yapıların Dinamik Parametrelerine Kablo Elemanların Etkisinin Operasyonel Modal Analiz ile İncelenmesi*. (Yayınlanmış Doktora Tezi). Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Samsun,
- Güneş, S. & Anıl, Ö.** (11-13 Ekim 2017). Operasyonel Modal Analiz Tekniği ile Yığma Yapıların Dinamik Davranışının Belirlenmesi. *4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Anadolu Üniversitesi – Eskişehir.
- Güneş, S.** (2017). *Operasyonel Modal Analiz Tekniği ile Yığma Yapıların Dinamik Davranışının Belirlenmesi*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Hökelekli, E.** (2015). *Manisa Hafsa Sultan Camii Deprem Davranışının Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İncelenmesi*. (Yayınlanmış Doktora Tezi). Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Humar, J.** (2012). *Dynamics of Structures*. CRC press.

- İnternet:** ARTEMIS. Software for Operational Modal Analysis. (<https://svibs.com/>)
- İnternet:** SAP2000. Integrated Software For Structural Analysis and Design. (<https://wiki.csiamerica.com/display/sap2000>)
- Kalybek, M.** (2022). *Modal Analysis And Finite Element Model Updating of Civil Engineering Structures Using Camera-Based Vibration Monitoring Systems* (Doctoral dissertation, University of Leicester).
- Kaya, Y., & Safak, E.** (2011). New Technique for Real-Time Modal Identification. In *4th International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC 2011*.
- Koçak, A. vd.,** (08-09-10 Mayıs 2015). Tek Açıklıklı Bir Demiryolu Köprüsünde Modal Parametrelerin Operasyonel Modal Analiz ve Sayısal Analiz Yöntemleri ile Belirlenmesi, *3.Köprüler Viyadükler Sempozyumu, İnşaat Mühendisleri Odası-Bursa Şubesi*.
- Kömür M.A.,** Deneme İ.Ö, Yerli H.R., 2015. *Düzlem Çelik Çerçeve Sistemlerin Operasyonel Modal Analizi*. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(2), 73-79 ss., Aralık 2015.
- Kurt, M.** (2016). *Tarihi Taş Kemer Köprülerinin Dinamik Davranışlarının Deneysel ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Belirlenmesi*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Kuyumcuoğlu, A.** (2008). *Çalışma Şartlarında Modal Analiz*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- López Aenlle, M. vd.,** (2011). Operational Modal Analysis on laminated glass beams. In *4th International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC 2011* (pp. 1-8).
- Mario, P., & Young, H. K.** (2019). *Structural dynamics: Theory and computation*.
- McDonald, S.** (2016). *Operational modal analysis, model updating, and seismic analysis of a cable-stayed bridge* (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- Mert, C.** (2016). *Üç Boyutlu Betonarme Çerçevelerin Katkılı Sıva ve Gergi Elemanları ile Güçlendirilmesi*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Mironov, A. vd.,** (2017). OMA Techniques Optimization For SHM Of Typical Industrial Structures. In *Proceedings of the 7th International Operational Modal Analysis Conference, Ingolstadt, Germany* (pp. 124-127).

- Okuyucu, D.** *Tek Katlı Betonarme Bir Yapı Üzerinde Operasyonel Modal Analiz Uygulaması.* Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 11(3), 1407-1419.
- Osmancıklı, G.** (2012). *Prefabrik Yapıların Dinamik Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi.* (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Özcan, D.M.** (2010). *Yapıların Patlatma Kaynaklı Doğrusal Olmayan Davranışlarının Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi.* (Yayınlanmış Doktora Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon,
- Özdoğan, D.B.** (2018). *Schmidt Çekici Test Yönteminin Tarihi Yığma Yapılarda Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılmasının Araştırılması: Erzurum Kadana Camii Uygulaması.* (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Özkul, M.** (2016). *Tarihi Bir Yapının Deneysel Modal Analiz ile Yapısal Güvenliğinin Belirlenmesi.* (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bornova-İzmir.
- Paz, M., & Leigh, W.** (1991). *Structural Dynamics.* Springer US.
- Peeters, B. vd.,** (2005). Industrial relevance of operational modal analysis-Civil, aerospace and automotive case histories. In Proceedings of the 1st *International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC 2005.*
- Poprawa, G. vd.,** (2017). Operational modal analysis in model updating of a truss railway bridge. In *7th International Operational Modal Analysis Conference.*
- Rainieri, C.** (2008). *Operational Modal Analysis for seismic protection of structures.* University of Naples "FEDERICO II.
- Rainieri, C. vd.,** (2007). The Operational Modal Analysis for the identification of historical structures: the Tower of the Nations in Naples. In *Proceedings of the 2nd International Operational Modal Analysis Conference* (pp. 153-160).
- Rainieri, C. vd.,** (2007, April). Implementation Of OMA Procedures Using Labview: Theory And Application. In *2nd International Operational Modal Analysis Conference* (Vol. 30, pp. 1-13). Copenhagen: Denmark.

- Rainieri, C. vd.,** (2009). Operational Modal Analysis and earthquake engineering. In *Proceedings of the Third International Operational Modal Analysis Conference*, Porto Novo, Italy.
- Rizo-Patron, S. S., & Sirohi, J.** (2016). *Operational Modal Analysis Of A Rotating Cantilever Beam Using High-Speed Digital Image Correlation*. In 57th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference (p. 1957).
- Sarıça, C.** (2019). *Yapıların Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi İçin Operasyonel Modal Analiz Bilgisayar Programı Yazımı*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Savaş, G.K.** (2020). *Çok Katlı Betonarme Yapıların Yapım Kalitesi Kontrolünün Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile Değerlendirilmesi*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Savov, K., & Wenzel, H.** (2005). System Identification and damage detection using wavelet analysis: applications in frame structures. In *Proceedings of the 1st International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC 2005)* (pp. 511-518).
- Schmidt, T.** (2007, April). Dynamic behaviour of twin bell towers. In *Proceedings of the 2nd international operational modal analysis conference*.
- Sevim, B.** (2010). *Kemer Barajların Dinamik Davranışlarının Sonlu Eleman ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi*. (Yayınlanmış Doktora Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Şahin, M.** (2020). *Kauçuk İzolatörlü Bir Yapının Soğuk Hava Koşulları Etkisi Altındaki Modal Davranışının Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile İncelenmesi*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Toydemir, B.** (2014). *Sivas – Ankara Arasındaki Dayanım Esasına Göre Tasarımı Yapılmış Demiryolu Köprülerinin Dinamik Karakteristiklerinin Ölçülmesi ve Performansa Dayalı Analizi*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi) Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Toydemir, B.** (2021). *Yığma ve Dolgu Duvar Boşluklarının Duvar ve Bina Davranışına Etkisinin Sayısal ve Operasyonel Modal Analiz ile İncelenmesi*. (Yayınlanmış Doktora Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Turan, F.N.** (2012). *Dengeli Konsol Betonarme Köprülerin Dinamik Karakteristiklerinin Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Belirlenmesi*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Wang, L.** (2012). *Innovative Damage Assessment Of Steel Truss Bridges Using Modal Strain Energy Correlation* (Doctoral dissertation, Queensland University of Technology).
- Xie, Y.** (2018). *Uncertainty quantification and management in operational modal analysis with multiple setups* (Doctoral dissertation, University of Liverpool).
- Yavuzer, M.N.** (2016). *Zal Mahmut Paşa Camii Yapısal Davranışı ve Geçmiş Hasarların İncelenmesi*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yetkin M. vd.,** (2021). *Operasyonel Modal Analiz Yönteminde Referanslı ve Referanssız Ölçümlerin Karşılaştırılması: Bir Minare Örneği*. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(3): 2069-2078.
- Yetkin, M.** (2016). *Betonarme Yapıların Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Dinamik Davranışının İncelenmesi*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Youssof, İ.B.** (2018). *Türkiye'deki Mevcut Tarihi Bir Yığma Yapı Örneğini Oluşturan Duvarların Düzlem dışı Deprem Etkileri İçin Hasar Limitlerinin İrdelenmesi*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Yücel A.,** 2020. *Bir Dizel Gemi Jeneratörünün Operasyonel Modal Analizi*. BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi, 23(1), 224-233, (2021).
- Zhang, L. vd.,** (2010). *A Frequency–Spatial Domain Decomposition (FSDD) Method For Operational Modal Analysis*. Mechanical Systems And Signal Processing, 24(5), 1227-1239.
- Zhivaev, A. A., & Boldyrev, G. G.** (2013). Operational modal analysis of sport arena stand structure. In *5th International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC 2013* (pp. 1-6).
- Zhu, Z.** (2020). *Bayesian Operational Modal Analysis with Multiple Setups and Multiple Modes*. The University of Liverpool (United Kingdom).