

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**PREFABRİK YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ ANALİTİK VE
DENEYSEL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Gökhan OSMANCIKLI

**EYLÜL 2012
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**PREFABRİK YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ ANALİTİK VE
DENEYSEL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ**

İnş. Müh. Gökhan OSMANCIKLI

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11.09.2012
Tezin Savunma Tarihi : 26.09.2012**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR

Trabzon 2012

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında

Gökhan OSMANCIKLI tarafından hazırlanan

**PREFABRİK YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ ANALİTİK VE
DENEYSEL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 11 / 09 / 2012 gün ve 1473 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

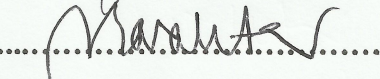
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Halil KARADENİZ

.....


Üye : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR

.....


Üye : Doç Dr. Levent GÜMÜŞEL

.....


Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır. "Prefabrik Yapıların Dinamik Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi" isimli tez çalışmasını bana öneren ve çalışmaların her aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle daima yanımda olan beni her zaman destekleyen Hocam Sayın Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR'a minnet ve şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

Tez çalışmamın gerçekleştirilmesinde değerli görüşlerini ve bilgilerini benimle paylaşan, benim için bir hocadan daha çok değerli bir abi olan Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Temel TÜRKER'e göstermiş olduğu özveri, anlayış ve içtenliğinden dolayı çok teşekkür ederim. Ayrıca, tezin hazırlanması sırasında yardımlarını esirgemeyen İnş. Yük. Müh. Fatma Nur TURAN KUDU'ya, İnş. Müh. Emre SARI'ya ve Arş. Gör. Hasan SESLİ'ye desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim. 7 yıllık öğrenim hayatım boyunca emeği geçen tüm hocalarıma ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Hayatım boyunca bana her türlü imkanı sağlayan, maddi ve manevi tüm desteklerini sonuna kadar gösteren ve en önemlisi de her zaman yanımda olan sevgili annem Şenay OSMANCIKLI'ya, değerli babam Rıdvan OSMANCIKLI'ya ve canım kardeşim Göksel OSMANCIKLI'ya minnettar olduğumu belirtmek isterim. Ayrıca yedi yıldır her sevincimi, mutluluğumu, üzüntümü paylaştığım, hayatımda önemli bir yere sahip sevgili meslektaşım İnş. Müh. Şenay UÇAK'a destek ve yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim.

Gökhan OSMANCIKLI
Trabzon 2012

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Prefabrik Yapıların Dinamik Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Alemdar Bayraktar’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 26/09/2012



Gökhan OSMANCIKLI

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ	XII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Prefabrik Yapılar Hakkında Genel Bilgiler.....	2
1.2.1. Dünya’da Prefabrik Yapıların Gelişim Süreci	4
1.2.2. Prefabrik Yapıların Kullanım Alanları	5
1.2.3. Prefabrik Yapıların Avantajları ve Dezavantajları	5
1.2.4. Prefabrik Yapı Elemanları.....	8
1.2.4.1. Çubuk Elemanlar	8
1.2.4.2. Düzlemsel Elemanlar	10
1.2.4.2.1. Döşemeler	10
1.2.4.2.2. Duvarlar	17
1.2.4.3. Kabuk Elemanlar	18
1.2.5. Prefabrik Taşıyıcı Sistemler	19
1.2.5.1. Kolon-Kiriş Sistemler	19
1.2.5.2. Kolon-Döşeme Sistemler	21
1.2.5.3. Panolu Sistemler	21
1.2.5.4. Hücre Sistemler	23
1.2.5.5. Karışık Sistemler	24
1.2.6. Prefabrik Yapılarda Birleşim Noktalarının Özellikleri.....	25
1.3. Prefabrik Yapılar Üzerine Yapılmış Çalışmalar.....	27
1.4. Tezin Amacı ve İçeriği.....	31
1.5. Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi	32
1.5.1. Teorik Modal Analiz Yöntemi	32

1.5.1.1.	Tek Serbestlik Dereceli Sistemler	33
1.5.1.2.	Çok Serbestlik Dereceli Sistemler	37
1.5.2.	Deneysel Modal Analiz Yöntemi	40
1.5.2.1.	Genel Kurallar	40
1.5.2.2.	Ölçüm Ekipmanları.....	41
1.5.2.2.1.	Titreştiriciler	41
1.5.2.2.2.	İvmeölçerler.....	43
1.5.2.2.3.	Veri Toplama Ünitesi ve Sinyal İşleme	44
1.5.2.3.	Operasyonel Modal Analiz.....	46
1.5.2.3.1.	Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) Yöntemi	48
1.5.2.3.2.	Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi	50
1.6.	Sonlu Eleman Model İyileştirme Yöntemleri	53
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	55
2.1.	C-1 Üstgeçidi.....	55
2.1.1.	C-1 Üstgeçidine Ait Genel Bilgiler	55
2.1.2.	C-1 Üstgeçidi'nin Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması	58
2.1.2.1.	C-1 Üstgeçidi'nin Teorik Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	60
2.1.3.	C-1 Üstgeçidi'nin Deneysel Modal Analizi.....	61
2.1.3.1.	C-1 Üstgeçidi'nin Deneysel Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	63
2.1.3.1.1.	Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma Yöntemiyle C-1 Üstgeçidine Ait Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi	64
2.1.3.1.2.	Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemiyle C-1 Üstgeçidine Ait Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi	65
2.2.	Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi.....	68
2.2.1.	Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'ne Ait Genel Bilgiler	68
2.2.2.	Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'nin Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması	71
2.2.2.1.	Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'nin Teorik Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi	72
2.2.3.	Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'nin Deneysel Modal Analizi.....	74
2.2.3.1.	Üretim Tesisi'nin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	75
2.2.3.1.1.	Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma Yöntemiyle Üretim Tesisine Ait Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi	76
3.	İRDELEME VE DEĞERLENDİRMELER.....	78

3.1.	Teorik ve Deneysel Olarak Elde Edilen Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması.....	78
3.1.1.	C-1 Üstgeçitine Ait Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması	78
3.1.2.	Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'ne Ait Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması.....	80
3.2.	Prefabrik Yapıların Sonlu Eleman Modellerinin İyileştirilmesi	82
3.2.1.	C-1 Üstgeçitine Ait Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi	82
3.2.2.	Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'ne Ait Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi.....	85
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	88
5.	KAYNAKLAR.....	91
	ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

PREFABRİK YAPILARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ ANALİTİK VE DENEYSEL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

Gökhan OSMANCIKLI

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR
2012, 95 Sayfa

Bu çalışmada, Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemiyle prefabrik yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ve deneysel veriler kullanılarak başlangıç sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Tez çalışması başlıca beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde prefabrik yapılardan, konuyla ilgili yapılan çalışmalardan, dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde kullanılan yöntemlerden, bu yöntemlere ait formülasyonlardan ve model iyileştirme yöntemlerinden bahsedilmektedir. İkinci bölümde C-1 Üstgeçidi ve Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi hakkında genel bilgiler verilmekte ve SAP2000 programında oluşturulan sonlu eleman modelleri sunulmaktadır. Sonrasında, prefabrik yapılara uygulanan deneysel ölçümlerin detayları ve elde edilen dinamik karakteristikler verilmektedir. Üçüncü bölümde deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırılması ve bağlantı noktalarının rijitlikleri kullanılarak analitik modellerin iyileştirilmesi verilmektedir. Dördüncü bölümde, yapılan çalışmaların sonuçlarına ve bazı önerilere yer verilmektedir. Beşinci bölümde ise çalışmanın hazırlanmasında yararlanılan kaynaklar sunulmaktadır. Çalışma sonunda OMA yönteminin, prefabrik yapıların deneysel dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde ve sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesinde güvenle kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Prefabrik yapılar, Operasyonel Modal Analiz, Sonlu Eleman Model
İyileştirme

Master Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF DYNAMIC BEHAVIOR OF PRECAST STRUCTURES USING
ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL METHODS

Gökhan OSMANCIKLI

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR
2012, 95 Pages

In this study, it is aimed to determined dynamic characteristics of precast structures using Operational Modal Analysis (OMA) and updated initial finite element models. The presented thesis consists of mainly five chapters. In the first chapter, the information about precast structures, the studies performed on this subject, methods which are used to determine dynamic characteristics, formulations of these methods and model updating methods are mentioned. In the second chapter, the information selected precast structures which are C-1 overpass and Doğu Karadeniz Precast Production Facility and initial finite element models using SAP2000 software are presented. Then, the measurement details which carried out environmental vibration test on the precast structures and obtained dynamics characteristics are given. In the third chapter, Comparisons obtained with analytical and experimental results, related tables and the finite element model updating in terms of connection rigidities on the joints for each precast structures are presented. In the fourth chapter, the results of analytical and experimental studies and some suggestions are given. In the fifth chapter which is the last chapter, the references used in this thesis are presented. At the end of the study, it is emphasized that OMA method can be used safely to determine the dynamic characteristics and to update initial finite element models of precast structures.

Key Words: Precast structures, Operational Modal Analysis, Finite Element model updating.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Prefabrik kirişlere ait çeşitli örnekler.....	9
Şekil 1.2. Prefabrik kolonlara ait çeşitli örnekler.....	10
Şekil 1.3. H ve T formlu çerçeveler	10
Şekil 1.4. Betonarme Prefabrik iskelet sistemlerde kullanılan döşeme elemanlarının sınıflandırılması	11
Şekil 1.5. T döşeme örneği.....	12
Şekil 1.6. Çift T plak döşeme için uygulama örnekleri.....	12
Şekil 1.7. U tipi döşeme örnekleri.....	13
Şekil 1.8. Boşluklu döşeme örneği ve yerleşim düzeni.....	14
Şekil 1.9. Asmolen Döşeme Örneği.....	16
Şekil 1.10. Filigran döşeme örnekleri.....	16
Şekil 1.11. Sabit mafsallı birleşim örneği.....	20
Şekil 1.12. Rijit bağlantılı birleşim örneği.....	20
Şekil 1.13. Gergi elemanının kullanılmasıyla oluşan birleşim örneği.....	20
Şekil 1.14. Kolon–döşeme sistemlerin montaj şekli ve sisteme ait birleşim detayı	21
Şekil 1.15. Uzun doğrultuda yerleştirilen panolu sistem örneği.....	22
Şekil 1.16. Kısa doğrultuda yerleştirilen panolu sistem örneği.....	23
Şekil 1.17. Her iki doğrultuda yerleştirilen panolu sistem örneği.....	23
Şekil 1.18. Kutu, halka ve iskeletli hücre sistemlere ait örnekler.....	24
Şekil 1.19. Tek serbestlik dereceli bir sistemin analitik ve matematik modeli.....	33
Şekil 1.20. İki serbestlik dereceli bir sistemin analitik modeli.....	38
Şekil 1.21. APS 400 tipi mekanik sarsıcı örneği.....	42
Şekil 1.22. B&K tipi darbe çekici örneği.....	43
Şekil 1.23. İvmeölçer ve diğer malzeme örnekleri.....	44
Şekil 1.24. B&K Tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi ve bilgisayar ortamı.....	46
Şekil 1.25. Operasyonel Modal Analiz Yöntemine ait ölçüm düzenek şeması.....	47
Şekil 2.1. C-1 üstgeçidinde ait mimari proje verileri.....	56
Şekil 2.2. C-1 üstgeçidinde ait görüntüler.....	58

Şekil 2.3.	C-1 üstgeçidi sonlu eleman modeli	60
Şekil 2.4.	C-1 Üstgeçidi'ne ait analitik olarak elde edilen ilk üç mod şekli.....	61
Şekil 2.5.	C-1 Üstgeçidi için ivmeölçerler ve referans yerleşimine ait görüntüler..	62
Şekil 2.6.	C-1 Üstgeçidi üzerinde gerçekleştirilen deneysel ölçümlere ait görüntüler.....	63
Şekil 2.7.	C-1 Üstgeçit üzerindeki ölçümlerde deneysel ölçüm düzeni ve ivmeölçerlerin yönleri.....	63
Şekil 2.8.	C-1 üstgeçidine ait spektral yoğunluk fonksiyonu.....	64
Şekil 2.9.	C-1 Üstgeçidi'ne ait kararlılık diyagramları.....	65
Şekil 2.10.	C-1 Üstgeçidi'ne ait spektral yoğunluk fonksiyonu.....	66
Şekil 2.11.	C-1 Üstgeçidi'ne uygulanan OMA sonucunda elde edilen mod şekilleri.	67
Şekil 2.12.	Üretim tesisine ait mimari proje verileri.....	69
Şekil 2.13.	Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'ne ait görüntüler.....	71
Şekil 2.14.	Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'ne ait sonlu eleman modeli....	72
Şekil 2.15.	Üretim tesisine ait analitik olarak elde edilen ilk beş mod şekli.....	73
Şekil 2.16.	Üretim tesisinin çerçeveleri üzerine yerleştirilen ivmeölçerlerin yerleşim düzeni.....	74
Şekil 2.17.	Üretim tesisi üzerinde gerçekleştirilen deneysel ölçümlere ait görüntüler.....	75
Şekil 2.18.	Üretim tesisi üzerindeki ölçümlerde deneysel ölçüm düzeni ve ivmeölçerlerin yönleri.....	75
Şekil 2.19.	Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'ne ait spektral yoğunluk fonksiyonu.....	76
Şekil 2.20.	Üretim tesisine ait deneysel mod şekilleri.....	77
Şekil 3.1.	C-1 Üstgeçidi'ne ait analitik ve deneysel mod şekillerinin karşılaştırılması.....	79
Şekil 3.2.	Üretim tesisine ait deneysel ve analitik mod şekillerinin karşılaştırılması.....	81
Şekil 3.3.	C1- Üstgeçidi'ne ait deneysel mod şekilleri ile iyileştirilmiş teorik mod şekillerinin karşılaştırılması.....	84
Şekil 3.4.	Üretim tesisine ait deneysel mod şekilleri ile iyileştirilmiş teorik mod şekillerinin karşılaştırılması.....	86

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. C-1 üstgeçidine ait malzeme özellikleri.....	59
Tablo 2.2. Model üstgeçide ait analitik doğal frekanslar, periyotlar ve modal davranışlar.....	61
Tablo 2.3. C-1 Üstgeçidi'ne ait deneysel ölçümden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları.....	65
Tablo 2.4. C-1 Üstgeçidi'ne ait deneysel ölçümden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları.....	67
Tablo 2.5. Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'ne ait malzeme özellikleri.....	71
Tablo 2.6. Üretim tesisine ait analitik doğal frekanslar, periyotlar ve modal davranışlar.....	73
Tablo 2.7. Üretim tesisine ait deneysel ölçümden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları.....	76
Tablo 3.1. C-1 Üstgeçidi'ne ait deneysel ve analitik doğal frekansların karşılaştırılması.....	78
Tablo 3.2. Üretim Tesisine ait deneysel ve analitik frekansların karşılaştırılması....	80
Tablo 3.3. Model iyileştirme işlemi sonrasında C-1 Üstgeçidi'ne ait deneysel ve analitik frekanslar.....	83
Tablo 3.4. Model iyileştirme işlemi sonrasında Üretim Tesisi'ne ait deneysel ve analitik frekanslar.....	85

SEMBOLLER DİZİNİ

A_k	Tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonuna ait k artık değer matrisi
A_*	Durum matrisi
B_*	Veri matrisi
B_k	Tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonuna ait k artık değer matrisi
c	Yapının sönümü
c_{cr}	Kritik sönüm
C_*	Sistem davranış matrisi
[C]	Sönüm matrisi
D_*	Doğrudan iletim matrisi
E_*	Değer operatörü
F	Yapıya uygulanan kuvvet
F_D	Sönüm kuvveti
F_I	Atalet kuvveti
$f(t)$	Yapıya uygulanan kuvveti
F_S	Yaydaki elastik şekil değişiminden dolayı yayda oluşan kuvveti
$\{f(t)\}$	Zamana bağlı kuvvet vektörü
$\{F\}$ ve $\{X\}$	$N*1$ boyutunda zamandan bağımsız kompleks genlikli vektörler
$G_{xx}(j\omega)$	Etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk (GSY) fonksiyonu
$G_{yy}(j\omega)$	Tepki sinyalinin GSY fonksiyonu
$H(j\omega)$	Frekans davranış fonksiyonu
\bar{H}	Kompleks eşlenik ve transpoze
[K]	Rijitlik matrisi
k	Yapının rijitliği
[M]	Kütle matrisi
m	Yapının kütlelerini
n	Mod sayısı

R_k	Artık değer fonksiyonu
$R(t)$	Titreşim kuvveti
S_i	Skaler tekil değerleri içeren diyagonal matris
s_{ij}	Skaler tekil değerler
s	Tekil değerler
t	Zaman
T	Kompleks transpoze
U_i	Tekil vektörleri içeren bütün matrisi
u_{ij}	Tekil vektörler
u_k	Belirgin etki sinyal vektörü
$\{ \dot{U}(t) \}$	Zamana bağlı hız vektörü
$\{ \ddot{U}(t) \}$	Zamana bağlı ivme vektörü
$\{ U(t) \}$	Zamana bağlı yerdeğiştirme vektörü
v_k	İvmeölçer kusurlarından dolayı işlenen gürültü sinyali
δ_{pq}	Kronecker delta
λ_k	Kutup fonksiyonu
$[\alpha(\omega)]$	Frekans davranış fonksiyonu
θ_α	Frekans davranış fonksiyonuna ait faz değeri
$ \alpha(\omega) $	Frekans davranış fonksiyonuna ait genlik değeri
ξ	Sönüm oranı
ω_d	Sönümlü doğal açısal frekans
ω	Sönümsüz doğal açısal frekans
w_k	Modeldeki belirsizlikler ve kusurlar nedeniyle işlenen gürültü sinyalleri
$\{x(t)\}$	Zamana bağlı yerdeğiştirme vektörü
$\{\dot{x}(t)\}$	Zamana bağlı hız vektörü
$\{\ddot{x}(t)\}$	Zamana bağlı ivme vektörü
X	Yerdeğiştirme
$\{X\}$	$N \times 1$ boyutunda zamandan bağımsız genlik

$\mathbf{x}(t)$	Durum vektörü
$\dot{\mathbf{x}}(t)$	Yapının hızı
$\ddot{\mathbf{x}}(t)$	Yapının ivmesi
$x(t)$	Yapının yer değiştirmesi
$\mathbf{x}_k = \mathbf{x}(k\Delta t)$	Ayrık-zaman durum vektörü
*	Kompleks eşlenik

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Dünya’da yapısal ve mimari açıdan çeşitlilik gösteren birçok yapı bulunmaktadır. Bu yapıların ortak özellikleri, sabit ve dinamik yükler altında ayakta kalmayı başarabilmeleridir. Dinamik yükler etkisi altındaki yapılarda titreşimler oluşmakta ve oluşan titreşimler yapı üzerinde müdahale gerektiren ya da gerektirmeyen birçok hasar meydana getirmektedir. Bu durumda yapılarda oluşabilecek titreşimler bilinmeli ve bu titreşimlerin oluşturacağı etkiler üzerinde durulmalıdır. Dünya son yıllarda birçok depremle yüzleşmiştir ve sonuç olarak ağır kayıpların verildiği durumlar ortaya çıkmıştır. Meydana gelen ağır kayıpların ülkeler için çeşitli sorunlar yarattığı düşünülürse, yapıların mevcut durumlarının bilinmesinin ve gerekli önlemlerin alınmasının ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır.

Yapılar inşa ve kullanım süresi boyunca, projelendirilme sırasında düşünülenenden daha farklı titreşimlere maruz kalabilmektedirler. Çünkü, yeni yapılan yapılar için projelendirilme aşamasında yapıda oluşabilecek yük durumları, belirli standartlara ve çoğu durumda basitleştirilerek belirlenmektedir. Mevcut yapılar için ise, bir yapının Sonlu Eleman (SE) modeli sadece yapıya ait proje verilerinden yola çıkarak oluşturulmak istenirse, oluşturulan modelin gerçek yapıyı ne ölçüde temsil ettiğinin belirlenmesinde zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu durumda, yapıların oluşacak titreşimlere karşı gösterecekleri davranışın deneysel olarak belirlenmesi ve elde edilen teorik ve deneysel değerlerin karşılaştırılıp gerçek yapıyı temsil edecek SE modelinin oluşturulması gerekliliği ortaya çıkmaktadır (Türker, 2005). Yapıların dinamik davranışlarını anlamak, onların dinamik karakteristikleri ya da modal parametreleri olarak bilinen doğal frekanslarını, mod şekilleri ve sönüm oranlarını belirlemekle mümkün olmaktadır. Günümüzde yapı dinamik karakteristiklerini belirlemek için teorik ve deneysel yöntemler kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan teorik yöntem Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), en yaygın olarak kullanılan deneysel yöntem ise Deneysel Modal Analiz (DMA) yöntemidir.

Yapıyı titreştirmek amacıyla uygulanan etkinin bilinip bilinmemesine bağlı olarak Deneysel Modal Analiz uygulamaları, Geleneksel Deneysel Modal Analiz ve Operasyonel Modal Analiz olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Geleneksel Deneysel Modal Analiz yönteminde yapıya uygulanan etkinin ve yapının bu etkiye gösterdiği tepkinin bilinmesi

gerekmekte; yapı dinamik davranışı ise tepki değerlerine ait spektral fonksiyonların etki değerine ait spektral fonksiyona oranlanmasıyla elde edilmektedir. Bu yöntem, etki değerinin bilinmesini de gerektirdiğinden Zorlanmış Titreşim Testi olarak da adlandırılmaktadır. Operasyonel Modal Analiz yönteminde ise yapıya uygulanan etkinin bilinmesine gerek yoktur. Bu yöntemde, yapının rüzgar, taşıt yükü, insan hareketi gibi rastgele etkiler altında titreştirildiği varsayılmakta ve yapı dinamik karakteristikleri tepki sinyallerinin spektral yoğunluk fonksiyonlarının gerek zaman gerekse frekans tanım alanında değerlendirilmesiyle belirlenebilmektedir. Bu yöntemde de yapıyı titreştirmek amacıyla rastgele çevresel titreşimlerden yararlanıldığı için Çevresel Titreşim Testi olarak da adlandırılmaktadır. Deneysel Modal Analiz yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen ölçümlerden, yapıya ait dinamik karakteristikler elde edilmektedir. Bu dinamik karakteristikler yapı dinamik davranışının belirlenmesinde kullanılan başlıca parametreler olduğundan, bu karakteristiklerin yapının mevcut davranışını yansıtacak şekilde gerçekçi olarak belirlenmesi oldukça önemlidir (URL-1, 2012).

Teorik yöntem olarak kullanılan SEY’de yapının SE modeli oluşturulurken malzeme özelliklerinden sınır şartlarına kadar pek çok kabul yapılmaktadır. Bu kabullerin sonucunda oluşturulan model, gerçek yapıyı ve ona ait dinamik davranışları doğru bir şekilde temsil etmemektedir. Bu durumda SE modelleri, deneysel yöntemlerle elde edilen dinamik karakteristikler yardımıyla doğrulanmalıdır. Bu doğrulama işlemi model güncelleme yöntemi olarak bilinmektedir.

İlerleyen teknolojiyle günümüzde birçok çelik ve betonarme prefabrik yapıların yapıldığı bilinmektedir. Bu yapılar üzerinde birçok teorik çalışma yapılmasına karşın deprem kuşağında bulunan ülkemizde prefabrik yapıların davranışlarının deneysel olarak belirlenmesine yönelik çalışmaların çok az olduğu görülmektedir. Bu durum düğüm noktaları tam bağlı olmayan prefabrik yapıların deneysel olarak incelenmesi konusuna olan ilginin artmasına sebebiyet vermektedir.

1.2. Prefabrik Yapılar Hakkında Genel Bilgiler

Geçmişte, özellikle savaşlar ve doğal afetler sonrasında ortaya çıkan temel ihtiyaçlardan biri olan barınma sorunu, inşaat sektörünün endüstriyel gelişimini hızlandırmış ve ortaya

çıkan konut açığına karşılık için, gelişmiş ülkeler bir çözüm arayışı içerisine girmişlerdir (Cansun, 1978; Eşiyok, 2000). Bu arayışın bir sonucu olarak, bir bina projesinin taşıyıcı sistemi oluşturan kolon, kiriş ve döşeme gibi yapı elemanlarının şantiyeye getirilmeden önce, bu amaç için özel olarak tasarlanmış endüstriyel ortamlarda üretimi sağlanarak prefabrik üretimin temelleri atılmıştır (TTSDTOTBB, 1988).

Prefabrik yapılar, kendilerini oluşturan yapı elemanlarının standartlaştırıldığı, inşaat sahasından uzak üretim tesislerinde seri ve özel olarak üretilip sonrasında montajları için inşaat sahasına getirilerek montajları yapılan ve birleştirildiklerinde bir taşıyıcı sistemi oluşturan ahşap, çelik, betonarme veya öngerilmeli beton elemanlardan oluşmaktadırlar. Prefabrik üretimin genel amacı; şantiyeye en az sayıda iş bırakacak şekilde, fabrikadaki işçilik kalitesini ve kapasitesini kontrol ederek çalışma şartlarında belirli bir kalite düzeyini tutturmak ve standartlaşmayı sağlamaktır (Kaleş, 1999; Geray, 1989). Kısaca prefabrik üretimin amacı, “daha az zamanda daha çok sayıda ve daha kaliteli yapılar üretmektir” denilebilir.

Yapı elemanlarının bir kısmının veya tümünün fabrikada endüstriyel yöntemlerle üretilmesini öngören bir yapım sistemi olan prefabrik üretimin en önemli özelliği, yapım sürecindeki işlemlerin fabrika üretim ve şantiyede montaj şeklindeki ayrımıdır (Ayaydın, 1981).

Bir prefabrik yapıyı oluşturan elemanların ve bileşenlerin sahip olması gereken özellikler aşağıda verilmektedir (Ayaydın, 1981).

➤ Boyutsal değişmezlik: Bileşenlerin değişebilirliğini ve birbirine kolayca birleştirilebilmesini, aralarındaki bağlantıların görevini doğru olarak yapmalarını ve tatminkar bir görünüme sahip olmalarını sağlamaktır.

➤ Sağlık ve dayanıklılık: Yapının bütün kullanım ömrü boyunca kaldırma, taşıma, montaj işlemlerinde maruz kalacağı etkilere karşı koyabilmesidir.

➤ Bitimdeki kalite: Dış duvarlar için düzgün ve yüksek kalitede bitim ve iç duvarlar için başka hazırlık gerekmeksizin dekorasyon yapabilme olanağı sağlayacak bitim gerçekleştirilebilmesidir.

1.2.1. Dünya’da Prefabrik Yapıların Gelişim Süreci

Prefabrik yapılardaki ilk gelişmeler 1836 yılında İngiltere’de George Godwin tarafından ilk teknik makalenin yayınlanması ile başlamıştır (Günerman, 1997). RIBA (Royal Institute of British Architects) tarafından ödüllendirilen bu makale prefabrik yapıların kullanımını teşvik eden ilk teknik yayın olması nedeniyle oldukça önemlidir.

Prefabrik beton yapı elemanları konusunda ilk patent 1844 yılında Frederick Ranson tarafından alınmıştır. 1849 yılında sonrasında 1855’te François Coignet, 1875’te W. Henry Lascelles ve daha birçok teknisyenin özellikle konut yapı sistemleri konusunda çeşitli patentler aldıkları bilinmektedir (Coignet, 1855). Yapılan çalışmaların ve alınan patentlerin içerisinde kuşkusuz en önemli olanı Thomas Edison’a aittir. Çünkü Edison, Amerika’da sahibi olduğu çimento şirketi adına endüstriyel bir yapı sistemi geliştirerek 1908 yılında bunun patentini almıştır. Edison başarılı uygulamalarda bulunarak bu alanda en önemli isimlerden biri olmayı başarmıştır (URL-2, 2012). Bu tür patentlerle başlayan prefabrik yapıların gelişimi özellikle İkinci Dünya Savaşı sonrasında artan konut ihtiyacı ile daha da yaygın hale gelerek endüstriyel üretimlerle devam etmiştir. Artan konut ihtiyacını hızlı bir şekilde kapatmak için yapılan prefabrik sistemler, uygulandıkları bölgeler itibari ile deprem bölgesi üzerinde bulunmamalarından dolayı, depreme karşı dayanıklı olup olmadıkları fazla önemsenmemiş ve incelenmemiştir. Prefabrik yapılar üzerinde yapılan araştırmalar daha çok birleşim bölgelerinin detayları ve üretim teknolojilerinin geliştirilmesi konularıyla sınırlı kalmıştır. 1960 ve 1970’li yıllarda ise gelişmiş ülkelerde prefabrik üretim konusunda yeterli düzeyde tecrübe birikimine ulaşılmıştır.

Türkiye’de ise ilk prefabrik yapı örneği, 1966 yılında inşa edilen, Ereğli Demir ve Çelik Fabrikası lojmanlarıdır. Prefabrik üretimle ilgili yanlış tespitlerde bulunulması ve ilk denemelerde istenilen başarının elde edilememesi Türkiye’de prefabrik üretim sürecinin ertelenmesine sebep olmuştur. Ancak 1970’li yıllarda yaşanan kriz, firmaların farklı çözümler aramasını tetikleyerek prefabrik üretim mantığı oluşmasına ve 1980’li yıllarda ise sistematik ürünlerin yapılarak prefabrik üretim gelişim sürecinin iyice hızlanmasına sebebiyet vermiştir. Ülkemizin özellikle deprem kuşağında bulunmuş olmasından dolayı prefabrik yapılarda karşılaşılan sorunlar unutulmamış ve bu durum Türkiye’de prefabrik yapılarla ilgili bir yönetmelik ihtiyacı doğurmuştur ve 1992 yılında Türk Standartları Enstitüsü tarafından prefabrik yapılar hakkında bir yönetmelik yayınlanmıştır (TSE 9967, 1992).

1.2.2. Prefabrik Yapıların Kullanım Alanları

Prefabrik elemanlar kullanılarak inşa edilen prefabrik yapılar kullanım amaçlarına göre iki farklı şekilde üretilirler. Bunlar, kalıcı prefabrik yapılar ve geçici prefabrik yapılarıdır. Şantiye binaları, barakalar, yatakhane ya da yemekhane olarak kullanılan yapılar gibi örnekler, daha çok şantiyelerde, inşaat süresi boyunca hizmet vermek üzere tasarlanmış geçici prefabrik yapılarıdır. Bunlar daha çok çelik ve ahşap malzemelerden oluşmaktadır. Bir anlamda portatifler, iş bitiminde sökülüp başka bir şantiyeye taşınırlar ve birkaç kez bu işlem yapıldıktan sonra, ekonomik ömürleri biter. Kalıcı prefabrik yapılar ise genelde betonarme olarak inşa edilirler. Bir kere kurulur, genelde sökülmez ve kuruldukları yerde kalırlar (Arslan, 2000).

Sunulan bu tez çalışmasında incelenen prefabrik yapılar kalıcı betonarme prefabrik yapılardandır. Betonarme prefabrik yapılar;

- Tek katlı ve küçük açıklıklı yapılar (konut, okul vb.)
- Tek katlı ve büyük açıklıklı yapılar (endüstri, spor, toplantı binaları vb.)
- Birkaç katlı yapılar (konut, okul, idare, laboratuvar binaları vb.)
- Çok katlı yapılar (büro, otel, hastane, konut vb.)

şeklinde gruplandırılmaktadır.

1.2.3. Prefabrik Yapıların Avantajları ve Dezavantajları

Prefabrik yapı sistemlerinin ekonomik olmadığı düşüncesi prefabrik yapıların üretiminde geleneksel yapı sistemlerinden farklı olarak makinelerin yoğun olarak kullanılması ve ön yatırım maliyeti bulunması gibi nedenlere dayanmaktadır. Ancak, prefabrik yapıların kullanımı uzun vadede yatırımcısı ve kullanıcılarına önemli kazançlar sağlamaktadır (Toprak, 2002). Prefabrik yapıların avantajları ve dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir (Hartland, 1975):

✓ Yüksek mukavemetli betondan imal edilen yüksek mukavemetli prefabrik betonarme elemanlar sayesinde, büyük açıklıklar daha küçük kesitlerle geçilebilmektedir.

✓ Prefabrik sistemlerde üretim çok daha hızlı ve seri bir şekilde gerçekleşmektedir. Bunun yanında bu sistemlerde kalıp kurma, bekleme, kalıp sökme vb. durumlar söz konusu olmadığı için bir yapının karkas sistemi çok kısa sürede oluşturulabilmektedir.

✓ Prefabrik yapılarda yapı iskele malzemesi, kalıp malzemesi, geçici destek elemanları ve benzeri malzemelere ihtiyaç duyulmadığından maliyetler azalmaktadır. Ayrıca yapım süresinin çok kısılması nedeniyle, kurulan tesislerin kısa sürelerde işletmeye açılması da sağlanmaktadır.

✓ Üretimin büyük bir bölümünün fabrikada yapılması, şantiye alanındaki çalışma süresini kısaltarak, ekonomi, işgücü ve zaman tasarrufu sağlamaktadır.

✓ Kış şartlarında kimi zaman durma noktasına gelen diğer yapım sistemlerine göre prefabrik yapılar, inşası sırasında genellikle kötü hava şartlarından etkilenmezler. Yani üretim iklime ve hava şartlarına bağlı olmadan devam edebilmektedir.

✓ Prefabrik yapıların bakım ve onarım ihtiyaçları diğer yapılara göre daha az olmaktadır.

✓ Prefabrik yapıyı oluşturan elemanlar uygun standartlarda eğitilmiş ve uzmanlaşmış kişilerin gözetimi altında titizlikle üretilmektedirler. Prefabrik elemanlar sıkı kalite kontrolünden geçirilmekte, böylece kusurlu imalat minimuma indirilmektedir. Bu durumda yapı ve onu oluşturan elemanların daha uzun ömürlü olmaları ve daha az bakıma ihtiyaç duymaları sağlanmaktadır.

✓ Prefabrik yapı elemanlarının içerisinde oluşturulan boşluklara elektrik ve su tesisatı gibi yapısal olmayan elemanlar kolaylıkla yerleştirilebilmektedir.

✓ Prefabrik yapılarda belirli yapı elemanlarına ihtiyaç duyulduğunda yapıyı oluşturan elemanlar birbirinden ayrılabilir ve tekrar birleştirilebilirler. Ayrıca mevcut yapıya rahatlıkla ek yapılabilir. Kolonların dış cepheye bakan yüzlerinde guse bırakılması buna örnek olarak verilebilir.

✓ Prefabrik yapı elemanlarının üretiminde yerinde dökme betonarme yapılar için zor veya bazı durumlarda imkansız olan şekil verme veya düzeltme yapılabilmektedir. Üretim esnasında doğal agregalar, çimentolar gibi çeşitli malzemelerin değişik biçimlerde kullanılması neticesinde farklı ürünler ortaya çıkarılabilmektedir. Bu tür uygulamalar eleman yüzeylerinde çeşitli kabartma ve dokular oluşturmak için kullanılarak farklı estetik görünüşler elde edilmesini sağlamaktadır.

✓ Projelendirme aşamasında standart ve tekrarlı detaylar kullanıldığından projelendirme ve tasarım aşaması hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Ayrıca prefabrik yapı üretiminde bilgisayarın kullanılmasıyla projelendirme ve kullanılacak malzemenin hesaplanması çok küçük sürelerde gerçekleşmektedir.

✓ Prefabrik yapıların inşaatlarda her şey projelendirme safhasında planlandığından ve kullanılacak elemanların sayıları belli olduğundan fiyat artışlarının maliyete tesiri olmamaksızın işin süratli bir şekilde devam etmesi sağlanmaktadır.

✓ Prefabrik yapıların inşasında kereste kullanımının neredeyse sıfıra yakın olmasından dolayı ormanların azalması büyük ölçüde engellenmektedir.

Prefabrik yapı teknolojisinde bahsedilen birçok üstünlüklere rağmen bazı olumsuz tarafları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar aşağıda sıralanmaktadır:

* Prefabrik yapıların birleşim noktalarında karşılaşılan sorunlar prefabrik yapı üretim teknolojisinin en önemli dezavantajlarından birisidir. Birleşim bölgelerinin tasarlanması, gerekli dayanımın sağlanması ve yapım esnasında kolaylıkla montaj yapılabilmesi için yeterli bilgi ve tecrübe gerekmektedir. Aksi halde proje üzerinde oldukça tatmin edici gözükün birleşim detayları uygulama esnasında yerine getirilmesi oldukça zor durumlar açığa çıkarabilmekte ve birleşimlerin eğilme momentini aktaracak şekilde rijit olarak teşkil edilmesinde büyük zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu durumda ek yerlerin rijitliğinin tam anlamıyla sağlanamaması depreme dayanıklılıkta ciddi sıkıntılar oluşturmaktadır.

* Prefabrik elemanlarda son dakika değişikliklerine yer verilemez. Dökme betonarme sistemlerin inşası esnasında meydana gelen yanlışlıkların düzeltilmesi prefabrik yapılara göre biraz daha elverişlidir. Bu yüzden prefabrik sistemlerde; tasarımda yüksek standart, kontrol ve detaylandırma önemli bir hale gelmektedir.

* Prefabrik elemanların tasarlanmalarının haricinde, nakliye, kaldırma vb. durumlar için bu yapı elemanlarına bir takım ilavelerin yapılması durumları söz konusu olmaktadır.

* Çok sayıda ve büyük boyutlara sahip prefabrik elemanların depolanması ve nakliyesi sırasında daha fazla alan ve araç ihtiyacının oluşması yapı maliyetini artırmaktadır. Bu durumda prefabrik yapı elemanlarının ağırlık ve boyutlarında birtakım sınırlamaların olması gerekmektedir.

* Düzensiz yapıların prefabrik olarak inşa edilmesi aşamasında farklı türde prefabrik elemanlar kullanılabileceğinden yapı maliyetlerinin artmasına söz konusu olacaktır. Çünkü

prefabrik yapılarda ekonomi ancak aynı tip yapı elemanlarının seri olarak üretimi ile sağlanmaktadır.

- ✘ Balkonlar, cepler veya çıkıntılar gibi özel detayların prefabrik elemanlarla meydana getirilmesi maliyetleri arttıracaktır.

- ✘ Yapı elemanlarının değişik zamanlarda üretilmesi ile elemanlar arasında oluşacak rötre farklarının uygun donatı detaylarının kullanımı ile ortadan kaldırılması gerekmektedir.

- ✘ Prefabrik yapı üretimi yerel olarak iş gücünü azaltabilmekte ve yerel malzemelerin kullanımını büyük ölçüde kısıtlayabilmektedir.

- ✘ Yangın açısından çelik yapılara göre daha avantajlı olsalar bile, az katlı yapılarda maliyetleri çelik yapılara göre daha fazladır.

1.2.4. Prefabrik Yapı Elemanları

Prefabrik yapı elemanları çubuk elemanlar, düzlem elemanlar ve kabuk elemanlar olmak üzere başlıca üç gruba ayrılabilir.

1.2.4.1. Çubuk Elemanlar

Bir boyutunun diğer boyutlarına oranla büyük olduğu yapı elemanlarıdır. Kirişler, kolonlar, çerçeveler, kemerler vb. elemanlar prefabrik yapı sistemlerinde çubuk elemanlar olarak sınıflandırılmaktadırlar.

Kiriş elemanlar, yatayda yüklerin aktarılmasını ve kolonlar arasında sistemin bütünlüğünün kurulmasını sağlayan elemanlardır. Kiriş kesitleri oluşturulurken dikkate alınması gereken bazı hususlar vardır. Bunlar, binanın fonksiyonunun ve kirişlerin üstlenmeleri gereken ek fonksiyonların göz önünde bulundurulmasıdır. Örnek olarak, endüstri yapılarında kirişlerin vinç kirişi görevini üstlenmeleri durumunda içlerinden servis sistemlerinin geçirilmesine imkan tanınacak şekilde üretilmesi gösterilebilir. Birleşimleri bağlantı şekillerine göre farklılık gösteren kiriş elemanlar, moment aktaran (rijit) ve moment aktarmayan (mafsallı) şekillerinde olmaktadır (Arslan, 2000).

Prefabrik kirişler, en kesitleri ve yükseklikleri sabit veya değişken olarak yapılabilirler. Şekil 1.1’de prefabrik kirişlere ait örnekler verilmektedir.



Şekil.1.1 Prefabrik kirişlere ait çeşitli örnekler

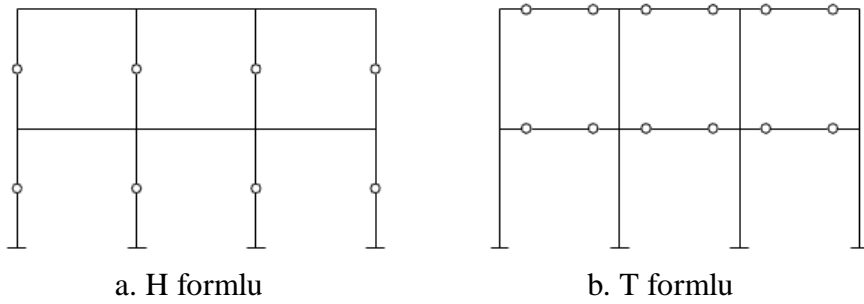
Kolon elemanlar, prefabrik sistemlerde döşeme ve kirişlerden gelen düşey veya yatay yükleri temele aktaran elemanlardır. Kolon elemanlar bir, iki veya üç kat yüksekliğinde olabilirler. Bu elemanlar kolon-kolon veya kolon-kiriş birleşimlerine sahip olabilirler ve bu birleşimler mafsallı veya rijit olarak oluşturulabilirler. Kolonlar değişik kesitlerde üretilebilirler (Şekil 1.2). Genellikle dikdörtgen en kesitli olan kolon elemanlar, kirişlerin oturmaları için, inceltmiş uçlu konsollar veya kısa konsollar şeklinde yapılabilirler.



Şekil 1.2. Prefabrik kolonlara ait çeşitli örnekler

Mafsallı kolon-kolon birleşimlerinin yapılacağı kolon elemanlarını, kat hizalarında birleştirmek yerine kat yüksekliklerinin yarı hizalarında birleştirmek daha uygun olmaktadır. Çünkü yatay ve düşey yükler altında yapılan analizlerde kolonların ortalarında oluşan momentlerin sıfıra yakın olduğu gösterilmiştir.

Çerçeve elemanlar genel olarak, T ve H şekillerinde oluşturulabilmektedir. Ayrıca ^ ve kemer şekillerinde oluşturulabildikleri bilinmektedir. Birbirleriyle ve kirişlerle olan ekleri mafsallı veya rijit olabilmektedir. Şekil 1.3'te T ve H formlu oluşturulan çerçevelere örnek verilmektedir.



Şekil 1.3. H ve T formlu çerçeveler (Arslan, 2000).

1.2.4.2. Düzlemsel Elemanlar

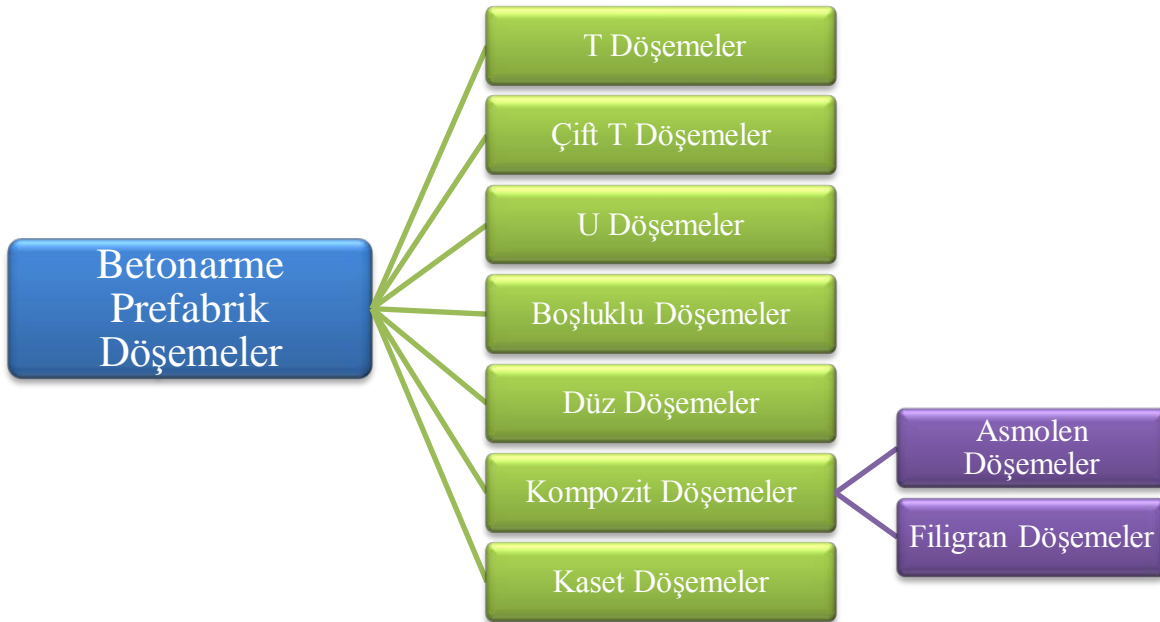
Düzlemsel prefabrik elemanlar döşemeler ve duvarlar olarak iki gruba ayrılmaktadır.

1.2.4.2.1. Döşemeler

Prefabrik iskelet sistemlerde genellikle ana çerçeve dışında kalan ikincil taşıyıcı sistem elemanları olarak görev yapan döşemeler, alt ve üst mekanları birbirinden ayırarak farklı

yaşama ortamları sağlayan, en önemlisi de kendi ağırlığını ve üzerine etkiyen yükleri kolonlar veya taşıyıcı duvarlar gibi düşey taşıyıcılara aktaran önemli yapı elemanlarıdır. Ayrıca düşey taşıyıcılarla beraber deprem, rüzgar gibi yatay yüklere maruz kaldıklarında yanal stabiliteyi sağlama işini üstlenirler.

Döşeme elemanları, prefabrik iskelet sistemlerde taşıyıcı eleman görevini üstlenirler ve bu elemanlar çeşitli malzemelerden ve çok çeşitli şekillerde oluşturulabilirler. Şekil 1.4'te prefabrik betonarme iskelet sistemlerde kullanılan döşeme elemanlarının çeşitleri verilmektedir.



Şekil 1.4. Betonarme Prefabrik iskelet sistemlerde kullanılan döşeme elemanlarının sınıflandırılması

Şekil 1.4'ten de görüldüğü gibi prefabrik betonarme döşemeler oldukça çeşitli şekillerde üretilmektedir. Prefabrik betonarme döşemelerle küçük açıklıklar geçilebildiği gibi büyük açıklıklarda geçilebilmektedir. Bu yüzden de döşeme elemanların kullanım amaçlarına göre birçok çeşidi bulunmaktadır. Bu tip döşemeler genellikle taşıyıcılık özellikleri ile ön planda bulunmalarından dolayı, büyük açıklıkların geçilmesinde en çok tercih edilen döşeme çeşitlerindedir. Elemanlarının boyutları, kullanım şekline ve geçtikleri açıklıklara göre değişmektedir. Bu elemanlar öngerilmeli ve öngerilmemiş olarak üretilmektedirler. Prefabrik betonarme döşemelerin eleman boyutlarının büyük olmasından dolayı gerekli olan

eleman sayısı ve montaj işleri azalmaktadır. Ancak eleman boyutlarının büyük olması nakliyede sıkıntılar yaratmakta ve kalıp işçiliğinde artış gözlemlenmektedir.

T Döşemeler, nervürlü plaklara kıyasla nervür yüksekliklerinin oldukça fazla olduğu döşeme plaklarıdır. Şekil 1.5'te T döşemeler için örnek verilmektedir.



Şekil 1.5. T döşeme örneği (URL-3, 2012).

Öngerilme işleminin uygulanması sonucunda T plakların çok daha büyük açıklıkları geçmesi ve buralarda rahatlıkla kullanılabilmesi sağlanmaktadır. Bu tip döşemelerde nervür yükseklikleri kullanım alanı ve amacına göre değişkenlik gösterebilmektedir.

Çift T Döşemeler, betonarme prefabrik sistemlerde en çok kullanılan elemanlardan biri olup, çok büyük açıklıkları geçmek veya yapıya aşırı yüklemelerin etkidiği durumlarda tercih edilebilmektedir. Bu çeşit döşemeler düz yüzeylere ve yivli kesitlere sahiptirler. Şekil 1.6'da görüldüğü gibi bir çift T döşeme elemanında iki nervür ve nervür yanlarında her iki tarafa doğru konsol plaklar bulunmaktadır.



Şekil 1.6. Çift T plak döşeme için uygulama örnekleri (URL-3, 2012).

Çift T plaklar diğer beton prefabrik elemanlar gibi üretim tesislerinde normal donatılı veya öngerilmeli olarak üretilmektedir. Öngerilmeli olarak üretilen çift T döşeme kesitleri daha incedir ve nervür yükseklikleri daha azdır. Bu durumda öngerilmeli çift T döşemelerinde hafiflik ve malzeme tasarrufu sağlanmış olur. Ayrıca bu döşeme elemanlarının boyutsal özellikleri üretildikleri ülkelere ve üretici firmalara göre farklılıklar göstermektedir. Prefabrik çift T döşeme elemanlarının montajında kaynaklı ve pimli birleşimler uygulanmaktadır.

U döşemeler, kaset döşemelere göre kalıp ve demir işçiliği daha az olan döşeme elemanlarıdır. U döşeme plakların nervürlü üretimi de bulunmaktadır. Nervürler ya döşeme plağını çepeçevre sarar ya da sadece plağın kenarlarında bulunmaktadır. Şekil 1.7’de U tipi döşeme için örnekler verilmektedir.



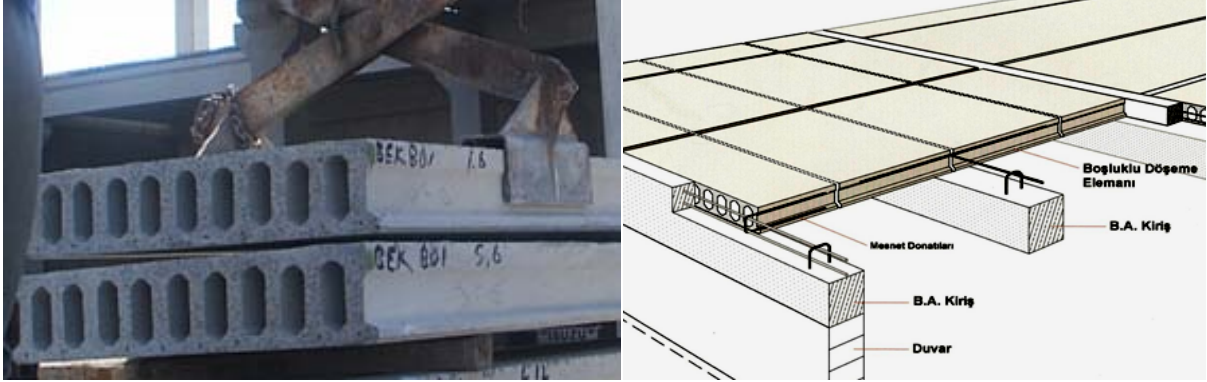
Şekil 1.7. U tipi döşeme örnekleri (URL-3, 2012).

Aşağıda U döşemelere ait bazı özellikler verilmektedir:

- Boyutlarında çeşitliliğin mümkün olduğu U plakların ağırlıkları fazladır.
- Kaset döşemelere kıyasla kalıp ve demir işçiliği daha azdır.
- Nervür aralıklarında aydınlatma boşlukları bırakılabilmektedir.
- Öngerilmeli olarak üretimleri yapılabilmektedir (Yaklaşık 15m açıklıklar rahatlıkla geçilebilmektedir).

Boşluklu döşemeler, bir doğrultuda çalışan sabit kalınlıklı boşluklu döşeme panolarının yan yana oturtulması ve birleştirilmesiyle yapılan döşemelerdir (Ayaydın, 1981). Sabit yükün azaltılması için döşeme kalınlığı içerisinde boşlukların bırakıldığı boşluklu döşemeler, büyük

yükler altında geniş açıklıkların geçilmesini sağlamaktadırlar. Şekil 1.8’de boşluklu döşeme örnekleri ve yerleşim düzenleri görülmektedir.



Şekil 1.8. Boşluklu döşeme örneği ve yerleşim düzeni (URL-4, 2012).

Normal veya öngerilmeli olarak imal edilebilen bu tip döşemelerin, öngerilmeli üretiminin daha yaygın olduğu bilinmektedir. Çünkü öngerilmeli yapılması bu döşeme elemanları ile daha fazla açıklıkların kolaylıkla geçilebilmesine imkan sunmaktadır (Ayaydın, 1981). Bu tip döşemelerde boşlukların bulunması üretimin, dolu kesitli döşeme plaklara göre daha zor olmasına sebep olmaktadır. Bu tip döşemeler aşağıdaki gibi sıralanan dezavantajlara sahiptir.

- × Kalınlıkları fazladır.
- × İmalatı güçtür.
- × Plaklarda delik açma imkanları çok sınırlıdır.

Tüm bu dezavantajlara rağmen boşluklu yapının sağladığı birçok avantaj aşağıda sıralanmaktadır:

- ✓ Boşluklu yapı bu tip döşeme plaklarının daha hafif olmasını sağlamaktadır.
- ✓ Yatayda tesisat düzenlenmesinin kolaylıkla yapılmasına imkan vermektedir.
- ✓ Diğer betonarme prefabrik elemanlara kıyasla daha iyi bir ısı yalıtımı sağlamaktadırlar.

- ✓ İstiflenmeleri kolaydır.
- ✓ Uygulama sonrası tavanda düz bir görünüm elde edilmektedir.

Düz döşemeler, diğer döşeme tipleri gibi ağır ve hareketli yükleri taşıyamamaktadırlar. Bundan dolayı genellikle, fazla yük binmeyen yerlerde döşeme veya çatı plakları olarak

kullanılmaktadırlar. Genellikle öngermesiz olarak üretilen bu tip döşemelerin öngermeli olarak üretilenleri de vardır.

Maksimum 10m olan büyük açıklıkların geçilebilmesi ancak bu tip döşemelerin öngermeli üretimi ile mümkün olabilmektedir. Düz döşeme plakları yaklaşık olarak 25m² alanları geçebildiği için daha büyük açıklıkların geçilmesi durumunda diğer tip döşeme plakları tercih edilmektedir (Yücesoy, 1998). Düz döşemelerin aşağıda sıralanan avantajları ve dezavantajları vardır:

- ✓ Kalıp işçiliğinin az olması ve donatı yerleşiminin kolay olmasından dolayı bu tip elemanların üretimi diğerlerine göre oldukça kolay ve hızlıdır. Bu durumda maliyetleri de oldukça düşüktür (Aydın, 1995).

- ✓ Montajları hızlı ve kolaydır.

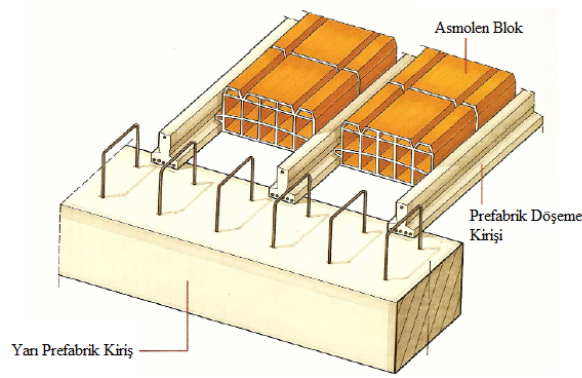
- ✓ Donatıdan, betondan ve zamandan tasarruf sağlayan bir yapı elemanıdır.

- ✓ Diğer tip döşemelere göre ucuza mal olmaktadır.

- ✗ Tesisat düzenlemesi işleminde yapısal yüksekliğin artırılması bu tip döşemeler için bir dezavantajdır.

Kompozit döşemeler, Şekil 1.4'ten de anlaşılacağı üzere asmolen döşemeler ve filigran döşemeler olmak üzere iki grupta incelenecektir.

Asmolen döşemeler, asmolen döşeme kirişleri ile bunların arasına döşenen asmolen tuğlalardan oluşmaktadırlar. Asmolen tuğlalar, statik yük taşımayan sadece dolgu malzemesi görevini üstlenen yapı malzemeleridir ve bu dolgu malzemeleri bina döşemelerinde ısı ve ses izolasyonu sağlamaktadırlar. Döşemelerde kullanılan nervür kirişler çelik veya betonarme olarak üretildiği için kompozit olarak çalışmaktadırlar. Böylece diğer döşeme sistemlerine göre daha sağlam olmasının sebebinin oluşturmaktadır. Ayrıca, asmolen prefabrik döşeme kirişleri asmolen döşeme sisteminde kullanılan döşeme kalıplarından kurtulmak için tercih edilmektedirler. Şekil 1.9'da asmolen döşemelere ait bir örnek verilmektedir.



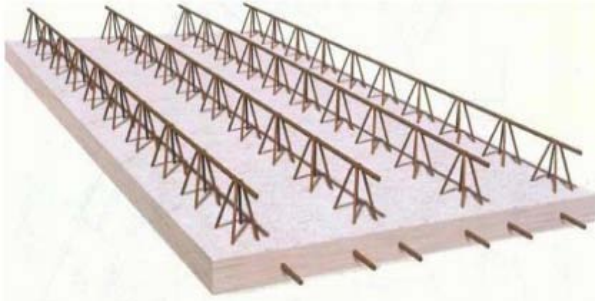
Şekil 1.9. Asmolen döşeme örneği (URL-3, 2012).

Asmolen döşeme imalatının sabit ağırlığı azaltma ve maliyeti düşürme gibi başlıca iki amacı vardır:

✓ Döşemenin kendi ölü ağırlığını azaltmak: Bu amaç ya çekme bölgesindeki yük taşımaya katkısı olmayan betonu boşaltmakla ya da burayı hafif malzemelerle doldurmak suretiyle gerçekleştirilmektedir.

✓ Beton dökümleri için gerekli olan kalıp işçiliğini azaltmak böylece yapı maliyetini düşürmek: Bu durum, betona göre daha ucuz olan dolgu malzemelerinin kullanılması ile mümkün olabilmektedir.

Filigran döşemeler, mütemadi döşeme hesabı yapılarak çözümlenen döşeme tipidir. Genellikle çok katlı konut tipi yapılarda kullanılmaktadır. Şekil 1.10'da filigran döşeme örneği verilmektedir.



Şekil 1.10. Filigran döşeme örnekleri (URL-4, 2012).

Bu tip döşemelerin kullanılmasındaki başlıca amaçlar aşağıda sıralanmaktadır:

✓ Bu amaçlardan en önemlisi döşeme üzerine yapılan ve kesitte üçgen olan donatı sisteminin varlığıdır. Bu sistemin amacı, filigran döşemelerin üretimden sonra taşımada, stoklamada ve montajda eğilme rijitliğini arttırmak ve aynı zamanda kompozit kesitin oluşmasında yarar sağlamaktır.

✓ Yerinde döküm betonu ve yapım süresini azaltmak için döşemelerin orta kısımları dolu tasarlanmaktadır.

✓ Düz döşeme yapımında kalıp ve iskele kurulmasını ortadan kaldırmaktadır.

✓ Montajları kolay ve hızlıdır.

✓ Kullanılan deprem etriyeleri ve pürüzlendirilmiş üst yüzey sayesinde kompozit sistem oluşturulmaktadır.

✓ Alt yüzeyin pürüzlendirilmeden yapıldığı durumda, bu kısımların sıva gerekmeksizin hemen boyanma imkanı bulunmaktadır.

✓ Tesisat düzenlenmesi için üretim esnasında gerekli boşlukların bırakılması mümkündür.

✓ Öngerilmeli olarak üretilmeleri, donatıdan tasarruf sağlanmasına imkan vermektedir.

✓ Çeşitli yalıtım uygulamalarına (ısı, ses, yangın gibi) olanak sağlamaktadır.

Kaset döşemeler, iki yönden kirişli olan plak elemanlardır. Bu plak elemanların hafif olmaları ve istenilen durumlarda kolaylıkla nervürler arasında boşluklar oluşturulabilmesi gibi belirgin avantajları vardır. Fakat bu elemanların üretim sırasında kalıplarının hazırlanması, donatının yerleştirilmesi ve öngerilme işlemlerinin yapılması oldukça zor olmaktadır.

1.2.4.2.2. Duvarlar

Bir hacmin yan yüzünü yekpare olarak örten dolu kesitli düzlemsel elemanlar duvar panoları olarak isimlendirilmektedir. Asıl görevleri yapının her iki doğrultuda da rijitleştirilmesini sağlamak olan duvar panoları, deprem ve rüzgar etkilerinin olmadığı durumlarda ise düşey yüklere karşı dayanım sağlarlar. Bu durumdan da anlaşılacağı üzere, duvar panolarının çeşitli amaçlar için kullanılan türleri vardır ve bunlar kullanım alanlarına

göre bölme duvar panoları, rijitleştirici duvar panoları ve taşıyıcı duvar panoları olmak üzere sınıflandırılabilirler.

Bölme duvar panoları, taşıyıcı değildirler. Sadece kendi ağırlıklarını taşırlar. Ancak, üzerlerine yatay yük etkidiğinde bu yükleri, duvarlar ve döşemeler gibi taşıyıcı görevleri olan elemanlara aktarabilen ve mekanı bölme amaçlı kullanılan duvar panolarıdır.

Rijitleştirici duvar panoları, rijitlik duvarları olarak da ifade edilen bu panoların kullanılmasının amacı, taşıyıcı duvarların burkulmasını önlemektir.

Taşıyıcı duvar panoları, kendi ağırlıkları dışında üzerine etkiyen yatay ve düşey yükleri taşıyan yapı elemanlarıdır.

Duvar panolarının taşıyıcı veya rijitleştirici olarak kullanılması gerekli durumlarda, kat yüksekliğinden daha az yükseklikte yapılmaması gerekmektedir. Yapıldığı durumlarda istenilen özellikleri göstermemektedirler. Ayrıca taşıyıcı veya rijitleştirici duvar panoların düşey ek yerleri panolara dik bir taşıyıcı duvar veya rijitlik duvarı ile ara kesit çizgisine gelecek şekilde olmalıdır (TSE 9967, 1992).

1.2.4.3. Kabuk Elemanlar

Kalınlığı diğer boyutlarına göre oldukça ince olan ve eğrisel yüzeylere sahip prefabrik yapı elemanları kabuk elemanlar olarak bilinmektedir. Taşıma görevlerini üzerlerine etkilen yükleri yüzeylerine paralel olarak yönlendirerek gerçekleştirirler. Bu elemanlar kalınlıklarının az olmasından dolayı hafiflerdir ve malzemede tasarruf sağlanmaktadır. Kabuk elemanların avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmektedir (Ayaydın, 1989).

- ✓ Yapılarından dolayı geniş açıklıkların geçilmesine olanak sağlarlar.
- ✓ Değişik biçimlerde oluşturulabildiklerinden dolayı estetik etkilere sahiplerdir.
- ✓ Kabuk elemanlara sahip yapılar ülkelerin ekonomik durumu ve teknik olanaklarını yansıtmakta ve yıllardır bu amaçla inşa edilen birçok yapı mevcuttur.

- * Kabuk elemanların hesapları oldukça karışık ve zordur, özellikle kenar detayların uygulanmasında ciddi zorluklar yaşanmaktadır.

- * Biçimlerinden dolayı çubuk ve düzlemsel elemanlara kıyasla kalıp maliyeti ve işçiliği pahalıdır.

1.2.5. Prefabrik Taşıyıcı Sistemler

Prefabrik betonarme taşıyıcı sistemler aşağıdaki sınıflandırma doğrultusunda oluşturulmaktadır (Aydın, 1995; Özden, 1988).

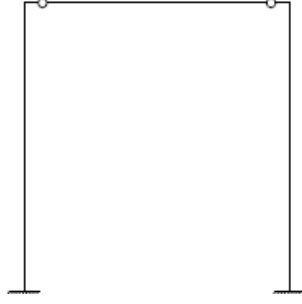
- Kolon – Kiriş Sistemler
- Kolon – Döşeme Sistemler
- Panolu Sistemler
- Hücre Sistemler
- Karışık Sistemler

1.2.5.1. Kolon–Kiriş Sistemler

Bu sistemler isminden de anlaşılacağı üzere yüklerin zemine bir iskelet vasıtasıyla aktarılmasını sağlayan prefabrik kolon ve kiriş elemanlardan oluşmaktadırlar. Düğüm noktalarının mafsallı yada rijit olarak tasarlanabildiği kolon–kiriş sistemlerin panolu sistemlere göre en önemli tarafı, taşıma ve bölme işlevlerinin farklı elemanlar tarafından gerçekleştirilmesidir. Bu durumda duvarlar taşıyıcı değil mekanı bölme işlevinde bulunmaktadır. Bu yüzden kolon–kiriş sistemleri genellikle bölme duvar ihtiyacının çok az olduğu endüstri yapılarında kullanılır. Ayrıca bu sistemlerde gerek duyulduğunda yatay yükleri alabilecek yerinde dökme veya prefabrik perde elemanlar ya da prefabrik pano duvarlar kullanılmaktadır.

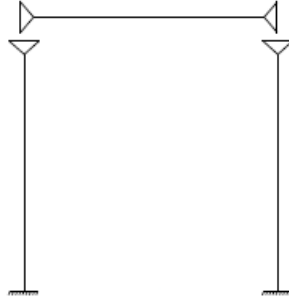
Düğüm noktalarının mafsallı yada rijit olarak tasarlanabildiği kolon–kiriş sistemler statik açıdan üç farklı şekilde oluşturulabilirler.

▲ Ankastre kolonlara oturan sabit mafsallı kirişlerle kurulan sistemler Şekil 1.11’de verilmektedir (Tümer, 2006).



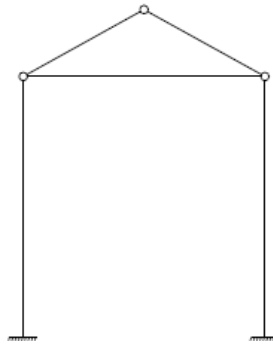
Şekil 1.11. Sabit mafsallı birleşim örneği

▲ Ankastre kolonlara oturan rijit bağlantılı kirişlerle kurulan sistemler Şekil 1.12’de verilmektedir (Tümer, 2006).



Şekil 1.12. Rijit bağlantılı birleşim örneği

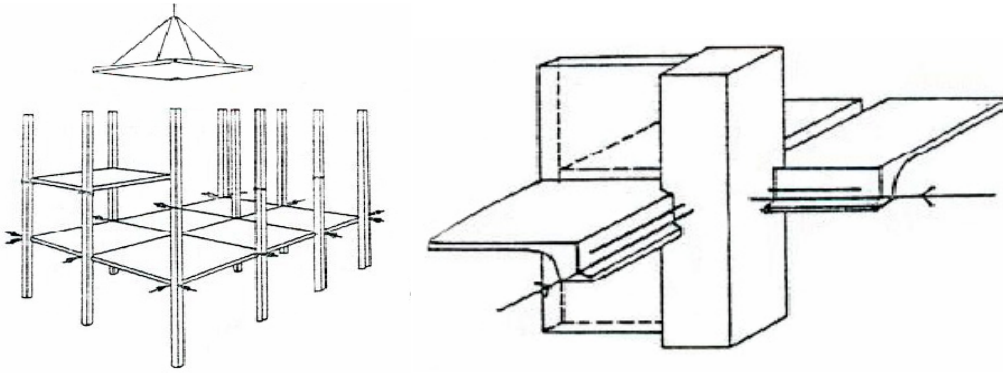
▲ İki kiriş ve bir gergi elemanı ile oluşturulan üçgen kirişli sistemler Şekil 1.13’te verilmektedir (Tümer, 2006).



Şekil 1.13. Gergi elemanının kullanılmasıyla oluşan birleşim örneği

1.2.5.2. Kolon-Döşeme Sistemler

Özel yapım metotları gerektiren bu sistemler, döşeme panolarının doğrudan kolonlara, perde veya prefabrik pano duvarlara gerekli detayların göz önüne alınarak oturtulduğu ve yatay yüklerin döşemeler tarafından diyafram oluşturularak düşey taşıyıcılara aktarıldığı sistemlerdir. Şekil 1.14'te kolon-döşeme sisteminin oluşturulmasına ait örnek verilmektedir (Anonim, 1997).



Şekil 1.14. Kolon-döşeme sistemlerinin montaj şekli ve sisteme ait birleşim detayı

Kolon-döşeme sistemleri yerde üst üste dökülmüş döşemelerin kaldırılıp prefabrik kolonlar üzerine oturtulmasıyla ve prefabrik döşemelerin ve prefabrik kolonların öngerilme donatısı ile birleştirilmesiyle oluşan sistemlerdir.

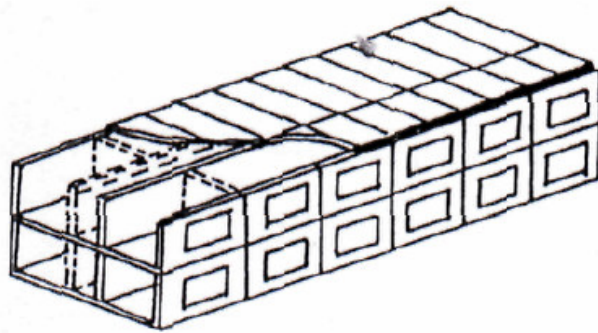
1.2.5.3. Panolu Sistemler

Genellikle konut türü yapılarda kullanılan panolu sistemlerin ana elemanları taşıyıcı olan duvar panelleridir. Yükler duvar panellerinin yüzeyleri boyunca taşınır. Bu sistemlerde taşıyıcı sistemin oluşturulmasıyla iç ve dış mekan duvarları da oluşturulmuş olmaktadır. Bu yüzden de genellikle çok katlı yapıların inşasında tercih edilmektedirler. Panolu sistemlerin hızlı bir şekilde inşa edilmesi ve yapının ağırlığını azaltmasından dolayı tercih sebebi olmaktadır. Ayrıca, panolu sistemlerde duvar panoları bir kat yüksekliğinde yapılmalıdır. Döşemelerden gelen düşey yükler panolu sistemlerin yüzeyleri boyunca önce

birbirlerine daha sonra da temele aktarılırlar. Panoların birleşim bölgeleri yatay yüklerin etkisi altında oluşacak olan kesme kuvvetine karşı dayanıklı olarak projelendirilmelidir. Bu durumda, birleşim bölgelerinde tesisat donanımının bulundurulması ve pano ara yüzeylerinin kenetli olarak yapılması kesme kuvvetine karşı birleşim bölgelerinin direnç kazanmasını sağlar.

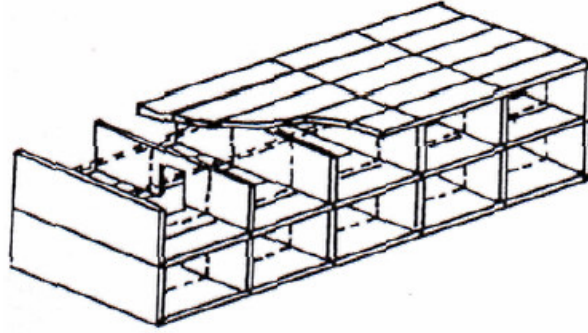
Duvar panoları, yapıya yerleştirilme doğrultuları açısından üç şekilde projelendirilmektedirler:

Duvar panolarının yapının uzun kenarı boyunca yerleştirilmeleriyle oluşturulan sistemlerde, yapıların uzun kenarları boyunca yerleştirilen duvar panoları döşemelerden gelen düşey yükleri karşılarken, deprem etkisi ile oluşan yatay yükler ise her iki doğrultuda da yerleştirilen duvar panoları tarafından karşılanmaktadır. Bu tip sistemlerde kat döşemeleri tek doğrultuda çalışmaktadırlar. Şekil 1.15'te uzun yapının uzun doğrultusunda yerleştirilen panolu sisteme ait örnek verilmektedir (Tümer, 2006).



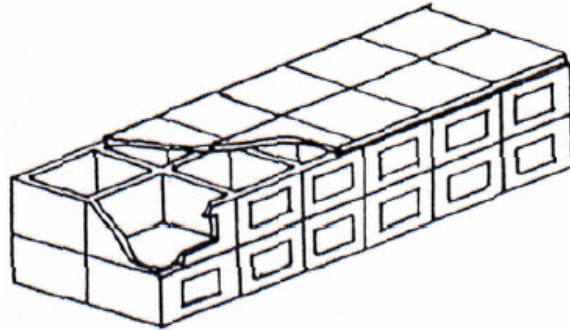
Şekil 1.15. Uzun doğrultuda yerleştirilen panolu sistem örneği

Duvar panolarının yapının kısa kenarı boyunca yerleştirilmeleriyle oluşturulan sistemlerde, yapıların kısa kenarları boyunca yerleştirilen duvar panoları döşemelerden gelen düşey yükleri karşılarken, deprem etkisi ile oluşan yatay yükler ise her iki doğrultuda da yerleştirilen duvar panoları tarafından karşılanmaktadır. Bu tip sistemlerde kat döşemeleri duvar panolarının yapının uzun kenarı boyunca yerleştirilmeleriyle oluşturulan sistemlerdeki gibi tek doğrultuda çalışmaktadırlar ve örneği Şekil 1.16'da verilmektedir (Tümer, 2006).



Şekil 1.16. Kısa doğrultuda yerleştirilen panolu sistem örneği

Duvar panolarının yapının her iki kenarı boyunca yerleştirilmeleriyle oluşturulan sistemlerde ise, yapıların her iki kenarları boyunca yerleştirilen duvar panoları döşemelerden gelen düşey yükleri karşılar, deprem etkisi ile oluşan yatay yükler ise düşey yükler gibi yine iki doğrultuda bulunan duvar panoları tarafından karşılanmaktadır. Bu tip sistemlerde kat döşemeleri iki doğrultuda çalışmaktadırlar. Şekil 1.17’de iki doğrultuda çalışan kat döşemelerine örnek verilmektedir. Ayrıca bu tip projelendirmeler, deprem bölgelerinde kullanılan en elverişli sistemlerdir (Tümer, 2006).



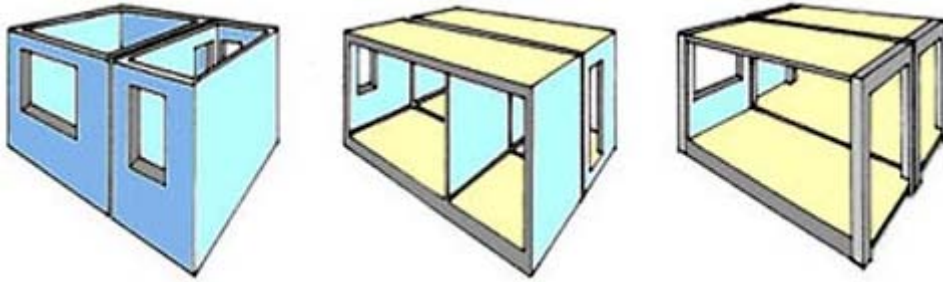
Şekil 1.17. Her iki doğrultuda yerleştirilen panolu sistem örneği

1.2.5.4. Hücre Sistemler

Hücre sistemler, taşıyıcı panel ve döşeme elemanlarının ayrı ayrı üretilip şantiyede birleştirilmeleri yerine bu elemanların üretim tesislerinde monolitik olarak oluşturulmaları ve şantiye ortamında birleştirilmeleri esasına dayanmaktadırlar. Hücrelerin yan yana, üst üste konmaları ve sistemin birlikte çalışmasını sağlayacak birleşim elemanlarının yerleştirilmesi

suretiyle tüm yapının taşıyıcı sisteminin, bölme duvarları ve döşemeleri ile üretilmesi sağlanmaktadır. Duvarlar kat ve çatı döşemelerinden gelen düşey yükleri ve her iki doğrultudaki yatay yükleri alırlar. Hücreler arasındaki düşey ve yatay ekler, yük aktarımını sağlayacak şekilde olmalıdır.

Prefabrik üretimin gelişmiş yöntemlerinden birisi olan hücre sistemlerdeki çalışmalar, diğer yöntemlere nazaran çok daha hızlı gerçekleşmektedir. Profesyonel çalışmaların sonucunda ortaya çıkan hücre sistemler, şantiyelerde, uzmanlaşmış az bir işçi sayısı ile tamamlanabilmektedir. Kutu, halka ve iskeletli hücreler olarak üretilen bu prefabrik sistemlerin ağırlıkları 70-100kN arasında değişmektedir. Şekil 1.18'de üretilen hücre sistemlere ait örnekler verilmektedir.



Şekil 1.18. Kutu, halka ve iskeletli hücre sistemlere ait örnekler (URL-5, 2012).

Her yöntemin olduğu gibi bu yöntemde zor tarafları bulunmaktadır. Hücre sistemler diğer prefabrik elemanlara göre (tekil pano elemanları) daha ağır olduklarından nakliye ve kaldırma problemleri olmaktadır. Bu tür sistemler diğer prefabrik sistemlere göre daha iyi düşünülerek tasarlanmalıdır. Ayrıca fabrikanın inşaat yerine yakın olmaması nakliyede problemler oluşturur. Bu yüzden hücre sistemlerin seçiminde oldukça dikkatli ve titiz davranılmalıdır.

1.2.5.5. Karışık Sistemler

Karışık sistemler, en az iki farklı taşıyıcı sistemin çeşitli şekillerde birleştirilmesiyle meydana gelen prefabrik sistemlerdir. Örneğin ana taşıyıcı sistemi iskelet olan (kolon ve kirişler) bir binanın dış cephesi taşıyıcı panellerden, asansör yuvası merdiven boşluğu gibi

elemanları da hücrelerden oluşabilir. Bu tür yapılarda birden fazla sistem kullanıldığı için farklı kapasitelerde birden fazla vinç ve iyi eğitilmiş, tecrübeli şantiye elemanlarına ihtiyaç vardır. Ayrıca tasarım aşamasında planlamanın çok iyi bir şekilde yapılması gerekmektedir.

1.2.6. Prefabrik Yapılarda Birleşim Noktalarının Özellikleri

Tasarımı yapılan ve uygulanması düşünülen birleşim bölgelerinin ilk olarak sahip olması gereken özellik, kullanım ömrü boyunca kendisine etki etmesi beklenen sabit yükler (taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanların ağırlıkları), düşey hareketli yükler (yapı üzerinde bulunan eşya ve insan gibi geçici yükler), yatay hareketli yükler (deprem ve rüzgar kuvvetleri) veya olması muhtemel toprak ve su basınçlarından dolayı oluşan yüklere karşı koyabilecek yeterli dayanıma sahip olmasıdır.

Prefabrik yapılarda kolon-kiriş, kolon-döşeme bağlantıları için çeşitli detaylar uygulanmaktadır. Bu bağlantılar genellikle en basit şekliyle mafsallı yapılmakta, zaman zaman rijit uygulamalar da gözlenmektedir (Arslan, 2000). Bağlantılar için tahta, mantar, bakalit, PVC, çelik, kurşun vb. gibi genelde rijit ara malzemeler kullanılmaktadır. Yüksek elastik şekil değiştirme özelliğine sahip, uzun ömürlü, ekonomik ve uygulaması kolay elastomer (sentetik kauçuk) mesnetlerin prefabrik yapıların ihtiyaçlarına adapte edilmiş tiplerinin bağlantı bölgelerinde kullanımı da yaygın olarak görülmektedir (Çolak, 1996). Bazı durumlarda ara malzeme kullanılmadan betonun betona oturtulduğu uygulamalar da görülmektedir. Ara malzemelerin kullanılmadığı veya bu malzemelerin rijit olmaları durumunda kirişlerin sehimlerine bağlı olarak mesnet noktalarındaki yük dağılımı hesaplanandan farklı olmakta, bu da çoğu zaman hasarlara neden olmaktadır (Özmen vd., 1997; Arslan, 2000; Tankut vd., 2000).

Prefabrik yapılarda yangına karşı, ekstra önlemler almaya gerek yoktur. Fakat birleşim bölgeleri için bu durum geçerli değildir. Bu bölgelerde yangından dolayı meydana gelecek hasarlar yapının genelini etkileyeceğinden, özellikle pas payının yeterli seviyelerde olmasına dikkat edilmelidir.

Birleşim bölgeleri tasarlanırken maliyetlerinin de makul ölçülerde kalmasına dikkat edilmelidir. Moment aktaran bağlantılar daha pahalıdır dolayısıyla, yapının rijitlik, stabilite ve

benzeri özelliklerine zarar vermemek şartıyla mümkün olduğu kadar moment aktaran bağlantıları azaltmalıdır.

Prefabrik yapılarda bağlantıların sağlaması gereken koşullar aşağıda sıralanmaktadır (Arslan, 2000; TSE 9967, 1992; Ayaydın, 1987).

✓ Prefabrik elemanların düğüm noktaları, yapının özelliğine göre o yerde oluşabilecek tüm normal kuvvet, kesme kuvveti, eğilme ve burulma momenti gibi zorlamaları emniyetle taşınmalı ve bağlanan elemanlardan birinden diğerine emniyetle aktarabilmelidir.

✓ Bağlantılarda veya mesnetlerde oluşabilecek dönme, yer değiştirme, deformasyonlar ve bağlantıyı oluşturan elemanların rölatif deformasyonları kabul edilebilir sınırlar içinde olmalıdır.

✓ Birleşim bölgesi sünek olarak tasarlanmalıdır. Yani birleşimin plastik deformasyon yapabilme kapasitesi sonuna kadar kullanılmalıdır. Bunun sonucunda zemindeki farklı oturmalar sonucunda oluşabilecek farklı deformasyonlara imkan verilebilir.

✓ Birleşimlerin sıcaklık değişimi, rötre ve sünme gibi etkilerden doğabilecek iç kuvvetlere karşı dayanıklı olarak tasarlanmaları gereklidir.

✓ Yapının birleşim bölgeleri korozyona karşı korunmalı ve yangına dayanıklı olmalıdır.

✓ Yapının montaj süresinin kısa olması için, zaman alıcı ve uğraştırıcı birleşim detaylarından kaçınılmalıdır.

✓ Birleşimler kolaylıkla kontrol edilebilmeli ve gerektiğinde düzeltme yapılabilecek esnekliğe sahip olmalıdırlar.

✓ Birleşim bölgeleri tasarlanırken maliyetlerinin, toplam maliyetlerin yanında makul ölçülerde kalmasına dikkat edilmelidir.

✓ Birleşim bölgeleri yeterli bir ses yalıtım özelliğine sahip olmalıdır.

✓ Dış ortamda yer alan birleşim bölgelerinin su ve hava geçirimsizliği sağlamalı ve ısı kaybı oluşturmamalıdır.

✓ Birleşim bölgelerinin uygulama sırasında zorluk çıkarmamaları için gerekli koşul ve önlemler proje safhasında alınmalı ve proje etüdü çok iyi yapılmalıdır.

✓ Bütün bu özellikleri sağlayan birleşim bölgelerinin mimari açıdan estetik bir görünüm sağlanmalıdır.

1.3. Prefabrik Yapılar Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Cheok ve Lew (1993), 1/3 oranında küçültülmüş bir prefabrik yapının düğüm noktalarının rijitlik katsayılarının laboratuarda deneysel yöntemlerle belirlenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Test için belirlenen rijitlik katsayıları 1985 Uniform Building Code standartlarından 2. ve 4. Deprem bölgesine göre alınmıştır. Test programının ana esası yüksek depremselliğe sahip bölgelerde yapılan prefabrik yapıların birleşim bölgelerinin ekonomik açıdan değerlendirilip, daha hesaplı projelendirme tekniklerinin geliştirilmesidir. Test, dairesel yüklemeler altında farklı tipte donatılara ve birleşim tekniklerine sahip prefabrik yapılar üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Park (1995), son zamanlarda uygulama oranı oldukça artan Prefabrik Yapılar üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışmada prefabrik döşemelerin, moment aktaran çerçevelerin ve taşıyıcı duvarların bağlantı rijitliklerinin belirlenmesi ve yapılar üzerinde sismik analizler gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Rizkalla ve Soudki (1995), deprem bölgelerindeki prefabrik yapıların taşıyıcı duvarlarının yataydaki birleşimleri üzerine bir çalışma yapmışlardır. İki aşamadan oluşan ve altı yıllık bir araştırma sonrasında yayınlanan bu çalışmada öncelikle laboratuvar modeli üzerinde onbeş birleşim noktasına sahip bir taşıyıcı perdenin önceden hesaplanan rijitlik katsayılarına göre model üzerinde dairesel yükleme testleri yapılmıştır ve daha sonra model üzerinde güncelleme yapılarak bağlantı noktalarının rijitlikleri tekrar hesaplanmıştır. İkinci aşamada ise aynı aşamalar kullanılarak 32 katlı bir prefabrik bina üzerinde tüm işlemler tekrarlanmıştır.

Saqan (1995), depreme karşı dayanıklı prefabrik yapıların yarı rijit bağlı kolon-kiriş birleşimlerinin değerlendirilmesi üzerine bir çalışma yapmıştır. Araştırma programının temel amacı, minimum maliyetle dinamik yüklere karşı en iyi şekilde direnç gösterebilecek prefabrik yapıların birleşim bölgelerini tasarlamaktır. Bu çalışmada göz önüne alınan bağlantı tipleri elastik olmayan akma prensibine, kayma bağlantıları arasında oluşan sürtünmelere ve zeminde oluşan küçük yer değiştirme esaslarına bağlı olarak tasarlanmıştır. Çalışmalar için dört adet yarı ölçekli prefabrik yapı oluşturulmuş ve üzerlerine dairesel yüklemeler etkittirilmiştir. Çalışma sonunda yapının düğüm noktalarına ait rijitlik katsayıları sunulmuştur.

Zhu vd., (1995), dinamik yükleme koşulları altında M- θ davranışının inceleneceği esnek düğüm noktalı bir yapı modellemiştir. Modelin açıklanabilmesi için gerekli dört parametre değerlendirilmiş ve farklı bağlantı tipleri için mevcut test verileri sunulmuştur. İleri sürülen bu model ile esnek düğüm noktalı bir çerçevenin lineer olmayan dinamik davranışı elde edilmiştir. Sonuçlar yapıya ait esnek düğüm noktalı birleşimlerin, yapının titreşim özelliklerini son derece değiştirdiğini göstermiştir.

Awkar ve Lui (1999) deprem etkilerine maruz, çok katlı esnek bağlantılı yapıların teorik analizleri üzerine çalışmışlardır. Oluşturulan modelde birleşim noktalarının rijitliği, yapının geometrik ve malzeme özelliklerine göre belirlenmiştir. Birleşim noktaları çift yönlü hareket edebilen bir yay eleman olarak modellenmiştir. Yapının geometrik düzensizliği ve elemanlar üzerindeki normal kuvvetler, rijitlik formülasyonunda stabilite fonksiyonunun oluşturulmasında dikkate alınmıştır. İki farklı deprem etkisine maruz bırakılmış iki katlı ve üç farklı birleşim tipinden (rijit, yarı-rijit, esnek) oluşturulan yapının dinamik karakteristikleri, yapının kendi modal davranışları referans alınarak incelenmiştir. Bu çalışma, yapıların düğüm noktalarındaki rijitliğin esnek olmasının yüksek katlı yapılardan düşük katlı yapılara göre önem kazandığını, tabandaki kesme kuvvetinin ve momentin azaldığını göstermektedir. Yapıların düğüm noktalarının rijitliğinin azalması ayrıca yapının periyodunun daha geniş spektrumlara yayılmasına sebep olmaktadır.

Yayaların kullanımı amacıyla yapılan köprülerin hem sürekli kullanımda olmaları hem de açık bir ortamda bulunmalarından dolayı, modal testlerin kısa sürede yapılması ve yüksek doğruluk derecesine sahip veriler elde edilmesi istenilmektedir. Bu gibi durumlarda deneysel modal analiz yöntemlerinin fazla olmasından faydalanarak istenilen şartlar sağlanabilir. Pavic ve Reynolds vd., (2002), arazide daha az süre çalışmayla iyi sonuçlar alınabilen bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem 1 ile 39Hz aralığında enerjiye sahip geçici bir sinyalin yapıya elektromanyetik sarsıcı ile uygulanmasını içermektedir.

Blandon ve Rodriguez (2005), depreme karşı dayanklı prefabrik betonarme yapıların bağlantılarının ve zemin diyaframlarının davranışları üzerine bir çalışma yapmışlardır. Taşıyıcı duvar ve çerçevelerin birleşiminden oluşan bu çalışmada, bir adet iki katlı prefabrik yapının deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deneysel modele ait kolon-kiriş bağlantılarının bazılarının tipik özelliği, kirişlerin çekme bölgesinde bulunan düğüm noktasındaki donatılarının zayıf bağlanmış olmasıdır. Yapısal hatalar oluşana kadar model, sismik yüklemelere maruz bırakılmıştır. Prefabrik betonarme zemin ve üst döşeme arasındaki

ilişkiden ayrıca bahsedilmiştir. Araştırma sonucunda, tasarım kriterlerinin ve standartların, elde edilen prefabrik betonarme yapıya ait bağlantılara ve diyaframlara olan etkileri araştırılmış ve gelecekte yapılacak çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

Öztürk ve Çatal (2005), yarı rijit yapıların dinamik tepkilerini bir bilgisayar programı kullanarak ortaya koymuşlardır. Yapının düğüm noktalarının birleşimi lineer elastik dönebilen bir yay gibi modellenmiştir. Aynı geometriye ve kesite sahip, farklı yay katsayıları olan yarı rijit yapılar incelenmiştir. Azalan katsayı değerleri ve gerçek yapıyı temsil eden yapı davranışı her bir kesit eleman için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Beş farklı çok katlı yapıdan elde edilen dinamik sonuçlar, yapıların referans alınan modal parametreleri ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma yarı rijit bağlantılı yapıların, özellikle düşük modlarda titreşim periyotlarının arttığını ortaya koymaktadır.

Rezaifar vd., (2008), sundukları araştırmada, bir sarsma tablası üzerine tek katlı olarak inşa edilen bir prefabrik üç boyutlu sandviç panel modelinin tam ölçekli dinamik testini çeşitli yer hareketleri altında gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın amacı, dinamik yükler (doğrusal ve doğrusal olmayan yapısal karakteristikler, şekil değiştirme, rijitliğin değişimi ve göçme mekanizması) altında tanımlanan sistemin sismik performanslarını elde etmektir. Analizde, testten elde edilen başlangıç frekansları, titreşim modları ve sonuçların karşılaştırılması sunulmuştur.

Zonta vd., (2008), %60 oranında küçültülmüş 5 katlı bir prefabrik test yapısı (9.14m eninde ve boyunda, 11.43m yüksekliğinde) kullanmışlardır. Yapıyı, büyüklüğü 1.5g PGA olan bir deprem simülasyonuna maruz bırakarak yapıya ait dinamik parametreleri elde etmeye çalışmışlardır. Yapmış oldukları bu çalışmada kapasite kriterlerine bağlı olarak dizayn edilen prefabrik yapının üzerinde hasar tespit yöntemini uygulamışlardır. Önerilen teknikte, deprem etkisi altındaki bir yapının sünekliğinin yapı üzerinde ne derece etkili olduğu değerlendirilmiştir. Genel olarak çerçevelerin sünekliğinin gözlemlenmesini temel alan bu yöntem, güçlü bir deprem esnasında oluşan hasarların plastik mafsalsal bölgesinde kalmasının gerekliliğine ve zayıf giriş güçlü kolon prensibine dayanmaktadır. Göz ardı edilebilen hasar dağılım sonuçları, sönümde ve mod şekillerinde değişiklik yapabilmektedir fakat, frekanslarda büyük değişiklikler olmamaktadır. Bu çalışma operasyonel bir açıdan incelenirse, kullanılan yöntemle düğüm noktalarında hasarlı olan yapıların genel modal karakteristikleri, doğruluğu ispatlanmış deneysel teknikler kullanılarak belirlenebilmektedir. Hasar değerlendirme işlemi, ölçülen mod şekillerindeki lokal değişikliklere bağlı olarak

yapılmaktadır. Hasar değerlendirme işlemi sonuçlarına göre tüm sistemin rijitliğinde çok önemli kayıplar meydana geldiği (yaklaşık %70) ve süneklik mekanizmasının etkinliğine ışık tuttuğu belirtilmiştir.

Türker vd., (2009), çelik yapıların dinamik karakteristiklerini değiştirdiği düşünülen yarı-rijit bağlantıların niteliğini araştırmışlardır. Araştırma, kutu kesitli kolonlar, dikdörtgen kesitli kolonlar ve iki boyutlu çerçeve olarak ölçeklendirilmiş üç modeli içerir. Öncelikle algoritmik çalışmada mesnetler ve bağlantı noktalarının tümünün rijit olması kabulüyle gerçekleştirilen teorik modal analizden elde edilen mod şekilleri ve doğal frekanslar hesaplanmıştır. İkinci olarak, modeller üzerindeki deneysel ölçümler doğal frekanslar, mod şekilleri ve modal sönüm oranlarını elde etmek için gerçekleştirilir. Üçüncü olarak, teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki farkı azaltmak için analitik modelin bağlantı noktaları ve mesnetlerinde lineer elastik dönme yapabilen yaylar kullanılmıştır. Son olarak ise dönebilen yay rijitliğine bağlı olarak geliştirilen bir yaklaşım kullanılarak mesnet ve kolon-kiriş bağlantı yüzdeleri belirlenmiştir.

López-Almansa vd., (2010), yarı-prefabrik olarak üretilen donatılı yığma tuğlalardan yapılmış orta açıklıklı narin tonozlar üzerine çalışmışlardır. Araştırmada, yarı-prefabrikasyon ve bağlantı teknikleri üzerinde durulmuştur. Yapıların tahmin edilen yapısal davranışlarını sergileyen sayısal modelleri geliştirilmiştir. Deneysel çalışma, önerilen yapı tekniklerinin doğruluğu, yapısal performansın araştırılması ve sayısal modelin kalibrasyonu olmak üzere üç ana konuyu belirtmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen tekniklerin uygulanabilirliğini ve yapısal davranışın süneklik ve dayanım açısından yeterli olduğunu göstermiştir.

Gopčević vd., (2011), deprem etkisi altındaki yarı rijit ve eksantrik bağlı çerçevelerin dinamik özellikleri ve zaman davranışları üzerinde çalışmışlardır. Doğrusal yapısal davranışını temsil eden sayısal bir yöntem geliştirmişlerdir. Kirişlerin uç noktalarındaki yarı rijit birleşimler doğrusal moment-dönme ilişkisini sağlayabilecek dönebilen yay elemanlar ile temsil edilmiştir. Düğüm noktaları eksantrik bağlı birleşimler ise kiriş uçları sonsuz rijit olan elemanlar ile sağlanmıştır. Bu çalışmada yarı rijit ve eksantrik bağlı birleşimlerin yapıda oluşturmuş olduğu etkiler, sayısal modeldeki ilgili düzeltme matrisi tarafından ortaya konulmuştur. Düzeltici matris, rijit ve merkezi bağlantılı kiriş elemanların geleneksel rijitlik matrisleri üzerine uygulanmıştır. Yapının değişken doğal frekansları ve modları gibi dinamik parametrelerinin yanında kolon-kiriş birleşim noktalarının eksantrisitesi de dikkate alınmıştır.

Musial (2012), betonarme kirişlerin statik ve dinamik rijitliklerinin deneysel çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Yük etkisi altındaki kirişlerin deplasmanları ve temel frekans değerleri üzerine çalışmıştır. Temel frekanslar Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Statik ve dinamik rijitlikler yerdeğiştirmeler ve temel frekanslara dayanarak hesaplanmıştır. Karşılaştırma analizi ise bu rakamsal veri değerlerinin benzemediğini göstermiştir.

1.4. Tezin Amacı ve İçeriği

Bu çalışmaların amacı, özellikle son yıllarda kullanım alanları ve üretimi hızla artan, prefabrik yapıların Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak deneysel ve teorik dinamik karakteristiklerini belirlemektir. Ayrıca, sonlu eleman modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak iyileştirilebileceğini, başka bir deyişle prefabrik yapıların mevcut davranışlarını en iyi şekilde yansıtabilecek olan sonlu eleman modellerini elde edebilmek için Operasyonel Modal Analiz Yöntemi'nin gerekliliğini ve uygulanabilirliğini göstermektir.

İleride yapılacak çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülen bu tez çalışmasında, uygulama örnekleri olarak seçilen iki farklı prefabrik yapının yapısal davranışlarının analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak prefabrik yapıların yapısal davranışları analitik olarak, Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi kullanılarak ise deneysel olarak belirlenmektedir. Aynı zamanda teorik irdelemede sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan sonlu eleman modellerinin deneysel yöntemle elde edilen değerler ışığında, gerçek yapıları en iyi temsil edecek modellerin oluşturulması amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda C-1 Üstgeçidi ve Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi uygulama örnekleri olarak seçilmiştir. Tez çalışması 4 bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, Genel Bilgiler başlığı altında prefabrik yapıların gelişim süreci, kullanım alanları, üretim, montaj ve kullanımları sırasında karşılaşılan avantaj ve dezavantajlardan ve prefabrik yapıları oluşturan elemanlardan detaylı bir şekilde bahsedilmektedir. Aynı zamanda bu bölümde, yapılara ait dinamik karakteristiklerin

belirlenmesinde kullanılan analitik ve deneysel yöntemler ve bunlara ait formülasyonlardan ve deneysel ölçüm ekipmanlarından söz edilmektedir.

İkinci bölümde, tez çalışması kapsamında seçilen uygulama örnekleri (C1 Üstgeçidi ve Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi) ve bu örneklere ait Teorik Modal Analiz ve Operasyonel Modal Analiz uygulamaları sunulmaktadır. Ayrıca, Teorik Modal Analiz uygulamasında kullanılan Sonlu Elemanlar Yönteminden ve Operasyonel Modal Analiz uygulamasında kullanılan Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma (GFTAA) ve Stokastik Alt Alan Belirleme (SAB) Yöntemlerinden kullanılarak elde edilen teorik ve dinamik karakteristikler verilmektedir.

Üçüncü bölümde, C1 Üstgeçidi ve Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'ne ait elde edilen teorik ve dinamik karakteristikler karşılaştırılmaktadır. Uygulama örneklerine ait sonlu eleman modellerinin deneysel ölçüm sonuçlarına göre iyileştirilmesi Model İyileştirme başlığı altında sunulmaktadır.

Son bölüm olan Dördüncü Bölümde ise, uygulama örnekleri üzerinde gerçekleştirilen çalışmalardan çıkarılan sonuçlar ve gelecek çalışmalara ışık tutacağı düşünülen öneriler kısmına yer verilmektedir. Dördüncü bölümü, Kaynaklar izlemekte ve Özgeçmiş sunularak tez çalışması sonlandırılmaktadır.

1.5. Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

1.5.1. Teorik Modal Analiz Yöntemi

Doğal frekanslar, sönüm oranları ve mod şekilleri teorik ya da deneysel olarak elde edilen bir yapıya ait dinamik karakteristiklerdir. Yapılarda oluşan titreşimleri incelemek için yapılan teorik ve deneysel çalışmaların tümü modal analiz olarak isimlendirilmektedir (Bayraktar vd., 2008; Chopra, 2006). Modal analizi anlayabilmek için ise öncelikle titreşim teorisini bilmek gerekmektedir. Başlangıç şartları veya uygulanan dış yükler altında bir sistemin göstermiş olduğu tepki titreşim olarak tanımlanmaktadır. Titreşim teorisi, serbest titreşim ve zorlanmış titreşim olmak üzere iki ana başlık altında incelenmektedir.

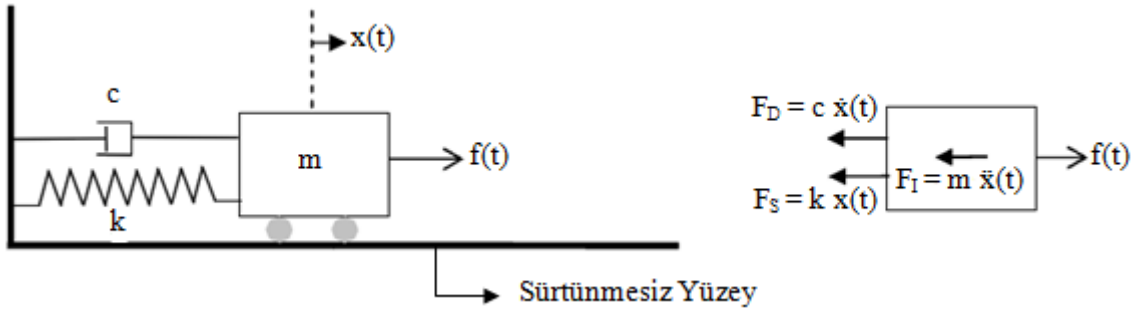
Bir yapının başlangıç sınır şartları altında hiçbir dış etki olmaksızın serbest olarak salınmasına serbest titreşim denilmektedir. Bir yapının başlangıç sınır şartları altında ancak belirli dış etkiler altında salınmasına ise zorlanmış titreşim denilmektedir.

Geçmişteki ve günümüzdeki yapıların tümü çok serbestlik dereceli sistemlerdir. Ancak çok serbestlik dereceli sistemlerin çözümündeki karmaşıklık ve çözüm tekniğinin çok zaman almasından dolayı, çok serbestlik dereceli bir yapı tek serbestlik dereceli bir yapının süperpozisyonu olarak düşünülerek tek serbestlik dereceli bir sistem olarak çözümlenebilmektedir. Bu durumda ilk olarak tek serbestlik dereceli sistemler sonrasında da çok serbestlik dereceli sistemler hakkında bilgi verilecektir.

1.5.1.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

Pratikteki yapılar çok serbestlik dereceli olmalarına rağmen bu sistemlerin çözümleri tek serbestlik dereceli sistemlerin birleşimi ile elde edilmektedir. Titreşim analizleri basit bir kütle-yay modeli incelenerek anlaşılabilir. Titreşim analizleri basit bir kütle-yay modeli incelenerek anlaşılabilir.

Tek serbestlik dereceli bir sistemin analitik modeli genel olarak Şekil 1.19'da verilmektedir.



Şekil 1.19. Tek serbestlik dereceli bir sistemin analitik ve matematik modeli

Şekil 1.19'daki serbest cisim diyagramı üzerinden denge denklemi yazılırsa,

$$F_I + F_D + F_S = f(t) \quad (1.1)$$

elde edilmektedir. Burada F_I atalet kuvvetini, F_D sönüm kuvvetini ve F_S yaydaki elastik şekil değişiminden dolayı yayda oluşan kuvveti göstermektedir (Türker, 2005). (1.1) denkleminde gerekli ifadeler yerlerine yazıldığında tek serbestlik dereceli sistemler için genel hareket denklemi,

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t) = f(t) \quad (1.2)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada; m, c ve k sırasıyla yapının kütleini, sönümünü ve rijitliğini, $\ddot{x}(t)$ yapının ivmesini, $\dot{x}(t)$ yapının hızını $x(t)$ yapının yer değiştirmesini ve $f(t)$ ise yapıya uygulanan kuvveti göstermektedir. Sönümsüz tek serbestlik dereceli bir sistemin hareket denklemini elde etmek istediğimizde (1.2) denkleminde $c=0$ yazılır ve bu hareket denklemi,

$$m \ddot{x}(t) + k x(t) = f(t) \quad (1.3)$$

şeklinde elde edilir. Yapının sönümsüz serbest titreşim yaptığı düşünülürse $f(t) = 0$ için yazıldığında (1.3) denklemi düzenlenirse,

$$m \ddot{x}(t) + k x(t) = 0 \quad (1.4)$$

elde edilebilmektedir (Chopra, 2006). Bu denklem çözümlerse,

$$k - \omega^2 m = 0 \quad (1.5)$$

ve

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.6)$$

olarak sönümsüz doğal açısal frekans (ω) elde edilir.

Yapının zorlanmış sönümsüz titreşim yaptığı düşünüldüğünde hareket denklemi, (1.3) denkleminde verildiği şekildedir. Bu denklemin çözümü için,

$$f(t) = F e^{i\omega t} \quad (1.7)$$

ve

$$x(t) = X e^{i\omega t} \quad (1.8)$$

olarak kabul edilir ve bu ifadeler (1.3) teki hareket denkleminde yerine yazılıp düzenlenirse,

$$(k - \omega^2 m) X e^{i\omega t} = F e^{i\omega t} \quad (1.9)$$

ifadesi elde edilir. Burada, X yerdeğiştirme, F uygulanan kuvvet, t zaman ve i karmaşık sayı sembolüdür. Bu denklem kullanılarak, zorlanmış titreşim yapan sönümsüz bir yapının frekans davranış fonksiyonu $H(\omega)$,

$$H(\omega) = \frac{X}{F} = \frac{1}{k - \omega^2 m} \quad (1.10)$$

şeklinde elde edilir.

Yapının viskoz sönümlü olması durumunda analitik model; kütle, sönüm ve rijitlik elemanlarından oluşur ve bu durumdaki hareket denklemini (1.2)'deki hareket denklemini ile ifade edilir. Serbest titreşim durumunda hareket denklemini,

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t) = 0 \quad (1.11)$$

ifadesine dönüşür. Bu denklemin çözümü için,

$$x(t) = X e^{st} \quad (1.12)$$

olduğu kabul edilirse (burada s karmaşık sayı olmak üzere) ve hareket denklemini düzenlenirse,

$$m s^2 + c s + k = 0 \quad (1.13)$$

denklemini elde edilir. Bu denklem çözülürse,

$$\begin{aligned}
 s_{1,2} &= -\frac{c}{2m} \mp \frac{\sqrt{c^2 - 4km}}{2m} \\
 &= -\omega\xi \mp i\omega\sqrt{1-\xi^2} \\
 &= -\omega\xi \mp i\omega_d
 \end{aligned} \tag{1.14}$$

olarak elde edilir. Burada; ω sönümsüz doğal açısız frekansı, ω_d sönümlü doğal açısız frekansı ve ξ ise sönüm oranını göstermektedir. Bu ifadede geçen sönümlü doğal açısız frekans ve sönüm oranı,

$$\omega_d = \omega\sqrt{1-\xi^2} \tag{1.15}$$

ve

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \tag{1.16}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada; c_{cr} kritik sönümü göstermektedir. Bu şekilde elde edilen $s_{1,2}$ değerleri (1.13) denklemdeki yer değiştirme ifadesinde yerine yazılırsa,

$$\begin{aligned}
 x(t) &= X e^{(-\omega\xi \mp i\omega\sqrt{1-\xi^2})t} \\
 &= X e^{-\omega\xi t} e^{i(\omega\sqrt{1-\xi^2})t}
 \end{aligned} \tag{1.17}$$

elde edilir. Bu denklemde; $\omega\xi$ olarak yazılan ifade gerçek kısmı, $\omega\sqrt{1-\xi^2}$ olarak yazılan ifade ise sanal kısmı gösterir. Yapının zorlanmış titreşim yaptığı düşünüldüğünde, hareket denklemi (1.2) denklemde verildiği şekildedir. Bu denklemin çözümü için,

$$f(t) = F e^{i\omega t} \tag{1.18}$$

ve

$$x(t) = X e^{i\omega t} \tag{1.19}$$

olarak kabul edilirse ve bu ifadeler (1.11) hareket denkleminde yerine yazılıp düzenlenirse,

$$(-\omega^2 m + i \omega c + k) X e^{i\omega t} = F e^{i\omega t} \quad (1.20)$$

denklemini elde edilir. Bu denklemden, zorlanmış titreşim yapan viskoz sönümlü bir yapının frekans davranış fonksiyonu $H(\omega)$,

$$H(\omega) = \alpha(\omega) = \frac{1}{(k - \omega^2 m) + i(\omega c)} \quad (1.21)$$

şeklinde elde edilir. Frekans davranış fonksiyonunun genlik ve faz açısı,

$$|\alpha(\omega)| = \frac{|X|}{|F|} = \frac{1}{\sqrt{(k - \omega^2 m)^2 + (\omega c)^2}} \quad (1.22)$$

ve

$$\angle \alpha(\omega) = \angle X - \angle F = \text{tg}^{-1}(-\omega c / (k - \omega^2 m)) = -\theta_\alpha \quad (1.23)$$

ifadesiyle elde edilir. Burada; $|\alpha(\omega)|$ ve θ_α sırasıyla frekans davranış fonksiyonuna ait genlik ve faz değerini göstermektedir.

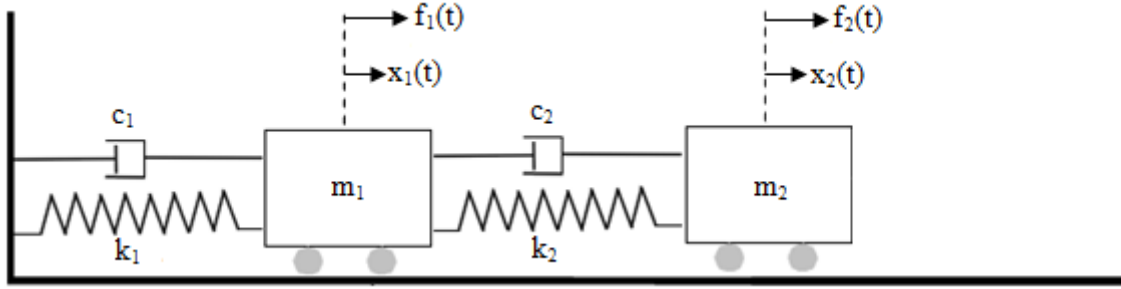
1.5.1.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

Gerçekte sistemlerin çoğu çok serbestlik dereceli sistemlerdir. Tek serbestlik dereceli sistemlerin titreşimindeki skaler değerlerin yerini, çok serbestlik dereceli sistemlerde vektörel ve matris büyüklükler alır. Çok serbestlik dereceli sistemlerde genel hareket denklemini (Chopra, 2006),

$$[M] \{\ddot{x}(t)\} + [C] \{\dot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (1.24)$$

denklemini ifade edilmektedir. Burada, $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ sırasıyla çok serbestlik dereceli sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini ve $\{\ddot{x}(t)\}$, $\{\dot{x}(t)\}$, $\{x(t)\}$ ve $\{f(t)\}$ ise sırasıyla

çok serbestlik dereceli sistemin zamana bağlı ivme, hız, yerdeğiştirme ve kuvvet vektörlerini göstermektedirler (Chopra, 2006). Çok serbestlik dereceli sistemlere örnek olması adına iki serbestlik dereceli bir sistemin kütle-sönüm-yay teorik modeli Şekil 1.20'de verilmektedir.



Şekil 1.20. İki serbestlik dereceli bir sistemin analitik modeli

Yapıda sönüm olmaması durumunda, analitik model kütle ve rijitlik terimleriyle ifade edilir. Bu durumda hareket denklemi,

$$[M] \{\ddot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (1.25)$$

bağıntısıyla verilir. Yapının doğal frekanslarını veya modal özelliklerini bulmak için yapının serbest titreşim yaptığı düşünülürse, bu durumda hareket denklemi,

$$[M] \{\ddot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} = \{0\} \quad (1.26)$$

olarak verilir. Bu denklemin çözümü için,

$$\{x(t)\} = \{X\} e^{i\omega t} \quad (1.27)$$

olduğu varsayılır. Burada; $\{X\}$ N*1 boyutunda zamandan bağımsız genliği göstermektedir. Düzenleme yapılarak (1.27) denklemi kullanılarak (1.26) çözülürse,

$$([K] - \omega^2 [M]) \{X\} e^{i\omega t} = \{0\} \quad (1.28)$$

denklemini elde edilir. Bu denklemin sıfırdan farklı çözümü için,

$$\det\left[[\mathbf{K}] - \omega^2 [\mathbf{M}]\right] = 0 \quad (1.29)$$

olmalıdır. Bu denklemin çözümünden N serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal açılmalık frekans (öz vektör) $(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_N)$ elde edilir. Her bir doğal frekansa karşılık yapının almış olduğu şekil, mod şekli olarak tanımlanır. Doğal frekansların küçükten büyüğe doğru sıralanması sonucunda elde edilen en küçük frekans temel frekans ve bu frekansa karşılık gelen mod şekli temel mod şekli olarak adlandırılır (Petyt, 1990).

Yapının tepki modelini oluşturmak için yapının aynı frekansta fakat değişen genlik ve fazda sinüzoidal bir kuvvetle titreştirildiği düşünülürse, bu durumda kuvvet ve yer değiştirme vektörleri sırasıyla,

$$\{f(t)\} = \{F\} e^{i\omega t} \quad (1.30)$$

ve

$$\{x(t)\} = \{X\} e^{i\omega t} \quad (1.31)$$

olarak kabul edilir. Burada $\{F\}$ ve $\{X\}$ N*1 boyutunda zamandan bağımsız kompleks genlikli vektörlerdir. (1.30) ve (1.31) ifadeleri (1.25) hareket denkleminde yerine yazılır ve düzenleme yapılırsa,

$$\left([\mathbf{K}] - \omega^2 [\mathbf{M}]\right) \{X\} e^{i\omega t} = \{F\} e^{i\omega t} \quad (1.32)$$

elde edilir. Bilinmeyen tepkinin çözümü için bu ifade tekrar düzenlenirse,

$$\{X\} = \left([\mathbf{K}] - \omega^2 [\mathbf{M}]\right)^{-1} \{F\} \quad (1.33)$$

ve

$$\{X\} = [\alpha(\omega)] \{F\} \quad (1.34)$$

elde edilir. Burada $[\alpha(\omega)]$ N*N boyutunda frekans davranış fonksiyonudur.

1.5.2. Deneysel Modal Analiz Yöntemi

Başlangıç analitik modeller oluşturulurken malzeme özelliklerinden sınır şartlarına kadar pek çok kabul yapılmaktadır. Yapılar bu şekilde analitik olarak incelenmekte ve analitik dinamik karakteristikleri elde edilmektedir. Ancak, modelleme aşamasında çeşitli kabuller yapılarak oluşturulan başlangıç analitik modellerin gerçek yapıları ne derecede temsil ettiği sorgulanmaktadır. Oluşturulan sonlu eleman modelin gerçeği ne şekilde temsil ettiğinin kontrol edilebilmesi için teorik ve deneysel dinamik karakteristiklerin birbiriyle karşılaştırılması gerekir. Bu durumda dinamik karakteristiklerin deneysel yöntemlerle elde edilmesi son derece önemlidir. Deneysel yöntem olarak Deneysel Modal Analiz Yöntemi tercih edilmektedir. Bu yöntemde mevcut yapı üzerinde çalışmalar yapıldığı için analitik yöntemlere göre gerçeğe çok daha yakın sonuçlar elde edilmekte ve analitik modelde çeşitli düzenlemeler yapılabilmektedir. Deneysel Modal Analiz Yönteminin kabul görmesinin en önemli yanı, uygulandığı yapı üzerinde hasar oluşturmaması ve etkin sonuç vermesidir.

Deneysel Modal Analiz yönteminde, yapı üzerinde sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen modal hareket noktalarına hassas ivmeölçerler yerleştirmektedir. İvmeölçerlerden gelen titreşim sinyalleri veri toplama ünitesi yardımıyla toplanmakta ve güncel yazılımlar kullanılarak dinamik karakteristikler elde edilmektedir (Altunışık, 2010; Ewins, 1995).

1.5.2.1. Genel Kurallar

Deneysel Modal Analiz, yapılardaki titreşimleri dikkate alarak yapıların dinamik karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Yapıların Deneysel Modal Analiz'i, yapıdan elde edilen ivmenin ölçülmesini ve analiz edilmesini içermektedir. Tepki değerleri ölçüldükten sonra tepkinin etkiye oranlanmasından yapıya ait dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde kullanılacak olan frekans davranış fonksiyonu elde edilir.

Deneysel Modal Analiz yöntemiyle değerlendirmeler başlıca beş aşamadan oluşmaktadır (Ercan vd., 2009).

- Birinci aşama, modal testi yapılacak yapının mesnetlenmesi, yapıya ivmeölçerlerin bağlanması ve sistem ayarlarının yapılmasını içermektedir.

- İkinci aşamada, belirlenen noktalardan yapı titreştirilir ve frekans davranış fonksiyonu elde edilir.

- Üçüncü aşamada, frekans davranış fonksiyonundan yapıya ait modal parametreler elde edilir.

- Dördüncü aşamada, sonuçların geçerliliği belirlenir.

- Beşinci aşamada, ise elde edilen bilgiler yardımıyla değerlendirmeler yapılır.

Deneysel Modal Analiz Yöntemi'nin geçerli olabilmesi için bazı temel kabuller yapılmaktadır (Heylen vd., 2007). Bu kabuller birbirleriyle ilişkili olup kısaca şu şekilde sıralanabilir:

- Yapıda oluşan titreşimlerin küçük olduğu ve yapının lineer davranış sergilediği ve yapının rijitliğini değiştirebilecek çok büyük titreşimler altında yapılan ölçümlerin doğru sonuçlar vermeyeceği kabul edilmektedir.

- Deneysel ölçümler sırasında, sıcaklık, nem vb. gibi bir etki altında yapının malzeme özelliklerinde ve sınır şartlarında herhangi bir değişim olmadığı kabul edilmektedir.

- Yapının bir bütün ve sürekli olduğu kabul edilmektedir. Diğer bir ifadeyle, yapının bir noktasında elde edilen davranışın bütün yapıyı temsil ettiği kabul edilmektedir.

1.5.2.2. Ölçüm Ekipmanları

Deneysel Modal Analiz yönteminde kullanılan ölçüm düzeneği titreştiriciler, ivmeölçerler, veri toplama sistemi ve sinyal işleme olmak üzere üç başlık altında incelenecektir.

1.5.2.2.1. Titreştiriciler

Deneysel Modal Analiz Yönteminde yapılar, çevresel ya da zorlanmış etkiler altında titreşmektedirler. Zorlanmış etkiler özel sarsma ekipmanları olarak bilinen sarsıcılar (shakers) ve darbe çekiçleridir. Çevresel etkiler ise taşıt trafiği, yaya trafiği, deprem, rüzgar, dalga vb. örnek olarak verilebilir. Yapay, küçük veya orta ölçekli mühendislik yapılarını veya laboratuvar modellerini titreştirmek için kullanılırken, çevresel etkilerden ise genellikle yapay titreştiricilerin kullanılmadığı çok büyük mühendislik yapılarının ölçümlerinde

faýdalanılmaktadır. Yapay titreştiriciler, kullanılacakları yapının hacimsel büyüklüğüne ve rijitliğine bağlı olarak seçilmektedirler. Yapay titreştiricilerden Geleneksel Modal Analiz Yönteminde, çevresel etkilerden ise Operasyonel Modal Analiz yönteminde yararlanılmaktadır.

Ölçüm sırasında doğru bir titreşim sağlanabilmesi için sarsıcıların yapıya ankastre monte edilmesi gerekmektedir. Bir yapının hacimsel büyüklüğü artıkça kullanılacak sarsıcı sayısı da artacaktır. Bu durumda ölçüm maliyeti artmış olacaktır. Ayrıca sarsıcıların doğru kullanılması hem ölçüm hem de yapı için oldukça önemlidir. Sarsıcıların yanlış kullanılması yapıda hasar oluşmasına sebebiyet vermektedir. Aşağıda APS 400 tip mekanik sarsıcıya bir örnek Şekil 1.21’de verilmektedir.



Şekil 1.21. APS 400 tipi mekanik sarsıcı örneği

Darbe çekiçleri, sarsıcılara göre daha ucuzdurlar ve uygulamaları kolaydır. Bu durum kullanımlarını avantajlı hale getirmektedir. Ancak, yapıya aktarılan kuvvetin düşük enerjili olması darbe çekiçlerinin bir dezavantajıdır (Ramos, 2007). Darbe çekiçleri hem genliği ve zamanla değişimi bilinmeyen rastgele titreşimler için hem de ölçülebilen büyüklüklerdeki titreşimler için kullanılmaktadırlar. Darbe çekiçlerinin içinde verilen etkiyi ölçmek için hassas sensörler bulunmaktadır (Türker, 2011). Ayrıca darbe çekiçlerinin yapıya farklı etkiye sahip darbeler uygulaması için yumuşak, orta sert ve sert başlıkları mevcuttur. Şekil 1.22’de örnek bir darbe çekici verilmektedir.



Şekil 1.22. B&K tipi darbe çekici örneği

1.5.2.2.2. İvmeölçerler

Deneyisel Modal Analiz Yöntemi ile gerçekleştirilen ölçümlerde, yapılarda oluşan titreşimleri ölçmek için ivmeölçerler kullanılmaktadır. Çeşitli ivmeölçer tipleri bulunmakta, sıklıkla piezoelektrik ivmeölçerler kullanılmaktadır. Ancak, kullanılacak olan ivmeölçer tipi elde edilecek verilerin doğruluğu için çok önemlidir. Çünkü yapılacak çalışmanın amacına uygun olarak seçilmeyen ivmeölçerler ile gerçekleştirilen deneysel ölçümlerden kaliteli sinyaller alınması mümkün değildir (Altunışık, 2010).

İvmeölçerlerin doğru bir şekilde seçilmesi için aşağıda verilen hususlara dikkat edilmelidir (Türker, 2011; Altunışık, 2010; Sevim, 2010).

- Frekans Aralığı: İvmeölçerin, ölçebileceği maksimum ve minimum frekans aralığını belirtmektedir.
- Hassasiyet: İvmeölçerin, yerçekimi ivmesiyle orantılı üretebileceği elektrik gücünü belirtmektedir. Birimi genellikle mV/g cinsindedir.
- Maksimum İvme Değeri: İvmeölçerin, elektrik sinyali bozulmadan veya kaybolmadan ölçebileceği en büyük ivme genliği değerini belirtmektedir. Birimi g'dir.
- Çalışma Sıcaklığı: İvmeölçerin, sağlıklı sinyal üretebileceği maksimum ve minimum ortam sıcaklığını belirtmektedir.

Seçilen ivmeölçerlerin tipine göre hassasiyetleri de değişmekte ve çoğunlukla ölçümlerde yüksek hassasiyetli ivmeölçerlerin kullanılması istenmektedir. Ancak yüksek hassasiyet, ivmeölçerin ağırlığı ve büyüklüğünü arttırmakta bu durumda narin ve küçük yapılarda ölçüm yapmak zorlaşmaktadır (Türker, 2011). Ayrıca, düşük frekansa sahip

yapılarda yüksek hassasiyetli ivmeölçerler, yüksek frekansa sahip yapılarda ise düşük hassasiyetli ivmeölçerler seçilmelidir (Altunışık, 2010).

Bu tez çalışmasında Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen ölçümde B&K 8340 tipi tek eksenli sismik ivmeölçerler kullanılmıştır. Bu ivmeölçerler seçilen yapılara dübeller ve çelik vidalar yardımıyla sabitlenmiştir. Şekil 1.23'te tek eksenli ivmeölçer ve kullanılan malzeme örnekleri verilmektedir.



a. B&K 8340 tipi ivmeölçer



b. Dübel ve çelik vida montajı

Şekil 1.23. İvmeölçer ve diğer malzeme örnekleri

1.5.2.2.3. Veri Toplama Ünitesi ve Sinyal İşleme

Test ve ölçümün ilk aşaması olan veri toplama aşaması, veri toplama ünitesi ve bilgisayardan oluşmaktadır. İvmeölçerlerden gelen sinyallerin ölçüm geometrisi dikkate alınarak derlenmesi ve bilgisayar ortamına aktarılması veri toplama ünitesi tarafından, aktarılan sinyallerin işlenmesi de bilgisayar ortamı tarafından gerçekleştirilmektedir. Ancak ivmeölçerlerden veri toplama ünitesine aktarılan sinyaller hamdır. Yani sinyaller yapı titreşimlerinden ve ortamdaki gürültülerden (insan, rüzgar, dere sesleri vb.) oluşmaktadır. Bunun için veri toplama sisteminin en önemli işlevi sinyal koşullama olup, bu sayede aşağıdaki durumlar gerçekleştirilebilmektedir:

- ✓ Gürültü sinyallerinin etkisi azaltılabilmektedir.
- ✓ İstenmeyen sinyaller filtrelenebilmektedir.
- ✓ Düşük seviyeli bir sinyalin kalitesi artırılabilir.
- ✓ İvmeölçerlerin elektrik gücü ayarlanabilmektedir.
- ✓ İvmeölçerlerin davranışları kontrol edilebilmektedir.

Bu işlemlerin en önemlisi ise, istenmeyen sinyallerin filtrelenmesi durumudur. İstenmeyen sinyaller, belirlenen frekans ölçüm aralığı dışında kalan yüksek frekans sinyalleridir. Eğer sinyaller düşük bir hızda ölçülüyorsa yüksek frekans içeriğine sahip sinyaller, düşük frekanslara sahipmiş gibi algılanarak yapılan ölçümün hatalı olmasına sebebiyet vermektedir (Türker, 2011).

Yapılara ait doğal frekans, sönüm oranı, mod şekilleri olarak tanımlanan dinamik karakteristiklerin belirlenebilmesi, veri toplama ünitesine aktarılan sinyallerin burada sinyal koşullama işlemine tabi tutularak bilgisayar ortamına aktarılma ile başlamaktadır. Bu işlem bilgisayar ortamında özel yazılımlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Sinyaller bilgisayar ortamına zaman tanım alanında aktarılmakta ancak, pratik sebeplerden ve hesaplama gereksinimlerinden dolayı frekans tanım alanına dönüştürülmektedirler.

Sinyallerin periyodik olamamalarından dolayı sinyal işleme aşamasında sızıntı hatası olarak tanımlanan problemler ortaya çıkmaktadır. Bu hatayı azaltmak için ölçüm süresi uzun tutulmalı ya da pencereleme yöntemleri kullanılmalıdır.

Bu tez çalışmasında Şekil 1.24'te görüldüğü gibi B&K tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi kullanılmıştır. Kullanılan veri toplama ünitesinin en önemli özelliği ölçüm yapılacak yapının büyük olduğu ve ivmeölçerlerin yetersiz olduğu durumlarda referanslı ölçüm yapılmasıdır. İvmeölçerlerin veri toplama ünitesine tanıtılmasında, ivmeölçerlerden sinyallerin alınarak veri toplama ünitesinde depolanmasında, depolanan sinyallerin sinyal koşullandırma işlemlerinin tamamlanmasında ve bilgisayara dayalı sinyal işleme programına aktarılmasında PULSE (PULSE, 2006) yazılımı kullanılmıştır. Titreşim testlerinden alınan sinyallerin işlenmesinde ve yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde Operational Modal Analysis (OMA, 2006) yazılımı kullanılmıştır.



Şekil 1.24. B&K Tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi ve bilgisayar ortamı

Deneysel Modal Analiz yöntemleri, yapılarda titreşim oluşmasını sağlayan etkilerin yapay ya da doğal olmasına bağlı olarak iki farklı yöntemle gerçekleştirilmektedir. Bunlar;

- Zorlanmış Titreşim Yöntemi (Geleneksel Modal Analiz)
- Çevresel Titreşim Yöntemi (Operasyonel Modal Analiz)

olarak adlandırılmaktadır.

Zorlanmış Titreşim yönteminde, yapı bilinen ve ölçülebilen bir etki ile (sarma tablası, darbe çekici, sarsıcılar vd.) titreştirilmekte ve yapının bu etkiye verdiği tepki ölçülmektedir. Çevresel Titreşim yönteminde ise yapının çevresel (doğal) bir etki ile (taşıt yükü, taşıt yükü, rüzgâr, deprem, dalga, patlatma vb.) titreştirildiği kabul edilmekte ve yapının bu etkiye göstermiş olduğu tepki ölçülmektedir.

Bu tez çalışmasında, seçilen prefabrik yapılar üzerinde Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi uygulanacağından dolayı bu yöntem hakkında detaylı bilgi verilecektir.

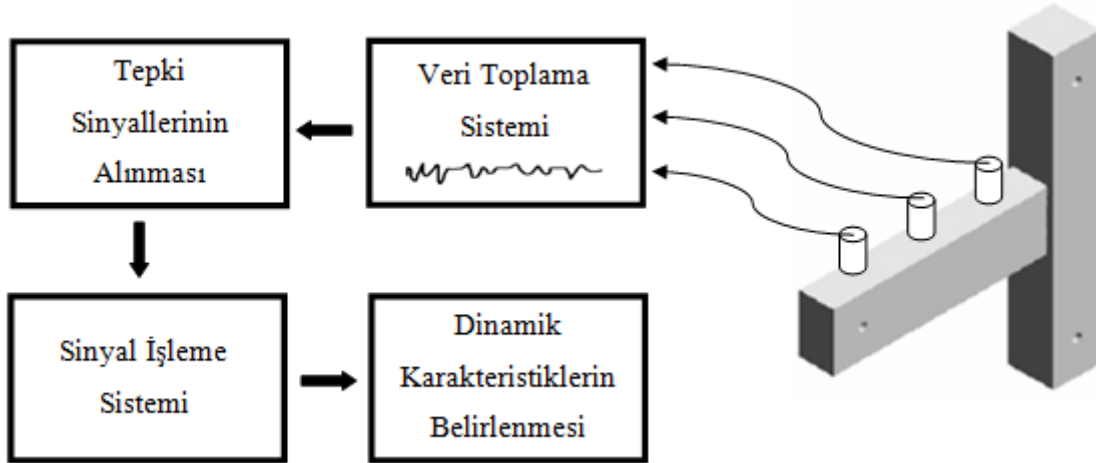
1.5.2.3. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi

Yapılarda etki kuvvetlerinin ölçülemediği sadece bu etkilerden dolayı oluşan titreşimlerin ölçülebildiği yöntem Operasyonel Modal Analiz Yöntemi olarak bilinmektedir. Etki kuvvetinin ölçülememesi, etki titreşimlerinin zamanla değişiminin ve genliğinin bilinmemesini beraberinde getirmektedir. Bu etkiler rüzgar, taşıt trafiği, yaya trafiği, dalga, deprem vb. gibi doğal etkilerden oluşmaktadır. Bu doğal etkilerin yapının tümüne aynı zamanda etkimesinden dolayı diğer yöntemlere göre daha sağlıklı sonuçlar elde edilmektedir.

Ölçülen titreşimlerin zaman ve frekans ortamında işlenmesi ile yapılara ait doğal frekanslar, sönüm oranları ve mod şekilleri olarak tanımlanan dinamik karakteristikler elde edilmektedir. Operasyonel Modal Analiz yöntemi özellikle büyük ölçekli ve narin yapılarda (baraj, köprü kemer, kubbe vb.) daha çok tercih edilmektedir. Çünkü doğal etkiler yapının her bölgesine aynı zamanlarda etkimekte ve ölçüm yapıda herhangi bir hasara sebep olmamaktadır (Bayraktar ve Türker, 2005-a).

Operasyonel Modal Analiz Yönteminin kullanım alanları oldukça fazladır. Sadece İnşaat Mühendisliği alanında değil makine parçalarının titreşim analizinden birçok mühendislik alanlarında dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca yapılarda hasar tespiti üzerine yapılan çalışmalarda, teorik analizlerin yapılmasının zor olduğu durumlarda, teorik olarak oluşturulan sonlu eleman modellerinin kontrolü gibi daha birçok çalışmada kullanıldığı bilinmektedir.

Operasyonel Modal Analiz Yönteminde bir ölçüm Şekil 1.25'te verilen aşamalardan oluşmaktadır.



Şekil 1.25. Operasyonel Modal Analiz Yöntemine ait ölçüm düzenek şeması

Şekil 1.25'ten de anlaşılacağı üzere Operasyonel Modal Analiz Yönteminde yapılarda oluşan titreşimler için sismik ivmeölçerler kullanılmakta, ivmeölçerlerin bağlanmış olduğu kablolar yardımıyla elde edilen titreşimler tepki sinyallerine dönüştürülmek üzere veri toplama ünitesine aktarılmaktadır. En son aşama olarak tepki sinyallerinin işlenmesi ve dinamik karakteristiklerin elde edilmesi için bir bilgisayar ortamına ihtiyaç duyulmaktadır.

1.5.2.3.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) Yöntemi

Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (FTAA) Yönteminin geliştirilmiş haline Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) yöntemi denir ve bu yöntem frekans ortamına dayalı bir yöntemdir. Bu durumda GFTAA yönteminin FTAA yöntemine göre bazı üstünlükleri vardır. Örneğin; GFTAA yönteminde doğal frekanslar ve mod şekillerinin yanında modal sönüm oranları da belirlenebilmektedir. Bununla birlikte piklerin seçilmesi ile gerçekleşen bir işlem olduğu için bazı dezavantajlar ortaya çıkmaktadır. Çünkü piklerin seçimi objektif değil subjektif bir konudur ve bu durumda sonuçların güvenilirliği azalmaktadır. Sönüm maksimum genliğe bağlı olarak hesaplandığı için ,maksimum genliğin doğruluğu belirlenecek sönümü de o derecede etkilemekte ve sönüm tahminlerinin güvenilirliği azalmaktadır (Bayraktar vd., 2008; Peeters, 2000). Avantajları ve dezavantajları olmasına rağmen GFTAA yöntemi modal analizin sinyal işleme aşamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemin çevresel titreşim altında bilinmeyen etki kuvveti ve ölçülebilen tepki kuvveti yani davranış fonksiyonu altındaki teorik bağıntısı,

$$G_{yy}(j\omega) = H(j\omega)^* G_{xx}(j\omega)H(j\omega)^T \quad (1.35)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Bendat ve Piersol, 2004). Burada $G_{xx}(j\omega)$ etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk (GSY) fonksiyonunu, $G_{yy}(j\omega)$ tepki sinyalinin GSY fonksiyonunu ve $H(j\omega)$ frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir.

Denklem (1.35)'teki * ve T sırasıyla ifadelerin kompleks eşleniğini ve transpozisini göstermektedir (Jacobsen vd., 2006). Matematiksel düzenlemelerden sonra tepki sinyaline ait GSY fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda,

$$H(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (1.36)$$

şeklinde elde edilmektedir (Bendat ve Piersol, 2004). Burada; n mod sayısını, λ_k kutup fonksiyonunu ve R_k artık değer fonksiyonunu göstermektedir. Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra denklem (1.35),

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[\frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] G_{xx}(j\omega) \left[\frac{R_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{R_s^*}{j\omega - \lambda_s^*} \right]^{\bar{H}} \quad (1.37)$$

şeklinde elde edilmektedir (Brincker vd., 2000). Burada; s tekil değerleri, \bar{H} kompleks eşleniği ve transpozeyi ifade etmektedir.

Matematiksel ifadeler sadeleştirildiğinde tepki sinyaline ait GSY fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda,

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{A_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{B_k}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{B_k^*}{-j\omega - \lambda_k^*} \quad (1.38)$$

şeklinde elde edilmektedir (Brincker vd., 2000). Burada; A_k tepki sinyalinin GSY fonksiyonuna ait k artık değer matrisini göstermektedir.

GFTAA yönteminde ilk adım GSY matrisini belirlemektir. Ayrık frekanslarda tepki sinyali GSY'nin tahmini $\omega = \omega_i$ olarak bilinmekte ve sonra tekil değer ayrıştırma matrisi alınarak ayrıştırılmaktadır (Brincker vd., 2000). Buna göre denklem (1.38),

$$G_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^{\bar{H}} \quad (1.39)$$

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 göstermektedir.

Denklem (1.39)'da verilen GSY fonksiyonunda, pik değer yapan noktalar doğal frekanslara karşılık gelmektedir. Pik noktaları oluşturan tekil vektörler (u_{ij}) ise doğal mod şekillerine karşılık gelmektedir (Brincker vd., 2000).

1.5.2.3.2. Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi

Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi zaman tanım alanında doğrudan çalışıp veri veren ve bu durumda spektral dönüşüme veya korelasyona ihtiyaç duyulmayan bir yöntemdir. Gürültüden oluşan olumsuz etkilere müdahalenin yapılabildiği bu yöntem dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için uygun ve kullanışlı bir yöntemdir. Bu yöntemde dikkate alınan formülasyon ve bağıntılar hareket denklemlerine bağlı olarak (1.40) denklemi ile ifade edilmiş ve yapı sisteminin dinamik davranışı lineer, sabit katsayılı ikinci derece diferansiyel denklem olarak düşünülmüştür (Overschee ve Moor, 1996; Peeters ve Roeck, 2000).

$$[M]\{\ddot{U}(t)\} + [C]\{\dot{U}(t)\} + [K]\{U(t)\} = \{R(t)\} = [B]\{u(t)\} \quad (1.40)$$

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

Burada, $\{R(t)\}$ kuvvet vektörü, ortamdaki verileri simgeleyen $[B]$ matrisi ve $\{u(t)\}$ vektörü cinsinden ifade edilebilmektedir. Dinamik denge denklemi, denklem (1.40), titreşen yapının davranışını temsil etmesine rağmen bu şekliyle SAB yöntemine uygun değildir. Bu yüzden, denklem (1.40) daha uygun bir form olan ayrık-zaman stokastik durum-uzayı modeline dönüştürülmektedir. Durum-Uzay modeli kontrol teorisinden üretilmekte, fakat bu model inşaat mühendisliğinde viskoz sönüme sahip yapıların dinamik karakteristiklerini hesaplamak için kullanılmaktadır (Yu ve Ren, 2005). Aşağıdaki tanımlamalar kullanılarak (1.40) denklemi,

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= \begin{pmatrix} U(t) \\ \dot{U}(t) \end{pmatrix} \\ A_* &= \begin{pmatrix} 0 & I_{n_2} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{pmatrix} \\ B_* &= \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}B \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (1.41)$$

$$\dot{x}(t) = A_*x(t) + B_*u(t) \quad (1.42)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Burada, A_* durum matrisini, B_* veri matrisini ve $x(t)$ durum vektörünü göstermektedir.

Çevresel titreşim testlerinde, yapının bütün serbestliklerini ölçmek pek mümkün olmamaktadır. Dolayısıyla, durum-uzay vektörünün eleman sayısı, sistemin durumunu tanımlayan bağımsız değişken sayısına eşittir ve gözlem denklemi,

$$y(t) = C_*x(t) + D_*u(t) \quad (1.43)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Burada, C_* sistem davranış matrisini, D_* doğrudan iletim matrisini göstermektedir. Denklem (1.42) ve (1.43) sürekli-zaman belirli durum-uzay modelini oluşturmaktadır. Burada, “sürekli zaman” ile ifadelerin herhangi bir $t \in \mathbb{N}$ anında değerlendirilebileceği ifade edilmektedir. Fakat ölçümler $k\Delta t$ ($k \in \mathbb{N}$) gibi ayırık zamanlarda gerçekleştirilmektedir. Örnekleme süresi ve ortamdaki gürültü sinyal verilerini her zaman için etkilemektedir. Örneklemeden sonra, durum-uzay modeli,

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= A_*x_k + B_*u_k \\ y_k &= C_*x_k + D_*u_k \end{aligned} \right\} \quad (1.44)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Burada, $x_k = x(k\Delta t)$ ayırık-zaman durum vektörünü, u_k belirgin etki sinyal vektörünü göstermektedir. Gerçek operasyonel koşullarda yapılan ölçümler, yapıya ve dış ortamdaki gürültüye ait sinyalleri içermektedir. Dolayısıyla denklem (1.44)'da stokastik gürültü bileşenleri eklendiğinde belirli-stokastik durum-uzay modeli,

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= A_*x_k + B_*u_k + w_k \\ y_k &= C_*x_k + D_*u_k + v_k \end{aligned} \right\} \quad (1.45)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Burada, w_k , modeldeki belirsizlikler ve kusurlar nedeniyle işlenen gürültü sinyallerini, v_k ise ivmeölçer kusurlarından dolayı işlenen gürültü sinyalini göstermektedir. Her iki vektörde değeri ölçülemeyen sinyallerden oluşmaktadır. Etkisi olmayan beyaz gürültü ve kovaryans matrisleri,

$$E_* \left[\begin{pmatrix} w_p \\ v_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_q^T & v_q^T \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad (1.46)$$

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

$$\delta_{pq} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } p = q \\ 0, & \text{eğer } p \neq q \end{cases} \quad (1.47)$$

SAB yönteminde yapı sisteminin davranışı, normal operasyon koşullarında belirlenmektedir. Bu durumda, (1.45)'te gösterilen belirgin sinyal verisi u_k 'yi, gürültü terimleri olan w_k ve v_k 'den ayırt etmek mümkün değildir. Bunun için, u_k gürültü terimleri w_k ve v_k cinsinden yazılıp yapının ayrık-zaman stokastik durum-uzay modeli,

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= A_* x_k + w_k \\ y_k &= C_* x_k + v_k \end{aligned} \right\} \quad (1.48)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (1.48), çevresel titreşimlerden dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde zaman-tanım alanının temelini oluşturmaktadır.

1.6. Sonlu Eleman Model İyileştirme Yöntemleri

Mühendislik yapılarının dinamik etkiler altındaki yapısal davranışları, doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı olarak tanımlanan dinamik karakteristiklere bağlı olarak belirlenmektedir. Günümüzde dinamik karakteristikler, yapıların proje verileri dikkate alınarak belirlenen eleman boyutları, malzeme özellikleri ve sınır şartlarına göre oluşturulan sonlu eleman modellerinin modal (serbest titreşim) analizleri sonucunda analitik olarak belirlenmektedir. Fakat analizler sırasında dikkate alınan parametreler, yapı malzemesinin zamanla dayanımını yitirmesi, yapının inşası sırasında gerçekleşen işçilik hataları, yapının maruz kaldığı farklı yüklemeler sonucu oluşan çatlama, yorulma, mesnet çökmeleri gibi nedenlerden dolayı değişime uğramış ve yapı dinamik karakteristikleri zaman içerisinde proje değerlerinden uzaklaşmış olabilmektedir. Dolayısıyla, analitik olarak belirlenen dinamik karakteristiklerin, yapıların deprem davranışlarının belirlenmesinde kullanılmasıyla doğru olmayan analiz sonuçlarının elde edilebileceği düşünülmektedir. Bu nedenle, yapı dinamik karakteristiklerinin analitik yöntemlerin yanında deneysel yöntemlerle de belirlenmesi gerekmektedir. Deneysel yöntemler doğrudan yapı üzerine uygulandığından, elde edilen dinamik karakteristiklerde yapının o andaki mevcut durumunu yansıtmaktadır (Türker, 2011; Sevim, 2010; Altunışık, 2010).

Dinamik karakteristiklerin analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmesi, elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve sonuçlar arasındaki farklılıkların yorumlanması ihtiyacını beraberinde getirmektedir. Genellikle oluşabilecek farklılıklar, sonlu eleman modeline dayalı analitik çözümler sırasında dikkate alınan belirsiz parametrelerden (malzeme ve kesit özellikleri, sınır şartları) kaynaklanmaktadır. Analitik ve deneysel dinamik karakteristikler arasındaki farklılık %5-10 civarında ise, analitik dinamik karakteristiklerin yapının mevcut durumunu yansıttığı kabul edilmektedir (Türker, 2011). Fakat bu değer %5-10'dan büyük ise analitik dinamik karakteristiklerin yapının mevcut durumunu yansıtmadığı kabul edilmektedir. Bu durumda, yapının sonlu eleman modelinin, deneysel ölçüm verilerine göre iyileştirilmesi gerekmektedir. Böylelikle sonuçlar arasındaki farklılıklar minimum seviyeye indirilmekte ve yapının mevcut durumunu yansıtan sonlu eleman modeli elde edilmektedir.

Yapı sonlu eleman modelini iki şekilde iyileştirmek mümkündür. Bunlar Deneme Yanılma Yöntemi ve Optimizasyon Yöntemleridir (Şahin, 2009). Deneme Yanılma

Yöntemi'nde, bir yapının sonlu eleman modeli oluşturulurken kullanılan malzeme özellikleri ve sınır şartları gibi belirsiz parametreler yeniden düzenlenerek sonlu eleman model iyileştirilmesi yapılır. Bu çalışmada da model iyileştirme yöntemi olarak Deneme Yanılma Yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyon Yöntemi ise temelde Deneme Yanılma Yöntemi'ni kullanır. Şöyleki, malzeme özellikleri ve sınır şartları gibi belirsiz parametreler için tanımlanan belli bir aralıktaki bütün değerler için sonlu eleman modeli tek tek analiz edilir. Her bir analiz sonucu elde edilen teorik değerler ile deneysel sonuçlar karşılaştırılır ve deneysel verilere en yakın sonucu veren belirsiz parametreler kullanılarak oluşturulan model elde edilir. Elde edilen bu model, iyileştirilmiş sonlu eleman modeli adını alır.

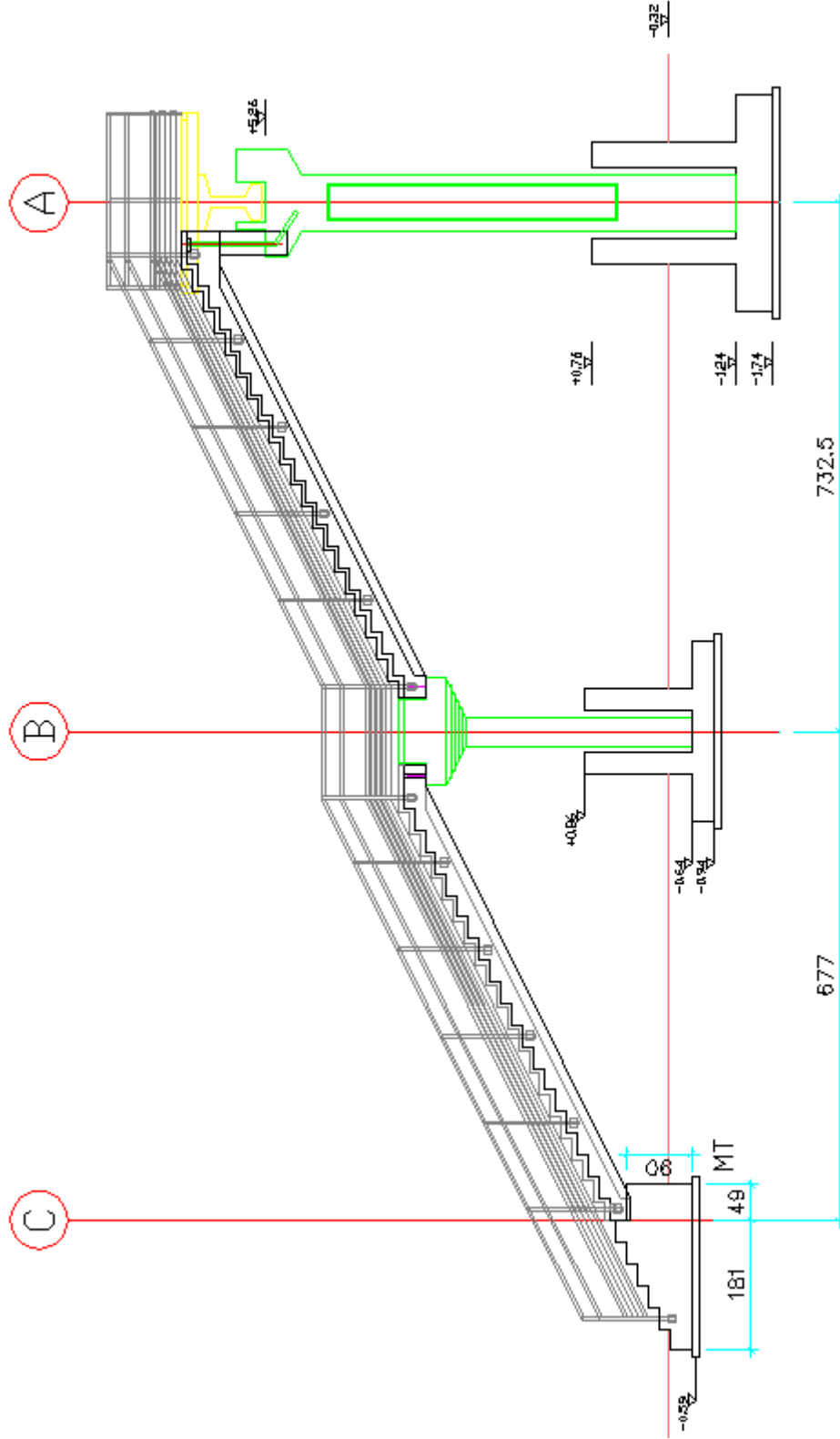
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Tez çalışmasının bu kısmında, Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak, prefabrik yapıların deneysel ve teorik dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Deneysel ve teorik dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde bir prefabrik sanayi yapısı ve birde prefabrik üstgeçit seçilmiş ve bu yapılar üzerinde uygulamalar yapılmıştır. Çalışmada, SAP2000 programı kullanılarak prefabrik yapıların 3-boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve teorik dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Ayrıca yapılar üzerinde çevresel titreşim etkileri olarak yaya hareketlerinden, rüzgâr ve trafik yüklerinden yararlanılarak Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle ölçümler gerçekleştirilmiş ve böylece yapılara ait deneysel dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Her iki yapı için ayrı ayrı teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen dinamik karakteristikler birbirleriyle karşılaştırılmış ve bu sonuçlar arasındaki farklılıklar en aza indirilecek şekilde prefabrik yapıların sonlu eleman modelleri düğüm noktalarındaki rijitlik katsayılarının değişimleri göz önüne alınarak iyileştirilmiştir. Bu tez çalışmasında, uygulama örnekleri olarak C-1 üstgeçidi ve Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi olmak üzere iki farklı prefabrik yapı seçilmiştir.

2.1. C-1 Üstgeçidi

2.1.1. C-1 Üstgeçidi'ne Ait Genel Bilgiler

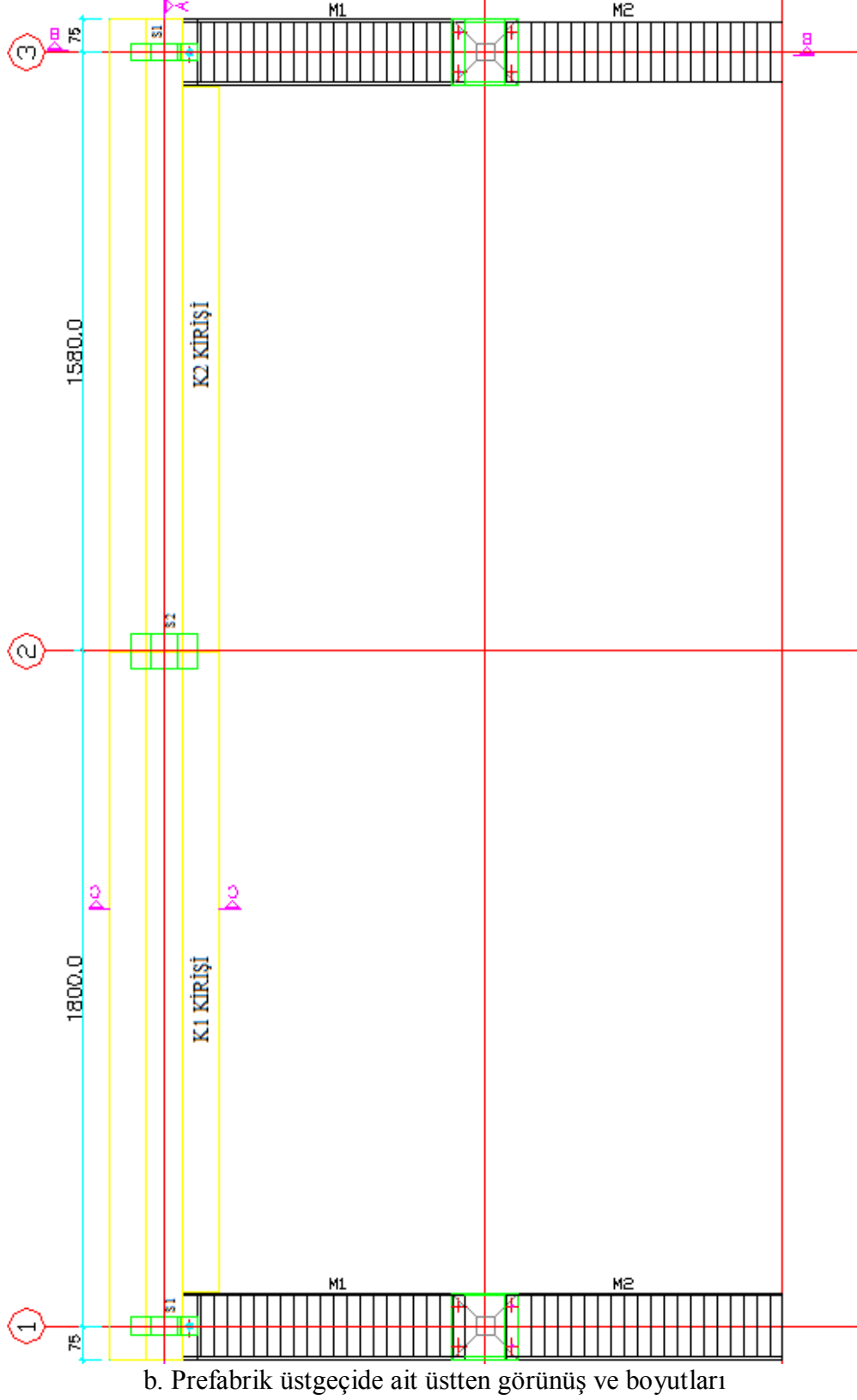
C-1 Üstgeçidi Trabzon-Rize karayolu üzerinde, Karadeniz Teknik Üniversitesi C kapısı çıkışında bulunmaktadır. Yoğun bir yaya trafiğine maruz kalan aynı zamanda yoğun taşıt trafiğinin oluşturduğu titreşimler etkisinde olan üstgeçit C kapısıyla Trabzon Havalimanı bağlantısını sağlamaktadır. Üstgeçit iki açıklıktan oluşmakta ve bu açıklıkları oluşturan kirişler orta refüj ve yaya kaldırımlarına oturan toplam üç kolon tarafından taşınmaktadır. Bir açıklığı diğer açıklığına göre daha fazla olan üstgeçidin tabliye açıklıkları birer kirişle geçilmiştir. Şekil 2.1'de üstgeçide ait boyutlar verilmektedir.



a. Prefabrik üstgeçide ait kesit ve boyutları

Şekil 2.1. C-1 üstgeçidine ait mimari proje verileri

Şekil 2.1'in devamı



Şekil 2.2’de incelemeleri yapılan Karadeniz Teknik Üniversitesi C kapısı çıkışında bulunan C-1 üstgeçidine ait görüntüler verilmektedir.



Şekil 2.2. C-1 üstgeçidine ait görüntüler

2.1.2. C-1 Üstgeçidi’nin Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Teorik analizlerin gerçekleştirilmesi için yapıları en iyi şekilde temsil edecek sonlu eleman modellerinin oluşturulması gerekmektedir. Sonlu eleman modelin oluşturulması sırasında yapının gerçek davranışını temsil edecek elemanların seçilmesi, en yakın malzeme özelliklerinin ve sınır koşullarının atanması oldukça önemlidir. Aksi halde oluşturulan sonlu eleman modeli gerçek yapıyı temsil eden bir model olmaktan oldukça uzaklaşmaktadır. Özetle, yapıların sonlu eleman modeli oluşturulurken gerekli veriler ne kadar doğru saptanırsa, oluşturulan model gerçek yapıyı ve davranışlarını o kadar iyi temsil etmektedir (Ercan vd., 2009).

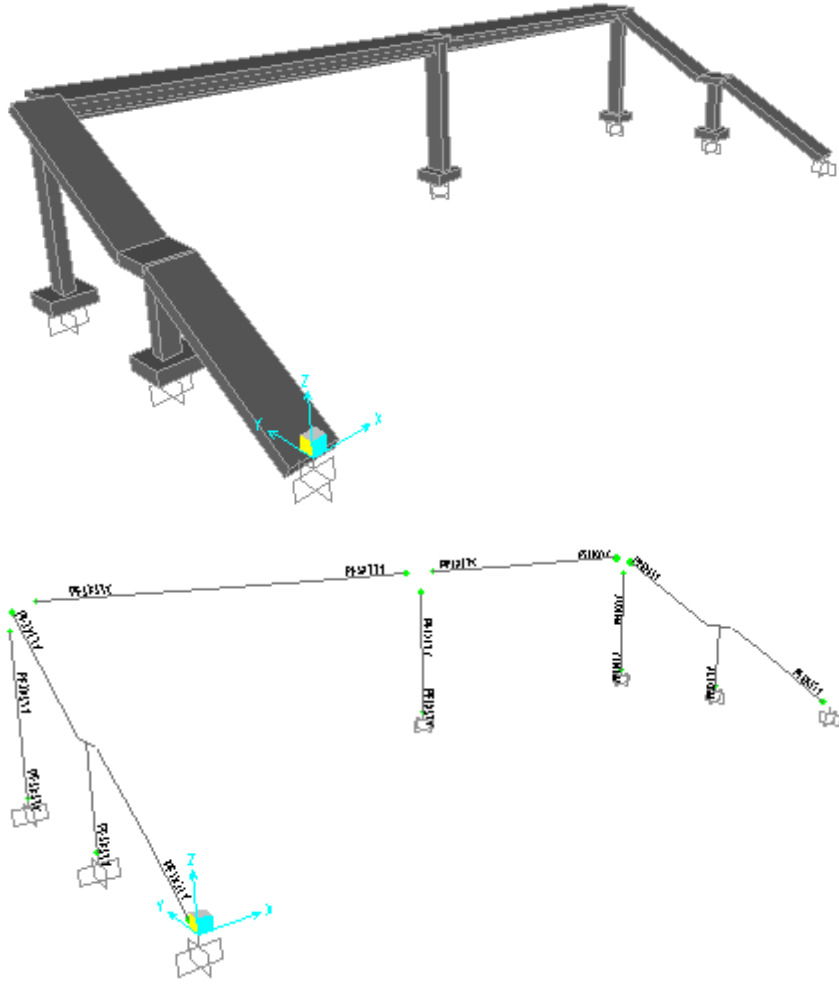
Uygulama örneklerinden biri olan C-1 üstgeçidine ait sonlu eleman modeli oluşturulurken SAP2000 (SAP2000, 1997) programı kullanılmıştır. Matematiksel modelin

oluşturulması için gerekli olan bütün geometrik boyutlar ve ölçüler Şekil 2.1’de verilen mimari projeden elde edilmiştir. C-1 üstgeçidinin öngermeli kiriş betonlarında C40, kolon betonları C25 ve grobeton olarak C14 kullanılmıştır. Yapıya ait malzeme özellikleri ise Tablo 2.1’de verilen değerler dikkat alınarak, modelleme aşamasında kullanılmıştır.

Tablo 2.1. C-1 üstgeçidine ait malzeme özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (N/m^2)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m^3)
Kolonlar (C40)	3.4E10	0.2	2300
Öngermeli Kirişler (C40)	3.4E10	0.2	2300
Merdivenler (C20)	2.8E10	0.2	2300
Merdiven Kolonları (C40)	3.4E10	0.2	2300
Sahanlıklar (C20)	2.8E10	0.2	2300
Tabliye (C20)	2.8E10	0.2	2300

Uygulama örneğinin SAP2000 programında modellenmesi aşamasında her bir noktada altı serbestliği olan kiriş elemanlar kullanılmıştır. Tabliye iki farklı kiriş elemandan oluşturulmuştur ve bu kiriş elemanların ayrı ayrı her bir düğüm noktasına, kolonların düğüm noktalarına ve merdivenlerin üst kısımlarına her bir doğrultu için 10000kNm/rad rijitlik katsayıları atanmıştır. Modelin kolon alt uçlarındaki mesnet şartları ankastre olarak dikkate alınmıştır. Üstgeçidi temsil etmek amacıyla oluşturulan ve rijitlik katsayılarının atandığı düğüm noktalarını gösteren model Şekil 2.3’te verilmektedir.



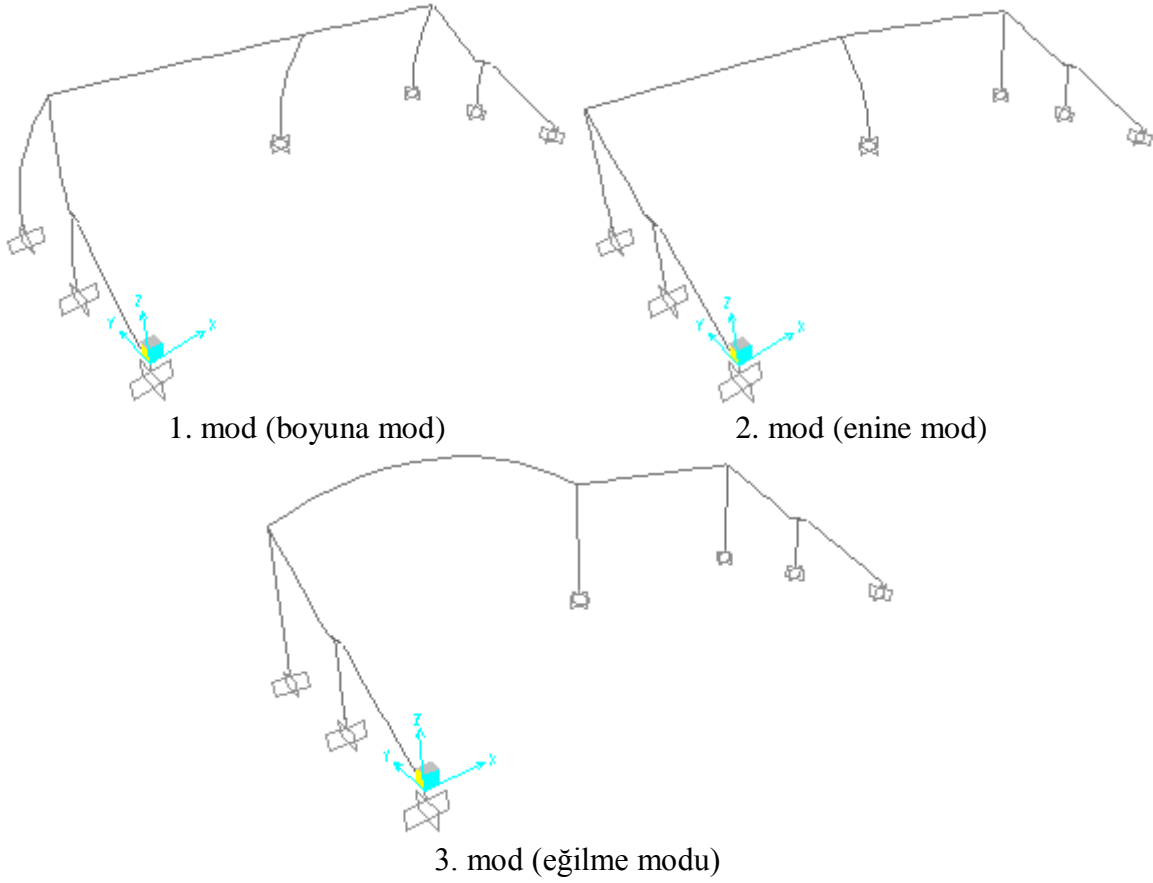
Şekil 2.3. C-1 üstgeçidi sonlu eleman modeli

2.1.2.1. C-1 Üstgeçidi'nin Teorik Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

SAP2000 sonlu elemanlar programı kullanılarak C-1 üstgeçidine ait oluşturulan ve yarı rijit düğüm noktalarına sahip model üzerinde Teorik Modal Analiz gerçekleştirilmiş ve teorik dinamik karakteristikler olan doğal frekanslar ve mod şekilleri elde edilmiştir. Teorik Modal Analiz sonucunda C-1 üstgeçidine ait elde edilen ilk üç moda karşılık gelen doğal frekans değerleri Tablo 2.2'de verilmektedir. Analiz sonuçlarına göre ilk üç teorik doğal frekans 2-5Hz arasında değerler almaktadır. Bu doğal frekans değerlerine karşılık gelen mod şekilleri incelendiğinde ise birinci modun x-ekseni doğrultusunda yanal, ikinci modun orta kolonda y-ekseni doğrultusunda yanal ve üçüncü modun ise sol tabliyede eğilme hareketi yaptığı Şekil 2.4'te görülmektedir.

Tablo 2.2. Model üstgeçide ait analitik doğal frekanslar, periyotlar ve modal davranışlar

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Modal Davranış
1	2.284	0.438	Boyuna mod
2	3.411	0.293	Enine mod
3	4.536	0.22	Eğilme modu



Şekil 2.4. C-1 Üstgeçidi'ne ait analitik olarak elde edilen ilk üç mod şekli

2.1.3. C-1 Üstgeçidi'nin Deneysel Modal Analizi

C-1 Üstgeçidinin deneysel dinamik karakteristiklerini belirlemek için Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılmıştır. Ölçüm x-y ve z doğrultularında üç kez referanslı olarak

gerçekleştirilmiş ve her aşama için bir referans olmak üzere toplam sekiz ivmeölçer kullanılmıştır. Üstgeçit iki açıklıktan oluşmakta ve ivmeölçerler her açıklığın başlangıç, bitiş ve orta noktasına montaj aparatları yardımıyla yerleştirilmiştir (Şekil 2.5).



a. x- doğrultusunda yerleştirilen ivmeölçerler ve referans



b. y ve z doğrultusunda yerleştirilen ivmeölçerler ve referans

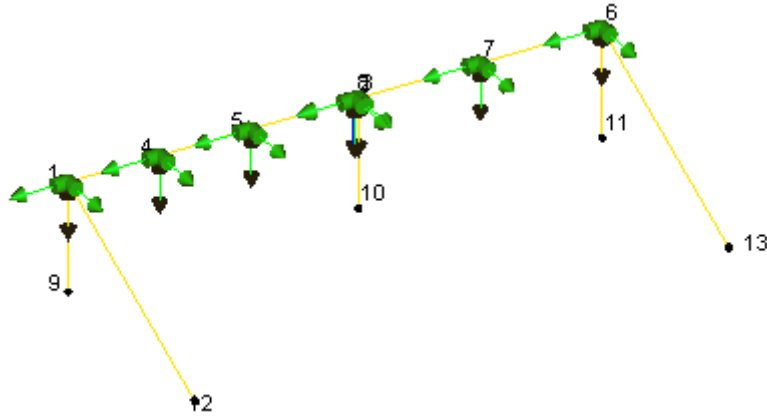
Şekil 2.5. C-1 Üstgeçidi için ivmeölçerler ve referans yerleşimine ait görüntüler

Ölçümler 0-6.25Hz frekans aralığında ve toplam 45dk süreyle çevresel titreşimler altında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ölçümlere ait görüntüler Şekil 2.6'da verilmektedir.



Şekil 2.6. C-1 Üstgeçidi üzerinde gerçekleştirilen deneysel ölçümlere ait görüntüler

Üstgeçit üzerindeki ölçümler için PULSE (PULSE, 2006) programında oluşturulan temsili model ve ivmeölçerleri gösteren ölçüm düzeni Şekil 2.7’de verilmektedir.



Şekil 2.7. C-1 Üstgeçit üzerindeki ölçümlerde deneysel ölçüm düzeni ve ivmeölçerlerin yönleri

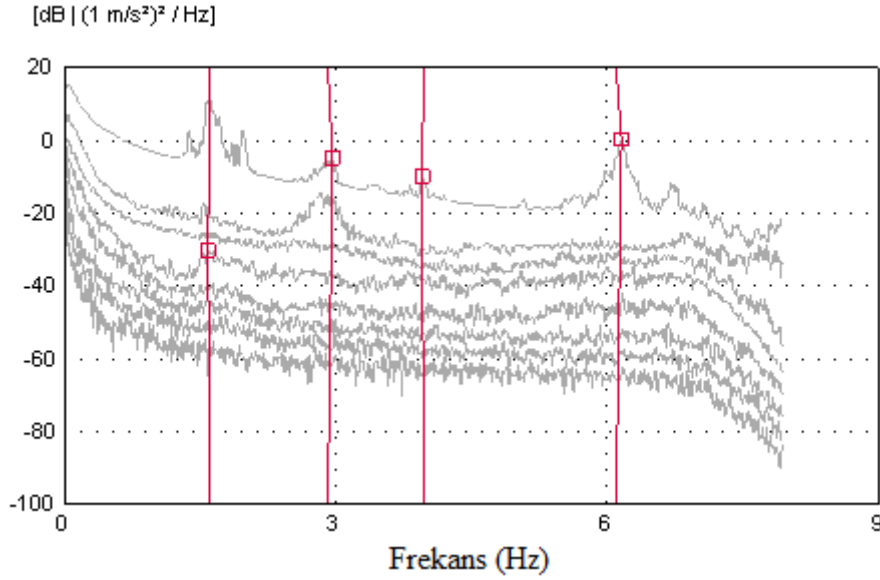
2.1.3.1. C-1 Üstgeçidi'nin Deneysel Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

C-1 Üstgeçidi'nin deneysel dinamik karakteristikleri, Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerinden frekans ortamında Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) ve zaman ortamında Stokastik Alt Alan Belirleme (SAB) yöntemlerine göre ayrıştırma işlemleri yapılarak elde edilmiştir. Yöntemin basitliği ve işlem hızının yüksek olması açısından Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma Yöntemi tercih edilmektedir. Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemi'nin tercih

edilme nedeni ise yöntemin, zaman verileri ile çalışması ve bu yüzden işlem adımlarında herhangi bir dönüşüm gerektirmemesidir.

2.1.3.1.1. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma Yöntemiyle C-1 Üstgeçidi'ne Ait Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Üstgeçit üzerinde gerçekleştirilen modal ölçümler sonrasında, Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma Yöntemi (GFTAA) ile elde edilen tekil değerler Şekil 2.8'de verilmektedir.



Şekil 2.8. C-1 üstgeçidine ait spektral yoğunluk fonksiyonu

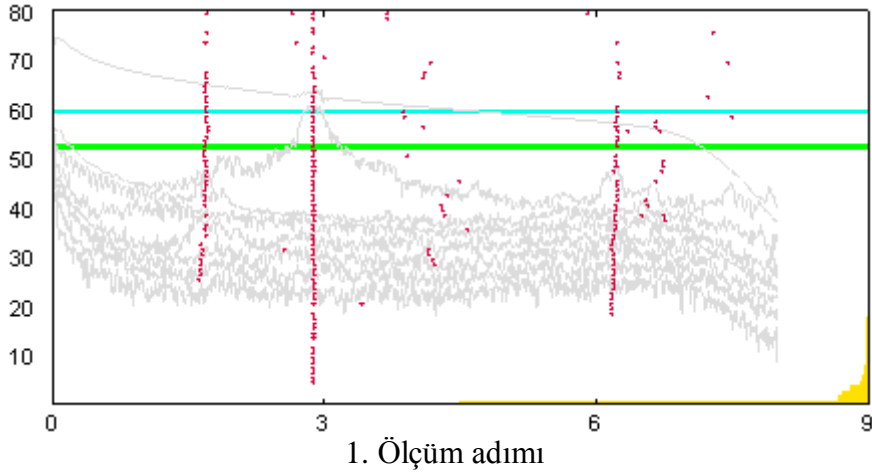
Tablo 2.3'te spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılarak belirlenen doğal frekans değerleri ve sönüm oranları verilmektedir.

Tablo 2.3. C-1 Üstgeçidi'ne ait deneysel ölçümden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

Frekans No	GFTAA Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)
1	1.604	0.347
2	2.917	1.684
3	6.104	0.489

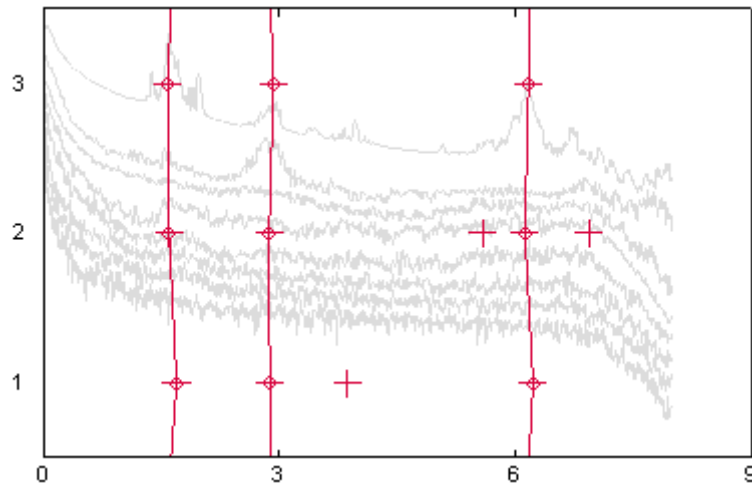
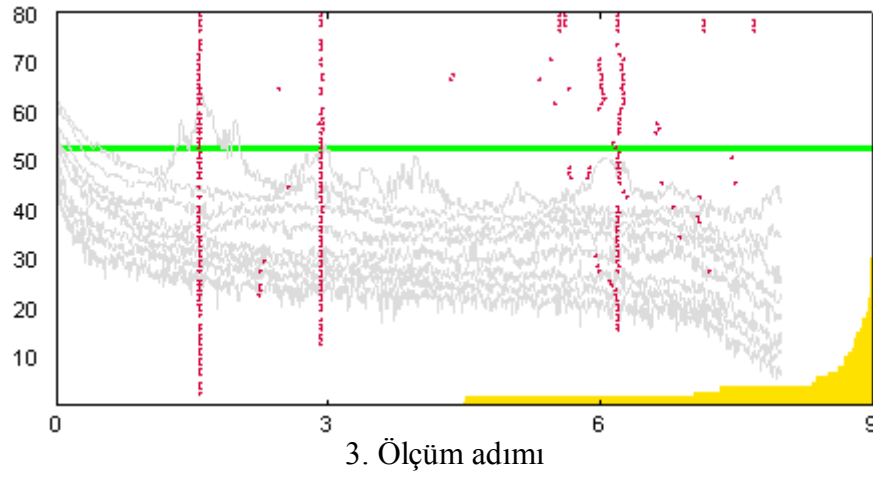
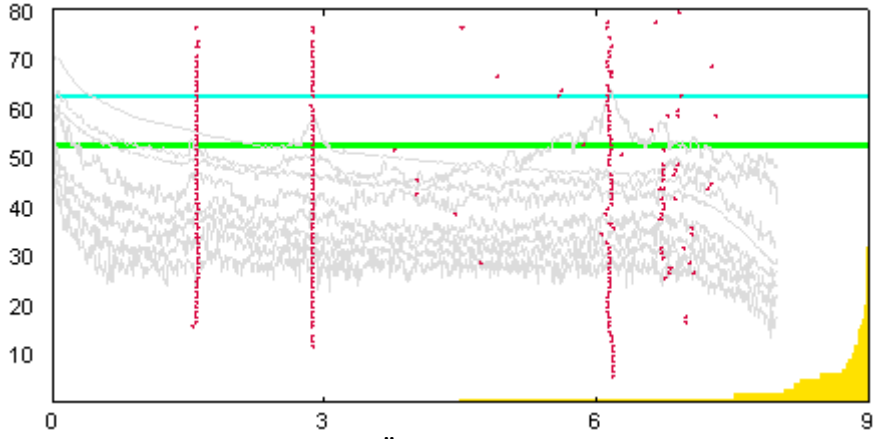
2.1.3.1.2. Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemiyle C-1 Üstgeçidi'ne Ait Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Gerçekleştirilen ölçümler sonucunda C-1 üstgeçidine ait Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemi (SAB) ile elde edilen kararlılık diyagramları ve spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 2.9 ve 2.10'da verilmektedir.



Şekil 2.9. C-1 Üstgeçidi'ne ait kararlılık diyagramları

Şekil 2.9'un devamı



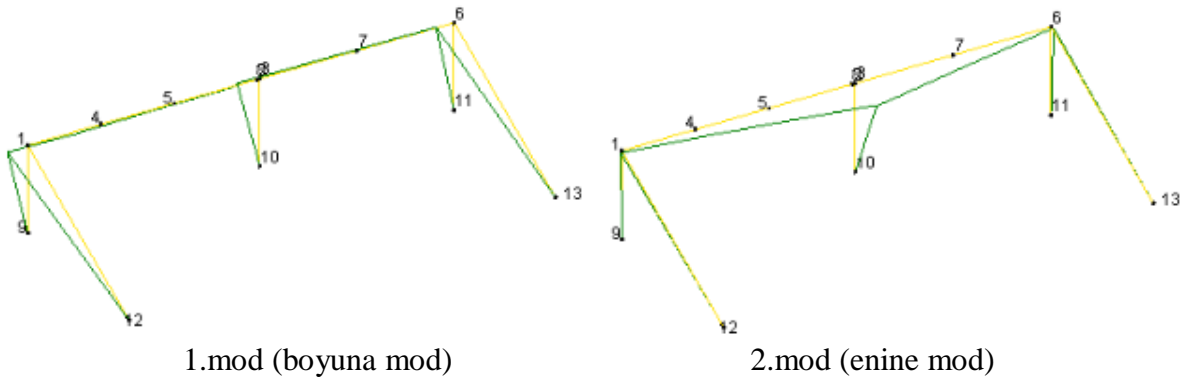
Şekil 2.10. C-1 Üstgeçidi'ne ait spektral yoğunluk fonksiyonu

Tablo 2.4.'te spektral yoğunluk fonksiyonu kullanılarak belirlenen doğal frekans değerleri ve sönüm oranları verilmektedir.

Tablo 2.4. C-1 Üstgeçidi'ne ait deneysel ölçümden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

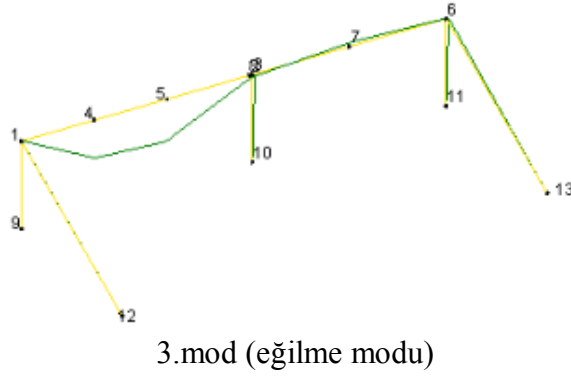
Frekans No	SAB Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)
1	1.627	2.203
2	2.895	1.44
3	6.178	1.559

C-1 Üstgeçidi'ne uygulanan deneysel ölçüm testlerinden GFTAA ve SAB yöntemlerine göre elde edilen frekans değerlerinin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu Tablo 2.3 ve Tablo 2.4 incelendiğinde görülmektedir. Ayrıca iki yöntem sonucunda elde edilen mod şekillerinin birbiriyle uyum içerisinde olmasından dolayı sadece bir yönteme ait mod şekilleri Şekil 2.11'de verilmektedir. Şekil 2.11 incelendiğinde birinci modun boyuna, ikinci modun orta kısımda enine öteleme ve üçüncü modun ise sol tabliyede eğilme modu olduğu görülmektedir.



Şekil 2.11. C-1 Üstgeçidi'ne uygulanan OMA sonucunda elde edilen mod şekilleri

Şekil 2.11'in devamı

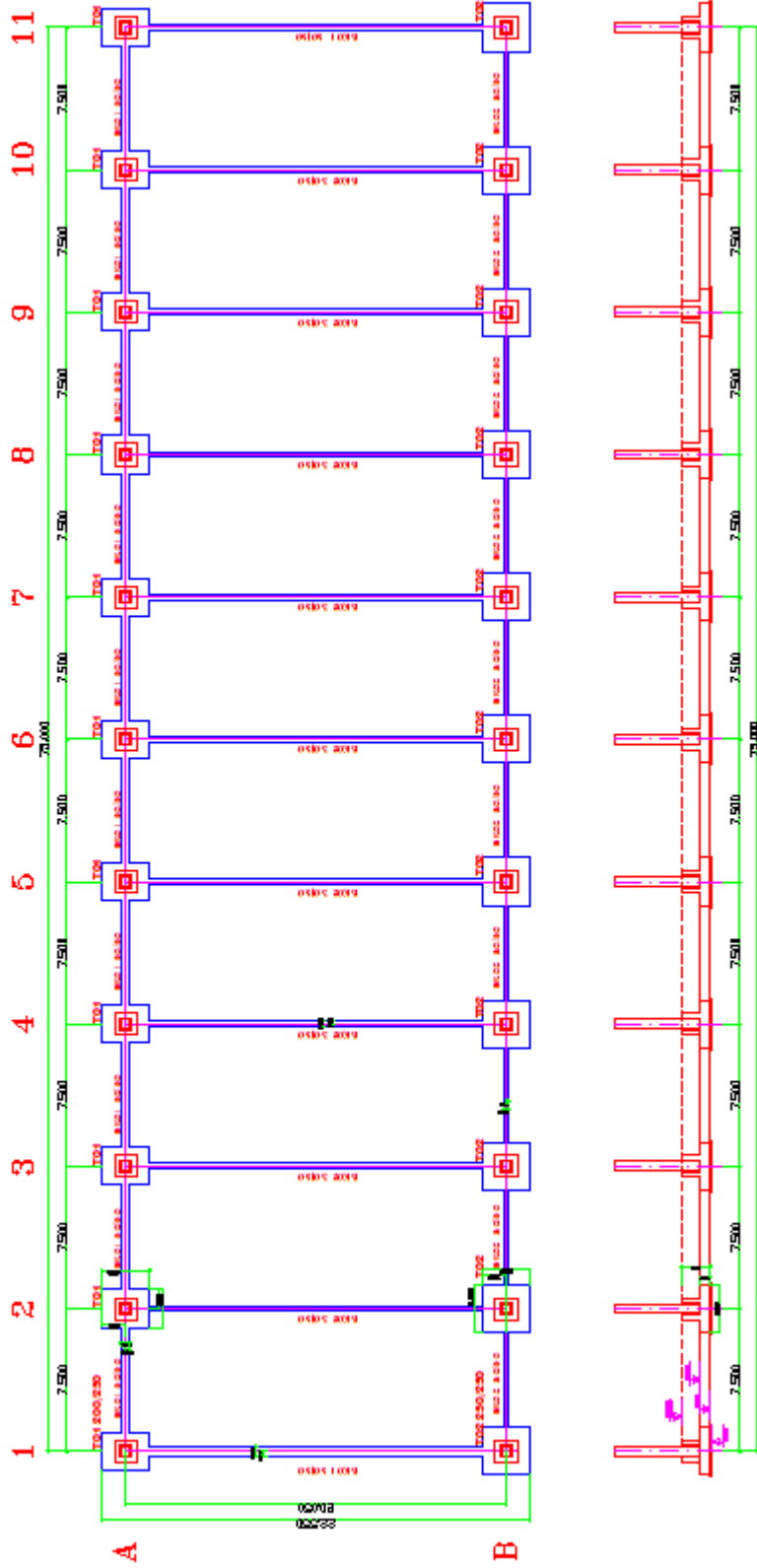


2.2. Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi

2.2.1. Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'ne Ait Genel Bilgiler

Diğer bir uygulama örneği olarak Trabzon'un Esiroğlu ilçesinde bulunan ve 2011 yılında inşa edilen Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi seçilmiştir. Bu endüstri yapısı Trabzon-Maçka karayolunun 12.kilometresinde bulunmaktadır. Toplam on açıklıklığa sahip olan bu tesis 75m uzunluğunda ve 20.050m genişliğindedir. Yapı toprak zemine oturmakla birlikte, karayolu ve çevresinde bulunan diğer sanayi tesislerinin yakın olmasından dolayı sürekli olarak titreşimlerin etkisinde bulunmaktadır. Tesise ait boyutlar Şekil 2.12'de verilmektedir.

Şekil 2.12'nin devamı



c. Üretim tesisine ait temel planı

Şekil 2.13'te incelemeleri yapılan Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'ne ait görüntüler verilmektedir.



Şekil 2.13. Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'ne ait görüntüler

2.2.2. Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'nin Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

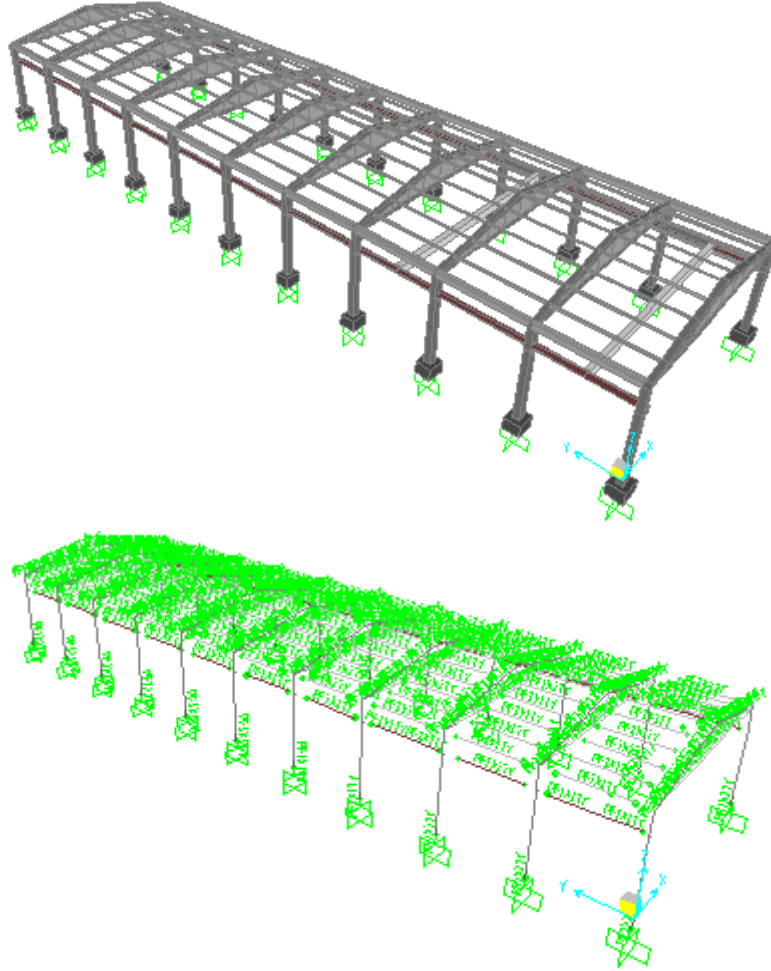
Üretim tesisine ait sonlu eleman modeli oluşturulurken SAP2000 (SAP2000,1997) programı kullanılmıştır ve matematiksel modelin oluşturulması için gerekli olan bütün geometrik boyutlar ve ölçüler Şekil 2.12'de verilen mimari projelerden sağlanmıştır. Yapıya ait malzeme özellikleri olarak Tablo 2.5'te verilen değerler kullanılmıştır.

Tablo 2.5. Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'ne ait malzeme özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (N/m^2)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m^3)
Çerçeve (C30)	3.2E10	0.2	2300
Temel (C20)	2.8E10	0.2	2300

Üretim tesisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak SAP2000 programında modellenmiştir. Yapı modellenirken 454 adet çerçeve ve 110 adet düzlem eleman kullanılmıştır. Kolonların alt ve üst uçlarına, kiriş uçlarına ve aşıklara her bir doğrultu için ayrı ayrı 10000kNm/rad rijitlik katsayısı atanmıştır. Kolonların alt uçlarındaki mesnet şartları ise ankastre olarak dikkate alınmıştır. Üretim tesisine ait SAP2000 programında oluşturulan

sonlu eleman modeli ve rijitlik katsayılarının atandığı düğüm noktalarını gösteren model Şekil 2.14'te verilmektedir.



Şekil 2.14. Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'ne ait sonlu eleman modeli

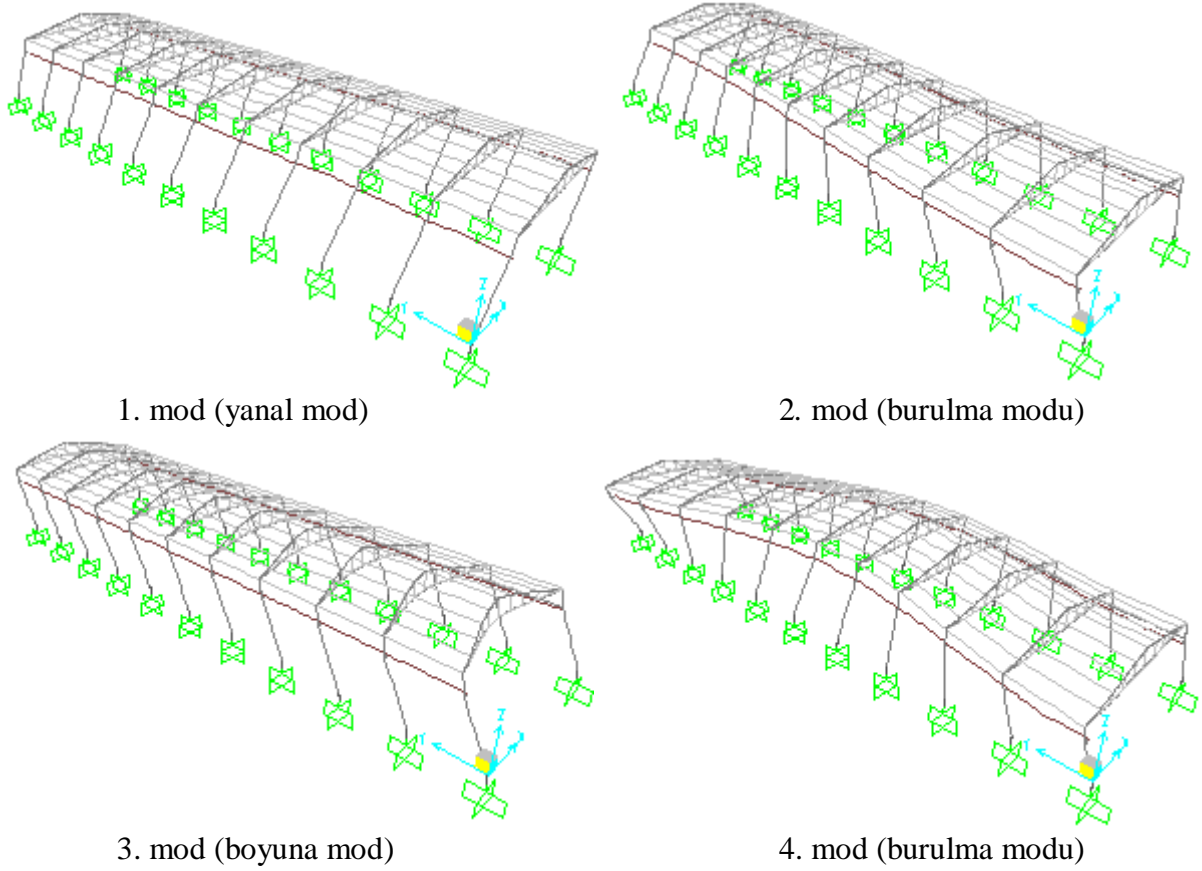
2.2.2.1. Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'nin Teorik Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Teorik Modal Analizi gerçekleştirilen üretim tesisine ait teorik dinamik karakteristikler olan doğal frekanslar ve mod şekilleri elde edilmiştir. Analiz sonucunda Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'ne ait elde edilen ilk beş modal davranış ve bu modal davranışlara karşılık gelen doğal frekans değerleri Tablo 2.6'da verilmektedir. Analiz sonuçlarına göre ilk beş teorik doğal frekans 0.8-1.3Hz arasında değerler almaktadır. Bu doğal frekans değerlerine

karşılık gelen mod şekilleri incelendiğinde ise birinci modun x-ekseni doğrultusunda yanal, ikinci modun burulma, üçüncü modun x-ekseni doğrultusunda boyuna, dördüncü ve beşinci modların her ikisinde de burulma modları olduğu Şekil 2.15’de görülmektedir.

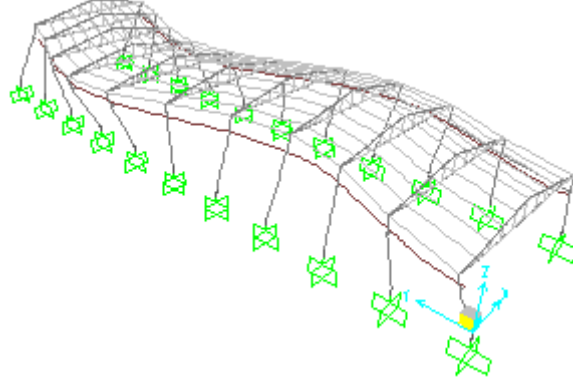
Tablo 2.6. Üretim tesisine ait analitik doğal frekanslar, periyotlar ve modal davranışlar

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Modal Davranış
1	0.870	1.148	Yanal mod
2	0.918	1.089	Burulma modu
3	1.001	0.999	Boyuna mod
4	1.069	0.936	Burulma modu
5	1.270	0.787	Burulma modu



Şekil 2.15. Üretim tesisine ait analitik olarak elde edilen ilk beş mod şekli

Şekil 2.15'in devamı



5. mod (burulma modu)

2.2.3. Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'nin Deneysel Modal Analizi

Üretim tesisine ait deneysel dinamik karakteristikleri belirlemek için üstgeçitte olduğu gibi Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılmıştır. Ölçüm x-y doğrultularında on iki adet tek eksenli ivmeölçerler kullanılarak tek seferde gerçekleştirilmiştir. Üretim tesisi toplamda on bir çerçeveden oluşmaktadır. İvmeölçer sayısının yetersiz olmasından ve ivmeölçerlerin montajındaki zorluklar nedeniyle çerçevenin başlangıç, bitiş ve orta noktalarından ölçüm alınmıştır. İvmeölçerler Şekil 2.16'da verildiği gibi yerleştirilmiştir.



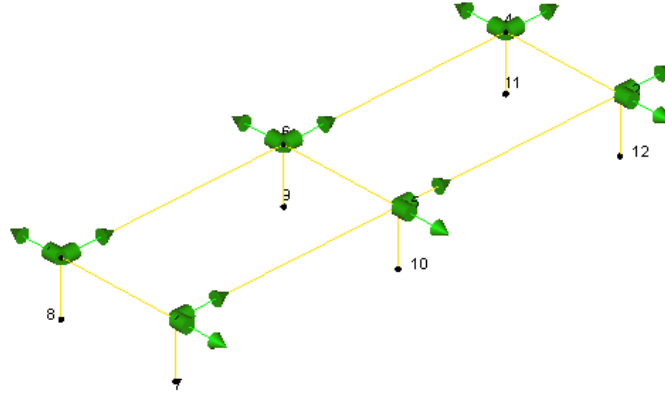
Şekil 2.16. Üretim tesisinin çerçeveleri üzerine yerleştirilen ivmeölçerlerin yerleşim düzeni

Ölçümler 0-6.25Hz frekans aralığında ve 30dk süreyle çevresel titreşimler altında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ölçümlere ait görüntüler Şekil 2.17’de verilmektedir.



Şekil 2.17. Üretim tesisi üzerinde gerçekleştirilen deneysel ölçümlere ait görüntüler

Üretim tesisi üzerindeki ölçümler için PULSE (PULSE, 2006) programında oluşturulan temsili model ve ölçüm düzeni Şekil 2.18’de verilmektedir.



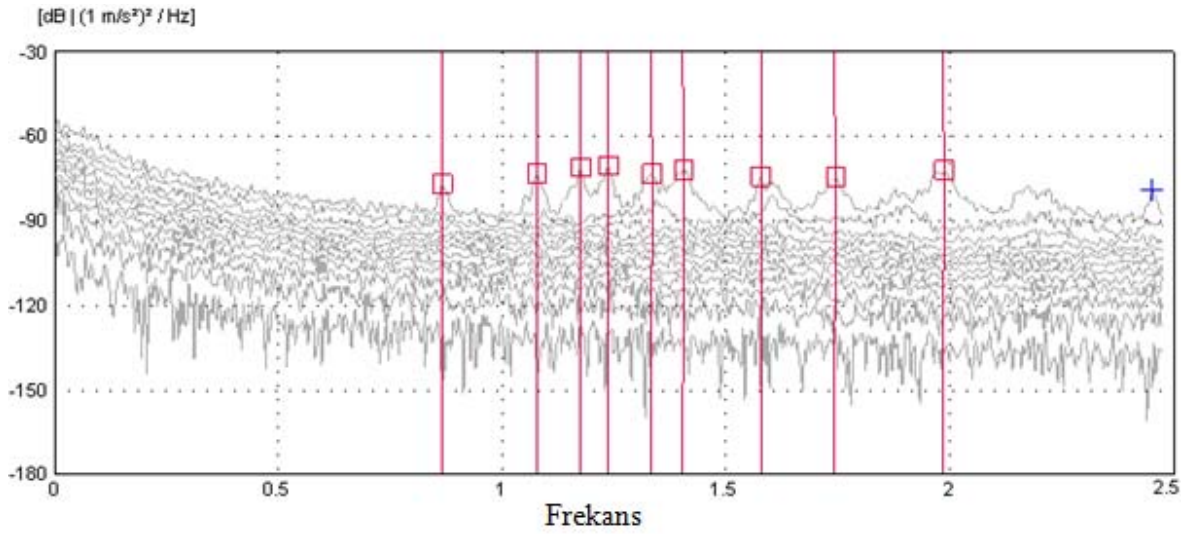
Şekil 2.18. Üretim tesisi üzerindeki ölçümlerde deneysel ölçüm düzeni ve ivmeölçerlerin yönleri

2.2.3.1. Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Üretim tesisinin deneysel dinamik karakteristikleri, Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerinden frekans ortamında Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) yöntemine göre ayrıştırma işlemi yapılarak elde edilmiştir.

2.2.3.1.1. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemiyle Üretim Tesisine Ait Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Üretim tesisi üzerinde gerçekleştirilen modal ölçümler sonrasında, Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi (GFTAA) ile elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 2.19’da verilmektedir.

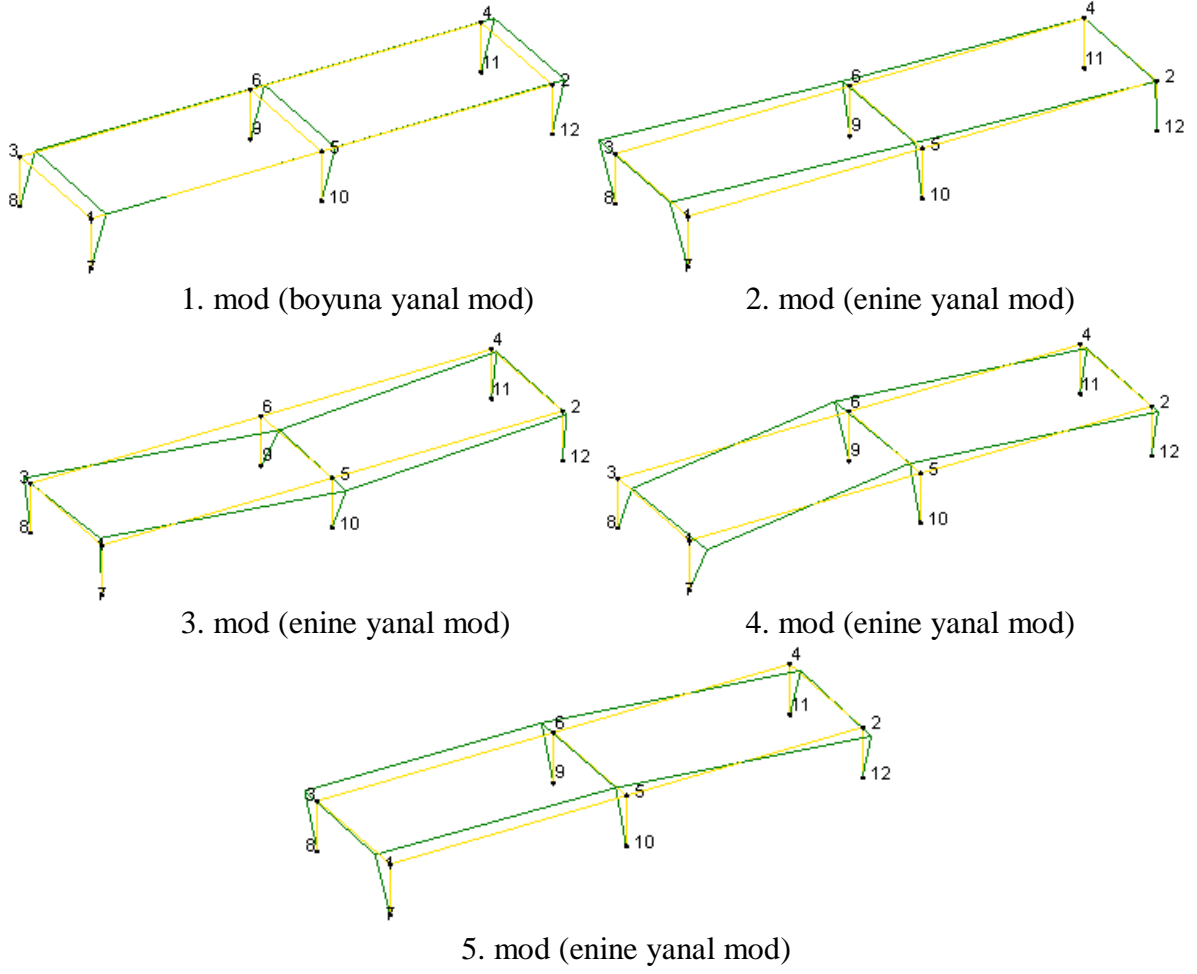


Şekil 2.19. Doğru Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisine ait spektral yoğunluk fonksiyonu

Spektral yoğunluk fonksiyonundan belirlenen doğal frekans değerleri ve modal sönüm oranları Tablo 2.7’de, mod şekilleri ise Şekil 2.20’de verilmektedir.

Tablo 2.7. Üretim tesisine ait deneysel ölçümden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

Frekans No	GFTAA Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)
1	0.869	0.774
2	1.079	0.841
3	1.176	0.428
4	1.240	0.772
5	1.338	0.724



Şekil 2.20. Üretim tesisine ait deneysel mod şekilleri

Şekil 2.20 incelendiğinde, birinci modun boyuna yanal mod, ikinci, üçüncü, dördüncü ve beşinci modların her birisinin enine yanal modlar oldukları görülmektedir.

3. İRDELEME VE DEĞERLENDİRMELER

Tez çalışmasının bu bölümünde uygulama örnekleri olarak seçilen iki farklı prefabrik yapı üzerinde analitik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen doğal frekanslar ve mod şekilleri olarak bilinen dinamik karakteristiklerin birbirleriyle karşılaştırılması ve değerlendirilmesinin ardından deneysel veriler ışığında SAP2000 programı yardımıyla oluşturulan analitik modellerin gerçek yapıları en iyi temsil edecek şekilde model güncelleme işlemlerine yer verilmektedir.

3.1. Teorik ve Deneysel Olarak Elde Edilen Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması

3.1.1. C-1 Üstgeçidi'ne Ait Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması

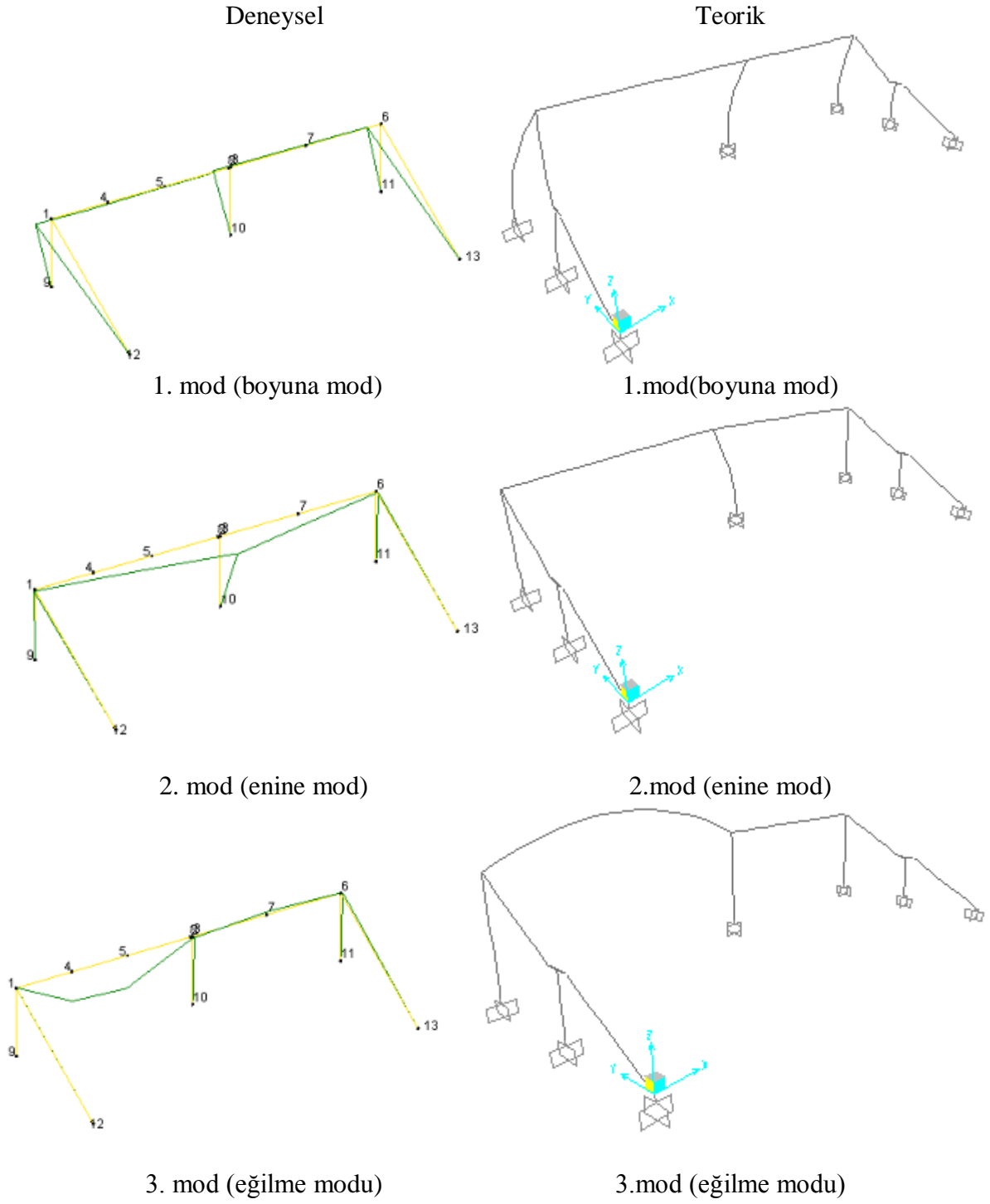
Analitik ve deneysel çalışmalar sonucunda C-1 Üstgeçidi'ne ait elde edilen dinamik karakteristikler karşılaştırmalı olarak Tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1. C-1 Üstgeçidi'ne ait deneysel ve analitik doğal frekansların karşılaştırılması

Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)				
	Deneysel		Analitik	Fark (%)	
	GFTAA	SAB		GFTAA	SAB
1	1.604	1.627	2.284	42.4	40.38
2	2.917	2.895	3.411	16.9	17.82
3	6.104	6.178	4.536	25.69	26.58

Üstgeçide ait analitik modelden elde edilen frekanslar ile deneysel frekans değerleri arasındaki ortalama farkın yaklaşık %29 değerinde olduğu Tablo 3.1'den anlaşılmaktadır. Bu farklılıkların analitik model oluşturma aşamasında malzeme özelliklerinden kaynaklanmadığı, prefabrik yapıların birleşim bölgelerinde yapılan kabullerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Üstgeçide ait teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen mod şekilleri karşılaştırmalı olarak Şekil 3.1'de verilmektedir ve aralarında iyi bir uyumun olduğu görülmektedir..



Şekil 3.1. C-1 Üstgeçidi'ne ait analitik ve deneysel mod şekillerinin karşılaştırılması

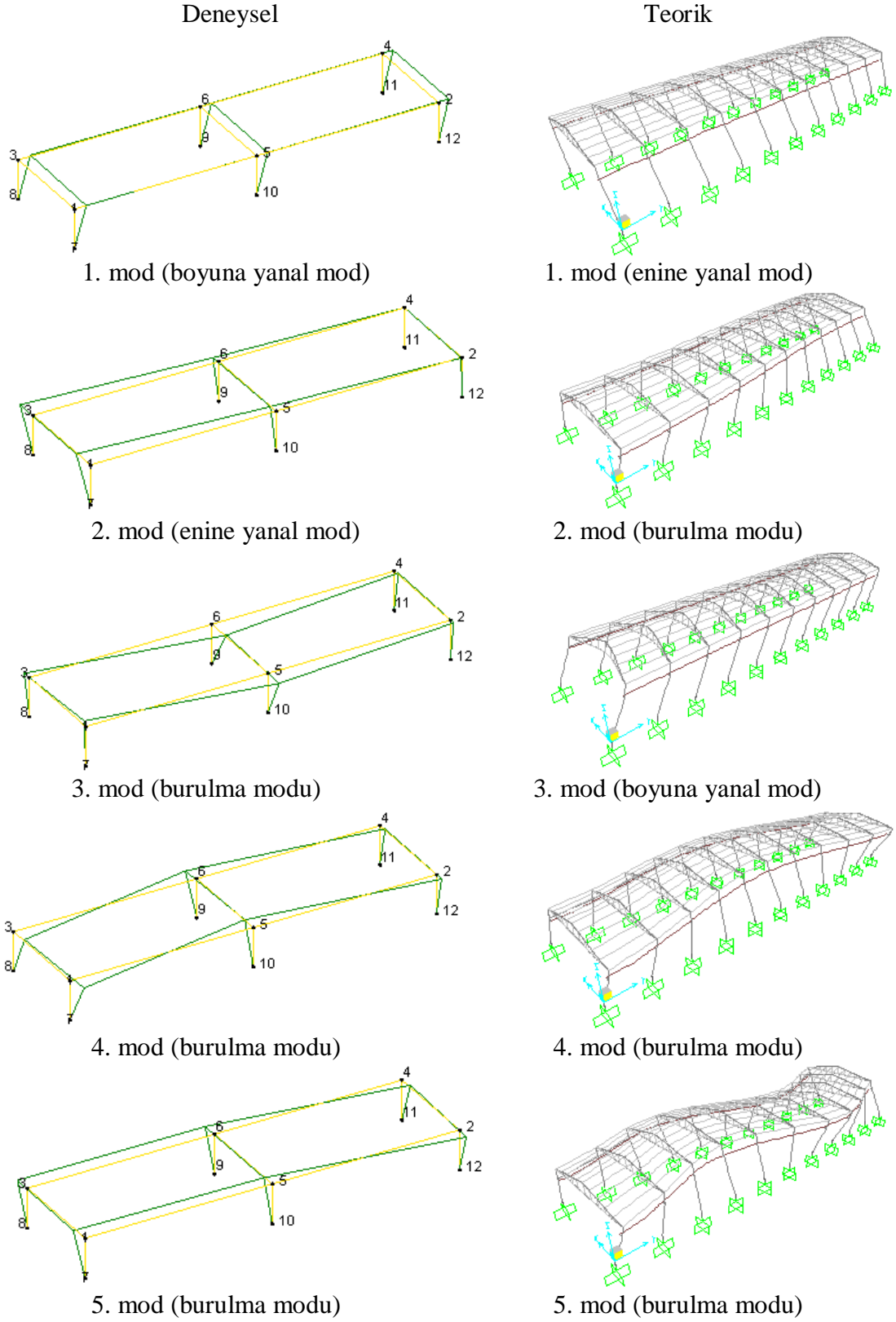
3.1.2. Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'ne Ait Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması

Üretim tesisi üzerinde uygulanan deneysel çalışma ve oluşturulan temsili model üzerinde gerçekleştirilen analitik çalışma sonuçlarında elde edilen dinamik karakteristiklerden biri olan doğal frekanslar karşılaştırmalı olarak Tablo 3.2'de verilmektedir.

Tablo 3.2. Üretim Tesisine ait deneysel ve analitik frekansların karşılaştırılması

Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)		
	Deneysel (GFTAA)	Analitik	Fark (%) (GFTAA)
1	0.869	0.870	0
2	1.079	0.918	14.92
3	1.176	1.001	14.88
4	1.240	1.069	13.79
5	1.338	1.270	5.08

Tablo 3.2'de görüldüğü gibi üretim tesisine ait analitik modelden elde edilen frekanslar ile deneysel frekans değerleri arasında farklılıklar bulunmakta ve ortalama fark yaklaşık %10 değerindedir. Bu farklılıkların üstgeçitte olduğu gibi analitik model oluşturma aşamasında malzeme özelliklerinden kaynaklanmadığı, prefabrik yapıların birleşim bölgelerinde yapılan kabullerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Üretim tesisine ait teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen mod şekilleri karşılaştırmalı olarak Şekil 3.2'de verilmektedir.



Şekil 3.2. Üretim tesisine ait deneysel ve analitik mod şekillerinin karşılaştırılması

Üretim tesisine ait analitik ve deneysel mod şekilleri arasında da frekans değerlerinde olduğu gibi bir takım farklılıkların olduğu Şekil 3.2'den anlaşılmaktadır. Bu farklılıkların frekans değerlerindeki farklarda olduğu gibi analitik modelleme sırasında birleşim bölgelerinde yapılan kabullerden kaynaklandığı ve bu konuda analitik kalibrasyon yapılması gerekliliği vardır.

3.2. Prefabrik Yapıların Sonlu Eleman Modellerinin İyileştirilmesi

C-1 Üstgeçidi ve Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi üzerinde yapılan teorik ve deneysel çalışmaların sonuçları karşılaştırılmış ve deneysel dinamik karakteristikler ile teorik sonuçlar arasında bir takım farklılıkların olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda sonlu eleman modellerinin deneysel veriler kullanılarak iyileştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Sonlu eleman model iyileştirmesinde bilinmesi gereken en önemli özelliklerden biri, doğruluğu hakkında kesine yakın bir bilgi sahibi olduğumuz parametreleri iyileştirmede kullanmamaktır (Sevim, 2010). Sonlu eleman model iyileştirmesi, malzeme özellikleri, sınır şartları, eleman kesit özellikleri veya eleman birleşimlerinin rijitlik katsayıları gibi doğruluğu tam olarak belirlenemeyen parametreler kullanılarak yapılmaktadır

Prefabrik yapıların teorik analizleri için gerekli olan sonlu eleman modelleri oluşturulurken birleşim bölgelerinin yarı-rijit olduğu ve rijitlik katsayısının her bölgede aynı değere sahip olduğu düşünülmüştür. Yapılara ait malzeme ve kesit özellikleri (elastisite modülü, poisson oranı, yapının fiziksel boyutları) ise projelerden alınmıştır. Bu durumda teorik ve deneysel sonuçlardaki farklılıkların yapılara ait malzeme özelliklerinden değil de her elemana ait birleşim noktasının rijitliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan model iyileştirme çalışmalarında öncelikli olarak birleşim bölgelerinin rijitliği dikkate alınmıştır.

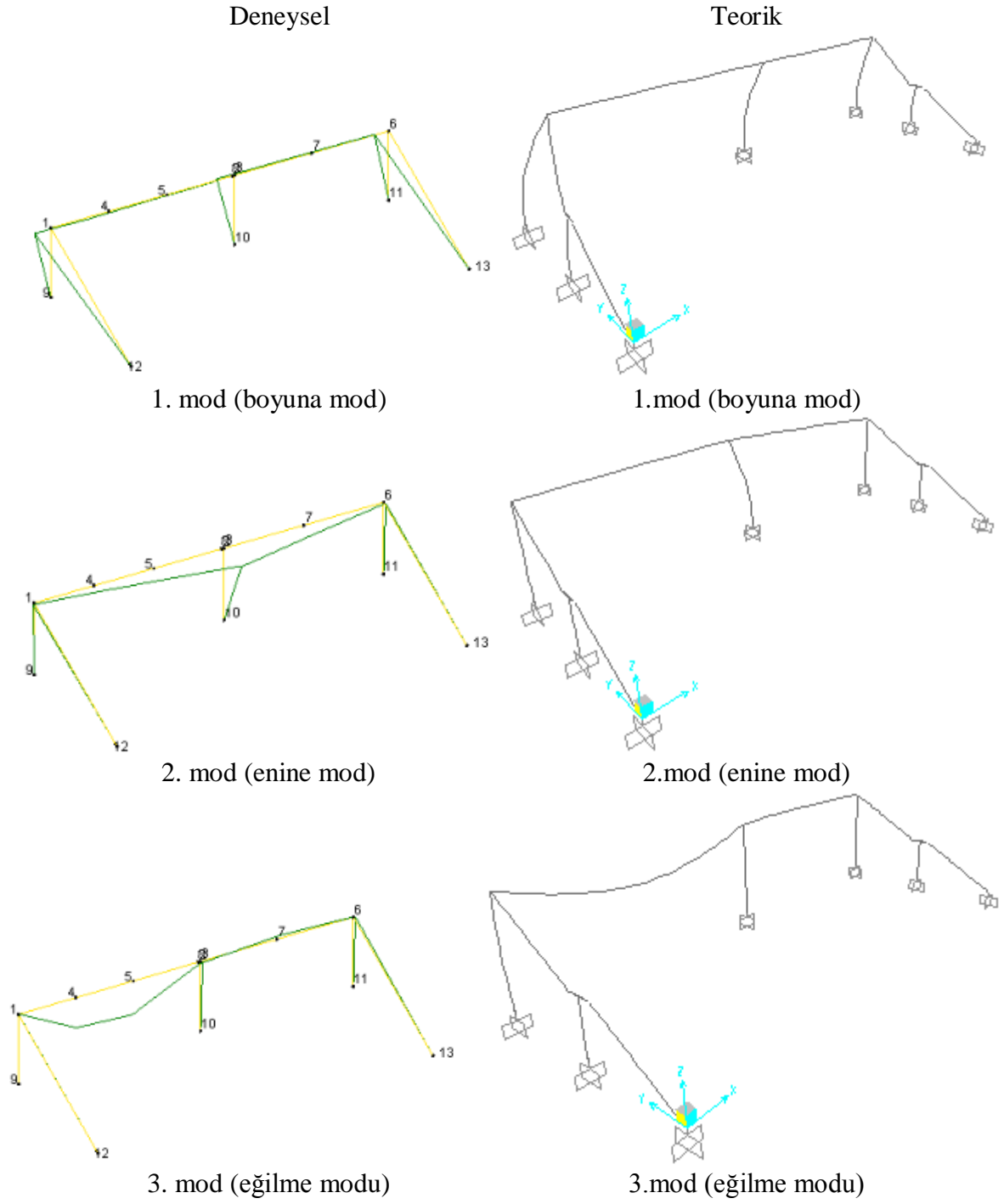
3.2.1. C-1 Üstgeçidi'ne Ait Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi

C-1 Üstgeçidi'ne Tablo 3.1'de verilen analitik ve deneysel frekans değerlerinin birbirlerinden farklı olduğu görülmektedir. Frekanslardaki farklılıkların giderilebilmesi veya minimum düzeye indirilebilmesi için C-1 Üstgeçidi'nin sonlu eleman modelinin deneysel ölçüm sonuçlarına göre iyileştirilmesi gerekmektedir. C-1 Üstgeçidi'ne ait kesit özellikleri ve

malzeme değerleri proje verilerine uygun olarak seçilmiştir. Dolayısıyla üstgeçit için iyileştirme parametreleri olarak düğüm noktalarının rijitlik katsayıları seçilmiş ve iyileştirme işlemi bu parametreye göre yapılmıştır. Başlangıç modelde, üstgeçit kolonlarının kirişlerinin her iki uçlarına ve merdivenlerin üst kısımlarına iki doğrultuda aynı rijitlik katsayıları verilmiştir. Kolonların oturduğu pabuçların zeminle olan bağlantıları rijit olarak düşünölmüş ve tüm pabulara ankastre mesnet atanmıştır. İyileştirme çalışmasında frekans değerlerinin azaltılması gerekliliği ile düğüm noktalarındaki rijitlikler her eleman için ayrı ayrı düşünölmüş ve atanmıştır. Bu rijitlik katsayıları 10000-50000kNm/rad aralığında değerler almaktadır. Tablo 3.3'ten anlaşılacağı üzere iyileştirme sonrasında analitik ve deneysel frekanslar arasında çok iyi bir uyum bulunmaktadır. Buna ek olarak mod Şekilleri arasındaki uyumun sağlandığı Şekil 3.3'ten görölmektedir.

Tablo 3.3. Model iyileştirme işlemi sonrasında C-1 Üstgeçidi'ne ait deneysel ve analitik frekanslar

Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)					
	Deneysel		Analitik		Fark (%)	
	GFTAA	SAB	İyileştirme Öncesi	İyileştirme Sonrası	GFTAA	SAB
1	1.604	1.627	2.284	1.612	0.5	0.92
2	2.917	2.895	3.411	2.91	0.24	0.52
3	6.104	6.178	4.536	6.051	0.87	2



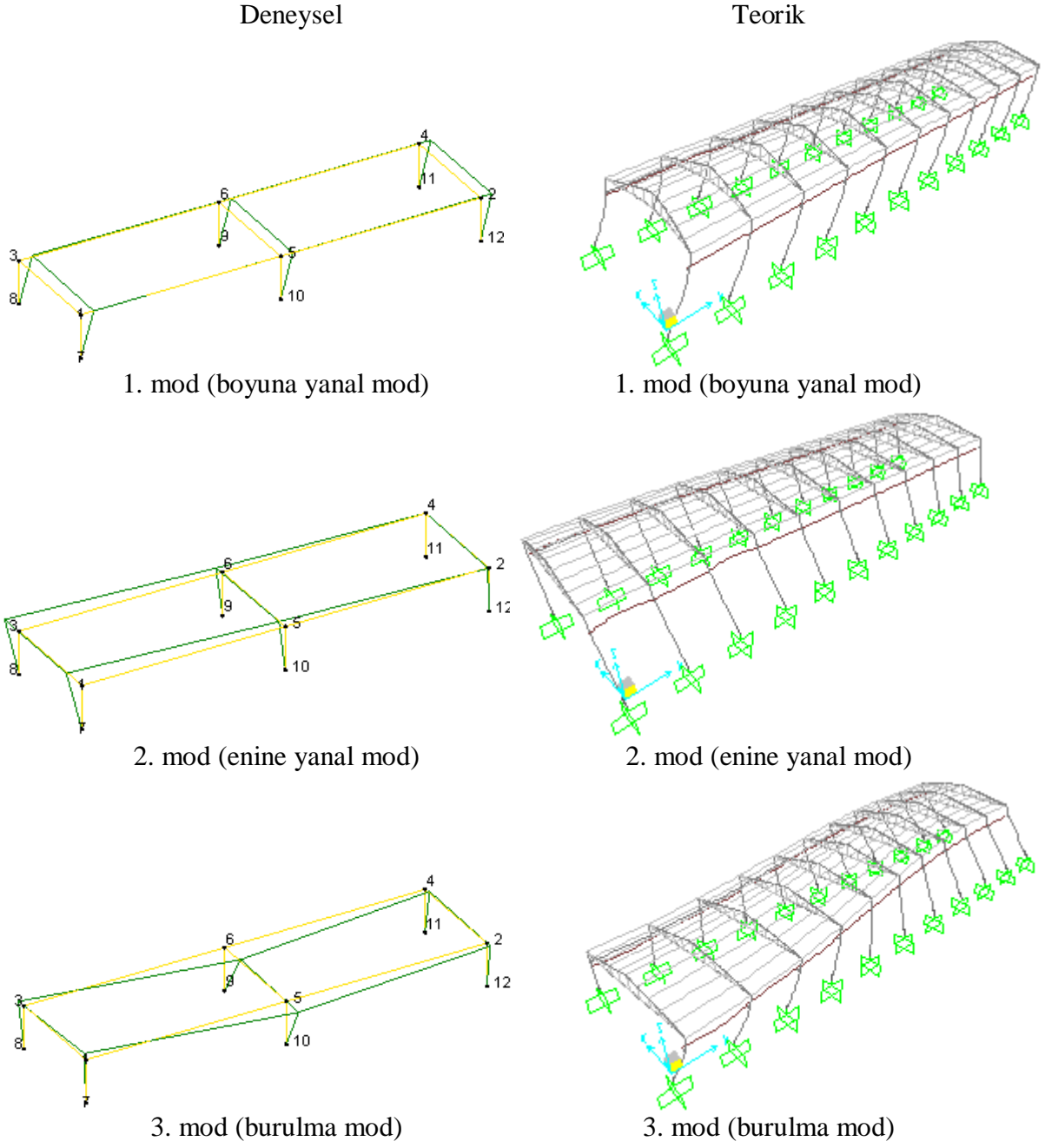
Şekil 3.3. C1- Üstgeçidi'ne ait deneysel mod şekilleri ile iyileştirilmiş teorik mod şekillerinin karşılaştırılması

3.2.2. Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'ne Ait Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi

Şekil 3.2'den görüldüğü gibi Üretim Tesisi'ne ait analitik ve deneysel mod şekillerinin birbirleriyle uyum içerisinde olmadığı, ayrıca Tablo 3.2'de verilen analitik ve deneysel frekans değerlerinin de birbirlerinden farklı olduğu görülmektedir. Frekanslardaki ve mod şekillerindeki uyumsuzlukların giderilebilmesi için üretim tesisine ait sonlu eleman modelinin deneysel verilere göre kalibre edilmesi gerekmektedir. Kalibrasyon çalışması yapı elemanlarının birleşim noktalarının rijitlikleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her eleman için ayrı ayrı rijitlik katsayısı verilmiştir ve bu rijitlik katsayıları 10000-30000kNm/rad aralığında değerler almaktadır. Tablo 3.4 ve Şekil 3.4'ten anlaşılacağı üzere iyileştirme sonrasında analitik ve deneysel frekanslar arasında ve mod şekilleri arasında çok iyi bir uyum olduğu görülmektedir.

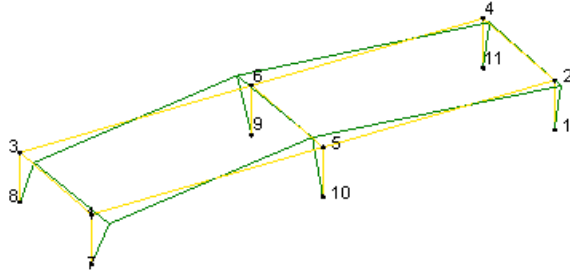
Tablo 3.4. Model iyileştirme işlemi sonrasında Üretim Tesisi'ne ait deneysel ve analitik frekanslar

Mod Numarası	Doğal Frekanslar (Hz)			
	Deneysel (GFTAA)	Analitik		Fark (%)
		İyileştirme Öncesi	İyileştirme Sonrası	
1	0.869	0.870	0.860	0
2	1.079	0.918	1.078	0
3	1.176	1.001	1.119	4.84
4	1.240	1.069	1.240	0
5	1.338	1.270	1.364	1.94

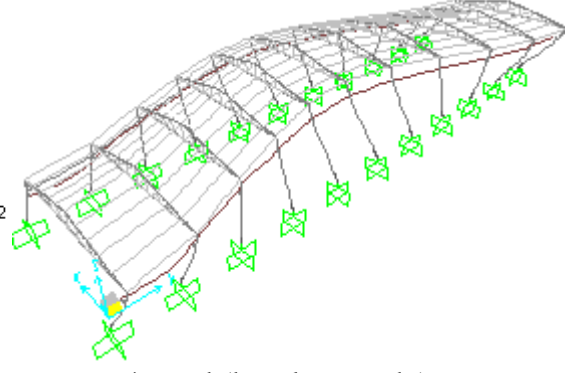


Şekil 3.4. Üretim tesisine ait deneysel mod şekilleri ile iyileştirilmiş teorik mod şekillerinin karşılaştırılması

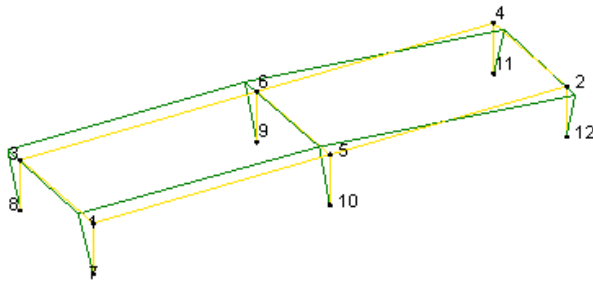
Şekil 3.4'ün devamı



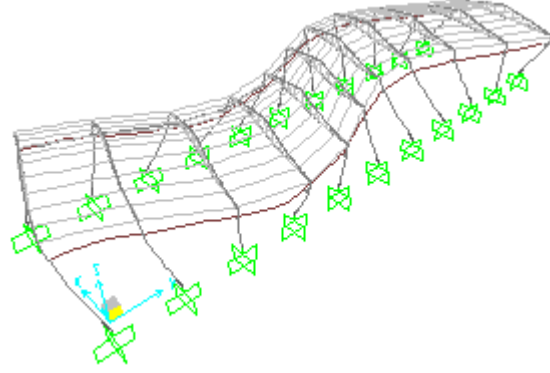
4. mod (burulma modu)



4. mod (burulma modu)



5. mod (burulma mod)



5. mod (burulma mod)

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, betonarme prefabrik yapıların deneysel ve teorik dinamik karakteristiklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak belirlenmesi ve yapıların mevcut davranışlarını en iyi şekilde yansıtacak sonlu eleman modellerinin oluşturulması amaçlanmıştır. Uygulama örnekleri olarak, Karadeniz Teknik Üniversitesi C kapısı çıkışında bulunan C-1 Üstgeçidi ve Trabzon-Maçka karayolu üzerinde bulunan Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi seçilmiştir.

SAP2000 programı kullanılarak her iki yapıya ait üç boyutlu sonlu eleman modelleri çubuk ve düzlem elemanlar kullanılarak oluşturulmuş ve bu modellerin modal analizleri yapılarak yapıların teorik mod şekilleri ve doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Daha sonra her iki yapı üzerinde Operasyonel Modal Analiz Yöntemi gerçekleştirilmiştir. Deneysel yöntemde titreştirici olarak yaya hareketleri, rüzgar ve trafik yükleri gibi çevresel etkilerden yararlanılmıştır. Yapıların bu çevresel etkilere göstermiş oldukları tepkileri ölçmek için Brüel&Krajer firmasının ürettiği 8340 tipteki tek eksenli sismik ivmeölçerler kullanılırken, ivmeölçerlerden elde edilen verileri toplayıp daha sonra işlemek üzere saklamak için ise aynı firmanın ürettiği 17 kanallı 3650 tipteki veri toplama ünitesi kullanılmıştır. Veri toplama ünitesinde toplanan sinyaller daha sonra OMA yazılımı aracılığı ile işlenerek dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Verilerin işlenip dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde frekans ortamında Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) ve zaman ortamında Stokastik Alt Alan Belirleme (SAB) Yöntemleri kullanılmıştır. Oluşturulan sonlu eleman modellerinin yapılara ait gerçek davranışları temsil edip etmediğinin kontrolü için deneysel ve teorik olarak elde edilen dinamik karakteristikler karşılaştırılmış ve aralarında farklılıklar olduğu saptanmıştır. Teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki bu farklılıkları en aza indirerek, yapıların mevcut davranışlarını en iyi şekilde yansıtacak modeli elde etmek için betonarme prefabrik yapıların sonlu eleman modelleri deneysel sonuçlar kullanılarak iyileştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında seçilen prefabrik yapılar üzerine Operasyonel Modal Analiz Yönteminin uygulanması, deneysel ve teorik olarak elde edilen dinamik karakteristiklerin karşılaştırılması ve sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesine dair elde edilen sonuçlar aşağıda sırasıyla verilmektedir:

- C-1 Prefabrik Üstgeçidi'nin ilk üç teorik frekansı 2.284-4.536Hz aralığında değerler almıştır.
- Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'nin ilk beş teorik doğal frekansı 0.870-1.270Hz arasında değerler almıştır.
- C-1 Üstgeçidi'nin ilk üç teorik mod şekillerine bakıldığında sırasıyla boyuna, enine ve eğilme mod şeklinde oldukları görülmüştür.
- Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'nin ilk beş teorik mod şekillerine bakıldığında ise sırasıyla yanal, burulma, boyuna, burulma ve burulma mod şeklinde oldukları görülmüştür.
- C-1 Üstgeçidi'nde OMA uygulaması çevresel titreşimler altında 0-6.25Hz frekans aralığında ve 45dk süreyle gerçekleştirilmiştir.
- Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'nde ölçüm yine çevresel titreşimler altında 0-6.25Hz frekans aralığında ve 30dk süreyle gerçekleştirilmiştir.
- C-1 Üstgeçidi'nin Operasyonel Modal Analiz sonuçlarına bakıldığında GFTAA Yöntemi kullanılarak elde edilen ilk üç deneysel doğal frekans değerinin 1.604-6.104Hz, sönüm oranlarının %0.347–1.684 arasında değerler aldıkları gözlemlenirken; SAB Yöntemi kullanılarak elde edilen ilk üç doğal frekans değerinin 1.627-6.178Hz aralığında ve sönüm oranlarının ise %1.44–2.203 aralığında oldukları belirlenmiştir.
- Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'nin Operasyonel Modal Analiz sonuçlarına bakıldığında ise GFTAA yöntemi kullanılarak elde edilen ilk beş deneysel doğal frekans değerinin 0.869-1.338Hz aralığında, sönüm oranlarının ise %0.428–0.841 aralığında aralığında değerler aldıkları belirlenmiştir.
- Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma ve Stokastik Alt Alan Belirleme yöntemleriyle ayrı ayrı hesaplanan C-1 Üstgeçidi'ne ait dinamik karakteristikler arasında iyi bir uyum olduğu gözlemlenmiştir.
- Seçilen prefabrik yapılar üzerinde gerçekleştirilen Operasyonel Modal Analiz uygulaması sonuçlarından elde edilen deneysel mod şekilleri incelendiğinde, C-1 Üstgeçidi'nin teorik mod şekilleriyle aralarında iyi bir uyumun olduğu ancak, Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'nde aynı uyumun olmadığı gözlemlenmiştir.
- C-1 Üstgeçidi'nin teorik ve deneysel doğal frekans değerleri karşılaştırıldığında aralarındaki en büyük farkın %42.4 olduğu belirlenmiştir.

- Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'nin teorik ve deneysel doğal frekans değerleri karşılaştırıldığında ise aralarındaki en büyük farkın %14.92 olduğu belirlenmiştir. Bu farklılıklardan dolayı her iki yapı için model iyileştirilmesi işleminin gerekliliği ortaya çıkmıştır.

- Betonarme prefabrik yapıların deneysel ve teorik dinamik karakteristikleri arasındaki farklılıkların teorik analizler sırasında yapılan düğüm noktası rijitlik kabullerinden kaynaklandığı düşünülmüş ve bu parametrede değişiklikler yaparak sonlu eleman modelleri iyileştirilmiştir. Böylece, yapıların teorik analizleri sırasında düğüm noktalarına atanan rijitlik değerleri yeniden düzenlenmiştir.

- Her iki prefabrik yapı için teorik ve deneysel sonuç farklılıklarını minimuma indirmek amacıyla yapılan üç boyutlu sonlu eleman modeli iyileştirilmesi işleminden sonra, teorik ve deneysel doğal frekanslar arasındaki fark C-1 Üstgeçidi için %42.4'ten %0.83'e, Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi için ise %14.92'den %4.84'e düşürülmüştür.

Bu çalışma ile Operasyonel Modal Analiz Yönteminin, teknolojinin gelişmesi ile üretim miktarı hızla artan ve düğüm noktalarındaki rijitlik değerlerinin belirlenmesi oldukça güç olan betonarme prefabrik yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde ve sonlu eleman model iyileştirilmesi işleminde güvenle kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır.

Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak aşağıda bazı öneriler verilmektedir.

- Prefabrik yapılar üzerinde gerçekleştirilen deneysel ölçüm sonuçları kullanılarak bu tip yapılarda hasar tespit çalışmaları yapılabilir.

- OMA Yönteminde çevresel titreşimler dikkate alındığından ölçümler, farklı çevresel şartlar altında gerçekleştirilebilir ve böylece farklı çevresel şartlar altında prefabrik yapıların uzun süreli dinamik davranışlarındaki değişimler gözlemlenebilir.

- Doğu Karadeniz Prefabrik Üretim Tesisi'nin bulunduğu bölgede daha önce meydana gelmiş deprem ivme kayıtları dikkate alınarak deprem davranışı incelenebilir.

- Gerçekleştirilen ölçümler ve öneriler mevcut olan farklı tip prefabrik yapılar üzerinde de uygulanabilir.

5. KAYNAKLAR

- Altunışık, A., C., 2010. Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik Ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Anonim, 1997. Beton Prefabrik Elemanların Birleşim Detayları-Taşıyıcı Sistem Birleşimleri, Prefabrik Birliği, Ankara.
- Arslan M., H., 2000. Prefabrik Endüstri Yapılarının Deprem Yüğü Etkisi Altında Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Awkar, J., C. ve Lui, E., M., 1999. Seismic Analysis and Response of Multistory Semirigid Frames, *Engineering Structures*, 21, 5, 425-441.
- Ayaydın, Y., 1981. Büyük Açıklıklı Prefabrik Betonarme Yapılar, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Ayaydın, Y., 1987. Taşıyıcı Duvar Perdeli Prefabrik Yapılar, Yılmaz Ofset Matbaası, İstanbul.
- Ayaydın, Y., 1989. Büyük Açıklıklı Prefabrik Betonarme Yapılar, 2. Baskı, Kurtis Matbaası, İstanbul.
- Aydın, T., S., 1995. Betonarme Çok Katlı Prefabrik İskeler Sistemler ve Düğüm Noktaları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bayraktar, A. ve Türker, T., 2005-a. Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile Düzlem Çerçevelerin Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Deprem Sempozyumu, Mart, Kocaeli, Türkiye, Bildiriler Kitabı: 1035-1041.
- Bayraktar, A., Altunışık, A., C., Sevim, B., Türker, T. ve Domanıç, K., A., 2008. Köprülerin Dinamik Karakteristiklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, *Yapı Dünyası*, 150, 44-57.
- Bendat, J., S. ve Piersol, A., G., 2004. *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, 3th Edition, John Wiley and Sons, USA.
- Blandon, J., J. ve Rodriguez, M., E., 2005. Behavior of Connections and Floor Diaphragms in Seismic-Resisting Precast Concrete Buildings, *PCI Journal*, March-April, 56-75.
- Brincker, R., Zhang, L. ve Andersen, P., 2000. Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition, 18th International Modal Analysis Conference, San Antonio, USA, 4062, 2, 625-630.

- Cansun, O., 1978. Türkiye’de Prefabrik Yapı Parçaları Üretmek Üzere Kurulacak Fabrikaların Dağılımı ve Bireysel Üretim Kapasiteleri, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Cheok, G., S. ve Lew, H., 1993. Model precast concrete beam-column connections subjected to cyclic loading, PCI J, 38, 4, 80-92.
- Chopra, A., K., 2006. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Third Edition, Prentice Hall, USA, 4th Edition, 995p.
- Coignet, F., E., 1855. Constructions Economic Concrete Mud, The Diary Engineering, November, 855.
- Çolak, M., 1996. Prefabrik Kolon Kiriş Birleşiminin Elastik Dönme Redörünün Belirlenmesi, Dördüncü Prefabrikasyon Sempozyumu, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Ercan, E., Arısoy, B. ve Nuhoglu, A., 2009. Mevcut Yapıların Deprem Davranışlarının Belirlenmesinde ve Güçlendirilmesinde Kullanılan Yöntemler, İzmir Afet Riskini Azaltma Sempozyumu, Aralık, İzmir, Bildiriler Kitabı: 179-199.
- Eşiyok, Ü., 2000. Konut Üretiminde Prefabrikasyona Bağlı Teknolojiler, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ewins, D., J., 1995. Modal Testing: Theory and Practice, John Wiley & Sons, New York.
- Geray, C., 1989. Prefabrikasyonun Finansman Süreci İçindeki Yeri ve Finansman Sorunlarına Katkıları, 4. Prefabrikasyon Sempozyumu: Ülke Ekonomisi Açısından Prefabrikasyon, Türkiye Prefabrik Birliği, Ankara, 61-68.
- Gopčević, Š., Brčić, S. ve Žugić, L., 2011. Dynamic Properties and Time Response of Frameworks With Semi-Rigid and Eccentric Connections, Architecture and Civil Engineering, 9, 3, 379-393.
- Günerman, H., 1997. Prefabrik Bina Sistemleri, Prefabrik İnşaat Teknolojileri Sempozyumu, Haziran, İstanbul, 169-184.
- Hartland, R., A., 1975. Design of Precast Concrete: An Introduction to Practical Design, Surrey University Press, London, Thomson Science and Professional.
- Heylen, W., Lammens, S. ve Sas, P., 2007. Modal Analysis Theory and Testing, Leuven Katholieke Universtiy, Department of Mechanical Engineering, Leuven, Belgium.
- Jacobsen, N., J., Andersen, P. ve Brincker, R., 2006. Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis, Proceedings of ISMA2006: International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium.

- Kaleş, Ö., 1999. Sekiz Derslikli Temel Eğitim Binalarının Betonarme Prefabrik Elemanlarla Üretiminde Tasarım Sorunları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- López-Almansa, F., Sarrablo, V., Lourenço, P., B., Barros, J., A., O., Roca, P., da Porto, P. ve Modena, C., 2010. Reinforced Brick Masonry Light Vaults: Semi-Prefabrication, Construction, Testing and Numerical Modeling, Construction and Building Materials, 24, 10, 1799-1814.
- Musial, M., 2012. Static and Dynamic Stiffness of Reinforced Concrete Beams, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 12, 2, 186-191.
- OMA, 2006. Operational Modal Analysis, Release 4.0. Structural Vibration Solution A/S, Denmark.
- Overschee, P., V. ve Moor, B., D., 1996. Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation and Applications, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Ozturk, A., U. ve Catal, H., H., 2005. Dynamic Analysis of Semi-Rigid Frames, Mathematical and Computational Applications, 10, 1, 1-8.
- Özden, K., 1988. Betonarme ve Öngerilmeli Beton Prefabrik Taşıyıcı Eleman, Sistem ve Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları- Öneri, Deprem Mühendisliği Türk Milli Komitesi Yayınları, İstanbul.
- Özmen, G., Yüzügüllü, Ö. ve Zorbozan, M., 1997. Yeni Deprem Yönetmeliğinin Prefabrik Yapılar Bakımından İncelenmesi, TDV/TR 97-006, Türkiye Deprem Vakfı, Nisan, İstanbul.
- Park, R., 1995. A Perspective on the Seismic Design of Precast Concrete Structures in New Zealand, PCI Journal, May-June, 40-50.
- Peeters, B., 2000. System Identification and Damage Detection in Civil Engineering, PhD Thesis, Katholieke University, Leuven, Belgium.
- Peeters, B. ve Roeck, G., D., 2000. Reference Based Stochastic Subspace Identification in Civil Engineering, Inverse Problems in Civil Engineering, 8, 47-74.
- Petyt, M., 1990. Introduction to Finite Element Vibration Analysis, Cambridge University Pres, Cambridge.
- PULSE, 2006. Analyzers and Solutions, Release 11.2. Bruel and Kjaer, Sound and Vibration Measurement A/S, Denmark.
- Ramos, J., L., F., S., 2007. Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, PhD Dissertation, Minho University, Portugal.

- Reynolds, P., Pavic, A. ve Prichard, S., 2002. Dynamic Analysis and Testing of a High Performance Floor Structure, International Conference on Structural Dynamic Modeling-Test, Analysis, Correlation and Validation, Maderia Island, Portugal, 339-346.
- Rezaifar, O., 2008. Dynamic Behaviour of 3D-Panel Single-Storey System Using Shaking Table Testing, Engineering Structures, 30, 2, 318-337.
- Rizkalla, S., H. ve Soudki, K., A., 1995. Horizontal Connections for Precast Concrete Load Bearing Shear Walls In Seismic Zones, http://www.ce.ncsu.edu/srizkal/linked_files/Horizontal_Connections_for_Precast_Concrete_in_Seismic_Zones.pdf.
- SAP2000, 1997. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA.
- Sagan, E., I., 1995. Evaluation of Ductile Beam-Column Connections for Use in Seismic-Resistant Precast Frames, PhD Thesis, Presented to the Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Austin.
- Sevim, B., 2010. Kemer Barajların Dinamik Davranışlarının Sonlu Eleman ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Şahin, A., 2009. Yapıların Deneysel ve Operasyonel Modal Analizleri İçin Sayısal Sinyal İşleme, Dinamik Karakteristik Belirleme ve Sonlu Eleman Model İyileştirme Yazılımları: SignalCAD-ModalCAD-FemUP, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Tankut, T., Ersoy, U. ve Özcebe, G., 2000. 1999 Yılında Marmara ve Düzce Depremlerinde Gözlenen Prefabrik Yapı Hasarları, 10. Prefabrikasyon Sempozyumu, İstanbul, Bildiri No:1.
- Toprak, Z., 2002. Prefabrik Sanayi Yapılarının Deprem Etkisine Göre Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- T.S.E. 9967, 1992. Yapı Elemanları, Taşıyıcı Sistemler ve Binalar-Prefabrik Betonarme ve Öngerilmeli Betondan- Hesap Esasları İle İmalat ve Montaj Kuralları, TS-9967, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TTSDTOTBB, Türkiye Ticaret Sanayi Deniz Ticaret Odaları ve Ticaret Borsaları Birliği, 1988. Konut Sorunu, Toplu Konut Uygulama Sonuçları ve Son Zamanlardaki Gelişmeler, 95, 36, Ankara.
- Tümer, Ç., 2006. Prefabrikte Yapılarda Kenetli Birleşimlerin Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Türker, T., 2005. Çelik Çerçeve Sistemlerin Dinamik Karakteristiklerinin Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Türker, T., 2011. Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Hasar Durumlarının Tespiti ve Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Türker, T., Kartal, M., E., Bayraktar, A. ve Muvafik, M., 2009. Assesment of Semi-Rigid Connections in Steel Structures by Modal Testing, Journal of Constructional Steel Research, 65, 7, 1538-1547.
- Yu, D., J. ve Ren, W., X., 2005. EMD-Based Stochastic Subspace Identification of Structures from Operational Vibration Measurements, Engineering Structures, 27, 1741-1751.
- Yücesoy, L., 1998. Temeller–Duvarlar–Döşemeler, YEM Yayınevi, İstanbul, 75-99.
- Zhu, K., Al-Bermani, F., G., A., Kitipornchai, S. ve Li, B., 1995. Dynamic Response of Flexibly Jointed Frames, Engineering Structures, 17, 8, 575-580.
- Zonta, D., Elgamal, A., Fraser, M. ve Priestley, M., 2008. Analysis of Change in Dynamic Properties of a Frame-Resistant Test Building, Engineering Structures, 30, 183-196.
- URL-1. <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/8276>. 15 Mayıs 2012.
- URL-2. <http://www.edisonmuckers.org/tag/invention/>. 10 Haziran 2012.
- URL-3. <http://www.imoankara.org.tr/Portals/0/prefabrik>. 12 Haziran 2012.
- URL-4. <http://www.prefab.org.tr/userfiles/file/makaleler/94-1.pdf>. 12 Haziran 2012.
- URL-5. <http://www.yapidergisi.com/makaleicerik.aspx?MakaleNum=31>. 14 Haziran 2012.

ÖZGEÇMİŞ

Gökhan OSMANCIKLI, 1987 yılında Çorum Merkez’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Çorum’da tamamladı. 2005 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde lisans eğitimine başladı. 2009 yılında İnşaat Mühendisliği Bölümü’ndeki lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2011-2012 Güz ve Bahar yarıyılarında Almanya’nın Bochum şehrindeki Ruhr Üniversitesi’nde Computational Engineering bölümünde LLP-Erasmus programı kapsamında bir yıllık eğitim aldı. Bekar olan Gökhan OSMANCIKLI, iyi derecede İngilizce ve az derecede Almanca bilmektedir.

Bu tez çalışması sırasında aşağıdaki çalışmalar hazırlanmıştır.

Osmancıklı, G., Uçak, Ş., Turan, F., N., Türker, T. ve Bayraktar, A., 2011. Investigation of Restoration Effects on the Dynamic Characteristics of the Hagia Sophia Bell-Tower by Ambient Vibration Test, Construction and Building Materials, 29, 564-572, (SCI, A Grubu).

Uçak, Ş., **Osmancıklı, G.**, Turan, F., N., Türker, T. ve Bayraktar, A. Structural Identification of a Historical Timber Bridge by Ambient Vibration Test, Journal of Vibration and Control, (İncelemede).

Turan, F., N., Uçak, Ş., **Osmancıklı, G.**, Türker, T. ve Bayraktar, A. Estimation of Modal Damping Ratios by Operational Modal Analysis Method, Structural Control and Health Monitoring, (İncelemede).