

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DENGELİ KONSOL BETONARME KÖPRÜLERİN DİNAMİK
KARAKTERİSTİKLERİNİN ÇEVRESEL TİTREŞİM VERİLERİ
KULLANILARAK BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Fatma Nur TURAN

**HAZİRAN 2012
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DENGELİ KONSOL BETONARME KÖPRÜLERİN DİNAMİK
KARAKTERİSTİKLERİNİN ÇEVRESEL TİTREŞİM VERİLERİ
KULLANILARAK BELİRLENMESİ**

İnş. Müh. Fatma Nur TURAN

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

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24.05.2012
Tezin Savunma Tarihi : 15.06.2012**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR

Trabzon 2012

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Fatma Nur TURAN tarafından hazırlanan

DENGELİ KONSOL BETONARME KÖPRÜLERİN DİNAMİK
KARAKTERİSTİKLERİNİN ÇEVRESEL TİTREŞİM VERİLERİ
KULLANILARAK BELİRLENMESİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 29/ 05 / 2012 gün ve 1458 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Halil KARADENİZ.....

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR

Jüri Üyesi : 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.

“Dengeli Konsol Betonarme Köprülerin Dinamik Karakteristiklerinin Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Belirlenmesi” isimli tez çalışmasını bana öneren ve her aşamasında gerek bilgi ve tecrübelerini gerekse maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen Hocam Sayın Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı başından beri takip eden, inceleyen ve değerli görüş ve bilgilerini benimle paylaşan değerli Hocalarım Sayın Yrd. Doç. Dr. Temel TÜRKER'e ve Yrd. Doç. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK'a çok teşekkür ederim. Ayrıca öğrenim hayatı boyunca bana emeği geçen tüm hocalarımı saygıyla anar, kendilerine minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Tez çalışmamın deneysel ölçümleri sırasında desteği olan arkadaşlarım Şenay UÇAK, Gökhan OSMANCIKLI ve Emre SARI'ya teşekkür ederim.

Tez çalışmamın sağlıklı bir şekilde yürütülebilmesi için gerekli projeyi sağlayan Trabzon Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü'ne, Trabzon Devlet Su İşleri 22. Bölge Müdürlüğü'ne, müteahhit firma olan KOLİN İnşaat Turizm, Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye, proje yüklenicisi olan DOLSAR İnşaat ve Limited Şirketi'ne ve SÜMERKAN İnşaat Taahhüt Turizm ve Nakliyat Ticaret Limited Şirketi'ne teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım süresince bana her türlü desteği veren babam Hüseyin TURAN'a, annem Selma TURAN'a ve kardeşlerim Seda Nur TURAN ve Emre TURAN'a müteşekkirdiğimi belirtmek isterim. Ayrıca, tüm desteğiyle yanımda olan eşim Serhat KUDU'ya teşekkür eder, bu çalışmanın, yeni çalışmalara ışık tutmasını ve ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Fatma Nur TURAN
Trabzon 2012

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Dengeli Konsol Betonarme Köprülerin Dinamik Karakteristiklerinin Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Belirlenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR‘ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda arazide yaptığımı, 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. 15 / 06 / 2012

Fatma Nur TURAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar.....	3
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği	10
1.4. Dengeli Konsol Betonarme Köprüler	11
1.5. Teorik Modal Analiz Yöntemi.....	16
1.5.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler	17
1.5.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler	18
1.6. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi.....	21
1.6.1. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile İlgili Genel Bilgiler	21
1.6.2. Operasyonel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Ölçüm Sistemi	22
1.6.2.1. Titreştiriciler	23
1.6.2.1.1. Sarsıcılar	23
1.6.2.1.2. Darbe Çekiçleri	24
1.6.2.2. Ölçüm Sistemi	25
1.6.2.2.1. İvmeölçerler.....	25
1.6.2.2.2. Veri Toplama Sistemleri.....	26
1.6.2.3. Analiz Yazılımı.....	26
1.6.3. Dinamik Karakteristikleri Belirleme Yöntemleri	27
1.6.3.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) Yöntemi	28

1.6.3.2.	Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi	30
1.7.	Sonlu Eleman Model İyileştirme Yöntemleri.....	33
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	34
2.1.	Giriş	34
2.2.	Berta Köprüsü	34
2.2.1.	Berta Köprüsü ve Geometrik Özellikleri.....	34
2.2.1.1.	Köprü Tabliyesi	37
2.2.1.2.	Köprü Ayakları ve Kenar Mesnetler.....	37
2.2.2.	Berta Köprüsü'nün Teorik Modal Analizleri	39
2.2.2.1.	Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli.....	39
2.2.2.2.	Sonlu Eleman Yöntemiyle (SEY) Berta Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	42
2.2.3.	Berta Köprüsü'nün Operasyonel Modal Analizleri.....	44
2.2.3.1.	Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	45
2.2.3.1.1.	Birinci Ölçüm Adımı	46
2.2.3.1.2.	İkinci Ölçüm Adımı.....	46
2.2.3.1.3.	Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) Yöntemiyle Berta Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	49
2.2.3.1.4.	Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemiyle Berta Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	51
2.2.3.2.	Operasyonel Modal Analiz Sonuçların Karşılaştırılması	53
2.2.4.	Berta Köprüsü'nün Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi	54
2.2.4.1.	Malzeme Özelliklerinin İyileştirilmesi	54
2.2.4.2.	Sınır Şartlarının İyileştirilmesi	55
2.2.4.3.	Diğer İyileştirmeler.....	56
2.2.4.4.	Berta Köprüsü'nün İyileştirilmiş Sonlu Eleman Modelinin Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	57
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	60
4.	KAYNAKLAR	62

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

DENGELİ KONSOL BETONARME KÖPRÜLERİN DİNAMİK KARAKTERİSTİKLERİNİN
ÇEVRESEL TİTREŞİM VERİLERİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ

Fatma Nur TURAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR
2012, 68 Sayfa

Bu tez çalışmasında, dengeli konsol betonarme karayolu köprülerinin dinamik karakteristikleri analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla, dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen Berta Köprüsü üzerinde analitik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Analitik çalışmalarda Sonlu Elemanlar Yöntemi, deneysel çalışmalarda çevresel titreşim verilerini dikkate alan Operasyonel Model Analiz Yöntemi kullanılmıştır.

Tez çalışması dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde yapı dinamik karakteristiklerinin öneminden ve hangi yöntemlerle elde edildiği konusunda bilgi verildikten sonra, sırasıyla konuyla ilgili daha önce yapılmış çalışmalardan, tezin amacı ve içeriğinden, dengeli konsol betonarme köprülerden, teorik ve Operasyonel Modal Analiz yöntemlerinden ve son olarak da sonlu eleman modeli iyileştirme yöntemlerinden bahsedilmektedir. İkinci bölümde tez çalışması için seçilen Berta Köprüsü'nün genel bir tanıtımı yapıldıktan sonra, köprü'nün sonlu eleman modeli oluşturulup dinamik karakteristikleri analitik olarak elde edilmektedir. Daha sonra köprü üzerine çevresel titreşim testi uygulanarak köprü'nün dinamik karakteristikleri deneysel olarak belirlenmektedir. Köprü'nün sonlu eleman modeli; malzeme özellikleri, sınır şartları ve diğer etkiler dikkate alınarak deneysel sonuçlara göre iyileştirilmektedir. Üçüncü bölümde yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve öneriler sunulmaktadır. Son bölümde ise, bu çalışmanın hazırlanması esnasında yararlanılan konu ile ilgili kaynaklar verilmektedir.

Çalışma sonunda, Ülkemizde son yıllarda yaygın olarak inşa edilmeye başlanan dengeli konsol betonarme köprülerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde, sonlu eleman model iyileştirmelerinde ve köprü sağlığı izlenmesinde çevresel titreşimlere dayalı Operasyonel Modal Analiz Yönteminin güvenle kullanılabileceği vurgulanmaktadır.

Anahtar Kelimeler : Operasyonel Modal Analiz, Dinamik Karakteristikler, Dengeli Konsol Betonarme Köprüler, Sonlu Eleman Model İyileştirme, Köprü Sağlığı İzlenmesi.

Master Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF BALANCED CANTILEVER
REINFORCED CONCRETE BRIDGES USING AMBIENT VIBRATION DATA

Fatma Nur TURAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR
2012, 68 Pages

In this thesis, dynamic characteristics of balanced cantilever reinforced concrete highway bridges are determined using analytical and experimental methods. For this purpose, analytical and experimental studies are done on Berta Bridge which was built by balanced cantilever method. Finite Element Method (FEM) and Operational Modal Analysis (OMA) which considers ambient vibration data were used in analytical and experimental studies, respectively.

This thesis consists of four chapters. In the first chapter of the thesis; after importance of structural dynamic characteristics studies which have been performed on this subject, aim and content of thesis, balanced cantilever concrete reinforced bridges, analytical and experimental modal analysis methods and finite element updating methods are mentioned, respectively. In the second chapter of the thesis, after general overview of Berta Bridge which was selected as application, analytical dynamic characteristics are obtained by using the finite element model of bridge. Ambient vibration tests are conducted to bridge and experimental dynamic characteristics are determined. Finite element model of the bridge was updated considering by material properties, boundary conditions and other variations. In the third chapter, obtained results and suggestions are submitted. In the last chapter, the references used in this thesis are presented.

As a conclusion, it is emphasized that Operational Modal Analysis method based on the ambient vibrations can be used safely to determine the dynamic characteristics, to update the finite element models, and to monitor the structural health of reinforced concrete highway bridges constructed with balanced cantilever method.

Key Words : Operational Modal Analysis, Dynamic Characteristics, Balanced Cantilever Concrete Bridges, Finite Element Model Updating, Structural Health Monitoring of Bridge.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Tipik bir dengeli konsol köprünün yapım aşamalarına ait şematik gösterilim (DOLSAR Proje, 2007).....	12
Şekil 1.2.	Balduin Köprüsü, Almanya.....	14
Şekil 1.3.	Choisy-le-Roi Köprüsü, Fransa.....	15
Şekil 1.4.	Kömürhan Köprüsü'ne ait bazı fotoğraflar	15
Şekil 1.5.	İmrahor Viyadüğü'ne ait bazı fotoğraflar.....	15
Şekil 1.6.	Gülburnu Köprüsü'ne ait bazı fotoğraflar	16
Şekil 1.7.	Berta Köprüsü'ne ait bazı fotoğraflar	16
Şekil 1.8.	Tek serbestlik dereceli sistemlerin teorik modeli	17
Şekil 1.9.	Tek serbestlik dereceli sistemlerin serbest cisim diyagramı.....	17
Şekil 1.10.	Çok serbestlik dereceli sistemlerin sönümsüz serbest titreşimi.....	19
Şekil 1.11.	Çeşitli sarsıcılar	23
Şekil 1.12.	Yaygın Olarak Kullanılan Darbe Çekici.....	24
Şekil 1.13.	Piezoelektrik tipi ivmeölçerin iç mekanizması.....	25
Şekil 1.14.	B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçer	26
Şekil 1.15.	B&K 3560-C tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi.....	26
Şekil 1.16.	Dinamik karakteristiklerin belirlenmesini gösteren akış şeması	28
Şekil 2.1.	Tarihi Berta Köprüsü'ne ait bazı fotoğraflar	35
Şekil 2.2.	Berta Köprüsü'ne ait bazı fotoğraflar	35
Şekil 2.3.	Berta Köprüsü'nün planı ve boy kesiti	36
Şekil 2.4.	Değişken kesitli tabliye üst yapısı	37
Şekil 2.5.	Köprü orta ayaklarına ait kesit görünüşleri	38
Şekil 2.6.	Köprü temellerine ait kesit görünüşleri (Ölçüler mm cinsinden verilmiştir) ...	38
Şekil 2.7.	Kenar ayaklarda dikkate alınan mesnet durumu (DOLSAR Proje, 2007).....	39
Şekil 2.8.	Berta Köprüsü'ne ait germe çubuklarının a) Kutu kesit üst döşeme, b) Ön görünüş, c) Kutu kesit alt döşeme yerleşim planı (DOLSAR Proje, 2007).....	41
Şekil 2.9.	Berta Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli	42
Şekil 2.10.	Berta Köprüsü'nün analitik olarak elde edilen ilk beş mod şekli.....	43
Şekil 2.11.	Ölçüm sırasında kullanılan aletler	44

Şekil 2.12. Köprü'nün her iki yakasından ölçüm görüntüleri	45
Şekil 2.13. Birinci ölçüm adımı için ivmeölçer yerleşim planı	46
Şekil 2.14. İkinci ölçüm adımı için ivmeölçer yerleşim planı	47
Şekil 2.15. Birinci ve ikinci ölçüm adımına ait bazı fotoğraflar.....	47
Şekil 2.16. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi ile elde edilen tekil değerler.....	49
Şekil 2.17. Berta Köprüsü'nün GFTAA yönteminden elde edilen mod şekilleri.....	50
Şekil 2.18. SAB Yönteminden elde edilen tekil değerler grafiği	52
Şekil 2.19. Berta Köprüsü'nün SAB Yönteminden elde edilen mod şekilleri.....	53
Şekil 2.20. İyileştirmeden sonra elde edilen 3-boyutlu sonlu eleman modeli.....	57
Şekil 2.21. İyileştirmeden sonra elde edilen analitik ilk beş mod şekli.....	58

TABLULAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Berta Köprüsü'nün sonlu eleman analizlerinde kullanılan yay katsayıları.....	40
Tablo 2.2. Berta Köprüsü'nün sonlu eleman analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri.....	41
Tablo 2.3. Berta Köprüsü'nün analitik doğal frekans ve periyotları	43
Tablo 2.4. Berta Köprüsü'nden GFTAA yöntemine göre elde edilen doğal frekans ve sönüm oranları.....	50
Tablo 2.5. Berta Köprüsü'nden SAB yöntemine göre elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları.....	52
Tablo 2.6. GFTAA ve SAB yöntemine göre elde edilen modların karşılaştırılması	54
Tablo 2.7. Berta Köprüsü'nün sonlu eleman model iyileştirilmesinde dikkate alınan malzeme özellikleri	
a) Elastisite Modülündeki değişimler	55
b) Yoğunluktaki değişimler	55
Tablo 2.8. İyileştirilmiş sonlu eleman modelinde kenar mesnetler için kullanılan yay katsayıları	56
Tablo 2.9. İyileştirilmiş sonlu eleman modelinde temel için kullanılan yay katsayıları ...	56
Tablo 2.10. Berta Köprüsü'nün sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra elde edilen dinamik karakteristikleri	59

SEMBOLLER DİZİNİ

A_c	Kesit alanı
A_k	Tepki sinyalinin GSY fonksiyonuna ait k . artık değer matrisi
A_*	Durum matrisi
A_r	Öz vektör
a_0, a_n, b_n	Fourier serisi katsayıları
B_*	Veri matrisi
c	Sönüm katsayısı
C_r	Sabit değer
C	Sistem sönüm matrisi
C_*	Sistem davranış matrisi
ÇSDS	Çok serbestlik dereceli sistemler
D_*	Doğrudan iletim matrisi
E_*	Değer operatörü
$F(t)$	Kuvvet vektörü
FDF	Frekans Davranış Fonksiyonu
f	Frekans
F_I	Atalet kuvveti
F_D	Sönüm kuvveti
F_S	Kütle hareketlerinden dolayı yayda oluşan kuvvet
FTAA	Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma
GFTAA	Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma
GSY	Güç Spektral Yoğunluğu
$G_{xx}(j\omega)$	Etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu
$G_{yy}(j\omega)$	Tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu
g	Yerçekimi ivmesi
$H(j\omega)$	Frekans davranış fonksiyonu
$H_{ik}(i\omega)$	Transfer matrisi
H_I	Birim diagonal matris

k	Yay katsayısı
\mathbf{K}	Sistem rijitlik matrisi
m	Yapının kütlesi
\mathbf{M}	Sistem kütle matrisi
OMA	Operasyonel Modal Analiz
PS	Piklerin seçilmesi
\mathbf{R}	Sisteme etkiyen ve zamanla değişen dış yük vektörü
R_k	Artık değer fonksiyonu
SAB	Stokastik Altalan Belirleme
SEY	Sonlu Eleman Yöntemi
S_i	Skaler tekil değerleri içeren diyagonal matris
s_{ij}	Skaler tekil değerler
T	Periyot
t	Zaman
TSDS	Tek Serbestlik Dereceli Sistemler
\mathbf{U}	Zamana bağlı yerdeğiştirme vektörü
U_i	Tekil vektörleri içeren bütün matris
u_{ij}	Tekil vektör
\mathbf{u}_k	Belirgin etki sinyal vektörü
$\dot{\mathbf{U}}$	Zamana bağlı hız vektörü
$\ddot{\mathbf{U}}$	Zamana bağlı ivme vektörü
$\mathbf{X}_i(w)$	Frekans tanım alanındaki tepki fonksiyonu
$\mathbf{v}_k, \mathbf{w}_k$	Model ve ivmeölçer hatalarından dolayı işlenen gürültü sinyalleri
$x(t)$	Kütlenin yer değiştirmesi
$\dot{x}(t)$	Kütlenin hızı
$\ddot{x}(t)$	Kütlenin ivmesi
$\mathbf{Y}_k(w)$	Frekans tanım alanındaki etki fonksiyonu
ZTY	Zorlanmış Titreşim Yöntemi
$\{\Phi\}_r$	Modal vektör
$[\Phi]$	Modal matris

δ_{pq}	Kronecker delta
Ψ_a	Analitik mod şekil vektörü
Ψ_d	Deneysel mod şekil vektörü
Ψ	Serbest titreşim genliğini
ω	Açısal frekans
λ	Özdeğer
λ_k	Kutup fonksiyonu
*	Kompleks eşlenik

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Köprüler, geçmişi günümüze bağlayan ve hayatımızın vazgeçilmez bir parçası olarak gördüğümüz önemli mühendislik yapılarıdır. İşlevleri gereği buldukları bölgedeki toplumların sosyal ve iktisadi hayatları üzerinde çok büyük öneme sahiptirler. İnsanoğlu varlığından itibaren köprüleri çeşitli amaçlar için kullanmıştır. İlk zamanlarda dar ve küçük yapılan ahşap ve kâgir olan köprülerin yerini günümüzde uzun açıklıklı çelik ve betonarme köprüler almıştır. Açıklıkların büyümesi ve yüklerin artması durumunda betonarme eleman boyutları çok büyümekte ve dolayısıyla yapının zati ağırlığını arttırmaktadır. Görünüştaki kütleli fazlalıklar ve bazen de yapı fonksiyonuyla çelişen betonarme oluşumlar ortaya çıkmaktadır. Bu durum son yıllarda öngerilmeli beton tekniğinin kullanılmaya başlamasıyla son bulmaktadır.

Öngerilmeli beton klasik betonarmenin çeşitli yetersizliklerini ve eksikliklerini giderebilmek için ortaya çıkan bir teknolojidir. Modern mühendisliğin en önemli gelişmelerinden biri olan öngerilmeli beton bir malzeme ve aynı zamanda da bir teknolojinin adıdır. Öngerilmeli beton kısa bir süre içerisinde geleceğin yapı malzemesi olarak süratle ön sırayı almış bulunmaktadır. Bu yapı malzemesi yöntemi ekonomi, hız, uzun ömürlülük, yangına dayanıklılık, enerji tasarrufu ve mimari esneklik sağlar. Öngerilme, köprülere beton dökümünden önce gerilen ve betonun dökülmesi ve sertleşmesinden sonra serbest bırakılan çelik çubuklarla verilebilir. Diğer bir tür öngerilme verme şekli de betonun dökülüp sertleştikten sonra, yerleştirilen öngerilme kablolarına kuvvet tatbik edip bunun uçlarından ankre edilmesidir. Öngerilme de, betonun yüksek basınç mukavemeti, çeliğin yüksek çekme mukavemetiyle birleştirilmektedir. İlk öngerilmeli beton köprüler 1950'de Almanya'da ve daha sonra Fransa'da yapılmıştır. Türkiye'de ise Kömürhan Köprüsü, İmrahor Viyadüğü, Atatürk Havalimanı dış hatlar terminali kapalı otoparkı, Ankara Sheraton Otel Kongre ve Kültür Merkezi, Ünye Çimento Çayeli tesislerinin çimento silosu gibi yapılar ardgerme tekniğiyle yapılmış ilk yapı örneklerindedir.

Büyük su yollarını ya da derin yarıları geçen köprüler, alternatif ulaşım yollarının sınırlı olması sebebi ile daha da önemlidirler. Servis hayatlarının uzunluğu göz önüne

alındığında köprülerin dinamik etkiler altındaki yapısal davranışlarının çok iyi belirlenmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Çünkü bu tür köprülerin zarar görmesi, can ve mal kaybının yanında şehirlerarası ulaşım bağlantısının da yok olması anlamına gelmektedir.

Yapıların dinamik yükler etkisindeki davranışları birçok belirsizliği içermektedir. Dinamik yüklerdeki belirsizliklerin yanı sıra dinamik davranışı etkileyen parametrelerdeki belirsizlikler, yapı dinamik davranışının gerçekçi olarak belirlenmesini zorlaştırmaktadır (Bayraktar vd., 2010e). Yapıların dinamik davranışlarını anlamak onların dinamik karakteristikleri ya da modal parametreleri olarak bilinen sönüm oranları, mod şekilleri ve doğal frekanslarını belirlemekle mümkün olmaktadır. Günümüzde yapı dinamik karakteristiklerini belirlemek için teorik ve deneysel yöntemler kullanılmaktadır.

Teorik yöntem olarak kullanılan Sonlu Elemanlar Yöntemi ile bir yapının sonlu eleman modeli oluşturulurken yapı malzeme özelliklerinden sınır şartlarına kadar pek çok kabul yapılmaktadır. Bu kabullerin sonucu olarak elde edilen model, gerçek modeli dolayısı ile yapının gerçek dinamik davranışını tam anlamıyla doğru şekilde temsil edememektedir. Bu problemlerden dolayı teorik modeller deneysel yöntemler kullanılarak doğrulanmalıdırlar (Birinci, 2010). Bu yüzden köprüler gibi büyük yapıların dinamik karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesinde uygulama basitliği, ölçüm sırasında trafik akışının kesilmemesi, ucuz maliyet gibi sebeplerden dolayı teorik yöntemin tamamlayıcısı olan Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır.

Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile sistemin dinamik değişkenleri olan doğal frekanslar ve bu frekanslara karşılık gelen modal şekilleri ve sönüm oranları belirlenebilmektedir. Sistemin dinamik değişkenleri, sistemdeki kütle miktar ve dağılımı ile sistemi oluşturan elemanların rijitliği ve dağılımı arasındaki ilişki sonucu ortaya çıkar. Sönüm oranları ise harekete maruz kalan sistemin malzemesi ve elemanları arasında oluşan iç sürtünmelerin veya tüketilen enerjinin bir ölçüsü olarak ortaya çıkar. Deneysel Modal Analizin diğer tekniklere göre avantajı yapı-temel-zemin etkileşimini de içerecek şekilde sistemi tanımlamasıdır (Dönmez ve Karakan, 2009). Operasyonel Modal Analiz Yönteminde, Zorlanmış ve Çevresel Titreşimler kullanılabilir. Zorlanmış Titreşimlerde darbe çekici ve sarsıcılar titreştirici olarak kullanılırken, Çevresel Titreşimde rüzgâr, taşıt yükü, deprem, patlatma veya yaya hareketi gibi titreştiriciler kullanılmaktadır. Tepkilerin ölçülüp değerlendirilmesinde frekans ve zaman tanım alanına dayalı birçok yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanılan yöntemlerin matematik tabanları aynı

olup, veri işleme ve denklem çözüme teknikleri ile matris dizilişleri birbirinden farklı özellikler içermektedir (Altunışık, 2010).

Teorik ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler arasındaki farklılıkların, yapının tasarımı sırasında kabul edilen malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki değişimler ile yapım kusurlarından kaynaklandığı görülmektedir. Bu kriterler dikkate alınarak sonuçlar arasındaki farklılıklar minimum seviyeye indirilmekte ve yapının mevcut durumunu yansıtan sonlu eleman modeli elde edilmektedir. Böylece, deneysel ölçüm yöntemlerine göre iyileştirilen sonlu eleman modelleri kullanılarak yapı güvenliği daha gerçekçi bir şekilde belirlenebilmektedir.

1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Tez kapsamında konuyla ilgili yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmektedir.

Salane ve Baldwin (1990), üç açıklıklı bir karayolu köprüsünün dinamik karakteristiklerini deneysel yöntemler ile belirlemek amacıyla tek açıklığını laboratuvar ortamında modellemişlerdir. Oluşturulan modelde, köprü uzunluğu 9.45 m ve köprü genişliği 1.52 m olarak dikkate alınmıştır. Köprü modeli oluşturulurken uç noktalara çıkmalar yapılarak farklı durumlarda deneysel ölçümlerin alınması amaçlanmıştır. Deneysel ölçümlerde Zorlanmış Titreşim Yöntemi kullanılmış ve 14 farklı noktadan ölçüm alınarak köprünün dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Ayrıca uç noktalara yapılan çıkmaların kırılması sonucunda frekans değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.

Pang (1996), doktora tezi kapsamında Amerika'nın Oklahoma eyaletinin yakınlarında 1973 yılında inşa edilen ve I-35 karayolu üzerinde bulunan 122 m uzunluğundaki betonarme Walnut Creek Köprüsünün dinamik karakteristiklerini analitik ve deneysel yöntemler kullanarak belirlemiştir. Köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli I-DEAS ve MATLAB programları kullanılarak oluşturulmuş, analizler gerçekleştirilerek ilk 12 frekans değeri 0-8 Hz aralığında analitik olarak belirlenmiştir. Deneysel ölçümlerde dinamik karakteristikleri belirlemek için zorlanmış titreşim yöntemi, titreştirici olarak da sarsıcılar kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, analitik ve deneysel olarak belirlenen modlar arasındaki uyum Modal Güvence Kriterleri oluşturularak detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Farrar (1997), üç açıklıklı ve toplam 130m uzunluğundaki I-40 karayolu köprüsünün dinamik karakteristiklerini zorlanmış ve çevresel titreşim testleri ile belirlemiştir. Çevresel titreşim testlerinde 29 kanallı veri toplama ünitesi kullanılmış, köprü tabliyesi üzerinden

farklı 26 noktadan karşılıklı olarak deneysel ölçümler alınmıştır. Deneysel ölçümlerde frekans aralığı, ortalama sayısı ve ölçüm süresi gibi parametreler değiştirilerek etkin modların elde edilmesi amaçlanmıştır. Ölçümler sırasında doğal titreştirici olarak köprü üzerindeki trafik akışı dikkate alınmış, dinamik karakteristikler Doğal Titreştirici Tekniği (NEXT) kullanılarak belirlenmiştir. Zorlanmış titreşim testlerinde ise köprü üzerindeki trafik akışı kesilmiş, hidrolik sarsıcılar kullanılarak köprüye titreşim hareketi uygulanmıştır. Ölçümlerden elde edilen titreşim sinyallerinin frekans davranış fonksiyonlarına dönüştürülmesiyle dinamik karakteristikler deneysel olarak elde edilmiştir. Deneysel ölçümler sonucunda köprünün ilk 6 frekansının 0-6Hz, sönüm oranı değerlerinin ise %0.38-1.58 arasında olduğu belirlenmiştir. Her iki yöntemden elde edilen modlar arasındaki uyum Modal Güvence Kriterleri oluşturularak incelenmiştir.

Kou ve DeWolf (1997), köprülerin dinamik davranışlarına farklı modelleme tekniklerinin ve analiz verilerinin etkisini belirlemek amacıyla parametrik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada örnek olarak, dört açıklıklı betonarme bir karayolu köprüsü seçilmiştir. Yapılan analizlerde değişken parametre olarak eleman boyutları, malzeme ve kesit özellikleri, sönüm karakteristikleri, araç yükleri, hızları ve yerleşim bölgeleri seçilmiş ve analizler sonrasında belirli noktalardan elde edilen deformasyonlar karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Çalışmada, seçilen değişken parametrelerin köprü dinamik karakteristiklerini, yer değiştirmelerini ve kesit tesirlerini önemli derecede etkilediği vurgulanmıştır.

Fry'ba ve Pirner (2001), karayolu köprülerinin dinamik karakteristiklerini ve statik yükler altındaki deneysel davranışlarını belirlemişlerdir.

Halling vd. (2001), karayolu köprülerinin dinamik karakteristiklerini sonlu eleman analizleri ve zorlanmış titreşim testleriyle belirlemişlerdir.

Wang ve Zong (2002), hazırladıkları bilimsel proje kapsamında Amerika'nın Florida eyaletinde bulunan kısa açıklıklı betonarme köprülerin yapısal davranışlarını analitik ve deneysel olarak belirlemişler, elde edilen sonuçları proje nihai raporunda detaylı olarak değerlendirmişlerdir. Köprülerin sonlu eleman analizleri gerçekleştirilerek yapısal davranışlar analitik olarak belirlenmiştir. Deneysel ölçümlerde Zorlanmış ve Çevresel Titreşim Yöntemleri uygulanmıştır. Analitik ve deneysel olarak elde edilen yapısal davranışları frekans, mod şekli, sönüm oranı, yerdeğiştirme ve şekil değiştirmeler cinsinden irdelenmiş, köprü hasar seviyeleri enerji transfer fonksiyonları dikkate alınarak belirlenmiştir.

Xu (2002), doktora tezi kapsamında Amerika'nın Illinois eyaletinde bulunan Kishwaukee Nehri üzerine dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen her biri beş açıklıklı ve 332 m uzunluklarındaki birbirinden bağımsız iki karayolu köprüsünün yapısal davranışlarını analitik ve deneysel yöntemlerle belirlemiş, elde edilen değerleri karşılaştırmalı olarak incelemiştir.

Zapico vd. (2003), çok açıklıklı bir karayolu köprüsünün dinamik karakteristiklerini ve sismik davranışını belirlemek amacıyla laboratuvar ortamında köprünün 1:50 ölçekli modelini oluşturmuşlardır. Model köprü, 4 m uzunluğunda ve dört açıklık olup, ayakları farklı yükseklikte zemine oturmaktadır. Köprü ayaklarının düşey ve yatay yüklemeler altında göstereceği davranışı belirlemek amacıyla dört farklı kesit tipi dikkate alınmıştır. Köprü dinamik karakteristikleri, sarma tablası üzerinde gerçekleştirilen zorlanmış titreşim testleri ile belirlenmiştir. Deneysel ölçümler sırasında enine yönde ve düşük yoğunluklu titreşimler uygulanmış, elde edilen frekans davranış fonksiyonları kullanılarak doğal frekanslar ve mod şekilleri belirlenmiştir. Deneysel olarak belirlenen dinamik karakteristikler sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen analitik veriler ile karşılaştırılmış, %30 civarında oluşan farklılıklar malzeme özellikleri ve sınır artlarındaki değişimler dikkate alınarak %2'lere kadar düşürülmüştür.

Owen ve Haritos (2003), Avustralya'nın Victoria eyaletinde 1920-1940 yıllarında inşa edilen ve bölgenin en önemli köprüleri olarak nitelendirilen üç köprünün dinamik karakteristiklerini analitik ve deneysel olarak belirlemeyi amaçlanmışlardır. Örnek olarak seçilen köprü modelleri Melbourne Üniversitesi laboratuvarında 1:2:5 ölçekli olacak şekilde değişik parametreler dikkate alınarak oluşturulmuştur. Köprü modellerinin sonlu eleman analizleri ve deneysel ölçümleri gerçekleştirilerek dinamik karakteristikler analitik ve deneysel olarak elde edilmiştir. Elde edilen dinamik karakteristik değerleri karşılaştırılmış, seçilen belirsiz parametreler ile birlikte kullanılarak köprü modellerinin mevcut durumlarını yansıtan sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Köprü modelleri üzerine statik yükleme testleri uygulanmış ve köprülere kontrollü hasarlar verilmiştir. Hasarlı modeller dikkate alınarak gerçekleştirilen deneysel ölçümler kullanılarak yapısal hasarlar, frekans değerlerindeki değişimler dikkate alınarak belirlenmiştir.

Cantieni (2004), yapmış olduğu çalışmada mühendislik yapılarının mevcut davranışını yansıtan ve dinamik karakteristikler olarak adlandırılan doğal frekanslarının, mod şekillerinin ve sönüm oranlarının belirlenmesinde zorlanmış ve çevresel titreşim testlerinin önemini vurgulamış, bu yöntemlerin temel adımları, kullanım kolaylıkları,

uygulama alanları, avantaj ve dezavantajlarını detaylı bir şekilde incelemiştir. Zorlanmış titreşim testleri için İsviçre'nin en uzun nehri olan Aare nehri üzerinde bulunan 72 m açıklıklı betonarme bir kemer köprü ile Berlin'de bulunan 241 m uzunluğundaki sekiz açıklıklı Westend Köprüsü örnek olarak seçilmiş, dinamik karakteristikler deneysel olarak belirlenmiştir. Zorlanmış titreşim testlerinde hidrolik sarsıcılar titreştirici olarak kullanılmıştır. Çevresel titreşim testleri için ise, 678 m uzunluğundaki Ganter köprüsü ile 30 m uzunluğunda ve 14 m genişliğindeki Regensdorf köprüsü örnek olarak seçilmiştir. Çevresel titreşim testleri sırasında rüzgâr ve trafik gibi çevresel etkiler titreştirici olarak dikkate alınmış, dinamik karakteristikler deneysel olarak belirlenmiştir.

Ren vd. (2004), 1972 yılında Güney ABD'deki Cumberland Nehri üzerine inşa edilen altı açıklıklı ve 509 m uzunluğundaki betonarme bir köprünün çevresel titreşim testlerine dayalı sismik davranışının belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. SAP2000 programı kullanılarak köprünün sonlu eleman modeli analiz edilmiş ve dinamik karakteristikler analitik olarak elde edilmiştir. Analitik olarak elde edilen mod şekilleri dikkate alınarak deneysel ölçüm noktaları belirlenmiş, üç adet üç eksenli ivmeölçerler kullanılarak titreşim verileri toplanmıştır. 0-12.5 Hz aralığında birer saatlik farklı sekiz ölçüm düzeneği kurulmuştur. Deneysel ölçüm verilerinin Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma ve Stokastik Altalan Belirleme Yöntemleri kullanılarak işlenmesiyle dinamik karakteristikler deneysel olarak elde edilmiştir. Köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli çevresel titreşim test sonuçlarına göre iyileştirilmiştir. Köprünün sismik davranışının belirlenmesinde daha önce meydana gelen depremlerden bölgeye özgü oluşturulan deprem kayıtları dikkate alınmış, ana taşıyıcı elemanlarda meydana gelen kesit tesirleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Feng vd. (2004), Amerika'nın Irvine eyaletinde bulunan ve dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen Jamboree ve West Street köprülerinin dinamik karakteristiklerini zorlanmış ve çevresel titreşim testleri ile deneysel olarak belirlemişlerdir. Jamboree ve West Street köprüleri sırasıyla 110.9 m ve 151.3 m uzunluğunda, üç açıklıklı öngerilmeli ve kutu kesitli betonarme köprülerdir. Zorlanmış titreşim testlerinde köprü üzerine 15 ton etki oluşturarak sarsıcılar yerleştirilmiş ve titreşim verileri elde edilmiştir. Çevresel titreşim testlerinde ise köprü kutu kesiti içerisinden ve ayaklarından ölçümler alınmış, Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma ve Piklerin Seçilmesi Yöntemleri kullanılarak dinamik karakteristikler elde edilmiştir.

El-Borgi vd. (2004), Kuzey Afrika'da bir kıyı ülkesi olan Tunus'ta bulunan sekiz açıklıklı SidiBouAli Köprüsünün dinamik karakteristiklerini analitik ve deneysel yöntemlerle belirlemişlerdir. Köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli geometrik özellikler dikkate alınarak SAP2000 programında oluşturulmuştur. Analitik modellemelerde üç ve dört düğüm noktalı toplam 6834 kabuk eleman ve elastomerik mesnet kullanılmış; malzemenin elastik, homojen ve izotropik olduğu kabul edilmiştir. Deneysel ölçümlerde Çevresel Titreşim Yöntemi kullanılmış olup, köprü üzerinde farklı 55 noktadan 16 kanallı veri toplama ünitesiyle titreşim verileri toplanmıştır. Titreşim verileri frekans tanım alanında işlenmiş, oluşturulan güç spektral yoğunluk fonksiyonlarından dinamik karakteristikler deneysel olarak elde edilmiştir. Analitik ve deneysel dinamik karakteristikler arasındaki farklılıklar, frekans değerleri için % 10 ile % 29 arasında değişirken sönüm oranları için % 4 ile % 9 arasında değişmektedir. Elde edilmiş olan bu yüzdelik oranlar betonun elastisite modülü ve elastomer mesnet rijitliklerindeki değişimler dikkate alınarak kabul edilebilir sınırlar içerisine indirilmiş, böylelikle köprünün mevcut durumunu yansıtan gerçek sonlu eleman modeli oluşturulmuştur.

Bagchi (2005), 1960 yılında Alberta eyaletinde inşa edilen ve toplam 93 m uzunluğa sahip üç açıklıklı betonarme Crowchild Köprüsünün sonlu eleman modelini deneysel ölçüm verilerine göre iyileştirmiştir. Çalışmada, sonlu eleman model iyileştirmesi sonucunda elde edilen mod şekillerinin birbirileriyle uyum içerisinde olduğu, doğal frekans değerleri arasındaki maksimum farkın %1 seviyelerine düştüğü belirtilmiştir.

Guan (2006), doktora tezi kapsamında betonarme köprülerin dinamik karakteristiklerinin yapısal titreşimlere bağlı olarak belirlenmesi üzerine çalışmıştır. Çalışma kapsamında, Amerika'nın California eyaletinde bulunan Watson Wash, Vincent Thomas ve Kings Stormwater köprüleri örnek olarak seçilmiştir. Köprülerin dinamik karakteristikleri, sonlu eleman analizleri ve deneysel ölçümler ile belirlenmiştir. Deneysel ölçümler çevresel titreşim testleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel titreşim verilerinin işlenip dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde, literatürde yer alan frekans ve zaman tanım alanlarındaki birçok yöntem kullanılmış, elde edilen değerler karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Köprülere ait sonlu eleman modelleri deneysel ölçüm verilerine göre iyileştirilmiş, sürekli tekrarlanan deneysel ölçümlerle belirlenen frekans ve mod şekilleri arasındaki farklılıklar dikkate alınarak köprülerin zamana bağlı hasar seviyeleri belirlenmiştir.

Gentile ve Bernardini (2008), Çevresel Titreşim Yöntemi ve radar ölçüm sistemi ile İtalya'da bulunan ve dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen 113.3 m uzunluğundaki Capriate köprüsünün dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Çevresel Titreşim Yöntemi'nde yapılan çeşitli ölçümler sonucu elde edilen titreşim verileri Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi kullanılarak köprünün dinamik karakteristikleri (doğal frekans ve mod şekli) belirlenmiştir. Köprü üzerinde deneysel ölçümlerin alındığı noktalara radar ölçüm sistemine ait reflektörler yerleştirilmiş, IBIS-S tipi sensörlerden zamana bağlı elde edilen hız ve yerdeğiştirme grafikleri kullanılarak da dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Çalışmadan, her iki yöntem için elde edilen frekans değerlerinin ve mod şekillerinin birbirleriyle uyum içinde olduğu belirlenmiştir.

Whelan vd. (2009), köprülerin dinamik karakteristiklerini kablosuz bağlantıya sahip ölçüm sistemiyle belirlemişlerdir. Örnek olarak, 17 m uzunluğunda betonarme tabliyeye sahip çelik kirişli bir köprü uygulama olarak seçilmiştir. Deneysel ölçümlerde Çevresel Titreşim Yöntemi kullanılmış olup, doğal titreştirici olarak rüzgâr ve taşıt yükleri dikkate alınmıştır. Farklı 20 noktadan toplanan ölçüm verileri Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma ve Stokastik Altalan Belirleme Yöntemleri kullanılarak işlenmiş ve dinamik karakteristikler deneysel olarak elde edilmiştir. Köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli FEMPRO programı kullanılarak oluşturulmuş, analizler sonrasında dinamik karakteristikler analitik olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, analitik ve deneysel olarak belirlenen frekans değerleri birbirleriyle karşılaştırılarak incelenmiştir. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma Yöntemi sonuçlarının sonlu eleman analizleriyle uyum içerisinde olduğu, buna rağmen yüksek modların elde edilmesinde Stokastik Altalan Belirleme yönteminin daha etkili olduğu vurgulanmıştır.

Sanayei ve DiCarlo (2009), köprülerin sonlu eleman modellerinin deneysel ölçüm verilerine göre iyileştirilmesinde değişik yöntemlerin kullanılabilirliğini göstermek amacıyla laboratuvar ortamında iki açıklı bir köprü modeli oluşturmuşlardır. Köprü modelinin uzunluğu 5.5 m, genişliği 1.83 m ve ayak yüksekliği 1.07 m'dir. Köprünün sonlu eleman modeli SAP2000 programında oluşturulmuş, analizler gerçekleştirilerek ilk 17 frekans değeri ve mod şekli analitik olarak belirlenmiştir. Deneysel ölçümlerde köprü üzerinde farklı 12 nokta belirlenmiş, 4 noktadan yapıya titreşim verilerek 8 noktadan yapısal tepkiler toplanmıştır. Elde edilen zaman tanım alanındaki veriler işlenerek dinamik karakteristikler deneysel olarak belirlenmiştir. Analitik ve deneysel sonuçlar arasındaki uyumun belirlenebilmesi için Modal Güvence Kriteri oluşturulmuş, yüksek modlarda

sonuçlar arasında farklılıklar oluştuğu görülmüştür. Bu farklılıklar, hata kalıntı fonksiyonları ile eleman rijitlikleri, atalet momentleri ve kesit alanındaki değişimler dikkate alınarak minimuma indirilmiş ve köprünün gerçek davranışını yansıtan sonlu eleman modeli oluşturulmuştur.

Magalhaes vd. (2010), deneysel ölüm yöntemlerine bağlı olarak köprülere ait sönüm oranı değerlerinin belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışma kapsamında örnek olarak, Porto’da bulunan bir karayolu köprüsü seçilmiştir. lmler sırasında doğal titreştirici olarak rüzgâr ve taşıt yükü dikkate alınmış, elde edilen deneysel ölüm verileri Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma ve Stokastik Altalan Belirleme Yöntemleri kullanılarak işlenmiş, dinamik karakteristikler deneysel olarak belirlenmiştir. Belirlenen dinamik karakteristik değerlerinin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu vurgulanmış, ilk iki frekans değerleri 1.3Hz ve 1.6Hz, ilk iki sönüm değerleri ise %1 ve %2 olarak elde edilmiştir.

Altunışık (2010), doktora tezi kapsamında betonarme karayolu köprülerinin analitik ve deneysel yapısal davranışlarını laboratuvar modelleri ve gerçek modeller üzerinde belirlemiştir.

Altunışık vd. (2011), Giresun–Espiye karayolunun 20+362 - 20+692 kilometreleri arasında yer alan Gülburnu Köprüsü’nün dinamik karakteristiklerini analitik ve deneysel olarak belirlemişlerdir. Köprünün 3-boyutlu sonlu eleman modelini SAP2000 programını kullanarak oluşturmuşlardır. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma ve Stokastik Altalan Belirleme Yöntemlerini kullanarak deneysel dinamik karakteristikleri elde etmişlerdir. Elde edilen analitik ve deneysel sonuçları karşılaştırmışlar ve aralarında farklılıkların oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Oluşan bu farkı azaltabilmek için sonlu eleman modelinde malzeme özelliklerine göre iyileştirme yaparak modeli gerçek durumu yansıtacak hale getirmişlerdir. Model iyileştirmesinden sonra köprünün doğal frekansları arasındaki farkın %9’dan %2’lere kadar düştüğünü gözlemlemişlerdir. Daha sonra 1992 Erzincan deprem kayıtlarını kullanarak köprünün deprem davranışını belirlemişlerdir. Köprüde bulunan sürtünmeli sarkaç izolatörlerin deprem sırasında yerdeğiştirmeleri ve iç kuvvetleri azalttığını da vurgulamışlardır.

Geçmişten günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından karayolu köprülerinin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi konusunda çeşitli çalışmalar yapıldığı yukarıda verilen literatür özetinde görülmektedir.

1.3. Tezin Amacı ve İçeriği

Bu tez çalışmasında, uzun açıklıkların geçilmesinde yaygın olarak tercih edilen ve Ülkemizde de kullanımı yaygınlaşan dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen betonarme karayolu köprülerinin dinamik karakteristiklerinin çevresel titreşim verileri kullanılarak belirlenmesi amaçlanmıştır.

Yapılan literatür araştırması incelendiğinde karayolu köprülerinin dinamik davranışlarını deneysel yöntemler kullanılarak belirlemeye yönelik birçok çalışmanın bulunduğu, fakat dengeli konsol yöntemi ile yapılan çalışmaların az olduğu görülmüştür. Literatüre katkı sağlayacağı düşüncesiyle Artvin’de yeni inşa edilen dengeli konsol betonarme köprülerden biri olan Berta Köprüsü üzerinde analitik ve deneysel çalışmalar yapılarak, köprünün dinamik davranışları araştırılmaktadır. Bu kapsamda hazırlanan tez, üç bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölüm genel bilgiler bölümü olup, karayolu köprülerinin dinamik davranışı ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar, tezin amacı ve içeriği, dengeli konsol tekniğiyle yapılmış olan betonarme köprülerin tarihi ve inşa aşamaları, Teorik Modal Analiz Yöntemi ve tez çalışmasının deneysel kısmını oluşturan Operasyonel Modal Analiz Yöntemine ait formülasyonlara yer verilmektedir.

İkinci bölümde, tez kapsamında yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgular sunulmaktadır. Uygulama için seçilen Berta Köprüsü’nün 3 boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve bu modelin teorik analizleri yapılarak köprüye ait teorik mod şekilleri ve doğal frekans değerleri belirlenmiştir. Daha sonra köprü üzerinde Operasyonel Modal Analiz yöntemi gerçekleştirilmiştir. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerinden elde edilen veriler, frekans ortamında Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) ve zaman ortamında Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemleri kullanılarak işlenmiş ve köprünün deneysel dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Ayrıca, Operasyonel Modal Analiz Yönteminden elde edilen sonuçların karşılaştırılmasından ve Berta Köprüsü’nün sonlu eleman modelleri, malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki değişimler dikkate alınarak deneysel sonuçlara göre iyileştirilmesinden bahsedilmektedir.

Üçüncü bölümde tez çalışmasından elde edilen sonuçlara ve yapılan önerilere yer verilmektedir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

1.4. Dengeli Konsol Betonarme Köprüler

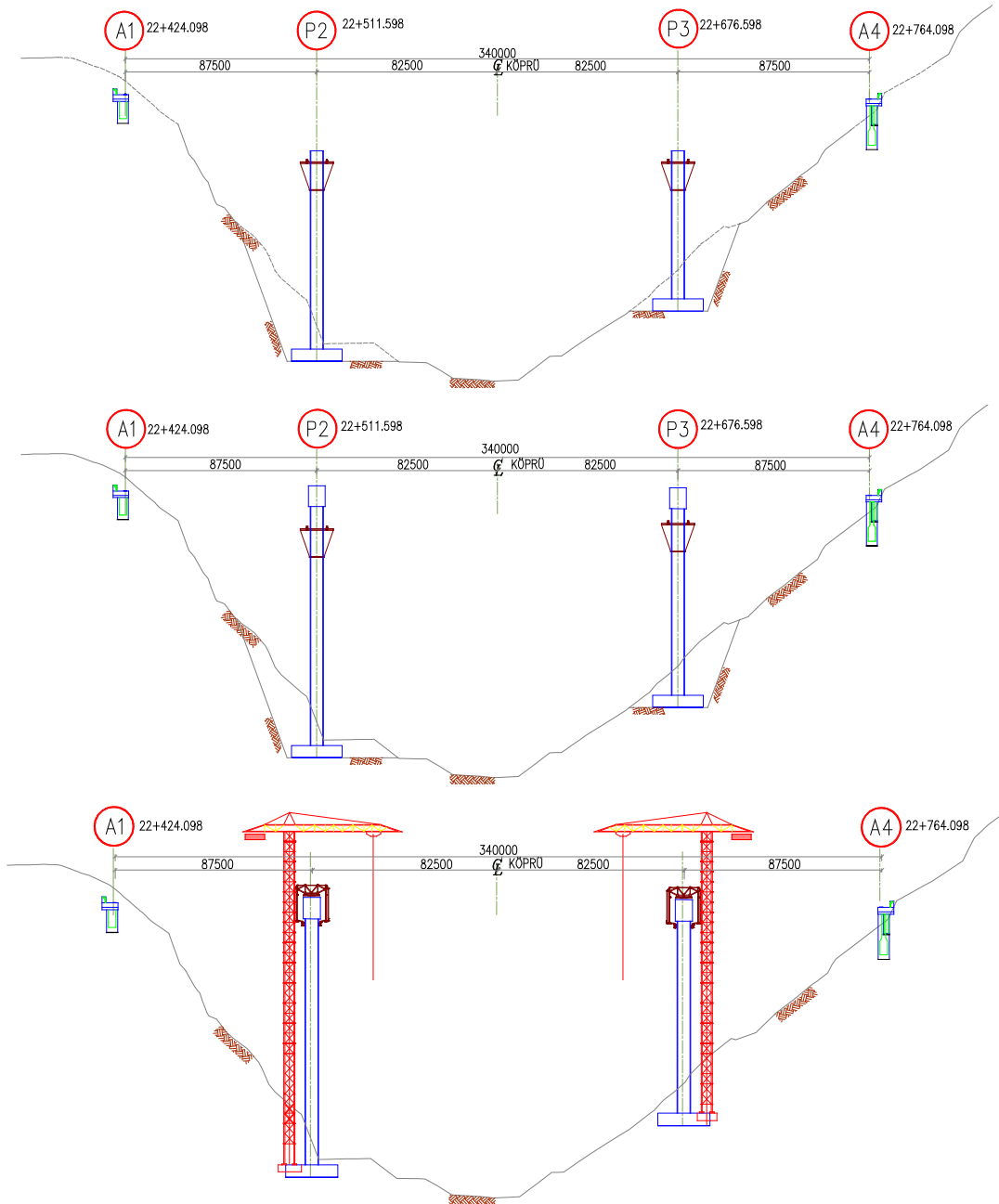
Betonarme olarak adlandırılan donatılı betonun yapı mühendisliğinde kullanımı, 19. yüzyıl sonlarında başlamış ve 20. yüzyıl başlarında yaygınlaşmıştır. Betonarmenin inşaat sektöründe sahneye çıkması adeta bir devrim olmuştur. Çelik ve betonu birleştiren bu yeni malzeme, kolay ve basit uygulanabilirliğiyle, ekonomikliğiyle ve sahip olduğu teknik özellikleriyle mimar ve mühendislerce tercih edilen önemli bir yapı malzemesi haline gelmiştir.

20. yüzyılın ikinci yarısında yaygınlaşan ön ve ard germeli betonla köprü mühendisliğinde yeni bir çığır açılmıştır. Öngerilmeli beton çeşitli işletme yükleri altındaki davranışını ve dayanımını geliştirmek üzere, bir yapı elemanına bilinçli olarak kalıcı gerilmeler verilmesidir. Bir başka tarife göre, bir yapı elemanında, işletme yüklerinin meydana getirdiği eğilmeye zıt yönde eğilme sağlayabilen kuvvetlerin uygulanmasıdır. Daha basit olarak öngerilmeli betonun tanımı, yüksek dayanımlı beton ile yüksek dayanımlı, haddelenmiş, yüksek elastik sınırlı çelik donatıların bir arada kullanılmasıyla elde edilen, çeliğe yapay olarak verilen gerilmenin aderans yoluyla betona iletilmesiyle kesitte oluşacak çekme gerilmelerinin yok edilmesi işlemidir (Topçu, 2006; Celasun, 1974).

Öngerilmeli beton kullanılarak açıklığı büyüyen ve özellikle derin vadilerden ve geniş nehirlerden geçme durumunda bulunan köprüler için dengeli konsol yöntemi en uygun çözüm olarak gözükmektedir. Dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen değişken kesitli uzun açıklıklı karayolu köprülerin yapımında önce orta ayaklar ve köprünün küçük bir kısmı, yerinde uygun bir kalıp sistemi ile inşa edilmektedir. Daha sonra orta ayakların her iki tarafına özel kalıp arabaları bağlanarak 3-5m uzunluğundaki birer segment (dilim) imal edilmektedir. Bu yolla, köprü üst yapısının ağırlığını zemine aktarmak üzere bir iskele sistemi yapılması gereği ortadan kalkmaktadır. Kalıp arabası kalıbın, betonun ve beton içerisindeki teçhizatın ağırlığını, bir önce dökülmüş olan segmente basarak taşımaktadır. Köprü orta noktasına gelindiğinde her iki taraftan gelen segmentler ya bir mafsal düzeneğiyle ya da kilit segmenti ile birleştirilmektedir. Birbirinden bağımsız olan üniteler beton yeterli mukavemeti kazanınca, daha önce betonda bırakılmış kanallardan yüksek mukavemetli çelik kablolar geçirilerek ve ardgerme tatbik edilerek birbirine bağlanmaktadır. Ardgerme tatbik edilir edilmez kalıp arabası bir segment boyu kadar ötelenmekte ve yeni bir segment için döngüye başlanmaktadır (Harputoğlu vd., 2007;

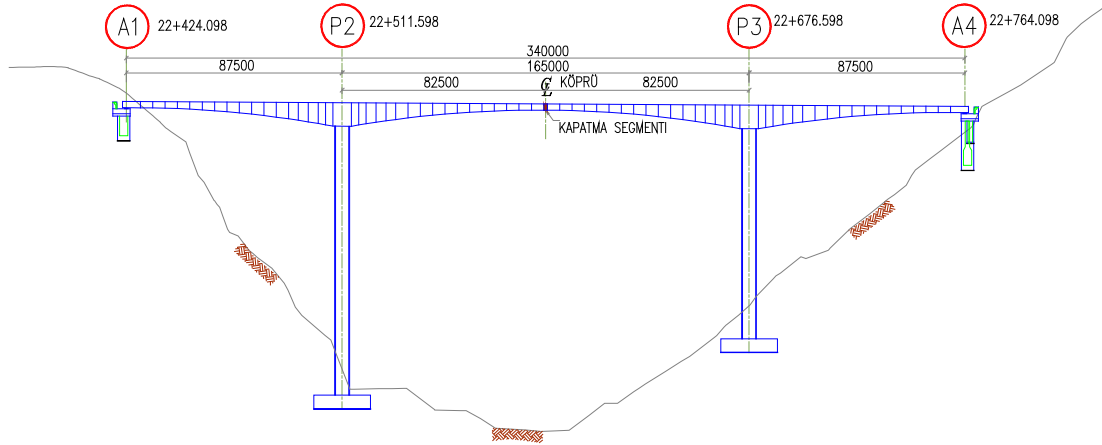
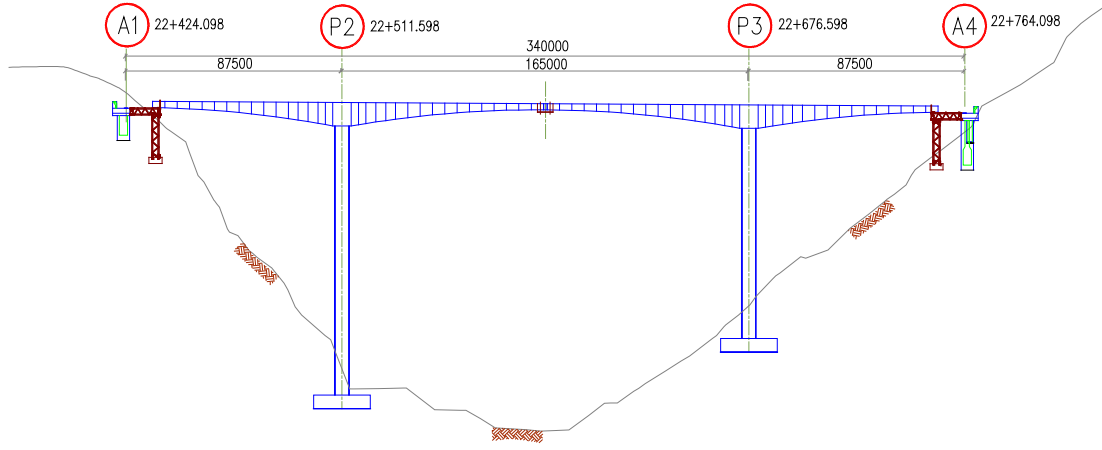
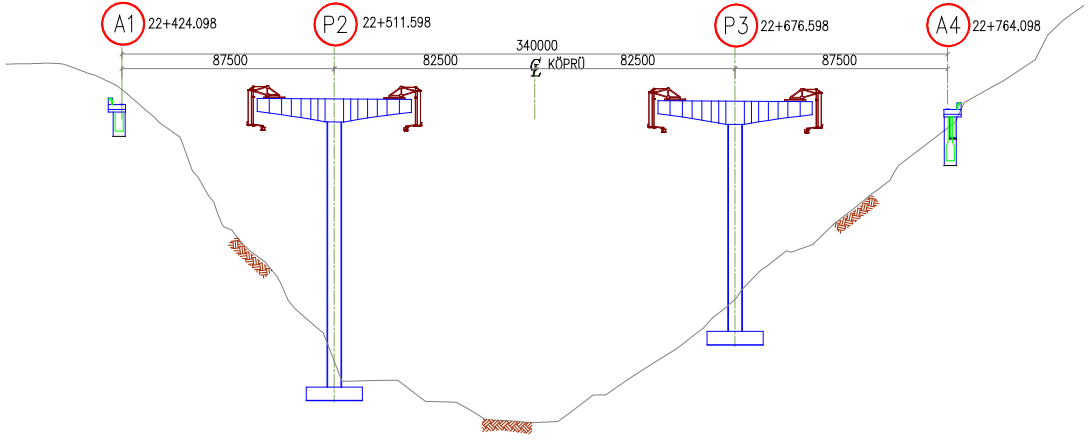
Karakaplan vd., 2007; Altunışık, 2010; Altunışık vd., 2009b). Köprü üstyapısını oluşturan segmentlerin inşasına ait şematik gösterim Şekil 1.1’de verilmektedir.

Dengeli Konsol Yöntemi enkesit yüksekliği sabit veya değişken olan her türlü üstyapı için kullanılabilir. Fakat gerek yapım sırasında gerekse yapım sonrasında statik zorlanmalara karşı en uygun form olarak değişken yükseklikli enkesit uygulaması tercih edilmektedir (Altunışık, 2010).



Şekil 1.1. Tipik bir dengeli konsol köprünün yapım aşamalarına ait şematik gösterim (DOLSAR Proje, 2007)

Şekil 1.1'in devamı



Dengeli konsol yöntemiyle yapılan ilk öngerilmeli beton köprü uygulaması 1950–1951 yılları arasında Almanya’da yapılan ve Ulrich Finsterwalder tarafından projelendirilen 62.09 m açıklıklı Balduin köprüsüdür (Şekil 1.2). Köprü yapımı sırasında üst yapı dilimleri yerinde dökülmüştür. Dilimler yerinde dökülebileceği gibi öndöküm olarak da hazırlanabilmektedir. İlk öndöküm uygulaması 1962–1964 yılları arasında Fransa’da yapılan Choisy-le-Roi köprüsüdür (Şekil 1.3). Jean Muller tarafından projelendirilen köprünün toplam uzunluğu 131 m, tabliye genişliği 28.4m ve açıklık mesafeleri sırasıyla 38m-55m-38m’dir. Ülkemizde ise dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen birçok karayolu köprüsü vardır. İlk uygulama 1983–1986 yılları arasında inşa edilen ve trafiğe açılan Kömürhan köprüsüdür (Şekil 1.4). Köprü 287 m uzunluğunda, 11.50 m genişliğinde ve üç açıklıklıdır. Orta açıklığı 135m, kenar açıklıkları 76’şar metredir. Köprü üstyapısı tek gözlü kutu formdan oluşmuş ve üstyapı dilimleri yerinde dökülmüştür. İkinci uygulama 1992-1998 yılları arasında Ankara’da inşa edilen İmrahor Viyadüğü’dür (Şekil 1.5). Toplam 604 metre uzunluğu ile Türkiye’de inşa edilen en uzun arduermeli yapı olan İmrahor Viyadüğü, 64 metre yüksekliğindeki ayaklar üzerinde 115 metrelik 4 orta açıklık ve 72 metrelik 2 kenar açıklığa sahiptir. 27 metre genişliğindeki kutu kesitli tabliyesi ile Dünyanın en geniş arduermeli viyadüğü unvanını da almıştır. Üçüncü uygulama ise Gülburnu Köprüsü’dür (Şekil 1.6). Köprü arduermeli yerinde dökme kutu kesite sahiptir ve Mayıs 2009’da trafiğe açılmıştır (Altunışık vd., 2009a; Altunışık vd., 2009b; Altunışık, 2010). Tez çalışmasının konusu olan Berta Köprüsü dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen Artvin’deki 5 köprüden biridir (Şekil 1.7).



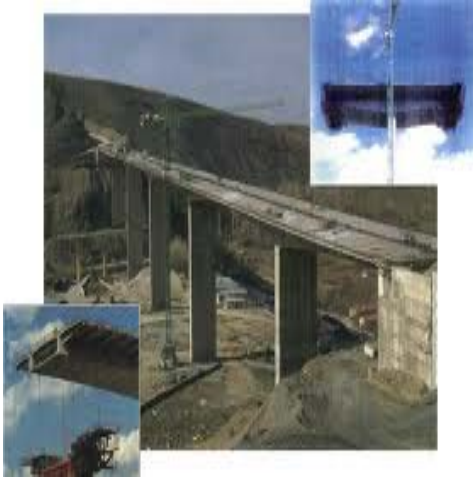
Şekil 1.2. Balduin Köprüsü, Almanya



Şekil 1.3. Choisy-le-Roi Köprüsü, Fransa



Şekil 1.4. Kömürhan Köprüsü'ne ait bazı fotoğraflar



Şekil 1.5. İmrahor Viyadüğü'ne ait bazı fotoğraflar



Şekil 1.6. Gülburnu Köprüsü'ne ait bazı fotoğraflar



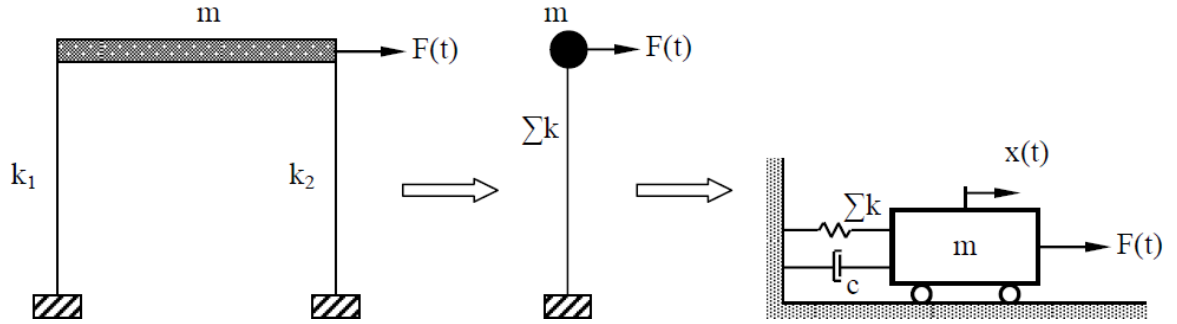
Şekil 1.7. Berta Köprüsü'ne ait bazı fotoğraflar

1.5. Teorik Modal Analiz Yöntemi

Mühendislik yapılarının dinamik karakteristikleri olarak adlandırılan doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları teorik modal analiz yöntemi kullanılarak belirlenmektedir. Dinamik karakteristiklerin tek ve çok serbestlik dereceli sistemler için elde ediliş i aşağıda sunulmaktadır.

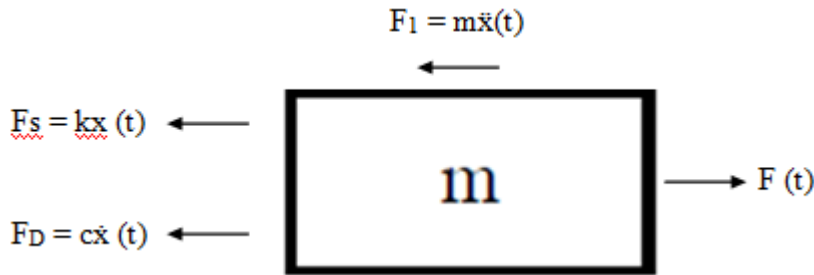
1.5.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

Bir düğüm noktasının uzayda üç doğrusal ve üç açısal olmak üzere altı hareket edebilme kabiliyeti vardır. Düğüm noktasının her bir hareket kabiliyeti serbestlik derecesi olarak adlandırılır. Bir serbestliğe sahip en basit sistemlere Tek Serbestlik Dereceli Sistemler (TSDS) denir (Chopra, 1995; 2006; Bayraktar, 2006; Birinci, 2009). Çoğu yapı pratikte tek serbestlik derecesine sahip olmamasına rağmen, çok serbestlik dereceli sistemler tek serbestlik dereceli sistemlerin süperpozisyonu olarak hesap edilebilmektedir. Tek serbestlik dereceli sistemlerin teorik modeli Şekil 1.8’de verilmektedir.



Şekil 1.8. Tek serbestlik dereceli sistemlerin teorik modeli

Şekil 1.8’deki teorik model kullanılarak elde edilen serbest cisim diyagramı Şekil 1.9’da gösterilmektedir.



Şekil 1.9. Tek serbestlik dereceli sistemlerin serbest cisim diyagramı

Şekil 1.9’deki serbest cisim diyagramı üzerinden denge denklemi yazılarak,

$$F_1 + F_D + F_S = F(t) \quad (1.1)$$

elde edilir. (1.1) nolu denklemde gerekli ifadeler yerine yazılırsa, TSDS için genel hareket denklemi,

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

olarak elde edilir. (1.1) ve (1.2) nolu denklemlerdeki, F_I atalet kuvveti, F_D sönüm kuvveti, F_S yaydaki elastik şekil değişiminden dolayı oluşan kuvveti, m kütle, c sönüm katsayısı, k yay katsayısı, $\ddot{x}(t)$ kütlenin ivmesi, $\dot{x}(t)$ kütlenin hızı, $x(t)$ kütlenin yer değiştirmesi, $F(t)$ uygulanan dış kuvvet olarak adlandırılır. Sönümsüz serbest titreşim için ise genel hareket denklemi olan (1.2) nolu denklemdeki sönüm sabiti $c=0$ ve titreşime başlangıç şartlarının neden olduğu düşünülerek de uygulanan dış kuvvet $F(t)=0$ kabul edilmektedir. (1.2) nolu denklem bu şartlar altında düzenlenirse, TSDS için sönümsüz serbest titreşim hareket denklemi,

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (1.3)$$

olarak elde edilir. Denklem (1.3) düzenlenirse,

$$\ddot{x}(t) + \omega^2 x(t) = 0 \quad (1.4)$$

ve buradan da

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.5)$$

elde edilir (Chopra, 2006; Birinci, 2009). (1.5) nolu denklemdeki ω , sönümsüz doğal açısal frekansı göstermektedir.

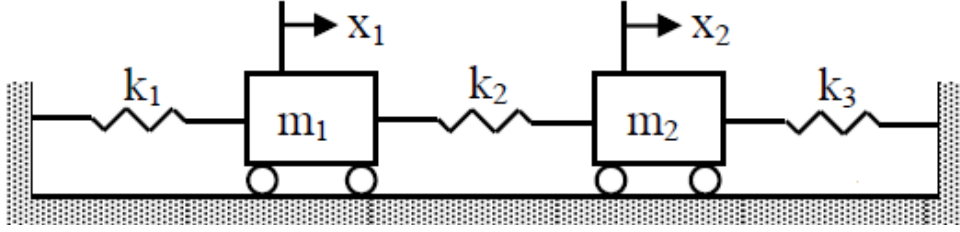
1.5.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

Gerçek sistem çok serbestlik dereceli sistemlerdir. Çok Serbestlik Dereceli Sistemlerde (ÇSDS) serbestlik derecesi, bir hareket denklemi ve doğal frekansa karşılık gelmektedir. Tek serbestlik dereceli sistemlerin titreşimindeki skaler değerlerin yerini, çok

serbestlik dereceli sistemlerde vektörel ve matris büyüklükler alır. Çok serbestlik dereceli sistemlerde genel hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (1.6)$$

dir (Chopra, 2006; Birinci, 2009). Burada, $[M]$ kütle matrisi, $[C]$ sönüm matrisi, $[K]$ rijitlik matrisi, $\{x(t)\}$ yer değiştirme vektörü, $\{\dot{x}(t)\}$ hız vektörü, $\{\ddot{x}(t)\}$ ivme vektörü, $\{F(t)\}$ kuvvet vektörüdür. Sönümsüz serbest titreşim durumunda sönüm matrisi $[C] = 0$ ve kuvvet vektörü $\{F(t)\} = 0$ kabul edilecektir. Çok serbestlik dereceli sistemleri temsil etmek amacıyla iki serbestlik dereceli bir sistemin sönümsüz serbest kütle-yay teorik modeli Şekil 1.10'da verilmektedir.



Şekil 1.10. Çok serbestlik dereceli sistemlerin sönümsüz serbest titreşimi

Sönümsüz serbest titreşimlerde sönüm olmadığı için teorik model kütle ve rijitlik terimleriyle ifade edilir ve bu durumda (1.6) nolu hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (1.7)$$

halini alır. Bu denklemin çözümü için basit harmonik hareket dikkate alınır ve

$$\{x(t)\} = \{A\} \sin(\varphi + \omega t) \quad (1.8)$$

olduğu varsayılır (Chopra, 1995; Birinci, 2009). Burada; $\{A\}$, zamana bağlı olmayan bir vektör olup, genlik vektörü olarak adlandırılır. (1.8) nolu denklem türetilip, (1.7) nolu denklemde yerine yazılacak olursa,

$$-\omega^2 [M]\{A\} \sin(\omega t + \varphi) + [K]\{A\} \sin(\omega t + \varphi) = \{0\} \quad (1.9)$$

elde edilir. Bu denklemdeki $\sin(\omega t + \varphi)$ terimi denklemden çıkartılıp gerekli düzenlemeler yapılırsa,

$$[[K] - \omega^2 [M]] \{A\} = \{0\} \quad (1.10)$$

bulunur ve bu denklem önden $[M]^{-1}$ ile çarpılırsa,

$$[[D] - \lambda[I]] \{A\} = \{0\} \quad (1.11)$$

standart öz değer denklemi elde edilir (Chopra, 1995; Chopra, 2006; Birinci, 2009). Burada,

$$[D] = [M]^{-1} [K] \quad (1.12)$$

dır. $[I]$ birim diyagonal matrisi ve $\lambda = \omega^2$ öz değerleri göstermektedir. (1.10) nolu denklemin sıfırdan farklı çözümü için,

$$|[K] - \omega^2 [M]| = 0 \quad (1.13)$$

karakteristik determinant denklemi elde edilir. Denklemin çözümünden n serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal açısal frekans (öz vektör) $(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n)$ elde edilir. Doğal frekansların büyükten küçüğe sıralanması sonucunda elde edilen en küçük frekans temel frekans ve bu frekansa karşılık gelen mod şekli temel mod şekli olarak adlandırılır. Her λ_r öz değer vektörüne karşılık bir A_r öz vektör veya doğal mod şekli (1.11) denkleminde belirlenir.

Elde edilen modal vektörler normalleştirilerek $\{\Phi\}_r$ modal vektörleri ve $[\Phi]$ modal matrisi denklem (1.14)'teki gibi oluşturulur (Chopra, 2006; Birinci, 2009).

$$[\Phi]_{n \times n} = [\{\Phi\}_1 \{\Phi\}_2 \dots \{\Phi\}_n] \quad (1.14)$$

1.6. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi

Operasyonel Modal Analiz adından da anlaşıldığı gibi hizmet durumundaki bir yapıdan gerçek zamanlı veri toplanarak yapılan deneysel bir modal analizdir. Bu yöntemde bilinmeyen kuvvetler/etkiler ya da yapı titreştiricileri olarak rüzgâr yükleri, yaya ve taşıt trafiği, deprem, dalga hareketleri vb. çevresel etkiler kullanılmaktadır. Tez çalışmasının bu kısmında deneysel ölçüm yöntemlerine bağlı mühendislik yapılarının dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde gerekli olan test aletleri detaylı bir şekilde tanıtılmakta, Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile ilgili genel bilgilere yer verilmekte ve son olarak da dinamik karakteristikleri belirleme yöntemlerine ait formülasyonlar sunulmaktadır.

1.6.1. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile İlgili Genel Bilgiler

Geçmiş demiryolu raylarındaki hasarların çekiç darbeleriyle oluşturulan titreşimlerin dinlenilerek belirlenmesine dayalı olan Operasyonel Modal Analiz Yöntemi, günümüzde yapılarda meydana gelen titreşimleri dikkate alarak yapıların dinamik karakteristikleri olarak tanımlanan doğal frekanslarının, mod şekillerinin ve modal sönüm oranlarının deneysel olarak belirlenmesinde kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. Yığma taş köprüler, asma köprüler, çelik köprüler, kablolu köprüler, yaya üst geçitleri ve karayolu köprüleri gibi önemli mühendislik yapılarının dinamik karakteristiklerinin belirlenebilmesi için kullanılan Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile ilgili birçok çalışma mevcuttur (Chuntavan, 1993; Catbaş, 1997; Womack ve Halling, 1999; Schwarz ve Richardson, 1999; Inaudi vd., 2000; Achter, 2000; Ewins, 2000; Zhao ve DeWolf, 2002; Bayraktar vd., 2007a; Bayraktar vd., 2007b; Bayraktar vd., 2007c; Bayraktar vd., 2007d; Ramos, 2007; Bayraktar vd., 2008a; Bayraktar vd., 2008b; Bayraktar vd., 2008c; Bayraktar vd., 2008d; Bayraktar vd., 2008e; Bayraktar vd., 2009a; Bayraktar vd., 2009b; Bayraktar vd., 2009c; Bayraktar vd., 2009d; Bayraktar vd., 2009e;. Bayraktar vd., 2009f; Birinci, 2009; Şahin, 2009; Bayraktar vd., 2010a; Bayraktar vd., 2010b; Bayraktar vd., 2010c; Bayraktar vd., 2010d; Bayraktar vd., 2010e; Bayraktar vd., 2010f; Bayraktar vd., 2010g; Bayraktar vd., 2010h; Bayraktar vd., 2010i; Sevim , 2010; Türker, 2011).

Çevresel titreşim verileri altında gerçekleştirilen Operasyonel Modal Analiz Yönteminde bazı kabuller yapılmaktadır. Bunlar;

- Malzeme özelliklerinin değişmediği,
 - Sınır şartlarının değişmediği,
 - Yapıda oluşan titreşimlerin küçük olduğu,
 - Yapının bir bütün ve sürekli olduğu,
- şeklindedir.

Genel olarak Operasyonel Modal Analizin uygulama alanları,

- Yapılar projelendirilirken teorik analizde yapılan kabullerin gerçekte sağlanıp sağlanmadığının belirlenmesi,
 - Teorik analiz sonucu elde edilen dinamik karakteristiklerin deneysel olarak elde edilenlerle karşılaştırılmasının yapılması ve sonlu elemanlar modelinin iyileştirilmesi,
 - Teorik analizin yapılmasında zorluk olan yapıların dinamik karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesi,
 - Yapı sağlığı izlenmesi,
 - Yapılarda hasar tespiti, yapıların güvenliklerinin belirlenmesi
- şeklinde sıralanabilir.

1.6.2. Operasyonel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Ölçüm Sistemi

Operasyonel modal analiz ölçümlerinde kullanılan ölçüm düzeneği başlıca üç kısımdan oluşmaktadır. Bunlar,

- Titreştiriciler
 - Ölçüm Sistemi
 - Analiz Yazılımı
- şeklinde sıralanabilir.

1.6.2.1. Titreştiriciler

Titreştiriciler üretilen titreşim sinyalinu yapıya uygulamak amacıyla kullanılan cihazlardır. Yapıları titreştirmek için çok değişik cihazlar olmasına rağmen yaygın ve başarılı bir şekilde kullanılan iki tip titreştirici vardır. Bunlar yapıya bütün ölçüm boyunca temas eden ve ölçüm boyunca ya yapıyla herhangi bir teması olmayan ya da yapıyla kısa süreli teması olan yapay titreştiriciler olarak iki kısma ayrılır. Yapıyla sürekli temas halinde olanlar sarsıcılar, yapıyla kısa süreli temas halinde olanlar darbe çekicileridir.

1.6.2.1.1. Sarsıcılar

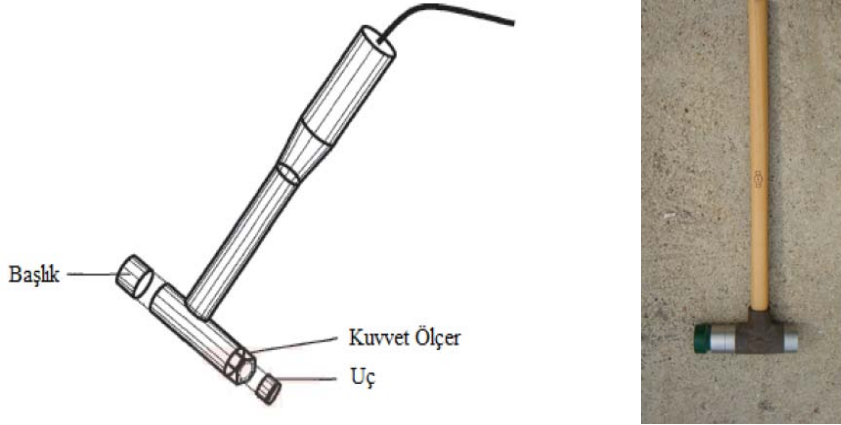
Sarsıcılar, genellikle mühendislik yapıları üzerinde gerçekleştirilen arazi çalışmalarında yapıyı titreştirmek amacıyla kullanılmaktadırlar. Bu tip cihazlar bütün ölçüm boyunca yapıyla temas halindedir ve bu mekanizmalar doğru güç aktarımları için yapıya çok iyi sabitlenmelidir. Sarsıcıların maliyetleri oldukça pahalı olduğundan yapı üzerinde dikkatli bir şekilde kullanılmalı ve yapıya zarar verilmemelidir. Seçilen yapının türüne ve frekans aralığına bağlı olarak sarsıcının mekanik özellikleri değiştirilebilmekte, böylelikle yapıya üç yönde farklı özelliklere sahip dalga hareketleri uygulanabilmektedir. Sarsıcılar; mekanik, elektro-manyetik ve elektro-hidrolik olarak üçe ayrılmaktadır (Altunışık, 2010). Şekil 1.11’de çeşitli tiplerdeki sarsıcılar görülmektedir.



Şekil 1.11. Çeşitli sarsıcılar

1.6.2.1.2. Darbe Çekiçleri

Yapıların titreştirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir diğer yöntem darbe çekiçleri kullanarak yapıyı titreştirmektir. Bu yöntemde ölçümler sırasında daha fazla özen gösterilmesi gerekmesine rağmen, kullanımını oldukça kolaydır ve orta ölçekli mühendislik yapıları veya laboratuvar modellerinin titreştirilmesinde kullanılmaktadır. Yapıyı titreştirmek için kullanılan alet, başlığı ve ucu değiştirilerek farklı frekans seviyelerinde titreşimler üreten bir çekiçten ibarettir (Şekil 1.12). Çekiçle yapıya uygulanan kuvvet, çekiğin ucuna yerleştirilen kuvvetölçerlerle ölçülür ve ölçülen kuvvetin yapıya uygulanan kuvvete eşit olduğu kabul edilir. Çekiçle uygulanan kuvvetin büyüklüğü, çekiç başlığının kütlesine ve çekiğin yapıya vurulduğu andaki hızına bağlı olarak belirlenebilir. Dolayısı ile istenilen seviyede kuvvet uygulamak için en uygun yol çekiç başlığının kütlesinin değiştirilmesidir (Türker, 2005). Özellikle köprüler gibi farklı malzeme özelliğine sahip (betonarme, çelik, yığma) yapılarda çalışma kapsamına bağlı olarak yumuşak, orta sert ve sert başlıklar kullanılabilir.



Şekil 1.12. Yaygın Olarak Kullanılan Darbe Çekici

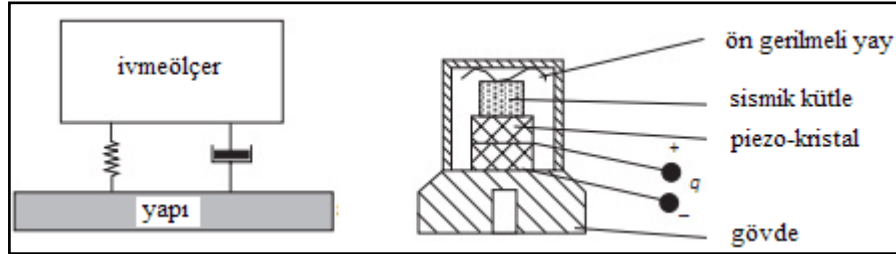
1.6.2.2. Ölçüm Sistemi

Ölçüm sistemlerinde yaygın olarak ivmeölçerler ve veri toplama sistemleri kullanılmaktadır.

1.6.2.2.1. İvmeölçerler

Titreşim sensörleri olarak da bilinen ivmeölçerler geniş frekans ve dinamik aralığa sahip olmaları ve nispeten küçük ve hafif olmalarından dolayı en çok tercih edilen dönüştürücü tipleridir. Adından da anlaşılacağı üzere ivmeölçerler deneysel ölçümler sırasında yerleştirildikleri yapıdaki titreşimleri ölçmek için kullanılmaktadırlar. İvmeölçerlerin birbirinden farklı özellik ve yapıda birçok çeşidi olmasına rağmen, genellikle yapısal titreşim ölçümlerinde piezoelektrik ivmeölçerler kullanılmaktadır.

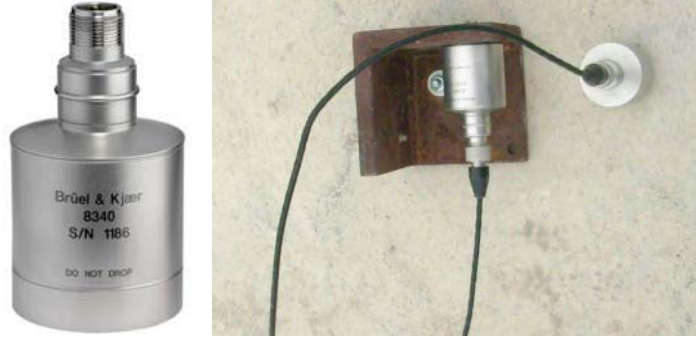
Şekil 1.13'te görüldüğü gibi bu tip ivmeölçerler, yay-kütle-sönümleyici sisteminden oluşmaktadır (Ramos, 2007).



Şekil 1.13. Piezoelektrik tipi ivmeölçerin iç mekanizması

Seçilen yapının tipine ve frekans aralığına göre ivmeölçerin belirlenmesi o yapıdan elde edilecek titreşim verilerinin doğru ve net bir şekilde belirlenmesini sağlar. Örneğin, düşük frekansa sahip yapılarda yüksek hassasiyetli ivmeölçerler, yüksek frekansa sahip yapılarda ise düşük hassasiyetli ivmeölçerler seçilmelidir.

Tez kapsamında, B&K 8340 tipi tek eksenli kablolu ivmeölçerler kullanılmıştır (Şekil 1.14 ve 1.15). Bu ivmeölçerlerin hassasiyeti 10 V/g, frekans aralığı 0.1–1500 Hz, maksimum ivmesi $\pm 5g$, boyutları 50.3 x 50.3 x 91.9 mm ve toplam kütlesi 775 gramdır.

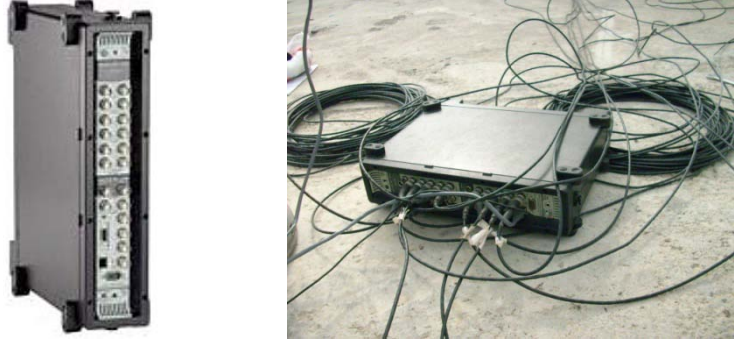


Şekil 1.14. B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçer

1.6.2.2.2. Veri Toplama Sistemleri

Veri toplama sistemi, ivmeölçerlerden gelen sinyalleri toplamak ve ilgili bilgisayar programına aktarmak için kullanılan veri toplama ünitesinden ve gelen sinyallerin işlenmesinde kullanılacak olan bilgisayardan oluşmaktadır. Dünyada kullanılan farklı modeller vardır.

Yapılan deneysel ölçümler sırasında B&K 3560-C tipindeki 17 kanallı veri toplama ünitesi kullanılmıştır (Şekil 1.15).



Şekil 1.15. B&K 3560-C tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi

1.6.2.3. Analiz Yazılım

Veri toplama sistemlerinden elde edilen titreşim verileri yazılımlarla analiz edilmektedir. Bu çalışmada, Brüel&Kjaer Firması tarafından geliştirilen PULSE (2006) ve OMA (2006) yazılımları kullanılmıştır.

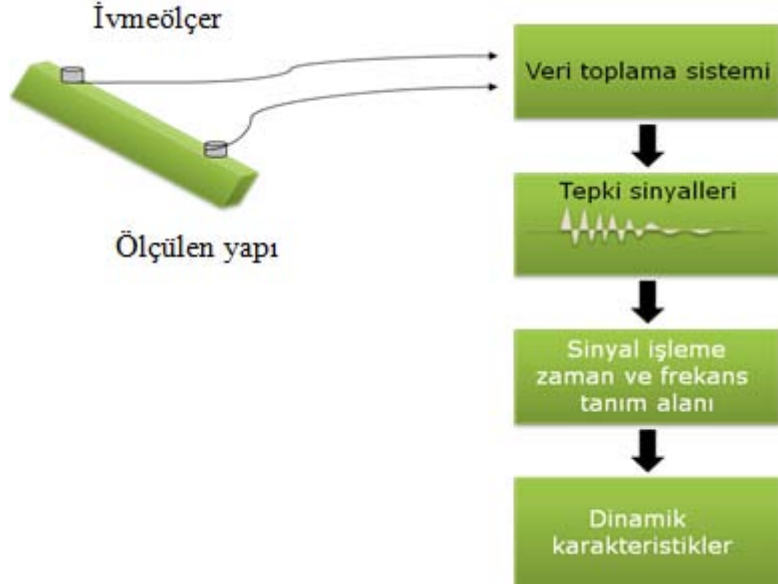
1.6.3. Dinamik Karakteristikleri Belirleme Yöntemleri

Uygulama basitliği, ölçüm sırasında trafik akışının kesilmemesi, ucuz maliyet gibi sebeplerden dolayı Operasyonel Modal Analiz Yöntemi köprülerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Operasyonel Modal Analiz Yöntemine göre yapıların dinamik karakteristiklerinin nasıl belirlendiğini gösteren akış şeması Şekil 1.16 'da verilmektedir. Bu yöntemde yapının çevresel bir etki ile (rüzgâr, taşıt yükü, yaya hareketi, deprem, patlatma gibi) titreştirildiği kabul edilmekte ve yapının bu titreşime göstermiş olduğu tepki ölçülmektedir. Tepkilerin ölçülüp değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan birçok yöntem vardır. Kullanılan yöntemlerin matematik tabanları aynı olup, veri işleme ve denklem çözme teknikleri ile matris dizilişleri birbirinden farklı özellikler içermektedir (Altunışık, 2010). Bu yöntemler değişkenin zaman olduğu zaman ortamında ve değişkenin frekans olduğu frekans ortamındaki yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Frekans tanım alanındaki yöntemler, her bir noktada ölçülen sinyalin analizine ve sinyaller arasındaki korelasyona dayanmaktadır. Bunlar, parametrik olmayan yöntemler olarak da adlandırılmaktadır. Zaman tanım alanındaki yöntemler ise her bir noktada sinyalin zaman geçmişine veya korelasyon fonksiyonlarıyla model uydurmaya dayanmaktadır (Altunışık, 2010).

Frekans ortamındaki yöntemler; Piklerin Seçilmesi (PS), Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (FTAA), Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA), Polimax yöntemleridir. Zaman ortamındaki yöntemler ise; Rastgele Azaltım, Tekrarlanan, Maksimum Olasılık ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemleridir (Şahin, 2009).

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, köprülerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde, literatürde sıklıkla tercih edilen yöntemlerden, Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlere ait formülasyonlar aşağıda verilmektedir.



Şekil 1.16. Dinamik karakteristiklerin belirlenmesini gösteren akış şeması

1.6.3.1. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) Yöntemi

Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) yöntemi frekans ortamına dayalı bir yöntem olup, kullanımı oldukça kolay olan Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (FTAA) yönteminin genişletilmiş halidir. Bu yöntemde, modlar davranışın spektral yoğunluk fonksiyonundan hesaplanan tekil değer ayırıştırma grafiklerindeki piklerin seçilmesiyle elde edilmektedir (Jacobsen vd., 2006). Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) Yöntemi, rezonans frekansının ve belirli bir modun sönümünün bulunmasına olanak sağlar. GFTAA yönteminde, bir titreşim pikinin etrafında tanımlanan tek serbestlik dereceli Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu (GSY), Ters Ayrık Fourier Dönüşümü kullanılarak zaman tanım alanına geri dönüştürülebilmektedir. Doğal frekans, zamana bağlı sıfır geçiş sayısının belirlenmesiyle; sönüm ise tek serbestlik dereceli normalize edilmiş oto korelasyon fonksiyonunun logaritmik azalışıyla elde edilmektedir (Jacobsen vd., 2006). GFTAA yönteminde ölçülmeyen etki kuvveti ve ölçülen tepki davranış fonksiyonu arasındaki ilişki,

$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega) = \mathbf{H}(j\omega)^* \mathbf{G}_{xx}(j\omega) \mathbf{H}(j\omega)^T \quad (1.15)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Bendat ve Piersol, 2004). Burada; $\mathbf{G}_{xx}(j\omega)$ etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk (GSY) fonksiyonunu, $\mathbf{G}_{yy}(j\omega)$ tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonunu ve $\mathbf{H}(j\omega)$ frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. Denklem (1.15)'teki * ve T sırasıyla ifadelerin kompleks eşleniğini ve transpozmesini göstermektedir. Matematiksel düzenlemelerden sonra tepki sinyaline ait GSY fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda,

$$\mathbf{H}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{\mathbf{R}_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{\mathbf{R}_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (1.16)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada; n mod sayısını, λ_k kutup fonksiyonunu ve \mathbf{R}_k artık değer fonksiyonunu göstermektedir. Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra denklem (1.15),

$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[\frac{\mathbf{R}_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{\mathbf{R}_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] \mathbf{G}_{xx}(j\omega) \left[\frac{\mathbf{R}_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{\mathbf{R}_s^*}{j\omega - \lambda_s^*} \right]^{\bar{\mathbf{H}}} \quad (1.17)$$

şeklinde elde edilmektedir (Brincker vd., 2000; Altunışık, 2010; Birinci, 2009). Burada; s tekil değerleri, $\bar{\mathbf{H}}$ kompleks eşleniğin transpozunu ifade etmektedir. Matematiksel ifadeler sadeleştirildiğinde tepki sinyaline ait GSY fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda,

$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{\mathbf{A}_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{\mathbf{A}_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{\mathbf{B}_k}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{\mathbf{B}_k^*}{-j\omega - \lambda_k^*} \quad (1.18)$$

şeklinde elde edilmektedir (Brincker vd., 2000; Birinci, 2009; Altunışık, 2010). Burada; \mathbf{A}_k tepki sinyalinin GSY fonksiyonuna ait k. artık değer matrisini göstermektedir. GFTAA yönteminde ilk adım GSY matrisini belirlemektir. Ayrık frekanslarda tepki sinyalinin GSY'sinin tahmini $\omega = \omega_i$ olarak bilinmekte ve sonra tekil değer ayırışım matrisi alınarak ayrıştırılmaktadır (Brincker vd., 2000; Birinci, 2009; Altunışık, 2010). Buna göre denklem (1.18),

$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega_i) = \mathbf{U}_i \mathbf{S}_i \mathbf{U}_i^H \quad (1.19)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; u_{ij} tekil vektörleri, $\mathbf{U}_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}]$ tekil vektörleri içeren bütün matrisi, s_{ij} skaler tekil değerleri ve $\mathbf{S}_i = [s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im}]$ skaler tekil değerleri içeren diyagonal matrisi göstermektedir. Denklem (1.19)'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; Birinci, 2009; Altunışık, 2010).

1.6.3.2. Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi

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

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{U}(t) = \mathbf{R}(t) = \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (1.20)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} sırasıyla sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir. $\mathbf{R}(t)$ titreşim kuvvetini, $\mathbf{U}(t)$, $\dot{\mathbf{U}}(t)$, $\ddot{\mathbf{U}}(t)$ ise zamana bağlı yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. Burada, $\mathbf{R}(t)$ kuvvet vektörü, ortamdaki verileri simgeleyen \mathbf{B} matrisi ve $\mathbf{u}(t)$ vektörü cinsinden ifade edilebilmektedir. Dinamik denge denklemi, denklem (1.20), titreşen yapının davranışını temsil etmesine rağmen bu şekliyle SAB yöntemine uygun değildir. Bu yüzden, denklem (1.20) daha uygun bir form olan ayırık-zaman stokastik durum-uzay modeline dönüştürülmektedir (Yu ve Ren, 2005; Birinci, 2009; Altunışık, 2010). Durum-Uzay modeli kontrol teorisinden üretilmekte, fakat bu model inşaat mühendisliğinde viskoz sönüme sahip yapıların dinamik karakteristiklerini hesaplamak için kullanılmaktadır (Yu ve Ren, 2005; Altunışık, 2010; Birinci, 2009). Aşağıdaki tanımlamalar kullanılarak (1.20) denklemi,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= \begin{pmatrix} \mathbf{U}(t) \\ \dot{\mathbf{U}}(t) \end{pmatrix} \\ \mathbf{A}_* &= \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_{n_2} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{pmatrix} \\ \mathbf{B}_* &= \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B} \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (1.21)$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_*\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_*\mathbf{u}(t) \quad (1.22)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada; \mathbf{A}_* durum matrisini, \mathbf{B}_* veri matrisini ve $\mathbf{x}(t)$ 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,

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_*\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_*\mathbf{u}(t) \quad (1.23)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005; Birinci, 2009; Altunışık, 2010). Burada; \mathbf{C}_* sistem davranış matrisini, \mathbf{D}_* doğrudan iletim matrisini göstermektedir. Denklem (1.22) ve (1.23) sürekli-zaman belirli durum-uzayı 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 ayrık zamanlarda gerçekleştirilmektedir. Örnekleme süresi ve ortamdaki gürültü sinyal verilerini her zaman için etkilemektedir. Örneklemeden sonra, durum-uzay modeli,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}_*\mathbf{x}_k + \mathbf{B}_*\mathbf{u}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}_*\mathbf{x}_k + \mathbf{D}_*\mathbf{u}_k \end{aligned} \right\} \quad (1.24)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005; Birinci, 2009; Altunışık, 2010). Burada; $\mathbf{x}_k = \mathbf{x}(k\Delta t)$ ayrık-zaman durum vektörünü, \mathbf{u}_k belirgin etki sinyal vektörünü göstermektedir. Gerçek operasyonel koşullarda yapılan ölçümler, yapıya ve dış ortamdaki

gürültüye ait sinyalleri içermektedir. Dolayısıyla denklem (1.24)'e stokastik gürültü bileşenleri eklendiğinde belirli-stokastik durum-uzay modeli,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}_* \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_* \mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}_* \mathbf{x}_k + \mathbf{D}_* \mathbf{u}_k + \mathbf{v}_k \end{aligned} \right\} \quad (1.25)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; \mathbf{w}_k , modeldeki belirsizlikler ve kusurlar nedeniyle işlenen gürültü sinyallerini, \mathbf{v}_k ise ivmeölçer kusurlarından dolayı işlenen gürültü sinyalini göstermektedir. Her iki vektörde değeri ölçülemeyen sinyallerden oluşmaktadır. Etkisi olmayan beyaz gürültü ve kovaryans matrisleri,

$$\mathbf{E}_* \left[\begin{pmatrix} \mathbf{w}_p \\ \mathbf{v}_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{w}_q^T & \mathbf{v}_q^T \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{S} \\ \mathbf{S}^T & \mathbf{R} \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad (1.26)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005; Birinci, 2009; Altunışık, 2010). Burada; \mathbf{E}_* beklenen değer operatörünü, δ_{pq} ise Kronecker delta'yı göstermektedir. Kronecker delta iki değişkenli bir fonksiyondur ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\delta_{pq} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } p = q \\ 0, & \text{eğer } p \neq q \end{cases} \quad (1.27)$$

SAB yönteminde yapı sisteminin davranışı, normal operasyon koşullarında değeri ölçülemeyen sinyallerle titreştirilerek belirlenmektedir. Bu veri eksikliğinden dolayı, denklem 1.25'te gösterilen belirgin sinyal verisi \mathbf{u}_k 'yi, gürültü terimleri olan \mathbf{w}_k ve \mathbf{v}_k 'den ayırt etmek mümkün değildir. Bu durumda, \mathbf{u}_k gürültü terimleri \mathbf{w}_k ve \mathbf{v}_k cinsinden yazılırsa yapının ayırık-zaman stokastik durum-uzay modeli,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}_* \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}_* \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \end{aligned} \right\} \quad (1.28)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (1.28), çevresel titreşimlerden dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde zaman tanım alanının temelini oluşturmaktadır.

1.7. Sonlu Eleman Model İyileştirme Yöntemleri

Mühendislik yapılarının doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı olarak tanımlanan dinamik karakteristikleri günümüzde 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 çatlamlar, yorulmalar, mesnet çökmeleri gibi nedenlerden dolayı değişime uğramış ve yapı dinamik karakteristikleri zaman içerisinde proje değerlerinden uzaklaşmış olabilmektedir (Şahin, 2009; Sevim, 2010; Altunışık, 2010; Türker, 2011). Bunların sonucunda teorik analizle gerçek yapı davranışı arasında farklılıklar oluşmaktadır. Bunun için, yapının mevcut halinin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ve yapının sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi ve bu iyileştirmeye göre yeniden analiz edilmesi gerekmektedir (Şahin, 2009).

Yapı sonlu eleman modelini iki şekilde iyileştirmek mümkündür. Bunlar Deneme Yanılma ve Optimizasyon Yöntemleridir (Şahin, 2009). Deneme Yanılma Yöntemi'nde, bir yapının sonlu eleman modeli oluşturulurken kullanılan yapı 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. 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 VE BULGULAR

2.1. Giriş

Bu tez çalışmasında, dengeli konsol betonarme karayolu köprülerinin dinamik karakteristiklerinin analitik ve deneysel yöntemlerle belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Artvin – Erzurum karayolu üzerinde bulunan ve ülkemizde yapılan en yüksek ayaklı köprü olma özelliği taşıyan Berta Köprüsü örnek olarak seçilmiştir.

2.2. Berta Köprüsü

2.2.1. Berta Köprüsü ve Geometrik Özellikleri

Berta Köprüsü yapılmadan önce bölgedeki ulaşım, 1878 yılında Artvin'in Rus Çarlığı yönetimine geçmesinden önce, stratejik öneminden dolayı Osmanlılar tarafından yapıldığı düşünülen, ve yıllar önce Artvin'in Ardanuç, Şavşat ve yöredeki köylerle bağlantısını sağlayan tarihi Berta Köprüsü ile sağlanmaktadır (Şekil 2.1). Uzun yıllar bölgeye hizmet eden tarihi köprü Artvin'in 5 km membasında enerji ve taşkın koruma amacıyla yapılmakta olan Deriner Barajı'nın suları altında kalacağı öngörüldüğü için, yeni bir köprünün yapılması gerekmiştir.

Bu amaçla köprünün hemen yanına 2008-2011 yılları arasında yeni Berta Köprüsü inşa edilmiştir. Berta Köprüsü, Artvin-Erzurum Devlet Yolu'nun 22. kilometresinde bulunmaktadır. Kolin İnşaatın yapımını sürdürdüğü bu köprü baraj gölü üst kotu seviyesinden daha yukarıda inşa edilmiştir. Bu yeni yapı 118.75 m ayak yüksekliği ile Türkiye'de yapılan en yüksek ayaklı dengeli konsol köprü olma özelliğini taşımaktadır. Berta Köprüsü'ne ait bazı fotoğraflar Şekil 2.2'de verilmektedir.

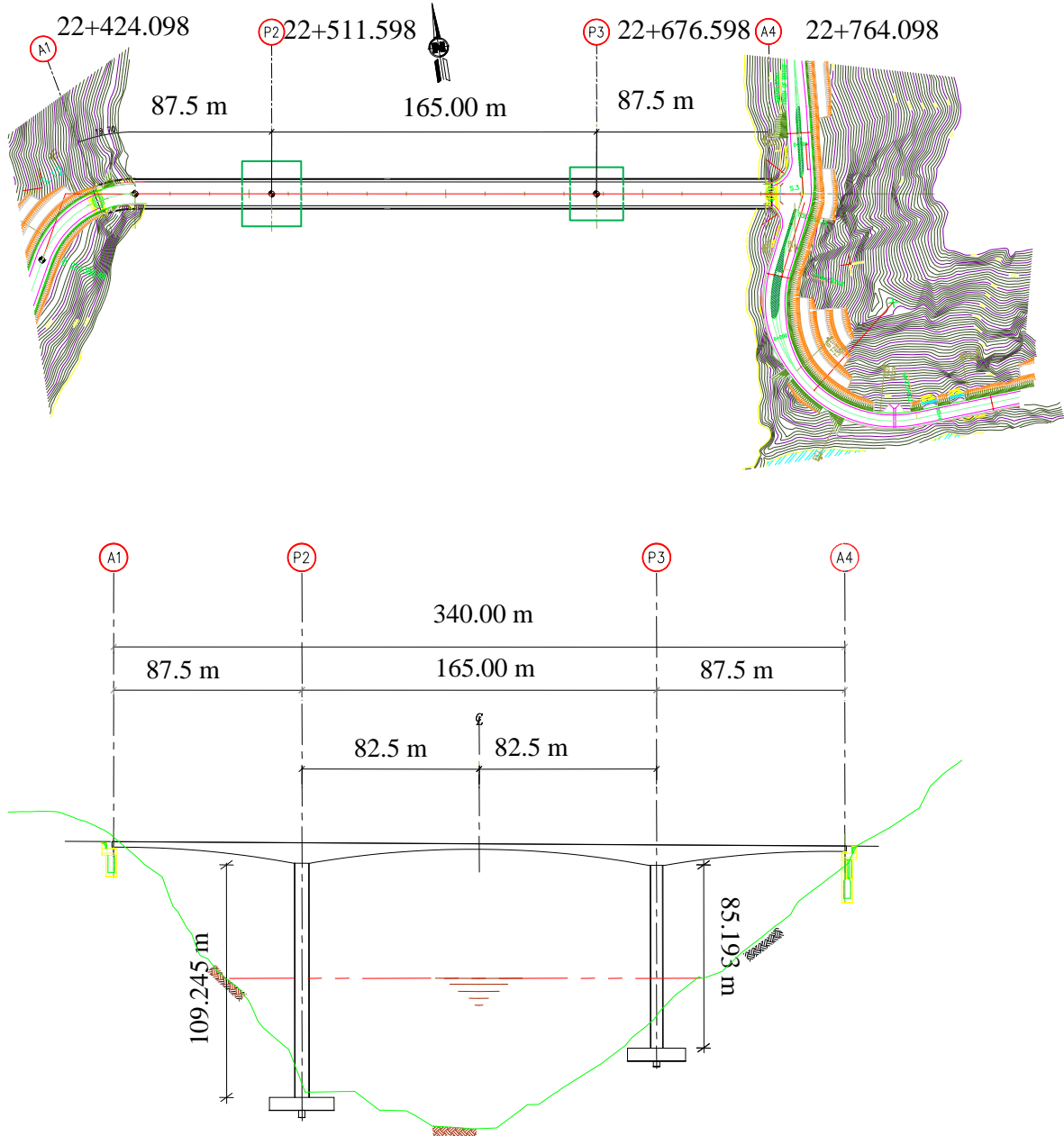


Şekil 2.1. Tarihi Berta Köprüsü'ne ait bazı fotoğraflar



Şekil 2.2. Berta Köprüsü'ne ait bazı fotoğraflar

Berta Köprüsü tek tabliyeye sahip, kutu kesitli ve öngerilmeli betonarme bir köprüdür. Köprü, ana açıklığı 165 m ve kenar açıklıkları 87.5 m olmak üzere toplam üç açıklıklıdır. Köprü toplam uzunluğu ve genişliği sırasıyla 340 m ve 15 m'dir. Köprü planı ve boy kesitine ait genel görünüşler Şekil 2.3'te verilmektedir. Köprü taşıyıcı sistemi başlıca tabliye, ayaklar ve kenar mesnetlerden oluşmaktadır.

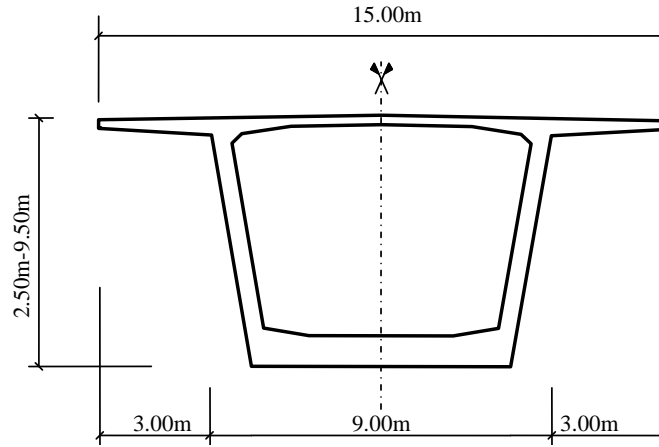


Şekil 2.3. Berta Köprüsü'nün planı ve boy kesiti

2.2.1.1. Köprü Tabliyesi

Berta Köprüsü, 340 m uzunluğunda ve 15 m genişliğinde bir tabliyeye sahiptir. Köprünün üst yapısı dengeli konsol ve öngerilmeli kutu kiriş sistemiyle inşa edilmiştir. Mevcut dengenin muhafazası, orta ayaklarda her iki tarafa doğru aynı zamanda inşa edilen segmentlerin yan yana getirilip, ardgerme ile bağlanmaları sonucu sağlanmıştır.

Tabliye, köprü orta noktasından itibaren Artvin ve Erzurum tarafına doğru 38'er adet olmak üzere toplam 76 adet segmentten oluşmaktadır. Segmentlerin tamamına yakın kısmı 5 m uzunluğundadır. Her bir segment donatılı kutu kesite sahiptir. Donatılı kutu kesitin yüksekliği orta ayak üzerinde 9.5 m olmakla beraber, parabolik bir azalım göstererek kenar ayaklarda 2.50 m'ye inmektedir. Kutu kesitin üst tabliyesinin kalınlığı tabliye uzunluğu boyunca sabit olup 0.25 m'dir. Yan cidar kalınlıkları ayakların bulunduğu bölgelere doğru 0.4 m'den 0.5 m'ye artarken, ayaklar üzerinde 1 m'dir. Alt tabliye kalınlığı ise kenar ayaklardan orta ayaklara kadar 0.25 m'den 1.2 m'ye kadar parabolik olarak artmaktadır. Değişken kutu kesitin şematik olarak gösterimi Şekil 2.4'te verilmektedir.

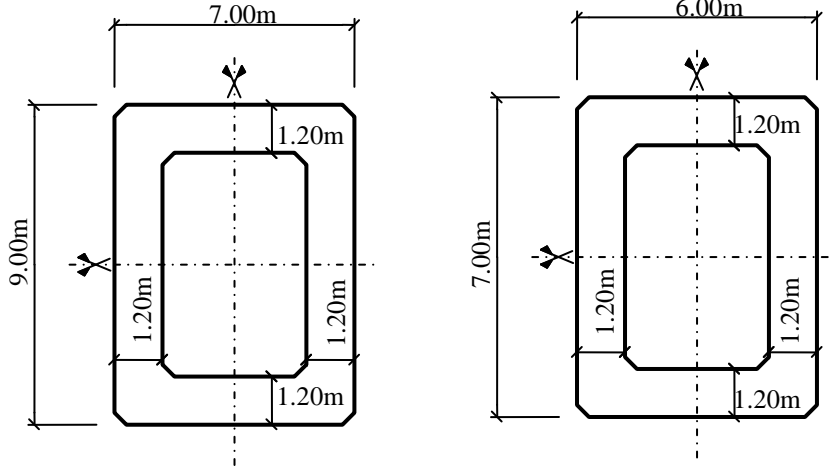


Şekil 2.4. Değişken kesitli tabliye üst yapısı

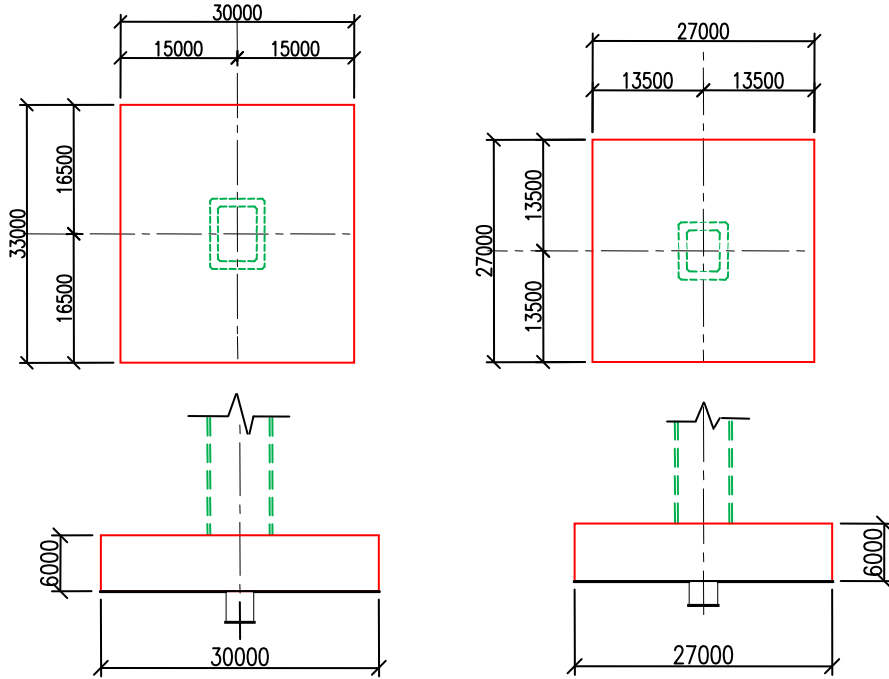
2.2.1.2. Köprü Ayakları ve Kenar Mesnetler

Köprü taşıyıcı sisteminde sırasıyla 109.2 m yükseklik ile 9.00x7.00 m ve 89.2 m yükseklik ile 7.00x6.00 m kesit boyutuna sahip 2 adet ayak mevcuttur. Ayaklar tekil temeller üzerine oturmaktadır. Tekil temeller 6 m kalınlığında olup, sırasıyla 33x30m ve 27x27 m kesit boyutlarına sahiptir. Temellerin beton basınç dayanımları 40 MPa'dır.

Temelerde S420 tipi betonarme demiri kullanılmıştır. Berta Köprüsü'nün inşası sırasında temeller için 338434.4 m uzunluğunda, boyutları Ø16 – Ø32 arasında değişen ve toplam 2027667.1 kg ağırlığında; orta ve kenar ayaklar için toplam 585268.4 m uzunluğunda, boyutları Ø14 - Ø32 arasında değişen ve toplam 2190881.64 kg ağırlığında donatı demiri kullanılmıştır. Köprü orta ayakları ve temel sistemine ait kesit görünüşleri sırasıyla Şekil 2.5'te ve Şekil 2.6'da verilmektedir.

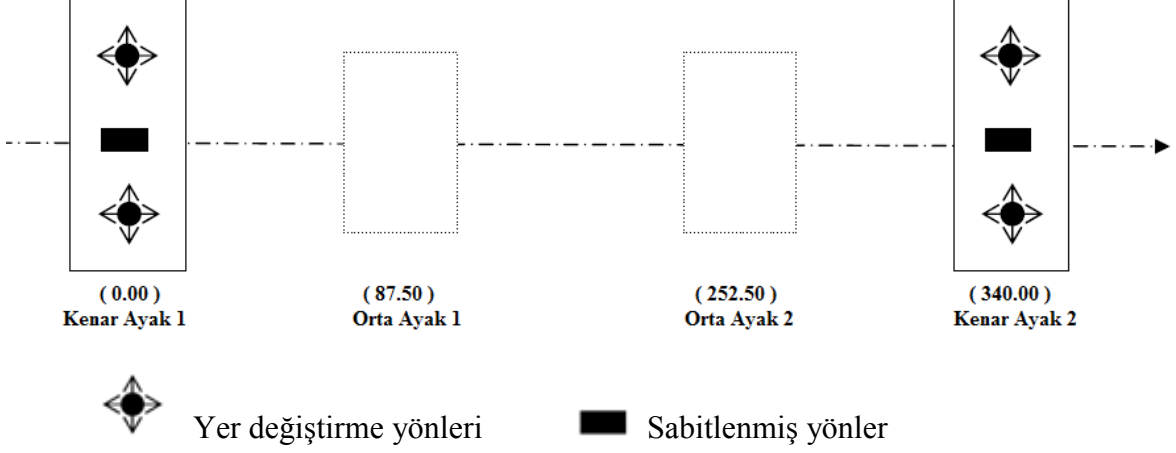


Şekil 2.5. Köprü orta ayaklarına ait kesit görünüşleri



Şekil 2.6. Köprü temellerine ait kesit görünüşleri (Ölçüler mm cinsinden verilmiştir)

Kenar ayaklarda enine ve boyuna uzamaya izin verilen mesnet tipi dikkate alınmıştır. Kenar ayaklarda dikkate alınan mesnet durumunun şematik görünüşü Şekil 2.7’de verilmektedir.



Şekil 2.7. Kenar ayaklarda dikkate alınan mesnet durumu (DOLSAR Proje, 2007)

2.2.2. Berta Köprüsü'nün Teorik Modal Analizleri

2.2.2.1. Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli

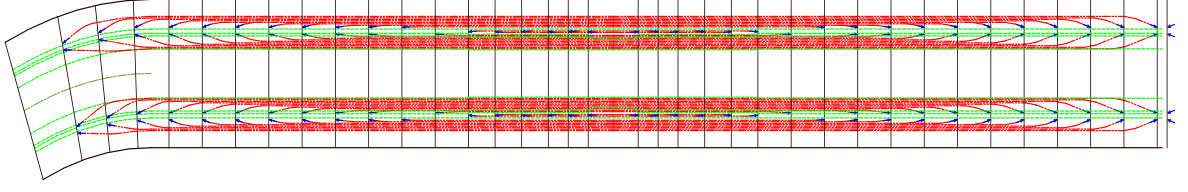
Berta Köprüsü'nün dinamik karakteristiklerini (doğal frekanslar ve mod şekilleri) analitik olarak belirlemek için köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 (2008) programında oluşturulmuştur. Köprü davranışının gerçekçi bir şekilde temsil edilebilmesi için sonlu eleman modeli yapı-temel-zemin etkileşimini içerecek şekilde geliştirilmiştir. Berta Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli, aşağıda belirtilen modelleme kriterleri dikkate alınarak oluşturulmuştur.

- Köprü tabliyesi ve ayaklar altı serbestlik derecesine sahip çubuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Değişken yüksekliğe sahip üst yapı segmentlerinin her biri proje verilerine göre çizilmiştir ve böylece daha güvenilir analiz sonuçlarının elde edilmesi amaçlanmıştır. Orta ayaklar değişken kesite sahip olmadığından tek bir modelden oluşmaktadır. Üst yapı segmentlerinin ise çoğunluğu 5 m olmak üzere 76 parçadan oluşmaktadır.

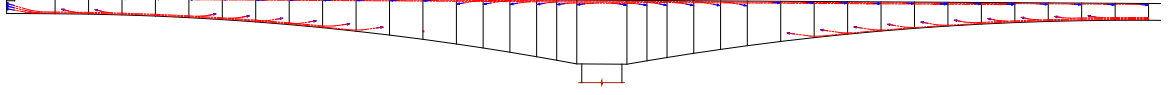
- Sonlu eleman modeli oluşturulurken toplam 208 düğüm noktası ve 97 çubuk eleman kullanılmıştır.
- Ardgerme ve öngerme kabloları moment aktarmayan çubuk elemanlar kullanılarak simüle edilmiştir ve ardgerme kabloları segmentin alt uçlarına, öngerme kabloları ise üst uçlarına proje verilerinde belirtilen şekilde bağlanmıştır. Ardgerme ve öngerme yükleri birim uzamalar cinsinden etki ettirilmiştir ve değeri $6E-3$ olarak alınmıştır. Üst döşemede toplam 108 adet öngerme kablosu, alt döşemede ise toplam 44 adet ard germe kablosu kullanılmıştır. Germe çubukları köprüye simetrik olarak yerleştirildiğinden Şekil 2.8’de köprünün simetri eksenine kadar germe çubuklarına ait yerleşim planı verilmiştir.
- Her bir orta ayak 10 adet sonlu elemana bölünmüş olup, üstyapı segmentleri ise 0.5m uzunluğunda parçalara ayrılmıştır.
- Deneysel ölçümler sırasında köprü üzerinde herhangi bir asfalt, bordür ve korkuluk gibi ek bir yük olmadığından sadece elemanların kendi ağırlıkları sonlu eleman analizinde dikkate alınmış ve program tarafından direk olarak hesap ettirilmiştir.
- Kenar ayak mesnetleri belirli oranlarda rijitliklere sahip yaylarla tanımlanmıştır. Bu şekilde kenar ayakların düşey serbestlikleri tamamen tutulmuş, fakat diğer iki doğrultudaki hareketler yarı tutulu olacak şekilde temsil edilerek dönmelere izin verilmemiştir. Tablo 2.1 ‘de analizler sırasında kullanılan yay katsayıları verilmiştir.

Tablo 2.1. Berta Köprüsü’nün sonlu eleman analizlerinde kullanılan yay katsayıları

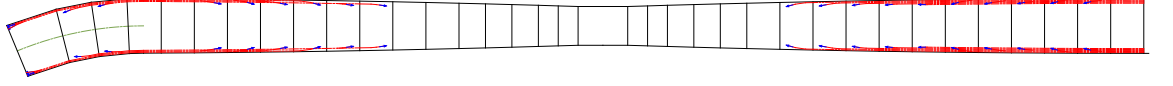
Sınır Şartları	Yay Katsayıları (kN/m)		
	Boyuna	Enine	Düşey
Sağ Mesnet	100000	100000	-
Sol Mesnet	100000	100000	-



a) Kutu kesit üst döşeme planı



b) Ön görünüş



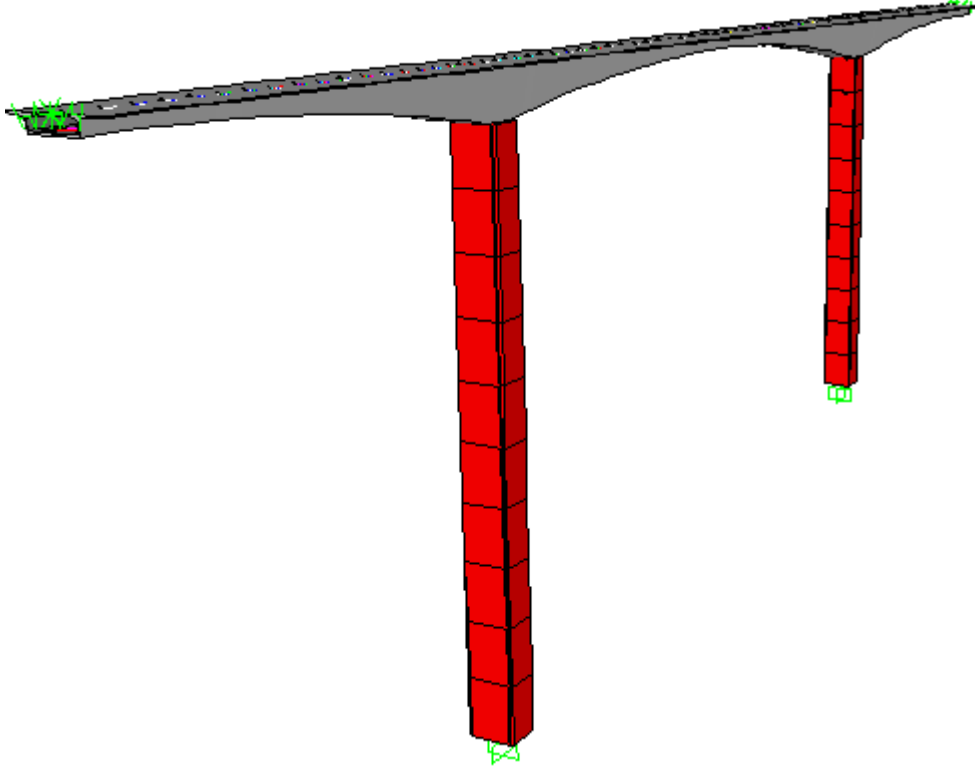
c) Kutu kesit alt döşeme planı

Şekil 2.8. Berta Köprüsü'ne ait germe çubuklarının yerleşim planı (DOLSAR Proje, 2007)

Köprü'nün modellenmesi ve analizleri sırasında dikkate alınan malzeme özellikleri Tablo 2.2'de, Berta Köprüsü'nün yukarıda belirtilen modelleme kriterleri dikkate alınarak oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 2.9'da verilmektedir.

Tablo 2.2. Berta Köprüsü'nün sonlu eleman analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri

Sonlu Eleman Modeli	Malzeme Özellikleri			
	Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı (-)	Yoğunluk (kg/m ³)	Beton Sınıfı
Tabliye	3.430E10	0.2	2450	C40
Ayaklar	2.895E10	0.2	2450	C30
Temeller	2.895E10	0.2	2450	C30
Öngerme Elemanları	1.95E11	-	-	-



Şekil 2.9. Berta Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli

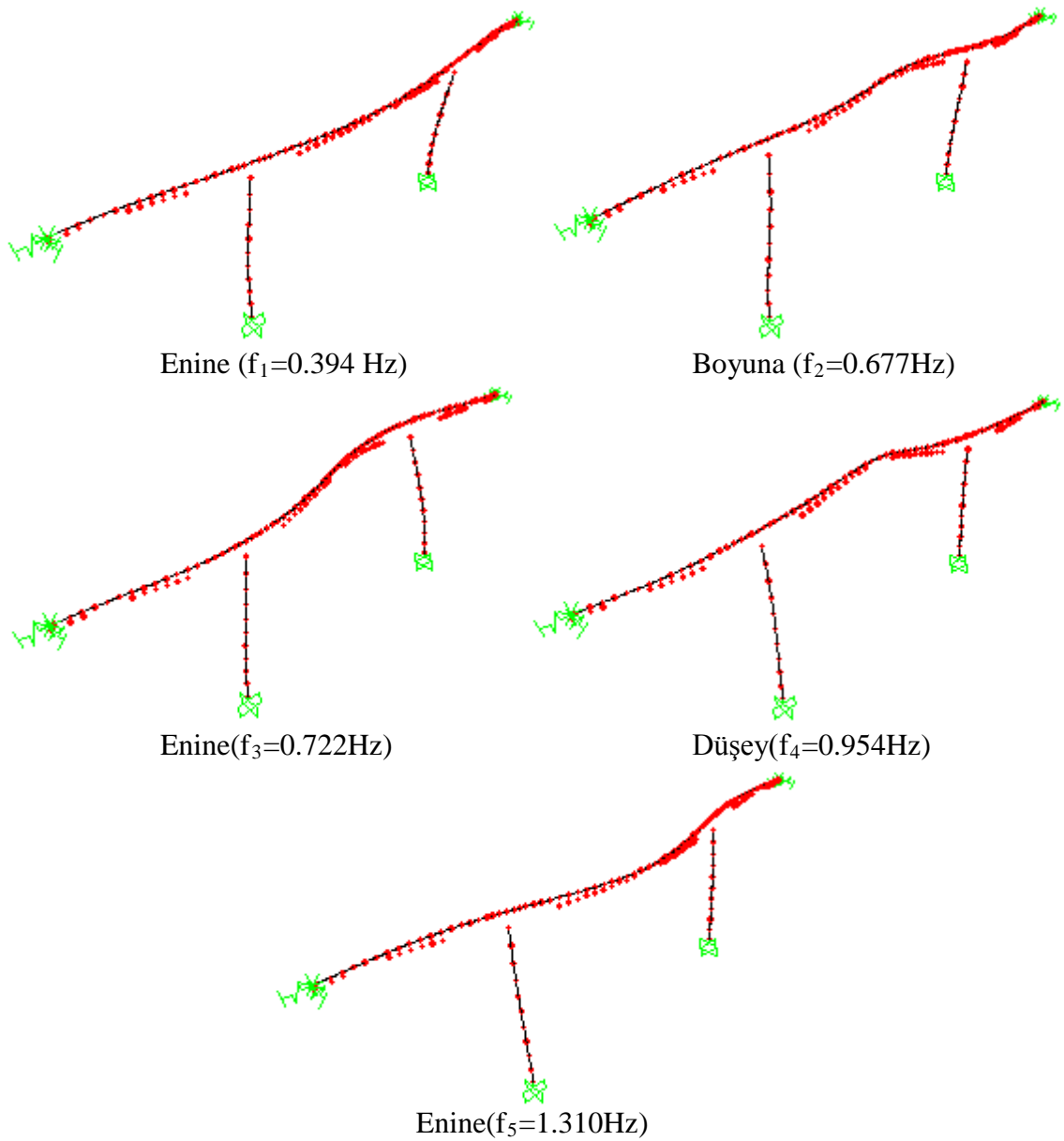
2.2.2.2. Sonlu Eleman Yöntemiyle (SEY) Berta Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Köprü'nün 3-boyutlu sonlu eleman modeli (SEM) SAP2000 (2008) programında oluşturulduktan sonra modal analiz gerçekleştirilmiş ve köprü teorik dinamik karakteristikleri olan mod şekilleri ve doğal frekans değerleri belirlenmiştir.

Berta Köprüsü'nün, SAP2000 (2008) sonlu eleman programı kullanılarak gerçekleştirilen modal analizinden elde edilen ilk beş moduna ait doğal frekans ve periyot değerleri Tablo 2.3'te verilmektedir. Tablo 2.3' ten görüldüğü gibi köprü'nün ilk beş doğal frekansı 0.394-1.310 Hz arasında değişmektedir. Köprü'nün ilk beş mod şekli Şekil 2.10'da verilmektedir. Şekil 2.10 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin uzama, düşey ve enine modlar olduğu görülmektedir.

Tablo 2.3. Berta Köprüsü'nün analitik doğal frekans ve periyotları

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)
1	0.394	2.539
2	0.677	1.477
3	0.722	1.385
4	0.954	1.048
5	1.310	0.764



Şekil 2.10. Berta Köprüsü'nün analitik olarak elde edilen ilk beş mod şekli

2.2.3. Berta Köprüsü'nün Operasyonel Modal Analizleri

Dinamik karakteristiklerinin teorik belirlenmesinde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi yapılarıdaki belirsizlikler nedeniyle yapının gerçek davranışı ve dinamik karakteristikleri hakkında kesin bir sonuç vermemektedir. Bu yöntemin kullanımını kısıtlayan parametreler, yapıyı oluşturan elemanların malzeme özelliklerinin tam olarak bilinmemesi, yapı geometrik boyutları ile ilgili veri eksiklikleri, yapı üzerinde meydana gelen zamana bağlı deformasyonlar ve sınır şartlarındaki belirsizlikler şeklinde sıralanabilir. Bu nedenle teorik olarak belirlenen dinamik karakteristiklerin deneysel yöntemlerle doğrulanması gerekliliği ortaya çıkar. Bu çalışmada seçilen Berta Köprüsü'nün dinamik karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesinde Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılmıştır.

Berta Köprüsü'nün deneysel ölçümlerinde minimum frekans aralığı ve hassasiyeti 0.1-1500 Hz ve 10 V/g olan B&K 8340 tipi tek eksenli sismik ivmeölçerler, standart bir dizüstü bilgisayar, tek eksenli sinyal kabloları ve ivmeölçerleri köprüye sabitlemede gerekli olan vidalama aparatları kullanılmıştır (Şekil 2.11). İvmeölçerlerden elde edilen sinyaller B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesinde birleştirilmiş ve PULSE (2006) yazılımına aktarılmıştır. Bu sinyaller OMA (2006) yazılımına transfer edilerek işlenmiş ve Berta Köprüsü'nün doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilmiştir. Köprü'nün frekans aralığı tam olarak bilinmediğinden ölçümler daha geniş aralık olan 0-12.5 Hz aralığında, analizler ise 0-3.125 Hz aralığında yapılmış ve ölçüm süresi ise 20 dk seçilmiştir.



Şekil 2.11. Ölçüm sırasında kullanılan aletler

Berta Köprüsü'nün dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemek için köprü'nün her iki yakasından birer ölçüm alınmak suretiyle iki adımda referanslı olarak tek çevresel titreşim testi uygulanmıştır (Şekil 2.12). Ölçümler sırasında doğal titreşim olarak rüzgâr ve yaya hareketlerinden yararlanılmıştır. Köprü üzerinde ölçüm yapılacak noktalara ivmeölçerler bağlandıktan sonra sinyallerin toplanacağı veri toplama ünitesi ayarları yapılarak (frekans aralığı seçilmeli, model ve ivmeölçer bağlantıları oluşturulmalı, ölçüm süresi belirlenmeli, vb.) ölçümler alınmıştır.



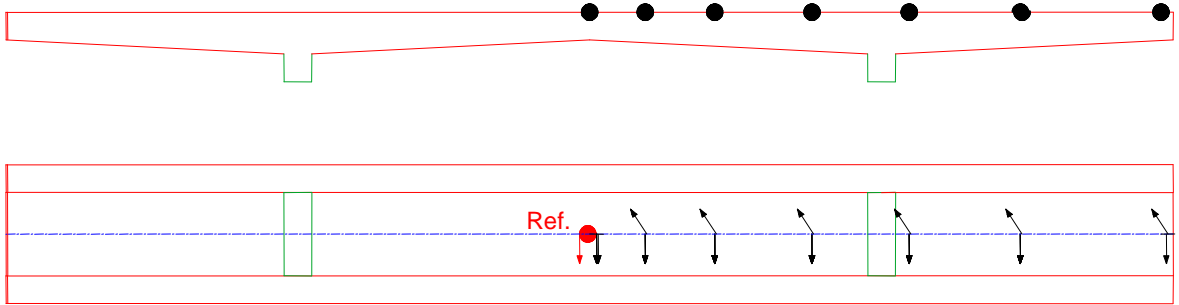
Şekil 2.12. Köprü'nün her iki yakasından ölçüm görüntüleri

2.2.3.1. Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Berta Köprüsü'nün deneysel ölçümleri sırasında Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılmıştır. Operasyonel Modal Analiz yönteminde ölçümü gerçekleştirilen yapının sadece belirli noktalarından titreşimleri ölçüldüğünden dolayı dinamik karakteristikler bu veriler kullanılarak elde edilmektedir. Bu durumda, yapıların dinamik karakteristikleri frekans ve zaman tanım alanında algoritmalara sahip yöntemlerle belirlenmektedir (Zhang vd., 2002; Brincker vd., 2003; Türker, 2011). Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, ölçümü gerçekleştirilen yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde OMA yazılımında yer alan ve literatürde sıklıkla tercih edilen yöntemlerden Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemleri kullanılmıştır.

2.2.3.1.1. Birinci Ölçüm Adımı

Ölçüm alınması istenilen nokta sayısı, veri toplama ünitesindeki kanal sayısından ve mevcut ivmeölçer sayısından fazla olduğu için referanslı ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bunun için köprü tabliyesinin Artvin ve Erzurum yönünden referanslı ölçüm alınmıştır. İlk olarak Erzurum yakasındaki kısımdan ölçüm almak üzere ivmeölçerler tabliye üzerine belirli aralıklarla yerleştirilmiştir. İvmeölçerler Berta Köprüsü'nün hem düşey doğrultudaki modlarının elde edilebilmesi amacıyla köprü uzunluğu boyunca düşey doğrultuda, hem de köprünün enine modlarının elde edilebilmesi amacıyla köprü uzunluğu boyunca yatay doğrultuda (köprü enine doğrultusunda) yerleştirilmiştir. Fakat orta nokta her iki ölçüm için ortak olacağından, bu noktadaki ivmeölçer Erzurum yakasında düşey olarak yerleştirilerek toplam 7 noktadan 13 ivmeölçerle ölçüm alınmıştır. Ölçümler Şekil 2.13'te de görüldüğü gibi köprü uzunluğu boyunca simetri eksenini üzerine yerleştirilen ivmeölçerler vasıtasıyla yapılmıştır.

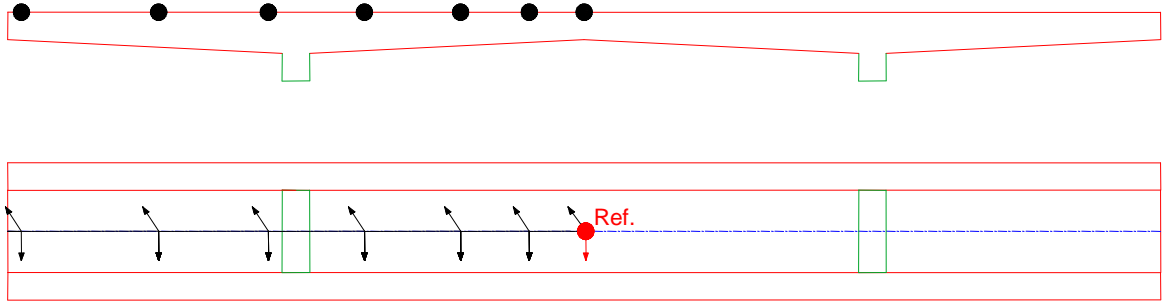


Şekil 2.13. Birinci ölçüm adımı için ivmeölçer yerleşim planı

2.2.3.1.2. İkinci Ölçüm Adımı

İkinci ölçüm olarak da Artvin yakasındaki kısımdan ölçüm almak üzere birinci ölçümde olduğu gibi ivmeölçerler Berta Köprüsü'nün hem düşey doğrultudaki modlarının elde edilebilmesi amacıyla köprü uzunluğu boyunca düşey doğrultuda, hem de köprünün enine modlarının elde edilebilmesi amacıyla köprü uzunluğu boyunca yatay doğrultuda (köprü enine doğrultusunda) yerleştirilmiştir. Köprünün diğer yakasına simetrik olacak şekilde ivmeölçerler yerleştirilmiş, fakat, orta noktadaki ivmeölçer yatay olarak

yerleştirilerek ölçüm alınmıştır. Referans ivmeölçeriyle birlikte toplam 14 ivmeölçer kullanılmıştır. Şekil 2.14'te ivmeölçerlerin yerleşim planı verilmektedir.



Şekil 2.14. İkinci ölçüm adımı için ivmeölçer yerleşim planı

Berta Köprüsü'nde gerçekleştirilen ölçümlere ait bazı fotoğraflar Şekil 2.15'te verilmektedir.



Şekil 2.15. Birinci ve ikinci ölçüm adımı için bazı fotoğraflar

Şekil 2.15'in devamı

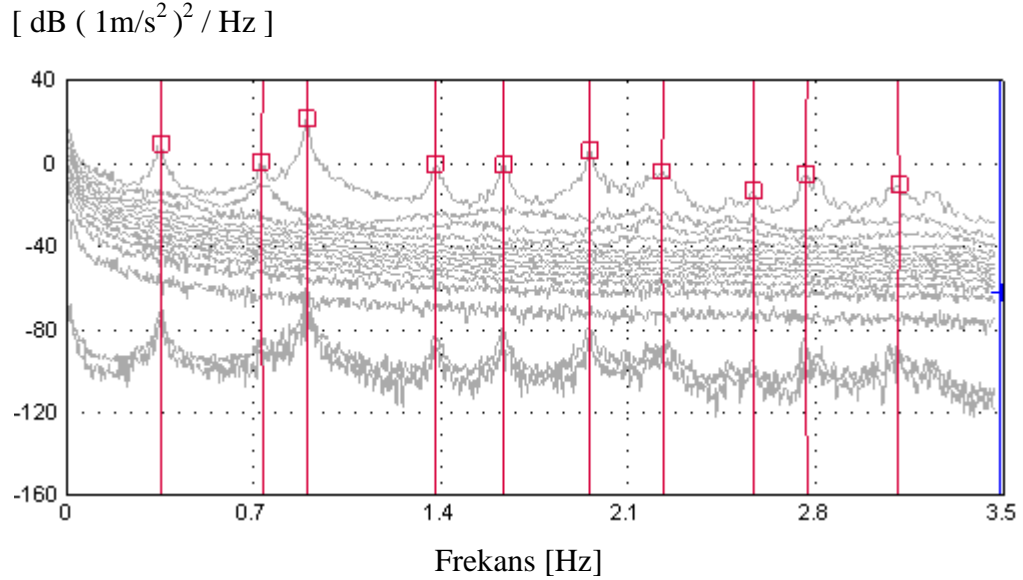


2.2.3.1.3. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) Yöntemiyle Berta Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) Yöntemi frekans ortamına dayalı bir yöntem olup basitliği, işlem hızı ve altyapı gibi nedenlerden dolayı tercih edilen bir yöntemdir. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) Yönteminde dinamik karakteristikler her bir titreşim sinyalinden tekil değerler olarak elde edilir. Bu yöntemde mod şekilleri ve doğal frekans değerlerine ek olarak sönüm oranları da elde edilebilmektedir.

Berta Köprüsü'ne ait ölçüm testi iki adım olarak gerçekleştirilmiştir. Bu iki adımdaki titreşim sinyalleri köprü orta noktası olan ve Ref. olarak gösterilen noktaya yerleştirilen tek eksenli ivmeölçer yardımıyla birleştirilmiştir (Şekil 2.12 ve Şekil 2.13).

Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) Yöntemi kullanılarak birinci ve ikinci ölçüm adımından ölçülen sinyallerden elde edilen tekil değerler Şekil 2.16'da ve bu tekil değerlerden elde edilen doğal frekans değerleri ile sönüm oranları ise Tablo 2.4'te verilmektedir.

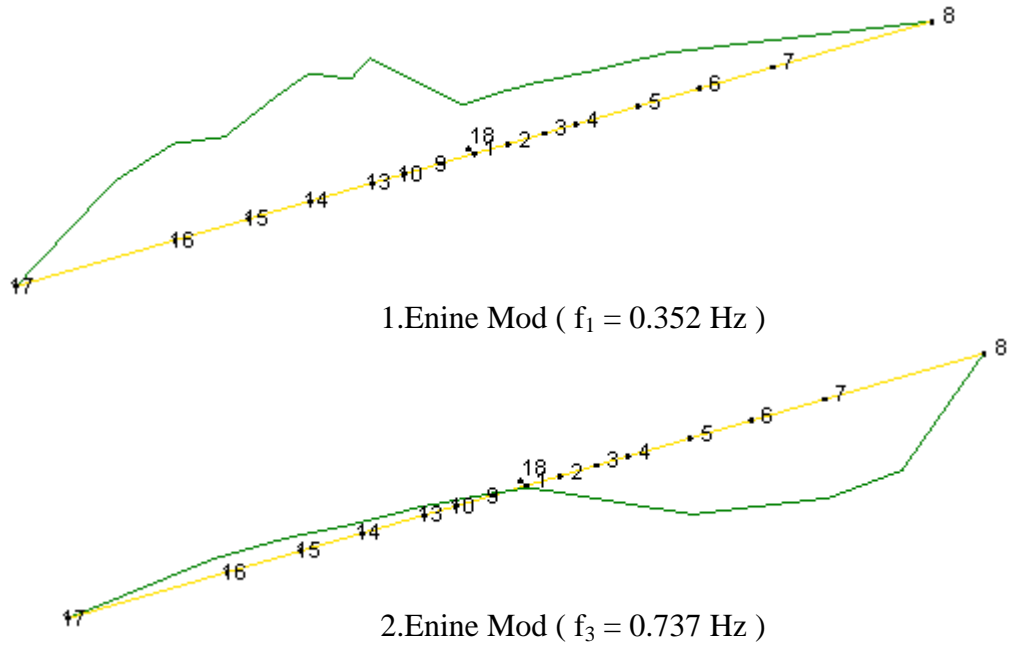


Şekil 2.16. Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma Yöntemi ile elde edilen tekil değerler

Tablo 2.4. Berta Köprüsü'nden GFTAA yöntemine göre elde edilen doğal frekans ve sönüm oranları

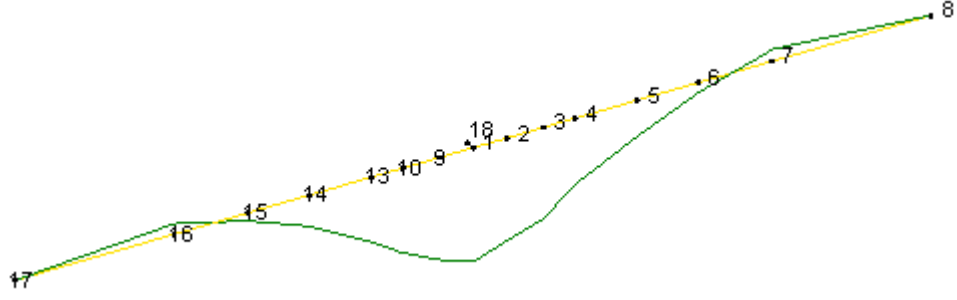
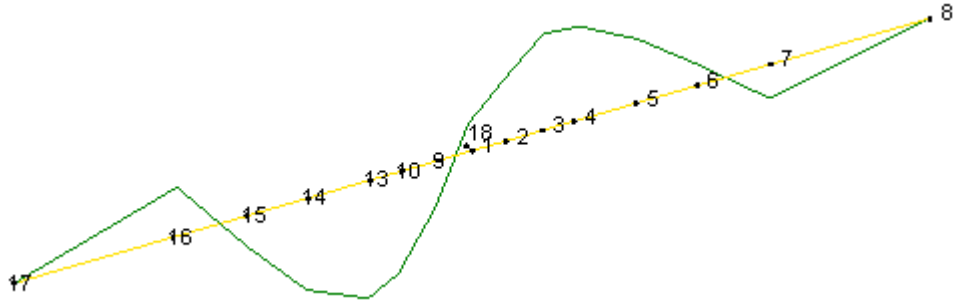
Frekans No	GFTAA Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	0.352	2.158
2	-----	-----
3	0.737	0.260
4	0.899	0.571
5	1.382	0.688

Tablo 2.4 incelendiğinde, ilk beş frekansın 0.352-1.382 Hz arasında, sönüm oranı değerlerinin ise %2.158-0.688 arasında değiştiği görülmektedir. Berta Köprüsü'ne uygulanan deneysel ölçüm testlerinden GFTAA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri Şekil 2.17'de verilmektedir. Şekil 2.17 incelendiğinde birinci ve üçüncü modların enine; dördüncü ve beşinci modların düşey; ikinci modun ise ölçülemediği görülmektedir. Deneysel ölçümler sırasında köprünün boyuna yönünde ivmeölçer yerleştirilemediği için bu yöndeki (ikinci mod) hareket belirlenememiştir.



Şekil 2.17. Berta Köprüsü'nün GFTAA yönteminden elde edilen mod şekilleri

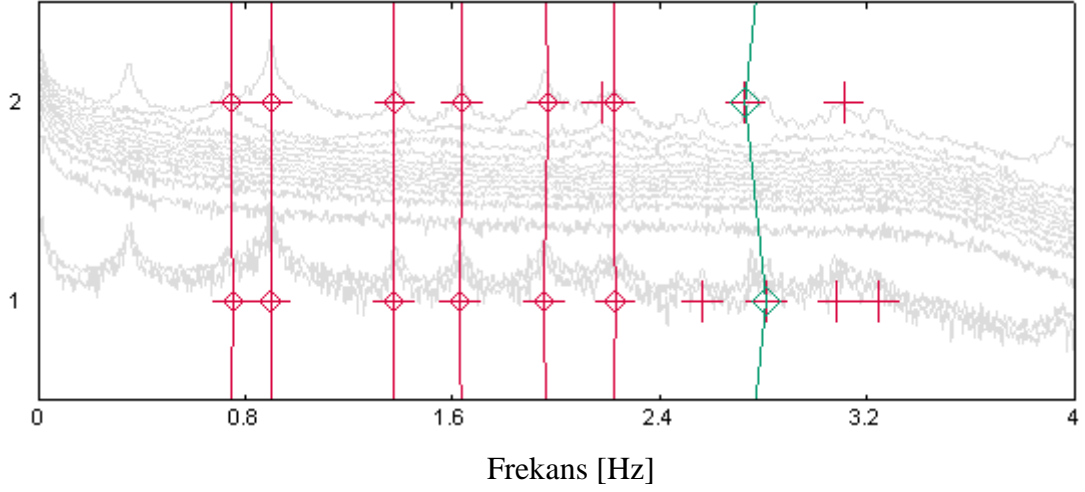
Şekil 2.17'nin devamı

1. Düşey Mod ($f_4 = 0.899$ Hz)2. Düşey Mod ($f_5 = 1.382$ Hz)

2.2.3.1.4. Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemiyle Berta Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Tepkilerin ölçülüp değerlendirilmesinde kullanılan başlıca yöntemlerden biri olan Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi, zaman verileri ile hiçbir korelasyon veya spektral dönüşümüne gerek kalmaksızın direkt olarak çalışan zaman ortamına dayalı bir yöntemdir. Berta Köprüsü'ne iki adımda uygulanan referanslı çevresel titreşim testinden toplanan sinyaller Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemine göre de belirlenmiştir.

Erzurum ve Artvin yakalarında olmak üzere iki ölçüm adımında gerçekleştirilen çevresel titreşim testindeki titreşim sinyalleri köprü orta noktası olan ve Ref. olarak gösterilen noktaya yerleştirilen tek eksenli ivmeölçer yardımıyla birleştirilmiştir. Ölçümden elde edilen tekil değerler grafiği Şekil 2.18'de verilmektedir.



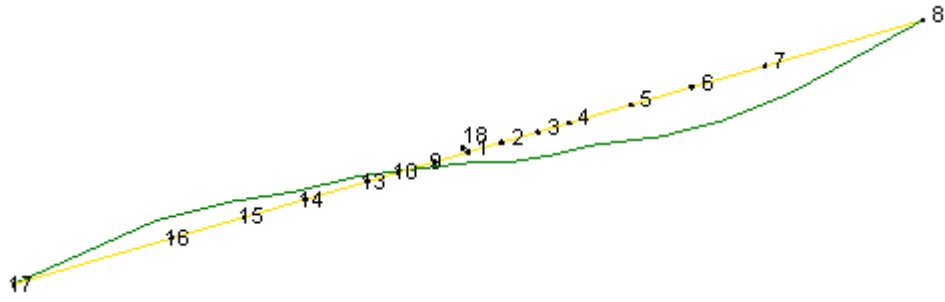
Şekil 2.18. SAB yönteminden elde edilen tekil değerler grafiği

Stokastik Altalan Belirleme Yöntemi ile elde edilen yığışlımlı tekil değerlerin değerlendirilmesi sonucu elde edilen doğal frekans değerleri ve sönüm oranları Tablo 2.5'te verilmektedir. Tablo 2.5'ten de anlaşılacağı üzere Stokastik Altalan Belirleme Yöntemi ile 1. moda ait frekans ve sönüm oranı değeri belirlenememiştir.

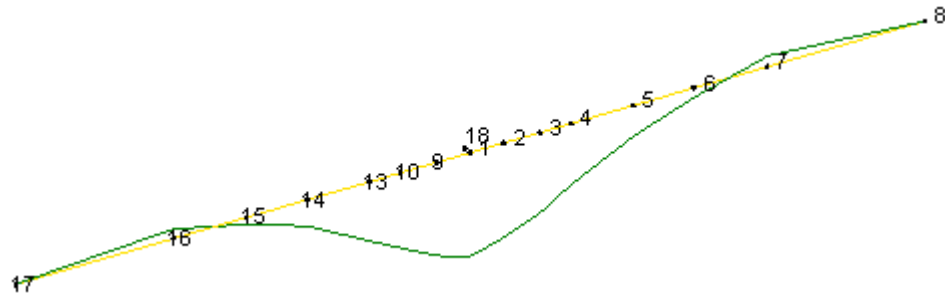
Tablo 2.5. Berta Köprüsü'nden SAB yöntemine göre elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

Frekans No	SAB Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	-----	-----
2	-----	-----
3	0.748	1.639
4	0.900	0.369
5	1.374	0.974

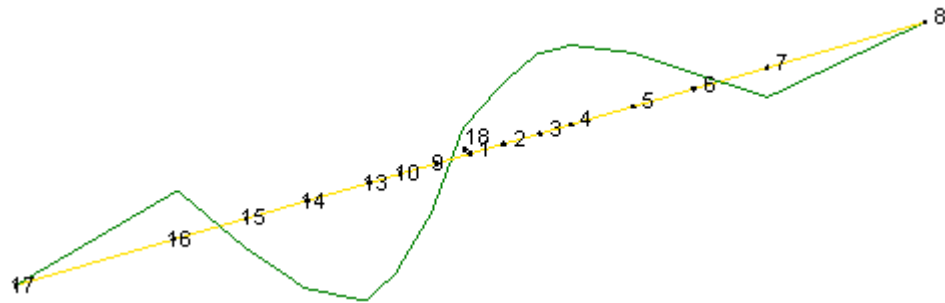
Stokastik Altalan Belirleme yöntemine göre elde edilen mod şekilleri Şekil 2.19'da verilmektedir. Şekil 2.19 incelendiğinde birinci modun elde edilemediğini diğer modların ise GFTAA yöntemine benzer şekilde ortaya çıktığı görülmektedir.



3. Mod - Enine



4. Mod - Düşey



5. Mod - Düşey

Şekil 2.19. Berta Köprüsü'nün SAB Yönteminden elde edilen mod şekilleri

2.2.3.2. Operasyonel Modal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 2.17 ve Şekil 2.19 incelendiğinde Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemleri kullanılarak elde edilen mod şekillerinin aynı olduğu görülmektedir. GFTAA ve SAB Yöntemlerinden elde edilen frekans değerleri ve sönüm oranları Tablo 2.6'da karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Tablo 2.6 incelendiğinde frekans değerlerinin birbiriyle uyum içinde olduğu, fakat sönüm oranı değerlerinde farklılıkların olduğu gözlenmektedir.

Tablo 2.6. GFTAA ve SAB Yöntemine göre elde edilen modların karşılaştırılması

Frekans No	Analitik Frekanslar	GFTAA Yöntemi		SAB Yöntemi	
		Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	0.394	0.352	2.158	-----	-----
2	0.677	-----	0.260	-----	-----
3	0.722	0.737	0.571	0.748	1.639
4	0.954	0.899	0.688	0.900	0.369
5	1.310	1.382	0.678	1.374	0.974

2.2.4. Berta Köprüsü'nün Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi

Berta Köprüsü'ne ait analitik ve deneysel mod şekilleri incelendiğinde, elde edilen mod şekillerinin birbirleriyle uyum içinde olduğu görülmektedir. Fakat Tablo 2.6'da elde edilen analitik frekanslar ile deneysel frekanslar karşılaştırmalı olarak incelendiğinde analitik ve deneysel olarak elde edilen doğal frekanslar arasında bazı farklılıkların olduğu görülmektedir. Doğal frekanslar arasındaki bu farklılıkları giderebilmek veya minimum düzeye getirebilmek için Berta Köprüsü'nün sonlu eleman modelinin deneysel ölçüm sonuçlarına göre iyileştirilmesi gerekmektedir. Sonlu eleman model iyileştirmesi, analizlerde kullanılan malzeme özellikleri, sınır şartları veya eleman kesit özellikleri gibi doğruluğu tam olarak belirlenemeyen parametreler değiştirilerek yapılmaktadır. Sonlu eleman model iyileştirmesinde bilinmesi gereken en önemli özelliklerden biri, doğruluğu hakkında kesine yakın bir bilgi sahibi olduğumuz parametreleri iyileştirmede kullanmamaktır. Diğer bir ifadeyle iyileştirme, belirsiz olan parametrelerin kabul edilebilir sınırlar içerisinde değiştirilmesiyle gerçekleştirilmektedir.

2.2.4.1. Malzeme Özelliklerinin İyileştirilmesi

Berta Köprüsü'nün analizleri sırasında dikkate alınan ve Tablo 2.2'de detaylı olarak verilen malzeme özelliklerinden elastisite modülü ve yoğunluk gibi parametrelerde değişiklikler yapılmıştır. Tablo 2.7'de sonlu eleman model iyileştirmesinde dikkate alınan malzeme özellikleri verilmektedir.

Tablo 2.7. Berta Köprüsü'nün sonlu eleman model iyileştirilmesinde dikkate alınan malzeme özellikleri

a) Elastisite Modülündeki değişimler

Eleman	Sınıf	Elastisite Modülü (N/m ²)	
		İyileştirmeden Önce	İyileştirmeden Sonra
Tabliye	C40	3.430E10	3.6E10
Ayaklar	C30	2.895E10	3.4E10
Temel	C30	2.895E10	3.4E10

b) Yoğunluktaki değişimler

Eleman	Sınıf	Yoğunluk (kg/m ³)	
		İyileştirmeden Önce	İyileştirmeden Sonra
Tabliye	C40	2450	2500
Ayaklar	C30	2450	2500
Temel	C30	2450	2500

2.2.4.2. Sınır Şartlarının İyileştirilmesi

Berta Köprüsü'nün başlangıç analitik modelinde kenar mesnetlerine enine ve boyuna doğrultularda belirli rijitliklere sahip yaylar tanımlanmıştır ve her iki doğrultuda yerdeğiştirmelere belirli oranlarda izin verilmiştir. İyileştirmede ise kenar mesnetlere enine, boyuna ve düşey doğrultularda yaylar tanımlanarak her üç yönde yerdeğiştirmelere izin verilmiştir fakat tamamen serbest bırakılmamıştır (Tablo 2.8). Ayrıca tüm yönlerdeki dönmelerde tutulu hale getirilmiştir.

Tablo 2.8. İyileştirilmiş sonlu eleman modelinde kenar mesnetler için kullanılan yay katsayıları

Sınır Şartları	Yay Katsayıları (kN/m)		
	Boyuna	Enine	Düşey
Sağ Mesnet	400000	120000	70000
Sol Mesnet	400000	120000	70000

Sınır şartı olarak bir diğer iyileştirme elemanı için temeller seçilmiştir. Başlangıç analitik modelinde temeller ankastre olarak seçilmiştir. Fakat iyileştirilmiş modelde orta ayakların altlarına sırasıyla 6 m yüksekliğinde 33x30 m ve 27x27 m boyutlu kabuk elemanlar tanımlanmıştır. Ayrıca temel zemin etkileşimini sağlayabilmek amacıyla temellerin altlarına enine, boyuna ve düşey yönlerde olmak üzere yaylar tanımlanmıştır ve değeri 20000 olarak dikkate alınmıştır (Tablo 2.9).

Tablo 2.9. İyileştirilmiş sonlu eleman modelinde temel için kullanılan yay katsayıları

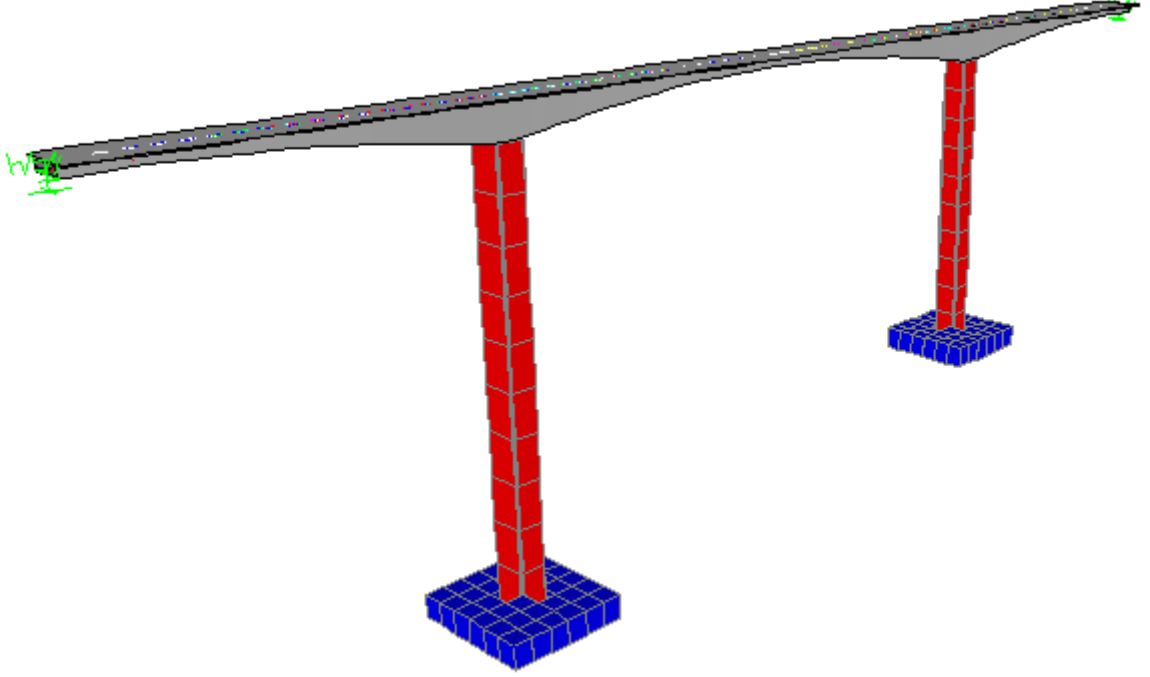
Sınır Şartları	Yay Katsayıları (kN/m ³)		
	Boyuna	Enine	Düşey
Sağ Temel	20000	20000	20000
Sol Temel	20000	20000	20000

2.2.4.3. Diğer İyileştirmeler

Berta Köprüsü'nün orta ayaklarının her iki yanındaki segment sonu perde duvarlarının ağırlıkları diyafram yükü (perde duvar yükü) olarak köprüye iyileştirilmiş modelde ilave edilmiştir.

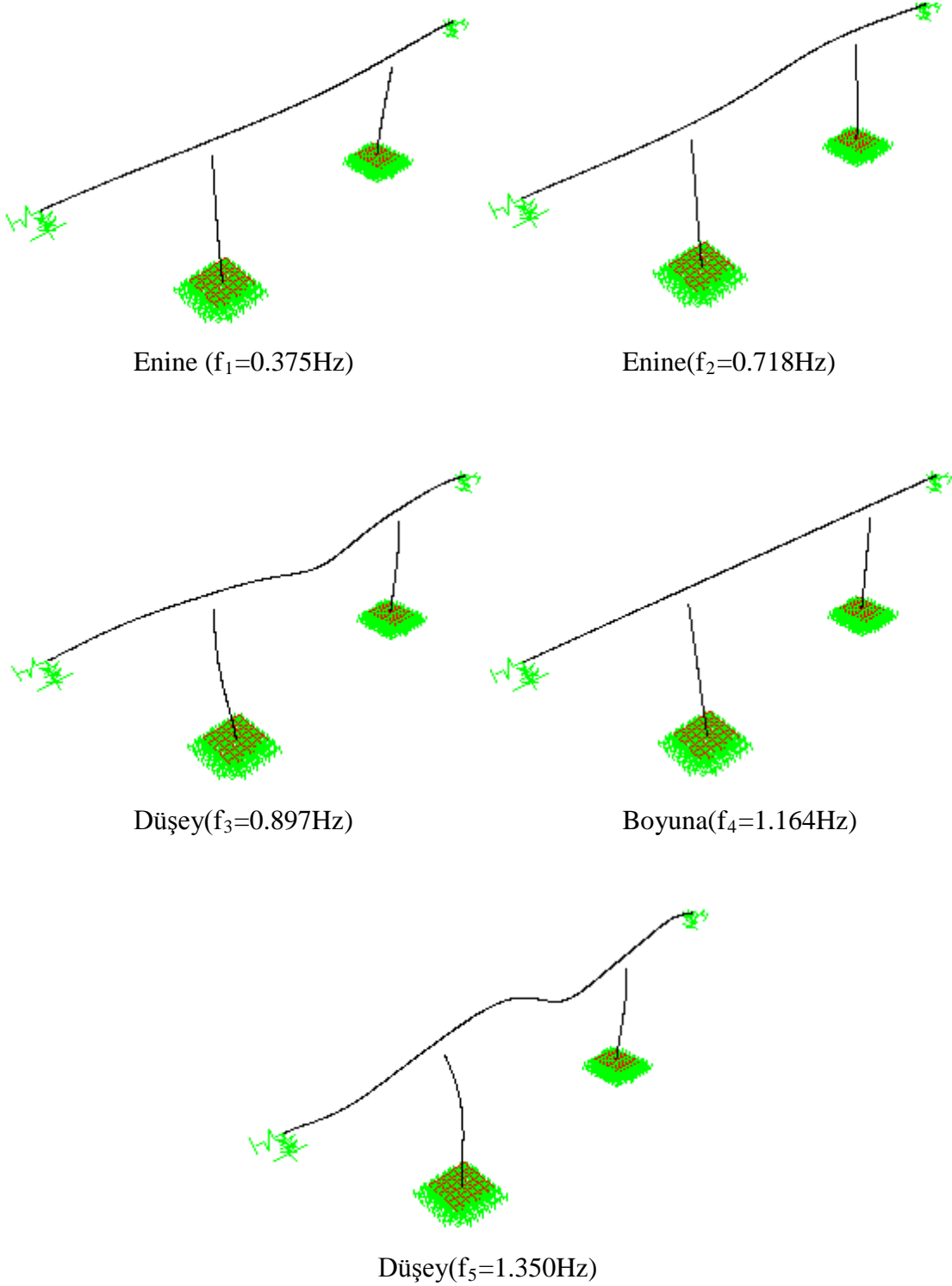
2.2.4.4. Berta Köprüsü'nün İyiletirilmi Sonlu Eleman Modelinin Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yapılan tüm iyileştirmeler sonucu elde edilen 3 boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 2.20'de verilmiştir.



Şekil 2.20. İyiletirmeden sonra elde edilen 3-boyutlu sonlu eleman modeli

İyileştirmeden sonra elde edilen mod şekilleri deneysel olarak elde edilen mod şekilleri ile uyum içinde olup Şekil 2.21’de verilmiştir.



Şekil 2.21. İyileştirmeden sonra elde edilen analitik ilk beş mod şekli

Berta Köprüsü'nün sonlu eleman model iyileştirmesinden önceki ve sonraki analitik ve deneysel frekansları Tablo 2.10'da karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Tablo 2.10'dan iyileştirilmeden önceki analitik ve deneysel frekanslar arasındaki fark % 2-11 arasında iken, iyileştirmeden sonra % 0.2-6 seviyesine çekilebilmiştir.

Tablo 2.10. Berta Köprüsü'nün sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra elde edilen dinamik karakteristikleri

Mod	Başlangıç Analitik Frekanslar (Hz)	İyileştirilen Analitik Frekanslar (Hz)	Deneysel Frekanslar (Hz)	İyileştirilmemiş Farklar (%)	İyileştirilmiş Farklar (%)
1	0.394	0.375	0.352	11	6
2	0.677	0.718	0.737	---	3
3	0.722	0.897	0.899	2	0.2
4	0.954	1.164	-----	6	---
5	1.310	1.350	1.382	3	2

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, dengeli konsol betonarme köprülerin dinamik karakteristiklerinin analitik ve deneysel yöntemlerle belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla tez kapsamında uygulama olarak, 2008-2011 yılları arasında Artvin’de dengeli konsol yöntemiyle inşa edilmiş olan Berta Köprüsü seçilmiştir. Berta Köprüsü’nün üç boyutlu sonlu eleman modeli proje verileri dikkate alınarak SAP2000 (2008) programında oluşturulmuş ve modal analizler sonucunda köprünün teorik dinamik karakteristikleri (doğal frekanslar ve mod şekilleri) analitik olarak belirlenmiştir. Analitik dinamik karakteristiklerle kıyaslamak amacıyla model köprüye çevresel titreşim testi uygulanmış ve deneysel dinamik karakteristikler (doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları) elde edilmiştir. Çevresel titreşim testinde titreştirici olarak yaya hareketleri ve rüzgar yüklerinden yararlanılmıştır. Mevcut sonlu eleman modelinin köprünün gerçek davranışını temsil edip etmediğinin kontrolü için deneysel ve teorik olarak elde edilen köprü dinamik karakteristikleri birbirleriyle karşılaştırılmış ve aralarında farklılıklar olduğu görülmüştür. Sonuçlar arasındaki farklılıklar malzeme özellikleri, sınır şartları ve diğer parametreler dikkate alınarak minimum düzeye indirilmiş ve köprünün mevcut durumunu en iyi şekilde yansıtacak olan sonlu eleman modeli elde edilmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

- Berta Köprüsü’nün analitik modal analizinden elde edilen ilk beş doğal frekans, 0.394-1.310 Hz arasında elde edilmiştir. Köprüye uygulanan çevresel titreşim testlerinden ise ilk beş deneysel doğal frekans 0.352-1.382 Hz arasında belirlenmiştir.
- Berta Köprüsü’ne ait deneysel ölçüm 0-12.5 Hz aralığında, analiz ise 0-3.125 Hz aralığında yapılmıştır. Ölçüm süresi ise 20 dk olarak seçilmiştir.
- Berta Köprüsü’ne uygulanan çevresel titreşim testlerinden elde edilen sönüm oranı değerleri % 2.158-0.688 arasında değişkenlik göstermektedir.
- Berta Köprüsü’nün sonlu eleman analizlerinden ve deneysel ölçüm testlerinden (GFTAA ve SAB yöntemleri) elde edilen mod şekilleri birbirleriyle uyum içerisindedir. Birinci ve üçüncü modlar enine; dördüncü ve beşinci modlar düşey olarak elde edilmiştir. İkinci mod ise analitik analizlerde boyuna doğrultuda uzama modu olarak elde edilmiştir. Deneysel ölçümlerde boyuna doğrultuda herhangi bir

ivmeölçer yerleştirilmediğinden analitik moda karşılık gelen uzama modu elde edilememiştir.

- Berta Köprüsü için gerçekleştirilen analitik ve deneysel çalışmalardan elde edilen doğal frekanslar incelendiğinde frekanslar arasında farklılıkların bulunduğu görülmüştür. Doğal frekanslar arasındaki bu farkı giderebilmek veya minimum düzeye getirebilmek için Berta Köprüsü'nün sonlu eleman modeli, malzeme özellikleri, sınır şartları ve diğer belirsiz parametreleri kabul edilebilir sınırlar içerisinde değiştirilerek iyileştirilmiştir.
- Berta Köprüsü'nün iyileştirilen sonlu eleman modelinden ilk beş doğal frekans 0.375-1.350 Hz arasında elde edilmiş ve mod şekillerinde bazı değişiklikler olmuştur. Analitik olarak elde edilen mod şekilleri ve deneysel ölçüm testlerinden elde edilen mod şekilleri birbirleriyle uyum içerisindedir. Birinci ve ikinci modlar enine; üçüncü ve beşinci modlar düşey olarak elde edilmiştir. Dördüncü mod ise analitik analizlerde boyuna doğrultuda uzama modu olarak elde edilmiştir. Deneysel ölçümlerde boyuna doğrultuda herhangi bir ivmeölçer yerleştirilmediğinden analitik moda karşılık gelen uzama modu elde edilememiştir.
- Berta Köprüsü'ne uygulanan çevresel titreşim testlerinden toplanan sinyallerin GFTAA ve SAB yöntemlerine göre ayrıştırılması sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler birbirine çok yakındır. Bu durum her iki yöntem için elde edilen sonuçların birbirleriyle uyum içerisinde olduğunu göstermektedir.

Tez çalışmasından elde edilen sonuçlardan yola çıkarak aşağıda bazı önerilere yer verilmektedir:

- Deneysel ölçüm sonuçları kullanılarak Berta Köprüsü'nün hasar tespiti yapılabilir.
- Berta Köprüsü'ne uygulanan çevresel titreşim testinden elde edilen dinamik karakteristikler köprünün ölçüm esnasındaki durumunu yansıtmaktadır. Bu ölçümler uzun süreli hale getirilerek köprünün davranışları sürekli izlenebilir. Böylece herhangi bir olumsuz durumda gecikmeden müdahale edilebilir.
- Berta Köprüsü'nün bölgede meydana gelmiş bir deprem ivme kaydına göre deprem davranışı belirlenebilir.
- Bu tez çalışmasında işlenen metodoloji, Ülkemizdeki benzer mevcut köprülerin güvenliğinin belirlenmesi için kullanılabilir.

4. KAYNAKLAR

- Achter, J.L., 2000. Full-Scale Bridge Bent Condition Assessment using Forced-Vibration Testing, Yüksek Lisans Tezi, Utah State University, Logan, Utah.
- Altunışık, A.C., Bayraktar, A., Sevim, B., Adanur, S. ve Domaniç, A., Karayolu Köprülerinin Sonlu Eleman Analizinde Yapım Aşamalarının ve Zamana Bağlı Deformasyonların Dikkate Alınması, Yapı Dünyası Dergisi, 161, 11-15.
- Altunışık, A.C., Bayraktar, A., Sevim, B., Domaniç, A. ve Adanur, S., 2009b. Yapım Aşamaları Dikkate Alınarak Köprülerin Davranışlarının Belirlenmesi, Sakarya International Symposium of Earthquake Engineering, October, Sakarya, Türkiye, Bildiriler Kitabı: 209-219.
- Altunışık, A.C., 2010. Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Altunışık, A.C., Bayraktar, A., Sevim, B. ve Ateş, Ş. 2011. Ambient Vibration based Seismic Evaluation of Isolated Gülburnu Highway Bridge, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31, 11, 1496-1510.
- Bagchi, A., 2005. Updating the Mathematical Model of a Structure using Vibration Data, Journal of Vibration and Control, 11, 12, 1469-1486.
- Bayraktar, A., 2006. Deprem Yönetmeliğinde Yapı Dinamiği İlkeleri, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Mesleki Eğitim Seminerleri, 17-19 Kasım.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., 2007a. Modal Testing and Finite Element Model Calibration of an Arch Type Steel Footbridge, Steel and Composite Structures, 7, 6, 487-502.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Türker, T. ve Sevim, B., 2007b. Tarihi Yığma Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, Eylül, Ankara, Türkiye, Bildiriler Kitabı: 429-440.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., Ateş, Ş. ve Adanur, S., 2007c. Determination of Earthquake Behaviour of Highway Bridges by Operational Modal Analysis, International Earthquake Symposium Kocaeli 2007, October, Kocaeli, Turkey, Bildiriler Kitabı: 368-380.
- Bayraktar, A., Türker, T., Sevim, B. ve Altunışık, A.C., 2007d. Determination of Dynamic Characteristics of Steel Footbridges by Analytical and Experimental Modal Analyses, International Symposium on Advances in Earthquake and Structural Engineering AESE 2007, October, Isparta-Antalya, Turkey, Bildiriler Kitabı: 163-172.

- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., Akköse, M. ve Coşkun, N., 2008a. Modal Analysis, Experimental Validation and Calibration of a Historical Masonry Minaret, Journal of Testing and Evaluation, 36, 6, 516-524.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., Domaniç, A. ve Taş, Y., 2008b. Köprülerin Dinamik Karakteristiklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Yapı Dünyası Dergisi, 150, 44-57.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., Domaniç, A. ve Taş, Y., 2008c. Kömürhan Köprüsünün Dinamik Karakteristiklerinin Analitik ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi, İMO İstanbul Şubesi Bülteni, 98, 10-21.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., Adanur, S. ve Ateş, Ş., 2008d. Ambient Vibration Testing of Steel Footbridges for Structural Identification, Proceedings of the Fifth International Engineering and Construction Conference (IECC'5), August, Irvine, USA, Bildiriler Kitabı: 87-94.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C., Türker, T. ve Adanur, S., 2008e. Determination of Blast Vibration Effects on the Dynamic Behaviour of the Highway Bridges using Modal Testing, Eighth International Congress on Advances in Civil Engineering, September, Eastern Mediterranean University, Famagusta, North Cyprus (ACE08-158), 3, Bildiriler Kitabı: 557-565.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C. ve Türker, T., 2009a. Analytical and Operational Modal Analyses of Turkish Style Reinforced Concrete Minarets for Structural Identification, Experimental Techniques, 33, 2, 65-75.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., 2009b. Modal Testing, Finite Element Model Updating and Dynamic Analysis of an Arch Type Steel Footbridge, Journal of Performance of Constructed Facilities, 23, 2, 81-89.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., Domaniç, A. ve Taş, Y., 2009c. Vibration Characteristics of Kömürhan Highway Bridge Constructed with Balanced Cantilever Method, Journal of Performance of Constructed Facilities, 23, 2, 90-99.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T. ve Domaniç, A., 2009d. Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi, Teknik Dergi, 20, 2, 4675-4700.
- Bayraktar, A., Türker, T., Sevim, B., Altunışık, A.C. ve Yıldırım, F., 2009e. Modal Parameter Identification of Hagia Sophia Bell-Tower via Ambient Vibration Test, Journal of Nondestructive Evaluation, 28, 1, 37-47.
- Bayraktar, A., Birinci, F., Altunışık, A.C., Türker, T. ve Sevim, B., 2009f. Finite Element Model Updating of Senyuva Historical Arch Bridge using Ambient Vibration Tests, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 4, 4, 177-185.

- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C. ve Türker, T., 2010a. Effect of the Model Updating on Earthquake Behavior of Steel Storage Tanks, Journal of Constructional Steel Research, 66, 462-469.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C. ve Türker, T., 2010b. Earthquake Analysis of Reinforced Concrete Minarets using Ambient Vibration Test Results, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 19, 3, 257-273.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., 2010c. Finite Element Model Updating of Kömürhan Highway Bridge based on Experimental Measurements, Journal of Smart Structures and Systems, 6, 4, 373-388.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., 2010d. Earthquake Behaviour of Kömürhan Highway Bridge using Validated Finite Element Model, Journal of Testing and Evaluation, 38, 4, 467-481.
- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C., Sevim, B., Şahin, A. ve Özcan, M., 2010e. Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Teknik Dergi, 337, 5185-5205.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Birinci, F., Sevim, B. ve Türker, T., 2010f. Finite Element Analysis and Vibration Testing of a Two-Span Masonry Arch Bridge, Journal of Performance of Constructed Facilities ASCE, 24, 1, 46-52.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., 2010g. Seismic Response of a Historical Masonry Minaret using a FE Model Updated with Operational Modal Testing, Journal of Vibration and Control, 17,1,129-149.
- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C. ve Sevim, B., 2010h. Evaluation of Blast Effects on Reinforced Concrete Buildings Considering Operational Modal Analysis Results, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30, 310-319.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., 2010i. Ambient Vibration Tests of a Steel Footbridge, Journal of Nondestructive Evaluation, 29,1,14-24.
- Bendat, J.S. ve Piersol, A.G., 2004. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 3th Edition, John Wiley and Sons, USA.
- Birinci, F., 2010. Taş Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- 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.
- Brincker, R., Ventura, C., E. ve Andersen, P., 2003. Why Output-Only Modal Testing is A Desirable Tool for A Wide Range of Practical Applications, Proceeding of the 21st International Modal Analysis Conference (IMAC XXI), Kissimmee, Florida.

- Cantieni, R., 2004. Experimental Methods used in System Identification of Civil Engineering Structures, 2nd Workshop: Problemi di Vibrazioni Nelle Strutture Civili e Nelle Costruzioni Meccaniche, June, Perugia, Italy.
- Catbas, F.N., 1997. Investigation of Global Condition Assessment and Structural Damage Identification of Bridges with Dynamic Testing and Modal Analysis, Doktora Tezi, University of Cincinnati, Cincinnati, USA.
- Celasun, H., 1974. "Öngerilmeli Beton", İDMMA yayınları, İstanbul.
- Chopra, A. K., 1995. Dynamics of Structures, Prentice Hall International, Inc., Toronto.
- Chopra, A.K., 2006. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Third Edition, Prentice Hall, USA.
- Chuntavan, C., 1993. Structural Identification of Steel Stringer Bridges for Condition Assessment, Doktora Tezi, University of Cincinnati, Cincinnati, USA.
- DOLSAR İnşaat ve Limited Şirketi, 2007. Berta Köprüsü Projeleri, Ankara.
- Dönmez, C. ve Karakan, E., 2009. Köprülerde Deneysel Modal Analiz Uygulamaları, İMO Teknik Dergi, 4851-4863.
- El-Borgi, S., Smaoui, H., Cherif, F., Bahlous, S. ve Gharairi, A., 2004. Modal Identification and Finite Element Model Updating of a Reinforced Concrete Bridge, Emirates Journal for Engineering Research, 9, 2, 29-34.
- Ewins, D.J., 2000. Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Press Ltd. England.
- Farrar, C.R., 1997. System Identification from Ambient Vibration Measurements on a Bridge, Journal of Sound and Vibration, 205, 1, 1-18.
- Feng, M.Q., Kim, D.K., Yi, J.H. ve Chen, Y., 2004. Baseline Models for Bridge Performance Monitoring, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 130, 5, 562-569.
- Fryba, L. ve Pirner, M., 2001. Load Tests and Modal Analysis of Bridges, Engineering Structures, 23, 102-109.
- Gentile, C. ve Bernardini, G., 2008. Output-Only Modal Identification of a Reinforced Concrete Bridge from Radar-Based Measurements, Nondestructive Testing and Evaluation, 41, 544-553.
- Guan, H., 2006. Vibration-Based Structural Health Monitoring of Highway Bridges, Doktora Tezi, University of California, San Diego, USA.

- Halling, M.W., Muhammad, I. ve Womack, K.C., 2001. Dynamic Field Testing for Condition Assessment Bridge Bents, Journal of Structural Engineering, ASCE, 127, 2, 161-167.
- Harputoğlu, Z., elebi, N. ve Tulumtaş, F., 2007. ‘‘Gülburnu Köprüsü’’, Köprüler ve Viyadkler Sempozyumu, Kasım, Antalya, Bildiriler Kitabı, 225–236.
- Inaudi, D., Casanova, N., Vurpillot, S., Glisic, B., Kronenberg, P. ve Lloret, S., 2000. Bridge Deformation Monitoring during Enlargement and Refurbishment Works under Traffic Conditions, International Association for Bridge and Structural Engineering, IABSE, 16th Congress, Luzern, Switzerland.
- 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.
- Karakaplan, A., Caner, A., Kur, . Domaniç A, Lle A., 2007. ‘‘Yapı zmlemesinde Yeni Bir Devir: Yapım Aşaması’’, Köprüler ve Viyadkler Sempozyumu, 29–30 Kasım, Antalya, Bildiriler Kitabı, 141–153.
- Kou, J.W. ve DeWolf, J.T., 1997. Vibrational Behavior of Continuous Span Highway Bridge-Influencing Variables, Journal of Structural Engineering, 123, 3, 333-344.
- Magalhaes, F., Cunha, A., Caetano, E. ve Brincker, R., 2010. Damping Estimation using Free Decays and Ambient Vibration Tests, Mechanical Systems and Signal Processing, 24, 1274-1290.
- 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.
- Owen, J.S. ve Haritos, N., 2003. Damage Detection in Large-Scale Laboratory Bridge Models, Key Engineering Materials, 245-246, 35-42.
- Pang, J., 1996. Modeling and Experimental Modal Analysis of Highway Bridge, Doktora Tezi, University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, USA.
- Peeters, B. ve Roeck, G.D., 2000. Reference Based Stochastic Subspace Identification in Civil Engineering, Inverse Problems in Civil Engineering, 8, 47-74.
- Peeters, B., 2000. System Identification and Damage Detection in Civil Engineering, Doktora Tezi, K.U, Leuven, Belgium,
- 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, Doktora Tezi, University of Minho, Portugal.
- Ren, W.X., Zatar, W. ve Harik, I.E., 2004. Ambient Vibration-Based Seismic Evaluation of a Continuous Girder Bridge, Engineering Structures, 26, 631-640.
- Salane, H.J. ve Baldwin, J.W., 1990. Identification of Modal Properties of Bridges, Journal of Structural Engineering, ASCE, 116, 7, 2008-2021.
- Sanayei, M. ve DiCarlo, C., 2009. Finite Element Model Updating of Scale Bridge Model using Measured Modal Response Data, Structures Congress.
- SAP2000, 2008. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures Inc, Berkeley, California, USA.
- Schwarz, B.J. ve Richardson, M.H., 1999. Experimental Modal Analysis, CSI Reliability Week, Orlando, USA.
- Sevim, B., 2010. Kemer Barajların Dinamik Davranışlarının Sonlu Eleman ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Şahin, A., 2009. Yapıların Deneysel ve Operasyonel Modal Analizleri için Sayısal Sinyal İşleme, Dinamik Karakteristik Belirleme ve Sonlu Eleman Model İyileştirilme Yazılımları: SignalCAD-ModalCAD- FemUP, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Topçu, İ.B., 2006. "Beton Teknolojisi", Uğur Ofset, Eskişehir.
- Türker, T., 2005. Çelik Çerçeve Sistemlerin Dinamik Karakteristiklerinin Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Türker, T., 2011. Çevresel Titreşim Verileri Kullanılarak Yapıların Hasar Durumlarının Tespiti ve Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Wang, T.L. ve Zong, Z., 2002. Improvement of Evaluation Method for Existing Highway Bridges, Rapor No: FL/DOT/RMC/6672-818, Structural Research Center, Florida Department of Transportation, Miami, Florida, USA.
- Whelan, M.J., Gangone, M.V., Janoyan, K.D. ve Jha, R., 2009. Real-Time Wireless Vibration Monitoring for Operational Modal Analysis of an Integral Abutment Highway Bridge, Engineering Structures, 31, 2224-2235.
- Womack, K.C. ve Halling, M.W., 1999. Forced Vibration Testing of the I-15 South Temple Bridge, No: UT-99.15, Department of Civil and Environmental Engineering, Utah State University, Logan, Utah, USA.

- Yu, D.J. ve Ren, W.X., 2005. EMD- Based Stochastic Subspace Identification of Structures from Operational Vibration Measurements, Engineering Structures, 27, 1741-1751.
- Zapico, J.L., Gonzalez, M.P., Friswell, M.I., Taylor, C.A. ve Crewe, A.J., 2003. Finite Element Model Updating of a Small Scale Bridge, Journal of Sound and Vibration, 268, 993-1012.
- Zhao, J. ve DeWolf, J.T., 2002. Dynamic Monitoring of Steel Girder Highway Bridge, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 7, 6, 350-356.
- Zhang, L., Brincker, R. ve Andersen, P., 2002. An Overview of Operational Modal Analysis: Major Development and Issues, B&K Technical Paper, 152-161.
- Xu, F., 2002. Health Assessment and Monitoring of a Post-Tensioned Segmental Concrete Bridge, Doktora Tezi, University of Illinois, Chicago, USA.

ÖZGEÇMİŞ

Fatma Nur TURAN, 1985 yılında Giresun'da doğdu fakat aslen Trabzonludur. İlkokulu 1992-1997 tarihleri arasında Ülkü İlköğretim Okulu'nda başlayıp Aydınlıkevler İlköğretim Okulu'nda tamamlamıştır. 1997-2000 yılları arasında hazırlık sınıfı da dahil olmak üzere üç sene Trabzon Anadolu İmam Hatip Lisesinde okuyup 8. Sınıfı Cumhuriyet İlköğretim Okulunda okuyarak orta öğrenimini tamamlamıştır. Lise hayatını Trabzon Lisesi'nde tamamlayarak girmiş olduğu Öğrenci Seçme Sınavında (ÖSS) gösterdiği başarıyla Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünü kazanmıştır. 2009 yılında buradan mezun olup aynı yıl burada yüksek lisans eğitimine başlamıştır. İyi derecede İngilizce bilen TURAN, evlidir.

Bu tez çalışması sırasında aşağıdaki çalışmalar hazırlanmıştır.

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

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

Osmancıklı, G., Uçak, Ş., **Turan, F.N.**, Türker, T., 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).