

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KARAYOLU KÖPRÜLERİNİN YAPISAL DAVRANIŞLARININ
ANALİTİK VE DENEYSEL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

İnş. Müh. Ahmet Can ALTUNIŞIK

**KASIM 2010
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KARAYOLU KÖPRÜLERİNİN YAPISAL DAVRANIŞLARININ
ANALİTİK VE DENEYSEL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

İnş. Müh. Ahmet Can ALTUNIŞIK

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“Doktor (İnşaat Mühendisliği)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12.10.2010
Tezin Savunma Tarihi : 04.11.2010

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Mehmet AKKÖSE

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Nart COŞKUN

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Süleyman ADANUR

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Zeki HASGÜR

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2010

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır.

“Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle 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. Mehmet AKKÖSE'ye ve Yrd. Doç. Dr. Nart COŞKUN'a çok teşekkür ederim. Tez çalışmam sırasında, özellikle laboratuvar modelinin oluşturulması kısmında, gece-gündüz demeden, değerli zamanını ve emeğini benim için harcamaktan kaçınmayan Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Süleyman ADANUR'a çok teşekkür ederim.

Akademik hayattaki güçlüklerle birlikte göğüs gerdiğimiz, acıları ve mutlulukları birlikte paylaştığımız, en zor zamanlarımda hep yanımda olan değerli arkadaşım ve dostum Yrd. Doç. Dr. Barış SEVİM'e şükranlarımı sunarım.

Akademik hayatım boyunca bana destek olan Hocalarım Sayın Yrd. Doç. Dr. Şevket ATEŞ'e, Dr. Abdurrahman ŞAHİN'e, Dr. Hasan Basri BAŞAĞA'ya, Dr. Yasemin BAYRAM'a, Arş. Gör. Mehmet ÖZCAN'a, Arş. Gör. Temel TÜRKER'e ve Arş. Gör. Dr. Murat Emre KARTAL'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamın sağlıklı bir şekilde yürütülmesi için Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a, KTÜ Rektörlüğü'ne ve Yurt İçi Doktora Bursu Programı kapsamında maddi destek sağlayan TÜBİTAK-BİDEB'e teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım süresince bana her türlü desteği veren babam Hüseyin ALTUNIŞIK'a, annem Nafiye ALTUNIŞIK'a ve ablam Çağla ALTUNIŞIK ÖZDEMİR'e müteşekkirdiğimi belirtmek isterim. Ayrıca, tüm desteğiyle yanımda olan eşim Vildan ALTUNIŞIK'a göstermiş olduğu sabırdan dolayı teşekkür eder, bu çalışmanın, yeni çalışmalara ışık tutmasını ve Ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Ahmet Can ALTUNIŞIK
Trabzon 2010

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER DİZİNİ	XVII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Karayolu Köprülerinin Dinamik Davranışı ile İlgili Çalışmalar	3
1.2.1. Analitik Çalışmalar	3
1.2.2. Deneysel Çalışmalar	10
1.2.2.1. Laboratuvar Çalışmaları	10
1.2.2.2. Arazi Çalışmaları	13
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği	20
1.4. Karayolu Köprülerinin Analitik Modellenmesi.....	22
1.4.1. Dengeli Konsol Yöntemi	22
1.4.2. Analizlerde Yapılan Kabüller	23
1.4.3. Yapım Aşamalarının Dikkate Alınması.....	24
1.4.4. Zamana Bağlı Malzeme Deformasyonlarının Dikkate Alınması	25
1.4.4.1. Basınç Dayanımı.....	26
1.4.4.2. Betonun Yaşı	26
1.4.4.3. Betonun Büzülmesi.....	27
1.4.4.4. Betonun Sünmesi	28
1.4.4.5. Çeliğin Relaksasyonu (Gevşemesi)	29
1.5. Sonlu Eleman Yöntemine Dayalı Dinamik Formülasyon	30
1.5.1. Analitik Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi.....	30
1.5.2. Newmark Yöntemine Göre Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz	30

1.6.	Deneysel Modal Analiz Yöntemi	33
1.6.1.	Deneysel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Ölçüm Sistemi	33
1.6.1.1.	Titreştiriciler	33
1.6.1.1.1.	Sarsıcılar	34
1.6.1.1.2.	Darbe Çekiçleri	35
1.6.1.2.	İvmeölçerler	36
1.6.1.3.	Veri Toplama Sistemi ve Sinyal İşleme	38
1.6.2.	Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile İlgili Genel Kurallar	41
1.6.3.	Deneysel Modal Analiz Yöntemine Ait Formülasyon	44
1.6.3.1.	Çevresel Titreşim Yöntemi	44
1.6.3.1.1.	Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) Yöntemi	45
1.6.3.1.2.	Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi	47
1.6.3.2.	Zorlanmış Titreşim Yöntemi	50
1.7.	Analitik ve Deneysel Dinamik Karakteristiklerin Modal Güvence Kriterine (MGK) Göre Değerlendirilmesi	52
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR	53
2.1.	Giriş	53
2.2.	Laboratuvar Çalışmaları	53
2.2.1.	Model Köprünün Geometrik Özellikleri ve Boyutlandırılması	53
2.2.2.	Model Köprünün İnşasında Kullanılan Malzeme Özellikleri	55
2.2.3.	Model Köprünün İnşası	56
2.2.3.1.	Temellerin İnşası	56
2.2.3.2.	Ayakların İnşası	57
2.2.3.3.	Tabliyenin İnşası	58
2.2.4.	Model Köprünün Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi	62
2.2.5.	Sonlu Eleman Yöntemiyle (SEY) Model Köprünün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	65
2.2.6.	Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle (DMA) Model Köprünün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	68
2.2.6.1.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Model Köprünün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	68
2.2.6.2.	Zorlanmış Titreşim Yöntemiyle (ZTY) Model Köprünün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi	86
2.2.6.3.	Model Köprünün Analitik ve Deneysel Dinamik Karakteristiklerinin Karşılaştırılması	89

2.3.	Arazi Çalışmaları	92
2.3.1.	Kömürhan Köprüsü	92
2.3.1.1.	Kömürhan Köprüsü ve Geometrik Özellikleri	92
2.3.1.1.1.	Köprü Tabliyesi	95
2.3.1.1.2.	Köprü Ayakları ve Kenar Mesnetler.....	96
2.3.1.1.3.	Orta Açıklık Mafsal Düzeneği.....	97
2.3.1.2.	Sonlu Eleman Yöntemiyle (SEY) Kömürhan Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	99
2.3.1.3.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Kömürhan Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	104
2.3.1.4.	Kömürhan Köprüsü'nün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi.....	119
2.3.1.4.1.	Malzeme Özelliklerinin İyileştirilmesi	120
2.3.1.4.2.	Sınır Şartlarının İyileştirilmesi	122
2.3.1.4.3.	Diğer İyileştirmeler.....	122
2.3.1.5.	Kömürhan Köprüsü'nün Deprem Davranışının Belirlenmesi	124
2.3.1.5.1.	Tabliye Davranışı.....	124
2.3.1.5.2.	Ayak Davranışı	126
2.3.1.6.	Kömürhan Köprüsü'nün Yapısal Davranışına Yapım Aşamalarının ve Zamana Bağlı Malzeme Deformasyonlarının Etkisinin Belirlenmesi	129
2.3.1.6.1.	Analizlerde Dikkate Alınan Yükleme Durumları.....	133
2.3.1.6.2.	Yapım Aşamalarına Bağlı Deformasyon Şekilleri	134
2.3.1.6.3.	Tabliye Davranışı.....	134
2.3.1.6.4.	Ayak Davranışı	136
2.3.2.	Gülburnu Köprüsü	138
2.3.2.1.	Gülburnu Köprüsü ve Geometrik Özellikleri	138
2.3.2.1.1.	Köprü Tabliyesi	141
2.3.2.1.2.	Köprü Ayakları ve Kenar Mesnetler.....	142
2.3.2.1.3.	Sismik İzolatörler.....	144
2.3.2.2.	Sonlu Eleman Yöntemiyle (SEY) Gülburnu Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	144
2.3.2.3.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Gülburnu Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	147
2.3.2.4.	Gülburnu Köprüsü'nün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi.....	159
2.3.2.5.	Gülburnu Köprüsü'nün Deprem Davranışının Belirlenmesi	161
2.3.2.5.1.	Tabliye Davranışı.....	163

2.3.2.5.2. Ayak Davranışı	166
2.3.2.5.3. İzolatör (Sismik Ayırıcı) Davranışı	169
3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	170
4. KAYNAKLAR.....	177
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Bu tez çalışmasında, karayolu köprülerinin yapısal davranışları analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla, laboratuvar ortamında oluşturulan model bir köprü ve arazi ortamında inşa edilen Kömürhan ve Gülburnu Köprüleri üzerinde analitik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Doktora tez çalışması üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm genel bilgiler bölümü olup; karayolu köprülerinin dinamik davranışı ile ilgili çalışmalar, karayolu köprülerinin analitik modellenmesi, sonlu eleman ve deneysel modal analiz yöntemleri ile ilgili genel bilgiler ve bu yöntemlere ait formülasyonlar bu bölümde sunulmaktadır. İkinci bölümde; yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgulara yer verilmektedir. İkinci bölümde yapılan çalışmalar iki kısma ayrılmıştır. İlk kısımda; laboratuvar ortamında oluşturulan bir model köprünün dinamik karakteristikleri analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmiş ve karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Model köprünün sonlu eleman modeli oluşturulup dinamik karakteristikler analitik olarak elde edildikten sonra, model köprü üzerine çevresel ve zorlanmış titreşim testleri uygulanarak köprünün dinamik karakteristikleri deneysel olarak belirlenmiştir. İkinci kısımda; Kömürhan ve Gülburnu Köprüleri'nin yapı-zemin etkileşimini içeren iki ve üç boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturularak dinamik karakteristikler analitik olarak belirlenmiştir. Analitik olarak belirlenen dinamik karakteristiklerin karşılaştırılması amacıyla bu iki köprüye çevresel titreşim testleri uygulanmış ve dinamik karakteristikler deneysel olarak belirlenmiştir. Köprülerin sonlu eleman modelleri, malzeme özellikleri ve sınır şartlarındaki değişimler dikkate alınarak deneysel sonuçlara göre iyileştirilmiştir. Köprülerin başlangıç ve iyileştirilmiş sonlu eleman modellerine deprem ivme kaydı uygulanmış, her iki durum için lineer deprem davranışı araştırılmıştır. Ayrıca, Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alındığı lineer olmayan analizi de gerçekleştirilmiştir. Üçüncü bölümde; tez çalışmasından elde edilen sonuçlara ve yapılan önerilere yer verilmektedir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

Anahtar Kelimeler : Çevresel Titreşim Testi, Deneysel Modal Analiz, Deprem Davranışı, Dinamik Karakteristik, Karayolu Köprüsü, Sonlu Eleman Model İyileştirme, Zorlanmış Titreşim Testi.

SUMMARY

Determination of Structural Behavior of Highway Bridges using Analytical and Experimental Methods

In this thesis, structural behaviors of highway bridges are determined using analytical and experimental methods. For this purpose, analytical and experimental studies are done on a laboratory bridge model and Kömürhan and Gülburnu Highway Bridges.

Three main sections are considered in this thesis. In the first section of the thesis; background of dynamic behavior of highway bridges, finite element and experimental modal analysis methods, and formulation of these methods are represented. In the second section of the thesis, analytical and experimental studies done on a laboratory bridge model and Kömürhan and Gülburnu Highway Bridges, and findings from these studies are considered. The second section of the thesis is separated to two main parts. In the first part; dynamic characteristics of laboratory bridge model are determined using analytical and experimental methods. Finite element model of laboratory bridge model is constituted and analytical dynamic characteristics are obtained. Ambient and forced vibration tests are conducted to laboratory bridge model and experimental dynamic characteristics are determined. In addition, analytical and experimental results are compared to each other. In the second part; two and three dimensional finite element models of Kömürhan and Gülburnu Highway Bridges considering soil-structure interaction are modeled and dynamic characteristics are determined analytically. To validate the analytical results, ambient vibration tests are applied to the bridges and dynamic characteristics are determined experimentally. Finite element models of the bridges are updated according to experimental results using some uncertain parameters such as material properties and boundary conditions. Linear time history analyses of both of initial and updated finite element models are performed. Also, construction stage analyses of Kömürhan Highway Bridge considering time dependent material properties are done to determine the nonlinear behavior. In the third section of the thesis; conclusions and some suggestions related to the thesis study are represented. Lastly, references and autobiography are represented.

Key Words : Ambient Vibration Test, Dynamic Characteristic, Earthquake Behavior, Experimental Modal Analysis, Finite Element Model Updating, Forced Vibration Test, Highway Bridge.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Köprü üstyapısını oluşturan segmentlerin inşasına ait şematik gösterim	22
Şekil 1.2. APS 400 tipi titreştirici.....	34
Şekil 1.3. B&K 8210 tipi darbe çekici	35
Şekil 1.4. Piezoelektrik tipi ivmeölçerin iç mekanizması (URL-3, 2010)	36
Şekil 1.5. a) B&K 8340 tipi tek eksenli, b) B&K 4506 tipi üç eksenli ve c) B&K 4507 tipi tek eksenli ivmeölçerler.....	37
Şekil 1.6. B&K 3560 C tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi.....	39
Şekil 1.7. Çevresel Titreşim Yöntemi'ne göre yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi.....	45
Şekil 1.8. Zorlanmış Titreşim Yöntemi'nin a) şematik gösterimi b) Frekans davranış fonksiyonunun belirlenmesi (Schwarz ve Richardson, 1999).....	51
Şekil 1.9. Darbe çekici ile dinamik karakteristiklerin belirlenmesi (Schwarz ve Richardson, 1999).....	51
Şekil 2.1. Model köprünün üç ve iki boyutlu görünüşleri (boyutlar cm cinsindedir) ...	54
Şekil 2.2. Sabit kesitli tabliye üst yapısı (boyutlar cm cinsindedir)	54
Şekil 2.3. Laboratuvar ortamında beton üretimine ait bazı fotoğraflar	55
Şekil 2.4. Temellerin inşasına ait bazı fotoğraflar.....	56
Şekil 2.5. Ayakların inşasına ait bazı fotoğraflar	57
Şekil 2.6. Dış kalıp ile hasır donatının yerleştirilmesine ait bazı fotoğraflar	58
Şekil 2.7. Kutu kesit alt tabla ve yan cidarlarının beton dökümüne ait bazı fotoğraflar .	59
Şekil 2.8. İç kalıbın alınması, geçici sunta kalıbın yapılması ve donatılar ile birlikte yerleştirilmesine ait bazı fotoğraflar	60
Şekil 2.9. Model köprünün bitmiş haline ait bazı fotoğraflar.....	61
Şekil 2.10. Silindir ve küp numunelerin alınmasına ve hazırlanmasına ilişkin bazı fotoğraflar	62
Şekil 2.11. Küp numunelerin tek eksenli basınç deneylerinden bazı fotoğraflar	63
Şekil 2.12. Tek eksenli basınç deneylerinden bazı fotoğraflar.....	64
Şekil 2.13. Silindir numuneden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme grafiği	64
Şekil 2.14. Model köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli.....	66
Şekil 2.15. Model köprünün analitik olarak elde edilen ilk sekiz mod şekli.....	67

Şekil 2.16.	Model köprünün çevresel titreşim testlerinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı	69
Şekil 2.17.	Model köprüde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar	70
Şekil 2.18.	Model köprünün birinci ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı	71
Şekil 2.19.	Model köprünün ikinci ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı	72
Şekil 2.20.	Model köprünün üçüncü ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı	74
Şekil 2.21.	Model köprünün dördüncü ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı	75
Şekil 2.22.	Model köprünün beşinci ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı	78
Şekil 2.23.	Model köprünün altıncı ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı	80
Şekil 2.24.	Model köprünün ÇTY'den elde edilen mod şekilleri.....	82
Şekil 2.25.	Model köprünün zorlanmış titreşim testlerinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı	86
Şekil 2.26.	Model köprünün zorlanmış titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar.....	87
Şekil 2.27.	Model köprünün zorlanmış titreşim testine ait frekans davranış fonksiyonları	88
Şekil 2.28.	Model köprünün SEY, ÇTY (GFTAA ve SAB) ve ZTY'e göre elde edilen doğal frekanslarının değişimi.....	89
Şekil 2.29.	SEY ve ÇTY'den elde edilen modlara ait MGK grafiği.....	90
Şekil 2.30.	Arazi çalışmaları kapsamında yapılan çalışmaları içeren akış şeması	93
Şekil 2.31.	Kömürhan Köprüsü'ne ait bazı fotoğraflar	94
Şekil 2.32.	Kömürhan Köprüsü'nün boy kesiti ve eleman boyutları	95
Şekil 2.33.	Değişken kesitli tabliye üst yapısı.....	96
Şekil 2.34.	Değişken kesitli köprü orta ayaklarına ait kesit görünüşleri (ölçüler cm cinsinden verilmiştir)	97
Şekil 2.35.	Orta açıklık genişleme derzindeki mafsal düzeneği (ölçüler mm cinsinden verilmiştir)	98
Şekil 2.36.	Orta açıklık genişleme derzindeki mafsal düzeneğine ait bazı fotoğraflar	99
Şekil 2.37.	Kömürhan Köprüsü'nün iki boyutlu sonlu eleman modeli.....	101
Şekil 2.38.	Kömürhan Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli	102
Şekil 2.39.	Kömürhan Köprüsü'nün analitik olarak elde edilen ilk sekiz mod şekilleri.	103

Şekil 2.40.	Kömürhan Köprüsü'nün referanslı olarak gerçekleştirilen ilk ölçüm düzeneğinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı.....	105
Şekil 2.41.	Kömürhan Köprüsü'nün referanslı olarak gerçekleştirilen ikinci ölçüm düzeneğinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı.....	105
Şekil 2.42.	Kömürhan Köprüsü'nün referanslı olarak gerçekleştirilen üçüncü ölçüm düzeneğinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı.....	106
Şekil 2.43.	Kömürhan Köprüsü'nün referanslı olarak gerçekleştirilen dördüncü ölçüm düzeneğinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı.....	107
Şekil 2.44.	Kömürhan Köprüsü'nün referanslı olarak gerçekleştirilen beşinci ölçüm düzeneğinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı.....	108
Şekil 2.45.	Kömürhan Köprüsü'nün referanslı olarak gerçekleştirilen altıncı ölçüm düzeneğinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı.....	108
Şekil 2.46.	Kömürhan Köprüsü'nde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar	109
Şekil 2.47.	Kömürhan Köprüsü'nün birinci ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri.....	110
Şekil 2.48.	Kömürhan Köprüsü'nün ikinci ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri.....	111
Şekil 2.49.	Kömürhan Köprüsü'nün üçüncü ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri.....	112
Şekil 2.50.	Kömürhan Köprüsü'nün dördüncü ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri.....	114
Şekil 2.51.	Kömürhan Köprüsü'nün beşinci ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri.....	115
Şekil 2.52.	Kömürhan Köprüsü'nün altıncı ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri.....	117
Şekil 2.53.	Kömürhan Köprüsü'nün ÇTY'den elde edilen mod şekilleri	119
Şekil 2.54.	Karot numunelerinin alınması sırasında elde edilen bazı görünüşler	120
Şekil 2.55.	Schmidt çekici ile yapılan ölçümlere ait bazı görünüşler	121
Şekil 2.56.	Kömürhan Köprüsü'nün analitik ve deneysel modlarına ait MGK grafiği... ..	123
Şekil 2.57.	1992 Erzincan depreminin doğu-batı bileşeni.....	124
Şekil 2.58.	Kömürhan Köprüsü'nde tabliye boyunca elde edilen yerdeğiştirmeler.....	125
Şekil 2.59.	Tabliyede boyunca elde edilen maksimum düşey yerdeğiştirmelerin zamana bağlı değişimleri.....	125
Şekil 2.60.	Kömürhan Köprüsü'nde tabliye boyunca elde edilen eğilme momentleri....	126
Şekil 2.61.	Tabliyede boyunca elde edilen maksimum eğilme momentinin zamana bağlı değişimleri.....	126

Şekil 2.62.	Ayak yüksekliği boyuca elde edilen boyuna yerdeğiştirmeler ve maksimum yerdeğiştirmelerin zamana bağlı değişimleri.....	127
Şekil 2.63.	Ayak yüksekliği boyunca elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerleri.....	128
Şekil 2.64.	Ayak yüksekliği boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri.....	128
Şekil 2.65.	Ayak yüksekliği boyuca elde edilen maksimum eğilme momenti değerlerinin zamana bağlı değişimi.....	129
Şekil 2.66.	Kömürhan Köprüsü'nün çeşitli yapım aşamalarına ait sonlu eleman modeli.....	130
Şekil 2.67.	Beton (a) ve öngerilmeli çelik (b) için kullanılan gerilme-şekil değiştirme diyagramları.....	132
Şekil 2.68.	Beton için zamana bağlı malzeme özelliği değişimleri.....	132
Şekil 2.69.	Öngerilmeli çelik için zamana bağlı malzeme özelliği değişimi.....	133
Şekil 2.70.	Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen deformasyon şekilleri ile tabliye ve ayaklara ait deformasyon değerleri.....	135
Şekil 2.71.	Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değişimi.....	136
Şekil 2.72.	Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen boyuna yerdeğiştirmelerin ayak yüksekliği boyunca değişimi.....	136
Şekil 2.73.	Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin ayak yüksekliği boyunca değişimi.....	137
Şekil 2.74.	Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen boyuna eğilme momentlerinin ayak yüksekliği boyunca değişimi.....	138
Şekil 2.75.	Gülburnu Köprüsü'ne ait bazı fotoğraflar.....	139
Şekil 2.76.	Gülburnu Köprüsü'nde kullanılan izolatörlere (sismik ayırıcı) ait kesit görünüşü (Yüksel Proje, 2007).....	141
Şekil 2.77.	Gülburnu Köprüsü'nün boy kesiti ve eleman boyutları (Yüksel Proje, 2007).....	141
Şekil 2.78.	Değişken kesitli tabliye üst yapısı (boyutlar cm cinsindedir).....	142
Şekil 2.79.	Ayak, temel ve kazık sistemine ait kesit görünüşü (boyutlar cm cinsindedir) (Yüksel Proje, 2007).....	143
Şekil 2.80.	Kenar ayaklarda dikkate alınan mesnet durumu (boyutlar cm cinsindedir) (Yüksel Proje, 2007).....	143
Şekil 2.81.	Köprüde kullanılan sürtünmeli sarkaç izolatörlere ait bazı görünüşler.....	144
Şekil 2.82.	İzolatörlerin yerleşim planı ve çalışma prensibi.....	145
Şekil 2.83.	Gülburnu Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli.....	146

Şekil 2.84.	Gülburnu Köprüsü'nün analitik olarak elde edilen ilk sekiz mod şekilleri...	147
Şekil 2.85.	Gülburnu Köprüsü'nün çevresel titreşim testlerinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı.....	149
Şekil 2.86.	Gülburnu Köprüsü'nde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar	149
Şekil 2.87.	Gülburnu Köprüsü'nün birinci ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı	150
Şekil 2.88.	Gülburnu Köprüsü'nün ikinci ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı	152
Şekil 2.89.	Gülburnu Köprüsü'nün üçüncü ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı	153
Şekil 2.90.	Gülburnu Köprüsü'nün dördüncü ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı	155
Şekil 2.91.	Gülburnu Köprüsü'nün beşinci ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı	156
Şekil 2.92.	Gülburnu Köprüsü'nün ÇTY'den elde edilen mod şekilleri.....	159
Şekil 2.93.	Gülburnu Köprüsü'nün analitik ve deneysel modlarına ait MGK grafiği	161
Şekil 2.94.	1992 Erzincan depreminin ivme kaydı bileşenleri.....	162
Şekil 2.95.	Gülburnu Köprüsü'nde tabliye boyunca elde edilen yerdeğiştirmeler.....	163
Şekil 2.96.	Tabliye boyunca elde edilen maksimum yerdeğiştirmelerin zamana bağlı değişimi	164
Şekil 2.97.	Gülburnu Köprüsü'nde tabliye boyunca elde edilen eğilme momentleri	165
Şekil 2.98.	Tabliye boyunca elde edilen maksimum eğilme momentinin zamana bağlı değişimi	165
Şekil 2.99.	Ayak yüksekliği boyuca elde edilen boyuna yerdeğiştirmeler ve maksimum yerdeğiştirmelerin zamana bağlı değişimleri.....	166
Şekil 2.100.	Ayak yüksekliği boyunca elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerleri.....	167
Şekil 2.101.	Ayak yüksekliği boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri	168
Şekil 2.102.	Ayak yüksekliği boyuca elde edilen maksimum eğilme momenti değerlerinin zaman bağlı değişimi.....	168

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Segmentlerin inşası sırasında geçen sürenin ortalama iş bölümü (Kumar, 2003; Harputoğlu vd., 2007)	24
Tablo 1.2. APS 400 tipi titreştiriciye ait genel özellikler (URL-1, 2010)	34
Tablo 1.3. B&K 8210 tipi darbe çekicine ait bazı özellikler (URL-2, 2010)	35
Tablo 1.4. B&K 4507 B 005 ve 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler ile B&K 4506 B 003 üç eksenli ivmeölçere ait bazı özellikler (URL-(4-6), 2010)	38
Tablo 1.5. ÇTY'e dayalı bazı dinamik karakteristik belirleme yöntemleri	45
Tablo 2.1. Model köprünün inşasında kullanılan malzeme karışımları.....	55
Tablo 2.2. Küp numunelerin tek eksenli basınç deneylerinden elde edilen bazı özellikler	63
Tablo 2.3. Silindir numunelerin tek eksenli basınç deneylerinden elde edilen bazı özellikler	64
Tablo 2.4. Model köprünün sonlu eleman analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri	65
Tablo 2.5. Model köprünün analitik doğal frekans, periyot ve mod şekilleri.....	66
Tablo 2.6. Model köprünün deneysel ölçüm testlerine ait genel bilgiler.....	70
Tablo 2.7. Model köprünün birinci ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları	72
Tablo 2.8. Model köprünün ikinci ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları	73
Tablo 2.9. Model köprünün üçüncü ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları	75
Tablo 2.10. Model köprünün dördüncü ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları	77
Tablo 2.11. Model köprünün beşinci ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları	80
Tablo 2.12. Model köprünün altıncı ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları	81
Tablo 2.13. GFTAA ve SAB yöntemine göre elde edilen modların karşılaştırılması.....	83
Tablo 2.14. Model köprünün çevresel titreşim testlerinden GFTAA yöntemine göre elde edilen ilk sekiz doğal frekans ve sönüm oranları.....	84

Tablo 2.15. Model köprünün çevresel titreşim testlerinden SAB yöntemine göre elde edilen ilk sekiz doğal frekans ve sönüm oranları.....	85
Tablo 2.16. Model köprüye uygulanan zorlanmış titreşim testinden elde edilen doğal frekanslar	89
Tablo 2.17. Model köprünün SEY, ÇTY ve ZTY'e göre elde edilen doğal frekansları.....	91
Tablo 2.18. Kömürhan Köprüsü'nün analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri.....	100
Tablo 2.19. Kömürhan Köprüsü'nün analitik doğal frekans, periyot ve mod şekilleri	103
Tablo 2.20. Kömürhan Köprüsü'nün birinci ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları	111
Tablo 2.21. Kömürhan Köprüsü'nün ikinci ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları	112
Tablo 2.22. Kömürhan Köprüsü'nün üçüncü ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları	113
Tablo 2.23. Kömürhan Köprüsü'nün dördüncü ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları	115
Tablo 2.24. Kömürhan Köprüsü'nün beşinci ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları	117
Tablo 2.25. Kömürhan Köprüsü'nün altıncı ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları	118
Tablo 2.26. Kömürhan Köprüsü'nün Malatya tarafındaki parçasından alınan ölçüm değerleri	121
Tablo 2.27. Kömürhan Köprüsü'nün Elazığ tarafındaki parçasından alınan ölçüm değerleri	121
Tablo 2.28. Kömürhan Köprüsü'nün sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra elde edilen dinamik karakteristikleri.....	123
Tablo 2.29. Malzeme deformasyonlarının dikkate alınması için seçilmesi gereken analiz parametreleri.....	131
Tablo 2.30. İzolatörlerin modelleme parametreleri	145
Tablo 2.31. Gülburnu Köprüsü'nün analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri	145
Tablo 2.32. Gülburnu Köprüsü'nün analitik doğal frekans, periyot ve mod şekilleri	146
Tablo 2.33. Gülburnu Köprüsü'nün deneysel ölçüm testlerine ait genel bilgiler.....	149
Tablo 2.34. Gülburnu Köprüsü'nün birinci ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları	151
Tablo 2.35. Gülburnu Köprüsü'nün ikinci ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları	153
Tablo 2.36. Gülburnu Köprüsü'nün üçüncü ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları	155

Tablo 2.37. Gülburnu Köprüsü'nün dördüncü ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları	156
Tablo 2.38. Gülburnu Köprüsü'nün beşinci ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları	158
Tablo 2.39. Gülburnu Köprüsü'nün sonlu eleman model iyileştirilmesinde dikkate alınan malzeme özellikleri	160
Tablo 2.40. Gülburnu Köprüsü'nün sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra elde edilen doğal frekansları	161
Tablo 2.41. Gülburnu Köprüsü'nün analizleri sonucunda ayaklarda elde edilen maksimum yerdeğiştirmeler.....	166
Tablo 2.42. İzolatör yüksekliği boyunca elde edilen yerdeğiştirmeler ve kesit tesirleri ..	169

SEMBOLLER DİZİNİ

A_c	Kesit alanı
A_k	Tepki sinyalinin GSY fonksiyonuna ait k . artık değer matrisi
A_*	Durum matrisi
a_0, a_n, b_n	Fourier serisi katsayıları
B_*	Veri matrisi
C	Sistem sönüm matrisi
C_*	Sistem davranış matrisi
ÇTY	Çevresel Titreşim Yöntemi
D_*	Doğrudan iletim matrisi
D_{sil}	Silindir numune çapı
E_*	Değer operatörü
$E_{ci}(t)$	t günlük betonun elastisite modülü
E_{ci}	Betonun 28 günlük elastisite modülü
$F(t)$	Kuvvet vektörü
FDF	Frekans Davranış Fonksiyonu
f	Frekans
$f_{cm}(t)$	t günlük bir betonun basınç dayanımı
f_{cm}	Betonun 28 günlük basınç dayanımı
$f_{küp}$	Küp numune basınç dayanımı
f_{sil}	Silindir numune basınç dayanımı
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_{sil}	Silindir numune yüksekliği
\mathbf{K}	Sistem rijitlik matrisi
\mathbf{M}	Sistem kütle matrisi
\mathbf{R}	Sisteme etkiyen ve zamanla değişen dış yük vektörü
RH	% olarak atmosferdeki nem oranı
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
t_0	Yükleme anındaki betonun yaşı
\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
$\mathbf{Y}_k(w)$	Frekans tanım alanındaki etki fonksiyonu
ZTY	Zorlanmış Titreşim Yöntemi
α	Faz açısı
$\beta_{cc}(t)$	Betonun yaşına bağlı bir katsayı
β_c	Yüklemeden sonra devam eden sünme
β_s	Zamana bağlı devam eden büzölmeyi gösteren bir katsayı
β_{sc}	Çimento tipine bağlı olarak değişen bir katsayı
$\sigma_c(t_0)$	t_0 anındaki yüklemeye karşılık gelen gerilme

δ_{pq}	Kronecker delta
μ	Poisson oranı
Ψ_a	Analitik mod şekil vektörü
Ψ_d	Deneysel mod şekil vektörü
Ψ	Serbest titreşim genliğini
$\phi(t, t_0)$	Sünme katsayısı
ω	Açısal frekans
ρ_t	t saat sonraki relaksasyon
λ	Özdeğer
λ_k	Kutup fonksiyonu
*	Kompleks eşlenik

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Köprüler, geçmişî günümüze bağlayan ve yıllara meydan okuyan önemli mühendislik yapılarıdır. Görünüşleri, bıraktıkları etkiler, üzerlerinden geçerken hissettirdikleri, çevrelerinde barındırdıkları ve konumlarıyla birbirinden farklı özellikler içeren köprüler, yüzyıllardır insanları birbirlerine kavuşturmaktadırlar. Ülkemizde yer alan ve karayolları üzerindeki önemli yapılardan biri olan köprüler, ilk dönemlerinde dar, küçük açıklıklı ve hafif yükleri taşıyabilecek nitelikte kâgir ve ahşap malzemelerden yapılırken; günümüzde bu köprülerin yerini uzun açıklıklı betonarme ve çelik köprüler almıştır. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün kuruluşu ile birlikte köprü yapımına hız verilmiş ve son yıllarda yeni tekniklerden yararlanılarak öngerilmeli ve ardgermeli betonarme köprüler yapılmaya başlanmıştır. Özellikle büyük nehirler, baraj gölleri ve derin vadi geçişlerinde uzun açıklıklı ve yüksek karayolu köprüleri inşa edilmektedir. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün 2009 Ocak ayına ait istatistiksel verileri (TCK, 2010) dikkate alındığında, Ülkemizde toplam 256 km uzunluğunda 5860 tane karayolu köprüsü bulunmaktadır. Bu köprülerin, toplam 239 km uzunluğa sahip 5494 tanesi betonarme taşıyıcı sisteme ve malzeme özelliğine sahiptir (TCK, 2010).

Betonarme karayolu köprülerinin yüksek yapım maliyetleri ve buldukları bölgelerdeki lojistik önemleri dikkate alındığında, bu tür mühendislik yapılarının dinamik etkiler altındaki yapısal davranışlarının çok iyi belirlenmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Özellikle, Ülkemizin aktif bir deprem kuşağı üzerinde bulunması, karayolu köprülerinin projelendirilmesinde ve uygulanmasında depremin önemli bir dinamik parametre olarak dikkate alınmasını zorunlu kılmaktadır. Çünkü, bu tür köprülerin depremlerden zarar görmesi, can ve mal kaybının yanında şehirlerarası ulaşım bağlantısının da yok olması anlamına gelmektedir.

Mühendislik yapılarının dinamik etkiler altındaki yapısal davranışları, doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı olarak tanımlanan dinamik karakteristiklere bağlı olarak belirlenmektedir. Günümüzde dinamik karakteristikler, yapıların proje verileri dikkate alınarak belirlenen eleman boyutları, malzeme özellikleri ve sınır şartlarına göre

oluşturulan sonlu eleman modellerinin modal (serbest titreşim) analizleri sonucunda analitik olarak belirlenmektedir. Fakat, analizler sırasında dikkate alınan parametreler, yapı malzemesinin zamanla dayanımını yitirmesi, yapının inşası sırasında gerçekleşen işçilik hataları, yapının maruz kaldığı farklı yüklemeler sonucu oluşan çatlamlar, yorulmalar, mesnet çökmeleri gibi nedenlerden dolayı değişime uğramış ve yapı dinamik karakteristikleri zaman içerisinde proje değerlerinden uzaklaşmış olabilmektedir. Dolayısıyla, analitik olarak belirlenen dinamik karakteristiklerin, yapıların deprem davranışlarının belirlenmesinde kullanılmasıyla doğru olmayan analiz sonuçlarının elde edilebileceği düşünülmektedir. Bu nedenle, yapı dinamik karakteristiklerinin analitik yöntemlerin yanında deneysel yöntemlerle de belirlenmesi gerekmektedir. Deneysel yöntemler doğrudan yapı üzerine uygulandığından elde edilen dinamik karakteristiklerde yapının o andaki mevcut durumunu yansıtmaktadır.

Yapıların dinamik karakteristiklerinin deneysel ölçüm yöntemlerine bağlı olarak belirlenmesinde Deneysel Modal Analiz yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, yapı üzerinde sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen modal hareket noktalarına hassas ivmeölçerler yerleştirmektedir. İvmeölçerlerden gelen titreşim sinyalleri veri toplama ünitesi yardımıyla toplanmakta ve güncel yazılımlar kullanılarak dinamik karakteristikler elde edilmektedir. Deneysel Modal Analiz yöntemi, Zorlanmış Titreşim Yöntemi ve Çevresel Titreşim Yöntemi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Zorlanmış Titreşim Yöntemi'nde, yapı bilinen ve ölçülebilen bir etki ile (sarma tablası, darbe çekici, sarsıcılar vd.) titreştirilmekte ve yapının bu etkiye verdiği tepki ölçülmektedir. Çevresel Titreşim Yöntemi'nde ise yapının çevresel (doğal) bir etki ile (rüzgâr, taşıt yükü, deprem, patlatma veya yaya hareketi gibi) titreştirildiği kabul edilmekte ve yapının bu etkiye göstermiş olduğu tepki ölçülmektedir. Tepkilerin ölçülüp değerlendirilmesinde frekans ve zaman tanım alanına dayalı birçok yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanılan yöntemlerin matematik tabanları aynı olup, veri işleme ve denklem çözme teknikleri ile matris dizilişleri birbirinden farklı özellikler içermektedir.

Dinamik karakteristiklerin analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmesi, elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve sonuçlar arasındaki farklılıkların yorumlanması ihtiyacını beraberinde getirmektedir. Genellikle oluşabilecek farklılıklar, sonlu eleman modeline dayalı analitik çözümler sırasında dikkate alınan belirsiz parametrelerden (malzeme ve kesit özellikleri, sınır şartları) kaynaklanmaktadır. Analitik ve deneysel dinamik karakteristikler arasındaki farklılık %5-10 civarında ise, analitik dinamik

karakteristiklerin yapının mevcut durumunu yansıttığı kabul edilmektedir. Fakat bu değer %5-10'dan büyük ise analitik dinamik karakteristiklerin yapının mevcut durumunu yansıtmadığı kabul edilmektedir. Bu durumda, yapının sonlu eleman modelinin, deneysel ölçüm verilerine göre iyileştirilmesi gerekmektedir. Böylelikle sonuçlar arasındaki farklılıklar minimum seviyeye indirilmekte ve yapının mevcut durumunu yansıtan sonlu eleman modeli elde edilmektedir. Sonlu eleman model iyileştirilmesi sırasında dikkate alınan belirsiz parametreler, deneme yanılma yöntemine göre veya bir optimizasyon algoritması kullanılarak belirlenebilmektedir.

Deprem gibi dinamik etkiler altında oluşabilecek kesit tesirlerinin hesaplanmasında yapıların deneysel ölçüm yöntemlerine göre iyileştirilen sonlu eleman modellerinin kullanılması gerekmektedir. Böylelikle, hem yapılar için daha gerçekçi analiz sonuçlarının elde edilmesi hem de deneysel ölçümlerin dinamik davranış üzerindeki etkisinin belirlenmesi sağlanmaktadır.

1.2. Karayolu Köprülerinin Dinamik Davranışı ile İlgili Çalışmalar

Bu kısımda, karayolu köprülerinin dinamik davranışlarının analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak belirlendiği çalışmalara yer verilmektedir. 1910'lu yıllardan itibaren yapıların dinamik davranışlarının analitik yöntemler kullanılarak belirlenmesi devam etmektedir. İlerleyen bilgisayar teknolojisi ve analiz yöntemleri de dikkate alındığında, günümüze kadar karayolu köprüleri ile ilgili yapılan birçok analitik çalışmaya rastlamak mümkündür. Bu nedenle, tezin literatür kısmında genellikle son 20 yıl içerisinde yapılan çalışmalara yer verilmektedir.

1.2.1. Analitik Çalışmalar

Karayolu köprülerinin dinamik karakteristiklerinin ve dinamik etkiler altındaki davranışlarının analitik olarak belirlenmesi konusunda geçmişten günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından çeşitli çalışmalar yapılmıştır. İlk dönemlerde yapılan çalışmalarda karayolu köprülerinin statik ve dinamik etkiler altındaki lineer davranışları çeşitli modelleme teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Daha sonra, lineer analiz sonuçlarının köprülerin yapısal davranışlarını daha gerçekçi bir şekilde yansıtmaları amacıyla sonlu

eleman modellemelerinde yapı-zemin etkileşim problemi dikkate alınmış ve analizler gerçekleştirilmiştir. Özellikle, 1990-1999 yılları arasında Amerika, Japonya, Tayvan ve Türkiye’de meydana gelen büyük depremler, köprülerin analizlerinde lineer olmayan davranışın dikkate alınmasının önemini ortaya koymuş ve bu durum araştırmacılar tarafından detaylı olarak incelenmiştir. Deprem gibi dinamik etkiler altında birçok köprüde meydana gelen hasarlar ve yıkılmalar karayolu köprülerinin dinamik etkilerden daha az etkilenmesini sağlayan izolasyon sisteminin ortaya çıkmasını ve bu sistemin sonlu eleman analizlerinde dikkate alınmasını zorunlu hale getirmiştir (Li, 1989; Spyrakos, 1990; Li, 1992; Spyrakos, 1992; Constantinou vd., 1993; Helba ve Kennedy, 1994; Kakinuma vd., 1994; Shahrooz vd., 1994; Monti vd., 1995; Thakkar ve Maheshwari, 1995; Zheng ve Takeda, 1995; Monti vd., 1996; Adanur, 1997; Alaylıoğlu ve Alaylıoğlu, 1997; Kawashima vd., 1997; Yashinsky, 1998; Casas, 1999; Mutobe ve Cooper, 1999; Sritharan vd., 2000; Vlassis ve Spyrakos, 2001; Chaudhary vd., 2002; Park vd., 2002; Song vd., 2002; Adanur, 2003; Spyrakos ve Loannidis, 2003; Tongaonkar ve Jangid, 2003; Ateş, 2004; Ateş vd., 2004; Aref vd., 2005; Kim vd., 2006).

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

Saiidi vd. (1998), Amerika’nın Nevada eyaleti sınırları içerisinde bulunan Reno-Sparks bölgesindeki 26 adet köprünün yapısal performanslarını belirlemişlerdir. Analizler sonrasında köprü taşıyıcı sistem elemanlarının yerdeğiştirme davranışları, kesit tesirleri ve süneklik düzeyleri elde edilmiştir. Çalışma kapsamında, maksimum ivme değeri 0.3g olan muhtemel bir deprem için köprü ayaklarında oluşabilecek hasarlar değerlendirilmiştir.

Friyba ve Pirner (2001), karayolu köprülerinin dinamik karakteristiklerini ve statik yükler altındaki lineer davranışlarını analitik olarak belirlemişlerdir.

Chaudhary vd. (2001a), taban izolasyonlu karayolu köprülerinin dinamik davranışını yapı-zemin etkileşiminin etkisini farklı analiz yöntemlerini dikkate alarak elde etmişlerdir.

Çalışma kapsamında, farklı taşıyıcı sisteme sahip dört adet karayolu köprüsü örnek olarak seçilmiştir. Köprülerin lineer analizleri 18 ayrı deprem kaydı için gerçekleştirilmiş, zemin, ayak, tabliye ve izolatörlerden (sismik ayırıcı) gerekli analiz verileri toplanmıştır. Çalışmadan, yapı-zemin etkileşiminin köprülerinin dinamik davranışlarının daha gerçekçi bir şekilde belirlenmesi için dikkate alınmasının gerekliliği vurgulanmış, bu etkinin köprü taşıyıcı sistem elemanlarından kolon ve temel rijitliğine bağlı olarak daha belirgin bir şekilde ortaya çıktığı belirtilmiştir.

Chaudhary vd. (2001b), Japonya'da bulunan Yama-age köprüsünün dinamik karakteristiklerini ve yapısal performansını köprünün sonlu eleman analizlerini gerçekleştirerek elde etmişlerdir. Yama-age köprüsü Japonya'da inşa edilen ve yüksek sönümlü kauçuk mesnetlerle izolasyonu sağlanan ilk köprü olma özelliğine sahiptir. Köprü betonarme kutu kesitli, altı açıklıklı ve toplam 248 m uzunluğundadır. Köprü boyuna doğrultuda %5 eğime sahip olup, tabliye genişliği köprü uzunluğu boyunca 14.5 m'den 11.5 m'ye kadar azalmaktadır. Analizlerde kullanılan farklı ivme kayıtları için tabliye kirişi, ayak başlıkları ve zeminden elde edilen veriler işlenmiş, köprünün dinamik karakteristikleri ve yapısal performansı belirlenmiştir.

California Üniversitesi'nde, 2001 yılında geniş bir çalışma ekibi tarafından gerçekleştirilen araştırmalar sonucunda karayolu köprülerinin sismik etkiler altındaki tasarım kriterlerini içeren CALTRANS (2001) adlı bir rapor sunulmuştur. Bu raporda, karayolu köprülerinin dinamik etkiler altında göstereceği davranışı belirlerken, lineer olmayan analizlerin kullanılmasının elde edilecek sonuçların gerçeğe daha uygun ve daha güvenilir olmasında, lineer analizlere göre çok etkili olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, karayolu köprülerinin mevcut tasarım felsefesinde sismik enerjiyi dağıtmak amacıyla sünek elemanlarda elastik olmayan deformasyonlara ve belirli düzeyde hasara izin verildiği açıklanmış, bu nedenle de lineer olmayan analizlerin daha uygun olacağı belirtilmiştir.

Kappos vd. (2002), yapı-zemin etkileşiminin karayolu köprülerinin dinamik karakteristiklerine ve kesit tesirlerine olan etkisini analitik olarak belirlemişlerdir. Çalışma kapsamında, dört açıklıklı ve toplam 200 m uzunluğunda kutu kesit taşıyıcı sisteme sahip karayolu köprüsü örnek olarak seçilmiştir. Köprünün analizleri SAP2000 (2008) programında farklı eleman türleri için hem zemin dikkate alınmadan hem de sert, orta ve yumuşak zemin sınıfları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, zemine ait sönüm oranının dikkate alınıp alınmaması durumları için de analizler tekrarlanmıştır. Çalışma kapsamında, yapı-zemin etkileşiminin köprünün dinamik karakteristiklerine (frekans ve

mod şekli) ve kesit tesirlerine (yerdeğiştirmeler, kesme kuvveti ve maksimum moment) olan etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Ruangrassamee ve Kawashima (2003), deprem gibi güçlü yer hareketi etkisindeki karayolu köprülerinde, köprü ayaklarının mafsal bölgelerinde meydana gelen elastik olmayan deformasyonlardan ve derzlerle ayrılmış tabliyelerin birbirine çarpmasından dolayı birçok bölgede lineer olmayan davranışın ortaya çıkabileceğini ifade etmişlerdir. Lineer olmayan bu davranışın yarı aktif kontrol sistemi ile birlikte değişik tipte ve özellikteki sönümleyiciler kullanılarak azaltılabileceği vurgulanmıştır. Analizler sonucunda, sürtünmeli tipteki sönümleyicilerin yerdeğiştirmeler ve eleman kuvvetleri üzerinde daha olumlu etkiler ortaya çıkardığı belirtilmiştir. Ayrıca, derzlerle ayrılan tabliyelerin birbirine değmesinden meydana gelen geniş genlikli ivme davranışında bu sistemle birlikte önemli derecede azalmalar olduğu görülmüştür.

Dicleli ve Mansour (2003), karayolu köprülerinin dinamik etkilere karşı güçlendirilmesinde izolasyon sisteminin kullanılabilirliği üzerine çalışmışlardır. Çalışmada örnek olarak, 1970 yılında Amerika'nın Illinois eyaletinde inşa edilen üç açıklıklı ve toplam 32.5 m uzunluğundaki betonarme karayolu köprüsü seçilmiştir. Köprünün statik ve dinamik analiz sonuçlarına göre sismik güçlendirmeye ihtiyaç olduğu belirlenmiş, klasik güçlendirme yöntemlerine göre hem çalışma stratejisi belirlenmiş hem de genel bir maliyet hesabı çıkarılmıştır. Buna ilaveten, köprü taşıyıcı sistem elemanları üzerinde oluşan kesit tesirlerini minimum seviyeye indirmek ve gerekli olan güçlendirmeyi ortadan kaldırmak amacıyla sürtünmeli sarkaç sistemi kullanılarak köprünün izolasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, güçlendirilmesi gereken karayolu köprülerinde izolasyon sistemlerinin kullanılmasının hem analiz sonuçları hem de maliyet açısından klasik yöntemlere oranla daha avantajlı olduğu vurgulanmıştır.

Jangid (2004), her iki yatay doğrultuda deprem hareketine maruz ve kauçuk mesnetler ile izolasyonu yapılan karayolu köprülerinin deprem davranışlarının belirlenmesi üzerine çalışmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan mesnet, iki eksenli kuvvet-şekildeğiştirme eğrisi ve yatay iki doğrultuda yenilenme kuvvetleri arasında etkileşimin var olduğu kabulüyle modellenmiştir. Kütlelerin düğüm noktalarına toplandığı kabul edilmiş, adım adım integrasyon yöntemi kullanılarak çözülen hareket denklemleri ile izolasyonlu köprülerin yapısal davranışları belirlenmiştir. Ayrıca, izolasyonsuz köprüler içinde benzer çalışmalar gerçekleştirilmiş, izolatörlerin köprülerin yapısal davranışına olan etkisi karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir.

Sgambi (2004), betonarme köprü ayaklarının yapısal performanslarını lineer olmayan sonlu eleman analizleriyle analitik olarak belirlemiştir. Bu amaçla, değişken kesitli üstyapıya ve farklı geometrik-mekanik özelliklerdeki ayaklara sahip betonarme bir köprü seçilmiş, köprü ayaklarının rijitlikleri, dayanımı ve sünekliği de dikkate alınarak yatay ve düşey yükler altında lineer olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Değişken kesitli köprü ayaklarının alt kısmı yüksek rijitliğe sahip kutu kesitten, üst kısmı ise çift taraflı perde duvarlardan oluşmaktadır. Böylelikle, hem yatay yerdeğiştirmelere izin verilmiş hem de düşey yüklerin zemine direkt aktarılması sağlanmıştır. Analizlerde köprü ayakları katı sonlu eleman formülasyonu kullanılarak hesaba katılmıştır. Çalışma kapsamında, köprü ayağı kutu kesit yüksekliğinin ayak toplam yüksekliğine oranı değişken parametre olarak seçilerek, bu parametrenin değişimine bağlı olarak gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen yerdeğiştirmeler ve muhtemel çatlak-hasar bölgeleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Jeremic vd. (2004), 26 açıklıklı ve toplam 1140 m uzunluğundaki I-880 viyadüğünün sismik davranışına yapı-zemin etkileşiminin etkisini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Analizlerde ilk olarak, yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmayıp köprü ayaklarının temele rijit olarak bağlandığı kabul edilmiştir. İkinci modelde ise, yapı-zemin etkileşimi eşdeğer yay elemanlarla hesaplara katılmıştır. Yay elemanlarının mekanik özellikleri zemin içerisindeki kazıklı temellerin sonlu eleman analizleri sonucunda hesap edilmiştir. Analizlerde lineer elastik davranış gösteren temel-zemin sistemi ve 50 yıl içerisinde olma olasılığı %10 olan deprem yer hareketi dikkate alınmıştır. Analizler sonucunda, yapı-temel-zemin etkileşiminin dikkate alınmasıyla köprü yapısal elemanlarının bazılarında elde edilen kesit tesirlerinde azalmaların, bazılarında ise artmaların meydana geldiği belirtilmiştir.

Ateş vd. (2005), sürtünmeli sarkaç sistemi ile izolasyonu gerçekleştirilen beş açıklıklı ve toplam 293 m uzunluğundaki bir karayolu köprüsünün dinamik davranışını, değişerek yayılan yer hareketini kullanarak belirlemiştir. Farklı tür zemin sınıfları dikkate alınarak gerçekleştirilen analizler sonucunda dinamik karakteristikler ve kesit tesirleri elde edilmiştir. Çalışma kapsamında, izolasyonlu ve izolasyonsuz durumlar için elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmış, izolasyon sisteminin köprülerin dinamik davranışına olan etkisi vurgulanmıştır.

Wu vd. (2006), Japonya'da inşa edilen İkinci Saikai köprüsünün lineer olmayan sismik davranışını analitik olarak belirlemiştir. Köprü, üç açıklıklı ve toplam 300 m

uzunluğundadır. Köprünün sonlu eleman modeli proje verileri dikkate alınarak oluşturulmuş, analizler sonrasında doğal frekanslar ve mod şekilleri elde edilmiştir. Lineer olmayan dinamik analizlerde Hyogo-ken Nanbu depremi ivme kaydı kullanılmıştır. İvme kaydı köprüye düzlem dışı ve boyuna doğrultuda ayrı ayrı etkittirilmiş ve köprünün deprem davranışı elde edilmiştir. Çalışma kapsamında, her iki doğrultuda etkittirilen deprem kaydı için gerçekleştirilen lineer olmayan analizlerin daha uygun sonuçlar verdiği vurgulanmıştır.

Karim ve Yamazaki (2007), karayolu köprülerinin hasar eğrisine izolasyon sisteminin etkisini basitleştirilmiş yaklaşımlar kullanarak belirlemişlerdir. Uygulama olarak, Japonya'da karayolu köprülerinin sismik tasarım standartlarına göre boyutlandırılan farklı 30 izolasyonlu köprü modeli dikkate alınmıştır. Modellerde değişken parametre olarak ayak yüksekliği, genişliği ve yük/dayanım oranları seçilmiştir. Köprü modellerinin hasar eğrileri, Japonya, Amerika ve Taiwan'da meydana gelen farklı 5 depremden elde edilen 250 ivme kaydı için basitleştirilmiş yaklaşımlarla elde edilmiştir. Analizler sonucunda, köprü ayaklarının alt bölgelerinde meydana gelebilecek hasar olasılığının izolasyonsuz köprülerde daha fazla olduğu, fakat benzer yük/dayanım oranları dikkate alındığında kolon ayakların üst bölgelerinde ise bu olasılığın izolasyonlu köprülerde daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, bu çalışmada kullanılan basitleştirilmiş yaklaşımların Japonya'da benzer karakteristiklere sahip karayolu köprüleri için yapılacak çalışmalarda da kullanılabilirliği incelenmiştir.

Eröz ve DesRoches (2008), sürtünmeli sarkaç sistemi kullanılarak izolasyonu gerçekleştirilen üç açıklıklı ve toplam 91 m uzunluğundaki bir köprünün lineer olmayan dinamik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Analizlerde hem malzeme bakımından hem de geometri bakımından lineer olmama durumları dikkate alınmıştır. Çalışmada, sismik izolasyonda kullanılan sürtünmeli sarkaç sistemi için normal kuvvetin değişimini, sürtünme katsayısının değişimini, iki yönlü hareketi ve büyük deformasyonların etkisini dikkate alabilecek yeni bir model kullanılmıştır. Köprü ayakları ve kenar mesnetler ile tabliye kirişleri arasına izolatör yerleştirilmiştir. Kullanılan izolatörlerin birinci periyodunun 2.0-2.5 s ve toplam hareket kabiliyetinin 23 cm olduğu kabul edilmiştir. Çalışma sonunda, farklı deprem kayıtları için modelleme parametrelerindeki değişimin köprünün dinamik davranışına olan etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Chouw ve Hao (2008a), köprülerin dinamik davranışına yapı-zemin etkileşiminin ve değişerek yayılan yakın fay yer hareketinin etkisini analitik olarak belirlemişlerdir.

Değişerek yayılan yer hareketi, farklı dalga hızı ve tutarlılık fonksiyonlarına sahip yakın fay yer hareketi modeli ile hesaba katılmıştır. Köprü yapısal davranışının sayısal hesaplamalarında yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmıştır. Çalışmada, yapısal analizlerde ve tasarımlarda dikkate alınan düzgün yayılan yer hareketi kayıtlarının ve sabitleştirilmiş temelin köprü yapısal davranışının tam olarak belirlenmesinde etkili sonuçlar vermediği vurgulanmıştır. Ayrıca, çalışma ekibinin yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak düzgün ve değişerek yayılan yer hareketlerinin köprülerin taşıyıcı sistem elemanlarının dinamik davranışına olan etkisinin belirlenmesi konusunda gerçekleştirdikleri birçok çalışma mevcuttur (Hashimoto ve Chouw, 2003; Chouw ve Hao, 2004; Chouw ve Hao, 2005; Chouw ve Hao, 2008b).

Shattarat vd. (2008), köprülerin dinamik etkiler altındaki davranışlarının belirlenmesinde lineer analiz yöntemlerinin kullanıldığını, lineer olmayan davranışın ise yaklaşık olarak belirlenen düzeltme katsayıları ile hesap edildiğini belirtmişlerdir. Çalışma kapsamında, iki açıklı ve kutu kesitli betonarme bir karayolu köprüsünün sismik davranışı lineer analizler kullanılarak belirlenmiş, elde edilen analiz sonuçlarından lineer olmayan davranış hesaplanmıştır. Hesaplanan analiz sonuçlarının doğruluğunu belirlemek amacıyla, lineer olmayan analiz yöntemlerinden Kapasite Spektrumu ve Elastik Olmayan Talep Spektrumu yöntemleri kullanılmış, elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Erhan ve Dicleli (2009), yapı-zemin etkileşiminin ve uç ayak tabliye sürekliliğinin karayolu köprülerinin hareketli yük dağılımına etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, çeşitli yapısal, geoteknik ve geometrik özelliklere sahip çok sayıda integral (tek döküm ve monolitik çalışan) ve basit mesnetli köprülerin iki ve üç boyutlu yapısal modelleri oluşturularak hareketli yükler altındaki analizleri gerçekleştirilmiştir. İki ve üç boyutlu analiz sonuçlarından, temel zemininin köprülerin taşıyıcı sistem elemanları için hesaplanmış olan hareketli yük dağılım katsayılarına etkileri belirlenmiştir. Yapılan bu çalışma sonucunda, yapı-zemin etkileşiminin integral köprülerin uç ayağı için hesaplanmış olan hareketli yük dağılım katsayılarını, büyük ölçüde etkilediği ve uç ayak tabliye sürekliliğinin özellikle kısa açıklıklı köprülerdeki hareketli yük dağılım katsayıları üzerinde oldukça etkili olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, yapı-zemin etkileşiminin köprülerin yapısal davranışlarına olan etkisi, çalışma ekibi tarafından hazırlanan diğer bir çalışmada da incelenmiştir (Dicleli ve Erhan, 2010).

1.2.2. Deneysel Çalışmalar

Bu kısımda gerçek boyutlu karayolu köprülerinin ve laboratuvar ortamında hazırlanan model köprülerin dinamik davranışlarıyla ilgili literatürde yapılan deneysel çalışmalar sırasıyla laboratuvar ve arazi çalışmaları olarak verilmektedir.

1.2.2.1. Laboratuvar Çalışmaları

Salane ve Baldwin (1990), karayolu köprülerinin dinamik karakteristiklerini deneysel yöntemler ile belirlemek amacıyla üç açıklıklı bir karayolu köprüsünün 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 ölçümler Zorlanmış Titreşim Yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş, bu yöntemde titreştiriciler ve ivmeölçerler analitik modellemeler sonucunda elde edilen eğilme ve burulma modlarının maksimum deformasyon yapan noktalarına yerleştirilmiştir. Farklı 14 nokta dikkate alınarak gerçekleştirilen ölçümler sonucunda köprünün dinamik karakteristikleri elde edilmiş ve uç noktalara yapılan çıkmaların kırılması sonucunda frekans değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.

Park vd. (2001), betonarme köprü kolonlarının tekrarlanan deprem yer hareketleri altındaki sismik performansını incelemek amacıyla 1:6 ölçeğindeki iki açıklıklı bir köprü modelini laboratuvar ortamında sarsma tablası üzerinde modellemişlerdir. Kolonların deformasyonları ve hasar durumları, deneysel ölçüm verilerinden elde edilen rijitlik, enerji dağılımı, kalıcı deformasyon ve doğal frekanslardaki değişimler dikkate alınarak belirlenmiştir. Frekans tanım alanında yapılan titreşim analizleri sonucunda köprü kolonunda meydana gelen bozulmaların rijitlikle ters, enerji ve kalıcı deformasyonla doğru orantılı olduğu belirlenmiştir.

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 açıklıklı 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. Model köprünün sismik davranışının belirlenmesinde Eurocode 8'de (2000) orta sınıf zemin türleri için kabul edilen davranış spektrumu dikkate alınmıştır. 0.35g maksimum ivmeye sahip bu spektrum, belirli oranda ölçeklendirilerek sarma tablası üzerinde bulunan köprü modeline yatay doğrultuda uygulanarak sismik davranış 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), Deneysel Modal Analiz yöntemini kullanarak betonarme köprülerde yapısal hasarların belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Bu amaçla, 1920-1940 yılları arasında Avusturya'nın Victoria eyaletinde inşa edilen ve bölgenin en önemli köprüleri olarak nitelendirilen üç köprü örnek olarak seçilmiştir. Seçilen köprülerin 1:2.5 ölçekli modelleri Melbourne Üniversitesi laboratuvarlarında değişik parametreler dikkate alarak 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.

Carden vd. (2006a; 2006b) ve Monzon vd. (2007), köprülerin sismik performansına esnek çapraz güçlendirmenin etkisini deneysel olarak belirlemek amacıyla laboratuvar ortamında 1:2.5 ölçekli ve tek açıklıklı kirişli bir betonarme köprü modeli oluşturmuşlardır. Köprü modelinin uzunluğu 18.2 m, eni 2.5 m ve kiriş derinliği 60 cm olarak dikkate alınmıştır. Sarma tablası üzerinde gerçekleştirilen deneylerde 1940 yılında meydana gelen El Centro depreminin ölçeklendirilmiş kayıtları kullanılmıştır. Güçlendirmeden önce ve sonra yükleme testleri yapılmış, yerdeğiştirmeler ve kesit tesirlerindeki değişimler dikkate alınarak yanal güçlendirmenin etkisi deneysel olarak belirlenmiştir.

Johnson vd. (2006) ve Saiidi vd. (2007), köprülerin yapısal performansına değişik güçlendirme şekillerinin etkisini deneysel olarak belirlemek amacıyla laboratuvar ortamında dört açıklıklı betonarme bir köprü modeli oluşturmuşlardır.

Tsai vd. (2007), 30 m uzunluğunda, 9 m genişliğinde ve 11 m ayak yüksekliğine sahip tek açıklıklı bir betonarme köprünün 1:7.5 ölçekli modelini sarma tablası üzerinde oluşturmuşlardır. Köprü modelinin ayak uç noktaları ile tabliye arasına sismik izolatörler yerleştirilmiştir. Rijit cisim hareketini sağlayabilmek için köprü üzerine eklenmiş kütleler yerleştirilmiştir. Köprünün doğal frekansları transfer fonksiyonları kullanılarak, sönüm oranları ise yarım bant güç yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Köprünün dinamik davranışı 1940 El Centro depreminin değişik oranlarda ölçeklendirilmiş ivme kayıtları dikkate alınarak belirlenmiştir. Ölçeklendirilmiş ivme kayıtları köprü modeline boyuna doğrultuda etkittirilmiştir. Deneysel ölçümler sonucunda kolon ve tabliye arasına yerleştirilen sismik izolatörlerin dinamik karakteristikler, yerdeğiştirmeler ve kesit tesirleri üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Deneysel verilerin doğruluğunun belirlenebilmesi için köprü modelinin sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçların birbirleriyle uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir.

Ren vd. (2008), betonarme köprülerde kirişlerin ve tabliyenin ortak çalışmasını sağlayan ve kesme kuvvetlerini aktaran bağlantı elemanlarının yapısal davranışa etkisini belirlemek amacıyla Pilbara bölgesinde bulunan 852 nolu köprünün 1:3 ölçekli modeli laboratuvar ortamında oluşturmuşlardır. 6 m uzunluğa ve 1.09 m genişliğe sahip olan köprü modelinin tabliyesi altında kenarlarda ve ortada olmak üzere toplam üç sıra kiriş bulunmaktadır. Köprü modelinin oluşturulmasında değişik hasar durumlarının dikkate alınabilmesi için kesme bağlantı elemanları olarak hareket edebilen ankraj çubukları kullanılmıştır. Deneysel ölçümler farklı 29 noktadan Zorlanmış Titreşim Yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sırasında titreştirici olarak darbe çekicinden yararlanılmış, farklı ankraj bölgeleri için ölçüm sonuçları karşılaştırılarak frekans değişimine bağlı hasar durumları elde edilmiştir.

Dönmez ve Karakan (2009), zorlanmış titreşim testinin karayolu köprüleri üzerindeki uygulamasını vurgulamak amacı ile laboratuvar ortamında model bir köprü tasarlayıp imal etmişlerdir. Model köprünün tasarlanması sırasında dikkate alınan eleman boyutları ve kesit özellikleri herhangi bir köprünün ölçeklendirilmiş durumunu yansıtmamaktadır. Köprü toplam üç açıklıklı olup uç mesnetlerde aynı kotta zemine, ara mesnetlerde ise kule ayaklar ile iki farklı kotta zemine oturmaktadır. Zorlanmış titreşim testi kullanılarak

dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde frekans ve zaman davranış fonksiyonları kullanılmıştır. Elde edilen deneysel dinamik karakteristikler, köprünün sonlu eleman modeli kullanılarak belirlenen analitik sonuçlar ile karşılaştırılmış ve model köprünün kenar mesnet şartlarının oluşturulması sırasında yapılan bazı hatalar nedeniyle sonuçlar arasında (özellikle yüksek modlarda) farklılıklar olduğu belirtilmiştir.

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 (2008) 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 olduğu 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.

1.2.2.2. Arazi Çalışmaları

Salawu ve Williams (1995), hasarlı köprülerde yapılan onarım ve güçlendirme çalışmalarının köprülerin dinamik karakteristiklerine olan etkisini deneysel olarak belirlemişlerdir. Çalışma kapsamında örnek olarak altı açıklıklı ve 104 m uzunluğunda betonarme bir karayolu köprüsü seçilmiştir. Deneysel ölçümlerde Zorlanmış Titreşim Yöntemi kullanılmış, köprü orta noktasına yerleştirilen hidrolik sarsıcılar ile birlikte farklı 54 noktadan titreşim verileri toplanmıştır. Deneysel ölçümler onarım ve güçlendirme çalışmalarından önce ve sonra tekrarlanmıştır. Çalışmada, yapılan güçlendirme çalışmalarının mod şekillerini değiştirmedeği, doğal frekansları az da olsa azalttığı, sönüm oranlarını ise düşük frekanslarda artırıp, yüksek frekanslarda azalttığı vurgulanmıştır.

Pang (1996), doktora tezi kapsamında 1973 yılında inşa edilen ve Amerika'nın Oklahoma eyaletinin yakınlarında 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. Dinamik karakteristikleri deneysel olarak belirlemek amacıyla zorlanmış titreşim testleri gerçekleştirilmiş, bu yöntemde titreştirici olarak 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 130 m 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 0-6 Hz, sönüm oranı değerlerinin ise %0.38-1.58 arasında olduğu belirlenmiştir. Her iki yöntemden elde edilen modlar arasındaki uyum Modal Güvence Kriterleri oluşturularak incelenmiştir.

Farrar ve Jauregui (1998), köprülerin deneysel ölçüm verilerine bağlı yapısal hasarlarının belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Örnek olarak, üç açıklıklı ve betonarme bir karayolu köprüsü üzerinde deneysel ölçümler gerçekleştirilmiş, dinamik karakteristikler arasındaki farklılıklar değişik yöntemler yardımıyla değerlendirilerek yapısal hasarlar belirlenmiştir.

Köprülerin deneysel ölçüm verilerine bağlı dinamik davranışlarının belirlenmesi konusunda çalışma yapan birçok araştırmacı İsviçre'nin Bern ve Zürih eyaletlerini birbirine bağlayan Z24 köprüsünü örnek problem olarak dikkate almışlardır (Wahab ve Roeck, 1999; Peeters, 2000; Brincker vd., 2001; Luscher vd., 2001; Maeck vd., 2001; Peeters and DeRoeck, 2001; Peeters ve Ventura, 2003; Teughels ve DeRoeck, 2003; Teughels ve DeRoeck, 2004; Catbaş vd., 2006; Andersen vd., 2007; Reynders ve

DeRoeck, 2008). Z24 köprüsü kenar açıklıkları 14 m, ana açıklığı ise 30 m olmak üzere toplam üç açıklıklı ve 58 m uzunluğunda öngerilmeli betonarme bir köprüdür. Z24 köprüsünün sonlu eleman analizleri köprünün proje verileri dikkate alarak gerçekleştirmiş ve dinamik karakteristikler analitik olarak elde edilmiştir. Deneysel ölçümlerde hem zorlanmış titreşim testleri hem de çevresel titreşim testleri kullanılmıştır. Deneysel ölçümlere bağlı dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemleri kullanılmıştır. Köprünün sonlu eleman modeli malzeme özellikleri, kesit özellikleri ve sınır şartlarındaki değişimler dikkate alınarak iyileştirilmiş, böylelikle analitik ve deneysel dinamik karakteristikler arasındaki farklılıklar minimum düzeye indirilmiştir. Köprü ayaklarından bir tanesinde meydana gelen oturmalar sürekli ölçümler yapılarak izlenmiş ve yapısal hasarlar frekanslardaki değişimler dikkate alınarak belirlenmiştir.

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 davranışlar 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 karayolu köprüsünün yapısal davranışını analitik ve deneysel yöntemlerle belirlemiş, elde edilen değerleri karşılaştırmalı olarak incelemiştir.

Brownjohn vd. (2003), karayolu köprülerinin dinamik karakteristiklerinin yapısal güçlendirmelere bağlı olarak değişimi hakkında analitik ve deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Kim ve Stubbs (2003), köprülerde meydana gelen yapısal hasarların deneysel ölçüm verilerine bağlı olarak belirlenmesi üzerine çalışmışlardır.

Cantieni (2004), yapmış olduğu çalışmada mühendislik yapılarının deneysel ölçüm verilerine bağlı dinamik karakteristiklerinin 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 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 uzunluğundaki 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 Cumberland nehri üzerine inşa edilen altı açıklıklı ve 509 m uzunluğundaki betonarme bir köprünün çevresel titreşim testlerine dayalı sismik davranışının belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Köprünün sonlu eleman modeli SAP2000 (2008) programı kullanılarak analiz edilmiş ve dinamik karakteristikler analitik olarak elde edilmiştir. Deneysel ölçüm noktaları analitik olarak belirlenen mod şekilleri dikkate alınarak belirlenmiş, üç adet üç eksenli ivmeölçer kullanılarak titreşim verileri toplanmıştır. Elde edilen titreşim verilerinin karşılaştırılması için farklı sekiz ölçüm düzeneği kurulmuş, 0-12.5 Hz aralığında bir saat süren kayıtlar ile birlikte deneysel ölçümler tamamlanmıştır. Deneysel ölçüm verilerinin Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma yöntemi ve Stokastik Altalan Belirleme yöntemleri kullanılarak işlenmesiyle dinamik karakteristikler deneysel olarak elde edilmiştir. Köprünün sonlu eleman modeli, taşıyıcı sistem elemanların atalet momentleri ve rijitliklerindeki değişimler dikkate alınarak iyileştirilmiş ve köprünün mevcut durumunu yansıtan gerçek sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. 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 yaratacak sarsıcılar yerleştirilmiş ve titreşim verileri elde edilmiştir. Çevresel titreşim testlerinde ise köprü kutu kesiti içerisinde ve ayaklarından ölçümler alınmış, Geliştirilmiş

Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma ve Piklerin Seçilmesi yöntemleri kullanılarak dinamik karakteristikler elde edilmiştir.

El-Borgi vd. (2004), SidiBouAli köprüsünün dinamik karakteristiklerini analitik ve Deneysel Modal Analiz yöntemleriyle belirlemişlerdir. Köprünün sonlu eleman modeli geometrik özellikler dikkate alınarak SAP2000 (2008) programında oluşturulmuştur. Analitik modellemelerde üç ve dört düğüm noktalı kabuk elemanlar kullanılmış, malzemenin elastik, homojen ve izotropik olduğu kabul edilmiştir. Deneysel ölçümlerde Çevresel Titreşim Yöntemi kullanılmış olup, köprü üzerinde farklı 55 noktadan 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, 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), Alberta eyaletinde bulunan ve toplam 93 m uzunluğa sahip üç açıklıklı betonarme Crowchild köprüsünün sonlu eleman modelini deneysel ölçüm verilerine göre iyileştirmiştir. Köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli proje verileri dikkate alınarak M-FEM (1999) programında oluşturulmuş, analizler gerçekleştirilerek dinamik karakteristikler analitik olarak elde edilmiştir. Dinamik karakteristikleri ve yapısal deformasyonları deneysel olarak belirlemek amacıyla, köprü üzerinde statik yükleme deneyleri ve çevresel titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Analitik ve deneysel olarak belirlenen dinamik karakteristikler karşılaştırıldığında sonuçlar arasında maksimum %11'lik bir farkın olduğu tespit edilmiştir. Oluşan bu farkı minimum düzeye çekmek amacıyla, köprünün sonlu eleman modeli, malzeme özellikleri ve eleman rijitliklerindeki değişimler dikkate alınarak iyileştirilmiştir. Çalışmada, sonlu eleman model iyileştirmesi sonucunda elde edilen mod şekillerinin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu, doğal frekans değerleri arasındaki maksimum farkın %1 seviyelerine düştüğü belirtilmiştir.

Huth vd. (2005), İsviçre'nin Lucerne eyaleti yakınlarında bulunan Romeo köprüsünde zamana bağlı meydana gelen hasarları belirlemek amacıyla köprü üzerinden sekiz ay boyunca deneysel ölçümler yapmışlardır. Romeo köprüsü 95m uzunluğunda, üç açıklıklı, öngerilmeli ve kutu kesitli betonarme bir köprüdür. Deneysel ölçümler Çevresel Titreşim Yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş, sekiz ay boyunca devam eden ölçümlerde köprü kutu kesitinin alt tabliyesinde ciddi çatlakların olduğu gözlenmiştir. Fakat,

çatlakların mod şekillerinde ve doğal frekans değerlerinde çok küçük farklılıklar meydana getirdiği tespit edilmiştir. Buna rağmen, mod şekillerinde meydana gelen değişimlerin frekanslarda meydana gelen değişimlere göre daha baskın olduğu belirlenmiş, bu nedenle hasar seviyelerinin belirlenmesinde mod şekillerinin belirsiz parametre olarak seçilmesine karar verilmiştir. Çalışma kapsamında, farklı hasar seviyeleri için frekans ve mod şekilleri Modal Güvence Kriterleri dikkate alınarak karşılaştırılmıştır.

Zanardo vd. (2006), köprüler üzerinde gerçekleştirilen onarım ve güçlendirme çalışmalarının dinamik karakteristiklere etkisini deneysel olarak belirlemiştir. Çalışma kapsamında, Avusturya'da bulunan dört açıklıklı betonarme MRWA köprüsü örnek olarak seçilmiş, dinamik karakteristikler onarım ve güçlendirme çalışmalarından önce ve sonra zorlanmış titreşim testleriyle belirlenmiştir. Elde edilen deneysel veriler, SAP2000 (2008) programı kullanılarak belirlenen analitik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada, onarım ve güçlendirme çalışmalarının köprünün rijitliğini artırarak doğal frekanslar arasında %5-10 seviyelerinde bir artış meydana getirdiği belirtilmiştir.

Mertlich (2006), yapmış olduğu yüksek lisans tezinde sınır şartlarındaki değişimin dinamik karakteristikler üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla Amerika'nın Utah eyaletinde bulunan betonarme bir köprü üzerinde çeşitli deneysel ölçümler gerçekleştirmiştir. Deneysel ölçümlerde Zorlanmış Titreşim Yöntemi kullanılmış olup, üç farklı sınır şartı durumu için farklı 44 noktadan titreşim verileri toplanmıştır. Çalışmada, her bir sınır şartı durumu için elde edilen frekans değerleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ayrıca, her bir durum için elde edilen mod şekillerinin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu Modal Güvence Kriterleri hesap edilerek belirlenmiştir.

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 karşılaştırmalı 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), İtalya’da bulunan ve dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen 113.3 m uzunluğundaki Capriate köprüsünün dinamik karakteristiklerini Çevresel Titreşim Yöntemi ve radar ölçüm sistemi ile belirlemişlerdir. Çevresel Titreşim Yöntemi’nde köprü üzerinde farklı 32 noktadan çeşitli ölçümler alınmış, elde edilen titreşim verilerinden Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma yöntemi kullanılarak dinamik karakteristikler (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 dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Çalışmadan, her iki yöntem için elde edilen frekans değerlerinin ve mod şekillerinin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir.

Whelan vd. (2009), kablosuz bağlantıya sahip ölçüm sistemi ile köprülerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışma kapsamında, 17 m uzunluğunda betonarme tabliyeye sahip çelik kirişli bir köprü uygulama olarak seçilmiştir. Deneysel ölçümlerde rüzgâr ve taşıt yükleri gibi doğal titreştiricilerin dikkate alındığı Çevresel Titreşim Yöntemi kullanılmıştır. Farklı 20 noktadan toplanan ölçüm verileri frekans ve zaman tanım alanındaki yöntemler kullanılarak işlenmiş ve dinamik karakteristikler deneysel olarak elde edilmiştir. Deneysel verilerin işlenmesinde Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma ve Stokastik Altalan Belirleme yöntemleri kullanılmıştır. 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.

Liu vd. (2009), 235 m uzunluğundaki üç açıklıklı öngerilmeli ve kutu kesitli betonarme bir karayolu köprüsünün dinamik karakteristiklerini 12 ay boyunca farklı sıcaklık değişimleri altında çevresel titreşim testleriyle deneysel olarak belirlemişlerdir. Köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli ABAQUS (2004) programında analiz edilerek dinamik karakteristikler analitik olarak elde edilmiştir. Sonlu eleman modeli malzeme

özellikleri, sınır şartları ve seçilen eleman tipleri değiştirilerek iyileştirilmiş, böylelikle deneysel ve analitik dinamik karakteristikler arasındaki farklılıklar minimum düzeye indirilmiştir. Sismik davranışı, deneysel ölçüm verilerine göre iyileştirilen sonlu eleman modeli üzerinden 1967 Koyna depreminin ivme kayıtları dikkate alınarak belirlenmiştir.

Magalhaes vd. (2010), köprülere ait sönüm oranı değerlerinin deneysel ölçüm yöntemlerine bağlı olarak belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışma kapsamında örnek olarak, Porto'da bulunan bir karayolu köprüsü seçilmiştir. Rüzgâr ve taşıt yükü gibi çevresel etkiler altında gerçekleştirilen deneysel ölçüm verileri Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma ve Stokastik Altalan Belirleme Yöntemleri kullanılarak işlenmiş, dinamik karakteristikler deneysel olarak belirlenmiştir. Belirlenen dinamik karakteristik değerlerinin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu vurgulanmış, ilk iki frekans değeri 1.3 Hz ve 1.6 Hz, ilk iki sönüm değeri ise %1 ve %2 olarak elde edilmiştir.

1.3. Tezin Amacı ve İçeriği

Yapılan literatür araştırmasının ilk kısmında karayolu köprülerinin lineer ve lineer olmayan statik ve dinamik davranışlarını belirlemek amacıyla gerçekleştirilen birçok analitik çalışmanın olduğu görülmektedir. Bu çalışmaların en önemli amacı, inşaları sırasında çok büyük maddi kaynaklar harcanan ve buldukları bölgelerde önemli lojistik değer taşıyan karayolu köprülerinin yapısal davranışlarını en iyi şekilde temsil edecek analitik modeli ve analiz yöntemini geliştirmektir. Fakat bu çalışmalar sırasında kullanılan programların, analiz yöntemlerinin, seçilen eleman tipi ve özelliklerinin farklılık göstermesi elde edilen analitik sonuçların deneysel yöntemler kullanılarak desteklenmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Literatür araştırmasının ikinci kısmı incelendiğinde, karayolu köprülerinin dinamik davranışlarını deneysel yöntemler kullanılarak belirlemeye yönelik birçok çalışmanın bulunduğu, fakat dengeli konsol yöntemi gibi yapımı uzun yıllar süren ve bu süre boyunca farklı tür statik ve dinamik etkilere maruz kalan karayolu köprülerinin çevresel ve zorlanmış titreşim testlerini içeren yeterince deneysel çalışma yapılmadığı görülmüştür.

Literatüre katkı sağlayacağı düşünülen bu tez çalışmasında, dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen karayolu köprülerinin yapısal davranışlarının analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, hem laboratuvar ortamında küçük ölçekli bir köprü modeli için hem de arazi ortamında gerçek karayolu

köprüleri için analitik ve deneysel çalışmalar yapılarak, köprülerin dinamik davranışları bu tez kapsamında araştırılmaktadır. Laboratuvar uygulaması için kutu kesitli taşıyıcı sisteme sahip tipik bir model köprü, arazi çalışmaları kapsamında ise Ülkemizde bulunan ve dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen Kömürhan ve Gülburnu Köprüleri uygulama olarak seçilmiştir. Bu kapsamda hazırlanan tez üç bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, genel bilgiler üzerinde durulmakta, konuyla ilgili yapılmış çalışmalara yer verilmekte ve konunun önemi vurgulanmaktadır. Bu bölümde, tez çalışmasının analitik kısmını oluşturan; karayolu köprülerinin sonlu eleman yöntemiyle modellenmesi, sonlu eleman yöntemine dayalı dinamik formülasyon ve tez çalışmasının deneysel kısmını oluşturan; Deneysel Modal Analiz, deneysel ölçüm sistemleri ve yöntemleri, deneysel yöntemlere ait formülasyon gibi konulara yer verilmektedir. Bu bölümde son olarak, analitik ve deneysel sonuçların karşılaştırılmasının yapıldığı Modal Güvence Kriterinden bahsedilmektedir.

İkinci bölümde, tez kapsamında yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgular sunulmaktadır. Bu bölüm, laboratuvar ve arazi çalışmaları olarak iki kısma ayrılmaktadır. Laboratuvar çalışmalarının yer aldığı birinci kısımda, uygulama için seçilen kutu kesitli taşıyıcı sisteme sahip karayolu köprüsünün küçük ölçekli modelinin boyutlandırılması, laboratuvar ortamında inşası ve malzeme özelliklerini belirlemek için gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan bahsedilmektedir. Bu kısımda, laboratuvar modelinin sonlu eleman modeline ve uygulanan çevresel ve zorlanmış titreşim testlerine yer verilmektedir. Köprünün analitik ve deneysel dinamik karakteristikleri birbiriyle karşılaştırılmalı olarak sunulmaktadır. Arazi çalışmalarının yer aldığı ikinci kısımda ise, uygulama için seçilen Kömürhan Köprüsü'nün ve Gülburnu Köprüsü'nün sonlu eleman modellerinin oluşturulmasından ve köprülerde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerinden bahsedilmekte, köprülerin analitik ve deneysel dinamik karakteristikleri belirlenmektedir. Kömürhan Köprüsü'nün ve Gülburnu Köprüsü'nün sonlu eleman modelleri deneysel ölçüm sonuçlarına göre iyileştirilmekte, başlangıç ve iyileştirilmiş sonlu eleman modelleri için deprem analizlerine yer verilmektedir. Bu kısımda son olarak Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alındığı lineer olmayan analizlerine yer verilmekte ve analizlerden elde edilen bulgular sunulmaktadır.

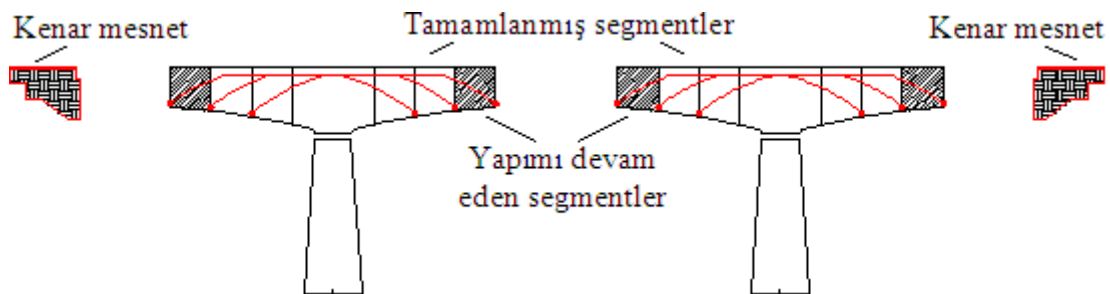
Üçüncü bölümde tez çalışmasından elde edilen sonuçlara ve yapılan önerilere yer verilmektedir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

1.4. Karayolu Köprülerinin Analitik Modellenmesi

Köprüler, geçmişi günümüze bağlayan en önemli mühendislik yapılarının başında gelmektedir. Stratejik bakımdan da çok önemli bir yeri olan köprülerin, değişik taşıyıcı sisteme ve malzeme özelliklerine sahip birçok uygulaması günümüzde mevcuttur. Fakat uzun açıklıkların geçilmesi gereken yerlerde genel olarak betonarme köprüler, asma köprüler ve kablolu köprüler tercih edilmektedir. Bu köprü tipleri arasında özellikle betonarme karayolu köprüleri yapım aşamalarından ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarından daha fazla etkilenmektedir. Betonarme karayolu köprüleri ile geniş ve uzun bir vadiyi maksimum açıklık ve minimum sayıda ayakla geçebilmek için en uygun ve en iyi yöntem yerinde dökme dengeli konsol yöntemidir.

1.4.1. Dengeli Konsol Yöntemi

Dengeli konsol yöntemi önerilmeli beton kullanılarak büyük açıklıkların geçilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, köprü üst yapısının her bir açıklığı, boyuna doğrultuda segment denilen parçalara bölünmekte ve bu segmentler parça parça inşa edilmektedir. Zeminden ek bir destek alınmadan, sabit bir noktadan dışarıya doğru konsol biçiminde uzanan ve yük taşıyabilen bir yapı ardışık adımlarla inşa edilmektedir. Köprü orta ayağının her iki tarafında birbirini dengeleyecek biçimde yapılan bu yapım tekniği Dengeli Konsol Yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Dengeli konsol yönteminde köprü üst yapısını oluşturan segmentlerin inşasına ait şematik gösterim Şekil 1.1'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Köprü üst yapısını oluşturan segmentlerin inşasına ait şematik gösterim

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. Bu yöntemle inşa edilen köprülerde genellikle kutu kesitli üstyapı formu kullanılmaktadır. Köprü genişliğine bağlı olarak tek veya çok gözlü kutu kesit kombinezonları yapılabilmektedir. Köprü üstyapısı orta ayaklar ile monolitik olarak birleşebildiği gibi, orta ayak başlığına yerleştirilen mesnetler vasıtasıyla da üst yapı çözümleri gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca, aynı anda birçok ayakta üretim yapılabilmesi sayesinde esneklik ve hızlı bir iş programı hazırlanabilmekte, segment boyunca aynı hareketli kalıp defalarca kullanılabilir. Açıklık ortaları sürekli olarak geçilebildiği gibi çeşitli çalışma prensiplerine göre hazırlanmış mafsal sistemleri de kullanılabilir.

1.4.2. Analizlerde Yapılan Kabüller

Köprüler gibi önemli mühendislik yapılarının tasarım aşamalarında ve ön boyutlandırmalarında genellikle sonlu eleman modelleri ve analizleri kullanılmaktadır. Analizler genellikle bilimsel dünyada kabul edilmiş ve yaygın olarak kullanılan sonlu eleman paket programları ile gerçekleştirilmektedir. Bu analizlerde inşa edilecek olan yapının statik, dinamik, lineer ve lineer olmayan davranışları belirli kabüller dikkate alınarak belirlenmektedir. Bu kabüllerin başında, yapıların sanki bir an içerisinde inşa edildiği, yüklendiği ve malzeme özelliklerinin inşa süresince değişmediği sıralanabilmektedir. Fakat dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen değişken kesitli uzun açıklıklı karayolu köprülerin yapımı yıllar alabilmektedir. Bu nedenle bu tür köprülerin sonlu eleman analizleri sırasında köprünün yapım aşamalarının ve malzeme özelliklerindeki değişimlerin dikkate alınması gerekmektedir. Çözümlemeler sırasında bu tür etkilerin dikkate alındığı sistemlerde eleman yüklerinin ve kesit tesirlerinin %50 civarında fazla elde edildiği görüldüğünde (Altunışık vd., 2009a; Altunışık vd., 2009b; Karakaplan vd., 2009; Altunışık vd., 2010a) konunun önemi daha da iyi anlaşılmaktadır.

1.4.3. Yapım Aşamalarının Dikkate Alınması

Dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen karayolu köprüleri genel olarak tabliye, ayaklar ve kenar mesnetlerden oluşmaktadır. Bu yöntemde 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 3-5 m uzunluğundaki birer segment imal edilmektedir. Kalıp arabası kalıbın, betonun ve beton içerisindeki teçhizatın ağırlığını, bir önce dökülmüş olan segmente basarak taşımaktadır. Beton yeterli mukavemeti kazanınca, daha önce betonda bırakılmış kanallardan yüksek mukavemetli çelik kablolar geçirilmekte ve ardgerme tatbik edilmektedir. Ardgerme tatbik edilir edilmez kalıp arabası bir segment boyu kadar ötelenmekte ve yeni bir döngüye başlanmaktadır. Ayakların iki tarafındaki birer segmentin imal edildiği bir döngü, yaklaşık olarak 1 haftada tamamlanmaktadır (Kumar, 2003; Harputoğlu vd., 2007). Bu şekilde orta ayaklardan başlayan köprü inşaatı bir taraftan kenar mesnetlere bir taraftan da orta açıklığa doğru ilerlemektedir. Köprü orta noktasına gelindiğinde her iki taraftan gelen segmentler ya bir mafsal düzeneğiyle ya da kilit segmenti ile birleştirilmektedir. Maksimum yerdeğiştirmeler köprünün bu bölümünde meydana geldiği için inşa aşamasına çok özen gösterilmesi gerekmektedir. Köprü üstyapısını oluşturan segmentlerin inşası için geçen sürenin ortalama iş bölümü Tablo 1.1’de özetlenmektedir.

Tablo 1.1. Segmentlerin inşası sırasında geçen sürenin ortalama iş bölümü (Kumar, 2003; Harputoğlu vd., 2007).

Süre	Yapılan iş
1. Gün	Kalıp arabasının kurulması
2. Gün	Segment donatısının ve ardgerme kablo kılıflarının döşenmesi
3. Gün	Segmentin beton dökümüne hazır hale getirilmesi
4. Gün	Beton dökülmesi
5. Gün	Betonun mukavemet kazanması
6. Gün	Betonun mukavemet kazanması
7. Gün	Ardgerme yapılması

Köprüler gibi önemli mühendislik yapılarının sonlu eleman analizlerinde yapım aşamalarının modellenmesi sırasında aşağıda belirtilen hususlara dikkat edilmelidir:

- Bu tür köprülerin projelendirilme aşamalarından trafiğe açılma sürelerine kadar geçen süre içerisindeki bütün yapım aşamalarının ve detaylarının belirlenmesi gerekmektedir.
- Köprü taşıyıcı sisteminin (ayaklar, tabliye, mesnetler, ardgerme kabloları) hangi yapım aşamaları izlenerek inşa edildiği ve bu aşamaların ne kadar sürdüğüne ait detaylı bir iş planı hazırlanmalıdır.
- Geometrik parametreler için “P-Delta Etkisi” dikkate alınmalıdır.
- Hazırlanan iş planına göre, sonlu eleman modeli yapım aşamaları dikkate alınarak adım adım modellenmeli ve her bir elemana değişik bir grup ismi atanmalıdır. Özellikle bu aşama, analizin ilerleyen bölümlerinde büyük bir kolaylık sağlamaktadır.
- Modellemeler sonrasında toplam yapım aşaması adımı ve süresi belirlenmeli, buna bağlı olarak her bir yapım aşaması süresince eklenen ve boşaltılan yüklemeler ilgili atama isimleri dikkate alınarak gerçekleştirilmelidir.
- Her bir adımdan elde edilen verilerin bir sonraki adıma eklenmesi için ilgili modüller seçilmeli, böylelikle analizlerin doğru sonuçlar vermesi sağlanmalıdır.
- Lineer olmayan parametreler literatüre uygun olarak seçilmelidir.

1.4.4. Zamana Bağlı Malzeme Deformasyonlarının Dikkate Alınması

Yapım aşamalarının dikkate alındığı analizlerde, karayolu köprüleri gibi önemli mühendislik yapıları sahada yüklenici firma tarafından nasıl inşa ediyorsa, statik hesap yapan mühendisler de bu yapım aşamalarını zamana bağlı olarak bilgisayar ortamında bir araya getirmelidirler. Bunu yapmaya çalışan proje mühendislerinin zamana bağlı malzeme deformasyonlarını göz önüne almaları gerekmektedir. Çünkü köprü yapımı sırasında betonun elastisite modülü, sünme ve rötre katsayıları iklim şartlarına bağlı olarak sürekli değişikliğe uğrayacaktır. Örnek vermek gerekir ise yeni dökülen bir beton yaştır ve sadece sisteme bir ağırlık getirmektedir. Bu beton 7 günlük, 28 günlük veya 1000 günlük iken dayanımı sürekli değişmektedir. Betonun yaş durumundan yapının ekonomik zamanını tamamlamasına kadar olan değişimler yapım aşaması çözümlemesinin içerisine eklenebilir ve bu sayede gelecekte olabilecek hatalar engellenmeye çalışılabilmektedir (Karakaplan

vd., 2009). Bu gibi etkilerin dikkate alınmaması, orta açıklığa gelindiğinde tabliyenin her iki tarafından gelen segmentler arası kot farkı oluşmasına veya orta açıklığın zaman içerisinde tehlikeli boyutta sabit sehim verebilmesine neden olabilmektedir.

1.4.4.1. Basınç Dayanımı

Betonun t yaşındaki basınç dayanımı çimento tipine, sıcaklığa ve kür şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Betonun herhangi bir yaştaki basınç dayanımı,

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t)f_{cm} \quad (1.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir (CEB-FIP, 1990). Burada, $\beta_{cc}(t)$ betonun yaşına bağlı bir katsayıdır ve aşağıdaki denklem yardımıyla hesap edilebilmektedir.

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t/t_1} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (1.2)$$

Burada, $f_{cm}(t)$ t günlük bir betonun basınç dayanımı, f_{cm} betonun 28 günlük basınç dayanımı, t betonun gün cinsinden yaşını göstermektedir. $t_1=1$ gündür ve s çimento tipine bağlı olarak değişen 0.20, 0.25 ve 0.38 gibi bir katsayıdır.

1.4.4.2. Betonun Yaşı

Betonun elastisite modülü zamanla birlikte değişmektedir. Elastisite modülü,

$$E_{ci}(t) = E_{ci} \sqrt{\beta_{cc}(t)} \quad (1.3)$$

şeklinde hesap edilmektedir (CEB-FIP, 1990). Burada, $E_{ci}(t)$ t günlük betonun elastisite modülünü, E_{ci} betonun 28 günlük elastisite modülünü, $\beta_{cc}(t)$ ise betonun yaşına bağlı olarak belirlenen bir katsayıyı ifade etmektedir.

1.4.4.3. Betonun Büzülmesi

The CEB-FIP (1990) şartnamesine göre betonun toplam büzülme şekildeğişirmesi,

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cso} \beta_s (t - t_s) \quad (1.4)$$

denklemleri ile hesap edilmektedir. Burada, ε_{cso} kavramsal büzülme katsayısını, β_s ise zamana bağlı devam eden büzülme gösteren bir katsayıyı ifade etmektedir. t betonun gün cinsinden yaşını, t_s ise beton için büzülmenin başladığı andan itibaren gün cinsinden yaşını göstermektedir. Kavramsal büzülme katsayısı aşağıdaki bağıntılar ile hesap edilebilmektedir.

$$\varepsilon_{cso} = \varepsilon_s(f_{cm}) \beta_{RH} \quad (1.5a)$$

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = \left[160 + 10 \beta_{sc} \left(9 - \frac{f_{cm}}{f_{cmo}} \right) \right] \quad (1.5b)$$

Burada, f_{cm} MPa cinsinden betonun 28 günlük basınç dayanımını göstermektedir. f_{cmo} 10MPa'dır. β_{sc} ise çimento tipine bağlı olarak 4 ve 8 arasında değişen bir katsayıyı ifade etmektedir.

$$\left. \begin{array}{ll} \beta_{RH} = -1.55 \beta_{sRH} & 40\% \leq RH < 90\% \\ \beta_{RH} = 0.25 & RH \geq 99\% \end{array} \right\} \quad (1.6)$$

Burada,

$$\beta_{sRH} = 1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \quad (1.7)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Burada, RH % olarak atmosferdeki nem oranını göstermektedir. RH_0 100%'dür. Zamana bağlı olarak devam eden büzülme,

$$\beta_s(t-t_s) = \sqrt{\frac{(t-t_s)/t_1}{350(h/h_0) + (t-t_s)/t_1}} \quad (1.8)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, h mm cinsinden ifade edilen kavramsal bir boyuttur ve $h = 2A_c/U$ ifadesi ile hesap edilmektedir. A_c kesit alanı, u ise atmosfer ile temas eden çevre uzunluğudur. $h_0=100\text{mm}$ ve $t_1=1$ gündür.

1.4.4.4. Betonun Sünmesi

Sünme etkisi CEB-FIP (1990) şartnamesinde sünme modeli olarak adlandırılan bir yaklaşımla hesaplanmaktadır. Bu yaklaşımda, t_0 anında sabit bir gerilme için,

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{ci}} \phi(t, t_0) \quad (1.9)$$

ifadesi dikkate alınmaktadır. Burada, $\sigma_c(t_0)$ t_0 anındaki yüklemeye karşılık gelen gerilmeyi, $\phi(t, t_0)$ ise sünme katsayısını göstermektedir. Bu katsayı,

$$\phi(t, t_0) = \beta_c(t - t_0) \phi_0 \quad (1.10)$$

ifadesi ile hesap edilmektedir. Burada, β_c yüklemekten sonra devam eden sünmeyi, t betonun gününü, t_0 ise yükleme anındaki betonun yaşını göstermektedir. Sünme katsayısı,

$$\phi_0 = \phi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) \quad (1.11a)$$

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)}{0.46 \left(\frac{h}{h_0} \right)^{1/3}} \quad (1.11b)$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{\sqrt{\frac{f_{cm}}{f_{cm0}}}} \quad (1.11c)$$

$$\beta(t_o) = \frac{1}{0.1 + \left(\frac{t_o}{t_1}\right)^{0.2}} \quad (1.11d)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Buradaki bütün parametreler yukarıda açıklanmaktadır. Zamana bağlı olarak devam eden sünme,

$$\beta_c(t-t_o) = \left[\frac{(t-t_o)/t_1}{\beta_H + (t-t_o)/t_1} \right] \quad (1.12a)$$

$$\beta_H = 150 \left\{ 1 + \left(1.2 \frac{RH}{RH_o} \right)^{18} \right\} \frac{h}{h_o} + 250 \leq 1500 \quad (1.12b)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, $t_1=1$ gün; $RH_o=100$ ve $h_o=100\text{mm}$ 'dir.

1.4.4.5. Çeliğin Relaksasyonu (Gevşemesi)

CEB-FIB (1990) şartnamesine göre, öngerilemeli çeliğin relaksasyonu 3 gruba ayrılmaktadır. Birinci grup, tel ve halat grupları için normal relaksasyonu; ikinci grup, tel ve halat grupları için gelişen ve devam eden relaksasyonu; son grup ise demir çubuklar ve donatılar için relaksasyonu göstermektedir.

30 yıla kadarki relaksasyon tahmini,

$$\rho_t = \rho_{1000} \left(\frac{t}{1000} \right)^k \quad (1.13)$$

bağıntısı ile hesap edilmektedir (CEB-FIB, 1990). Burada, ρ_t t saat sonraki relaksasyonu, ρ_{1000} ise 1000 saat sonraki relaksasyonu göstermektedir. $k \approx \log(\rho_{1000}/\rho_{100})$ yaklaşımında k 1. grup için 0.12, ikinci grup için 0.19 olarak dikkate alınmakta, ρ_{100} ise 100 saat sonraki relaksasyonu göstermektedir. Normalde, relaksasyonun uzun süreli değerleri için uzun süreli testler yapılmaktadır. 50 yıl üzeri relaksasyon değerleri için 1000 saatlik relaksasyonun 3 katı dikkate alınmaktadır.

1.5. Sonlu Eleman Yöntemine Dayalı Dinamik Formülasyon

1.5.1. Analitik Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Yapı sistemlerinin yer hareketi etkisindeki sönümlü hale ait ortak hareket denklemi,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{R} \quad (1.14)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada, \mathbf{M} , \mathbf{C} ve \mathbf{K} sistemin sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini, \mathbf{U} , $\dot{\mathbf{U}}$ ve $\ddot{\mathbf{U}}$ ise aynı sistemin rölatif yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. \mathbf{R} ise sisteme etkiyen ve zamanla değişen dış yük vektörüdür.

Bir karayolu köprüsüne veya herhangi bir yapı sistemine ait doğal frekanslar ve mod şekilleri, o sisteme ait sönümsüz serbest titreşim hareket denkleminin çözümünden elde edilmektedir. Bu durumda denklem (1.14)'te sönümün ve dış kuvvetin olmadığı kabul edilirse, sistemin zamana bağlı sönümsüz serbest titreşim hareket denklemi,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{0} \quad (1.15)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir (Chopra, 2006).

1.5.2. Newmark Yöntemine Göre Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, karayolu köprülerinin deprem güvenliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen dinamik analizlerde Newmark yöntemi tercih edilmiştir.

Newmark yönteminde, hız ve yerdeğiştirmeler t ile $t + \Delta t$ zamanı arasında,

$$\dot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t} = \dot{\mathbf{U}}_t + \left[(1-\gamma)\ddot{\mathbf{U}}_t + \gamma\ddot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t} \right] \Delta t \quad (1.16)$$

$$\mathbf{U}_{t+\Delta t} = \mathbf{U}_t + \dot{\mathbf{U}}_t(\Delta t) + \left[(0.5-\beta)\ddot{\mathbf{U}}_t + \beta\ddot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t} \right] (\Delta t)^2 \quad (1.17)$$

şeklindeki gibi ifade edilebilmektedir (Bathe, 1996; Chopra, 2006). Burada, \mathbf{U}_t , $\dot{\mathbf{U}}_t$, $\ddot{\mathbf{U}}_t$ sırasıyla t anındaki yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini, $\mathbf{U}_{t+\Delta t}$, $\dot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t}$, $\ddot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t}$ sırasıyla $t+1$ anındaki yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. Bu denklemde, β ve γ integrasyon parametreleri olup Δt zaman aralığındaki ivmenin değişimini tanımlamaktadır. Ayrıca bu parametreler, kullanılan yöntemin stabilite ve doğruluk karakteristiklerini belirlemektedir. $\gamma = \frac{1}{2}$ ve $\frac{1}{6} \leq \beta \leq \frac{1}{4}$ seçilmesi Newmark yönteminin doğruluğu için yeterli olmaktadır (Chopra, 2006).

Bölüm 1.5.1’de verilen (1.14) denkleminin t ve $t+1$ anındaki dengesi dikkate alındığında,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}_t + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}_t + \mathbf{K}\mathbf{U}_t = \mathbf{R}_t \quad (1.18)$$

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}_{t+1} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}_{t+1} + \mathbf{K}\mathbf{U}_{t+1} = \mathbf{R}_{t+1} \quad (1.19)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Eğer (1.19) denkleminin (1.18) denklemi çıkarılırsa artımsal hareket denklemi,

$$\mathbf{M}\Delta\ddot{\mathbf{U}}_t + \mathbf{C}\Delta\dot{\mathbf{U}}_t + \mathbf{K}\Delta\mathbf{U}_t = \Delta\mathbf{R}_t \quad (1.20)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada, Δ değişim operatörünü göstermek üzere,

$$\left. \begin{aligned} \Delta\ddot{\mathbf{U}}_t &= \ddot{\mathbf{U}}_{t+1} - \ddot{\mathbf{U}}_t \\ \Delta\dot{\mathbf{U}}_t &= \dot{\mathbf{U}}_{t+1} - \dot{\mathbf{U}}_t \\ \Delta\mathbf{U}_t &= \mathbf{U}_{t+1} - \mathbf{U}_t \end{aligned} \right\} \quad (1.21)$$

şeklinde ifade edilmektedir. (1.16) ve (1.17) denklemleri artımsal olarak düzenlenirse;

$$\Delta\dot{\mathbf{U}}_t = (\Delta t)\ddot{\mathbf{U}}_t + \gamma(\Delta t)\Delta\ddot{\mathbf{U}}_t \quad (1.22)$$

$$\Delta \mathbf{U}_t = (\Delta t) \dot{\mathbf{U}}_t + \frac{(\Delta t)^2}{2} \ddot{\mathbf{U}}_t + \beta (\Delta t)^2 \Delta \ddot{\mathbf{U}}_t \quad (1.23)$$

ifadeleri elde edilmektedir. (1.23) denkleminde $\Delta \ddot{\mathbf{U}}_t$ çekilecek olursa;

$$\Delta \ddot{\mathbf{U}}_t = \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} \Delta \mathbf{U}_t - \frac{1}{\beta (\Delta t)} \dot{\mathbf{U}}_t - \frac{1}{2\beta} \ddot{\mathbf{U}}_t \quad (1.24)$$

şeklinde elde edilmektedir. (1.24) denklemini (1.22) denkleminde yerine konursa,

$$\Delta \dot{\mathbf{U}}_t = \frac{\gamma}{\beta (\Delta t)} \Delta \mathbf{U}_t - \frac{\gamma}{\beta} \dot{\mathbf{U}}_t + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{\mathbf{U}}_t \quad (1.25)$$

şeklinde elde edilmektedir. (1.24) ve (1.25) denklemleri artımsal hareket denklemi (1.20)'de yerine konur ve düzenlenirse;

$$\left. \begin{aligned} \left(\mathbf{K} + \frac{\gamma}{\beta (\Delta t)} \mathbf{C} + \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} \mathbf{M} \right) \Delta \mathbf{U}_t &= \Delta \mathbf{R}_t + \left(\frac{1}{\beta (\Delta t)} \mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta} \mathbf{C} \right) \dot{\mathbf{U}}_t \\ &+ \left[\frac{1}{2\beta} \mathbf{M} + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \mathbf{C} \right] \ddot{\mathbf{U}}_t \end{aligned} \right\} \quad (1.26)$$

ifadesi elde edilmektedir. Dinamik hareket denkleminin, her Δt zaman aralığı içinde statik denge konumu sağlanarak çözümü elde edilmektedir. Burada adım adım çözümde ilk önce $\Delta \mathbf{U}_t$ (1.23) denkleminde bulunmaktadır. Daha sonra, (1.24) ve (1.25) denklemleri yardımıyla $\Delta \dot{\mathbf{U}}_t$ ve $\Delta \ddot{\mathbf{U}}_t$ elde edilmektedir. Bir sonraki adıma ait değerler, (1.27) denkleminde elde edilmektedir. İşlemler bu şekilde çözüm aralığı boyunca devam etmektedir.

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{U}_{t+1} &= \mathbf{U}_t + \Delta \mathbf{U}_t \\ \dot{\mathbf{U}}_{t+1} &= \dot{\mathbf{U}}_t + \Delta \dot{\mathbf{U}}_t \\ \ddot{\mathbf{U}}_{t+1} &= \ddot{\mathbf{U}}_t + \Delta \ddot{\mathbf{U}}_t \end{aligned} \right\} \quad (1.27)$$

1.6. Deneysel Modal Analiz Yöntemi

Deneysel Modal Analiz (DMA) yöntemi, mühendislik yapılarının dinamik karakteristikleri olarak adlandırılan doğal frekanslarını, mod şekillerini ve sönüm oranlarını deneysel ölçüm yöntemlerine bağlı olarak belirlemeye yarayan ve literatürde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. DMA yöntemi, yapı üzerine uygulanan yükün türüne göre Çevresel ve Zorlanmış Titreşim Yöntemleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Tez çalışmasının bu kısmında, yapıların Deneysel Modal Analizi'nde kullanılan ölçüm sistemi detaylı olarak irdelenmekte, kaliteli bir deneysel ölçümün nasıl gerçekleştirileceği anlatılmakta, dinamik karakteristiklerin hassas olarak elde edilebilmesi için dikkat edilmesi gereken hususlar bahsedilmekte ve son olarak da Çevresel ve Zorlanmış Titreşim Yöntemleri'ne ait formülasyonlar verilmektedir.

1.6.1. Deneysel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Ölçüm Sistemi

1.6.1.1. Titreştiriciler

Deneysel Modal Analiz yönteminde, yapıları titreştirmek amacıyla çevresel (doğal) ve yapay etkilerden yararlanılmaktadır. Çevresel etkiler olarak deprem, rüzgâr, dalga hareketi, yaya hareketi ve taşıt trafik yüklerinden; yapay titreştiriciler olarak sarsıcılar, sarsma tablaları ve darbe çekiçleri kullanılmaktadır. Köprüler gibi çok büyük ve rijit mühendislik yapılarının deneysel ölçümlerinde genellikle çevresel etkiler dikkate alınmaktadır. Bu şekilde, hem köprü trafik akışının devamı hem de ölçüm maliyetinin azalması sağlanmaktadır. Çünkü uzun açıklıklı köprülerin yapay titreştiriciler kullanılarak gerçekleştirilen ölçümlerinde birkaç tane sarsıcının kullanılması gerekebilmektedir. Yapay titreştiriciler genellikle kısa açıklıklı ve üzerinde fazla trafik akışının olmadığı köprülerde daha fazla kullanılmakta, böylelikle ölçülebilen etkilere karşı sistem davranışı değerlendirilebilmektedir. Yapay titreştiriciler kullanılacakları yapının hacimsel büyüklüğüne ve rijitliğine bağlı olarak seçilmektedirler.

1.6.1.1.1. Sarsıcılar

Sarsıcılar, genellikle mühendislik yapıları üzerinde gerçekleştirilen arazi çalışmalarında kullanılmaktadırlar. Seçilen yapının türüne ve frekans aralığına bağlı olarak sarsıcının mekanik özellikleri değiştirilebilmekte, böylelikle yapıya üç yönde farklı özelliklere sahip dalga hareketleri uygulanabilmektedir. Deneysel ölçümler sırasında sarsıcının yapıya ankastre olarak monte edilmesi yapıdan doğru bir titreşim sağlanabilmesi açısından oldukça önemlidir. Köprüler gibi büyük kütleli ve aktif durumdaki yapıları titreştirmek için kullanılan sarsıcı sayısı ve maliyeti oldukça fazla olmakta, yanlış kullanım durumlarında ise yapıya zarar verebilmektedir.

Sarsıcılar; mekanik, elektro-manyetik ve elektro-hidrolik olarak üçe ayrılmaktadır. Bu tez kapsamında, laboratuvar ortamında oluşturulan model köprünün deneysel ölçümlerinde APS 400 tipi mekanik sarsıcı kullanılmıştır. Sarsıcıya ait bazı fotoğraflar ve genel özellikler sırasıyla Şekil 1.2 ve Tablo 1.2’de verilmektedir.



Şekil 1.2. APS 400 tipi titreştirici

Tablo 1.2. APS 400 tipi titreştiriciye ait genel özellikler (URL-1, 2010)

Model	APS 400
Maksimum Kuvvet	445 N
Maksimum Hız	1 m/s
Frekans Aralığı	0-200 Hz
Uygulama Yönlere	Yatay ve Düşey
Uygulama Sıcaklığı	+5 ile +40 oC arası
Boyutlar	0.526 x 0.314 x 0.178 m
Toplam Kütle	73 kg

1.6.1.1.2. Darbe Çekiçleri

Darbe çekiçleri orta ölçekli mühendislik yapılarını veya laboratuvar modellerini titreştirmek için kullanılmaktadırlar. Bu bakımdan ölçülecek yapı boyutlarına ve malzeme özelliğine bağlı olarak darbe çekicini ve çekiç başlığını seçmek gerekmektedir. Özellikle köprüler gibi farklı malzeme özelliğine sahip (betonarme, çelik, yığma) yapılarda çalışma kapsamına bağlı olarak yumuşak, orta sert ve sert başlıklar kullanılabilir. Darbe çekiçlerinin içerisinde, verilen etkiyi ölçmek amacıyla hassas sensörler bulunmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, laboratuvar ortamında oluşturulan model köprünün deneysel ölçümlerini gerçekleştirmek için Brüel&Kjaer 8210 tipi darbe çekici kullanılmıştır. Darbe çekiçlerine ait fotoğraflar ve genel özellikler sırasıyla Şekil 1.3 ve Tablo 1.3'te verilmektedir.



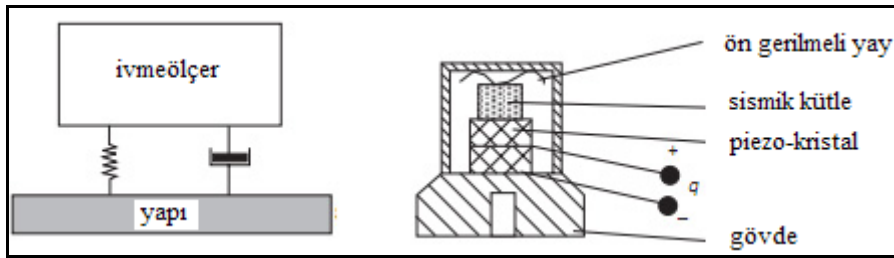
Şekil 1.3. B&K 8210 tipi darbe çekici

Tablo 1.3. B&K 8210 tipi darbe çekicine ait bazı özellikler (URL-2, 2010)

Model	B&K 8210
Hassasiyet	0.225 mV/N
Maksimum Kuvvet	22200 N
Çalışma Sıcaklığı	-73 ile +60 °C arası
Toplam Uzunluk	0.8966 m
Toplam Kütle	5.44 kg

1.6.1.2. İvmeölçerler

Deneysel Modal Analiz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen deneysel ölçümlerde en önemli nokta, seçilen yapının tipine ve frekans aralığına göre belirlenen ivmeölçerlerdir. İvmeölçerler yerleştirildikleri yapıdaki titreşimleri ölçmek için kullanılmaktadırlar. Farklı tipte ivmeölçerler mevcut olup, yapısal titreşimlerin ölçümünde genellikle piezoelektrik ivmeölçerler kullanılmaktadır. Şekil 1.4'te görüldüğü gibi bu tip ivmeölçerler, yay-kütle-sönümleyici sisteminden oluşmaktadır (Ramos, 2007). İvmeölçerlerin aktif kısmı ise kuartz veya seramik kristallerinden yapılmaktadır. Kuartz ya da seramik kristaller bir kuvvet altında kaldığında picocoulomb ($2.78E-12$ Amper saat) seviyesinde elektrik yükü üretmektedirler. Bu elektrik yükünün kristal üzerindeki değişimi yer çekimi ivmesinin değişimi ile doğru orantılıdır. İvmeölçerlerdeki sismik kütle ivme altında maruz kaldığı atalet kuvveti piezoelektrik kristale etkimekte ve ivme ile doğru orantılı bir elektrik sinyali çıkışı vermektedir. Bu ivmeölçerlerin içinde sinyali taşınabilir voltaj sinyaline çeviren bir sinyal koşullayıcı devre bulunmaktadır. Bu şekilde üretilen sinyal veri toplama ünitesine aktarılmaktadır (Sevim, 2010).



Şekil 1.4. Piezoelektrik tipi ivmeölçerin iç mekanizması (URL-3, 2010).

Bir mühendislik yapısının titreşim verilerinin doğru ve net bir şekilde elde edilebilmesi için kullanılacak ivmeölçer tipinin çok dikkatli seçilmesi gerekmektedir. Yapılacak çalışmanın amacına uygun olarak seçilmeyen ivmeölçerler ile gerçekleştirilen deneysel ölçümlerden kaliteli sinyaller alınması mümkün değildir. Bu nedenle, ivmeölçerleri ölçebileceği frekans aralığı, hassasiyeti, ölçebileceği maksimum ivme değeri ve çalışma sıcaklığına göre belirlemek gerekmektedir. Bu özellikler kısaca aşağıda açıklanmaktadır.

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

Yukarıda belirtilen mekanik ve fiziksel özellikler bilindiği takdirde doğru ivmeölçeri seçmek kolaylaşmaktadır. Örneğin, düşük frekansa sahip yapılarda yüksek hassasiyetli ivmeölçerler, yüksek frekansa sahip yapılarda ise düşük hassasiyetli ivmeölçerler seçilmelidir. Ayrıca kullanılacak ivmeölçerin ağırlıkları ve boyutları, ölçülecek yapının ağırlığı ve boyutlarından fazla olmamalıdır (Sevim, 2010).

Tez kapsamında, B&K 4507 B 005 ve B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler ile B&K 4506 B 003 tipi üç eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. Bu ivmeölçerlere ait bazı fotoğraflar ve genel özellikler sırasıyla Şekil 1.5 ve Tablo 1.4'te verilmektedir.



a) B&K 8340 b) B&K 4506 c) B&K 4507

Şekil 1.5. a) B&K 8340 tipi tek eksenli, b) B&K 4506 tipi üç eksenli ve c) B&K 4507 tipi tek eksenli ivmeölçerler

Tablo 1.4. B&K 4507 B 005 ve 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler ile B&K 4506 B 003 tipi üç eksenli ivmeölçere ait bazı özellikler (URL-(4-6), 2010)

Model	B&K 4507 B 005	B&K 8340	B&K 4506 B 003
Hassasiyet	1 V/g	10 V/g	0.5 V/g
Frekans Aralığı	0.4-6000 Hz	0.1-1500 Hz	0.3-2000 Hz
Maksimum İvme	±7 g	± 0.5 g	±14 g
Çalışma Sıcaklığı	-54 ile +100 °C arası	-51 ile +74 °C arası	-54 ile +100 °C arası
Boyutlar	10 x 10 x 10 mm	50.3 x 50.3 x 91.9 mm	17 x 17 x 17 mm
Toplam Kütle	4.6 gram	775 gram	18 gram

1.6.1.3. Veri Toplama Sistemi ve Sinyal İşleme

Veri toplama sistemi, veri toplama ünitesi ve bilgisayardan oluşmaktadır. Veri toplama ünitesi, ivmeölçerlerden gelen sinyalleri toplamak ve ilgili bilgisayar programına aktarmak için kullanılmaktadır. Bilgisayar programı ise, sinyallerin işlenmesinde gerekli arayüzü sağlamaktadır. Sinyal toplama ve işleme kısaca şu şekilde açıklanabilir.

İvmeölçerlerden veri toplama ünitesine aktarılan sinyaller genellikle hamdır. Yani sinyaller yapı titreşimlerinden ve ortamdaki gürültülerden oluşmaktadır. Ham sinyallerin kullanılması durumunda yapı davranışının doğru olarak belirlenebilmesi zorlaşmaktadır. Bu bakımdan veri toplama sisteminin en önemli işlevlerinden biri sinyal koşullamadır. Sinyal koşullama, ham sinyalleri istenen özelliklere getirme işlemidir. Bu işlem genellikle düşük seviyeli bir sinyalin kalitesini artırmak, gürültü sinyallerinin etkisini azaltmak, istenmeyen sinyalleri filtrelemek, gerekli durumlarda ivmeölçerlerdeki elektrik gücünü ayarlamak veya ivmeölçerlerin davranışlarının kontrol etmek için yapılmaktadır. Veri toplama sistemi içerisinde yer alan sinyal koşullandırıcılar bu işlemleri gerçekleştirmektedir. Bu işlemlerin en önemlisi istenmeyen sinyallerin filtrelenmesidir. İstenmeyen sinyaller, seçilen frekans ölçüm aralığı dışında kalan yüksek frekans sinyalleridir. Eğer sinyaller düşük bir hızda ölçülüyorsa yüksek frekans içeriğine sahip sinyaller, düşük frekanslara sahipmiş gibi algılanmakta ve yapılan ölçüm hatalı olmaktadır. Bu hatayı engellemek için ölçme hızı, en büyük frekansın en az iki katı seçilmelidir. Bu konuda daha fazla bilgi Heylen vd. (2007) ve Ramos'dan (2007) elde edilebilir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel ölçümlerde veri ünitesi olarak B&K 3560 C tipi 17 kanallı cihaz kullanılmıştır (Şekil 1.6). Bu cihaz, portatif olup iki adet batarya ile çalıştırılmakta ve elektrik olmadığı durumlarda 1-1.5 saat kadar ölçüm yapılabilmektedir.

Cihaza 17 adet tek eksenli ivmeölçer bağlanarak ölçümler gerçekleştirilebilmektedir. Fakat köprüler gibi uzun açıklıklı mühendislik yapılarının dinamik davranışlarının doğru elde edilebilmesi için daha fazla ivmeölçer kullanılması gerekmektedir. Bu gibi durumlarda, cihaz referanslı ölçüm yapmaya olanak sağlamaktadır. Referanslı ölçüm, mevcut ivmeölçerler kullanılarak aynı ölçüm içerisinde daha fazla noktadan ölçüm yapılmasıdır.



Şekil 1.6. B&K 3560 C tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi

Yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenebilmesi için ivmeölçerlerden veri, toplama ünitesine aktararak saklanan sinyallerin işlenmesi gerekmektedir. Bu adıma sinyal işleme ismi verilmektedir. Bu adım sinyallerin veri toplama ünitesinde sinyal koşullama işlemlerinden sonra bilgisayar ortamına aktarılmasıyla başlamaktadır. Sinyal işleme bilgisayarda geliştirilen özel yazılımlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Sinyaller bilgisayara zaman tanım alanında aktarılmaktadır. Fakat gerek pratik sebeplerden gerekse hesaplama gereksinimlerinden dolayı frekans tanım alanı tercih edilmektedir. Zaman tanım alanındaki sinyallerin frekans tanım alanına aktarılmasında Fourier serilerinden yararlanılmaktadır. $x(t)$ ile gösterilen periyodik bir sinyal sonsuz Fourier serisine açıldığında,

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \right] \quad (1.28)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Ramos, 2007). Burada, a_0 , a_n , b_n sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \end{aligned} \right\} \quad (1.29)$$

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

$$x_k = x(t_k) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi k}{N} n\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi k}{N} n\right) \right], \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1.30)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, a_0 , a_n , b_n sırasıyla aşağıdaki gibidir:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x_k \\ a_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \cos \frac{2\pi nk}{N} \\ b_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \sin \frac{2\pi nk}{N} \end{aligned} \right\} \quad (1.31)$$

Sinyal işleme sırasında bazı problemlerle karşılaşmaktadır. Bu problemlerin en önemlisi sızıntı hatasıdır. Sızıntı hatası, sinyal periyodunun tam katlı olmamasından yani sinyalin periyodik olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu hatayı azaltmak için ölçüm süresi uzun tutulmalıdır. Diğer bir çözüm ise pencereleme yöntemlerini kullanmaktır. Pencereleme yöntemleri sinyal periyodunu tam katlı hale getirerek sızıntı problemini ortadan kaldırmaktadır. Bu konuda daha fazla bilgi literatürden elde edilebilir (Heylen vd., 2007; Ramos, 2007; Şahin, 2009; Sevim, 2010).

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda; ivmeölçerlerin veri toplama ünitesine tanıtılmasında, ivmeölçerlerden sinyallerin alınarak veri toplama ünitesinde depolanmasında, depolanan sinyallerin sinyal koşullandırma işlemlerinin tamamlanmasında ve bilgisayara dayalı sinyal işleme programına aktarılmasında

Brüel&Kjaer Firması tarafından geliştirilen PULSE (2006) yazılımı kullanılmıştır. Çevresel titreşim testlerinden PULSE (2006) yazılımıyla alınan sinyallerin işlenmesinde ve dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde Operational Modal Analysis (OMA, 2006) yazılımı kullanılmış; zorlanmış titreşim testlerinden toplanan sinyaller ise özel bir sinyal işleme yazılımı olmadığından sadece PULSE (2006) yazılımında sinyal koşullama gerçekleştirilerek köprülere ait Frekans Davranış Fonksiyonları (FDF) elde edilmiştir.

1.6.2. Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile İlgili Genel Kurallar

Deneysel Modal Analiz yöntemi ile ilgili ilk çalışmalar 1940'lı yıllarda uzay ve astronomi bilimlerinde, daha sonra havacılık, makine ve otomotiv sektörlerinde gerçekleştirilmiştir. 1980'li yıllarda Zorlanmış Titreşim Yöntemi, 1990'lı yıllarda ise Çevresel Titreşim Yöntemi inşaat mühendisliği yapılarında kullanılmaya başlanmıştır (Chuntavan, 1993; Womack ve Halling, 1999; 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). Her iki yöntemin birbirine göre üstün tarafları vardır.

Yapıların çevresel etkilerle titreştirilemediği veya ortamda yapıyı titreştirecek seviyede doğal etki olmadığı durumlarda Zorlanmış Titreşim Yöntemi kullanılmaktadır. Zorlanmış titreşim testinde kullanılan darbe çekiçleri ve sarsıcılar hem pahalıdır hem uygulamaları pratik değildir ve mevcut yapıya zarar verebilmektedir. Ayrıca köprü gibi büyük mühendislik yapıları mevcut sarsıcılarla ancak lokal olarak titreştirilebilmektedir. Lokal titreşimlerden elde edilen veriler ise yapı bütünü değerlendirilmesinde hatalara neden olabilmektedirler. Bu nedenle günümüzde Çevresel Titreşim Yöntemi daha çok tercih edilmektedir. Çünkü çevresel titreşim testinde, yapı doğal etkilerle titreşmekte ve herhangi bir dış tetikleyiciye ihtiyaç duyulmamaktadır. Dolayısıyla uygulaması, zorlanmış titreşim testine göre hem kolay hem de daha ucuzdur. Yapı doğal etkiler altında titreştiğinden, yapıdan alınan sinyaller yapı bütünü kapsamaktadır. Bu yöntemde yapıya zarar verme riski neredeyse sıfırdır. Üstelik uygulama sırasında yapı kullanım amacına hizmete devam etmektedir (Catbaş, 1997; Schwarz ve Richardson, 1999; Hwang vd., 2000; Inaudi vd., 2000; Bayraktar vd., 2009g; Şahin, 2009; Altunışık vd., 2010b; 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 vd., 2010).

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

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

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

- Yapının bir bütün ve sürekli olduğu kabul edilmektedir. Diğer bir ifadeyle, yapının bir noktasında elde edilen davranışın bütün yapıyı temsil ettiği kabul edilmektedir. Köprüler gibi büyük yapıların, özellikle Zorlanmış Titreşim Yöntemi'ne göre yapılan Deneysel Modal Analizi'nde bu kabulün sağlanması oldukça zordur.

Deneysel Modal Analiz ölçümlerinin sağlıklı bir biçimde gerçekleştirilebilmesi için uygulamacıların hem Deneysel Modal Analiz yöntemi hem de ölçülecek yapı davranışı hakkında genel mühendislik bilgisine sahip olması gerekmektedir. Bu bakımdan uygulamacı test planını doğru bir şekilde yapmalıdır. İyi bir test planı aşağıdaki gibi hazırlanmalıdır:

- ❖ Ölçülecek yapı belirlenmelidir.
- ❖ Yapının dinamik karakteristikleri hakkında ön bilgiye sahip olunmalıdır. Belirlenmesi gereken mod sayısı, modları içeren frekans aralığı ve mod şekilleri bilinmelidir. Bu bilgilere deneysel ölçümden önce yapılacak sonlu eleman analizi ile yaklaşık olarak ulaşılabilir.

- ❖ Kullanılacak Deneysel Modal Analiz Yöntemi belirlenmelidir. Zorlanmış Titreşim Yöntemi veya Çevresel Titreşim Yöntemi'nden uygun olana karar verilmelidir.

- ❖ Ölçümlerde kullanılacak ivmeölçer tipi seçilmeli ve hangi noktalardan ölçüm alınacağı belirlenmelidir. İvmeölçer seçimiyle ilgili bilgiler Bölüm 1.6.1.2'de detaylıca anlatılmıştır. İvmeölçerler sadece yerleştirildikleri noktadaki sinyalleri algıladıklarından yapının mod şekillerini elde edecek şekilde, uygun bir sıklıkta yerleştirilmelidir. Çünkü deneysel mod şekilleri ivmeölçer noktalarının modal yerdeğiştirmelerin birleştirilmesinden

meydana gelmektedir. Eğer ivmeölçer noktaları yeterli sıklıkta değilse yapının mod şekillerinin hepsi elde edilemeyebilir. Mümkünse ivmeölçer noktaları ile sonlu eleman modelindeki serbest düğüm noktaları birbiriyle örtüşmelidir. İvmeölçer sayısının yetersiz kaldığı durumlarda referanslı ölçümler gerçekleştirilerek bu sorun ortadan kaldırılmalıdır. Bu husus analitik ve deneysel modların karşılaştırılması sırasında ayrıca önem teşkil etmektedir. Ayrıca ölçümler sırasında ivmeölçerlerin yapıyla tam bağlı olması yani yapı ile ivmeölçer arasında gevşeklik olmaması ve ivmeölçerlerin yağmurdan, manyetik alandan ve darbelerden korunması gerekmektedir.

- ❖ Yapı üzerine yerleştirilen ivmeölçerler veri toplama ünitesine tanıtılmalıdır. Sinyaller toplanmaya başlamadan önce frekans aralığı ve ölçüm hassasiyeti belirlenmelidir. Frekans aralığı ve ölçüm hassasiyeti, istenmeyen ortam sinyallerin ve gürültü sinyallerinin etkisini azaltmak için gereklidir. Yapı için frekans aralığı sonlu eleman analizinden yaklaşık olarak tespit edilebilmektedir.

- ❖ Ölçümlere başlanmadan önce, yapı üzerine yerleştirilen ivmeölçerlerin veri toplama ünitesine sinyal aktarıp aktaramadığı kontrol edilmelidir.

- ❖ Testlerde gerekli miktarda kaliteli sinyalin elde edilebilmesi için ölçüm süresinin doğru belirlenmesi gerekmektedir. Ölçüm süresinin belirlemesi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bendat ve Piersol'a (1986) göre minimum 17 dk, Caetano'ya (2000) göre, yapının en büyük periyodunun 240-1280 katı kadar ölçüm alınmalıdır. Rodrigues'e (2004) göre, yapının en büyük periyodunun 2000 katı kadar ölçüm alınmalıdır. Ramos'a (2007) göre, her testte 10 dk'den az olmamak kaydıyla, yapının en büyük periyodunun 1000 katı kadar ölçüm alınmalıdır.

- ❖ Ölçümler bittikten sonra, veri toplama sistemine ait yazılım kullanılarak ham sinyaller koşullama işlemine tabi tutulmakta ve işlenmek üzere bilgisayara dayalı sinyal işleme ve dinamik karakteristikleri belirleme programına aktarılmaktadır. Burada sinyaller işlenerek, hem frekans tanım alanında hem de zaman tanım alanında yapının doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları belirlenmektedir.

1.6.3. Deneysel Modal Analiz Yöntemine Ait Formülasyon

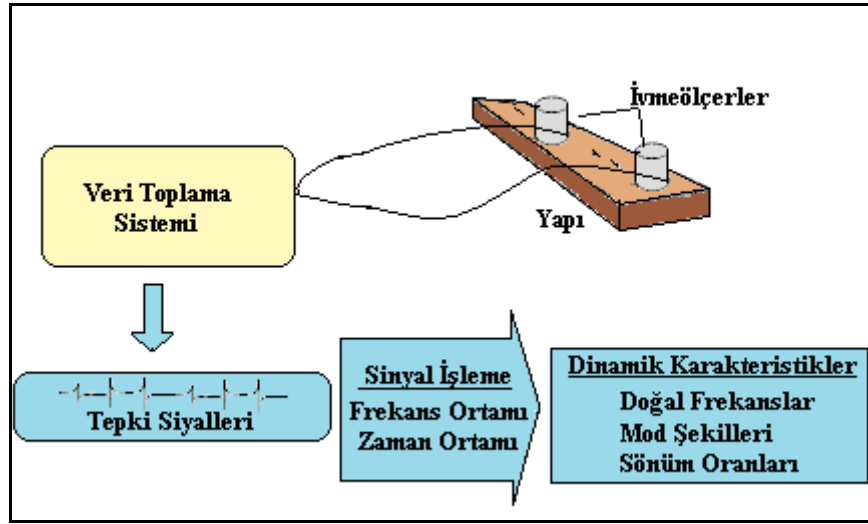
1.6.3.1. Çevresel Titreşim Yöntemi

Çevresel Titreşim Yöntemi'nde, etki kuvveti ölçülmediğinden Etki Davranış Fonksiyonu belirlenmemektedir. Dolayısıyla bu yöntem literatürde Operasyonel Modal Analiz veya Sadece Tepki Modal Analizi gibi isimler almaktadır (Zhang vd., 2002; Brincker vd., 2003). Bu yöntemde, yapıların dinamik karakteristikleri frekans ve zaman tanım alanlarında algoritmalara sahip yöntemlerle belirlenmektedir. 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 geçişine veya korelasyon fonksiyonlarıyla model uydurmaya dayanmaktadır. Zaman ve frekans tanım alanlarından birinin diğerine göre kesin bir üstünlüğü yoktur. Yani her iki tanım alanına dayalı yöntemler dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde kullanılabilir. Bununla birlikte iki tanım alanı arasında bazı farklılıklardan bahsedilebilir. Zaman tanım alanına dayalı yöntemlerin sayısal alt yapısı daha sağlamdır. Ayrıca istenmeyen gürültü sinyalleri daha kolay ayırt edilebilmekte ve sinyal işleme sırasında karşılaşılan sızıntı ve filtreleme hataları en aza indirilebilmektedir. Birbirine yakın frekanslar zaman tanım alanına dayalı yöntemlerle daha kolay belirlenebilmektedir (Ramos, 2007). Literatürde frekans ve zaman tanım alanlarına dayalı pek çok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları Tablo 1.5'te özetlenmektedir. Çevresel Titreşim Yöntemi'ne (ÇTY) göre yapıların dinamik karakteristiklerinin nasıl belirlendiğini gösteren akış şeması Şekil 1.7'de verilmektedir.

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, köprülerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde OMA (2006) yazılımında yer alan ve literatürde sıklıkla tercih edilen yöntemlerden, Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayırıştırma (GFTAA) ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlere ait formülasyon aşağıda verilmektedir.

Tablo 1.5. ÇTY'e dayalı bazı dinamik karakteristik belirleme yöntemleri

Tanım Alanı	Yöntem
Frekans	Piklerin Seçilmesi (PS)
	Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (FTAA)
	Geliştirilmiş Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA)
	Polimax
Zaman	Rastgele Azaltım
	Tekrarlanan
	Maksimum Olasılık
	Stokastik Altalan Belirleme (SAB)



Şekil 1.7. Çevresel Titreşim Yöntemi'ne göre yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi

1.6.3.1.1. Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) Yöntemi

Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (GFTAA) yöntemi kullanımı kolay olan Frekans Tanım Alanında Ayrıştırma (FTAA) yönteminin genişletilmiş halidir. Bu yöntemde, modlar davranışın spektral yoğunluk fonksiyonundan hesaplanan tekil değer ayrıştırma grafiklerindeki piklerin seçilmesiyle elde edilmektedir. FTAA yöntemini Hızlı Fourier Dönüşümü'nden (HFD) tek bir frekans hattının kullanımına dayalı olduğundan, belirlenen doğal frekansın kesinliği HFD'nin çözünürlüğüne bağlıdır. FTAA yönteminde yapının sönüm oranları belirlenemez. Diğer taraftan GFTAA yönteminde belirlenen doğal frekansların ve mod şekillerinin kesinliği artırılmakta ayrıca, sönüm oranları elde edilebilmektedir (Jacobsen vd., 2006).

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 davranış fonksiyonu arasındaki ilişki;

$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega) = \mathbf{H}(j\omega)^* \mathbf{G}_{xx}(j\omega) \mathbf{H}(j\omega)^T \quad (1.32)$$

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 (1.32)'daki * ve T sırasıyla ifadelerin kompleks eşleniğini ve transpozisini göstermektedir. Matematiksel düzenlemelerden sonra tepki sinyaline ait GSY fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda,

$$\mathbf{H}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{\mathbf{R}_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{\mathbf{R}_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (1.33)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada; n mod sayısını, λ_k kutup fonksiyonunu ve \mathbf{R}_k artık değer fonksiyonunu göstermektedir. Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra denklem (1.32),

$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[\frac{\mathbf{R}_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{\mathbf{R}_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] \mathbf{G}_{xx}(j\omega) \left[\frac{\mathbf{R}_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{\mathbf{R}_s^*}{j\omega - \lambda_s^*} \right]^{\bar{H}} \quad (1.34)$$

şeklinde elde edilmektedir (Brincker vd., 2000). Burada; s tekil değerleri, \bar{H} kompleks eşleniği ve transpozeyi ifade etmektedir. Matematiksel ifadeler sadeleştirildiğinde tepki sinyaline ait GSY fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda,

$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{\mathbf{A}_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{\mathbf{A}_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{\mathbf{B}_k}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{\mathbf{B}_k^*}{-j\omega - \lambda_k^*} \quad (1.35)$$

şeklinde elde edilmektedir (Brincker vd., 2000). 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 ayrıştırma matrisi alınarak ayrıştırılmaktadır (Brincker vd., 2000). Buna göre denklem (1.35),

$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega_i) = \mathbf{U}_i \mathbf{S}_i \mathbf{U}_i^H \quad (1.36)$$

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 (1.36)'te 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).

Pik etrafındaki GSY fonksiyonundan elde edilen tek serbestlik dereceli tekil değer yoğunluk fonksiyonu kullanılarak doğal frekans ve sönüm elde edilmektedir. Bu işlem ters HFD yapılarak zaman tanım alanında doğal frekans ve sönüm belirlenebilmektedir (Brincker vd., 2000). İki modun belirgin olması durumunda, birinci tekil vektör her zaman için iyi bir mod şekli ortaya koyacaktır. Bununla birlikte, iki mod ortogonal olması durumunda, bu modlara ait tekil vektörler ilgili mod şekil vektörlerini göstermektedir (Brincker vd., 2000).

1.6.3.1.2. 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 denklem olarak,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{U}(t) = \mathbf{R}(t) = \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (1.37)$$

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 (1.37), titreşen yapının davranışını temsil etmesine rağmen bu şekliyle SAB yöntemine uygun değildir. Bu yüzden, denklem (1.37) daha uygun bir form olan ayrık-zaman stokastik durum-uzayı modeline dönüştürülmektedir (Yu ve Ren, 2005). Durum-Uzay modeli kontrol teorisinden üretilmekte, fakat bu model inşaat mühendisliğinde viskoz sönüme sahip yapıların dinamik karakteristiklerini hesaplamak için kullanılmaktadır (Yu ve Ren, 2005). Aşağıdaki tanımlamalar kullanılarak (1.37) denklemi,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= \begin{pmatrix} \mathbf{U}(t) \\ \dot{\mathbf{U}}(t) \end{pmatrix} \\ \mathbf{A}_* &= \begin{pmatrix} 0 & \mathbf{I}_{n_2} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{pmatrix} \\ \mathbf{B}_* &= \begin{pmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B} \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (1.38)$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_*\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_*\mathbf{u}(t) \quad (1.39)$$

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,

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_* \mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_* \mathbf{u}(t) \quad (1.40)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Burada; \mathbf{C}_* sistem davranış matrisini, \mathbf{D}_* doğrudan iletim matrisini göstermektedir. Denklem (1.39) ve (1.40) 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,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}_* \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_* \mathbf{u}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}_* \mathbf{x}_k + \mathbf{D}_* \mathbf{u}_k \end{aligned} \right\} \quad (1.41)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005). 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 (1.41)’e stokastik gürültü bileşenleri eklendiğinde belirli-stokastik durum-uzayı modeli,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}_* \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_* \mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}_* \mathbf{x}_k + \mathbf{D}_* \mathbf{u}_k + \mathbf{v}_k \end{aligned} \right\} \quad (1.42)$$

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,

$$E_* \left[\begin{pmatrix} \mathbf{w}_p \\ \mathbf{v}_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{w}_q^T & \mathbf{v}_q^T \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{S} \\ \mathbf{S}^T & \mathbf{R} \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad (1.43)$$

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

$$\delta_{pq} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } p = q \\ 0, & \text{eğer } p \neq q \end{cases} \quad (1.44)$$

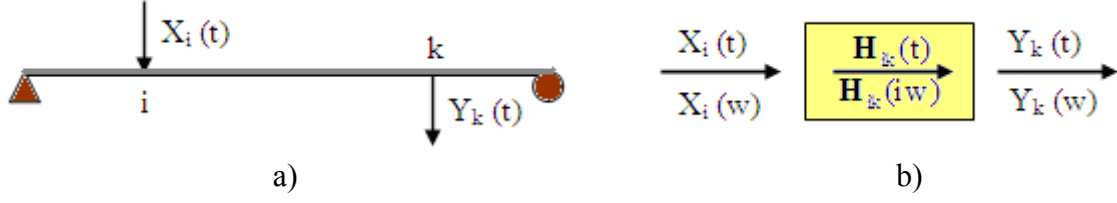
SAB yönteminde yapı sisteminin davranışı, normal operasyon koşullarında değeri ölçülemeyen sinyallerle titreştirilerek belirlenmektedir. Bu veri eksikliğinden dolayı, denklem (1.42)'da gösterilen belirgin sinyal verisi \mathbf{u}_k 'yi, gürültü terimleri olan \mathbf{w}_k ve \mathbf{v}_k 'den ayırt etmek mümkün değildir. Bu durumda, \mathbf{u}_k gürültü terimleri \mathbf{w}_k ve \mathbf{v}_k cinsinden yazılırsa yapının ayrık-zaman stokastik durum-uzay modeli,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}_* \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}_* \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \end{aligned} \right\} \quad (1.45)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (1.45), çevresel titreşimlerden dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde zaman alanının temelini oluşturmaktadır.

1.6.3.2. Zorlanmış Titreşim Yöntemi

Zorlanmış Titreşim Yöntemi'nde, yapı $X_i(t)$ gibi yapay bir kuvvetle i noktasından titreştirilmekte ve yapının bu etkiye göstermiş olduğu tepki- $Y_k(t)$, yapay kuvvet sinyali- $X_i(t)$ ile birlikte ölçülmektedir (Şekil 1.8a). Yapay titreşimler, sarsıcılardan veya darbe çekiçlerinden elde edilmektedir. Zaman tanım alanında ölçülen bu sinyaller frekans tanım alanına Fourier serileri kullanılarak dönüştürüldüğünde, etki-tepki zaman sinyalleri arasındaki ilişkiyi gösteren FDF- H_{ik} yerini Transfer Matrisi- $H_{ik}(i\omega)$ olarak adlandırılan FDF matrisine bırakmaktadır (Şekil 1.8b) (Schwarz ve Richardson, 1999).



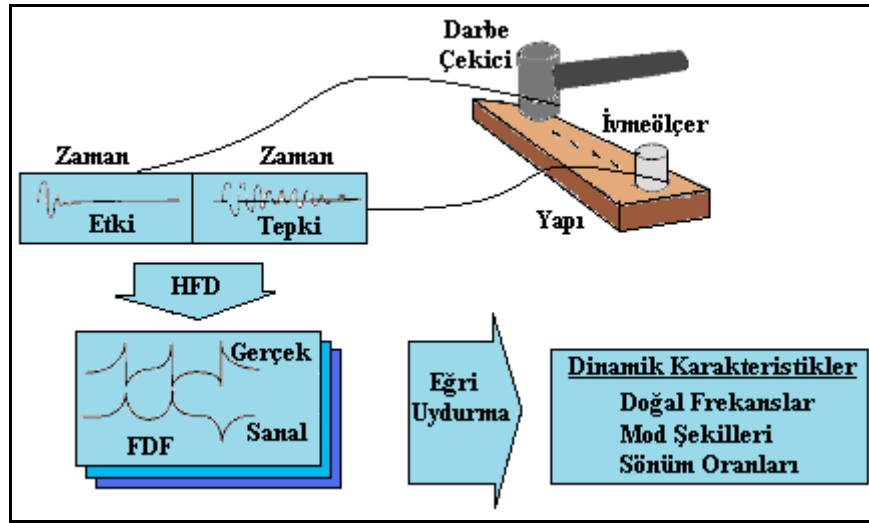
Şekil 1.8. Zorlanmış Titreşim Yöntemi'nin a) şematik gösterimi b) Frekans davranış fonksiyonunun belirlenmesi (Schwarz ve Richardson, 1999).

Zorlanmış Titreşim Yöntemi'nde, etki-tepki sinyalleri arasındaki ilişki,

$$H_{ik}(iw) = \frac{Y_k(w)}{X_i(w)} \quad (1.46)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; $H_{ik}(iw)$ Frekans Davranış Fonksiyonu'nu, $X_i(w)$ frekans tanım alanındaki tepki fonksiyonunu ve $Y_k(w)$ frekans tanım alanındaki etki fonksiyonunu göstermektedir. Elde edilen Frekans Davranış Fonksiyonu $H_{ik}(iw)$ çeşitli sayısal teknikler kullanılarak ayrıştırılmakta ve yapıya ait doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilmektedir.

Zorlanmış Titreşim Yöntemi'ne göre bir yapının dinamik karakteristiklerinin nasıl belirlendiğini gösteren akış şeması Şekil 1.9'da verilmektedir. Şekil 1.9'da görüldüğü gibi yapıya etkiyen kuvvet darbe çekiciden sağlanmaktadır.



Şekil 1.9. Darbe çekici ile dinamik karakteristiklerin belirlenmesi (Schwarz ve Richardson, 1999).

1.7. Analitik ve Deneysel Dinamik Karakteristiklerin Modal Güvence Kriterine (MGK) Göre Değerlendirilmesi

Bir yapının analitik ve deneysel yöntemlerle elde edilen modlarının doğruluğuna sadece frekans değerlerinin yakınlığına bakılarak karar verilmemektedir. Bunun için modların karşılaştırılması daha doğru bir çözümdür. Modal Güvence Kriteri (MGK), analitik ve deneysel olarak hesaplanan farklı mod şekil vektörlerinin karşılaştırılmasında ya da bir yöntem kullanılarak hesaplanan mod şekil grubunun doğruluğunun kontrol edilmesinde kullanılmaktadır. İki mod şekli arasındaki Modal Güvence Kriteri,

$$\text{MGK}(\Psi_a, \Psi_d) = \frac{|\Psi_a^T \Psi_d|^2}{(\Psi_a^T \Psi_a)(\Psi_d^T \Psi_d)} \quad (1.47)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Allemang, 2003; Heylen vd., 2007; Şahin, 2009; Sevim, 2010). Burada; Ψ_a analitik ve Ψ_d deneysel mod şekil vektörlerini göstermektedir. Eğer Ψ_a ve Ψ_d aynı mod şekil vektörleri iseler, MGK birim matris olmalıdır. Eğer Ψ_a ve Ψ_d farklı mod şekil vektörleri iseler, MGK değeri sıfıra yakın olmalıdır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

2.1. Giriş

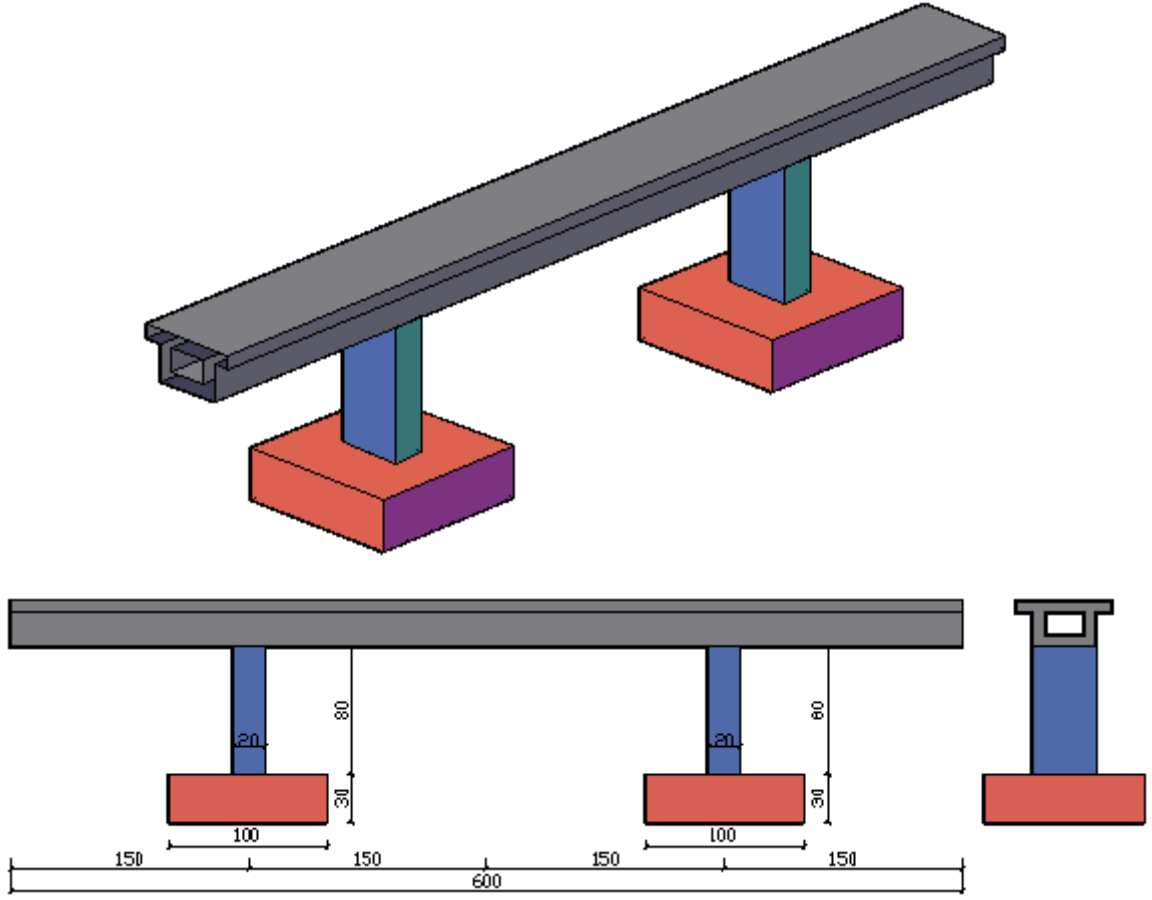
Bu tez çalışmasında, karayolu köprülerinin dinamik davranışlarının analitik ve deneysel yöntemlerle belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla çalışmada, farklı üç karayolu köprüsü uygulama olarak seçilmiştir. Birinci uygulama için laboratuvar ortamında inşa edilmiş küçük ölçekli bir model köprü, ikinci ve üçüncü uygulama için arazi üzerinde gerçek karayolu köprüleri seçilmiştir. Bu bakımdan yapılan çalışmalar, laboratuvar ve arazi çalışmaları olarak iki kısımda incelenmiştir.

2.2. Laboratuvar Çalışmaları

Tez çalışması kapsamında, laboratuvar ortamında oluşturulacak köprü modelinin analitik ve deneysel sonuçlarının arazi çalışmaları ile karşılaştırılabilmesi için model köprü taşıyıcı sisteminin arazi çalışmaları sırasında seçilen köprülerle uyumlu olması gerekmektedir. Bu amaçla, laboratuvar ortamında yapılması planlanan karayolu köprü modeli için, Ülkemizde bulunan ve dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen Kömürhan ve Gülburnu Köprüleri'nin taşıyıcı sistemleri örnek olarak seçilmiştir. Model köprü, sabit en kesitli üstyapı taşıyıcı sisteme sahiptir. Çünkü değişken en kesitli üstyapı taşıyıcı sistemine sahip köprüleri inşa etmek oldukça güçtür.

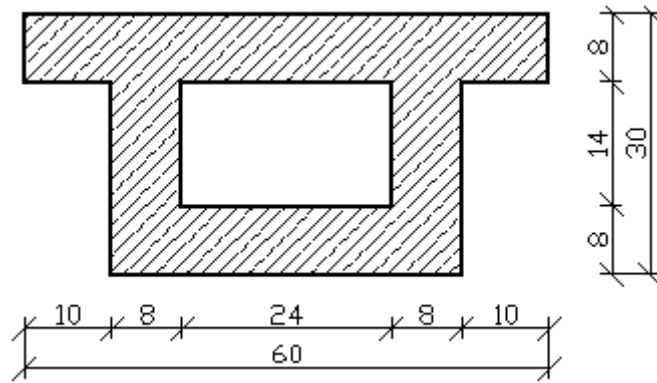
2.2.1. Model Köprü'nün Geometrik Özellikleri ve Boyutlandırılması

Laboratuvar ortamında inşa edilen model köprü, kenar açıklıkları 1.5'şer m ve orta açıklığı 3 m olmak üzere toplam üç açıklıklı ve 6 m olacak şekilde tasarlanmıştır. Model köprü başlıca temel, ayak ve tabliyeden oluşmaktadır. Köprü'nün zemine ankastre olarak bağlanması amacıyla temeller $1 \times 1 \text{ m}^2$ alanında ve 30 cm yüksekliğinde dikkate alınmıştır. Ayaklar $20 \times 40 \text{ cm}^2$ en kesitinde ve 80 cm yüksekliğindedir. Kutu kesitli tabliye 6 m uzunluğunda olup 30 cm kesit yüksekliğine sahiptir. Model köprü'nün iki ve üç boyutlu görünüşleri Şekil 2.1'de verilmektedir.



Şekil 2.1. Model köprünün üç ve iki boyutlu görünüşleri (boyutlar cm cinsindedir)

Model köprünün tabliyesi tek hücreli kutu kesit taşıyıcı sisteme sahiptir. Kutu kesit genişliği tabliye üzerinde 60 cm ve ayaklar üzerinde 40 cm'dir. Kutu kesit yüksekliği tabliye boyunca sabit olup 30 cm'dir. Tabliye üst ve alt tabla kalınlığı ile yan duvar cidar kalınlıkları tabliye boyunca sabit olup 8 cm'dir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Sabit kesitli tabliye üst yapısı (boyutlar cm cinsindedir)

2.2.2. Model Köprünün İnşasında Kullanılan Malzeme Özellikleri

Model köprünün inşası için kullanılan betonun bir kısmı laboratuvar ortamında bir kısmı ise hazır beton santralinde üretilmiştir. Temeller, ayaklar ve kutu kesit alt tablası ile yan cidarları laboratuvar ortamında üretilen beton ile kutu kesit üst tablası ise hazır beton santralinde üretilen beton ile inşa edilmiştir. Model köprünün inşasında C30 betonu kullanılması amaçlanmıştır. İstenilen beton sınıfını elde etmek amacıyla hesaplanan malzeme karışımları Tablo 2.1’de verilmektedir. Temeller, kolonlar ve tabliyede donatı olarak değişik çapta S420 çeliği kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında beton üretimine ait bazı fotoğraflar Şekil 2.3’te verilmektedir.

Tablo 2.1. Model köprünün inşasında kullanılan malzeme karışımları

Bileşen	Temel	Ayak	Tabliye	
			Yan Cidarlar Alt Tabla	Üst Tabla
Agrega (8-16mm)	558 kg/m ³	558 kg/m ³	558 kg/m ³	508 kg/m ³
Agrega (4-8mm)	465 kg/m ³	465 kg/m ³	465 kg/m ³	435 kg/m ³
Agrega (0-4mm)	837 kg/m ³	837 kg/m ³	837 kg/m ³	917 kg/m ³
Çimento (Ç)	350 kg/m ³	350 kg/m ³	350 kg/m ³	350 kg/m ³
Su (S)	150 kg/m ³	150 kg/m ³	150 kg/m ³	150 kg/m ³
S/Ç	0.43	0.43	0.43	0.43
Katkı	3 kg/m ³	3 kg/m ³	3 kg/m ³	3 kg/m ³
Toplam	1417.80 kg	302.46	771.28	680.55



Şekil 2.3. Laboratuvar ortamında beton üretimine ait bazı fotoğraflar

2.2.3. Model Köprünün İnşası

Boyutları Şekil 2.1 ve 2.2’de verilen model köprü betonarme olarak inşa edilmiştir. Betonun yerleştirmek için temel ve ayak kalıbı ahşaptan, tabliye üst yapısının dış ve iç kalıbı ise çelik sacdan yapılmıştır. Tabliyenin dış ve iç kalıbının ahşap keresteden yapılmasının zor olması nedeniyle ve kalıptan çıkacak beton yüzeyinin daha pürüzsüz olması sağlamak amacıyla çelik sac tercih edilmiştir.

2.2.3.1. Temellerin İnşası

Model köprünün temelleri $1 \times 1 \text{ m}^2$ alanında ve 30 cm yüksekliğindedir. Temellerin inşası için temellerin dış yüzeylerine belirli aralıklarla birbirine çakılan ahşaplardan oluşturulan kalıplar uygun koordinatlar hesaplanarak yerleştirilmiştir. Kalıp içerisine yatay doğrultuda her iki yönde $\Phi 14/15$ temel donatısı 2.5 cm pas payı dikkate alınarak donatı kafesi oluşturulmuştur. Kalıp içerisine ayak boyuna donatıları yerleştirilerek beton dökülmüştür. Temellerin inşasına ait bazı fotoğraflar Şekil 2.4’te verilmektedir.



Şekil 2.4. Temellerin inşasına ait bazı fotoğraflar

2.2.3.2. Ayakların İnşası

Model köprünün ayakları $20 \times 40 \text{ cm}^2$ en kesitinde ve 80 cm yüksekliğindedir. Temel betonu prizini aldıktan sonra ayakların inşası için ayakların dış yüzeylerine yerleştirilmek üzere belirli aralıklarla birbirine çakılan ahşaplardan oluşturulan kalıplar yapılmıştır. Ayaklarda $6\Phi 12$ boyuna donatı ve $\Phi 8/15$ etriye donatısı kullanılmıştır. Pas payı olarak 2.5 cm dikkate alınmıştır. Ayakların tabliye ile monolitik olarak çalışmasını sağlamak amacıyla dört adet köşe donatısı 30'ar cm ve iki adet kenar donatısı 6'şar cm ayak üst noktasından itibaren filiz boyu olarak bırakılmıştır. Ayakların inşasına ait bazı fotoğraflar Şekil 2.5'te verilmektedir.



Şekil 2.5. Ayakların inşasına ait bazı fotoğraflar

2.2.3.3. Tabliyenin İnşası

Model köprü'nün tabliyesi tek hücreli kutu kesit taşıyıcı sisteme sahiptir. Kutu kesit inşasını kesit içerisinde hiçbir malzeme bırakmadan tamamlamak amacıyla beton dökümü iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada çelik sacdan oluşan dış kalıp köprü ayakları üzerine jeodezik ölçümler ile birlikte yerleştirilmiştir. Böylelikle tabliye inşası sonrasında tabliyenin başlangıç ve bitiş noktalarının aynı kotta olması sağlanmıştır. Dış kalıp içerisinde kutu kesit yan cidarlarının ve alt tablasının içerisinde kalacak şekilde 10 cm kare gözlü $\Phi 6$ 'lık hasır donatı 3 cm pas payı dikkate alınarak yerleştirilmiştir. Çelik sacdan oluşan dış kalıp ile hasır donatının yerleştirilmesine ait bazı fotoğraflar Şekil 2.6'da verilmektedir.



Şekil 2.6. Dış kalıp ile hasır donatının yerleştirilmesine ait bazı fotoğraflar

Beton dökümünden önce çelik dış kalıp yağlanmıştır. Böylelikle kalıbın sertleşmiş betondan kolaylıkla çıkması sağlanmıştır. İlk önce kutu kesit içerisine 8 cm kalınlığında beton dökülerek kutu kesit alt tablası oluşturulmuştur. Daha sonra çelik sacdan yapılan iç kalıp dış kalıp içerisine yerleştirilmiş, böylelikle beton dökümü sonrasında yan cidar kalınlıklarının 8 cm olması sağlanmıştır. İç kalıp yerleştirildikten sonra yan cidar boşluklarına beton dökümü gerçekleştirilmiş, on gün boyunca betonun priz alması beklenmiştir. Kutu kesit alt tabla ve yan cidarlarının beton dökümüne ait bazı fotoğraflar Şekil 2.7’de verilmektedir.



Şekil 2.7. Kutu kesit alt tabla ve yan cidarlarının beton dökümüne ait bazı fotoğraflar

Alt tabla ve yan cidar betonu prizini aldıktan sonra iç kalıp sökülüştür. Üst tabla betonunu dökmek amacıyla kutu kesit içerisine suntuadan geçici kalıp yapılmıştır. Böylelikle üst tabla betonu döküldükten sonra geçici suntuanın alınması ve kutu kesit içerisinde hiçbir malzemenin kalmaması amaçlanmıştır. Tabliye boyunca geçici sunta üzerine pas payı 3 cm olacak şekilde 10 cm kare gözlü $\Phi 6$ 'lık hasır donatı yerleştirilmiştir. Kalıbın sökülmesi sırasında yan kulakların kırılmaması amacıyla tabliye boyunca her iki uca $\Phi 8$ 'lik ve enine doğrultuda $\Phi 8/50$ 'lik donatı yerleştirilmiştir. İç kalıbın alınması, geçici sunta kalıbın yapılması ve donatılar ile birlikte yerleştirilmesine ait bazı fotoğraflar Şekil 2.8'de verilmektedir.



Şekil 2.8. İç kalıbın alınması, geçici sunta kalıbın yapılması ve donatılar ile birlikte yerleştirilmesine ait bazı fotoğraflar

Geçici iç kalıp ve donatılar yerleştirildikten sonra üst tabla betonu dökülmüştür. Üst tabla betonu diğer betonlar gibi laboratuarda oluşturulmamış olup hazır beton santralinden temin edilmiştir. Beton dökümü bittikten sonra yaklaşık iki hafta boyunca her gün sabah ve akşam olmak üzere beton sulanarak kür yapılmıştır. Daha sonra geçici sunta kalıp ve çelik kalıp sökülerek model köprünün laboratuvar modeli ortaya çıkmıştır. Üst tabla betonunun dökümünden sonra modelin bitmiş haline ait bazı fotoğraflar ise Şekil 2.9'da verilmektedir.



Şekil 2.9. Model köprünün bitmiş haline ait bazı fotoğraflar

2.2.4. Model Köprünün Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Model Köprünün sonlu eleman yöntemine göre analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için elastisite modülü, kütle yoğunlu ve Poisson oranı gibi malzeme özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Model köprünün inşası için kullanılan betonun bir kısmı laboratuvar ortamında bir kısmı ise hazır beton santralinde üretilmiştir.

Model köprünün malzeme özelliklerini belirlemek için tek eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Tek eksenli basınç deneylerinde beton dökümleri sırasındaki taze betondan numuneler alınarak deneyler gerçekleştirilmiş ve betonun basınç dayanımı belirlenmiştir. Elde edilen basınç dayanımları kullanılarak betonun elastisite modülü belirlenmeye çalışılmıştır.

Tek eksenli basınç deneyleri için temel, ayak ve tabliye betonu dökümleri sırasında üçer adet standart silindir numuneler ($H_{sil}=30$ cm ve $D_{sil}=15$ cm) ve 15 cm'lik küp numuneler alınmıştır. Numunelerin alınmasına ve hazırlanmasına ilişkin bazı fotoğraflar Şekil 2.10'da verilmektedir.



Şekil 2.10. Silindir ve küp numunelerin alınmasına ve hazırlanmasına ilişkin bazı fotoğraflar

Küp numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarını belirlemek için yapılan tek eksenli basınç deneylerine ilişkin bazı fotoğraflar Şekil 2.11’de, testlerden elde edilen bazı özellikler Tablo 2.2’de verilmektedir. Tablo 2.2’de, 1 ve 3 numaralı numuneler tabliyeden, 2 ve 4 numaralı numuneler ise temel ve ayak betonundan alınmıştır. Tablo 2.2’den görüldüğü gibi, küp numunelerin 28 günlük basınç dayanımları 32.9-39.1 MPa arasında değişmektedir.



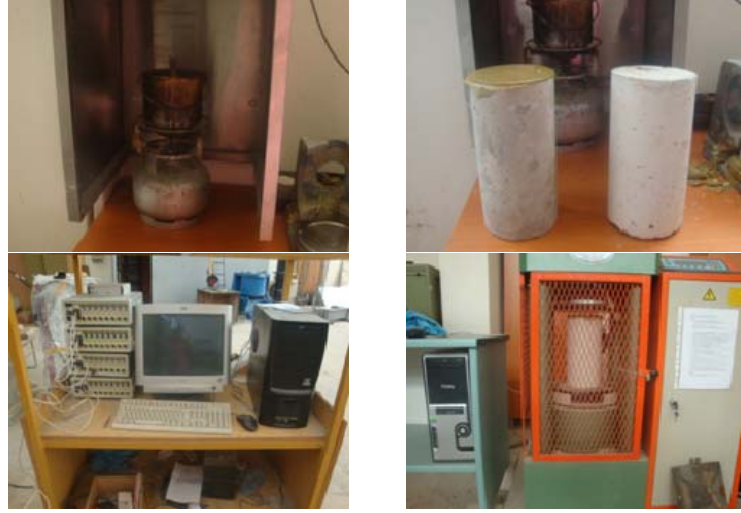
Şekil 2.11. Küp numunelerin tek eksenli basınç deneylerinden bazı fotoğraflar

Tablo 2.2. Küp numunelerin tek eksenli basınç deneylerinden elde edilen bazı özellikler

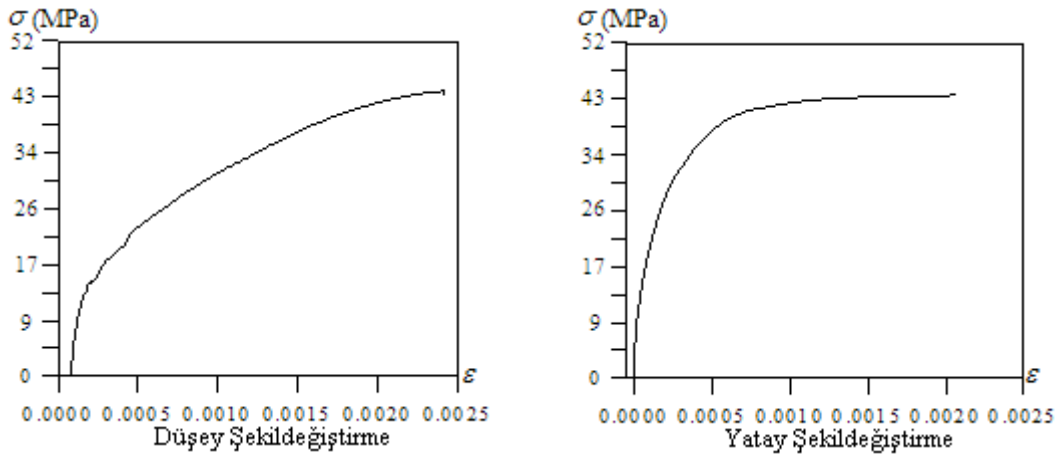
Numune	Alan (cm ²)	Hacim(cm ³)	Yaş (Gün)	Kırılma Yüğü (kgf)	Dayanım (f _{küp})	
					(kgf/cm ²)	(MPa)
1	225	3375	7	62000	276	27.6
2	225	3375	7	71000	316	31.6
3	225	3375	28	74000	329	32.9
4	225	3375	28	88000	391	39.1

Silindir numunelerin basınç dayanımlarını ve sonlu eleman analizlerinde kullanılacak malzeme parametrelerini belirlemek amacıyla temel, ayak ve tabliyeden alınan silindir numunelere yatay ve düşeyde şekildeğiştirme ölçerler yapıştırılarak, betonun gerilme-şekildeğiştirme grafiği ve Poisson oranı elde edilmiştir. Numunelerin tek eksenli basınç deneylerine ait bazı fotoğraflar Şekil 2.12’de, betonun gerilme-şekildeğiştirme grafiği ise Şekil 2.13’te verilmektedir. Deneylerden elde edilen bazı özellikler ile elastisite modülü değerleri Tablo 2.3’te verilmektedir. Betonun diğer bir malzeme özelliği olan Poisson oranı genellikle 0.15-0.20 arası bir değer almaktadır. Poisson oranının agrega, çimento, su miktarı gibi beton parametreleriyle doğrudan bir ilişkisi yoktur. Bununla birlikte, Poisson oranı yüksek dayanımlı betonlar için düşük, normal dayanımlı betonlar için ise yüksektir

(Mehta, 1986). Tablo 2.3'te 1 nolu numune tabliyeden, 2 ve 3 nolu numuneler ise sırasıyla ayak ve temel betonundan alınmıştır.



Şekil 2.12. Tek eksenli basınç deneylerinden bazı fotoğraflar



Şekil 2.13. Silindir numuneden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme grafiği

Tablo 2.3. Silindir numunelerin tek eksenli basınç deneylerinden elde edilen özellikler

Numune	Yükseklik (cm)	Çap (cm)	H/D	Yaş (Gün)	Kırılma Yüğü (N)	Dayanımı (f_{sil}) (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
1	30	15	2	28	460720	26.07	28500
2	30	15	2	28	606330	34.31	30000
3	30	15	2	28	614140	34.76	30000

2.2.5. Sonlu Eleman Yöntemiyle (SEY) Model Köprünün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

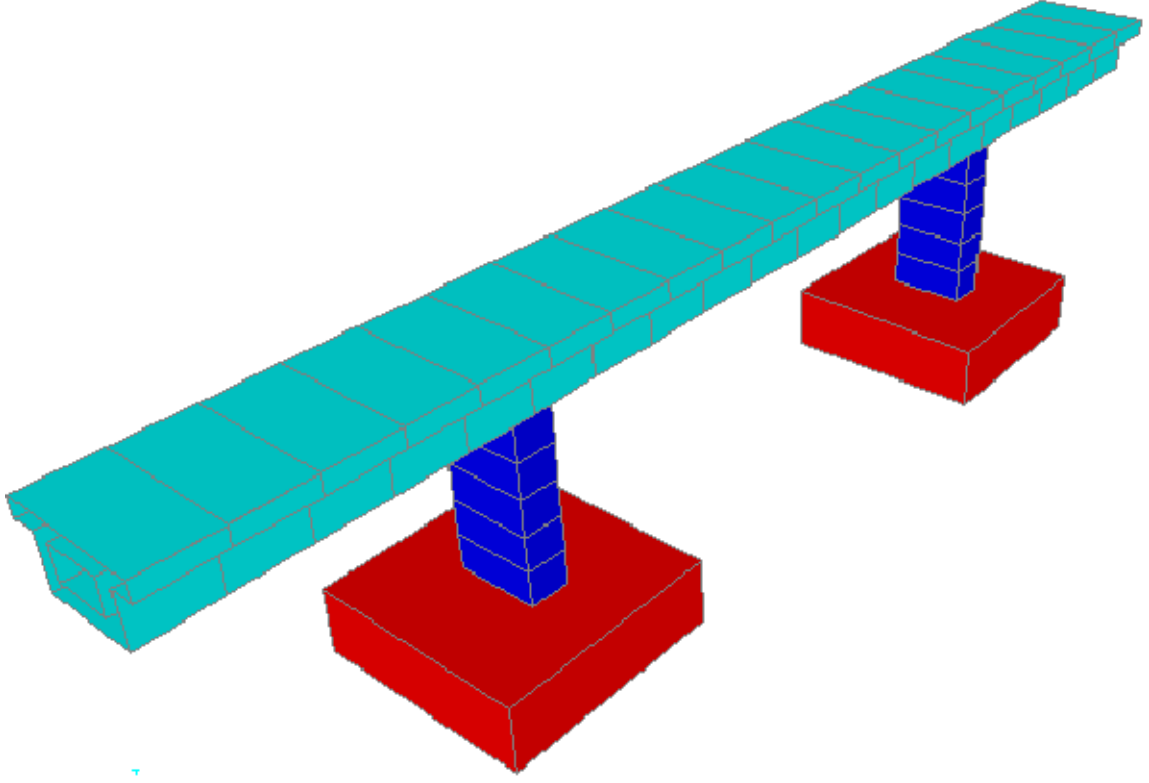
6 m uzunluğa ve 1.4 m yüksekliğe sahip model köprünün dinamik karakteristiklerini (doğal frekanslar ve mod şekilleri) belirlemek amacıyla köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 programında oluşturulmuştur. Model köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli, aşağıda belirtilen modelleme kriterleri dikkate alınarak oluşturulmuştur.

- Köprü tabliyesi ve ayaklar altı serbestlik derecesine sahip çubuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Sabit kesitli üstyapı segmentlerinin ve ayakların her biri program tarafından direk olarak tanımlanmış, ortalama kesit özellikleri dikkate alınmayıp daha güvenilir analiz sonuçlarının elde edilmesi amaçlanmıştır. Her bir orta ayak 8 adet sonlu elemana bölünmüş olup, üstyapı segmentleri ise 30 cm uzunluğunda parçalara ayrılmıştır.
- Her bir ayak altında bulunan temeller çubuk elemanlar kullanılarak modellenmiş, yatay doğrultudaki kesit özellikleri ilgili elemanlara atanmıştır.
- Sınır şartları olarak temelin yere ankastre olarak bağlandığı kabul edilip, bu noktalarının bütün hareket serbestlikleri tutulmuştur. Tabliye kenar uçlarında ise herhangi bir mesnet tanımlanmamış olup, bütün yöndeki hareketleri serbest bırakılmıştır.

Model köprünün sonlu eleman yöntemiyle modellenmesi sırasında dikkate alınan malzeme özellikleri Tablo 2.4'te verilmektedir. Model köprünün yukarıda belirtilen modelleme kriterleri dikkate alınarak oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 2.14'te verilmektedir.

Tablo 2.4. Model köprünün sonlu eleman analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri

Sonlu Eleman Modeli	Malzeme Özellikleri		
	Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı (-)	Yoğunluk (kg/m ³)
Tabliye	2.85E10	0.2	2500
Ayaklar	3.00E10	0.2	2500
Temeller	3.00E10	0.2	2500

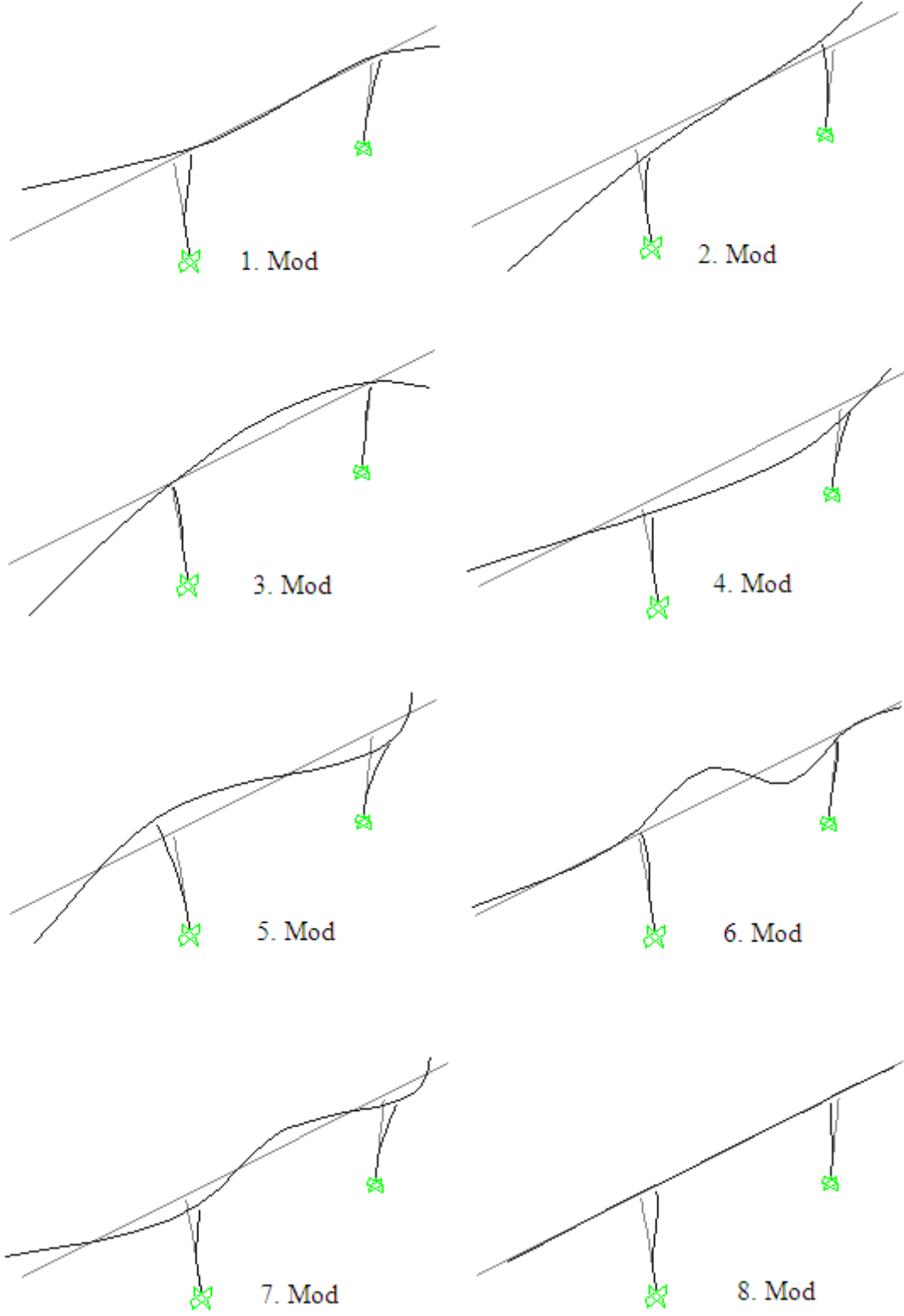


Şekil 2.14. Model köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli

Model köprünün, SAP2000 (2008) sonlu eleman programı kullanılarak gerçekleştirilen modal analizinden elde edilen ilk sekiz moduna ait doğal frekans ve periyot değerleri ile mod şekilleri sırasıyla Tablo 2.5'te verilmektedir. Tablo 2.5'ten görüldüğü gibi köprünün ilk sekiz doğal frekansı 28.33-313.5 Hz arasında değişmektedir. Köprünün ilk sekiz mod şekli Şekil 2.15'te verilmektedir. Şekil 2.15 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin uzama, düşey ve enine modlar olduğu görülmektedir.

Tablo 2.5. Model köprünün analitik doğal frekans, periyot ve mod şekilleri

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli
1	28.33	0.0353	1. Uzama
2	33.82	0.0296	1. Asimetrik Enine
3	41.39	0.0242	1. Düşey
4	56.05	0.0178	1. Enine
5	123.9	0.0081	2. Düşey
6	232.7	0.0043	2. Enine
7	265.8	0.0038	3. Enine
8	313.5	0.0032	2. Uzama



Şekil 2.15. Model köprünün analitik olarak elde edilen ilk sekiz mod şekli

2.2.6. Deneysel Modal Analiz (DMA) Yöntemiyle Model Köprünün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

2.2.6.1. Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Model Köprünün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Model köprünün deneysel ölçümlerinde B&K 4507 tipi tek eksenli ve B&K 4506 tipi üç eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. İvmeölçerlerden elde edilen sinyaller B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesinde birleştirilmiş ve PULSE yazılımına aktarılmıştır. Bu sinyaller OMA yazılımına transfer edilerek işlenmiş ve köprünün doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilmiştir.

Model köprünün dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemek için köprüye altı farklı çevresel titreşim testi uygulanmıştır. Çevresel titreşim testleri tabliye üst tablasının beton dökümünden (köprü inşasının bitişi) 30 gün sonra gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçümler sırasında Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılmıştır. Laboratuarda inşa edilen model köprünün deneysel ölçümlerinde ortamda rüzgar, taşıt, deprem vs., gibi herhangi bir çevresel etki olmadığından köprüyü titreştirmek için APS 400 tipi titreştirici ve B&K 8210 tipi darbe çekiçleri kullanılmıştır. Uygulamada zorlanmış titreşim testi için kullanılan bu sarsıcılar model köprünün çevresel titreşim testlerinde veri toplama sistemine tanıtılmamış, dolayısıyla değeri ölçülmeyen doğal bir etki gibi dikkate alınmıştır. Model köprünün deneysel ölçümlerinde kullanılan ölçüm sistemi ile ilgili detaylı bilgiler Bölüm 1.6.1’de mevcuttur.

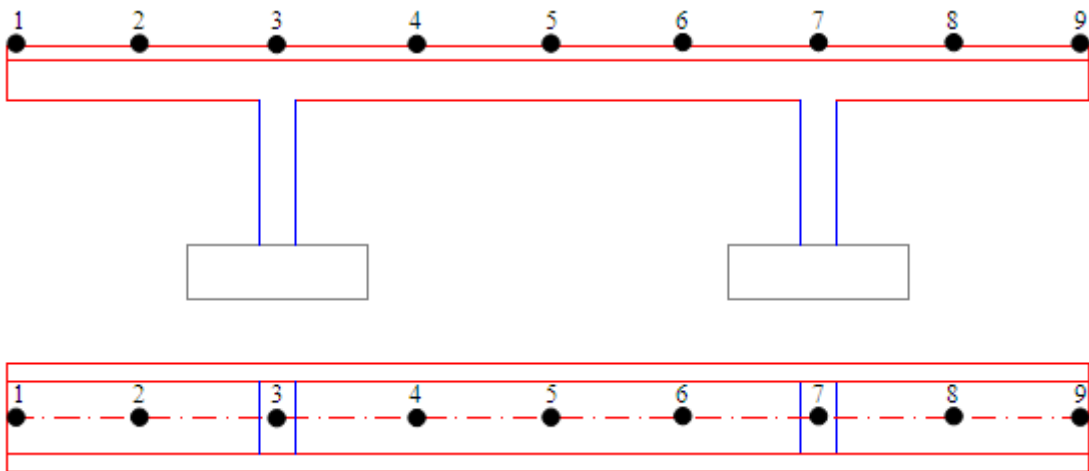
Deneysel ölçümlerin köprünün hangi noktalarından alınacağı dinamik karakteristiklerin (frekans, mod şekli, sönüm oranı) doğru olarak belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle köprünün muhtemel hareket noktaları analitik olarak belirlenmiş ve karşılaştırmaların daha iyi yapılabilmesi için altı farklı ölçüm testi kurulmuştur. Analitik olarak elde edilen mod şekilleri dikkate alındığında yatay doğrultuda her iki yönde (boyuna ve enine) ve düşey doğrultuda modların elde edildiği görülmüştür. Bu nedenle deneysel ölçümler sırasında kurulan ölçüm testlerinde her üç yöndeki modlarında elde edilmesi amaçlanmıştır. Köprü kutu kesit boşluğunun küçük olması ve köprü uzunluğu boyunca kutu kesit içerisine uzanılmaması nedeniyle deneysel ölçümler tabliye üzerinden alınmıştır. Bu ölçüm testleri:

- Birinci Ölçüm Testi: Model köprünün düşey doğrultudaki modlarının elde edilebilmesi amacıyla tek eksenli ivmeölçerler köprü uzunluğu boyunca düşey

doğrultuda yerleştirilmiştir.

- İkinci Ölçüm Testi: Model köprünün yatay doğrultudaki enine modlarının elde edilebilmesi amacıyla tek eksenli ivmeölçerler köprü uzunluğu boyunca yatay doğrultuda (köprü enine doğrultusunda) yerleştirilmiştir.
- Üçüncü Ölçüm Testi: Model köprünün yatay doğrultudaki uzama modlarının elde edilebilmesi amacıyla tek eksenli ivmeölçerler köprü uzunluğu boyunca yatay doğrultuda (köprü uzunluğu doğrultusunda) yerleştirilmiştir.
- Dördüncü Ölçüm Testi: İlk üç ölçüm testi ile elde edilen modların tek ölçüm ile elde edilebilmesi amacıyla tek eksenli ivmeölçerler yatay doğrultuda her iki yönde ve düşey doğrultuda yerleştirilmiştir. Ölçüm alınması istenilen nokta sayısı veri toplama ünitesindeki kanal sayısından fazla olduğu için referanslı ölçümler gerçekleştirilmiştir.
- Beşinci Ölçüm Testi: Beşinci ölçümde, bütün doğrultudaki modların elde edilebilmesi amacıyla üç eksenli ivmeölçerler yatay doğrultuda her iki yönde ve düşey doğrultuda yerleştirilmiştir. Ölçüm alınması istenilen nokta sayısı veri toplama ünitesindeki kanal sayısından fazla olduğu için referanslı ölçümler gerçekleştirilmiştir.
- Altıncı Ölçüm Testi: Altıncı ölçümde, sadece iki ayak arasında kalan orta açıklık üç eksenli ivmeölçer ile birlikte ölçülmüş, yatay doğrultuda her iki yönde ve düşey doğrultudaki modların elde edilmesi amaçlanmıştır.

Köprünün iki boyutlu görünüşleri üzerinde ivmeölçerlerin yerleşim planı Şekil 2.16'da, ölçümlere ait detaylı bilgiler ise Tablo 2.6'da verilmektedir. Model köprüde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar Şekil 2.17'de verilmektedir.



Şekil 2.16. Model köprünün çevresel titreşim testlerinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı

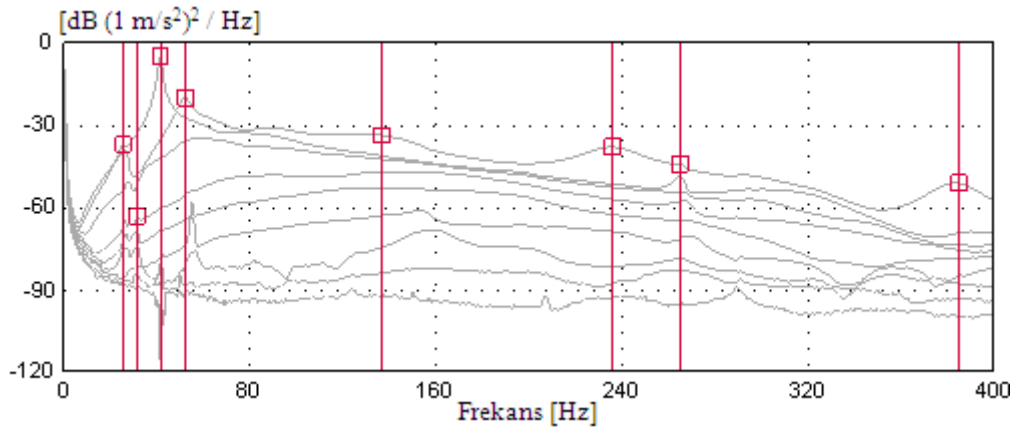
Tablo 2.6. Model köprünün deneysel ölçüm testlerine ait genel bilgiler

Ölçüm Testi	Nokta	İvmeölçer			Frekans Aralığı	Toplam Süre	Adım
		Düşey	Doğrultu Enine	Boyuna			
1	1-9	✓	-	-	0-400Hz	5 dak	1
2	1-9	-	✓	-	0-400Hz	5 dak	1
3	1-9	-	-	✓	0-400Hz	5 dak	1
4	1-9	-	-	✓	0-400Hz	15 dak	3
	1-9	✓	-	-			
5	1-3	✓	✓	✓	0-400Hz	15 dak	3
	4-6	✓	✓	✓			
	7-9	✓	✓	✓			
6	4-6	✓	✓	✓	0-400Hz	5 dak	1

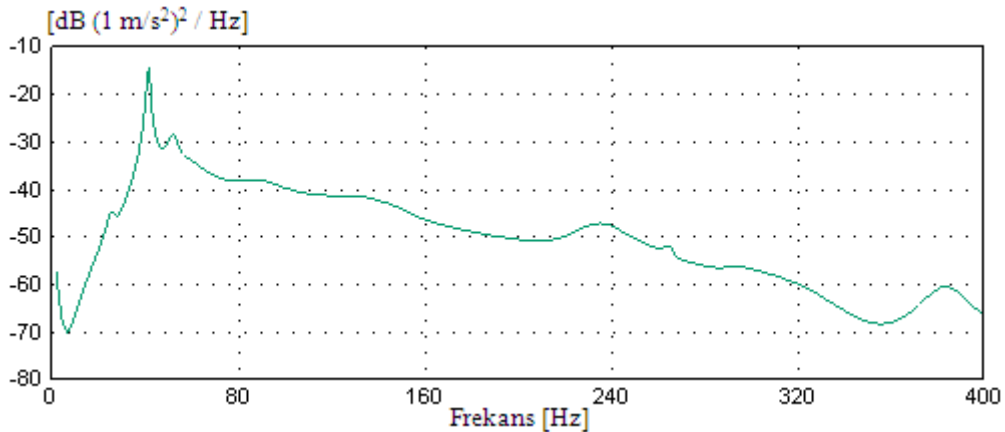


Şekil 2.17. Model köprüde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar

Model köprüye uygulanan altı farklı çevresel titreşim testinden toplanan sinyallerin GFTAA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri ve bu matrislerinin ortalamaları, SAB yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen kararlılık diyagramları sırasıyla Şekil 2.18-2.23'te verilmektedir. Şekil 2.18-2.23 incelendiğinde, her bir çevresel titreşim testinden elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ve kararlılık diyagramlarının birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Deneysel ölçümler sonucu elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları Tablo 2.7-2.12'de verilmektedir. Tablo 2.7-2.12 incelendiğinde, frekans değerlerinin birbirine yakın değerlerde olduğu ve ilk sekiz frekansın 25.30-299.5 Hz arasında elde edildiği görülmektedir. Sönüm oranı değerleri arasında tam bir uyum yakalanamamış olup, bu değerler %0.239-5.715 arasında değişkenlik göstermektedir.



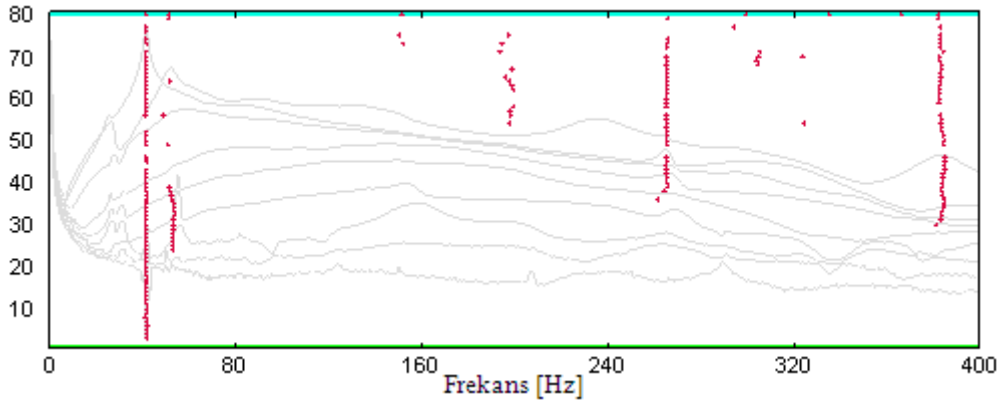
a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri



b) Spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

Şekil 2.18. Model köprünün birinci ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı

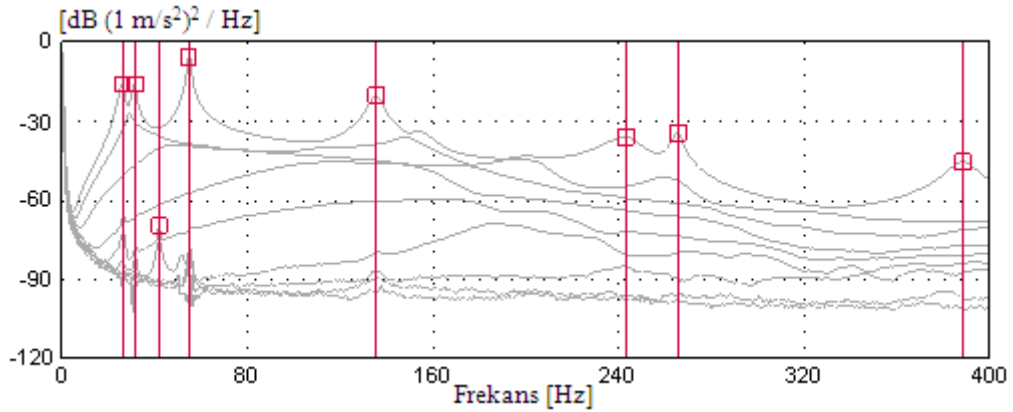
Şekil 2.18'in devamı



c) Kararlılık diyagramı

Tablo 2.7. Model köprünün birinci ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

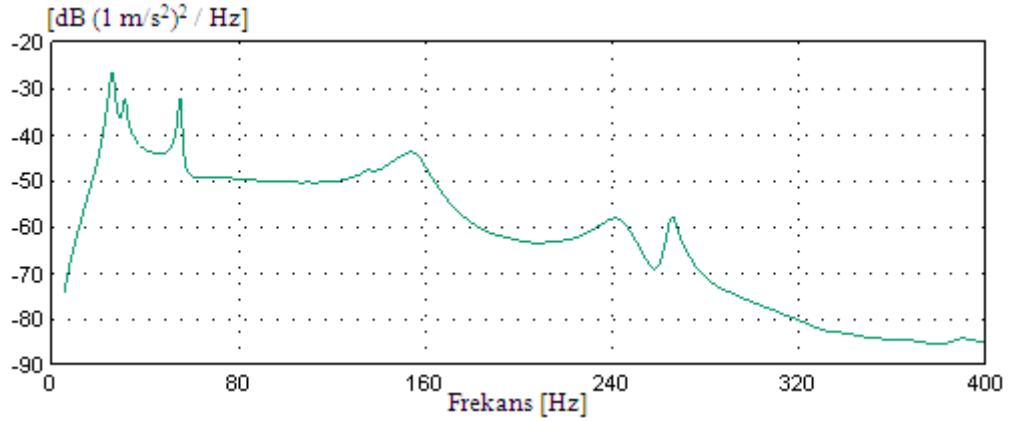
Frekans No	GFTAA Yöntemi		Ortalama Spektral Yoğunluk	SAB Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)		Frekans (Hz)	Sönüm (%)
1	25.32	2.488	25.50	25.30	2.500
2	31.51	1.402	31.50	31.70	1.870
3	41.47	1.472	41.50	41.40	3.351
4	52.18	5.631	52.00	51.00	5.631
5	139.0	2.315	136.0	138.2	4.125
6	235.0	5.715	235.0	235.0	5.020
7	264.8	0.492	264.0	265.8	0.799
8	295.5	1.420	292.0	299.5	2.857



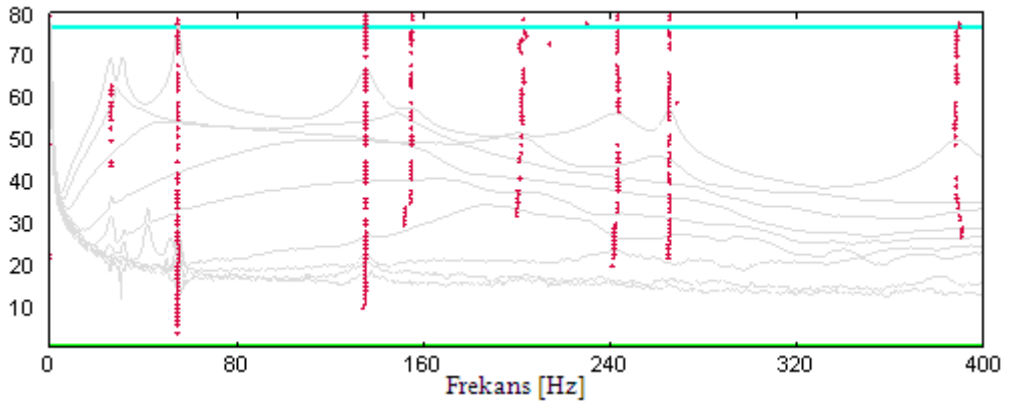
a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

Şekil 2.19. Model köprünün ikinci ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı

Şekil 2.19'un devamı



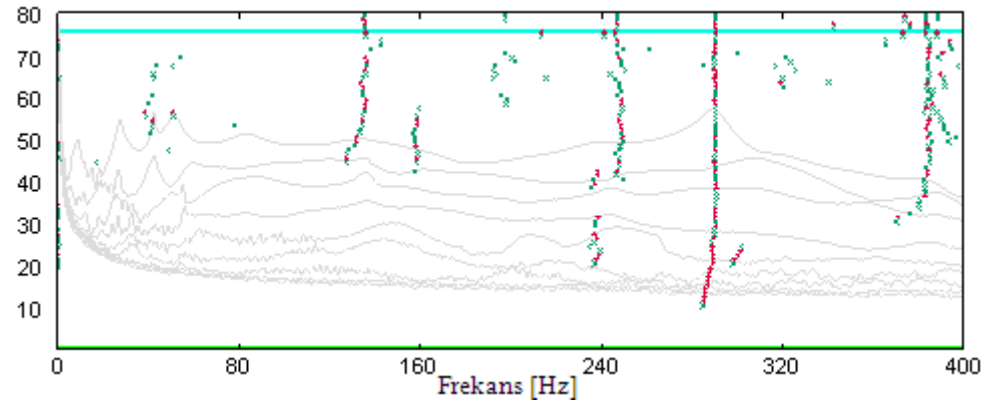
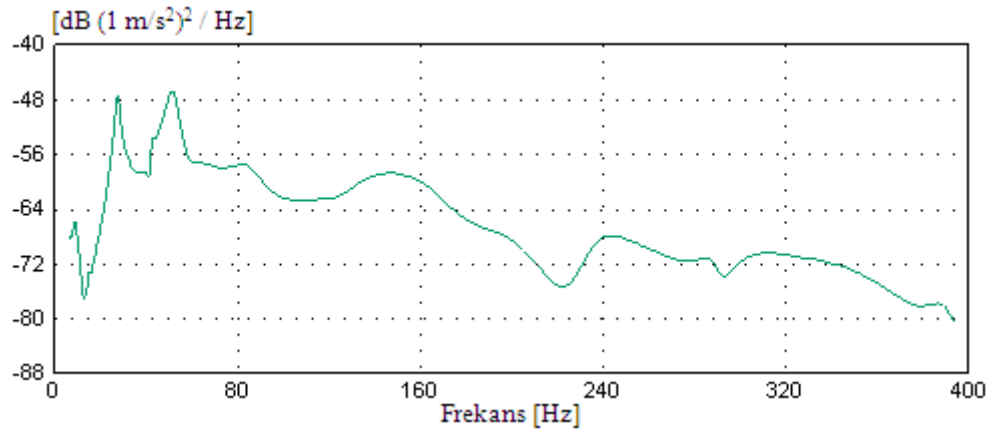
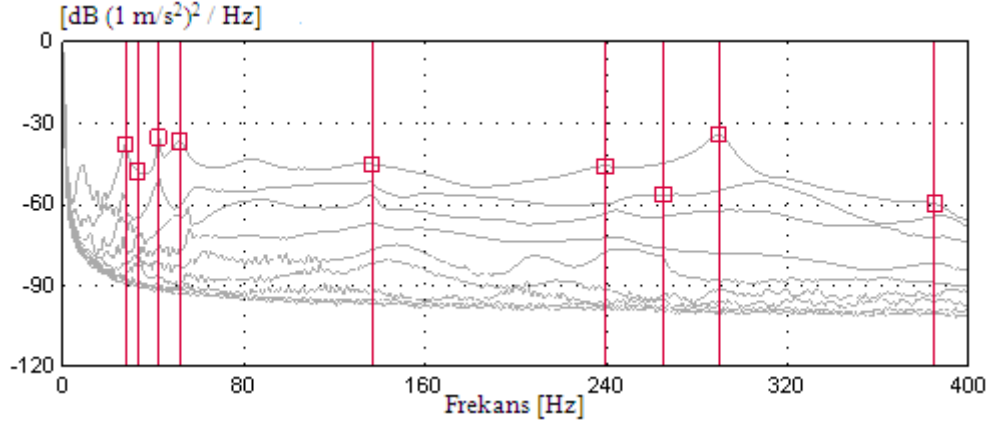
b) Spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması



c) Kararlılık diyagramı

Tablo 2.8. Model köprünün ikinci ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

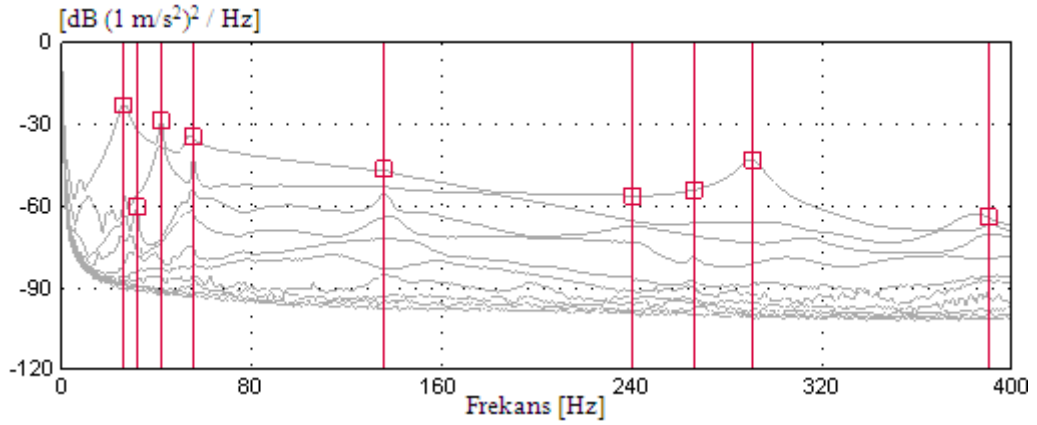
Frekans No	GFTAA Yöntemi		Ortalama Spektral Yoğunluk	SAB Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)		Frekans (Hz)	Sönüm (%)
1	25.84	4.008	25.50	26.77	5.225
2	31.13	2.987	31.50	34.92	2.534
3	41.90	0.941	42.10	41.90	1.315
4	54.91	1.004	55.00	54.66	0.697
5	135.4	2.184	154.0	135.3	1.947
6	241.7	2.423	241.0	243.2	3.175
7	265.1	0.673	265.0	265.4	0.800
8	297.0	1.112	297.2	297.3	0.914



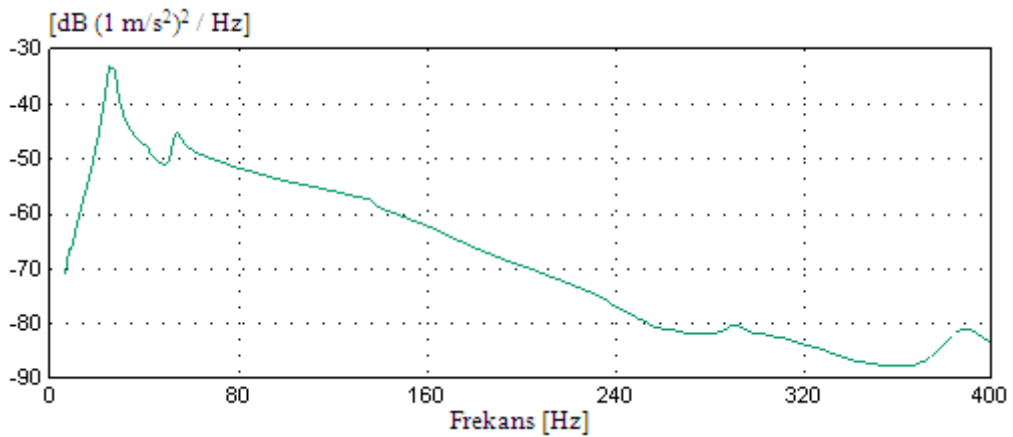
Şekil 2.20. Model köprünün üçüncü ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı

Tablo 2.9. Model köprünün üçüncü ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

Frekans No	GFTAA Yöntemi		Ortalama Spektral Yoğunluk	SAB Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)		Frekans (Hz)	Sönüm (%)
1	27.30	4.263	27.50	27.00	4.350
2	32.45	2.532	31.50	31.90	2.400
3	42.25	1.368	42.50	49.04	1.720
4	51.37	1.265	51.50	55.78	1.414
5	133.9	2.302	148.0	136.0	0.539
6	240.0	2.693	243.0	241.1	4.504
7	265.0	0.783	265.0	265.2	0.872
8	288.8	1.856	285.0	290.5	1.698



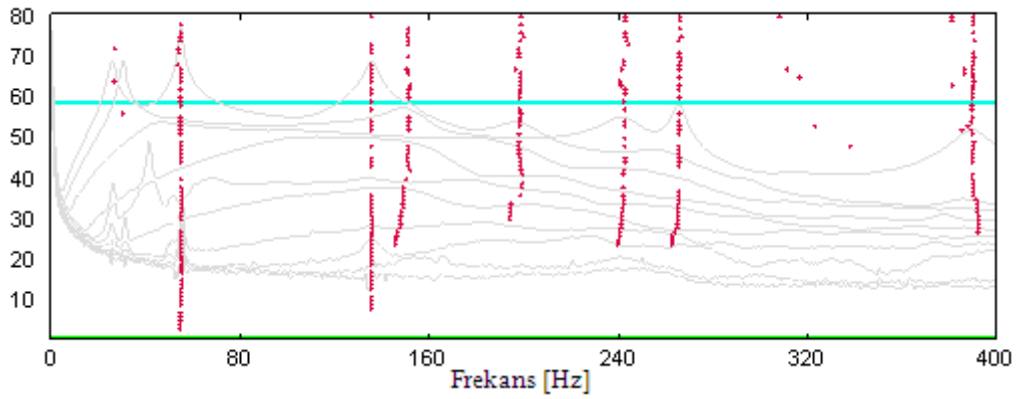
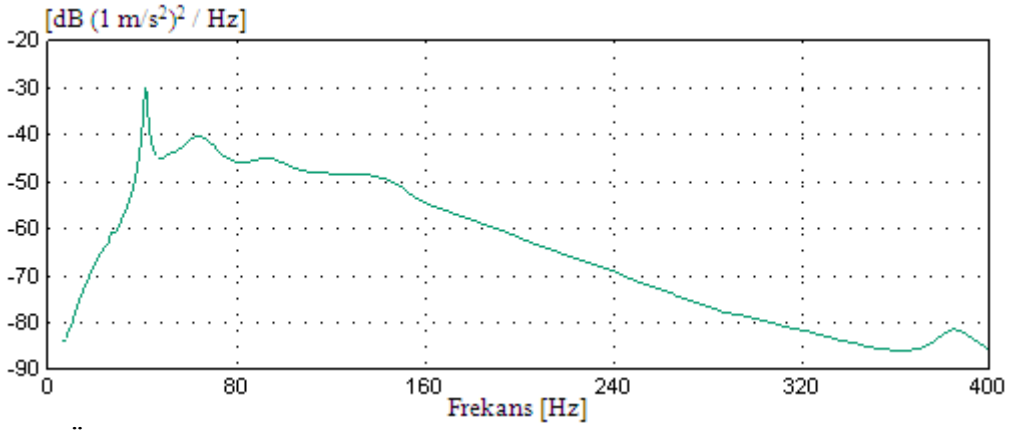
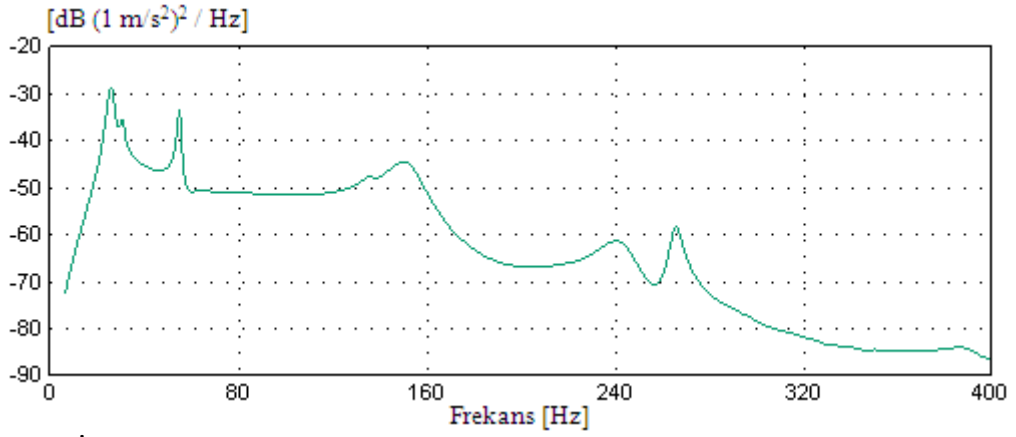
a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri



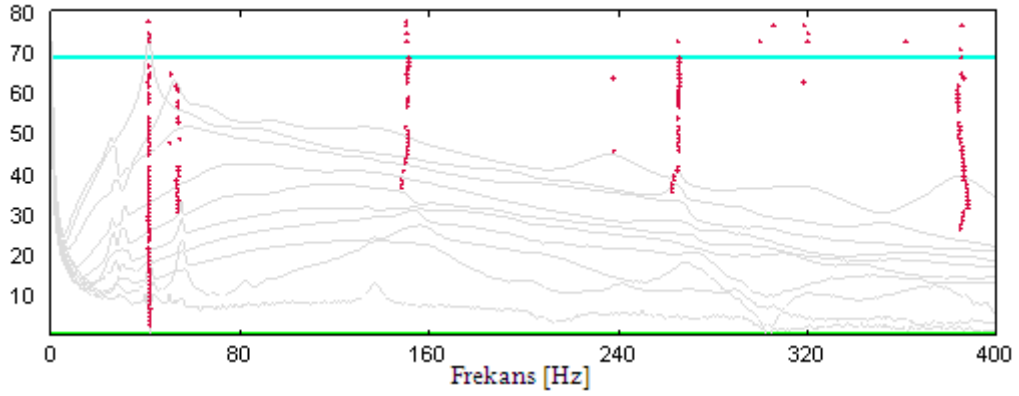
b) Birinci adımdan elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

Şekil 2.21. Model köprünün dördüncü ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı

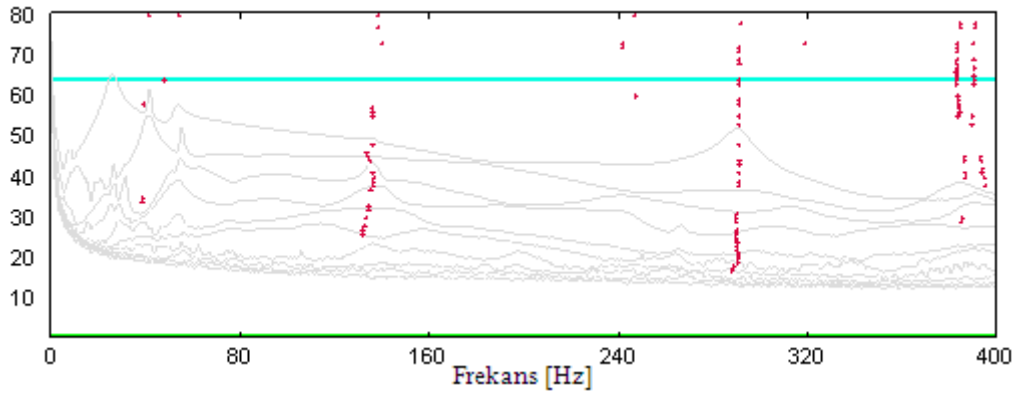
Şekil 2.21'in devamı



Şekil 2.21'in devamı



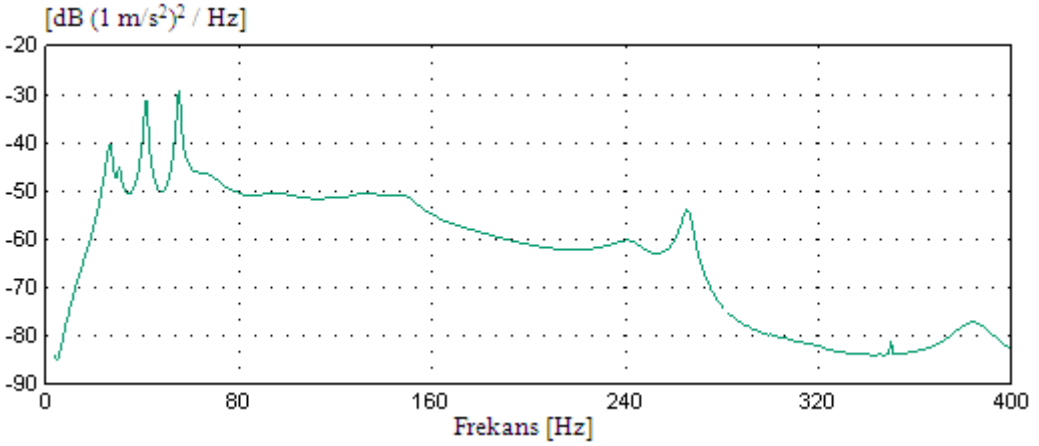
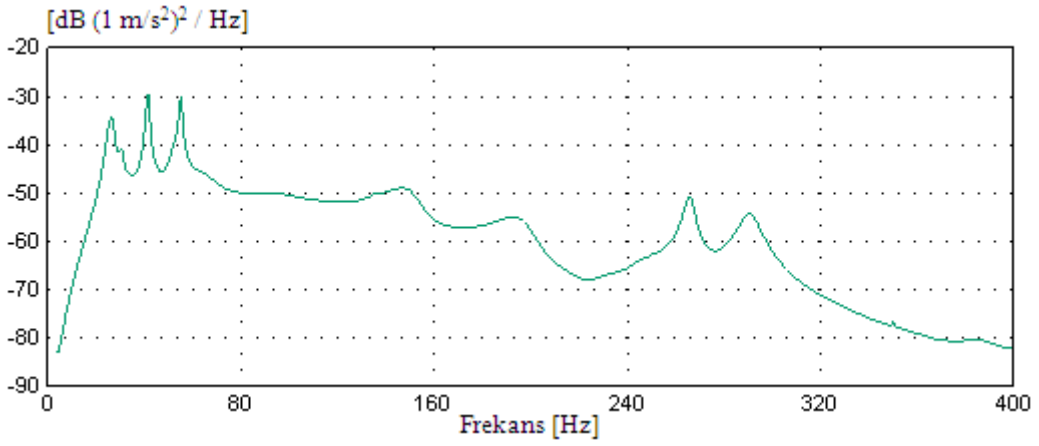
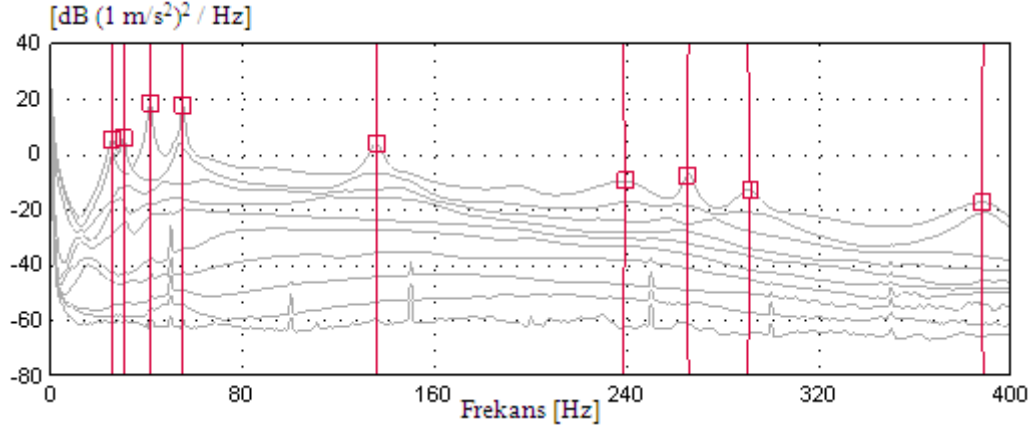
f) İkinci adımdan elde edilen kararlılık diyagramı



g) Üçüncü adımdan elde edilen kararlılık diyagramı

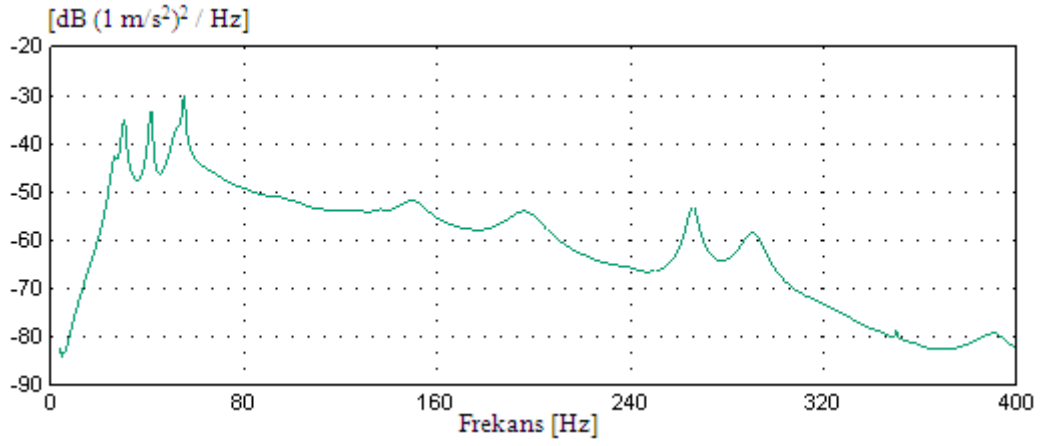
Tablo 2.10. Model köprü'nün dördüncü ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

Frekans No	GFTAA Yöntemi		Ortalama Spektral Yoğunluk	SAB Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)		Frekans (Hz)	Sönüm (%)
1	25.79	4.659	26.00	26.50	4.250
2	30.50	3.720	31.00	31.19	3.500
3	41.50	1.159	41.50	42.00	1.430
4	54.34	1.695	55.00	54.70	1.820
5	138.0	0.239	141.0	138.5	0.895
6	240.5	2.620	241.0	238.0	2.714
7	266.0	0.944	266.0	265.0	0.810
8	291.0	2.661	290.0	290.0	1.420

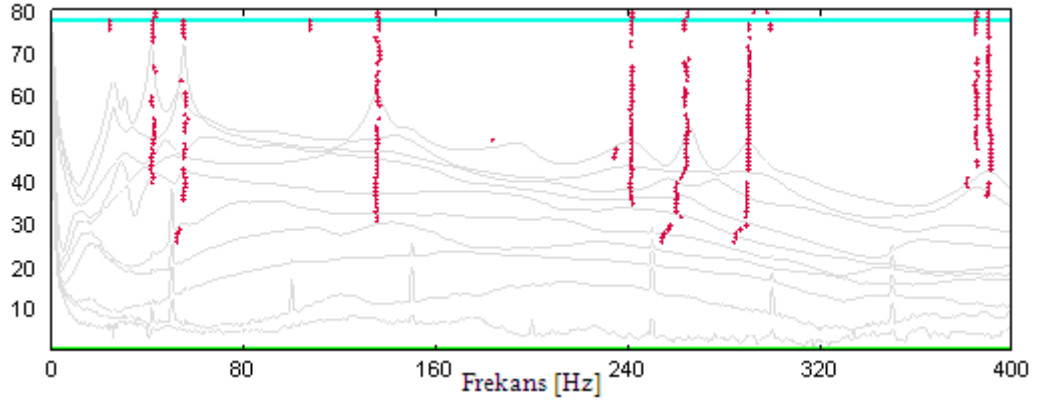


Şekil 2.22. Model köprü'nün beşinci ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı

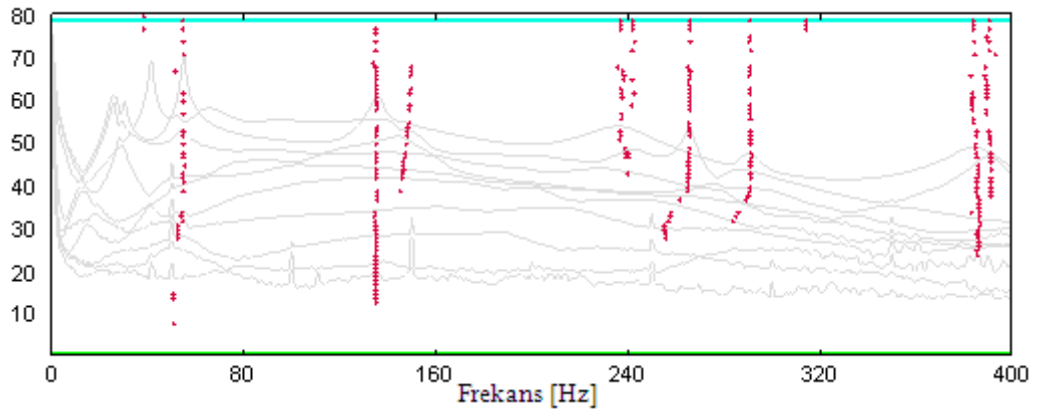
Şekil 2.22'nin devamı



d) Üçüncü adımdan elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

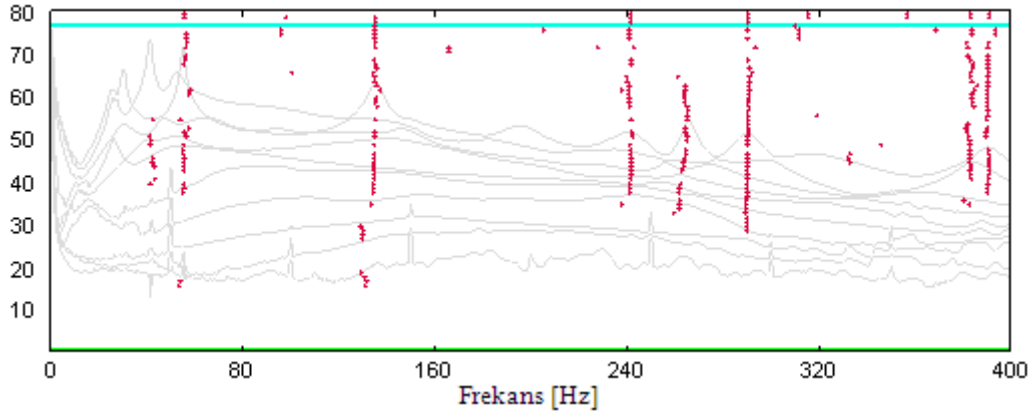


e) Birinci adımdan elde edilen kararlılık diyagramı



f) İkinci adımdan elde edilen kararlılık diyagramı

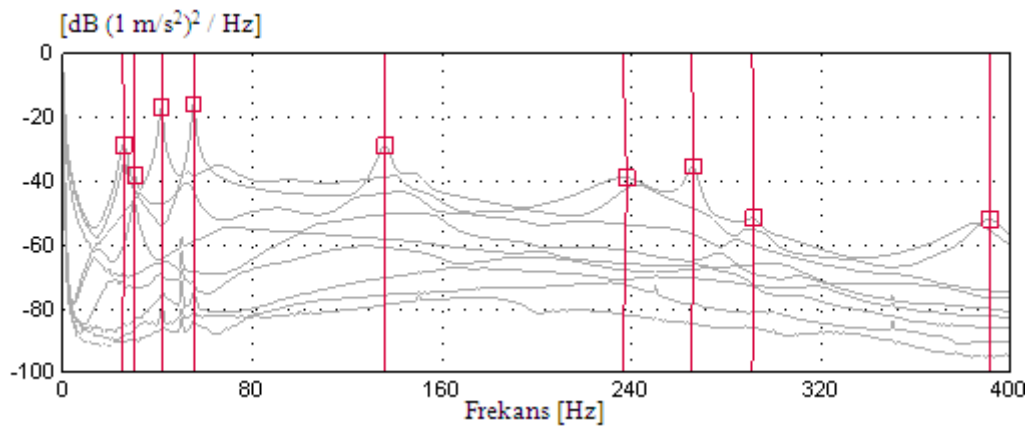
Şekil 2.22'nin devamı



g) Üçüncü adımdan elde edilen kararlılık diyagramı

Tablo 2.11. Model köprünün beşinci ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

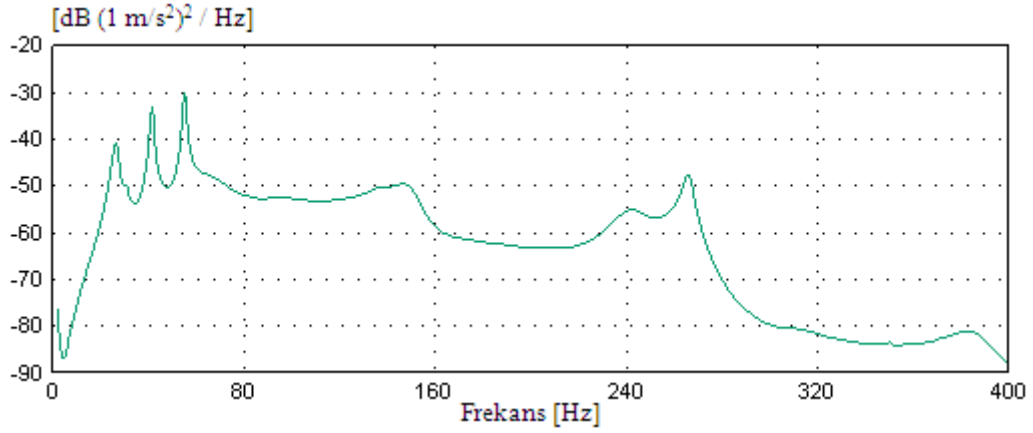
Frekans No	GFTAA Yöntemi		Ortalama Spektral Yoğunluk	SAB Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)		Frekans (Hz)	Sönüm (%)
1	25.34	2.363	26.00	26.00	2.600
2	30.17	3.514	30.50	30.50	2.800
3	41.40	1.406	41.50	41.50	1.520
4	55.01	1.043	55.00	55.00	1.715
5	135.5	1.996	148.0	138.0	0.912
6	238.1	3.232	240.0	241.0	2.670
7	265.6	0.761	266.0	265.0	0.785
8	290.4	1.253	291.0	290.0	0.985



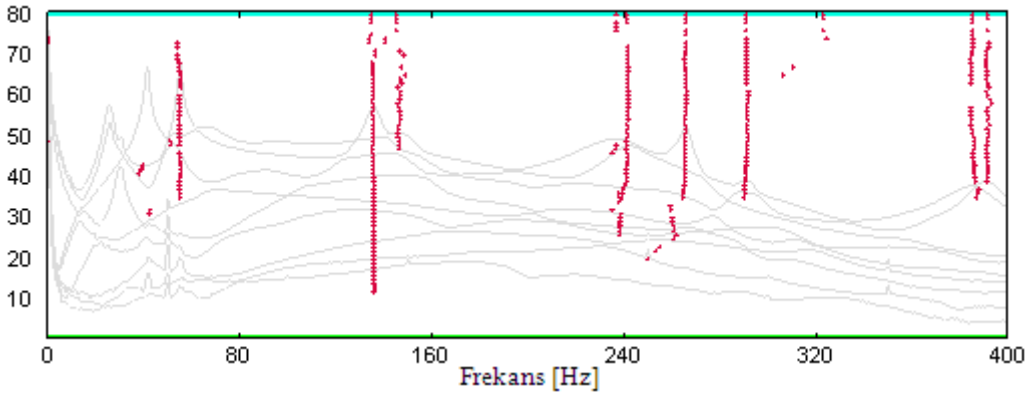
a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

Şekil 2.23. Model köprünün altıncı ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı

Şekil 2.23'ün devamı



b) Spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

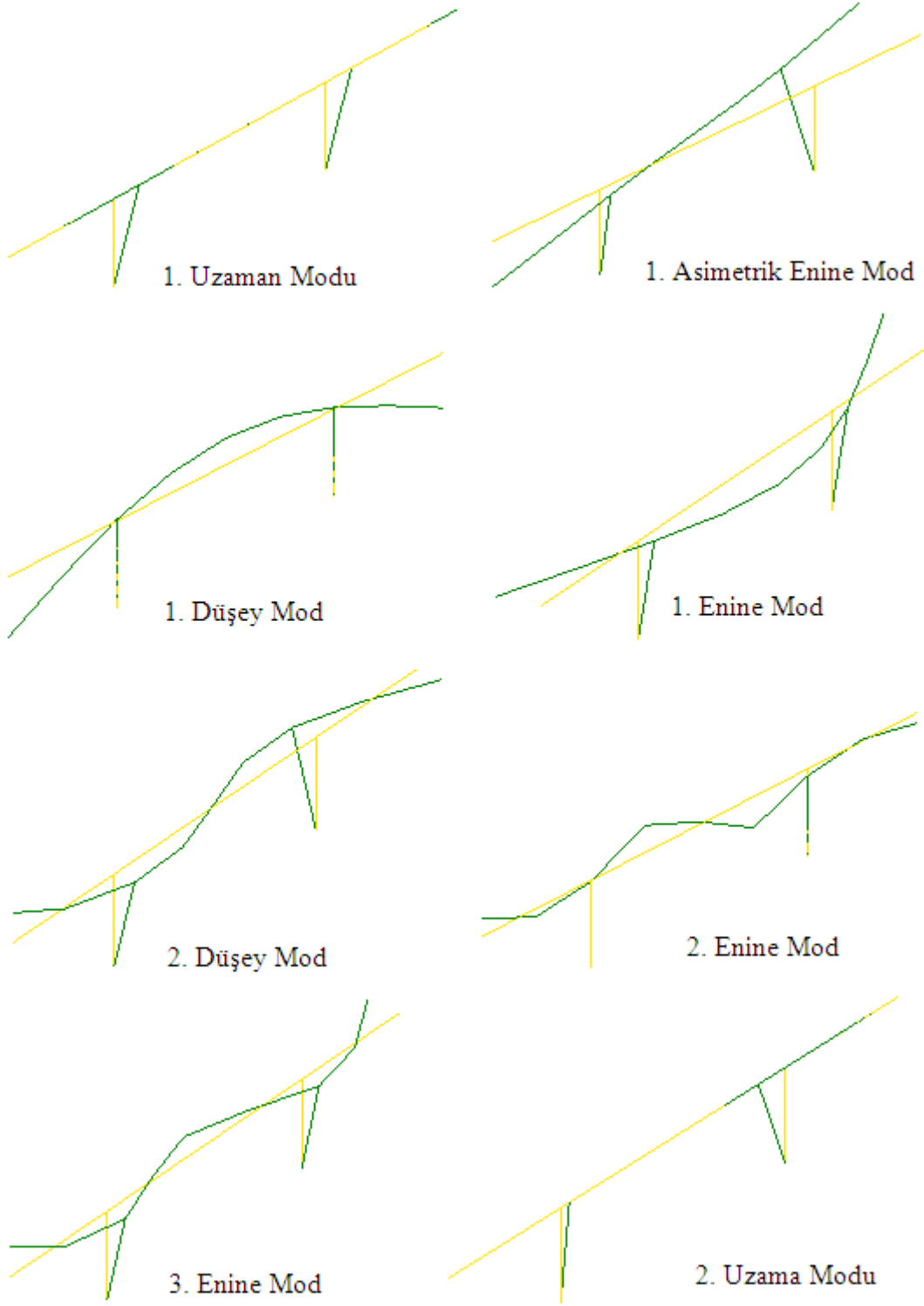


c) Kararlılık diyagramı

Tablo 2.12. Model köprünün altıncı ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

Frekans No	GFTAA Yöntemi		Ortalama Spektral Yoğunluk	SAB Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)		Frekans (Hz)	Sönüm (%)
1	25.36	2.295	26.50	26.00	2.320
2	30.44	2.392	30.50	30.80	1.950
3	41.46	1.392	41.50	43.91	1.650
4	55.09	0.963	55.00	54.01	1.914
5	135.8	1.721	136.0	134.7	1.359
6	236.2	1.855	242.0	236.9	4.700
7	265.4	0.813	266.0	265.6	0.821
8	290.9	0.626	291.0	292.9	0.715

Model köprüye uygulanan deneysel ölçüm testlerinden GFTAA ve SAB yöntemlerine göre elde edilen mod şekilleri birbirleriyle uyum içerisinde. Bu nedenle sadece bir ölçüme ait mod şekilleri Şekil 2.24’te verilmektedir.



Şekil 2.24. Model köprünün ÇTY’den elde edilen mod şekilleri

Şekil 2.24 incelendiğinde, birinci ve sekizinci modların uzama; ikinci, dördüncü, altıncı ve yedinci modaların enine; üçüncü ve beşinci modaların ise düşey mod olduğu görülmektedir.

Model köprü üzerinde gerçekleştirilen deneysel ölçüm düzenekleri ve ivmeölçerlerin yerleşim planları incelendiğinde ilk üç ölçümün sadece tek doğrultuda sinyal aldığı görülmektedir. Altıncı ölçüm ise sadece iki ayak arasında kalan orta açıklık davranışının elde edilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle köprünün bütün olarak yapısal davranışının elde edilmesinde ve elde edilen dinamik karakteristiklerin karşılaştırmalı olarak incelenmesinde dördüncü ve beşinci ölçümler oldukça önem kazanmaktadır. Bu kısmı daha iyi ifade edebilmek için, model köprünün dördüncü ve beşinci ölçümleri için GFTAA ve SAB yöntemlerine göre elde edilen ilk sekiz doğal frekans ve modlar arasındaki uyumu gösteren Modal Güvence Kriteri (MGK) değerleri Tablo 2.13'te verilmektedir. Tablo 2.13'te görüldüğü gibi iki yöntemden elde edilen doğal frekanslar arasındaki en büyük fark %2.68'dir. Ayrıca, ilk sekiz mod şekli için MGK değerleri 1'e yakındır. Buradan GFTAA ve SAB yöntemlerinden elde edilen modların birbirine çok benzediği anlaşılmaktadır.

Tablo 2.13. GFTAA ve SAB yöntemine göre elde edilen modların karşılaştırılması

Mod	Dördüncü Ölçüm Testi				Beşinci Ölçüm Testi			
	GFTAA (Hz)	SAB (Hz)	Fark (%)	MGK	GFTAA (Hz)	SAB (Hz)	Fark (%)	MGK
1	25.79	26.50	2.68	0.995	25.34	26.00	2.54	0.980
2	30.50	31.19	2.21	0.992	30.17	30.50	1.08	0.975
3	41.50	42.00	1.19	0.954	41.40	41.50	0.24	0.930
4	54.34	54.70	0.66	0.893	55.01	55.00	0.02	0.866
5	138.0	138.5	0.36	0.912	135.5	138.0	1.81	0.891
6	240.5	238.0	1.04	0.880	238.1	241.0	1.20	0.865
7	266.0	265.0	0.38	0.872	265.6	265.0	0.23	0.884
8	291.0	290.0	0.34	0.905	290.4	290.0	0.14	0.900

Model köprünün GFTAA ve SAB yöntemleri kullanılarak bütün ölçümlerinden elde edilen frekans ve sönüm oranı değerleri Tablo 2.14 ve 2.15'te karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Tablo 2.14 ve 2.15 incelendiğinde GFTAA ve SAB yöntemlerinden elde edilen doğal frekansların hemen hemen örtüştüğü, sönüm oranları arasında ise farklılık olmasına karşın yine de uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 2.14. Model köprünün çevresel titreşim testlerinden GFTAA yöntemine göre elde edilen ilk sekiz doğal frekans ve sönüm oranları

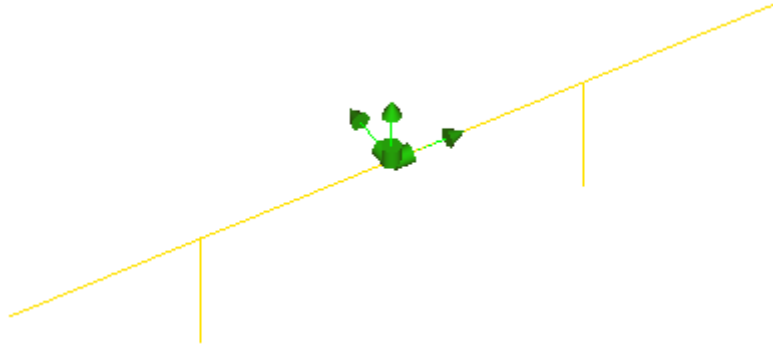
Modlar (Hz)	Çevresel Titreşim Testleri-GFTAA Yöntemi											
	Birinci Ölçüm		İkinci Ölçüm		Üçüncü Ölçüm		Dördüncü Ölçüm		Beşinci Ölçüm		Altıncı Ölçüm	
	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	25.32	2.488	25.84	4.008	27.30	4.263	25.79	4.659	25.34	2.363	25.36	2.295
2	31.51	1.402	31.13	2.987	32.45	2.532	30.50	3.720	30.17	3.514	30.44	2.392
3	41.47	1.472	41.90	0.941	42.25	1.368	41.50	1.159	41.40	1.406	41.46	1.392
4	52.18	5.631	54.91	1.004	51.37	1.265	54.34	1.695	55.01	1.043	55.09	0.963
5	139.0	2.315	135.4	2.184	133.9	2.302	138.0	0.239	135.5	1.996	135.8	1.721
6	235.0	5.715	241.7	2.423	240.0	2.693	240.5	2.620	238.1	3.232	236.2	1.855
7	264.8	0.492	265.1	0.673	265.0	0.783	266.0	0.944	265.6	0.761	265.4	0.813
8	295.5	1.420	297.0	1.112	288.8	1.856	291.0	2.661	290.4	1.253	290.9	0.626

Tablo 2.15. Model köprünün çevresel titreşim testlerinden SAB yöntemine göre elde edilen ilk sekiz doğal frekans ve sönüm oranları

Modlar (Hz)	Çevresel Titreşim Testleri-SAB Yöntemi											
	Birinci Ölçüm		İkinci Ölçüm		Üçüncü Ölçüm		Dördüncü Ölçüm		Beşinci Ölçüm		Altıncı Ölçüm	
	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	25.30	2.500	26.77	5.225	27.00	4.350	26.50	4.250	26.00	2.600	26.00	2.320
2	31.70	1.870	34.92	2.534	31.90	2.400	31.19	3.500	30.50	2.800	30.80	1.950
3	41.40	3.351	41.90	1.315	49.04	1.720	42.00	1.430	41.50	1.520	43.91	1.650
4	51.00	5.631	54.66	0.697	55.78	1.414	54.70	1.820	55.00	1.715	54.01	1.914
5	138.2	4.125	135.3	1.947	136.0	0.539	138.5	0.895	138.0	0.912	134.7	1.359
6	235.0	5.020	243.2	3.175	241.1	4.504	238.0	2.714	241.0	2.670	236.9	4.700
7	265.8	0.799	265.4	0.800	265.2	0.872	265.0	0.810	265.0	0.785	265.6	0.821
8	299.5	2.857	297.3	0.914	290.5	1.698	290.0	1.420	290.0	0.985	292.9	0.715

2.2.6.2. Zorlanmış Titreşim Yöntemiyle (ZTY) Model Köprünün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Model köprünün doğal frekanslarını belirlemek amacıyla köprüye zorlanmış titreşim testleri uygulanmıştır. Model köprünün zorlanmış titreşim testlerinde kullanılan deneysel ölçüm sistemi Bölüm 1.6.1'deki anlatıma uygun olarak seçilmiştir. Buna göre, B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi ve B&K 4506-B003 tipi üç eksenli ivmeölçerler ve PULSE yazılımı Zorlanmış Titreşim Yöntemi'nde kullanılmıştır. Model köprüyü değerli ölçülebilen bir etki ile titreştirmek için APS 400 tipi titreştirici ve B&K 8210 tipi darbe çekici kullanılmıştır. Gerçekleştirilen zorlanmış titreşim testlerinde köprüden gelen titreşim sinyallerini toplamak için bir adet üç eksenli ivmeölçer köprü tabliyesi üzerinde açıklık orta noktasına yerleştirilmiştir (Şekil 2.25). Her bir zorlanmış titreşim testinde ölçülmesi planlanan frekans aralığı analitik modellerden elde edilen doğal frekanslara göre 0-400 Hz arası seçilmiş ve her test için darbe çekiciyle ortalama 5 darbe yapılarak sinyaller toplanmıştır. Testlerde, ivmeölçerlerle veri toplama ünitesi arasındaki sinyal transferi tek eksenli sinyal kabloları ile sağlanmıştır. Veri toplama ünitesine alınan ham sinyalleri dijital ortama göndermek için veri toplama ünitesi ile bilgisayar arasında ara kablo kullanılmış ve PULSE yazılımı ile ham sinyaller işlenebilir hale getirilmiştir. Zorlanmış titreşim testlerinde toplanan sinyalleri işleyebilecek bir paket program ölçüm sistemine dahil edilmediğinden, model köprünün dinamik karakteristikleri belirlenememiştir. Bunun yerine köprünün doğal frekanslarını içeren Frekans Davranış Fonksiyonları (FDF) PULSE yazılımından elde edilmiştir. Model köprünün zorlanmış titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar Şekil 2.26'da verilmektedir.

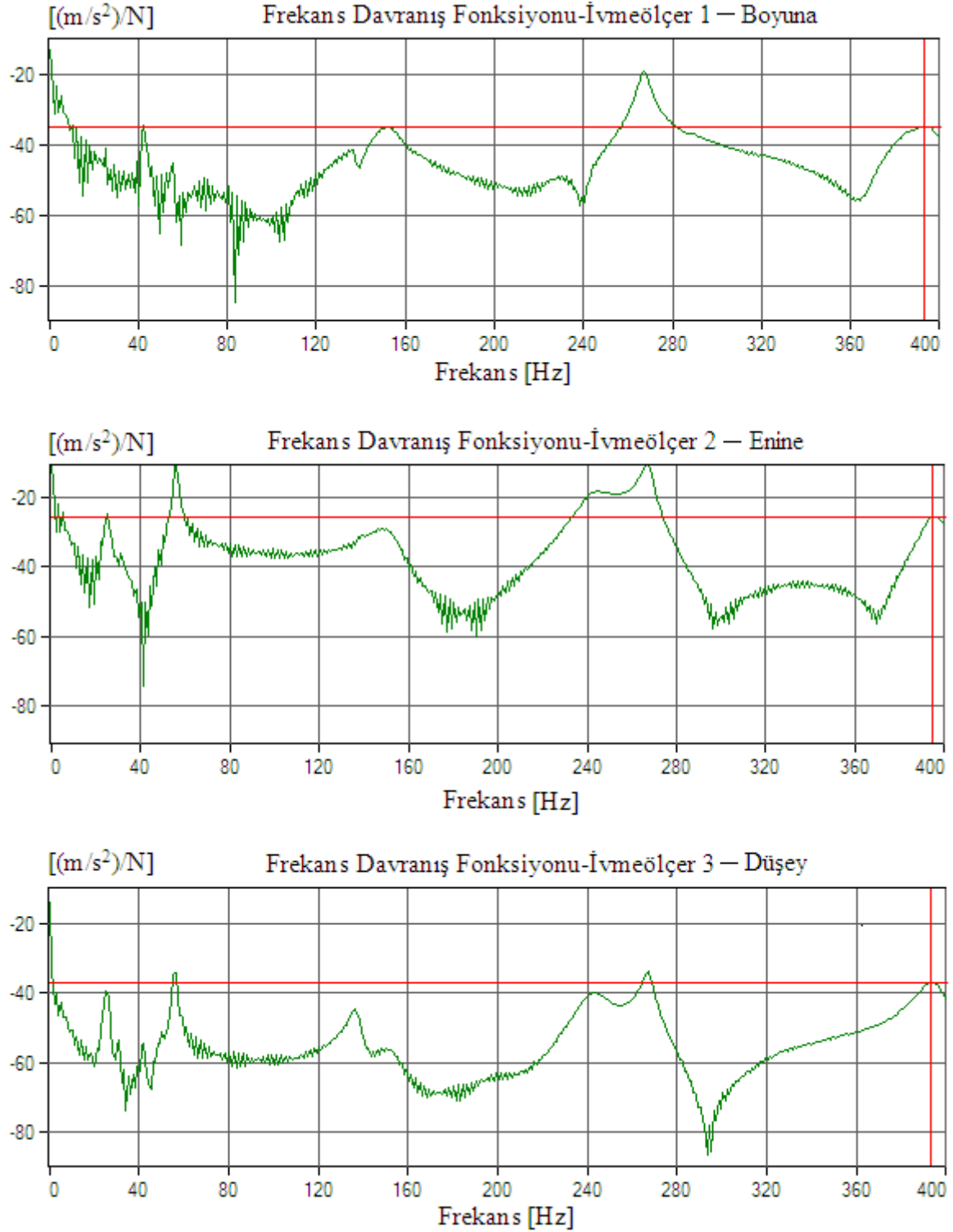


Şekil 2.25. Model köprünün zorlanmış titreşim testlerinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı



Şekil 2.26. Model köprü'nün zorlanmış titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar

Model köprüye aynı ölçüm düzeneği kullanılarak farklı dört zorlanmış testi uygulanmıştır. Her bir ölçüm testinde bir adet üç eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Her bir eksenden (yatay doğrultuda boyuna ve enine ile düşey doğrultuda) beş darbe vuruşunun ortalaması alınarak Frekans Davranış Fonksiyonları (FDF) elde edilmiştir. Elde edilen FDF'ler incelendiğinde alınan ölçümlerin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Bu nedenle sadece bir ölçümden elde edilen FDF'ler Şekil 2.27'de verilmektedir. FDF'lerde görünen pikler, doğal frekanslara karşılık gelmektedir. Kullanılan ölçüm sisteminde yeterli yazılım bulunmadığından dolayı mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilememiştir.



Şekil 2.27. Model köprü'nün zorlanmış titreşim testine ait frekans davranış fonksiyonları

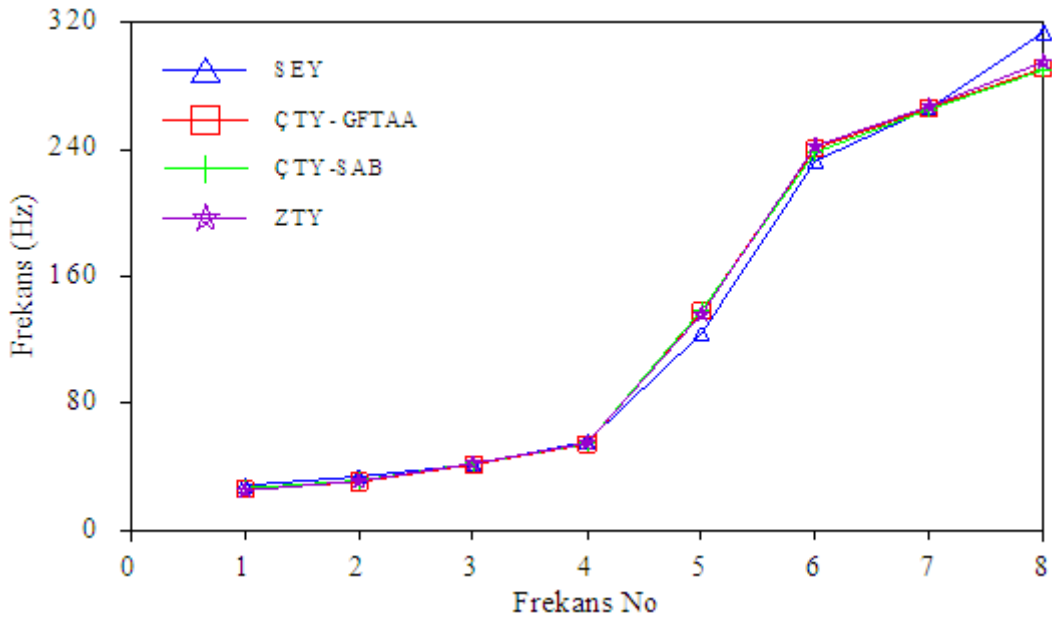
Model köprüye uygulanan zorlanmış titreşim testlerinden her bir ivmeölçer için elde edilen frekans davranış fonksiyonlarından yararlanılarak belirlenen doğal frekanslar Tablo 2.16'da verilmektedir.

Tablo 2.16. Model köprüye uygulanan zorlanmış titreşim testinden elde edilen doğal frekanslar

Zorlanmış Titreşim Testleri	Frekans (Hz)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Ölçüm 1	25.0	31.0	42.0	55.0	136.0	242.0	267.0	295.0

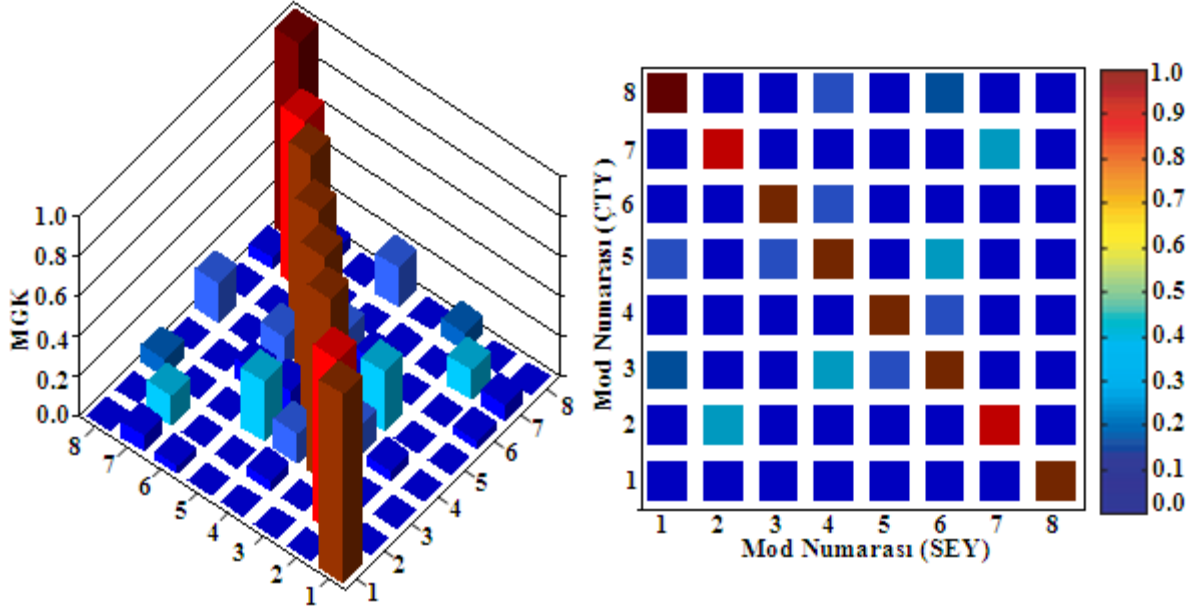
2.2.6.3. Model Köprünün Analitik ve Deneysel Dinamik Karakteristiklerinin Karşılaştırılması

SEY, ÇTY ve ZTY'den elde edilen doğal frekanslar Tablo 2.17'de, doğal frekansların değişimi ise Şekil 2.28'de verilmektedir. GFTAA ve SAB yöntemlerinden elde edilen doğal frekanslar birbirleriyle uyum içerisinde olduğu için (Tablo 2.13) Tablo 2.17'de sadece GFTAA yönteminden elde edilen doğal frekans değerleri verilmiştir. Şekil 2.28'den her dört yöntemle göre elde edilen doğal frekansların birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 2.28. Model köprünün SEY, ÇTY (GFTAA ve SAB) ve ZTY'ye göre elde edilen doğal frekanslarının değişimi

SEY ve ÇTY'den elde edilen mod şekilleri arasındaki uyumu gösteren MGK grafikleri Şekil 2.29'da verilmektedir. Şekil 2.29'da görüldüğü gibi, analitik ve deneysel modlar birbiriyle uyum içerisinde dir.



Şekil 2.29. SEY ve ÇTY'den elde edilen modlara ait MGK grafiği

Tablo 2.17. Model köprünün SEY, ÇTY ve ZTY'e göre elde edilen doğal frekansları

Mod	Ölçüm 1			Ölçüm 2			Ölçüm 3			Ölçüm 4			Ölçüm 5			Ölçüm 6		
	SEY	ÇTY	ZTY	SEY	ÇTY	ZTY	SEY	ÇTY	ZTY	SEY	ÇTY	ZTY	SEY	ÇTY	ZTY	SEY	ÇTY	ZTY
1	28.33	25.32	25.0	28.33	25.84	25.0	28.33	27.30	25.0	28.33	25.79	25.0	28.33	25.34	25.0	28.33	25.36	25.0
2	33.82	31.51	31.0	33.82	31.13	31.0	33.82	32.45	31.0	33.82	30.50	31.0	33.82	30.17	31.0	33.82	30.44	31.0
3	41.39	41.47	42.0	41.39	41.90	42.0	41.39	42.25	42.0	41.39	41.50	42.0	41.39	41.40	42.0	41.39	41.46	42.0
4	56.05	52.18	55.0	56.05	54.91	55.0	56.05	51.37	55.0	56.05	54.34	55.0	56.05	55.01	55.0	56.05	55.09	55.0
5	123.9	139.0	136.0	123.9	135.4	136.0	123.9	133.9	136.0	123.9	138.0	136.0	123.9	135.5	136.0	123.9	135.8	136.0
6	232.7	235.0	242.0	232.7	241.7	242.0	232.7	240.0	242.0	232.7	240.5	242.0	232.7	238.1	242.0	232.7	236.2	242.0
7	265.8	264.8	267.0	265.8	265.1	267.0	265.8	265.0	267.0	265.8	266.0	267.0	265.8	265.6	267.0	265.8	265.4	267.0
8	313.5	295.5	295.0	313.5	297.0	295.0	313.5	288.8	295.0	313.5	291.0	295.0	313.5	290.4	295.0	313.5	290.9	295.0

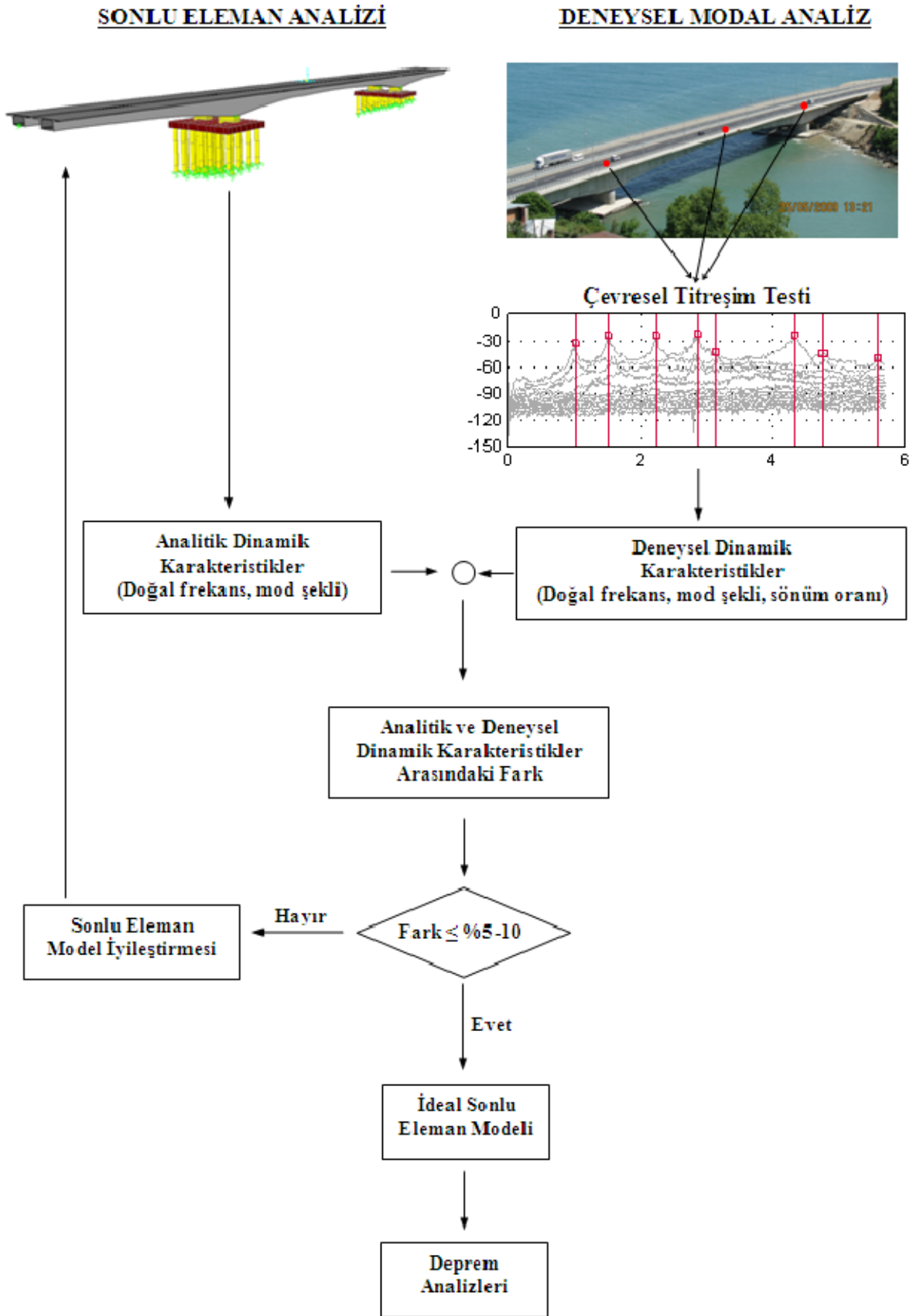
2.3. Arazi Çalışmaları

Tez çalışması kapsamında yapılması planlanan arazi çalışmaları için Kömürhan Köprüsü ve Gülburnu Köprüsü seçilmiştir. Bu kısımda, seçilen köprülerin dinamik karakteristikleri analitik ve deneysel olarak belirlenmekte ve köprülerin sonlu eleman modelleri deneysel ölçüm sonuçları dikkate alınarak iyileştirilmektedir. Ayrıca bu kısımda, seçilen köprülerin deprem davranışları başlangıç ve iyileştirilmiş sonlu eleman modelleri üzerinde gerçekleştirilen analizler ışığında karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Bu kısımda, yapılan çalışmaları içeren akış şeması Şekil 2.30'da verilmektedir.

2.3.1. Kömürhan Köprüsü

2.3.1.1. Kömürhan Köprüsü ve Geometrik Özellikleri

Kömürhan Köprüsü, Elazığ-Malatya Karayolu'nun Fırat Nehri ile kesiştiği nokta olan 51. kilometresinde geçişi sağlayan köprüdür. Fırat'ın bu kesimindeki tek köprü olduğu için de lojistik önemi büyüktür. Köprü'nün yapımına 23.02.1983 tarihinde başlanılmış ve 08.04.1986 tarihinde tamamlanarak trafiğe açılmıştır. Kömürhan Köprüsü, Malatya ile Elazığ il sınırının tam ortasında olup 1986 yılından beri Karakaya baraj gölünün iki tarafını birbirine bağlamaktadır. Kömürhan Köprüsü yapılmadan önce Elazığ-Malatya illeri arasındaki ulaşım çeşitli yollarla yapılmaktaydı. 1930 yıllara kadar ulaşım sadece sal ve kayıklarla, daha sonra ise 1. Dünya savaşı yıllarında yapılmış olan ahşap bir köprüyle sağlanmıştır. Fakat suların yükselmesi ile birlikte ahşap köprü yıkılmış, dolayısıyla sal ve kayıklarla ulaşım tekrar dönmüştür. Bu nedenle Kömürhan Boğaz'ında betonarme bir köprü yapılması kararlaştırılmıştır. 1 Ağustos 1930 tarihinde başlayan betonarme köprü inşaatı 3 Nisan 1932 tarihinde tamamlanmıştır. Köprü'nün yapımcısı bir İsveç firması olan Nidgvist ve Helm Anonim Şirkettir. Köprü, esasında İsmet Paşa Köprüsü olarak isimlendirilmesine rağmen, Kömürhan Köprüsü olarak da anılmaktadır. Kömürhan Köprüsü, 109.60 m orta açıklık uzunluğuyla kemer tipinde yapıldığı dönem itibariyle dünyanın en büyük altıncı betonarme köprüsü olma özelliğini kazanmıştır. Uzun yıllar bölgeye hizmet eden bu ilk köprü'nün, Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP) kapsamında inşa edilmiş olan Karakaya Baraj Gölünün suları altında kalacağı öngörüldüğü için, boğaza yeni bir köprü'nün yapılması gerekmiştir.



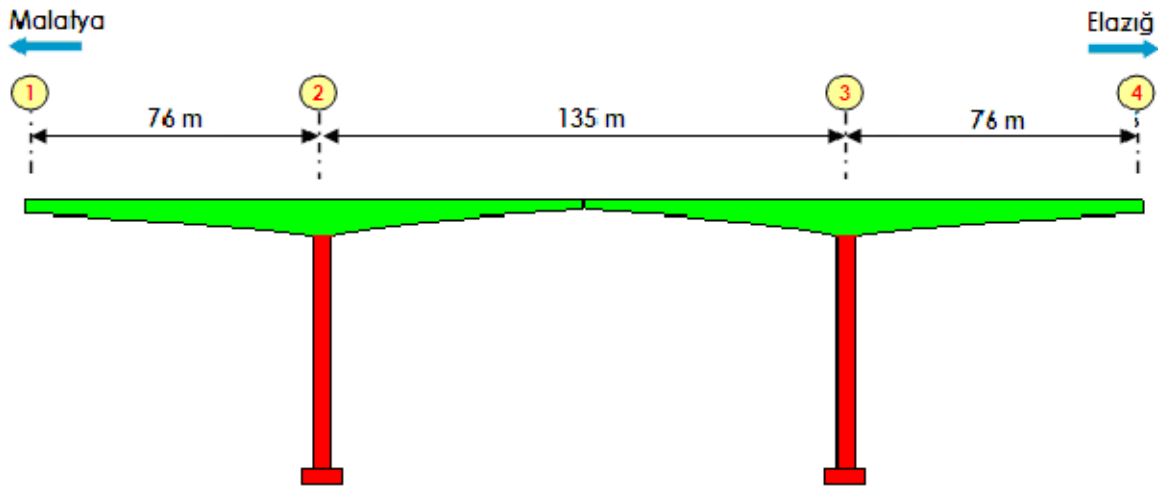
Şekil 2.30. Arazi çalışmaları kapsamında yapılan çalışmaları içeren akış şeması

Bu amaçla köprünün hemen yanına 1983-1986 yılları arasında bir yenisi inşa edilmiştir. Bu yeni yapı Türkiye'nin ilk dengeli konsol yöntemi ile inşa edilmiş köprüsü olma özelliğini taşımaktadır. Kömürhan Köprüsü'ne ait bazı fotoğraflar Şekil 2.31'de verilmektedir. Karakaya Barajı yapıldıktan sonra orijinal Kömürhan Köprüsü suyun altında kalmıştır.



Şekil 2.31. Kömürhan Köprüsü'ne ait bazı fotoğraflar

Kömürhan Köprüsü tek tabliyeye sahip, kutu kesitli ve öngerilmeli betonarme bir köprüdür. Köprü, ana açıklığı 135 m ve kenar açıklıkları 76 m olmak üzere toplam üç açıklıklıdır. Köprü toplam uzunluğu ve genişliği sırasıyla 287 m ve 11.5 m'dir. Köprü'nün inşası sırasında 1340 ton inşaat demiri, 143 ton öngerme kablosu ve 11000 m³ beton kullanılmıştır. Köprü boy kesiti ve eleman boyutlarına ait genel görünüşler Şekil 2.32'de verilmektedir. Köprü taşıyıcı sistemi başlıca tabliye, ayaklar, kenar mesnetler ve orta açıklık genişleme derzinden oluşmaktadır.



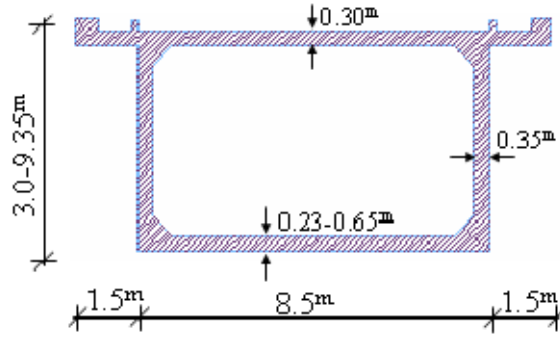
Şekil 2.32. Kömürhan Köprüsü'nün boy kesiti ve eleman boyutları

2.3.1.1.1. Köprü Tabliyesi

Kömürhan Köprüsü, 287 m uzunluğunda ve 11.5 m genişliğinde tek tabliyeye sahiptir. Tabliye üzerinde trafik biri gidiş ve biri de geliş olmak üzere iki şeritten sürdürülmektedir. Köprü'nün 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, öngerilme ile bağlanmaları sonucu sağlanmıştır.

Tabliye, köprü orta noktasından itibaren Elazığ ve Malatya tarafına doğru 28'er adet olmak üzere toplam 56 adet segmentten oluşmaktadır. Segmentlerin tamamına yakın kısmı 5 m uzunluğundadır. Her bir segment donatılı kutu kesite sahiptir. Donatılı kutu kesitin yüksekliği orta ayak üzerinde 9.35 m olmakla beraber, parabolik bir azalım göstererek kenar ayaklarda 3.50 m'ye, ortadaki genişleme derzinde ise 3.00 m'ye inmektedir. Kutu

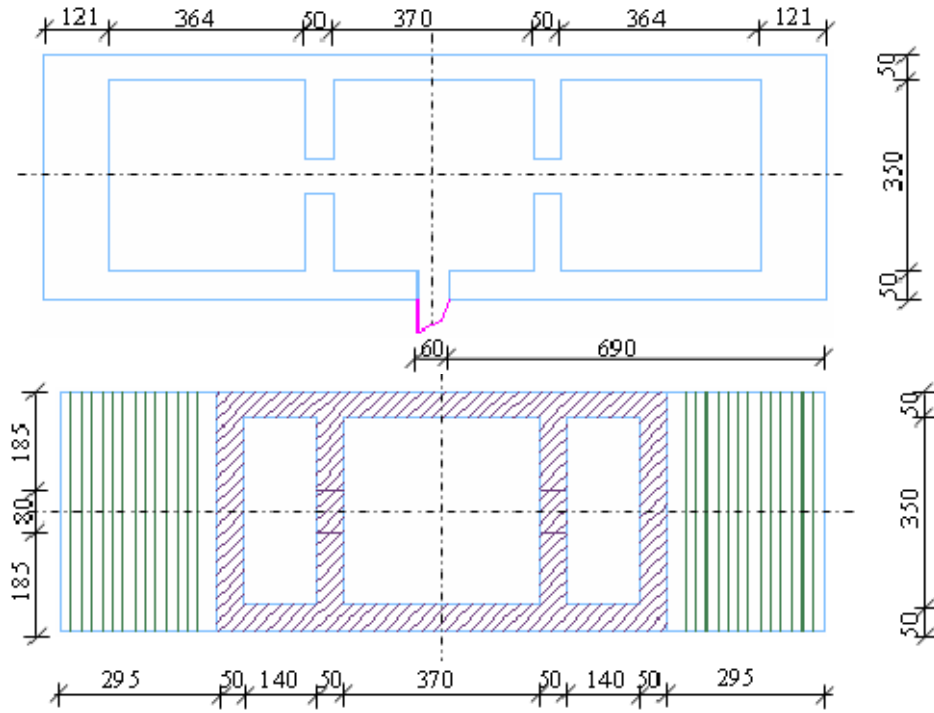
kesitin yan cidarlarının ve üst tabliyesinin kalınlığı tabliye uzunluğu boyunca sabit olup sırasıyla 0.35 m ve 0.30 m'dir. Alt tabliye kalınlığı ise kenar ayaklardan orta ayaklara kadar 0.23 m'den 0.65 m'ye kadar parabolik olarak artmaktadır. Değişken kutu kesitin şematik olarak gösterimi Şekil 2.33'te verilmektedir.



Şekil 2.33. Değişken kesitli tabliye üst yapısı

2.3.1.1.2. Köprü Ayakları ve Kenar Mesnetler

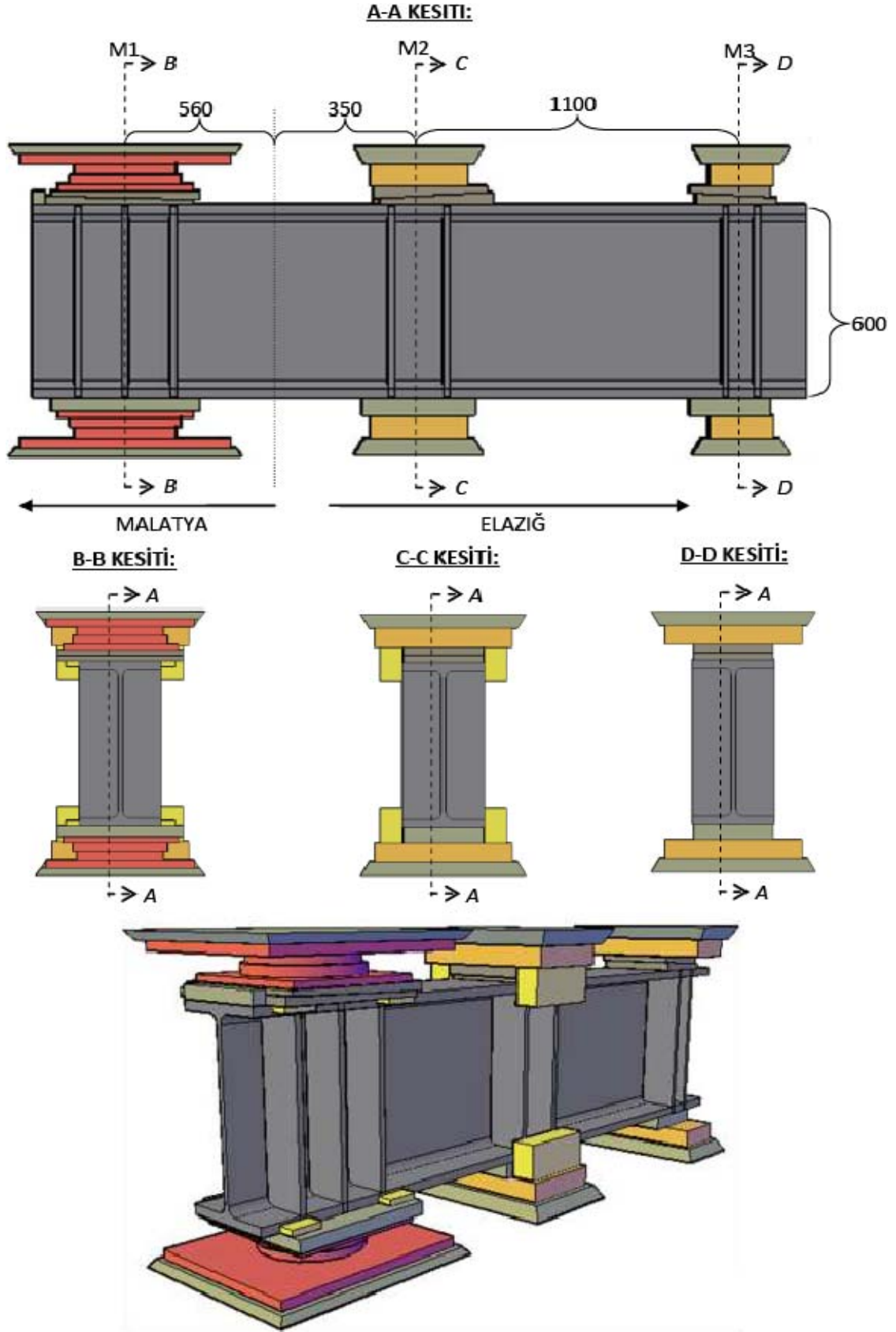
Kömürhan Köprüsü'nün Elazığ taraf kenar ayağı 60 adet 25 m boyunda, Malatya tarafı kenar ayağı ise 60 adet 40 m boyunda $\varnothing 36$ 'lık ankraj çubukları ile kayaya ankre edilmiştir. Ayrıca, köprü üstyapısını kenar ayak perdesine bağlamak amacıyla her bir ayakta 40 adet olmak üzere S420 kalitesinde $\varnothing 50$ çapında çekme çubukları kullanılmıştır. Bu çubuklar Malatya kenar ayağı tarafında 3.7 m, Elazığ tarafında ise 4.7 m uzunluğundadır. Her biri 59.50 m yüksekliğinde olan orta ayaklar 3 gözlü değişken kesitten oluşmaktadırlar. Kesit genişliği alt tarafta 14.40 m olmakla beraber, lineer şekilde azalarak üstte 8.50 m'ye düşmektedir. Hidrostatik dengenin korunması için ayak çeper ve göz duvarlarında su geçişine imkân veren boşluklar bırakılmıştır. Kömürhan Köprüsü'nün orta ayak temelleri $24 \times 13.5 \text{ m}^2$ kesit alanına ve 5 m derinliğe sahip demirli kütle betondur. Değişken ayak kesitine ait görünüşler Şekil 2.34'te verilmektedir.



Şekil 2.34. Değişken kesitli köprü orta ayaklarına ait kesit görünüşleri (ölçüler cm cinsinden verilmiştir)

2.3.1.1.3. Orta Açıklık Mafsalsal Düzenegi

Kömürhan Köprüsü'nün orta açıklığında, üstyapı orta açıklık konsollarını birbirine bağlamak amacı ile kutu kesitin içinde çelik kirişlerden oluşan ve moment aktarmayan mafsalsal düzenek tasarlanmıştır. Bu şekilde, orta açıklıktaki konsol uçları serbest bırakılmış ve ısı değişimi sebebiyle üstyapıda oluşacak genleşmelere izin verilmiştir. Ayrıca, iki uç arasında bir bağlantı oluşturularak düşey yükler altında üstyapının ortak hareket etmesini sağlanmıştır. Orta açıklık mafsalsal düzenegi iki adet IPB 600 kesitli çelik kirişten oluşmaktadır. Her bir kiriş Elazığ tarafında üstte ve altta ikişer adet sabit mesnetle, Malatya tarafında ise yine üstte ve altta birer adet düşey yük kapasiteli, enine ve boyuna yönde kayıcı mesnet ile üstyapıya bağlanmıştır. Bu şekilde Elazığ tarafında çelik kirişin dönme ve hareket serbestlikleri engellenerek tam ankastre bir bağlantı oluşturulmuştur. Malatya tarafındaki mesnetlerde ise dönmelere ve yatay yöndeki hareketlere izin verilmiş ve bu kısmın mafsalsal olarak hareket etmesi sağlamıştır. Ayrıca, enine doğrultudaki hareketi kenar takozlar ile engellenmiştir. Şekil 2.35'te orta açıklık mafsalsal düzeneginin şematik görünüşü, Şekil 2.36'da ise orta açıklık mafsalsal düzenegine ait bazı fotoğraflar verilmektedir.



Şekil 2.35. Orta açıklık genişme derzindeki mafsalsuz düzeneği (ölçüler mm cinsinden verilmiştir).



a) Tabliye birleşim bölgesinden görüntüler



b) Kutu kesit içerisinde görüntüler

Şekil 2.36. Orta açıklık genişleme derzindeki mafsal düzeneğine ait bazı fotoğraflar

2.3.1.2. Sonlu Eleman Yöntemiyle (SEY) Kömürhan Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Kömürhan Köprüsü'nün dinamik karakteristiklerini analitik olarak belirlemek için köprünün iki ve üç boyutlu sonlu eleman modelleri SAP2000 programında oluşturulmuştur. Köprü temeli ve zemini hakkında çok fazla bilgiye sahip olunamadığı için sonlu eleman modelinde yapı-temel-zemin etkileşimi dikkate alınamamıştır. Kömürhan Köprüsü'nün iki ve üç boyutlu sonlu eleman modelleri, aşağıda belirtilen modelleme kriterleri dikkate alınarak oluşturulmuştur.

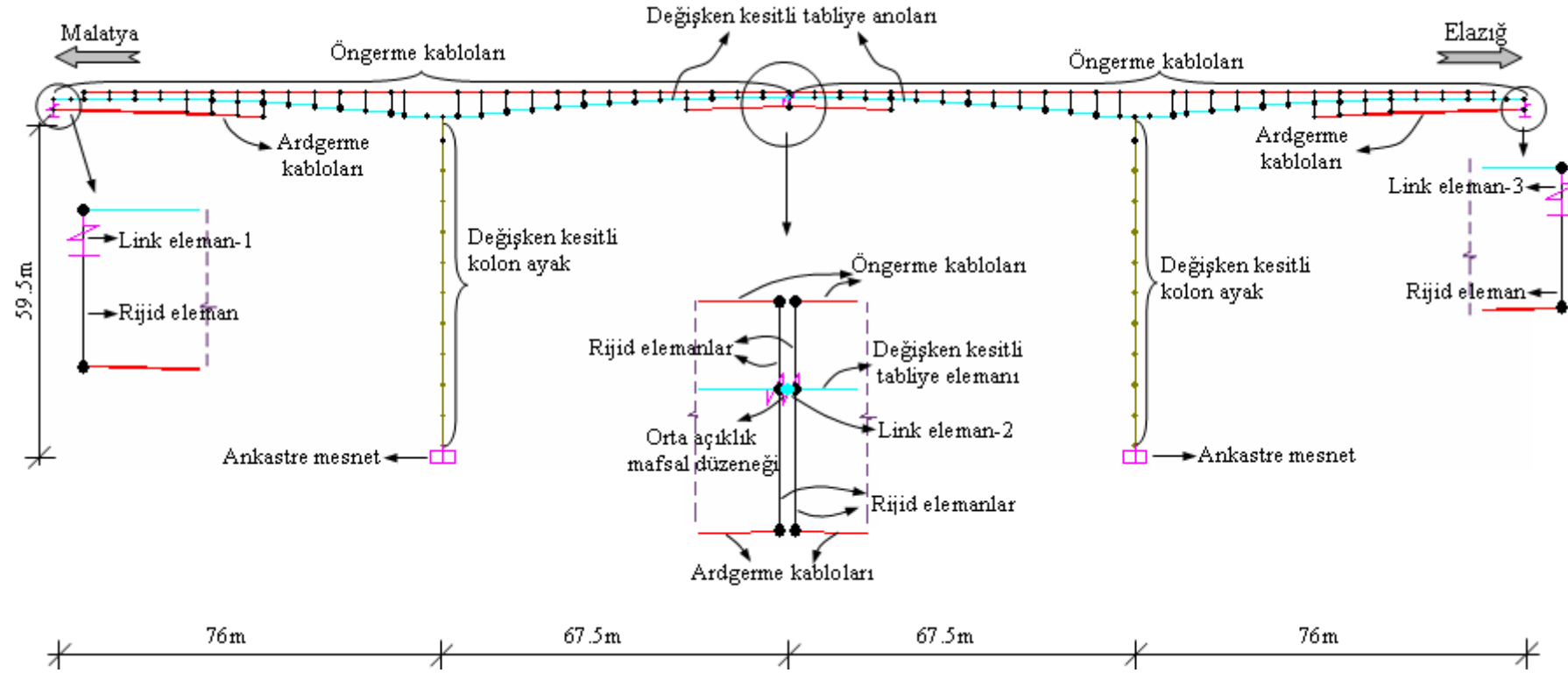
- Köprü tabliyesi ve ayaklar altı serbestlik derecesine sahip çubuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. İki boyutlu modelde değişken yükseklikli üstyapı segmentlerinin ve ayakların her biri ortalama kesit özellikleri dikkate alınarak modele katılırken, üç boyutlu modellemede ise değişken kesitli elemanlar direk olarak tanımlanmıştır.

- İki boyutlu modelde tüm elemanlar kendi geometrik merkezlerinden geçirilmiş ve ara bağlantılar rijit çubuk elemanlar yardımı ile sağlanmıştır. Üç boyutlu modelde ise direk değişken kesitli eleman tipleri kullanılmıştır. Her bir orta ayak 50 adet sonlu elemana bölünmüş olup, üstyapı segmentleri ise 0.5m uzunluğunda parçalara ayrılmıştır.
- Ardgerme kabloları moment aktarmayan çubuk elemanlar kullanılarak simüle edilmiştir ve üstyapı segment uçlarına proje verilerinde belirtilen düşey lokasyonlarında bağlanmıştır. Ardgerme yükleri birim uzamalar cinsinden etki ettirilmiştir.
- Kenar ayak mesnetleri yüksek 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 verilmiştir.
- Orta açıklık genişleme derzindeki mafsal düzeneği yay eleman ile simüle edilmiştir. Yay elemanı boyuna yönde serbest olup, enine ve düşey hareketi yüksek rijitliğe sahip olacak şekilde modellenmiştir.

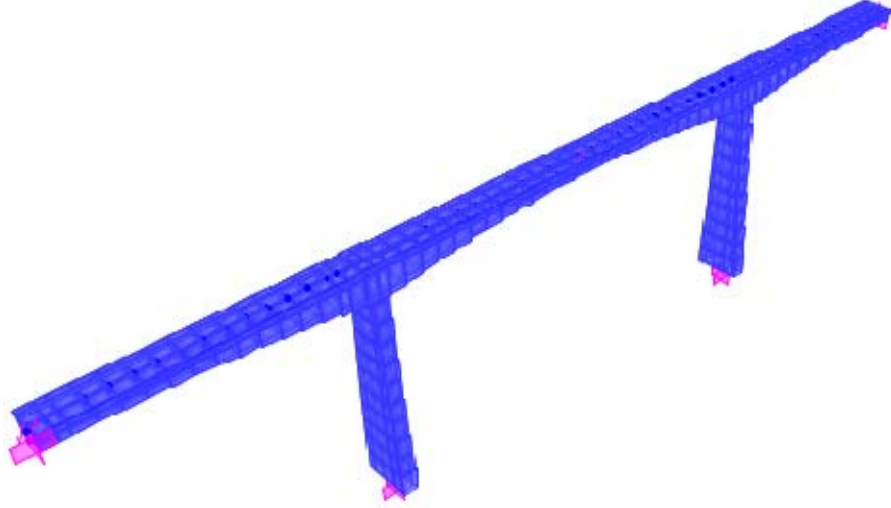
Kömürhan Köprüsü'nün modellenmesi sırasında dikkate alınan malzeme özellikleri Tablo 2.18'de verilmektedir. Kömürhan Köprüsü'nün yukarıda belirtilen modelleme kriterleri dikkate alınarak oluşturulan iki ve üç boyutlu sonlu eleman modelleri Şekil 2.37 ve 2.38'de verilmektedir.

Tablo 2.18. Kömürhan Köprüsü'nün analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri

Eleman	Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı (-)	Yoğunluk (kg/m ³)
Tabliye	4.25E10	0.2	2500
Ayaklar	4.25E10	0.2	2500
Öngerme Elemanları	1.95E11	-	-
Rijit Elemanlar	1.00E15	0.3	-



Şekil 2.37. Kömürhan Köprüsü'nün iki boyutlu sonlu eleman modeli



Şekil 2.38. Kömürhan Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli

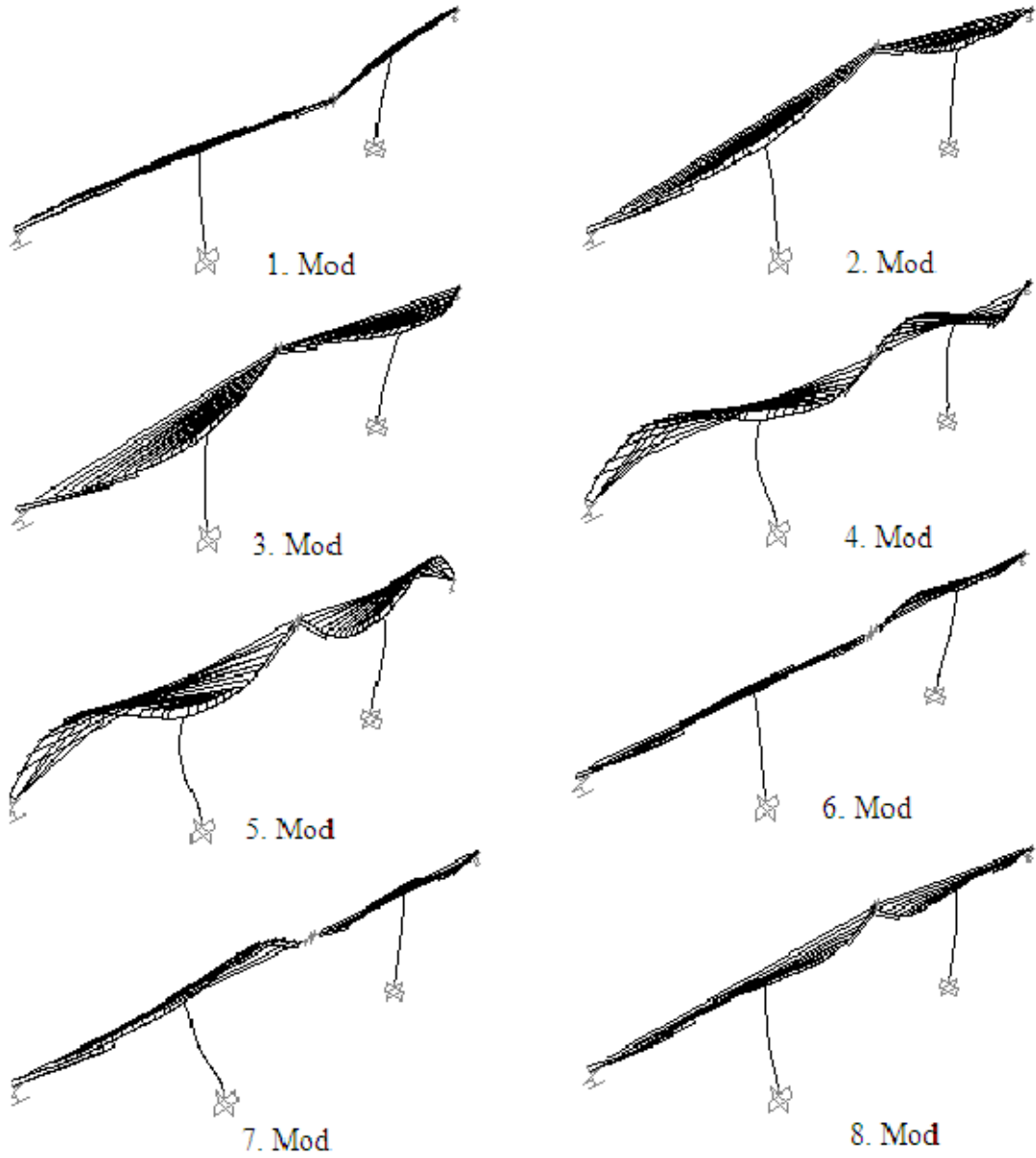
Köprü'nün iki ve üç boyutlu sonlu eleman analizlerinde aşağıda belirtilen yükleme durumları dikkate alınmıştır:

- Ölü Yük: Tüm elemanların kendi ağırlıklarıdır ve program tarafından direk olarak hesap edilmektedir.
- Ek Ölü Yükler: Asfalt, bordür, boru hattı ve destekleri, korkuluk gibi ek olarak etki eden ağırlıklardır 8-10 cm'lik asfalt dikkate alınarak ve gerekli şartnameler göz önünde bulundurularak her bir segment için yaylı yük şeklinde 31 kN/m olarak etki ettirilmiştir. Bu yük SAP2000 (2008) vprogramı tarafından direk olarak sonlu eleman modal analizine ilave edilecek ek kütleyle çevrilmiştir.

Kömürhan Köprüsü'nün, SAP2000 (2008) sonlu eleman programı kullanılarak gerçekleştirilen modal analizinden elde edilen ilk sekiz moduna ait doğal frekans, doğal periyot ve mod şekli sırasıyla Tablo 2.19'da verilmektedir. Tablo 2.19'da görüldüğü gibi köprü'nün ilk sekiz doğal frekansı 0.790-4.847 Hz arasında değişmektedir. Köprü'nün ilk sekiz mod şekli Şekil 2.39'da verilmektedir. Şekil 2.39 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin enine, düşey ve uzama modlar olduğu görülmektedir.

Tablo 2.19. Kömürhan Köprüsü'nün analitik doğal frekans, periyot ve mod Şekilleri

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli
1	0.790	1.266	1. Enine
2	1.106	0.904	1. Düşey
3	1.845	0.542	2. Enine
4	2.315	0.432	2. Düşey
5	2.685	0.373	3. Düşey
6	3.346	0.299	1. Boyuna
7	3.588	0.279	2. Boyuna
8	4.847	0.206	4. Düşey



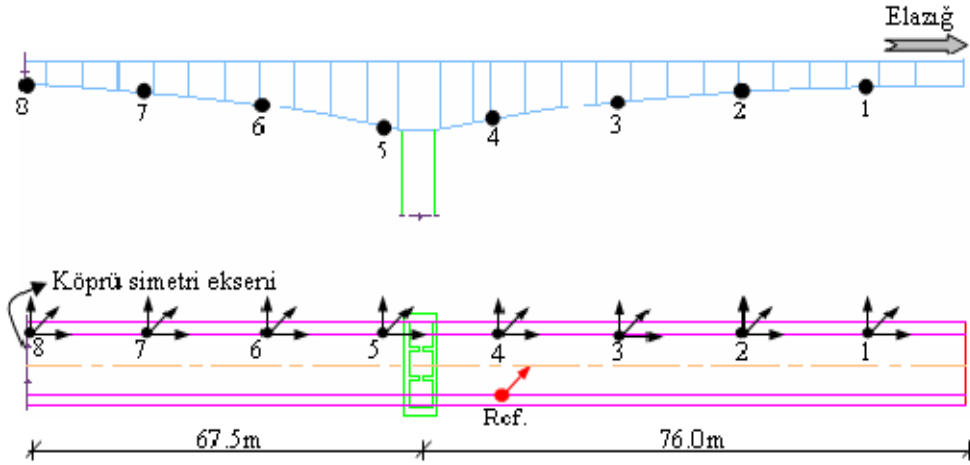
Şekil 2.39. Kömürhan Köprüsü'nün analitik olarak elde edilen ilk sekiz mod Şekilleri

2.3.1.3. Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Kömürhan Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Kömürhan Köprüsü'nün deneysel ölçümlerinde B&K 4507 tipi tek eksenli ivmeölçerler ile B&K 4506 tipi üç eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. İvmeölçerlerin minimum frekans aralığı ve hassasiyeti B&K 4507 için 0.4-6000 Hz ve 1 V/g, B&K 4506 için ise 0.3-2000 Hz ve 0.5 V/g'dir. İvmeölçerlerden elde edilen sinyaller B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesinde birleştirilmiş ve PULSE yazılımına aktarılmıştır. Bu sinyaller OMA yazılımına transfer edilerek işlenmiş ve Kömürhan Köprüsü'nün doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilmiştir.

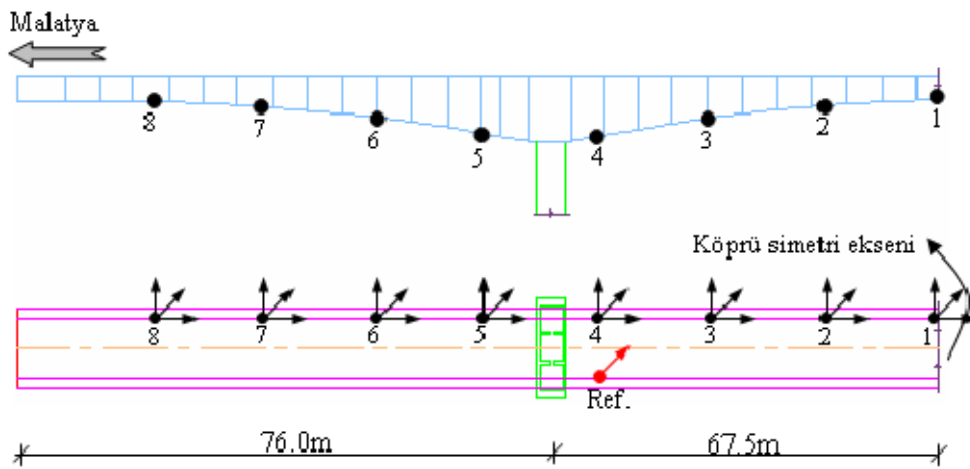
Kömürhan Köprüsü'nün dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemek için köprüde 25-28 Şubat 2008 tarihleri arasında incelemeler yapılmış ve dört gün boyunca köprüye altı farklı çevresel titreşim testi uygulanmıştır. Deneysel ölçümler sırasında Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılmış, çevresel etkiler olarak köprü üzerinden devam eden trafik etkisi ve rüzgâr dikkate alınmıştır. Deneysel ölçümlerin köprü'nün hangi noktalarından alınacağı dinamik karakteristiklerin (frekans, mod şekli, sönüm oranı) doğru olarak belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle köprü'nün muhtemel hareket noktaları analitik olarak belirlenmiş ve karşılaştırmaların daha iyi yapılabilmesi için altı farklı ölçüm testi kurulmuştur. Bu ölçüm testleri:

- Birinci Ölçüm Testi: Kömürhan Köprüsü'nün orta açıklığında bulunan mafsal düzeneği dikkate alındığında köprü Elazığ ve Malatya tarafı olmak üzere iki eşit ve her bakımdan simetrik parçaya ayrılabilir. Ayrıca, orta açıklıkta zamana bağlı meydana gelen düşey deformasyon da göz önüne alındığında bu iki parçanın kendi arasında karşılaştırılması gerekliliği orta çıkmıştır. Bu nedenle ilk ölçüm, kutu kesit içerisinden ve Elazığ tarafındaki parçadan tek sıra halinde alınmıştır. Bu amaçla ilk ölçüm testinde biri referans olmak üzere dokuz farklı noktadan üç eksenli ivmeölçerler kullanılarak titreşim verileri toplanmıştır. Veri alınması istenilen nokta sayısı kanal sayısından fazla olduğu için referanslı ölçümlerin yapılmasına karar verilmiştir. Bunun için ölçüm testi iki adım olarak kurulmuştur. İlk adımda ivmeölçerler Şekil 2.40'ta gösterilen 1, 2, 3 ve 4 noktalarına yerleştirilmiş ve titreşim verileri toplanmıştır. İkinci adımda ise ivmeölçerler 5, 6, 7 ve 8 noktalarına yerleştirilmiştir. Bu iki ölçümdeki titreşim sinyalleri Ref. olarak gösterilen noktaya yerleştirilen tek eksenli ivmeölçer yardımıyla birleştirilmiştir.



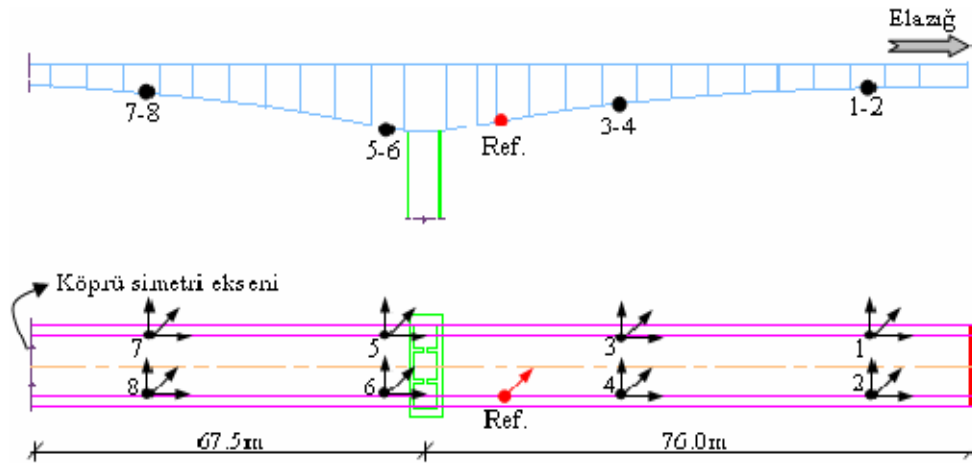
Şekil 2.40. Kömürhan Köprüsü'nün referanslı olarak gerçekleştirilen ilk ölçüm düzeneğinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı

- İkinci Ölçüm Testi: İkinci ölçüm testi, birinci ölçümün tam simetrisi olacak şekilde köprü kutu kesiti içerisinde ve Malatya tarafındaki parçadan tek sıra halinde alınmıştır. Bu ölçüm ile birlikte Elazığ ve Malatya taraflarında bulunan ayrı iki parçanın dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması da sağlanabilecektir. Bu amaçla ikinci ölçüm testi iki adım olarak kurulmuştur. İlk adımda ivmeölçerler Şekil 2.41'de gösterilen 1, 2, 3 ve 4 noktalarına yerleştirilmiş ve titreşim verileri toplanmıştır. İkinci adımda ise ivmeölçerler 5, 6, 7 ve 8 noktalarına yerleştirilmiştir. Bu iki ölçümdeki titreşim sinyalleri Ref. olarak gösterilen noktaya yerleştirilen tek eksenli ivmeölçer yardımıyla birleştirilmiştir.



Şekil 2.41. Kömürhan Köprüsü'nün referanslı olarak gerçekleştirilen ikinci ölçüm düzeneğinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı

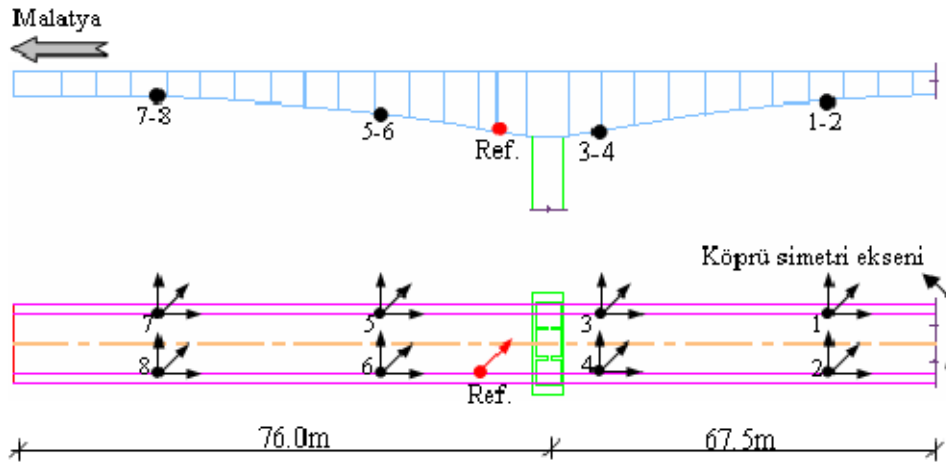
- Üçüncü Ölçüm Testi: İlk iki ölçüm testi yapıp köprünün Elazığ ve Malatya tarafında kalan parçalarının davranışları birbirleri ile karşılaştırıldıktan sonra her bir parçasın kendi arasında burulma açısından incelenmesi gerektiği düşünülmüştür. Bu nedenle üçüncü ölçüm olarak, köprünün Elazığ tarafındaki parçasından karşılıklı noktalar halinde titreşim verileri toplanmıştır. Bu ölçüm testinde de yine biri referans olmak üzere dokuz farklı noktadan üç eksenli ivmeölçerler kullanılarak köprünün titreşim verileri toplanmıştır. Ölçüm testi iki adım olarak kurulmuştur. İlk adımda ivmeölçerler Şekil 2.42’de gösterilen 1, 2, 3 ve 4 noktalarına yerleştirilmiş ve titreşim verileri toplanmıştır. İkinci adımda ise ivmeölçerler 5, 6, 7 ve 8 noktalarına yerleştirilmiştir. Bu iki ölçümdeki titreşim sinyalleri Ref. olarak gösterilen noktaya yerleştirilen tek eksenli ivmeölçer yardımıyla birleştirilmiştir.



Şekil 2.42. Kömürhan Köprüsü'nün referanslı olarak gerçekleştirilen üçüncü ölçüm düzeneğinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı

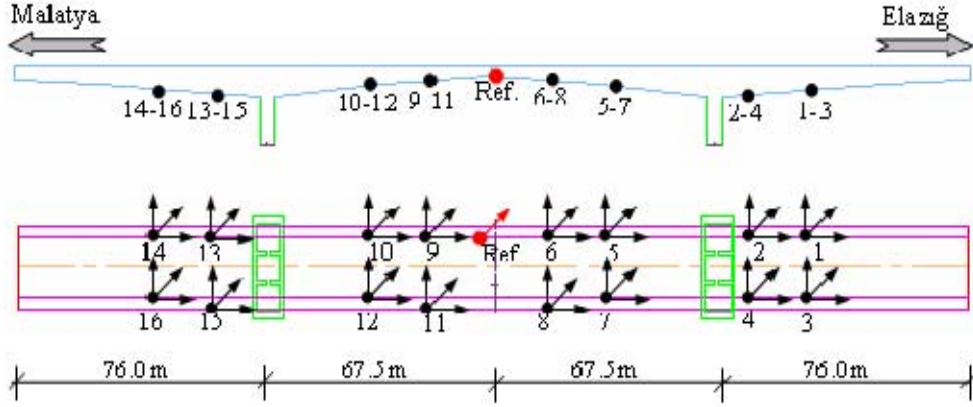
- Dördüncü Ölçüm Testi: Köprünün Elazığ ve Malatya tarafında kalan parçalarının birbirleriyle karşılaştırılması için dördüncü ölçüm de, üçüncü ölçümün simetrisi olarak köprü kutu kesiti içerisinde ve Malatya tarafındaki parçadan karşılıklı noktalar halinde titreşim ölçümleri alınmıştır. Dördüncü ölçüm testinde diğer ölçümlere benzer olarak biri referans olmak üzere dokuz farklı noktadan üç eksenli ivmeölçerler kullanılarak köprünün Malatya tarafındaki parçasından titreşim verileri toplanmıştır. Ölçüm testi hazırlanırken seçilen noktalar üçüncü ölçüm sisteminin simetrisi olacak şekilde seçilmiştir. Bunun amacı, hem köprünün orta açıklıkta bulunan mafsal düzeneğiyle iki eşit parçaya ayrılan kısımlarının aynı hareketi yapıp

yapmadığının kontrol edilmesini sağlamak hem de köprünün Malatya tarafında kalan parçasını burulma açısından incelemektir. Ölçüm testi iki adım olarak kurulmuştur. İlk adımda ivmeölçerler Şekil 2.43'te gösterilen 1, 2, 3 ve 4 noktalarına yerleştirilmiş ve titreşim verileri toplanmıştır. İkinci adımda ise ivmeölçerler 5, 6, 7 ve 8 noktalarına yerleştirilmiştir. Bu iki ölçümdeki titreşim sinyalleri Ref. olarak gösterilen noktaya yerleştirilen tek eksenli ivmeölçer yardımıyla birleştirilmiştir.



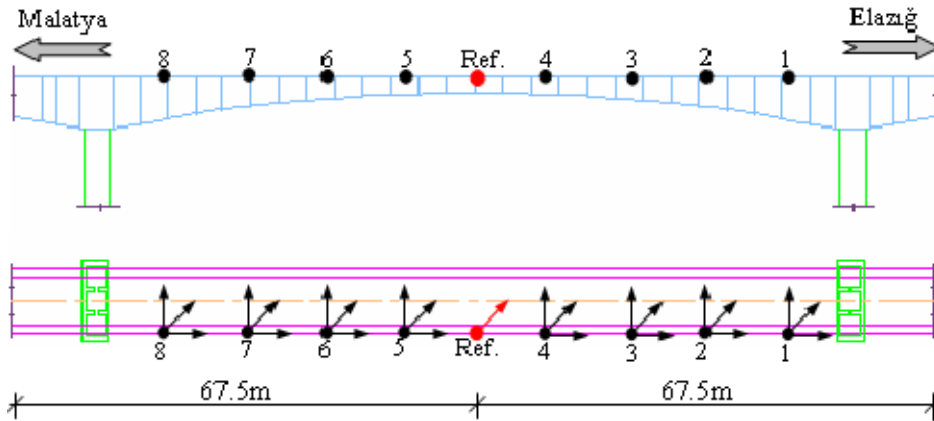
Şekil 2.43. Kömürhan Köprüsü'nün referanslı olarak gerçekleştirilen dördüncü ölçüm düzeneğinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı

- Beşinci Ölçüm Testi: Köprünün Elazığ ve Malatya tarafında kalan parçalarının kendi aralarında ve birbirleriyle karşılaştırılmasından sonra beşinci ölçüm olarak kutu kesit içerisinden köprünün boydan boya karşılıklı olarak ölçümü gerçekleştirilmiştir. Beşinci ölçüm testinde diğer ölçümlere benzer olarak biri referans olmak üzere dokuz farklı noktadan üç eksenli ivmeölçerler kullanılarak köprünün titreşim verileri toplanmıştır. Ölçüm testi hazırlanırken seçilen noktaların köprünün olası analitik mod şekillerinin belirlenebileceği yerlere yakın olmasına özen gösterilmiştir. Ölçüm testi dört adım olarak kurulmuştur. İlk adımda ivmeölçerler Şekil 2.44'te gösterilen 1, 2, 3 ve 4 noktalarına, ikinci adımda 5, 6, 7 ve 8 noktalarına, üçüncü adımda 9, 10, 11 ve 12 noktalarına, dördüncü adımda da 13, 14, 15 ve 16 noktalarına yerleştirilmiştir. Bu dört adımdaki titreşim sinyalleri köprü orta noktasına yerleştirilen ve Ref. olarak gösterilen noktaya yerleştirilen tek eksenli ivmeölçer yardımıyla birleştirilmiştir.



Şekil 2.44. Kömürhan Köprüsü'nün referanslı olarak gerçekleştirilen beşinci ölçüm düzeneğinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı

- Altıncı Ölçüm Testi: Köprüünün kutu kesit içerisinde ölçümleri tamamlandıktan sonra tabliye üzerinden ölçümlere geçilmiştir. Bu ölçümde, orta ayaklar arasında kalan ana açıklık tek sıra halinde yerleştirilen ivmeölçerlerle ölçülmüştür. Bu ölçümde diğer ölçümlere benzer olarak biri referans olmak üzere dokuz farklı noktadan üç eksenli ivmeölçerler kullanılarak köprüünün titreşim verileri toplanmıştır. Ölçüm testi hazırlanırken seçilen noktaların köprüünün olası analitik mod şekillerinin belirlenebileceği yerlere yakın olmasına özen gösterilmiştir. Ölçüm testi iki adım olarak kurulmuştur. İlk adımda ivmeölçerler Şekil 2.45'te gösterilen 1, 2, 3 ve 4 noktalarına, ikinci adımda ise 5, 6, 7 ve 8 noktalarına yerleştirilmiştir. Bu iki adımdaki titreşim sinyalleri köprü orta noktası olan ve Ref. olarak gösterilen noktaya yerleştirilen tek eksenli ivmeölçer yardımıyla birleştirilmiştir.

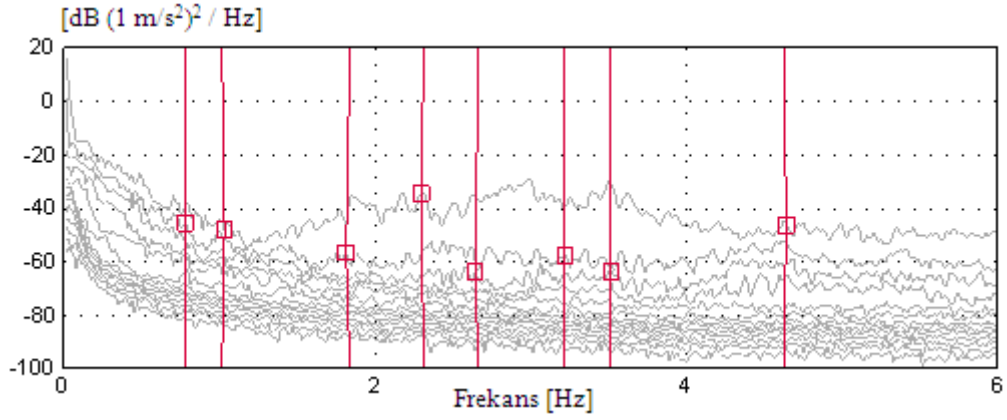


Şekil 2.45. Kömürhan Köprüsü'nün referanslı olarak gerçekleştirilen altıncı ölçüm düzeneğinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı

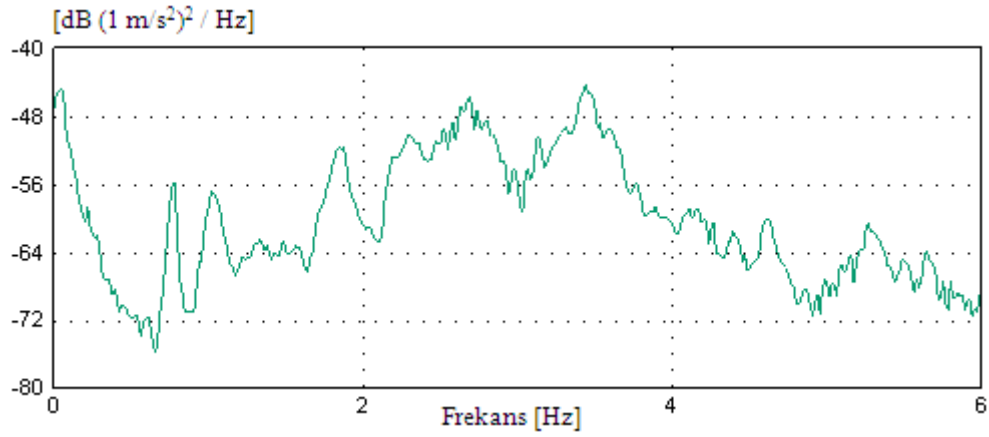
Kömürhan Köprüsü'nde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar Şekil 2.46'da verilmektedir. Kömürhan Köprüsü'ne uygulanan altı farklı çevresel titreşim testinden toplanan sinyallerin GFTAA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri ve bu matrislerinin ortalamaları sırasıyla Şekil 2.47-2.52'de verilmektedir. Şekil 2.47-2.52 incelendiğinde, her bir çevresel titreşim testinden elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Buradan Bölüm 1.6.2'deki anlatıma uygun olarak; farklı noktalarda alınan ölçümlerden elde edilen davranışların bütün yapıyı temsil ettiği anlaşılmaktadır. Deneysel ölçümler sonucu elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları Tablo 2.20-2.25'te verilmektedir. Tablo 2.20-2.25 incelendiğinde, frekans değerlerinin birbirine yakın değerlerde olduğu ve ilk sekiz frekansın 0.764-4.400 Hz arasında elde edildiği görülmektedir. Sönüm oranı değerleri arasında tam bir uyum yakalanamamış olup, bu değerler %0.417-5.412 arasında değişkenlik göstermektedir.



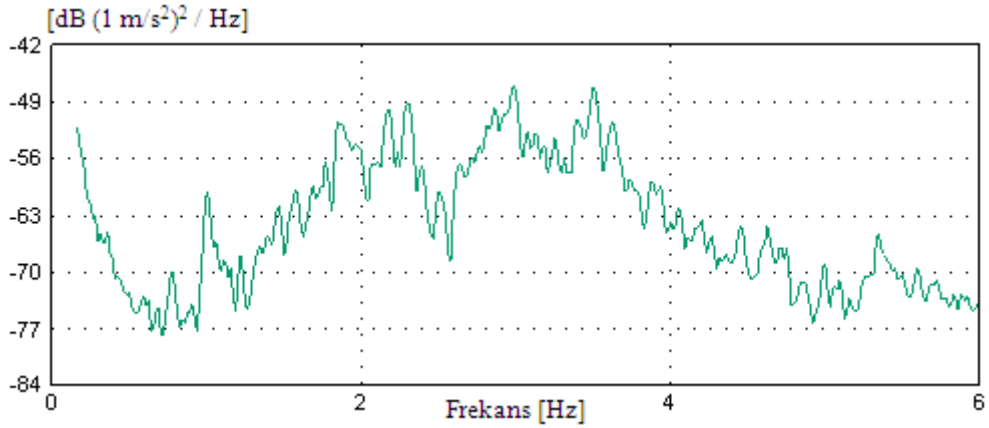
Şekil 2.46. Kömürhan Köprüsü'nde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar



a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri



b) Birinci adımdan elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

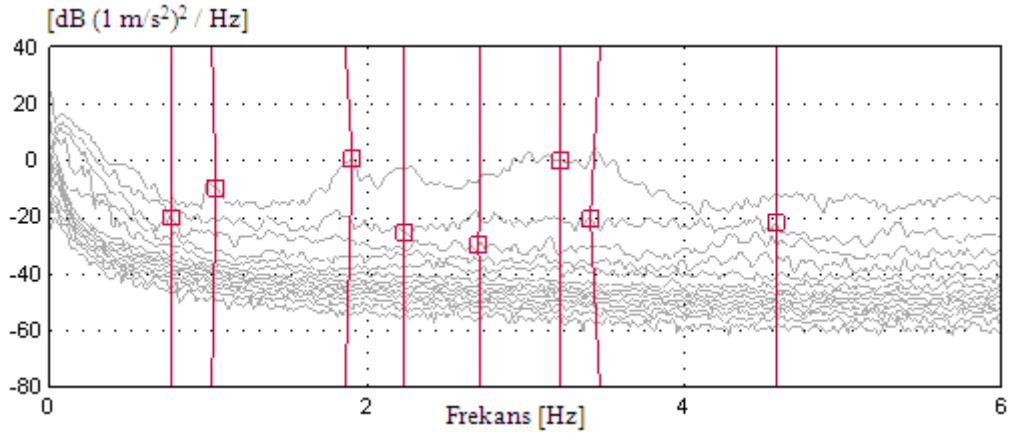


c) İkinci adımdan elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

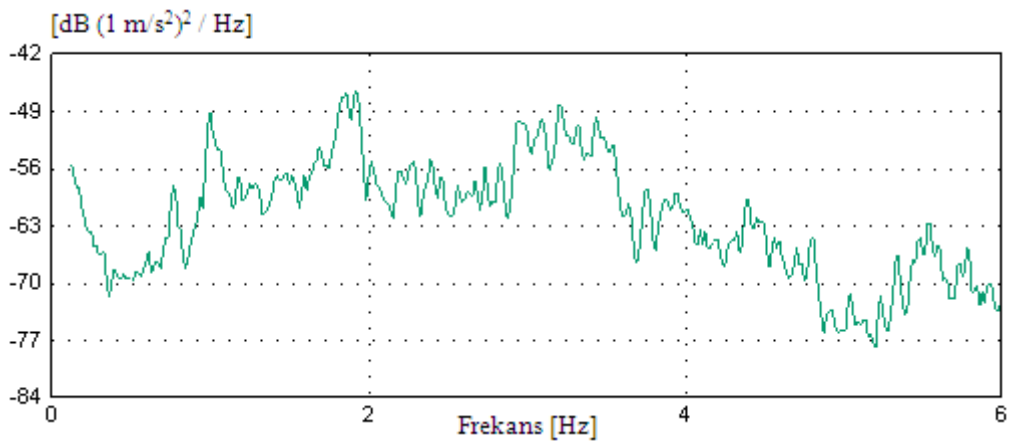
Şekil 2.47. Kömürhan Köprüsü'nün birinci ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

Tablo 2.20. Kömürhan Köprüsü'n n birinci ölümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

Frekans No	GFTAA Yöntemi		Ortalama Spektral Yoğunluk
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)	
1	0.776	2.072	0.781
2	1.014	3.554	1.020
3	1.836	2.033	1.840
4	2.310	2.065	2.300
5	2.660	5.412	2.690
6	3.178	1.912	3.140
7	3.406	1.700	3.440
8	4.623	2.145	4.610



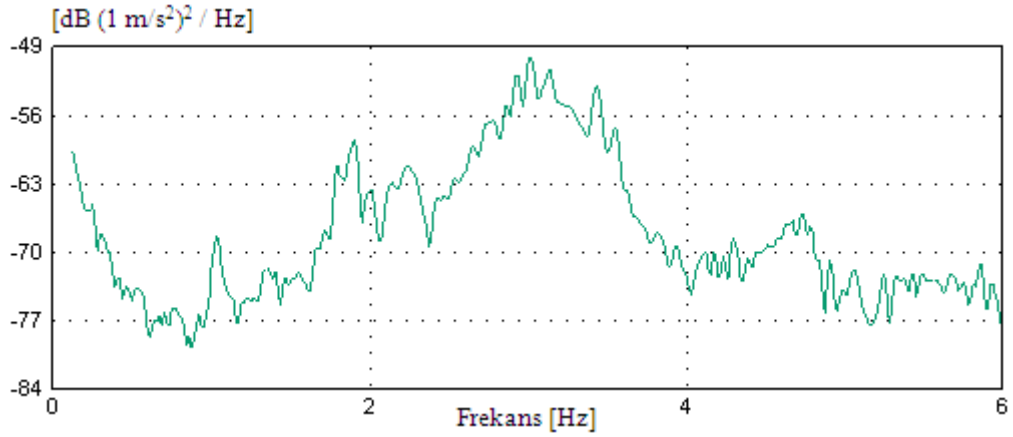
a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri



b) Birinci adımdan elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

Şekil 2.48. Kömürhan Köprüsü'n n ikinci ölümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

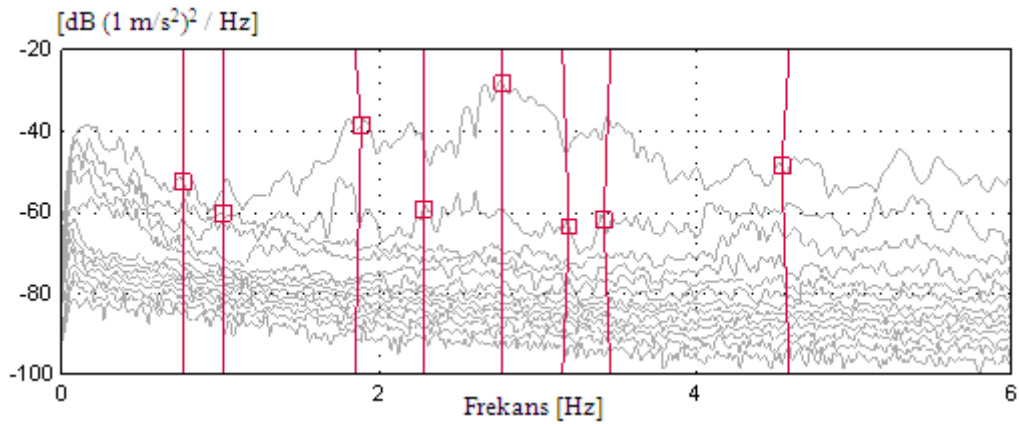
Şekil 2.48'in devamı



c) İkinci adımdan elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

Tablo 2.21. Kömürhan Köprüsü'nün ikinci ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

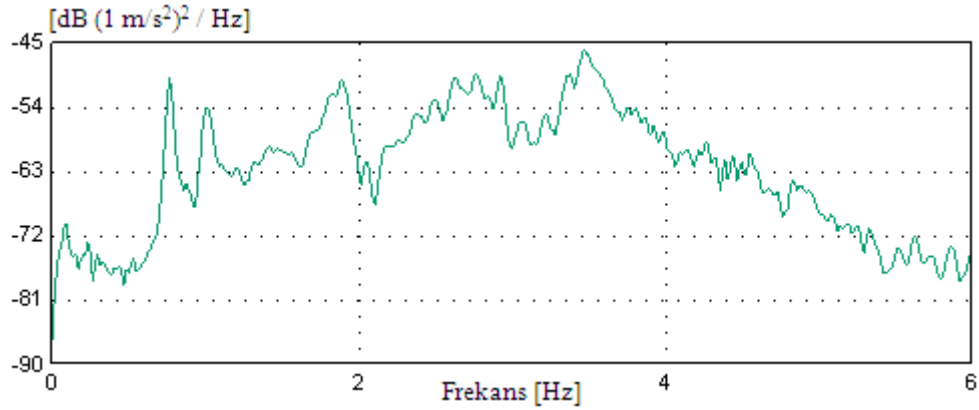
Frekans No	GFTAA Yöntemi		Ortalama Spektral Yoğunluk
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)	
1	0.766	1.720	0.765
2	1.020	3.211	1.000
3	1.861	2.170	1.880
4	2.230	0.707	2.280
5	2.714	0.417	2.730
6	3.211	1.937	3.200
7	3.467	1.750	3.440
8	4.575	1.826	4.400



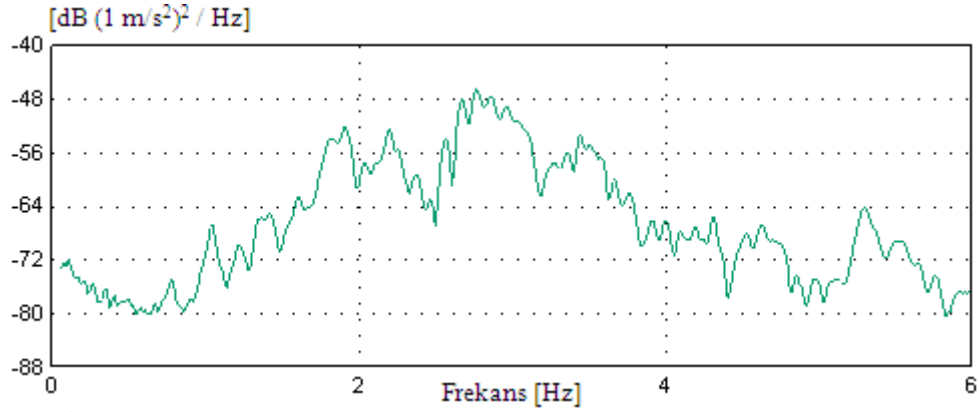
a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

Şekil 2.49. Kömürhan Köprüsü'nün üçüncü ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

Şekil 2.49'un devamı



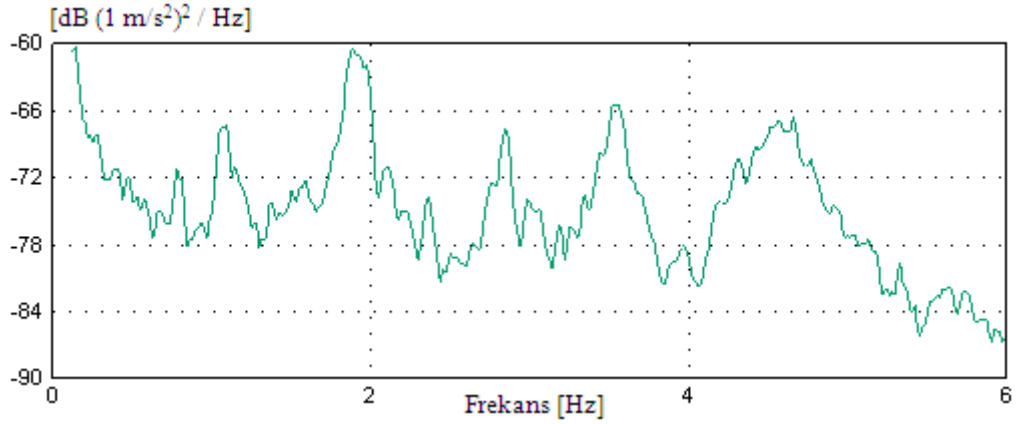
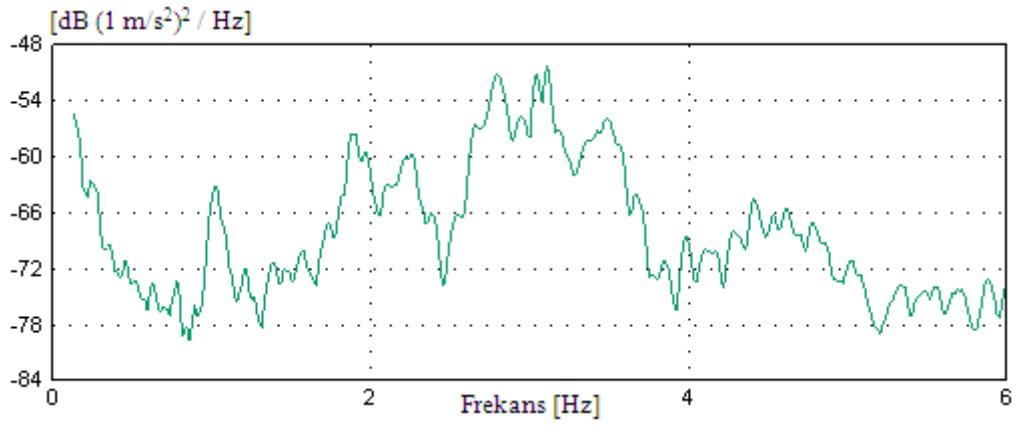
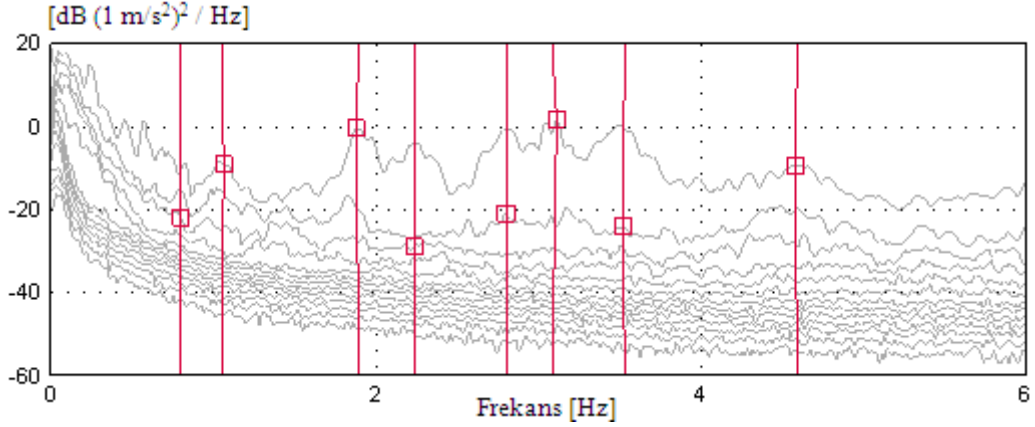
b) Birinci adımdan elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması



c) İkinci adımdan elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

Tablo 2.22. Kömürhan Köprüsü'nün üçüncü ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

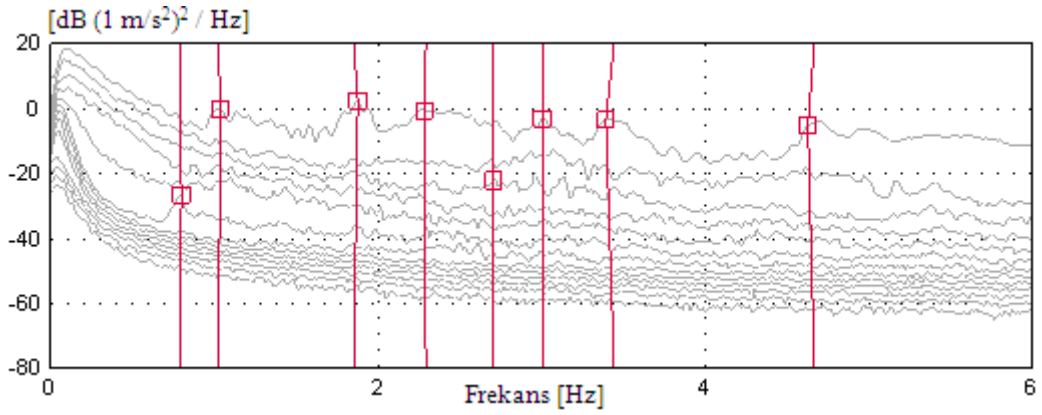
Frekans No	GFTAA Yöntemi		Ortalama Spektral Yoğunluk
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)	
1	0.766	1.961	0.766
2	1.016	3.411	1.020
3	1.851	2.672	1.890
4	2.290	1.329	2.370
5	2.773	2.141	2.770
6	3.162	1.070	3.220
7	3.465	1.020	3.470
8	4.595	2.300	4.550



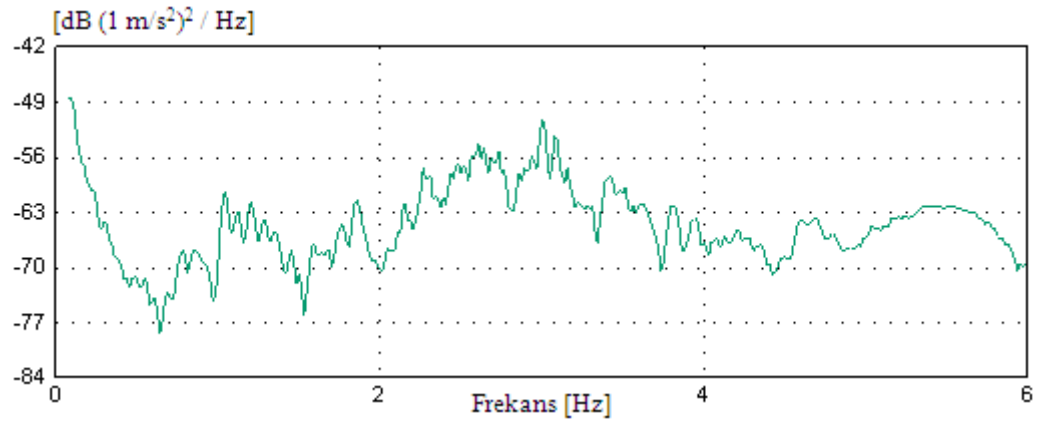
Şekil 2.50. Kömürhan Köprüsü'nün dördüncü ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

Tablo 2.23. Kömürhan Köprüsü'nün dördüncü ölümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

Frekans No	GFTAA Yöntemi		Ortalama Spektral Yoğunluk
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)	
1	0.797	1.868	0.781
2	1.049	2.993	1.020
3	1.894	2.795	1.890
4	2.234	0.706	2.250
5	2.807	4.888	2.780
6	3.090	1.750	3.110
7	3.528	1.700	3.480
8	4.586	1.707	4.410



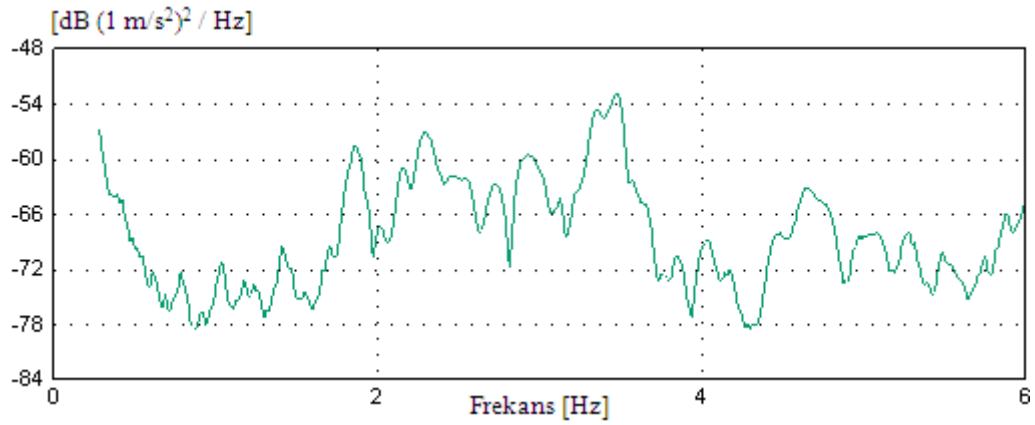
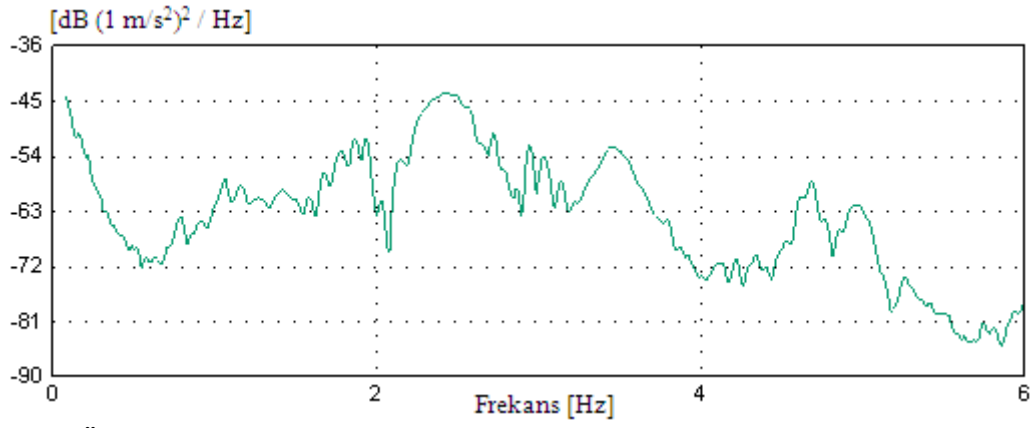
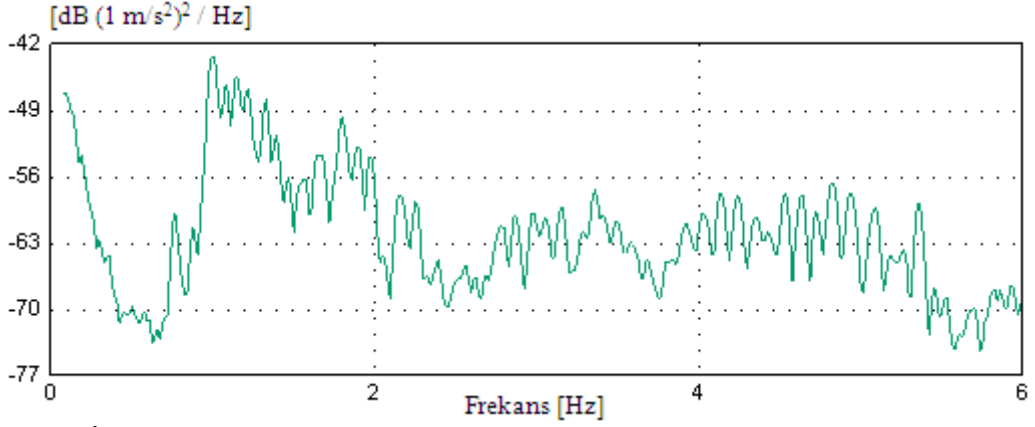
a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri



b) Birinci adımdan elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

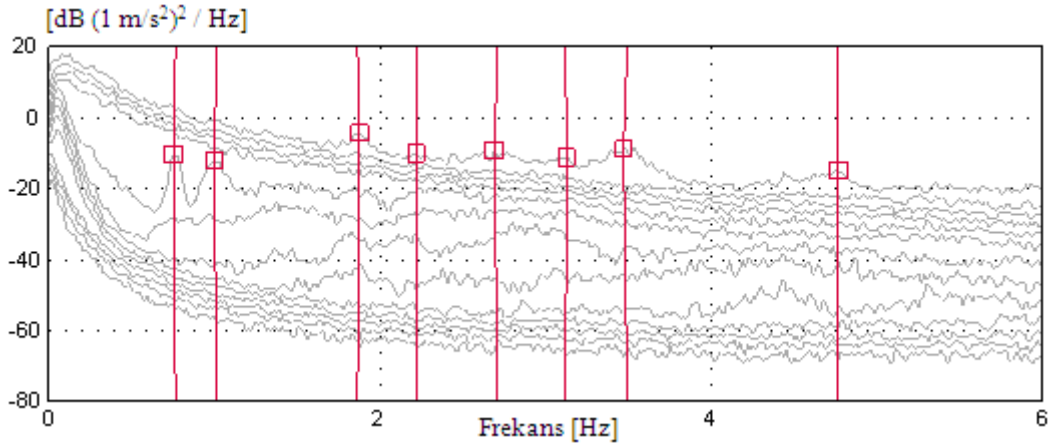
Şekil 2.51. Kömürhan Köprüsü'nün beşinci ölümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

Şekil 2.51'in devamı

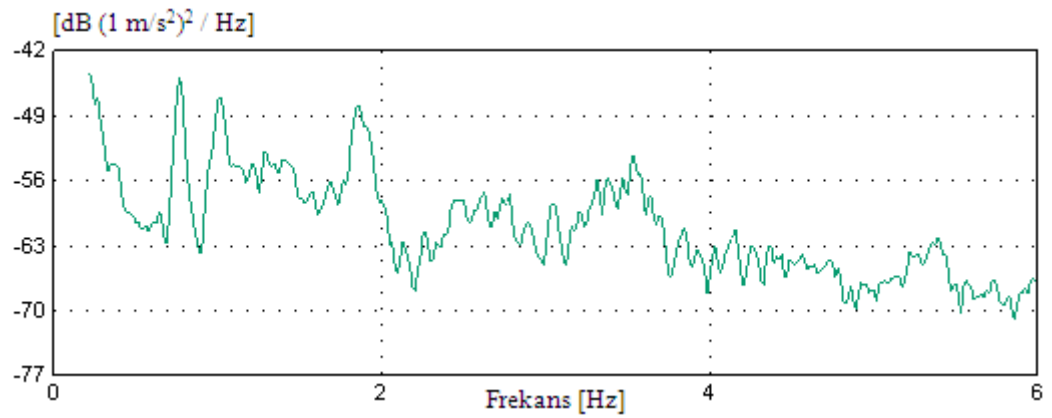


Tablo 2.24. Kömürhan Köprüsü'nün beşinci ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

Frekans No	GFTAA Yöntemi		Ortalama Spektral Yoğunluk
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)	
1	0.788	1.373	0.781
2	1.027	1.785	1.050
3	1.850	2.057	1.860
4	2.291	1.465	2.270
5	2.703	1.420	2.610
6	3.001	1.625	3.020
7	3.440	2.400	3.420
8	4.665	1.420	4.690



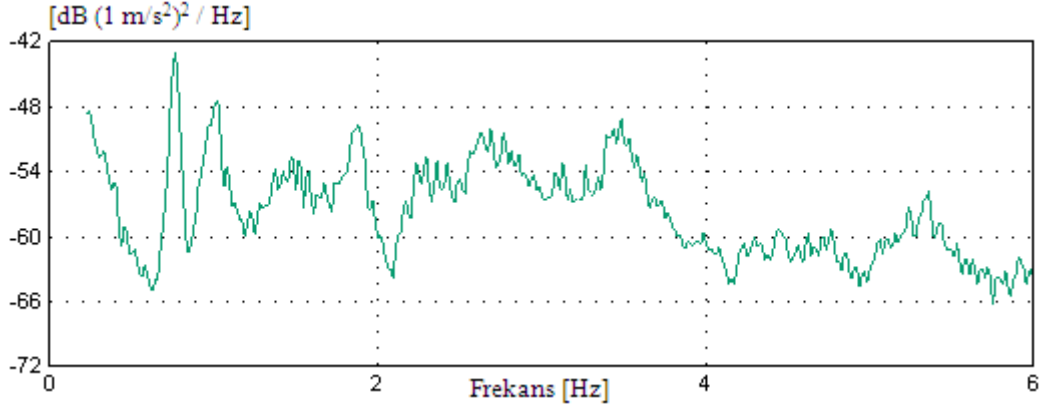
a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri



b) Birinci adımdan elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

Şekil 2.52. Kömürhan Köprüsü'nün altıncı ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

Şekil 2.52'nin devamı

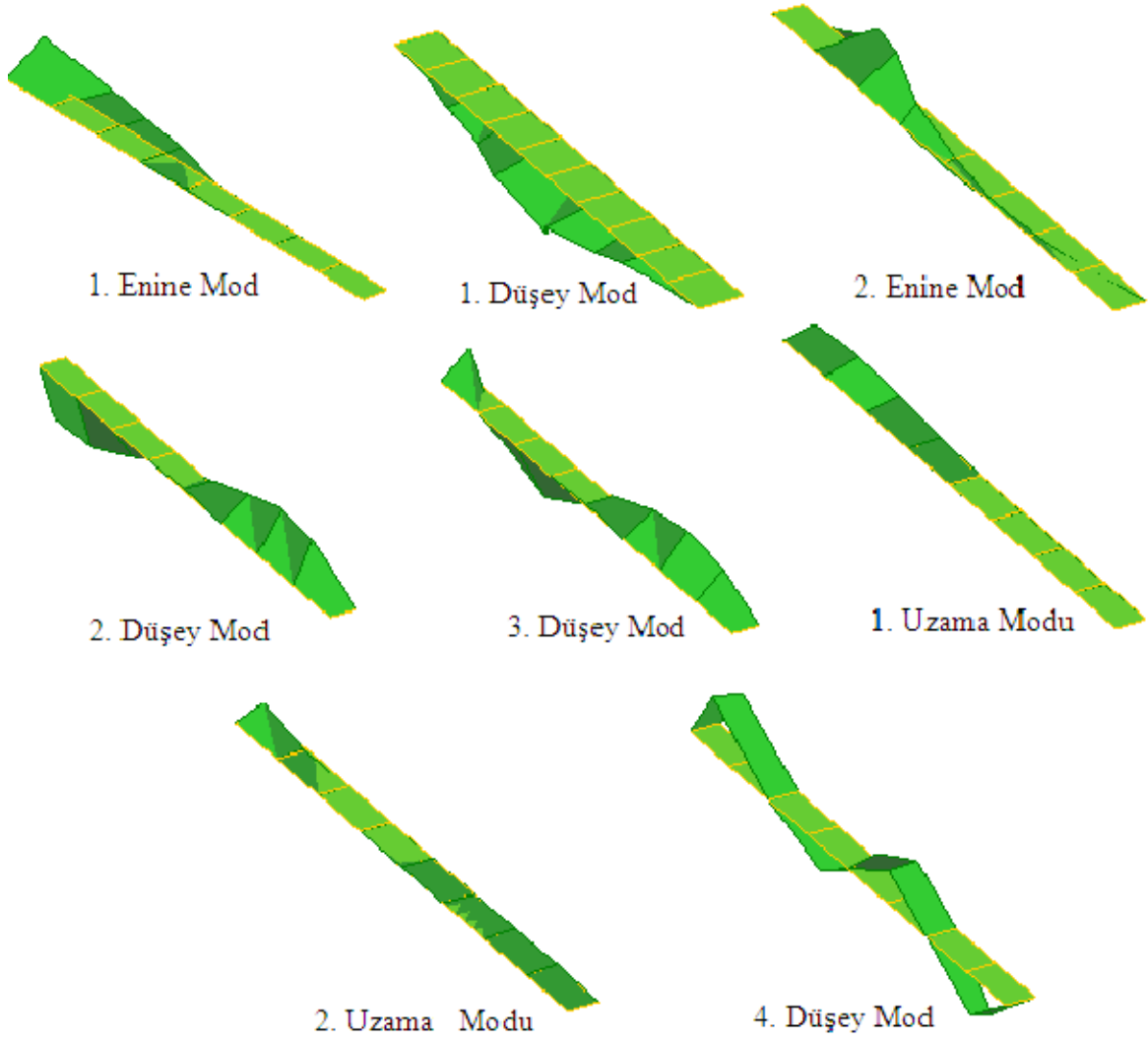


c) İkinci adımdan elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

Tablo 2.25. Kömürhan Köprüsü'nün altıncı ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

Frekans No	GFTAA Yöntemi		Ortalama Spektral Yoğunluk
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)	
1	0.764	3.263	0.766
2	1.010	2.140	1.020
3	1.862	1.409	1.860
4	2.219	1.314	2.270
5	2.710	0.578	2.630
6	3.118	1.250	3.050
7	3.491	2.400	3.530
8	4.754	1.400	4.440

Kömürhan Köprüsü'ne uygulanan deneysel ölçüm testlerinden GFTAA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri birbirleriyle uyum içerisindedir. Bu nedenle sadece bir ölçüme ait mod şekilleri Şekil 2.53'te verilmektedir. Şekil 2.53 incelendiğinde, her bir ölçümden elde edilen birinci ve üçüncü modların enine; ikinci, dördüncü, beşinci ve sekizinci modların düşey; altıncı ve yedinci modların ise uzama modu olduğu görülmektedir.



Şekil 2.53. Kömürhan Köprüsü'nün ÇTY'den elde edilen mod şekilleri

2.3.1.4. Kömürhan Köprüsü'nün Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi

Şekil 2.39 ve 2.53 karşılaştırmalı olarak incelendiğinde analitik ve deneysel olarak elde edilen mod şekillerinin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Fakat Tablo 2.19'da elde edilen analitik frekanslar ile Tablo 2.20-2.25'te elde edilen deneysel frekanslar karşılaştırmalı olarak incelendiğinde analitik ve deneysel olarak elde edilen doğal frekanslar arasında bazı farklılıkların olduğu, analitik frekansların deneysellerden biraz daha büyük olduğu görülmektedir. Doğal frekanslar arasındaki bu farklılıkları giderebilmek için Kömürhan Köprüsü'nün sonlu eleman modelinin deneysel sonuçlara 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.

2.3.1.4.1. Malzeme Özelliklerinin İyileştirilmesi

Kömürhan Köprüsü'nün analizleri sırasında dikkate alınan ve Tablo 2.18'de detaylı olarak verilen malzeme özelliklerinin deneysel olarak belirlenebilmesi için köprü kutu kesit içerisindeki çeşitli bölgelerden karot numuneleri alınmış, ayrıca Schmidt çekici kullanılarak hem karot numunelerinin alındığı bölgelerden hem de köprünün birçok farklı bölgesinden okumalar yapılarak beton dayanımının ve elastisite modülünün mevcut değerleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Karot numuneleri, köprünün sekiz farklı segmentinden ve kutu kesit içerisinde 15x30 cm² boyutlarında Elazığ Belediyesi ekipleri tarafından uygun numune alma bölgeleri belirlenerek alınmıştır. Bu numunelerin yarısı Ankara'da, yarısı da Elazığ'da kırılmış ve beton dayanımı 29 MPa olarak belirlenmiştir. Bu dayanım değeri dikkate alınarak köprü tabliyesine ait nihai beton elastisite modülü 32000 MPa olarak dikkate alınmıştır. Karot numunelerinin alınması sırasında elde edilen bazı görüşler Şekil 2.54'te verilmektedir.



Şekil 2.54. Karot numunelerinin alınması sırasında elde edilen bazı görüşler

Schmidt çekici kullanılarak, karot numunelerinin alındığı segmentlerden ve kolon ayak uç noktalarının tabliye ile birleştiği bölgelerden gerekli ölçümler alınmış ve beton

dayanımı belirlenmiştir. Ölçümler hem kutu kesit yan cidarlarından hem de kutu kesit alt tabliyesinden alınmıştır. Ölçüm alınan segmentlerden elde edilen ölçüm değerleri Tablo 2.26 ve 2.27’de, ölçüme ait bazı fotoğraflar Şekil 2.55’te verilmektedir.



Şekil 2.55. Schmidt çekici ile yapılan ölçümlere ait bazı görüntüler

Tablo 2.26. Kömürhan Köprüsü’nün Malatya tarafındaki parçasından alınan ölçüm değerleri

Ölçüm	Segment 0		Segment 12		Segment 22		Segment 27	
	Yan	Yan	Taban	Yan	Taban	Yan	Taban	Yan
1	54.0	58.0	36.0	54.0	40.0	46.0	43.0	44.0
2	56.0	58.0	38.0	56.0	43.0	46.0	43.0	44.0
3	58.0	58.0	40.0	56.0	43.0	47.0	43.0	45.0
4	58.0	58.0	40.0	56.0	43.0	50.0	43.0	46.0
5	59.0	58.0	40.0	56.0	44.0	50.0	44.0	46.0
6	60.0	58.0	42.0	56.0	44.0	50.0	44.0	46.0
7	60.0	58.0	44.0	58.0	45.0	51.0	46.0	46.0
8	60.0	58.0	44.0	58.0	48.0	52.0	46.0	46.0
9	60.0	60.0	48.0	60.0	50.0	52.0	47.0	48.0
10	60.0	60.0	48.0	60.0	52.0	54.0	50.0	48.0

Tablo 2.27. Kömürhan Köprüsü’nün Elazığ tarafındaki parçasından alınan ölçüm değerleri

Ölçüm	Segment 0		Segment 12		Segment 22		Segment 27	
	Yan	Yan	Taban	Yan	Taban	Yan	Taban	Yan
1	50.0	48.0	44.0	48.0	42.0	47.0	39.0	40.0
2	52.0	50.0	44.0	50.0	42.0	48.0	40.0	43.0
3	54.0	54.0	46.0	50.0	42.0	50.0	42.0	48.0
4	54.0	58.0	46.0	54.0	43.0	52.0	44.0	48.0
5	56.0	58.0	46.0	54.0	44.0	52.0	44.0	48.0
6	56.0	58.0	48.0	54.0	45.0	54.0	45.0	48.0
7	58.0	58.0	48.0	54.0	48.0	54.0	46.0	48.0
8	58.0	58.0	48.0	54.0	50.0	54.0	48.0	52.0
9	58.0	60.0	50.0	54.0	50.0	54.0	50.0	52.0
10	60.0	60.0	52.0	56.0	52.0	56.0	52.0	52.0

Her bir segmentten elde edilen ölçüm verilerinin minimum ve maksimumları çıkarılıp ortalamaları alınmış ve ortalama değerler 0.63 olarak belirlenen karbonlaşma katsayısı ile çarpılarak $15 \times 30 \text{ cm}^2$ 'lik numuneler için basınç dayanımları elde edilmiştir. Elde edilen basınç dayanımları dikkate alınarak köprü tabliyesi ve köprü ayağı için mevcut elastisite modülleri sırasıyla 32000 MPa ve 37500 MPa olarak belirlenmiştir.

2.3.1.4.2. Sınır Şartlarının İyileştirilmesi

Deneysel ölçümlerden önce oluşturulan başlangıç analitik modelde Elazığ ve Malatya taraflarında kalan kenar ayaklar lineer elastik yay elemanlar ile simule edilmiştir. Bu elemanların rijitlikleri ve diğer özellikleri hesap edilerek programa aktarılmıştır. Fakat köprünün mevcut durumunu yansıtan gerçek sonlu eleman modelinin oluşturulmasında kenar ayak mesnetleri çekme ve basınçta farklı özellikler gösteren multi elastik yay elemanlar ile simule edilmiştir. Bunun nedeni ise çekme anında çekme çubuklarına, basınç anında ise elastomere uygulanan kuvvetlerin ayrı ayrı dikkate alınmasını sağlamaktır. Yay elemanların rijitlik ve diğer özellikleri benzer hesaplamalar ile programa katılmıştır.

2.3.1.4.3. Diğer İyileştirmeler

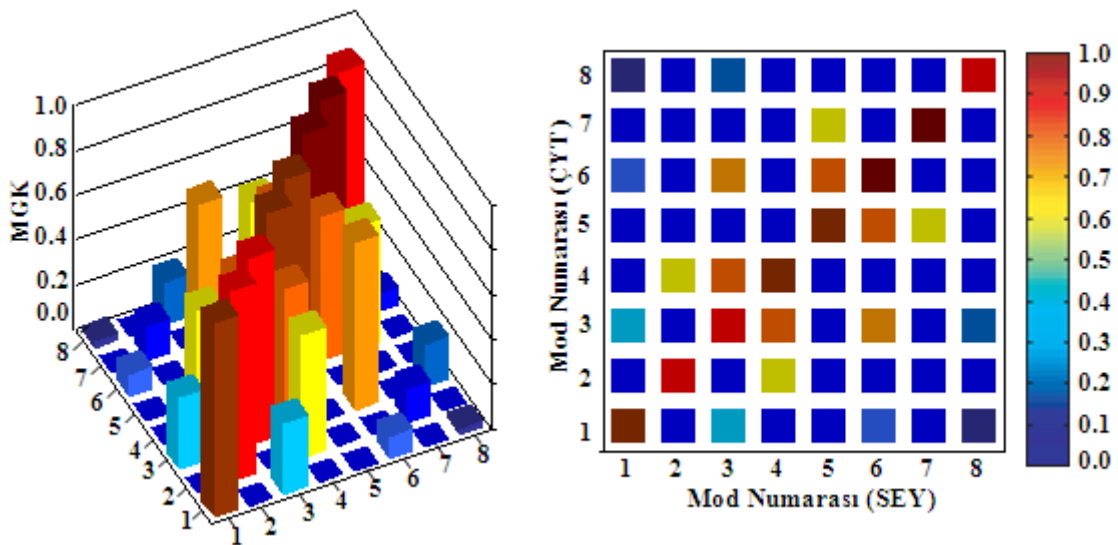
Kömürhan köprüsünün gerçek durumunu yansıtan sonlu eleman modelinin oluşturulması için yapılan diğer iyileştirmeler şu şekildedir;

- ❖ Karot numuneleri ve paftalardaki ortalama donatı yüzdeleri dikkate alınarak ayak betonunun birim kütle yoğunluğu 2400 kg/m^3 , tabliye betonunun birim kütle yoğunluğu ise 2300 kg/m^3 olarak belirlenmiştir.
- ❖ Köprünün orta ayak uç noktaları ile tabliyesi arasında ters “v” şeklinde rijit bağlantı elemanları mevcuttur. Bu elemanların alanları, rijitlikleri, atalet momentleri ve kütleleri hesaplanarak ayaküstü segmentlere (her bir ayak üzerinde sağa ve sola birer segment) düzeltme faktörleri şeklinde etkilmiştir.
- ❖ Köprü kenar ayaklarında ve orta açıklığındaki segment sonu perde duvarlarının ağırlıkları diyafram yükü olarak köprüye ilave edilmiştir. Hesap Kontrol Raporunda hesaplandığı şekliyle, her bir kenar ayakta 1117 kN, açıklık ortasında köprünün Elazığ ve Malatya parçalarının 26. segment sonlarında ise 150 kN olarak modele katılmıştır.

Kömürhan Köprüsü'nün sonlu eleman model iyileştirmesinden önceki ve sonraki analitik ve deneysel frekansları Tablo 2.24'te karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Tablo 2.28 incelendiğinde, frekanslar arasındaki maksimum farkın %10'dan %2'ye düştüğü görülmektedir. Ayrıca, model iyileştirmesinden sonra elde edilen mod şekilleri analitik mod şekilleri ile uyum içerisindedir. İyileştirilmiş analitik ve deneysel mod şekilleri arasındaki uyumu görebilmek için çizilen Modal Güvence Kriteri grafiği Şekil 2.56'da verilmektedir. Şekil 2.56'dan anlaşıldığı üzere, analitik ve deneysel mod şekilleri arasında iyi bir uyum bulunmaktadır.

Tablo 2.28. Kömürhan Köprüsü'nün sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra elde edilen dinamik karakteristikleri

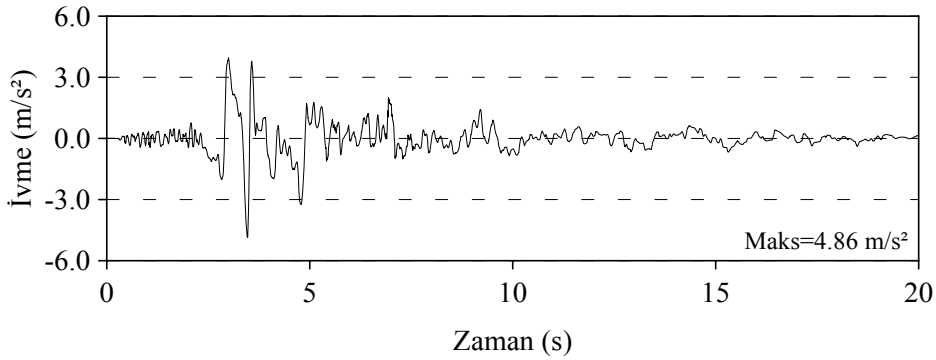
Analitik Frekanslar (Hz)	İyileştirilen Analitik Frekans (Hz)	Deneysel Frekanslar (Hz)					
		Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6
0.790	0.760	0.766	0.766	0.766	0.797	0.788	0.764
1.106	1.032	1.014	1.020	1.016	1.049	1.027	1.010
1.845	1.815	1.836	1.861	1.851	1.894	1.850	1.862
2.315	2.214	2.230	2.230	2.290	2.234	2.291	2.219
2.685	2.551	2.660	2.714	2.773	2.807	2.703	2.710
3.346	3.238	3.178	3.211	3.162	3.090	3.001	3.118
3.588	3.439	3.406	3.467	3.465	3.528	3.440	3.491
4.847	4.480	4.623	4.575	4.595	4.586	4.665	4.754



Şekil 2.56. Kömürhan Köprüsü'nün analitik ve deneysel modlarına ait MGK grafiği

2.3.1.5. Kömürhan Köprüsü'nün Deprem Davranışının Belirlenmesi

Kömürhan Köprüsü'nün deprem davranışını belirlemek için zaman tanım alanında lineer analizler gerçekleştirilmiştir. Deprem analizleri, sonlu eleman model iyileştirmesinin etkisini görmek için hem iyileştirmeden önceki sonlu eleman modeli hem de iyileştirilmiş sonlu eleman modeli için yapılmıştır. Deprem analizlerinde yer hareketi olarak 1992 yılında meydana gelen Erzincan depremi ivme kaydı kullanılmıştır (PEER, 2009). Bu yer hareketi, köprüye yakın bir bölgede meydana geldiği için tercih edilmiştir. Erzincan depreminin doğu-batı bileşeni köprüye düşey doğrultuda uygulanmıştır. Erzincan depreminin ivme kayıt bileşenleri Şekil 2.57'de verilmektedir. Köprü'nün zaman tanım alanında lineer analizlerinde, eleman matrisleri Gauss sayısal integrasyon tekniği kullanılarak hesaplanmıştır. Dinamik hareket denkleminin çözümünde ise Newmark Yöntemi kullanılmıştır. İyileştirmeden önceki dinamik analizlerde %5 sönüm oranı dikkate alınmıştır. İyileştirmeden sonraki dinamik analizlerde ise deneysel ölçümler sonucunda elde edilen sönüm oranları dikkate alınmıştır. Analizlerden, Kömürhan Köprüsü'nün taşıyıcı sistem elemanlarına ait yerdeğıştirmeler ve kesit tesirleri elde edilmiştir.

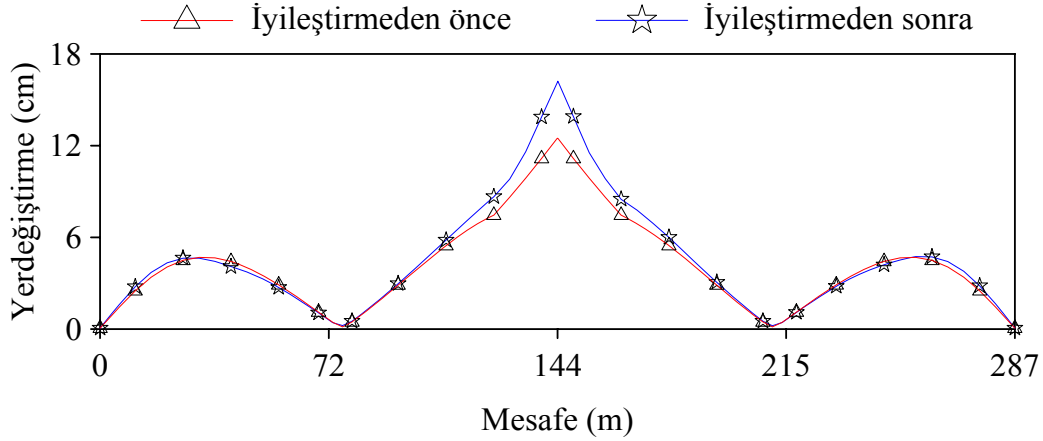


Şekil 2.57. 1992 Erzincan depreminin doğu-batı bileşeni

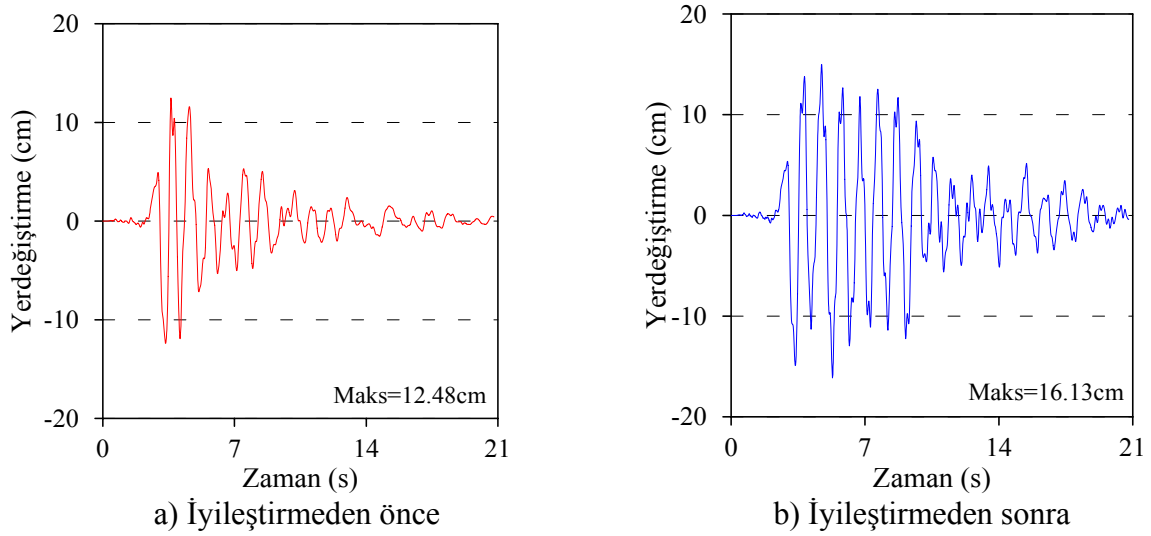
2.3.1.5.1. Tabliye Davranışı

Kömürhan Köprüsü'nün analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğıştirmelerin tabliye boyunca değışimi Şekil 2.58'de verilmektedir. Şekil 2.58'de görüldüğü gibi yerdeğıştirmeler köprü açıklık ortasına doğru artmakta ve sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra elde edilen yerdeğıştirme değeri daha büyük çıkmaktadır. Maksimum düşey yerdeğıştirme değeri sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra 12.48

cm'den 16.13 cm'ye çıkmaktadır. Elde edilen maksimum yerdeğiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimleri Şekil 2.59'da verilmektedir.

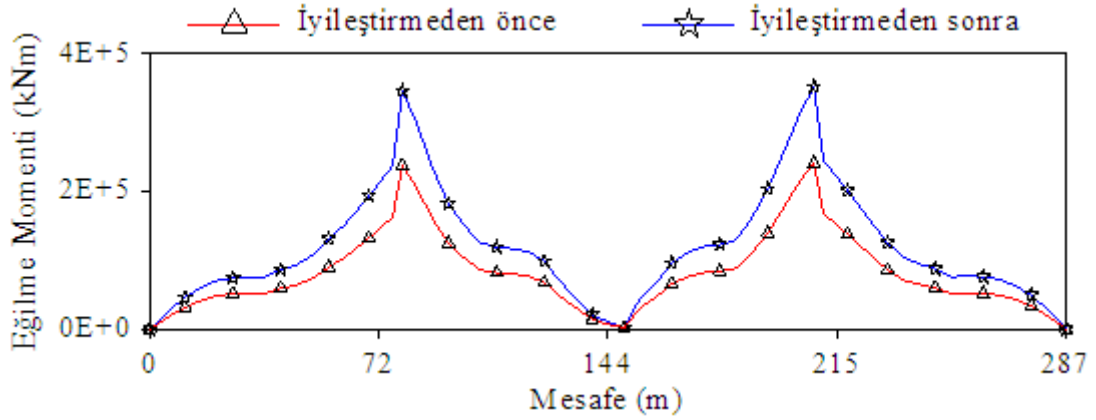


Şekil 2.58. Kömürhan Köprüsü'nde tabliye boyunca elde edilen yerdeğiştirmeler

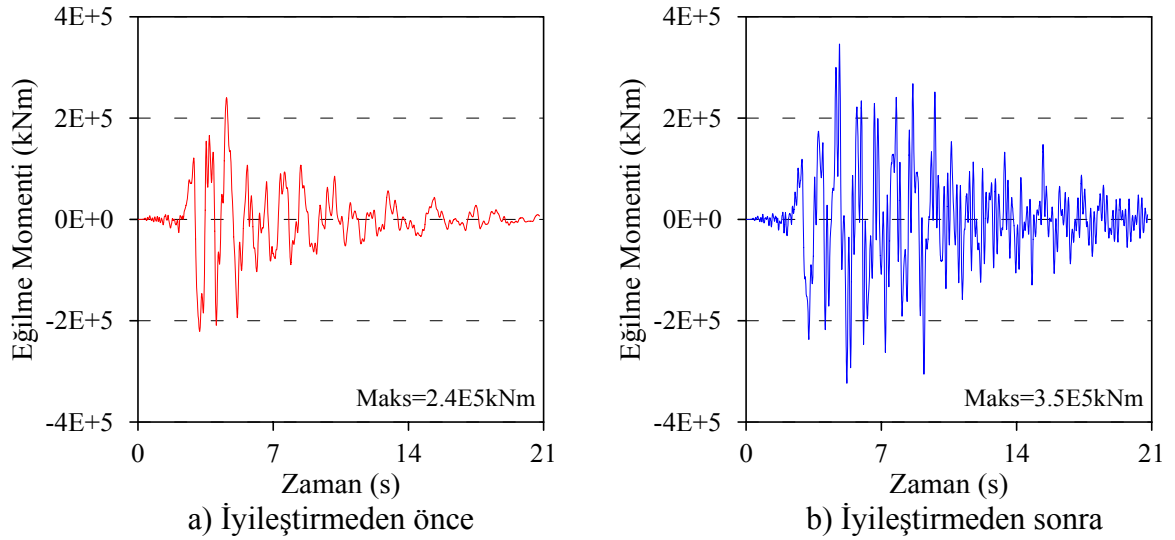


Şekil 2.59. Tabliyede boyunca elde edilen maksimum düşey yerdeğiştirmelerin zamana bağlı değişimleri

Kömürhan Köprüsü'nün analizleri sonucunda elde edilen maksimum eğilme momentinin tabliye boyunca değişimi Şekil 2.60'ta verilmiştir. Şekil 2.60'ta görüldüğü gibi sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra elde edilen eğilme momentleri daha büyüktür. Maksimum eğilme momenti değeri model iyileştirmeden sonra 2.4E5 kNm'den 3.5E4 kNm'ye çıkmaktadır. Elde edilen maksimum eğilme momentinin zamana bağlı olarak değişimi Şekil 2.61'de verilmektedir.



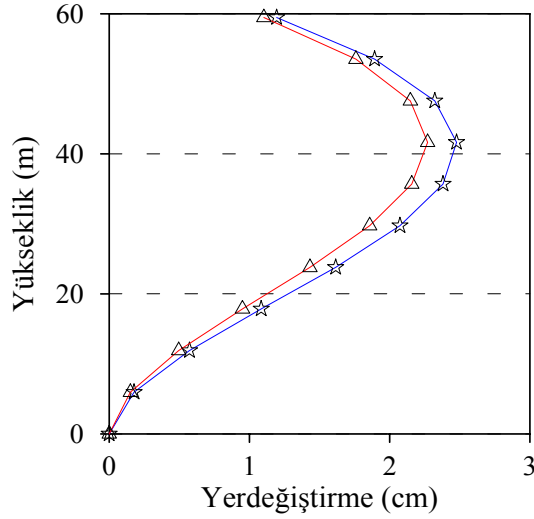
Şekil 2.60. Kömürhan Köprüsü'nde tabliye boyunca elde edilen eğilme momentleri



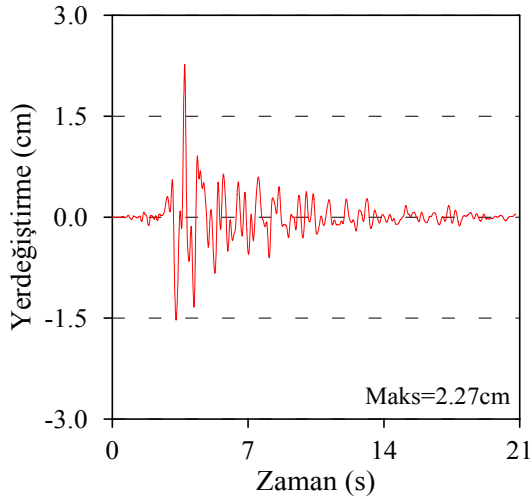
Şekil 2.61. Tabliyede boyunca elde edilen maksimum eğilme momentinin zamana bağlı değişimi

2.3.1.5.2. Ayak Davranışı

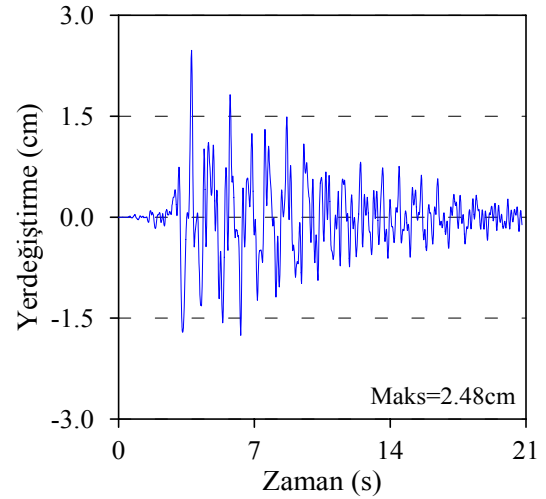
Kömürhan Köprüsü'nün sonlu eleman model iyileştirmesinden önceki ve sonraki analizleri için elde edilen maksimum yerdeğiştirmelerin ayak yüksekliği boyunca değişimi ve maksimum yerdeğiştirmenin zamana bağlı değişimi Şekil 2.62'de verilmiştir. Ayaklarda maksimum yerdeğiştirme boyuna doğrultuda ve köprü ayağının yerden 40 m yüksekliğinde elde edilmiştir. Maksimum yerdeğiştirme değeri model iyileştirmeden sonra 2.27 cm'den 2.48 cm'ye çıkmaktadır.



a) Boyuna yerdeğiştirmelerin ayak yüksekliği boyunca değişimi



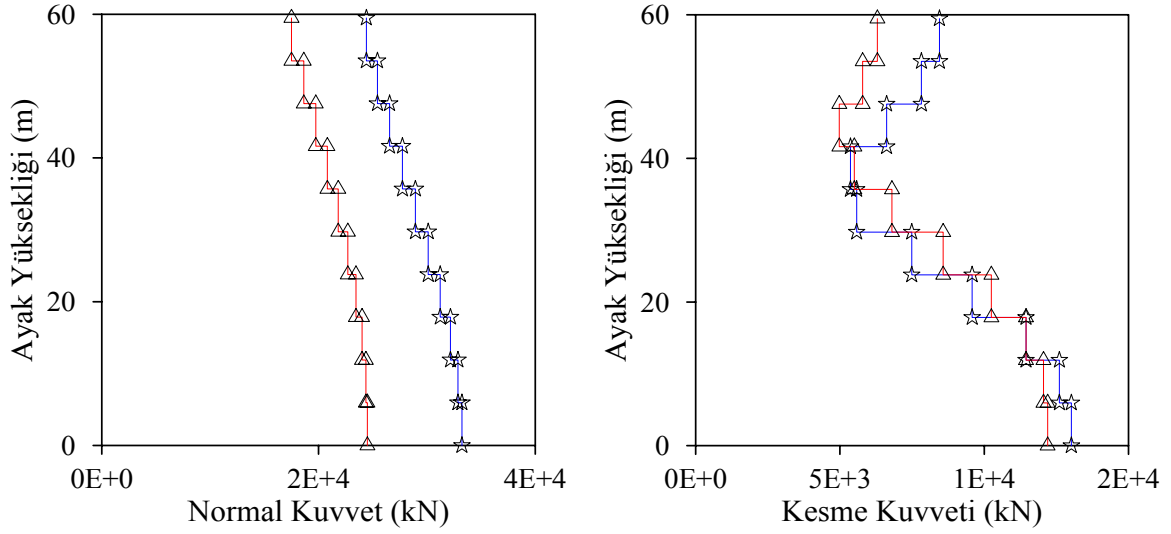
b) İyileştirmeden önce



c) İyileştirmeden sonra

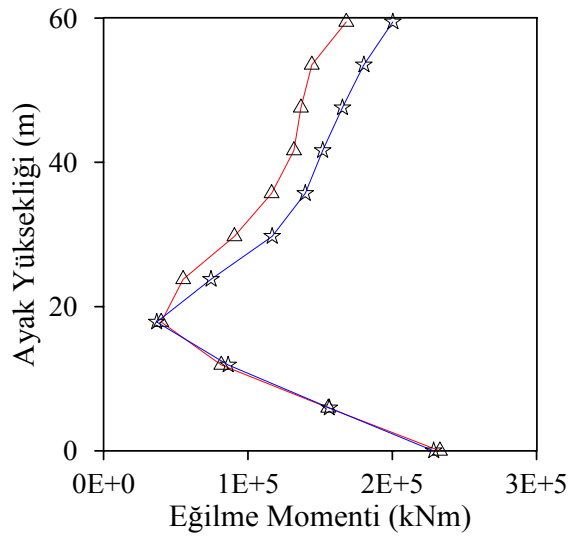
Şekil 2.62. Ayak yüksekliği boyuca elde edilen boyuna yerdeğiştirmeler ve maksimum yerdeğiştirmelerin zamana bağlı değişimleri

Ayak yüksekliği boyunca elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerleri Şekil 2.63'te verilmektedir. Şekil 2.63 incelendiğinde, ayak yüksekliği boyunca normal kuvvet değerlerinin biraz azaldığı, kesme kuvveti değerlerinin ise tabanda maksimum değerini alıp ayak yüksekliği boyunca değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin arttığı görülmektedir.

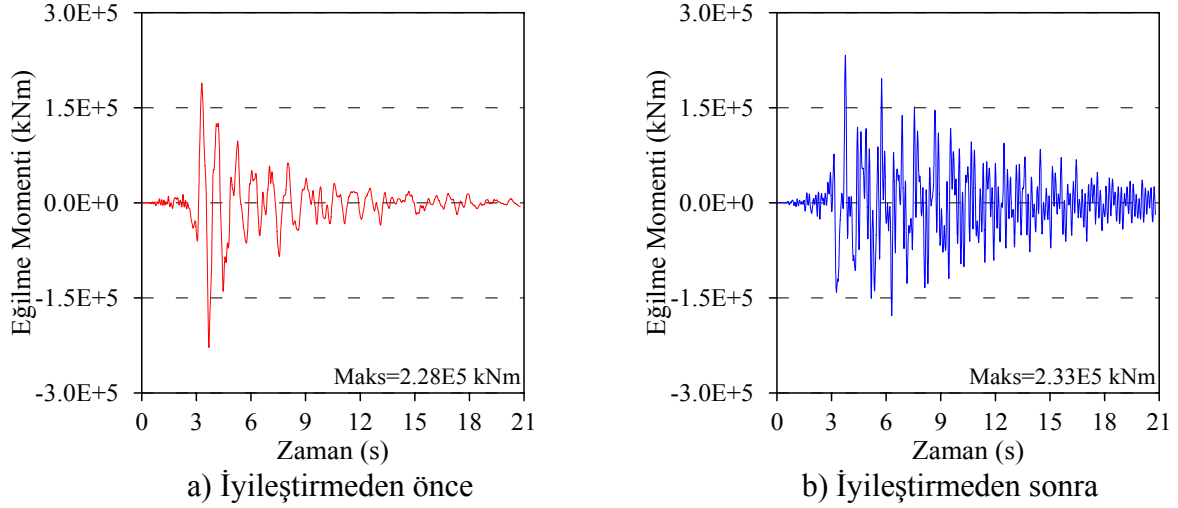


Şekil 2.63. Ayak yüksekliği boyunca elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerleri

Sonlu eleman model iyileştirmesinin öncesi ve sonrasında, ayak yüksekliği boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri Şekil 2.64'te verilmektedir. Şekil 2.64 incelendiğinde, ayak yüksekliği boyunca eğilme momenti değerlerinin değişim gösterdiği, ayak ortasına doğru değerlerin azalıp daha sonra tekrar arttığı görülmektedir. Maksimum eğilme momenti değeri model iyileştirmeden sonra $2.28E5$ kNm'den $2.33E5$ kNm'ye çıkmaktadır. Elde edilen maksimum eğilme momentinin zaman bağlı olarak değişimi Şekil 2.65'te verilmektedir.



Şekil 2.64. Ayak yüksekliği boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri



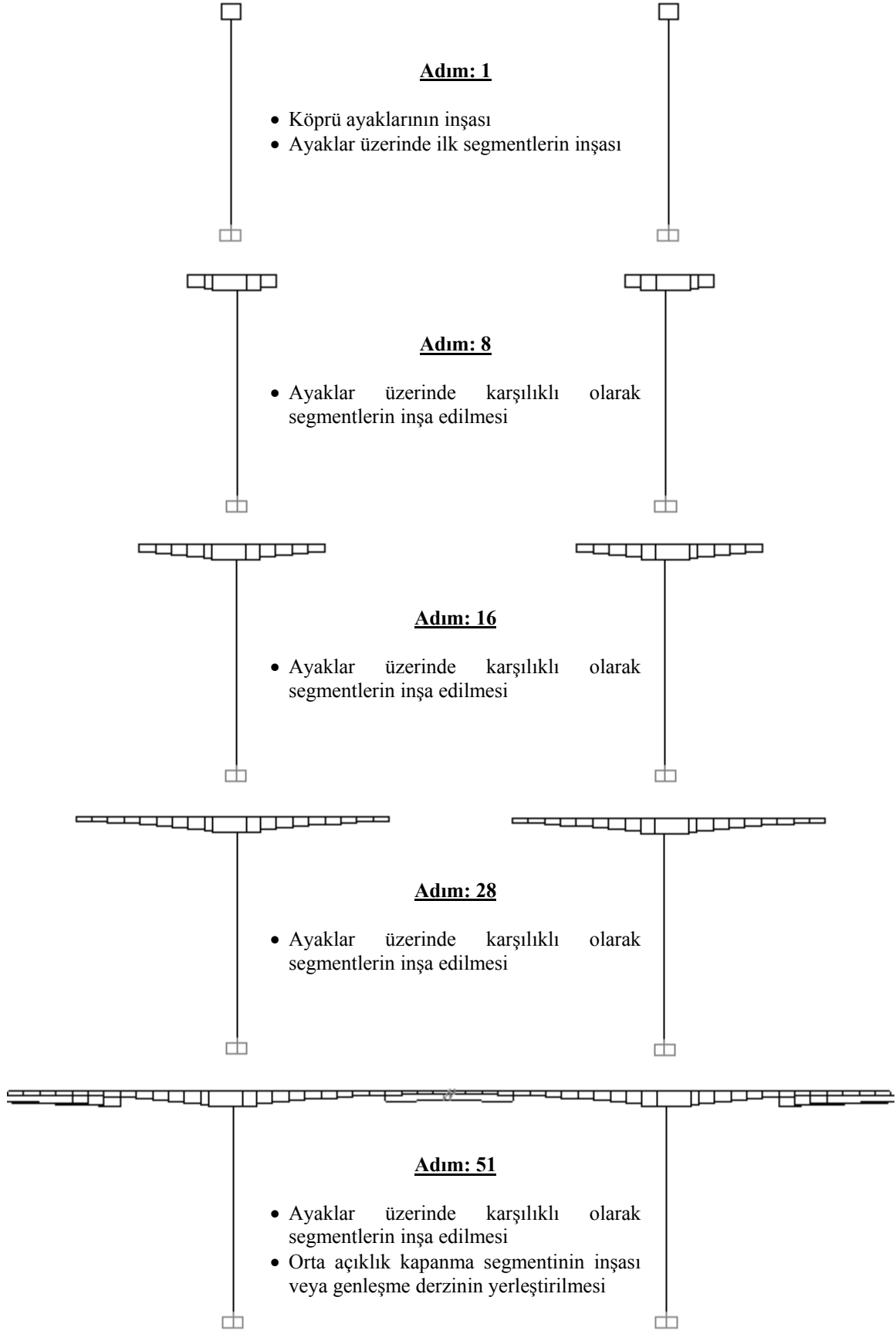
Şekil 2.65. Ayak yüksekliği boyuca elde edilen maksimum eğilme momenti değerlerinin zamana bağlı değişimi

2.3.1.6. Kömürhan Köprüsü'nün Yapısal Davranışına Yapım Aşamalarının ve Zamana Bağlı Malzeme Deformasyonlarının Etkisinin Belirlenmesi

Kömürhan Köprüsü'nün yapısal davranışına yapım aşamalarının etkisini belirlemek amacıyla köprünün sonlu eleman modeli proje hesap raporları dikkate alınarak toplam 51 adımda oluşturulmuştur. Modellemeler sırasında toplam adım sayısı ve maksimum iterasyon sayısı sırasıyla 200 ve 50 olarak dikkate alınmıştır. Kömürhan Köprüsü'nün çeşitli yapım aşamalarına ait sonlu eleman modeli Şekil 2.66'da verilmektedir.

Kömürhan Köprüsü'nün yapısal davranışına zamana bağlı malzeme deformasyonlarının etkisini belirlemek amacıyla yapım aşamalı sonlu eleman modelinde beton malzemesi için elastisite modülündeki değişimler, rötre ve sünme etkileri, çelik malzemesi için ise çeliğin relaksasyonu dikkate alınmıştır. Çünkü beton ve çelik gibi yapısal malzemelerin bu özellikleri iklim şartlarına bağlı olarak devamlı değişkenlik gösterebilmektedir. Köprünün analizlerinde dikkate alınan malzeme parametreleri Tablo 2.29'da verilmektedir.

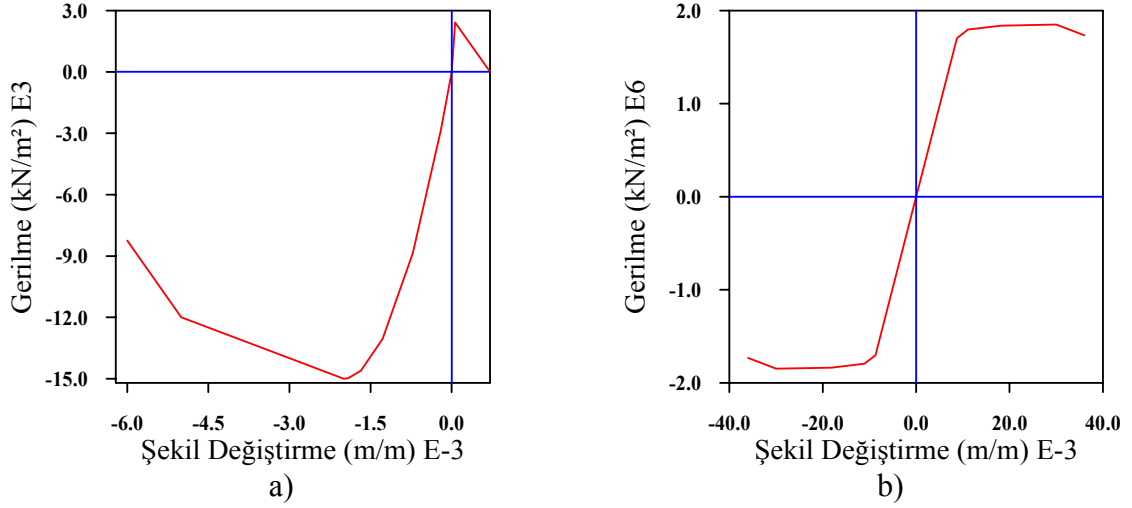
Beton ve çelik için zaman bağlı değişen malzeme özellikleri Şekil 2.67-2.69'da verilmektedir. Analizlerde dikkate alınan bu parametreler SAP2000 sonlu eleman programı içerisinde de bulunan CEB-FIB tasarım kodun yardımıyla belirlenmiştir. Tablo 2.29 belirtilen parametrelere bağlı olarak Şekil 2.67-2.69'da verilen grafikler otomatik olarak değişmektedir. Köprünün inşasının başlamasından günümüze kadar geçen süre ortalama olarak 10000 gün olarak dikkate alınmıştır.



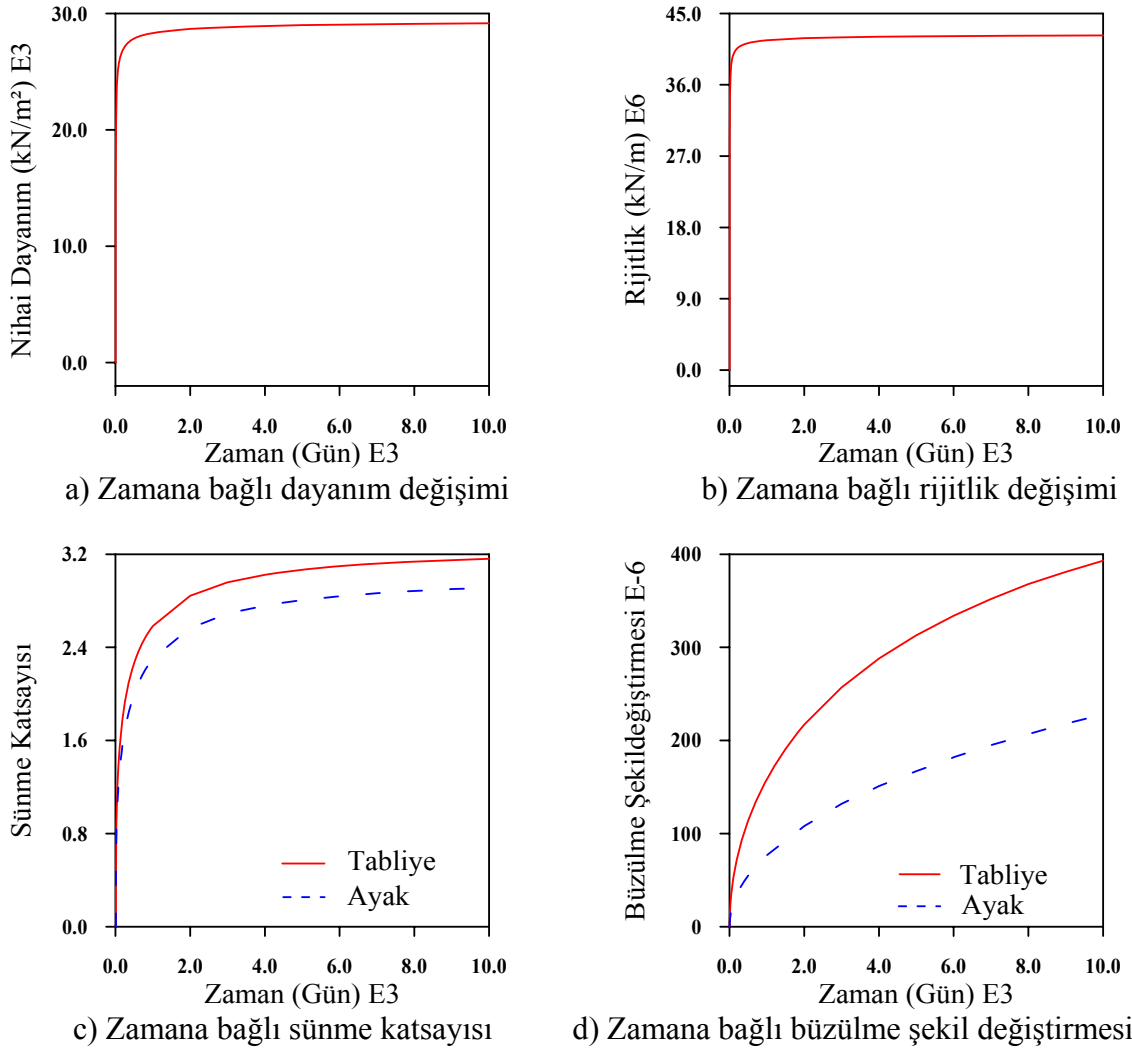
ekil 2.66. Kömürhan Köprüsü'nün çeşitli yapım aşamalarına ait sonlu eleman modeli

Tablo 2.29. Malzeme deformasyonlarının dikkate alınması için seçilmesi gereken analiz parametreleri

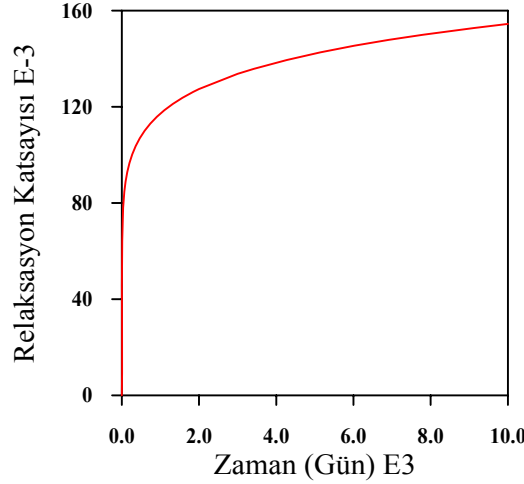
PARAMETRELER	TAŞIYICI SİSTEM ELEMANLARI			
		Tabliye	Ayaklar	Öngerilmeli Çelik
Malzeme Özelliği		Beton	Beton	Tendon
		Isotropik	Isotropik	Tek eksenli
Lineer Olmayan Malzeme Verileri	Histerezis (Gecikme) tipi	Kinematik	Kinematik	Kinematik
	Gerilme-Şekil değ. diyagramı	Kullanıcı Tanımlı	Kullanıcı Tanımlı	Kullanıcı Tanımlı
Zamana Bağlı Özellikler	Elastisite mdülü	✓	✓	-
	Sünme	✓	✓	-
	Büzülme	✓	✓	-
	Sünme analiz tipi	Tam	Tam	-
	Beton çimentosu tip katsayısı	0.25	0.25	-
	Bağıl nem	60	60	-
	Sünmeye maruz kesit oranı	0.619	0.619	-
	Büzülme katsayısı	5	5	-
	Büzülme başlangıç zamanı	0	0	-
	Çelik relaksasyonu	-	-	✓
	Relaksasyon analiz tipi	-	-	Tam
	Parametre sınıfı	-	-	1



Şekil 2.67. Beton (a) ve öngerilmeli çelik (b) için kullanılan gerilme-şekil değiştirme diyagramları



Şekil 2.68. Beton için zamana bağlı malzeme özelliği değişimleri



Şekil 2.69. Öngerilmeli çelik için zamana bağlı malzeme özelliği değişimi

2.3.1.6.1. Analizlerde Dikkate Alınan Yükleme Durumları

Kömürhan Köprüsü'nün yapısal davranışına yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının etkisini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen analizlerde aşağıda belirtilen yükleme durumları dikkate alınmıştır:

- Ölü Yük: Tüm elemanların kendi ağırlıklarıdır ve program tarafından direk olarak hesap edilmektedir.
- Ek Ölü Yükler: Asfalt, bordür, boru hattı ve destekleri, korkuluk gibi ek olarak etki eden ağırlıklardır 8-10 cm'lik asfalt dikkate alınarak ve gerekli şartnameler göz önünde bulundurularak her bir segment için yaylı yük şeklinde 31 kN/m olarak etki ettirilmiştir. Bu yük SAP2000 programı tarafından direk olarak sonlu eleman modal analizine ilave edilecek ek kütleyle çevrilmiştir.
- Kalıp Arabası Yüğü: Bir segmentin yapımı öncesinde, önceki segmente uygulanan ve yapım bittiğinde sonraki segmente kaydırılan kalıp arabası yüküdür. Hesap Kontrol Raporunda baz alındığı gibi 600 kN olarak uygulanmaktadır. Hem çift numaralı hem de tek numaralı segmentlerde mevcuttur. Köprü yapımı bittiğinde tamamen iptal edilmektedir.
- Diyafram Yüğü: Köprü kenar ayaklarında ve orta açıklığındaki segment sonu perde duvarlarının ağırlıklarıdır. Hesap Kontrol Raporunda hesaplandığı şekliyle, her kenar ayakta 1117 kN, açıklık ortasında her iki tarafın 26. segmenti sonunda ise 261 kN olarak modele katılmıştır.

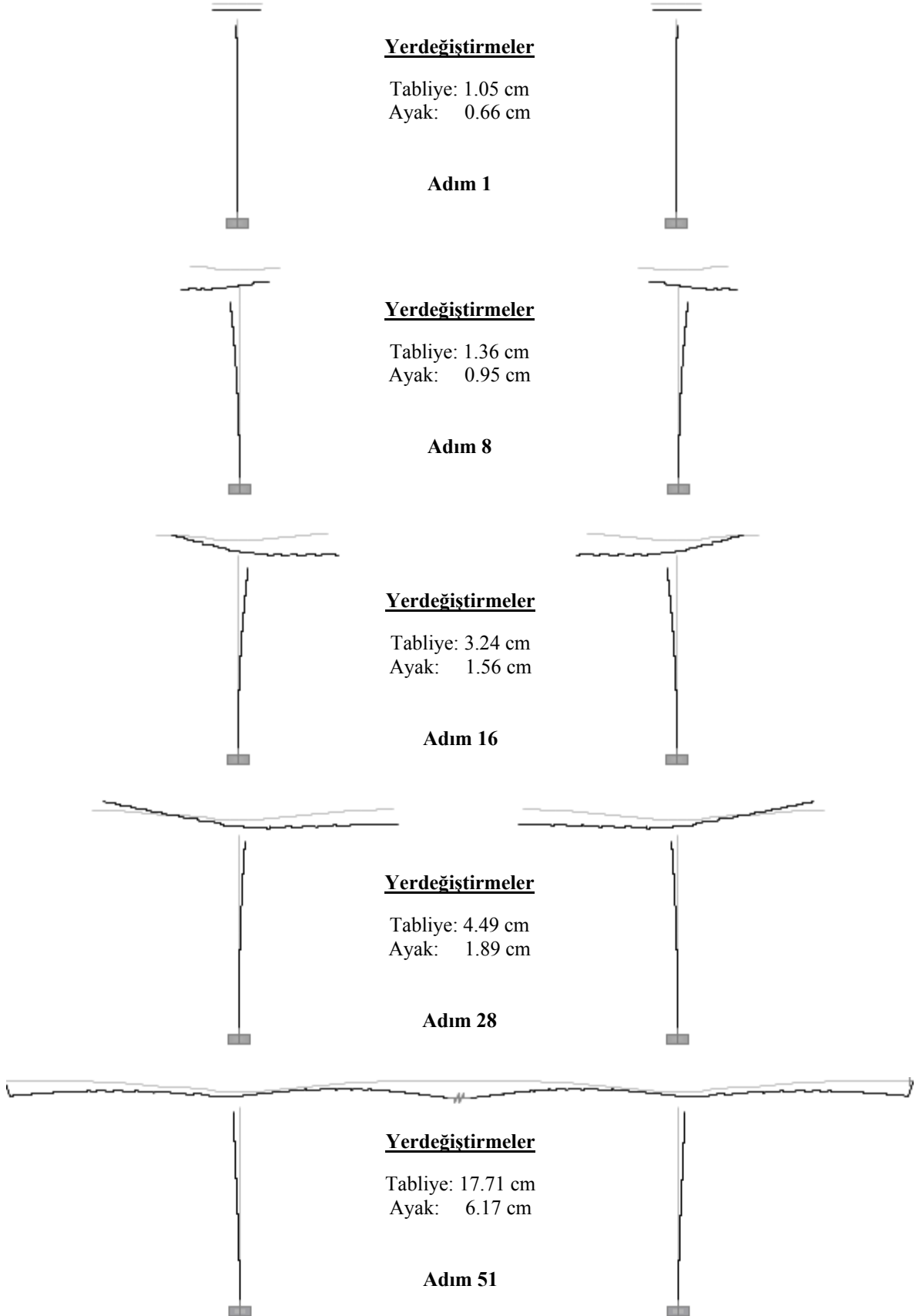
- Uzama Yüğü: Kablolara Hesap Kontrol Raporunda belirtilen öngerilme uygulayacak eşdeğer uzama yüküdür.
- Kriko Yüğü: Kenar ayak anoları bağlanmadan önce 27. segment' e uygulanması öngörölmüş olan 500 kN' lık kriko yüküdür. Hesap Kontrol Raporunda bunun yerine başka bir krikosuz alternatif uygulanacağı belirtilmiş olmasına rağmen, bilgi eksikliği yüzünden modelde bu şekli ile bırakılmıştır.
- Sıcaklık Yüğü: İklimsel değışikler nedeniyle oluşabilecek sıcaklık farklılıklarını dikkate alan yükür. Köprünün bulunduğu bölgeye bağlı olarak analizlerde +35°C ile -35°C olarak dikkate alınmıştır.

2.3.1.6.2. Yapım Aşamalarına Bağlı Deformasyon Şekilleri

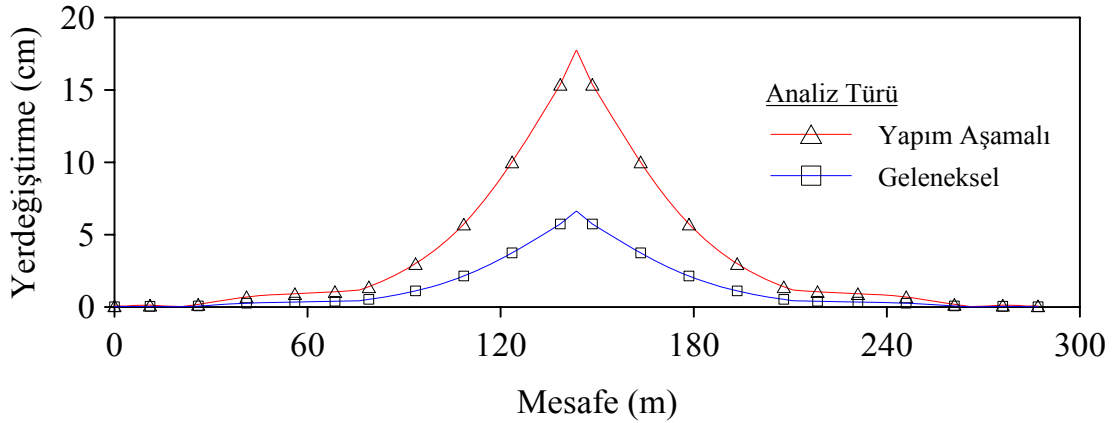
Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen deformasyon şekilleri ile tabliye ve ayaklara ait deformasyon değeri Şekil 2.70'de verilmektedir. Şekil 2.70'de görüldüğü gibi köprü yapımı ilerledikçe konsol uç noktalarında oluşan düşey deformasyonlar ile ayaklarda oluşan yatay deformasyonlar artmaktadır.

2.3.1.6.3. Tabliye Davranışı

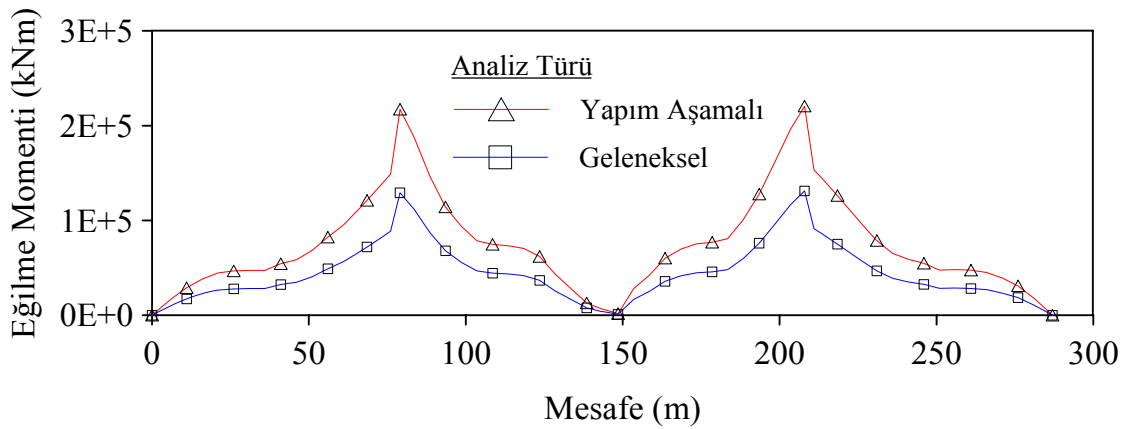
Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğıştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değışimi Şekil 2.71'de verilmektedir. Yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerin etkisini daha iyi belirlemek amacıyla elde edilen veriler yapım aşamalarının dikkate alınmadığı analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 2.71'de görüldüğü gibi yerdeğıştirmeler köprü açıklık ortasına doğru artmakta, eğilme momenti ise ayaklar üzerinde maksimum değere sahip olup köprü açıklık ortasında minimum değere ulaşmaktadır. Ayrıca, yapım aşamaları ve zaman bağlı malzeme deformasyonları dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerden daha büyük değeri elde edildiği görülmektedir.



Şekil 2.70. Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen deformasyon şekilleri ile tabliye ve ayaklara ait deformasyon değerleri



a) Yerdeğiştirmeler



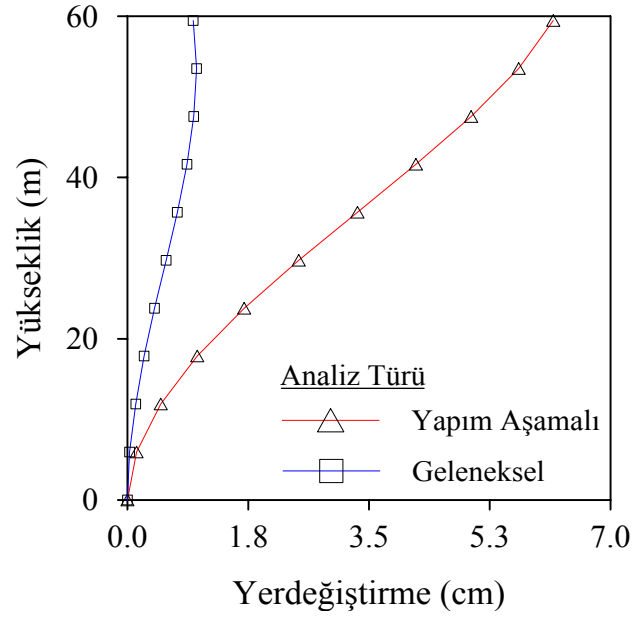
b) Eğilme momenti

Şekil 2.71. Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen düşey yerdeğiştirmelerin ve eğilme momentlerinin tabliye boyunca değişimi

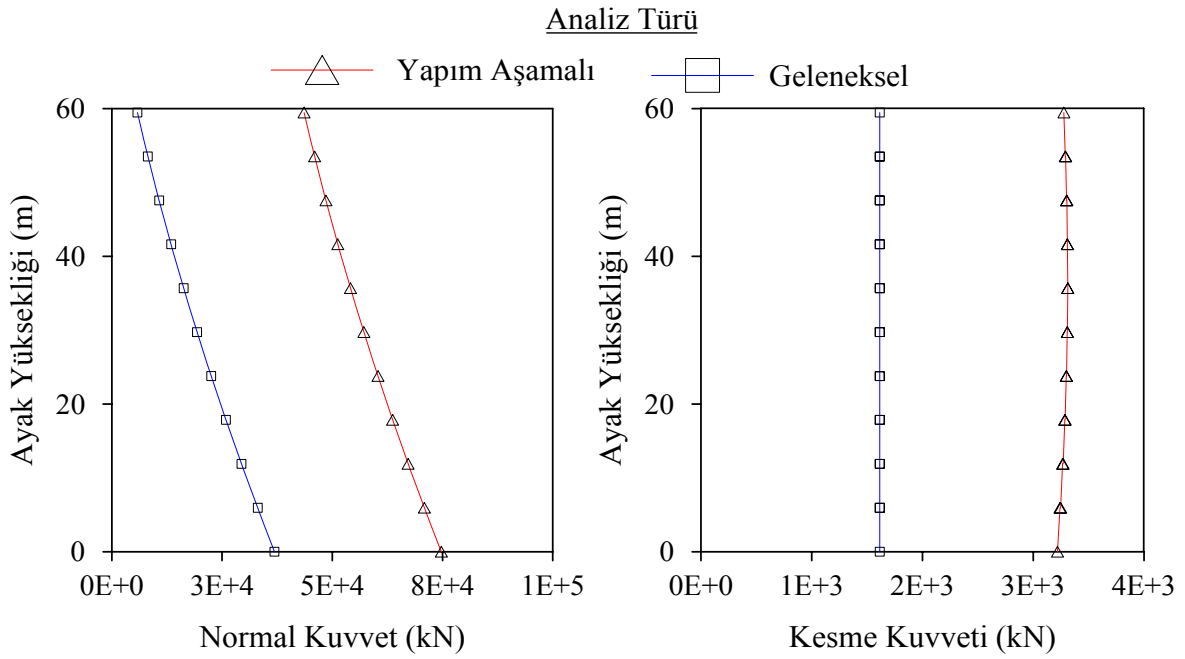
2.3.1.6.4. Ayak Davranışı

Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen boyuna yerdeğiştirmelerin ayak yüksekliği boyunca değişimi Şekil 2.72'de verilmiştir. Şekil 2.72 incelendiğinde, boyuna yerdeğiştirmelerin ayak yüksekliği boyunca arttığı ve maksimum yerdeğiştirmenin yapım aşamalarının dikkate alındığı durum için ayak uç noktasında 6.17 cm olarak elde edildiği görülmektedir.

Ayak yüksekliği boyunca elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerleri Şekil 2.73'te verilmektedir. Şekil 2.73 incelendiğinde, ayak yüksekliği boyunca normal kuvvet değerlerinin azaldığı, kesme kuvveti değerlerinin ise hemen hemen aynı kaldığı görülmektedir. Ayrıca, yapım aşamaları dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerden daha büyük kesit tesirlerinin elde edildiği görülmektedir.

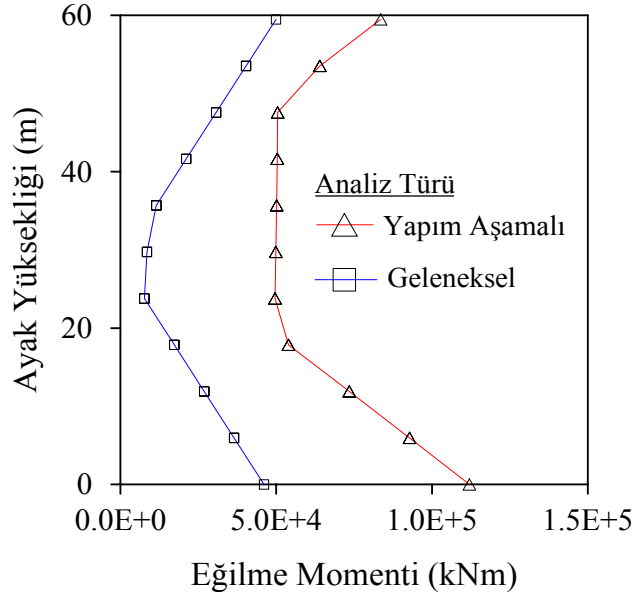


Şekil 2.72. Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen boyuna yerdeğiştirmelerin ayak yüksekliği boyunca değişimi



Şekil 2.73. Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin ayak yüksekliği boyunca değişimi

Ayak yüksekliği boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri Şekil 2.74'te verilmektedir. Şekil 2.74 incelendiğinde, ayak yüksekliği boyunca eğilme momenti değerlerinin değişim gösterdiği, ayak ortasına doğru değerlerin azalıp daha sonra tekrar arttığı görülmektedir. Ayrıca, yapım aşamaları dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerden daha büyük eğilme momentlerinin elde edildiği görülmektedir.



Şekil 2.74. Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda elde edilen eğilme momentlerinin ayak yüksekliği boyunca değişimi

2.3.2. Gülburnu Köprüsü

2.3.2.1. Gülburnu Köprüsü ve Geometrik Özellikleri

Gülburnu Köprüsü, Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü kontrolünde bulunan Doğu Karadeniz Sahil Yolu İyileştirme Projesi kapsamındaki Giresun-Espiye Devlet Yolu'nun 20+362 ve 20+692 km'leri arasında yapılmıştır. Gülburnu Köprüsü ile birlikte, tarihi Zefre Limanı'nın bulunduğu ve doğal bir güzelliğe sahip olan Gülburnu Koyu'nun korunması amaçlanmıştır.

1998-2000 yılları arasında kablolu köprü, asma köprü, viyadük ve betonarme gibi değişik taşıyıcı sisteme sahip köprü tipleri değerlendirilmiş, son olarak dengeli konsol yöntemiyle inşa edilecek kutu kesitli öngerilmeli betonarme bir köprünün yapılmasına karar verilmiştir. 2001 yılında temel kazık imalatına başlanmış, ancak deniz tabanının jeolojik özellikleri nedeni ile kazıların yapımı mümkün olmayıp, bu çalışmalar aynı yıl durdurulmuştur. İlave sondaj raporlarına göre alternatif projeler üzerinde çalışılmaya başlanmış ve 2004 yılında Ø 200 cm çaplı fore kazıklı ve radye üst kotu deniz seviyesinde olacak şekilde dengeli konsol yöntemiyle inşa edilecek betonarme bir köprüye karar verilmiştir. Köprünün üç açıklıklı (kenar açıklıklar 82.5 m ve ana açıklık 165 m) ve 330 m uzunluğunda yapılmasına karar verilmiş, 2005 tarihinde fore kazık imalatlarına başlanmıştır. Mayıs 2009 tarihinde köprü inşası tamamlanarak trafiğe açılmıştır. Gülburnu Köprüsü, Ülkemizde bulunan ve dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen iki betonarme köprüden birisidir. Köprü ayakları ve tabliyesi arasında izolatörler (sismik ayırıcılar) bulunmaktadır. Gülburnu Köprüsü'ne ait bazı fotoğraflar Şekil 2.75'te verilmektedir.

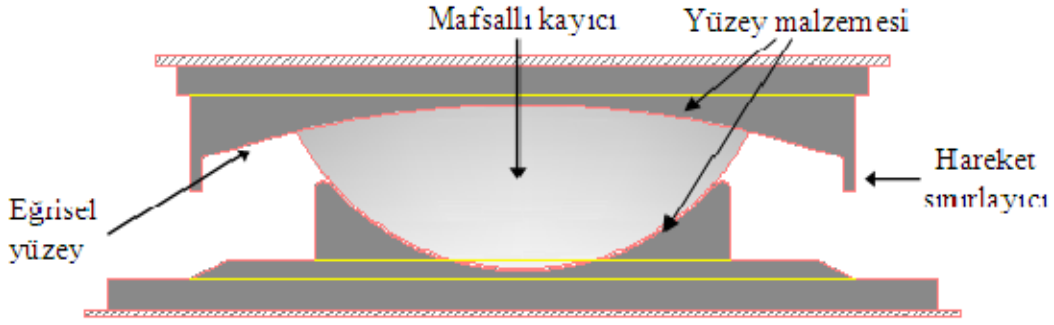


Şekil 2.75. Gülburnu Köprüsü'ne ait bazı fotoğraflar

Şekil 2.75'in devamı

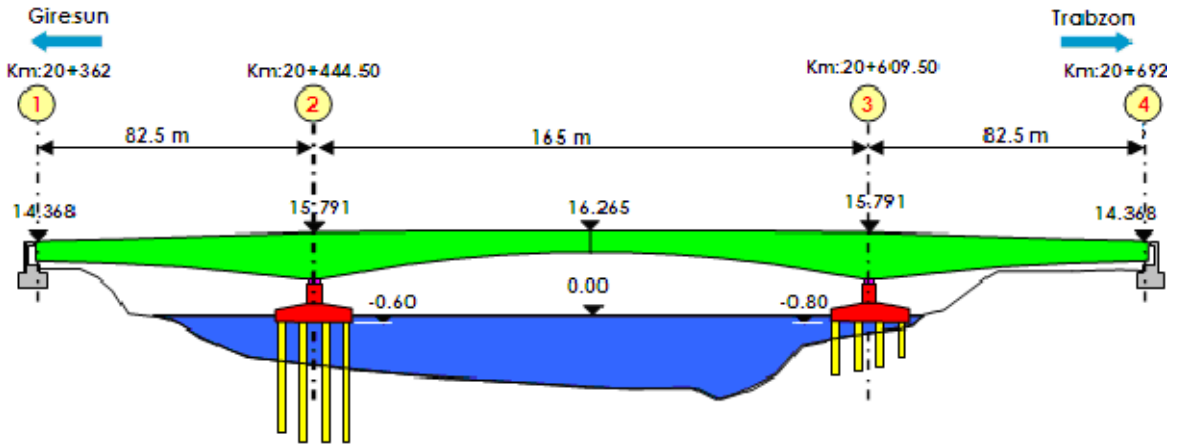


Gülburnu Köprüsü'nün sismik izolasyonunda sürtülmeli sarkaç izolatörler kullanılmıştır. Bu tür sismik izolasyon sistemleri inşası devam eden veya güçlendirilecek önemli mühendislik yapılarının deprem gibi dinamik etkilerden minimum düzeyde etkilenmesini sağlayan en etkili çözüm yöntemlerinden birisidir. Sürtülmeli sarkaç sistemi, üretimi diğer izolasyon sistemlerine göre daha kolay ve dayanıklıdır. Bu sistemde, istenilen sonuçların elde edilebilmesi için izolasyon sisteminin taşıdığı ağırlıktan ve geometrisinden yararlanılmaktadır. Sürtülmeli sarkaç sistemi, kayıcı olup silindirik içbükey yüzey üzerinde kayabilen ve yüzeyi bir kauçuk mesnet malzemesi ile kaplayan mafsallı bir kayıcıdan oluşmaktadır (Ateş, 2004). Bu şekilde, sistemin periyodu artmakta, yatay kuvvetler ve momentler önemli düzeyde azalmaktadır. Gülburnu Köprüsü'nde kullanılan sürtülmeli sarkaç izolatörlerin kesit görünüşü Şekil 2.76'da verilmektedir.



Şekil 2.76. Gülburnu Köprüsü'nde kullanılan izolatörlere (sismik ayırıcı) ait kesit görünüşü (Yüksel Proje, 2007).

Gülburnu Köprüsü çift tabliyeye sahip, kutu kesitli ve öngerilmeli betonarme bir köprüdür. Köprü, ana açıklığı 165 m ve kenar açıklıkları 82.5 m olmak üzere toplam üç açıklıklıdır. Köprü toplam uzunluğu ve genişliği sırasıyla 330 m ve 30 m'dir. Köprü'nün inşası sırasında 3800 ton inşaat demiri, 738 ton öngerme kablosu ve 25000 m³ beton kullanılmıştır. Köprü boy kesiti ve eleman boyutlarına ait genel görünüşler Şekil 2.77'de verilmektedir. Köprü taşıyıcı sistemi başlıca tabliye, ayaklar, kenar mesnetler ve izolatörlerden oluşmaktadır.



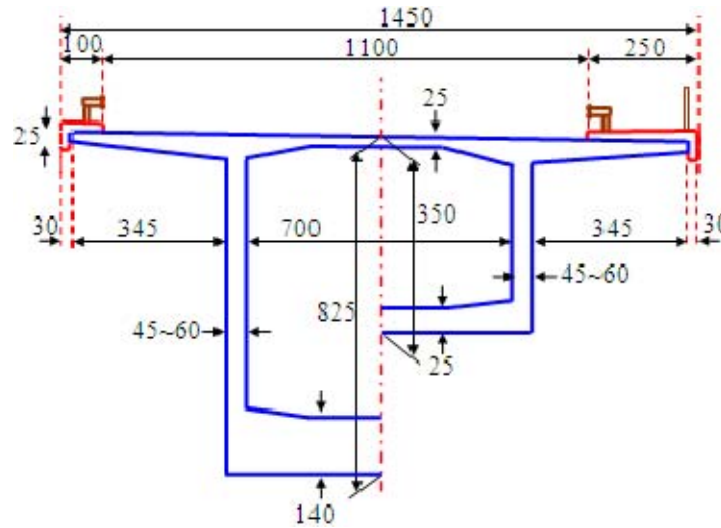
Şekil 2.77. Gülburnu Köprüsü'nün boy kesiti ve eleman boyutları (Yüksel Proje, 2007).

2.3.2.1.1. Köprü Tabliyesi

Gülburnu Köprüsü, tek hücreli kutu kesite sahip yerinde dökme ve ardgermeli taşıyıcı sistemli iki tabliyeye sahiptir. Tabliye toplam uzunluğu ve genişliği sırasıyla 330 m ve 30 m'dir. Tabliyeler üzerindeki trafik biri gidiş ve biride geliş olmak üzere iki şeritten

sürdürülmektedir. Köprünün üst yapısı dengeli konsol ve öngerilmeli kutu kesit sistemiyle inşa edilmiştir. Mevcut dengenin muhafazası, orta ayaklarda her iki tarafa doğru aynı zamanda inşa edilen segmentlerin yan yana getirilip, öngerilme ile bağlanmaları sonucu sağlanmıştır.

Köprü tabliyesi her biri ortalama 5 m uzunluğunda olan toplam 65 segmentten oluşmaktadır. Her bir segment donatılı kutu kesite sahiptir. Donatılı kutu kesitin yüksekliği orta ayaklar üzerinde 8.25 m olmakla beraber, parabolik bir azalım göstererek kenar ayaklarda ve köprü ortasında 3.50 m'ye düşmektedir. Kutu kesitin üst tabla kalınlığı köprü uzunluğu boyunca sabit olup, 25 cm'dir. Alt tabla kalınlığı 25 cm ile 140 cm, yan duvarların kalınlığı ise 45 cm ile 60 cm arasında parabolik olarak değişmektedir. Kullanılan betonun basınç dayanımı 40 MPa'dır. Kutu kesitler tabliye boyunca 15.7 mm çaplı yüksek dayanımlı öngerme halatlar ile birbirine bağlanmıştır. Kullanılan halatların çekme dayanımı 1860 MPa'dır. Halatların sayısı ayaklardan başlayarak kenar mesnetlere ve köprü açıklık ortasına doğru 66 adetten 2'ye düşmektedir. Değişken kesitli kutu kesitin şematik olarak gösterimi Şekil 2.78'de verilmektedir.

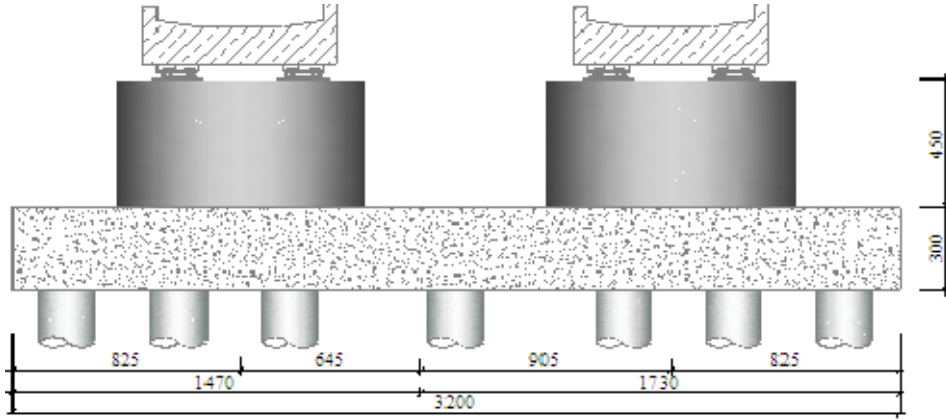


Şekil 2.78. Değişken kesitli tabliye üst yapısı (boyutlar cm cinsindedir)

2.3.2.1.2. Köprü Ayakları ve Kenar Mesnetler

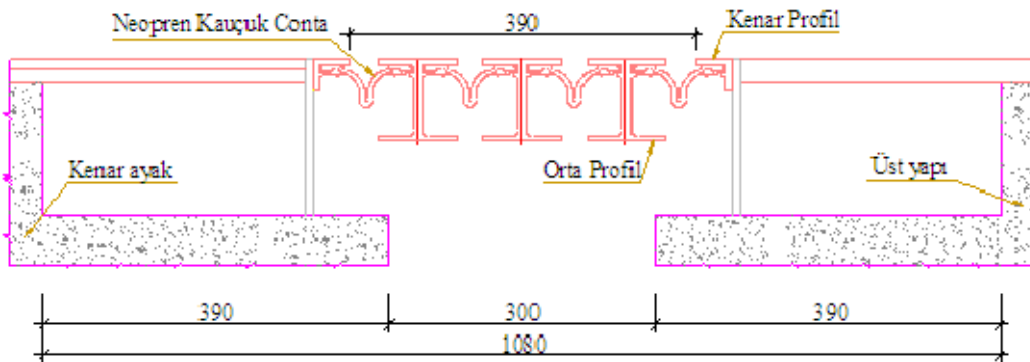
Köprü taşıyıcı sisteminde 4.5 m yüksekliğe ve $9.00 \times 3.75 \text{ m}^2$ kesit alanına sahip 4 adet ayak mevcuttur. Ayaklar kazıklı radye temeller üzerine oturmaktadır. Her bir ayak ortalama 25 m uzunluğunda ve 200 cm çapında 28 adet kazık üzerindedir. Radye temeller

3 m kalınlığında olup, 32x22 m² kesit alanına sahiptir. Temellerin ve kazıkların beton basınç dayanımları sırasıyla 35 MPa ve 30 MPa'dır. Temelerde S420 tipi betonarme demiri kullanılmıştır. Köprü ayağı, temel ve kazık sistemine ait kesit görünüşü Şekil 2.79'da verilmektedir.



Şekil 2.79. Ayak, temel ve kazık sistemine ait kesit görünüşü (boyutlar cm cinsindedir) (Yüksel Proje, 2007).

Kenar ayaklarda sadece boyuna uzamaya izin verilen mesnet tipi dikkate alınmıştır. Kenar ayaklarda dikkate alınan mesnet durumunun şematik görünüşü Şekil 2.80'de verilmektedir.



Şekil 2.80. Kenar ayaklarda dikkate alınan mesnet durumu (boyutlar cm cinsindedir) (Yüksel Proje, 2007).

2.3.2.1.3. Sismik İzolatörler

Köprü üzerinde, her bir ayakta iki adet olmak üzere toplam sekiz adet sürtünmeli sarkaç izolatör kullanılmıştır. Proje tasarım kriterleri dikkate alınarak izolatörlerin hareket kabiliyeti 50 cm olarak belirlenmiştir. İzolatörlerin imalatı ve hareket kabiliyeti Amerika'nın California eyaletinde özel deneysel yöntemler kullanılarak test edilmiştir. Kullanılan izolatörlerin köprü üzerine yerleştirilmeden önceki ve sonraki durumlarına ait bazı görünüşler Şekil 2.81'de verilmektedir.

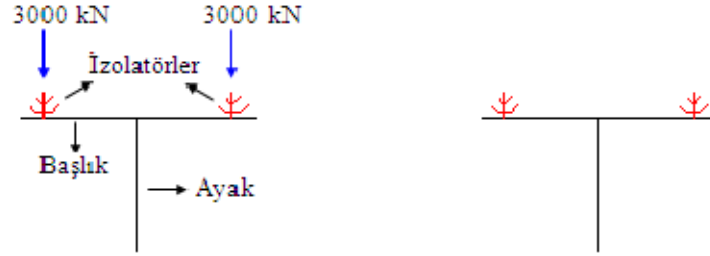


Şekil 2.81. Köprüde kullanılan sürtünmeli sarkaç izolatörlere ait bazı görünüşler

2.3.2.2. Sonlu Eleman Yöntemiyle (SEY) Gülburnu Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Gülburnu Köprüsü'nün dinamik karakteristiklerini analitik olarak belirlemek için köprünün üç boyutlu sonlu eleman modeli (SEM) SAP2000 programında oluşturulmuştur. Köprü davranışının gerçekçi bir şekilde temsil edilebilmesi için sonlu eleman modeli yapı-temel-zemin etkileşimini içerecek şekilde geliştirilmiştir. Tabliye, ayaklar ve temel kazıklar altı serbestlik derecesine sahip çubuk elemanlar, radye temeller ise kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Kenar ayaklarda mesnet şartı olarak sadece tabliye uzunluğu boyunca oluşabilecek yerdeğiştirmelere izin verilmiştir. Temel kazıklarının uç noktalarındaki sınır şartı yüksek rijitliğe sahip yay elemanlar kullanılarak belirlenmiştir. Yay katsayıları proje hesap raporu dikkate alınarak boyuna ve enine doğrultuda $1E9$ N/m, düşey doğrultuda ise $6E9$ N/m olarak belirlenmiştir (Yüksel Proje, 2007). Öngerme kabloları uç noktalarında moment almayan çubuk elemanlar ile modellenerek projede belirlenen lokasyonlara yerleştirilmiştir. Öngerme kablolarının yükleri şekildeğiştirmeler cinsinden hesap edilmiştir. Ayaklar ve tabliye arasında yerleştirilen sürtünmeli sarkaç izolatörler link elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Sürtünmeli sarkaç izolatörlerin

yerleşim planı ve çalışma prensibine ait şematik gösterim Şekil 2.82’de, modellemeler sırasında dikkate alınan parametreler Tablo 2.30’da verilmektedir. Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri ise Tablo 2.31’de verilmektedir. Gülburnu Köprüsü’nün yukarıda belirtilen modelleme kriterleri dikkate alınarak oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 2.83’te verilmektedir.



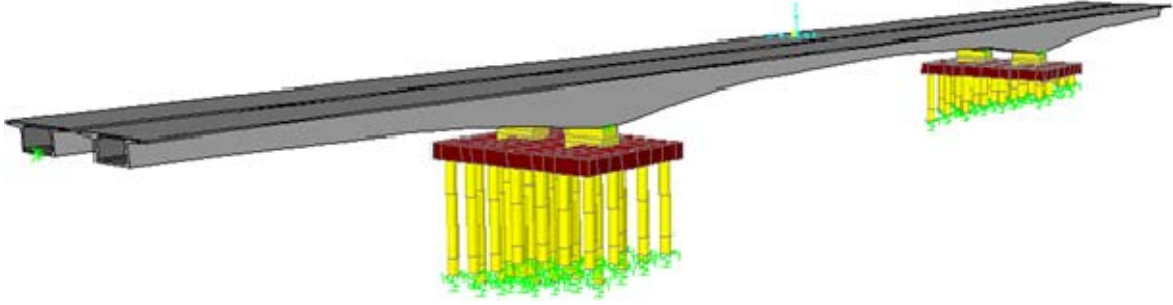
Şekil 2.82. İzolatörlerin yerleşim planı ve çalışma prensibi

Tablo 2.30. İzolatörlerin modelleme parametreleri

Özellikler	Doğrultu (kN ve m)		
	Boyuna	Enine	Düşey
Lineer Analiz Özellikleri			
▪ Etkili rijitlik	14000000	7228	7228
▪ Etkili sönüm	0	0	0
Kesme Deformasyon Bölgesi			
▪ Uç noktadan uzaklık	-	0.225	0.225
Lineer Olmayan Analiz Özellikleri			
▪ Rijitlik	14000000	76606	76606
▪ Sönüm katsayısı	0	-	-
▪ Sürtünme Katsayısı, Yavaş	-	0.03	0.03
▪ Sürtünme Katsayısı, Hızlı	-	0.06	0.06
▪ Denge parametresi	-	35	35
▪ Yüzey yarıçapı	-	3.962	3.962

Tablo 2.31. Gülburnu Köprüsü’nün analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri

Eleman	Sınıf	Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı (-)	Yoğunluk (kg/m ³)
Tabliye	C40	3.6E10	0.2	2500
Ayaklar	C35	3.5E10	0.2	2500
Kazıklar	C30	3.4E10	0.2	2500
Temel	C30	3.4E10	0.2	2500
Çelik Donatı*	S420	2.1E11	0.3	7850
*Akma Dayanımı=1600 MPa		Nihai Dayanım=1860 MPa		



Şekil 2.83. Gülburnu Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modeli

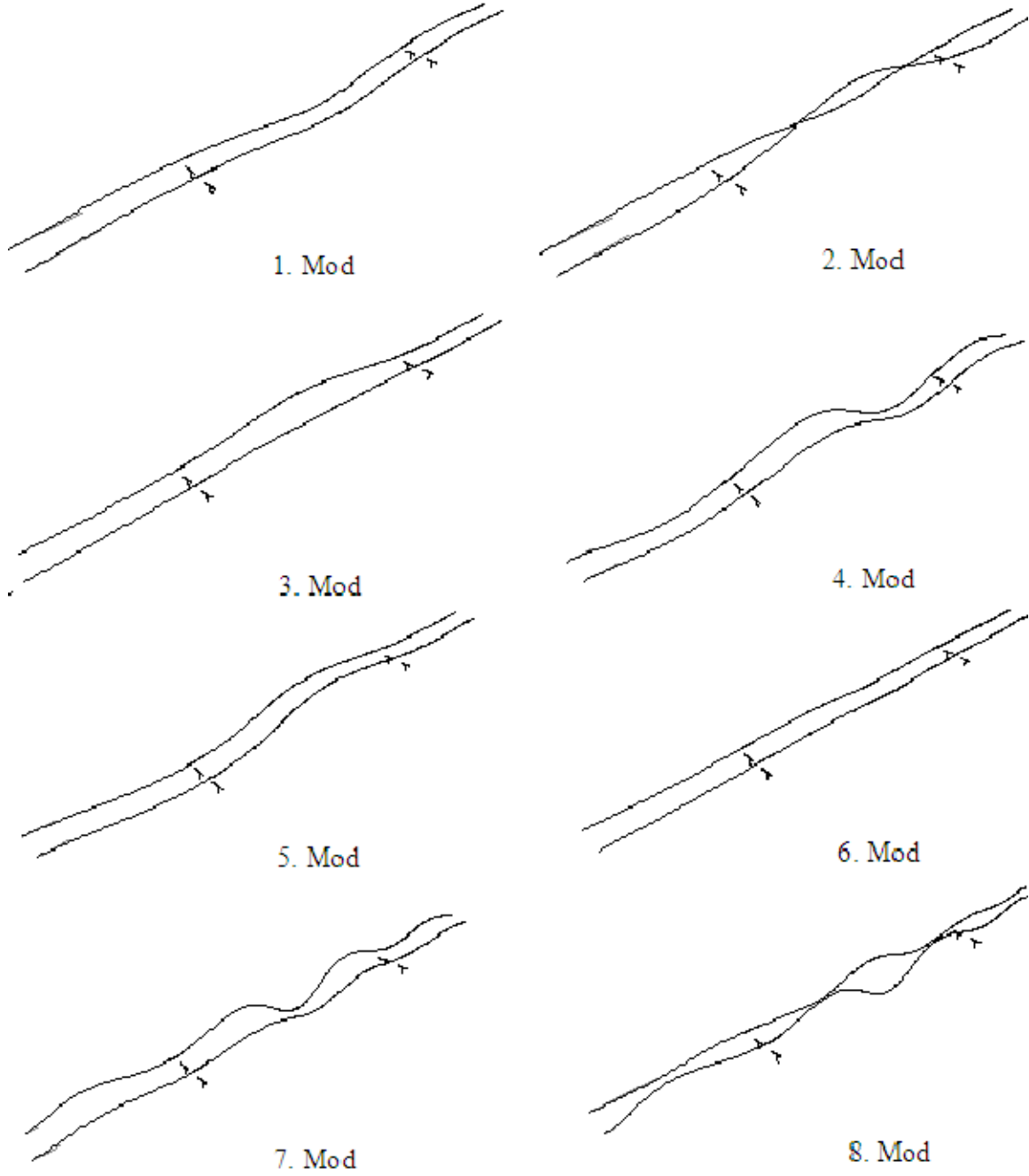
Köprü'nün üç boyutlu sonlu eleman analizlerinde aşağıda belirtilen yükleme durumları dikkate alınmıştır:

- Ölü Yük: Tüm elemanların kendi ağırlıklarıdır ve program tarafından direk olarak hesap edilmektedir.
- Ek Ölü Yükler: Asfalt, bordür, boru hattı ve destekleri, korkuluk gibi ek olarak etki eden ağırlıklardır. Gerekli şartnameler göz önünde bulundurularak her bir segment için yayılı yük şeklinde 50.90 kN/m olarak etki ettirilmiştir. Bu yük SAP2000 programı tarafından sonlu eleman analizine ilave edilecek ek kütleyle çevrilmiştir.

Gülburnu Köprüsü'nün, SAP2000 sonlu eleman programı kullanılarak gerçekleştirilen modal analizinden elde edilen ilk sekiz moduna ait doğal frekans, doğal periyot ve mod şekli sırasıyla Tablo 2.32'de verilmektedir. Tablo 2.32'de görüldüğü gibi köprü'nün ilk sekiz doğal frekansı 1-6 Hz arasında değişmektedir. Köprü'nün ilk sekiz mod şekli Şekil 2.84'te verilmektedir. Şekil 2.84 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin enine, burulma, uzama ve düşey modlar olduğu görülmektedir.

Tablo 2.32. Gülburnu Köprüsü'nün analitik doğal frekans, periyot ve mod şekilleri

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli
1	1.086	0.921	1. Düşey
2	1.642	0.609	1. Burulma
3	2.355	0.425	1. Enine
4	3.102	0.322	2. Düşey
5	3.318	0.301	2. Enine
6	4.524	0.221	1. Uzama
7	5.012	0.200	3. Düşey
8	5.960	0.168	2. Burulma



Şekil 2.84. Gülburnu Köprüsü'nün analitik olarak elde edilen ilk sekiz mod şekilleri

2.3.2.3. Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Gülburnu Köprüsü'nün Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

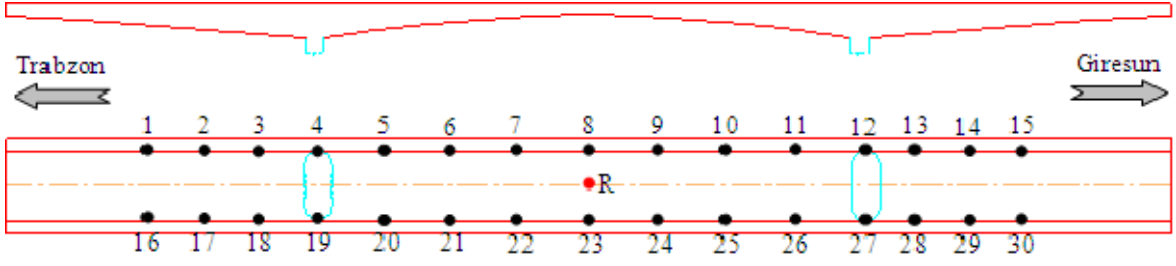
Gülburnu Köprüsü'nün deneysel ölçümlerinde B&K 8340 ve B&K 4507 tipi tek eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. İvmeölçerlerin minimum frekans aralığı ve hassasiyeti B&K 8340 tipi için 0.1-1500 Hz ve 10 V/g, B&K 4507 için ise 0.4-6000 Hz ve 1 V/g'dir. İvmeölçerlerden elde edilen sinyaller B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesinde

birleştirilmiş ve PULSE (2006) yazılımına aktarılmıştır. Bu sinyaller OMA (2006) yazılımına transfer edilerek işlenmiş ve Gülburnu Köprüsü'nün doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilmiştir.

Gülburnu Köprüsü'nün dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemek için köprüde 10-12 Mayıs 2009 tarihleri arasında incelemeler yapılmış ve üç gün boyunca köprüye beş farklı çevresel titreşim testi uygulanmıştır. Deneysel ölçümler sırasında Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılmış, çevresel etkiler olarak köprü üzerinden devam eden trafik etkisi ve rüzgâr dikkate alınmıştır. Deneysel ölçümlerin köprü'nün hangi noktalarından alınacağı dinamik karakteristiklerin (frekans, mod şekli, sönüm oranı) doğru olarak belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle köprü'nün muhtemel hareket noktaları analitik olarak belirlenmiş ve karşılaştırmaların daha iyi yapılabilmesi için beş farklı ölçüm testi kurulmuştur. Bu ölçüm testleri:

- Birinci Ölçüm Testi: Gülburnu Köprüsü'nün taşıyıcı sistemi incelendiğinde köprü Giresun ve Trabzon tarafı olmak üzere iki eşit ve her bakımdan simetrik parçaya ayrılabilir. Bu nedenle, bu iki parçanın kendi arasında karşılaştırılması gerekliliği orta çıkmıştır. İlk ölçüm, kutu kesiti içerisinden ve Giresun tarafındaki parçadan karşılıklı noktalar halinde alınmıştır.
- İkinci Ölçüm Testi: İkinci ölçüm testi, birinci ölçümün tam simetrisi olacak şekilde köprü kutu kesiti içerisinden ve Trabzon tarafındaki parçadan karşılıklı noktalar halinde alınmıştır. Bu ölçüm ile birlikte Giresun ve Trabzon taraflarında kalan simetrik parçaların dinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması sağlanabilecektir.
- Üçüncü Ölçüm Testi: Bu ölçümde, orta ayaklar arasında kalan ana açıklık kutu kesiti içerisinden düşey ve enine doğrultuda yerleştirilen ivmeölçerlerle ölçülmüştür.
- Dördüncü Ölçüm Testi: Bu ölçümde, üçüncü ölçüme ilave olarak boyuna doğrultuda yerleştirilen ivmeölçerler yardımıyla orta ayaklar arasında kalan ana açıklığın kutu kesiti içerisinden üç doğrultudaki hareketleri ölçülmüştür.
- Beşinci Ölçüm Testi: Beşinci ölçümde, kutu kesiti içerisinden köprü'nün boydan boya karşılıklı olarak ölçülmesi gerçekleştirilmiştir.

Köprü'nün iki boyutlu görünüşleri üzerinde ivmeölçerlerin yerleşim planı Şekil 2.85'te, ölçümlere ait detaylı bilgiler ise Tablo 2.33'te verilmektedir. Gülburnu Köprüsü'nde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar Şekil 2.86'da verilmektedir.



Şekil 2.85. Gülburnu Köprüsü'nün çevresel titreşim testlerinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı

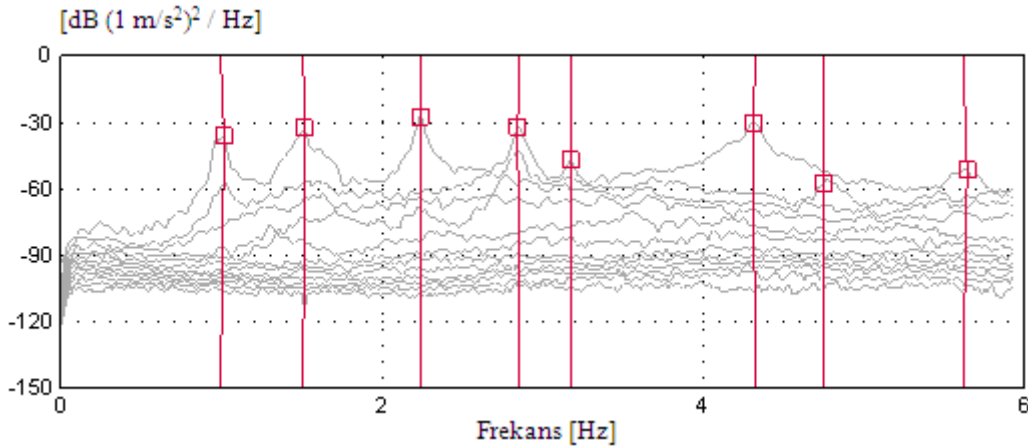
Tablo 2.33. Gülburnu Köprüsü'nün deneysel ölçüm testlerine ait genel bilgileri

Ölçüm Testi	İvmeölçer			Frekans Aralığı	Toplam Süre	Adım
	Nokta	Düsey	Doğrultu Enine Boyuna			
1	1, 4, 6, 8	✓	✓	0-12.5Hz	30 dak	1
	16, 19, 21, 23	✓	✓			
2	8, 10, 12, 15	✓	✓	0-12.5Hz	15 dak	1
	23, 25, 27, 30	✓	✓			
3	5-11	✓	✓	0-12.5Hz	30 dak	2
	20-26	✓	✓			
4	8, 23	✓	✓	0-12.5Hz	15 dak	1
	6, 10, 21, 25	✓	✓			
5	1-15	✓	✓	0-12.5Hz	30 dak	2
	16-30	✓	✓			



Şekil 2.86. Gülburnu Köprüsü'nde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar

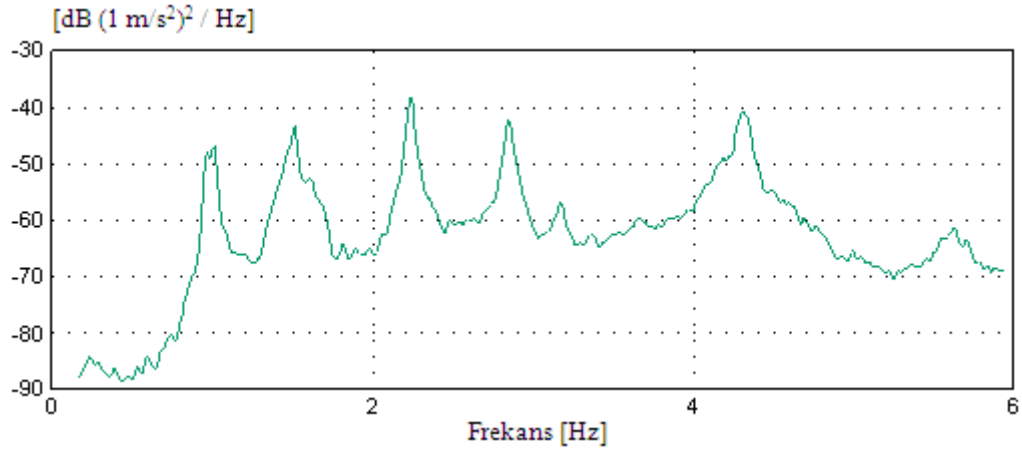
Gülburnu Köprüsü'ne uygulanan beş farklı çevresel titreşim testinden toplanan sinyallerin GFTAA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri ve bu matrislerinin ortalamaları, SAB yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen kararlılık diyagramları sırasıyla Şekil 2.87-2.91'de verilmektedir. Şekil 2.87-2.91 incelendiğinde, her bir çevresel titreşim testinden elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ve kararlılık diyagramlarının birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Buradan, Bölüm 1.6.2'deki anlatıma uygun olarak; farklı noktalarda alınan ölçümlerden elde edilen davranışların bütün yapıyı temsil ettiği anlaşılmaktadır. Deneysel ölçümler sonucu elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları Tablo 2.34-2.38'de verilmektedir. Tablo 2.34-2.38 incelendiğinde, frekans değerlerinin birbirine yakın değerlerde olduğu ve ilk sekiz frekansın 0.984-5.668 Hz arasında elde edildiği görülmektedir. Sönüm oranı değerleri arasında tam bir uyum yakalanamamış olup, bu değerler %0.178-4.662 arasında değişkenlik göstermektedir.



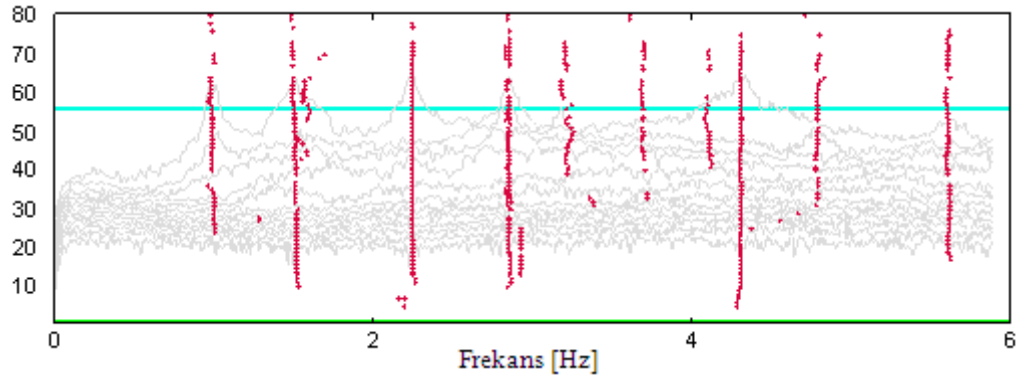
a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

Şekil 2.87. Gülburnu Köprüsü'nün birinci ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı

Şekil 2.87'nin devamı



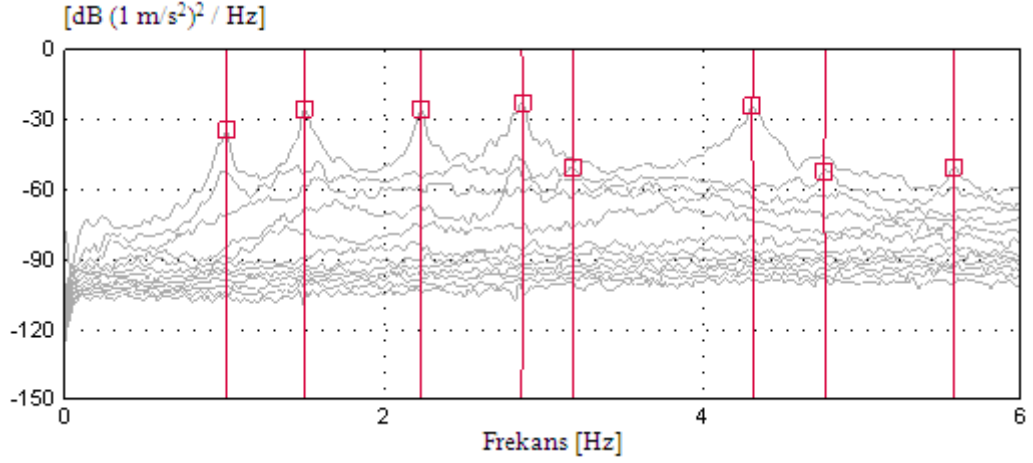
b) Spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması



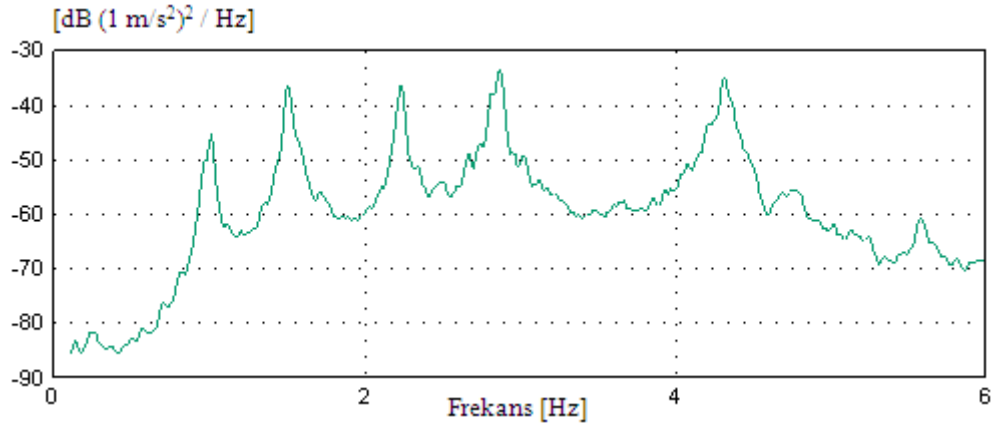
c) Kararlılık diyagramı

Tablo 2.34. Gülburnu Köprüsü'nün birinci ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

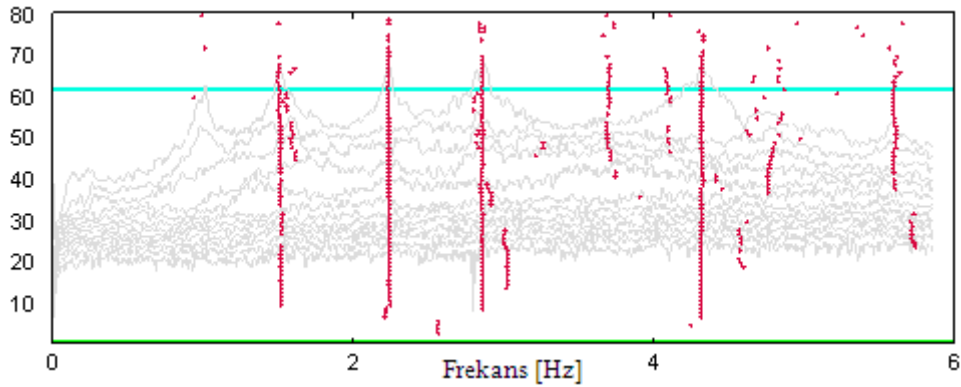
Frekans No	GFTAA Yöntemi		Ortalama Spektral Yoğunluk	SAB Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)		Frekans (Hz)	Sönüm (%)
1	0.994	2.529	1.000	0.984	2.195
2	1.507	1.615	1.520	1.500	1.109
3	2.238	0.661	2.230	2.240	0.519
4	2.848	0.678	2.840	2.847	1.298
5	3.173	0.758	3.170	3.209	1.855
6	4.320	0.745	4.310	4.304	0.829
7	4.747	0.178	4.770	4.788	1.019
8	5.615	1.017	5.640	5.602	0.419



a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri



b) Spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

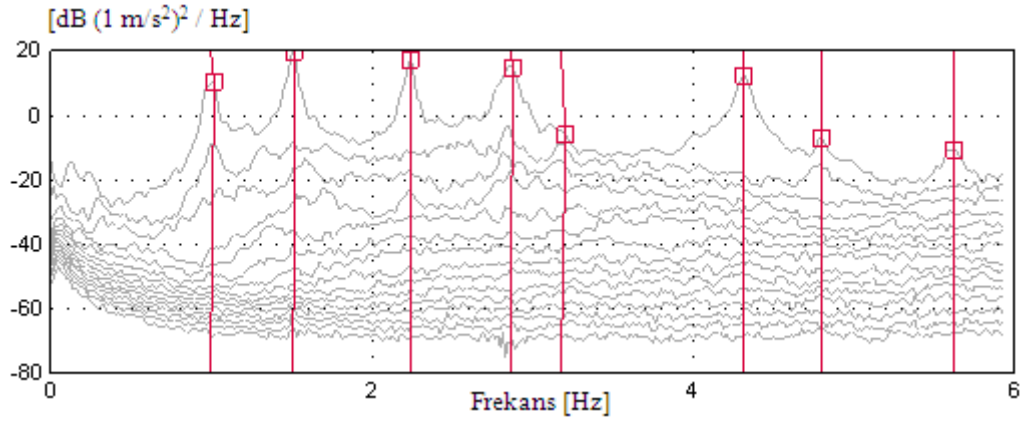


c) Kararlılık diyagramı

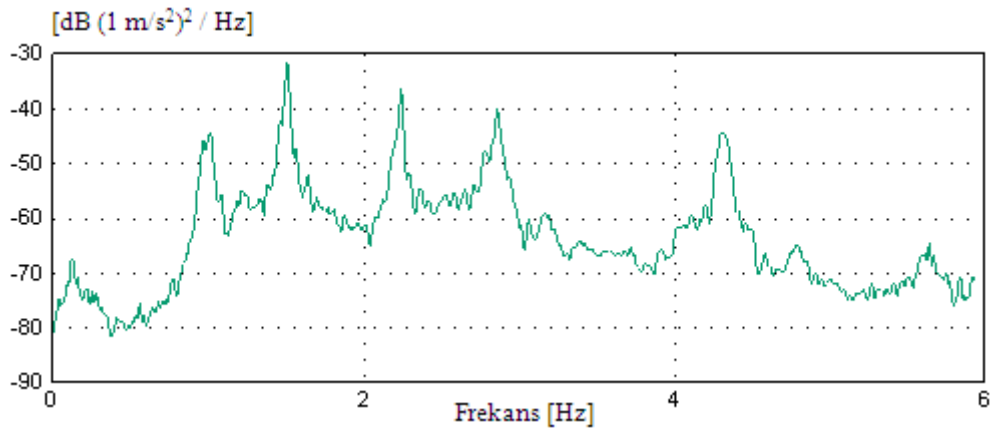
Şekil 2.88. Gölburnu Köprüsü'nün ikinci ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı

Tablo 2.35. Gülburnu Köprüsü'nün ikinci ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

Frekans No	GFTAA Yöntemi		Ortalama Spektral Yoğunluk	SAB Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)		Frekans (Hz)	Sönüm (%)
1	1.013	1.871	1.000	0.991	4.662
2	1.505	1.016	1.510	1.513	0.683
3	2.235	0.701	2.230	2.234	0.612
4	2.868	0.814	2.870	2.851	0.487
5	3.188	0.758	3.130	3.188	0.758
6	4.325	0.735	4.320	4.308	0.820
7	4.774	0.183	4.760	4.835	0.976
8	5.585	0.535	5.590	5.592	1.063



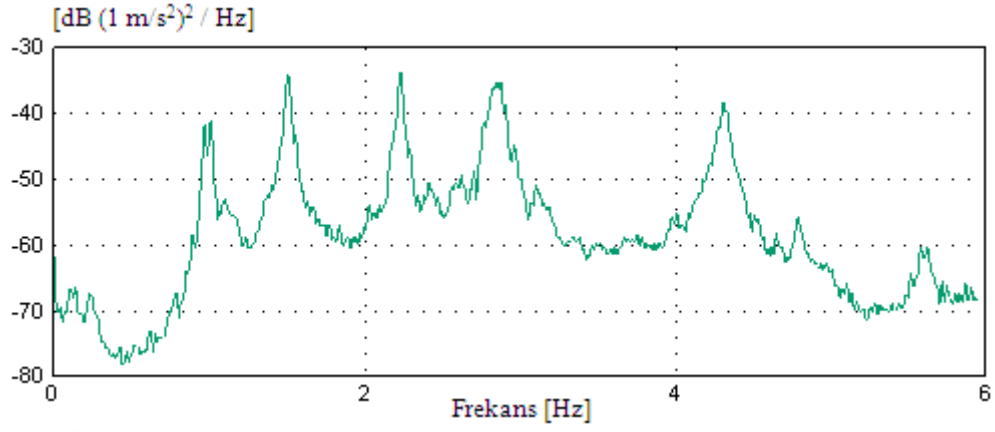
a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri



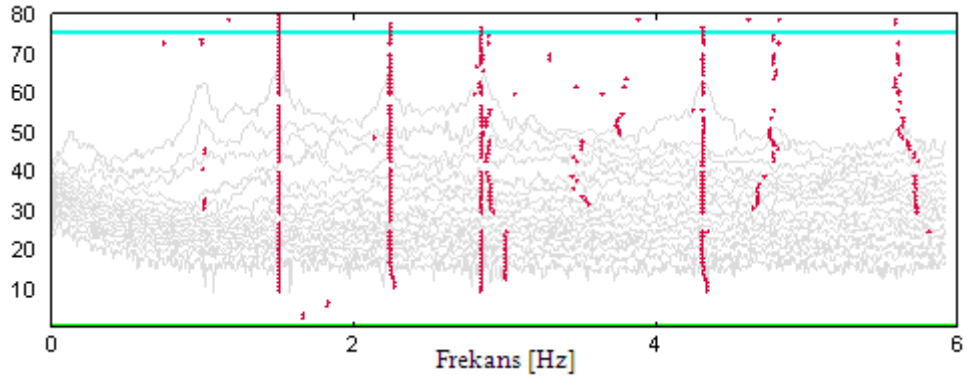
b) Birinci adımdan elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

Şekil 2.89. Gülburnu Köprüsü'nün üçüncü ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı

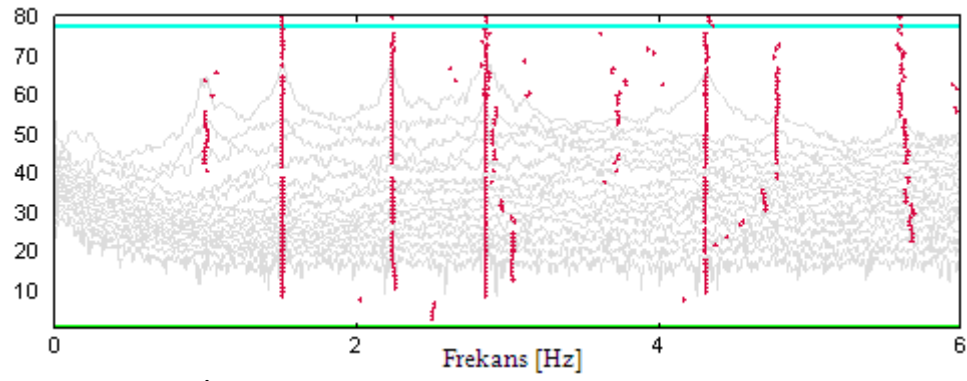
Şekil 2.89'un devamı



c) İkinci adımdan elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması



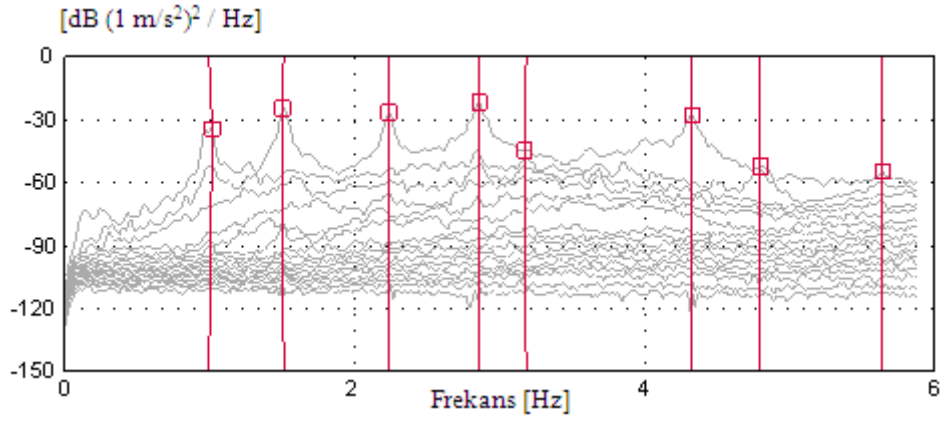
d) Birinci adımdan elde edilen kararlılık diyagramı



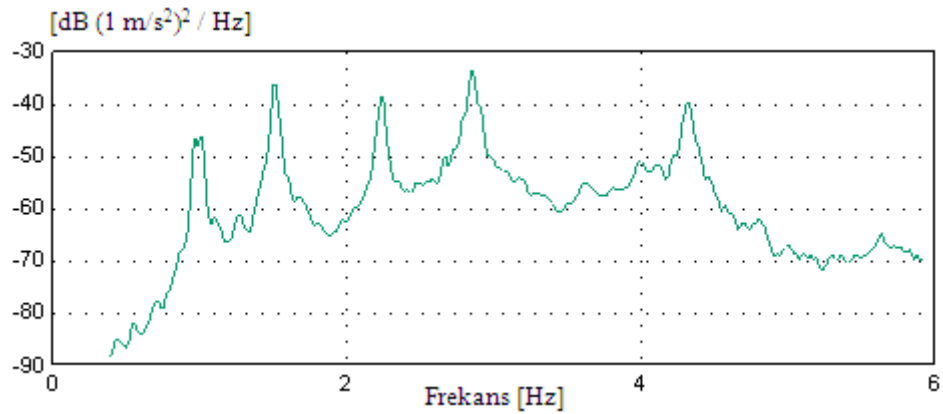
e) İkinci adımdan elde edilen kararlılık diyagramı

Tablo 2.36. Gülburnu Köprüsü'nün üçüncü ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

Frekans No	GFTAA Yöntemi		Ortalama Spektral Yoğunluk	SAB Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)		Frekans (Hz)	Sönüm (%)
1	0.994	2.556	1.010	0.997	3.952
2	1.508	0.962	1.510	1.505	0.304
3	2.238	0.636	2.230	2.238	0.548
4	2.860	1.040	2.850	2.850	0.739
5	3.175	0.758	3.100	3.188	0.758
6	4.314	0.647	4.300	4.335	0.407
7	4.793	0.448	4.790	4.848	0.976
8	5.618	0.687	5.630	5.626	1.136



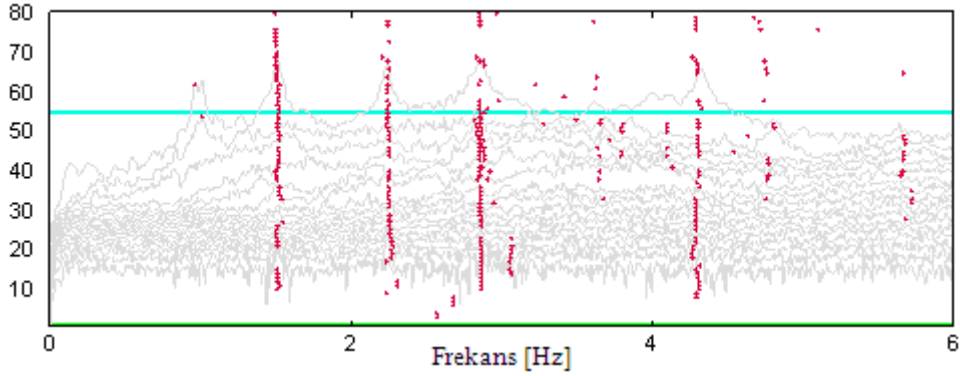
a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri



b) Spektral yoğunluk matrislerinin ortalaması

Şekil 2.90. Gülburnu Köprüsü'nün dördüncü ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı

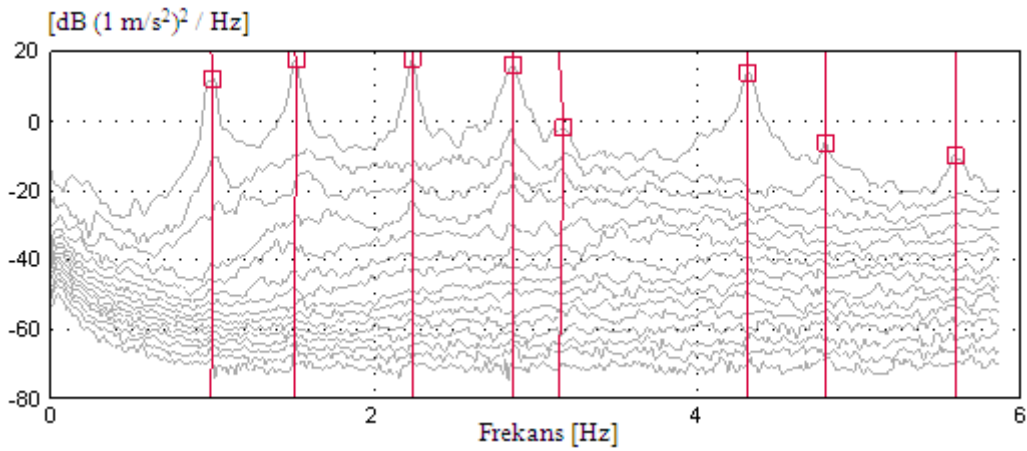
2.90'ın devamı



c) Kararlılık diyagramı

Tablo 2.37. Gülburnu Köprüsü'nün dördüncü ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

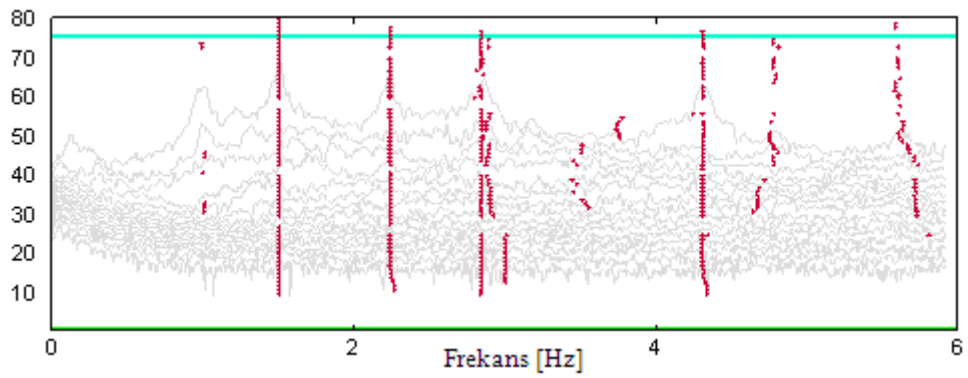
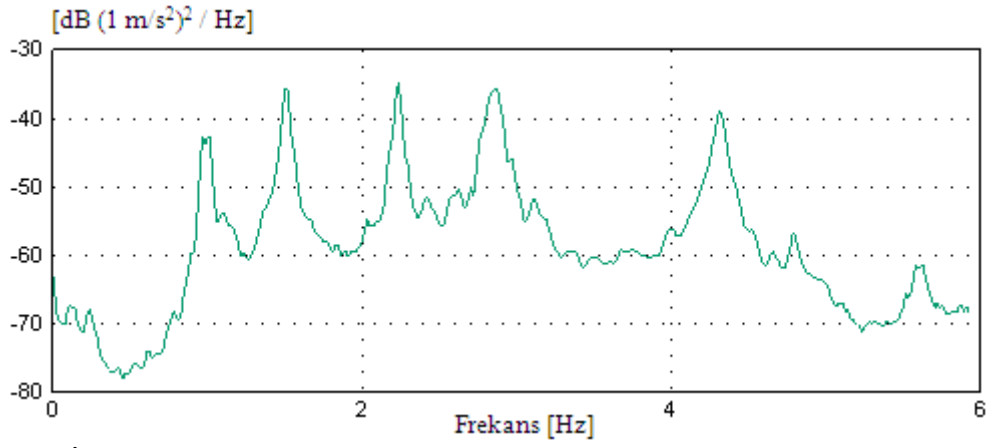
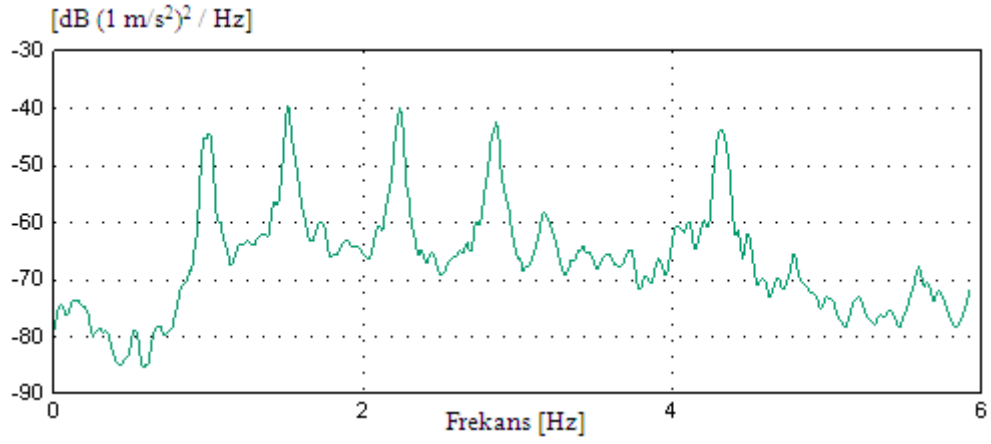
Frekans No	GFTAA Yöntemi		Ortalama Spektral Yoğunluk	SAB Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)		Frekans (Hz)	Sönüm (%)
1	0.993	2.661	1.000	0.995	3.952
2	1.508	0.958	1.520	1.505	0.559
3	2.238	0.741	2.230	2.241	0.604
4	2.853	0.765	2.860	2.874	2.145
5	3.181	0.371	3.170	3.258	0.758
6	4.321	0.558	4.330	4.298	0.962
7	4.797	0.448	4.800	4.761	1.547
8	5.637	0.560	5.640	5.668	2.743



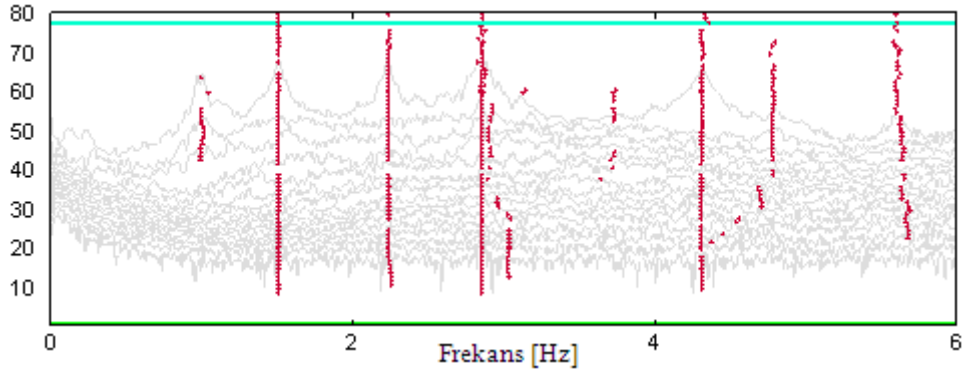
a) Spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

Şekil 2.91. Gülburnu Köprüsü'nün beşinci ölçümünden elde edilen spektral yoğunluk matrisleri ve kararlılık diyagramı

Şekil 2.91'in devamı



Şekil 2.91'in devamı

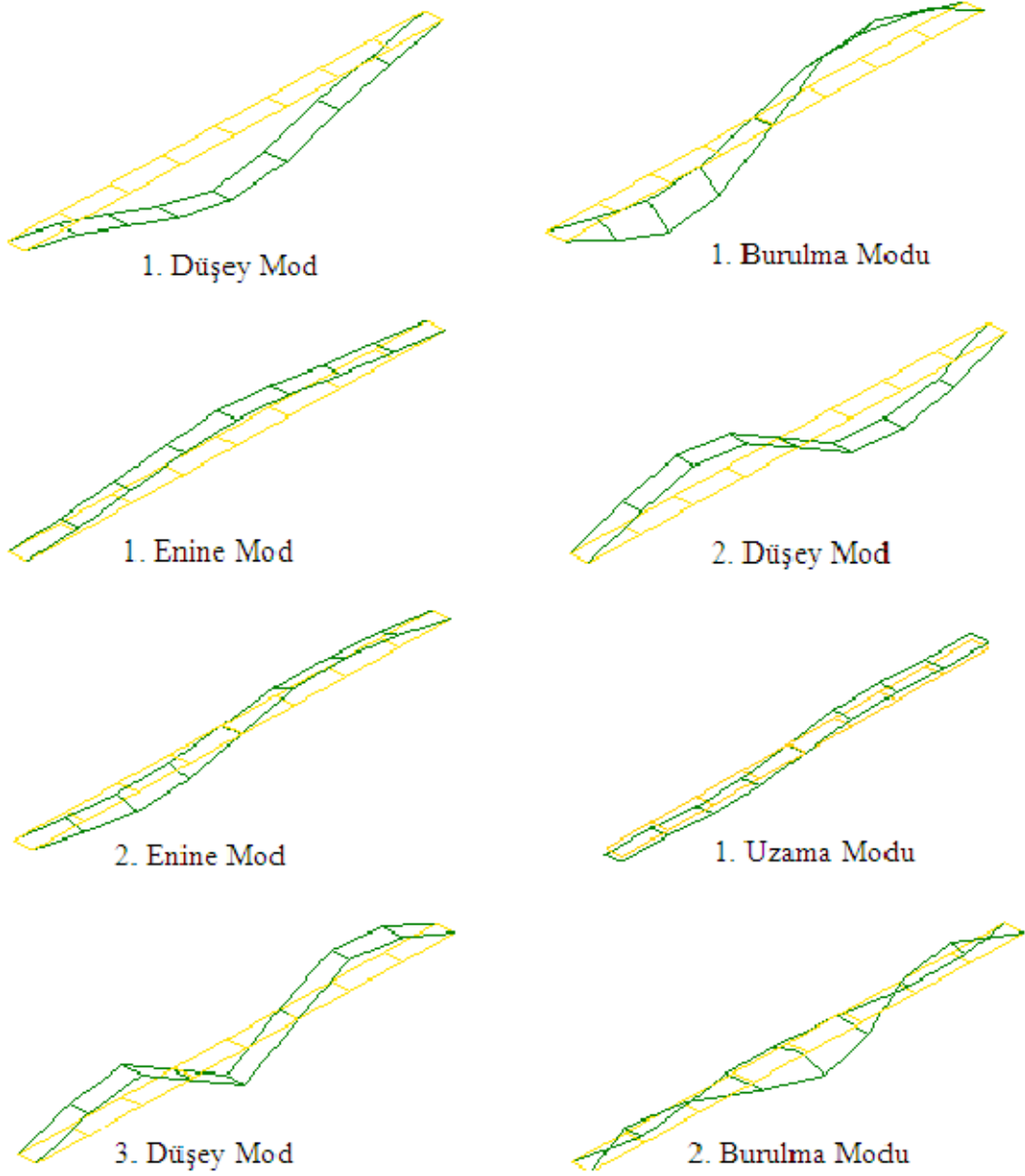


e) İkinci adımdan elde edilen kararlılık diyagramı

Tablo 2.38. Gülburnu Köprüsü'nün beşinci ölçümünden elde edilen doğal frekanslar ve sönüm oranları

Frekans No	GFTAA Yöntemi		Ortalama Spektral Yoğunluk	SAB Yöntemi	
	Frekans (Hz)	Sönüm (%)		Frekans (Hz)	Sönüm (%)
1	0.991	2.377	1.000	0.992	2.512
2	1.508	1.018	1.520	1.507	0.342
3	2.235	0.693	2.230	2.226	0.624
4	2.854	1.004	2.860	2.832	0.657
5	3.142	0.644	3.170	3.175	0.556
6	4.315	0.621	4.310	4.325	0.424
7	4.790	0.453	4.780	4.832	0.857
8	5.599	0.634	5.590	5.612	1.026

Gülburnu Köprüsü'ne uygulanan deneysel ölçüm testlerinden GFTAA ve SAB yöntemlerine göre elde edilen mod şekilleri birbirleriyle uyum içerisinde. Bu nedenle sadece bir ölçüme ait mod şekilleri Şekil 2.92'de verilmektedir. Şekil 2.92 incelendiğinde, birinci, dördüncü ve yedinci modların düşey; ikinci ve sekizinci modların burulma; üçüncü ve beşinci modların enine; altıncı modun ise uzama modu olduğu görülmektedir.



Şekil 2.92. Gülburnu Köprüsü'nün ÇTY'den elde edilen mod şekilleri

2.3.2.4. Gülburnu Köprüsü'nün Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi

Şekil 2.84 ve 2.92 karşılaştırmalı olarak incelendiğinde analitik ve deneysel mod şekillerinin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Tablo 2.32'de elde edilen analitik frekanslar ile Tablo 2.34-2.38'de elde edilen deneysel frekanslar karşılaştırmalı olarak incelendiğinde ise analitik ve deneysel olarak elde edilen doğal frekanslar arasında bazı farklılıkların olduğu, analitik frekansların deneysellerden biraz daha büyük olduğu görülmektedir. Doğal frekanslar arasındaki bu farklılıkları giderebilmek veya minimum düzeye getirebilmek için Gülburnu Köprüsü'nün sonlu eleman modelinin deneysel ölçüm

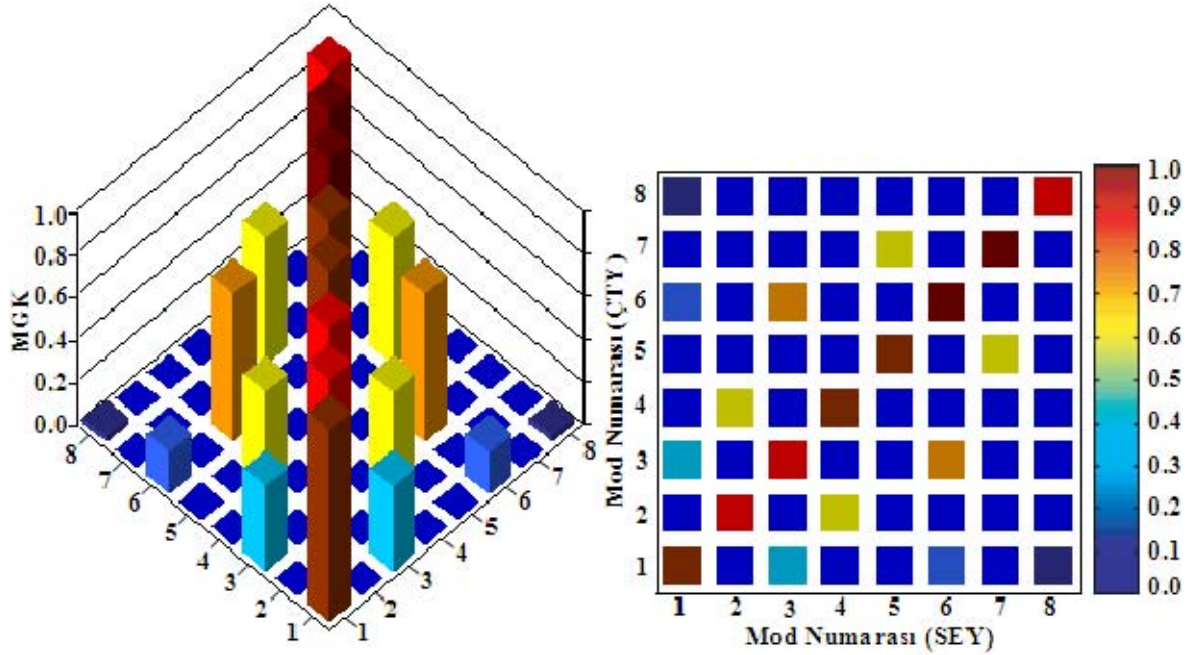
sonuçlarına göre iyileştirilmesi gerekmektedir. Sonlu eleman model iyileştirmesi, analizlerde kullanılan malzeme özellikleri, sınır şartları veya eleman kesit özellikleri gibi doğruluğu tam olarak belirlenemeyen parametreler kullanılarak yapılmaktadır. Sonlu eleman model iyileştirmesinde bilinmesi gereken 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. Bu çalışmada, Gülburnu Köprüsü'nün sonlu eleman modelinde kabul edilen sınır şartları ve eleman kesit özellikleri köprünün proje verilerine uygun olarak seçilmiştir (Yüksel Proje, 2007). Dolayısıyla iyileştirme parametresi olarak malzeme özellikleri kullanılmıştır. Malzeme özelliklerinde ise değişken parametre olarak en belirsiz özellik olan elastisite modülü seçilmiştir. Köprü taşıyıcı sistem elemanlarından tabliye, ayaklar, kazıklar ve temelin elastisite modülleri yaklaşık %6 azaltılarak Gülburnu Köprüsü'nün sonlu eleman modeli iyileştirilmiş, bu şekilde köprünün mevcut durumunu yansıtan gerçek sonlu eleman modeli elde edilmiştir. Gülburnu Köprüsü'nün sonlu eleman model iyileştirmesinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2.39'da verilmektedir. Gülburnu Köprüsü'nün iyileştirmeden önceki ve sonraki analitik ve deneysel frekansları Tablo 2.40'ta karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Tablo 2.40 incelendiğinde, frekanslar arasındaki maksimum farkın %9'dan %2'ye düştüğü görülmektedir. Ayrıca, model iyileştirmesinden sonra elde edilen mod şekilleri analitik mod şekilleri ile uyum içerisindedir. İyileştirilmiş analitik ve deneysel mod şekilleri arasındaki uyumu görebilmek için oluşturulan Modal Güvence Kriteri grafiği Şekil 2.93'te verilmektedir. Şekil 2.93'ten anlaşıldığı üzere, analitik ve deneysel mod şekilleri arasında çok iyi bir uyum bulunmaktadır.

Tablo 2.39. Gülburnu Köprüsü'nün sonlu eleman model iyileştirilmesinde dikkate alınan malzeme özellikleri

Eleman	Sınıf	Elastisite Modülü (N/m ²)	
		İyileştirmeden Önce	İyileştirmeden Sonra
Tabliye	C40	3.6E10	3.4E10
Ayaklar	C35	3.5E10	3.3E10
Kazıklar	C30	3.4E10	3.2E10
Temel	C30	3.4E10	3.2E10

Tablo 2.40. Gülburnu Köprüsü'nün sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra elde edilen doğal frekansları

Frekans No	Analitik Frekanslar (Hz)		Deneysel Frekanslar (Hz)				
	İyileştirmeden Önce	İyileştirmeden Sonra	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5
1	1.086	0.994	0.994	1.013	0.994	0.993	0.991
2	1.642	1.510	1.507	1.505	1.508	1.508	1.508
3	2.355	2.285	2.238	2.235	2.238	2.238	2.235
4	3.102	2.910	2.848	2.868	2.860	2.853	2.854
5	3.318	3.215	3.173	3.188	3.175	3.181	3.142
6	4.524	4.398	4.320	4.325	4.314	4.321	4.315
7	5.012	4.834	4.747	4.774	4.793	4.797	4.790
8	5.960	5.665	5.615	5.585	5.618	5.637	5.599

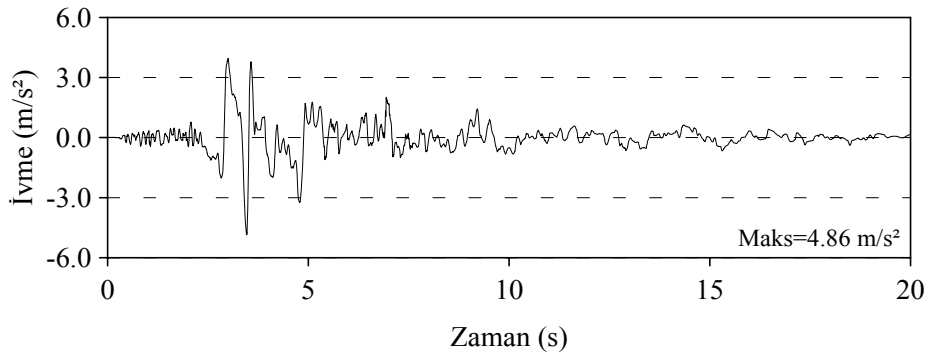


Şekil 2.93. Gülburnu Köprüsü'nün analitik ve deneysel modlarına ait MGK grafiği

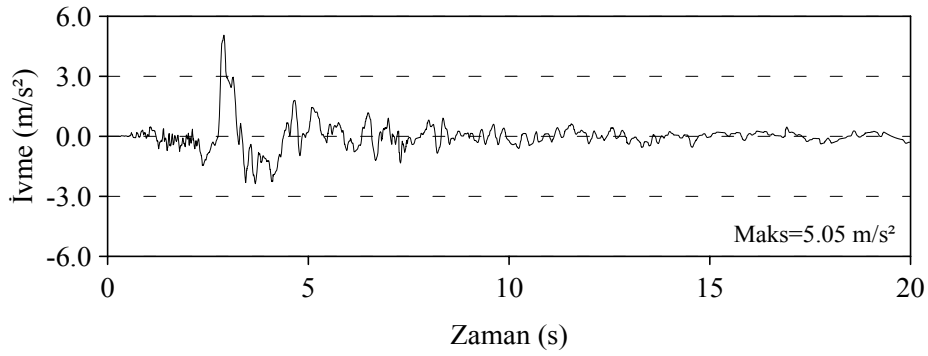
2.3.2.5. Gülburnu Köprüsü'nün Deprem Davranışının Belirlenmesi

Gülburnu Köprüsü'nün deprem davranışını belirlemek için zaman tanım alanında lineer analizler gerçekleştirilmiştir. Deprem analizleri, sonlu eleman model iyileştirmesinin etkisini görmek için hem iyileştirmeden önceki hem de iyileştirilmiş sonlu eleman modelleri için yapılmıştır. Deprem analizlerinde yer hareketi olarak 1992 yılında meydana gelen Erzincan depremi ivme kayıtları kullanılmıştır (PEER, 2009). Bu yer hareketi,

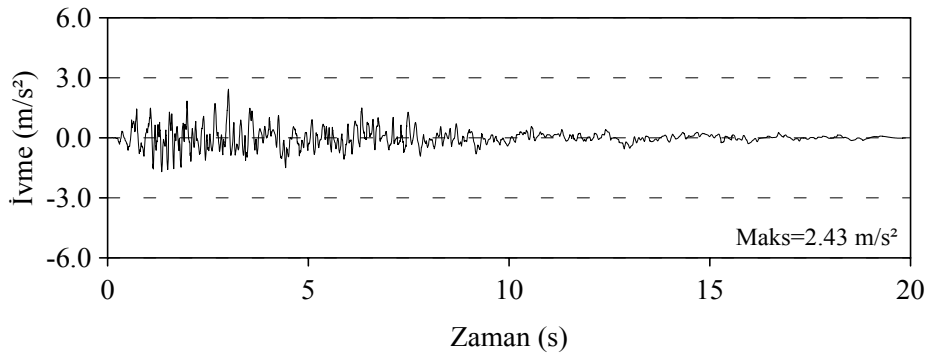
köprüye yakın bir bölgede meydana geldiği için tercih edilmiştir. Erzincan depreminin doğu-batı, kuzey-güney ve düşey bileşenleri köprünün boyuna, enine ve düşey doğrultularına aynı anda uygulanmıştır. Erzincan depreminin ivme kayıt bileşenleri Şekil 2.94'te verilmektedir. Köprünün zaman tanım alanında lineer analizlerinde, eleman matrisleri Gauss sayısal integrasyon tekniği kullanılarak hesaplanmıştır. Dinamik hareket denkleminin çözümünde ise Newmark Yöntemi kullanılmıştır. İyileştirmeden önceki dinamik analizlerde %5 sönüm oranı dikkate alınmıştır. İyileştirmeden sonra ise deneysel ölçümler sonucunda her bir mod için elde edilen sönüm oranları dikkate alınmıştır.



a) Doğu-batı bileşeni



b) Kuzey-güney bileşeni

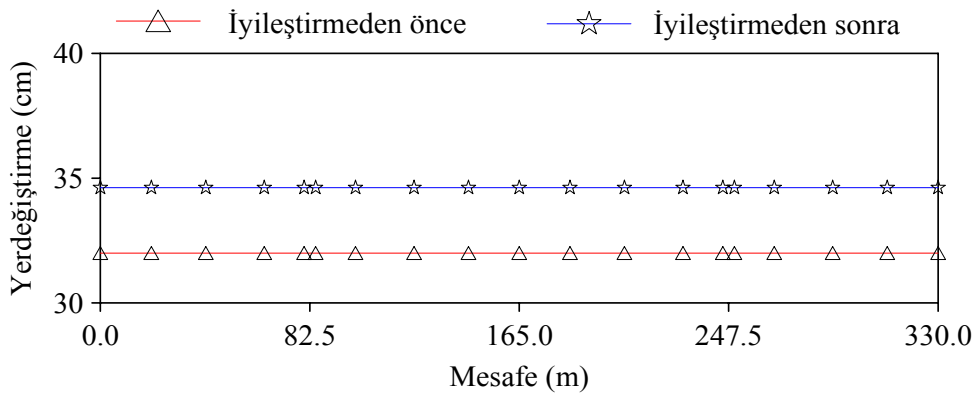


c) Düşey bileşen

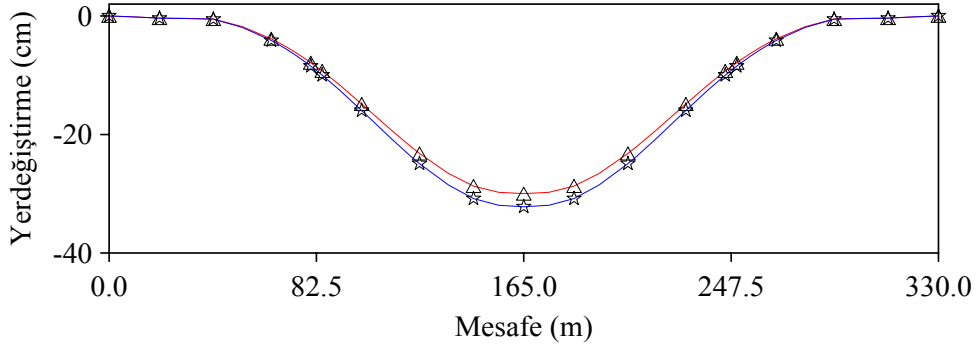
Şekil 2.94. 1992 Erzincan depreminin ivme kaydı bileşenleri

2.3.2.5.1. Tabliye Davranışı

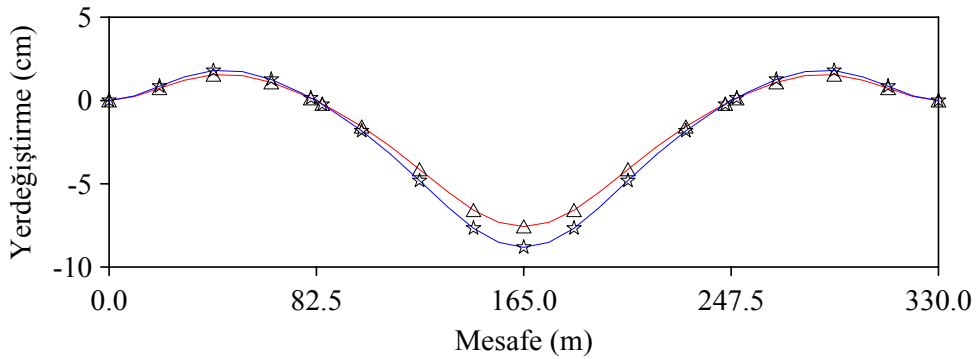
Gülburnu Köprüsü'nün analizleri sonucunda elde edilen boyuna, enine ve düşey yerdeğıştirmelerin tabliye boyunca değişimi Şekil 2.95'te verilmektedir. Şekil 2.95'te görüldüğü gibi sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra elde edilen yerdeğıştirme değerleri daha büyüktür. Her iki analiz durumu içinde boyuna doğrultuda elde edilen yerdeğıştirmeler tabliye boyunca sabit kalırken, enine ve düşey doğrultuda elde edilen yerdeğıştirmeler köprü açıklık ortasına doğru artmaktadır.



a) Boyuna yerdeğıştirmeler



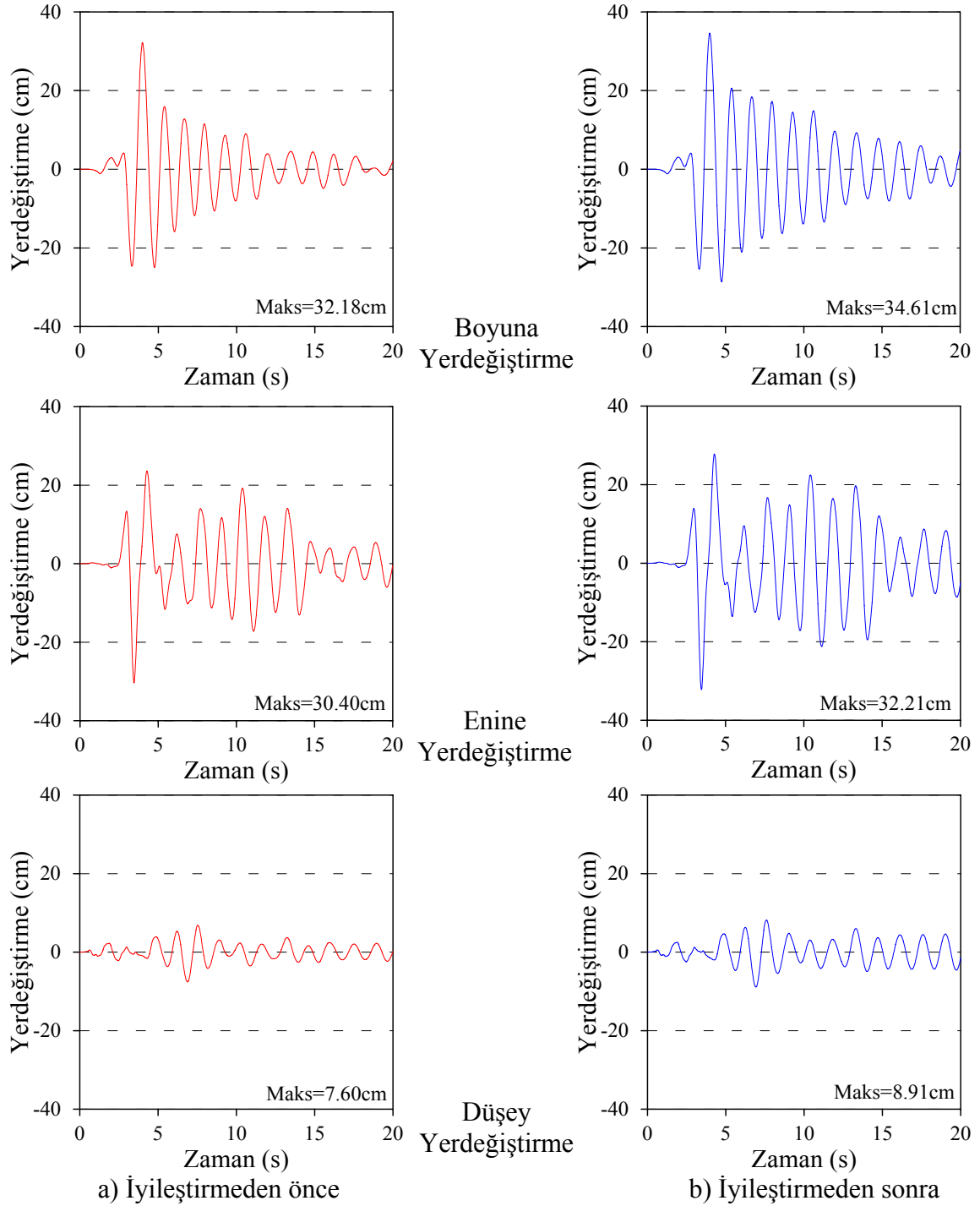
b) Enine yerdeğıştirmeler



c) Düşey yerdeğıştirmeler

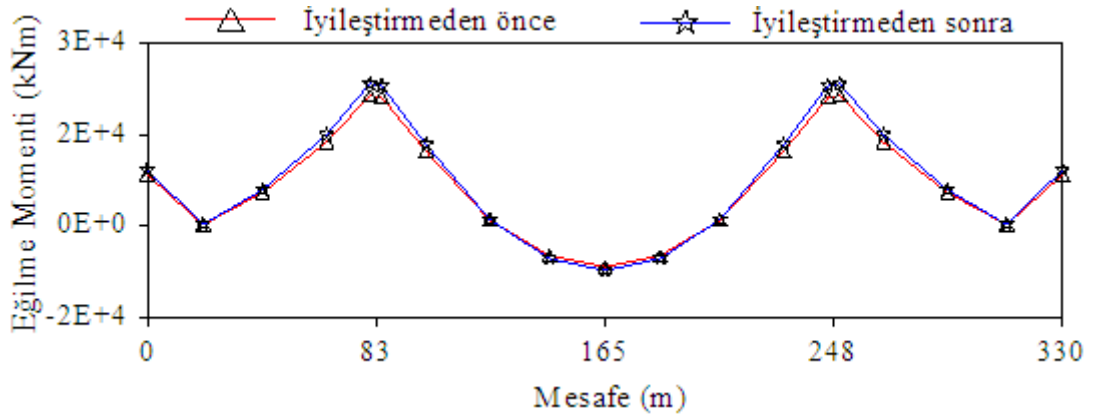
Şekil 2.95. Gülburnu Köprüsü'nde tabliye boyunca elde edilen yerdeğıştirmeler

Maksimum boyuna yerdeğiştirme değeri model iyileştirmeden sonra 32 cm'den 34.6 cm'ye, maksimum enine yerdeğiştirme değeri 29.8 cm'den 32.2 cm'ye ve maksimum düşey yerdeğiştirme değeri ise 7.6 cm'den 8.8 cm'ye çıkmaktadır. Maksimum yerdeğiştirmelerin zamana bağlı olarak değişimleri Şekil 2.96'da verilmektedir.

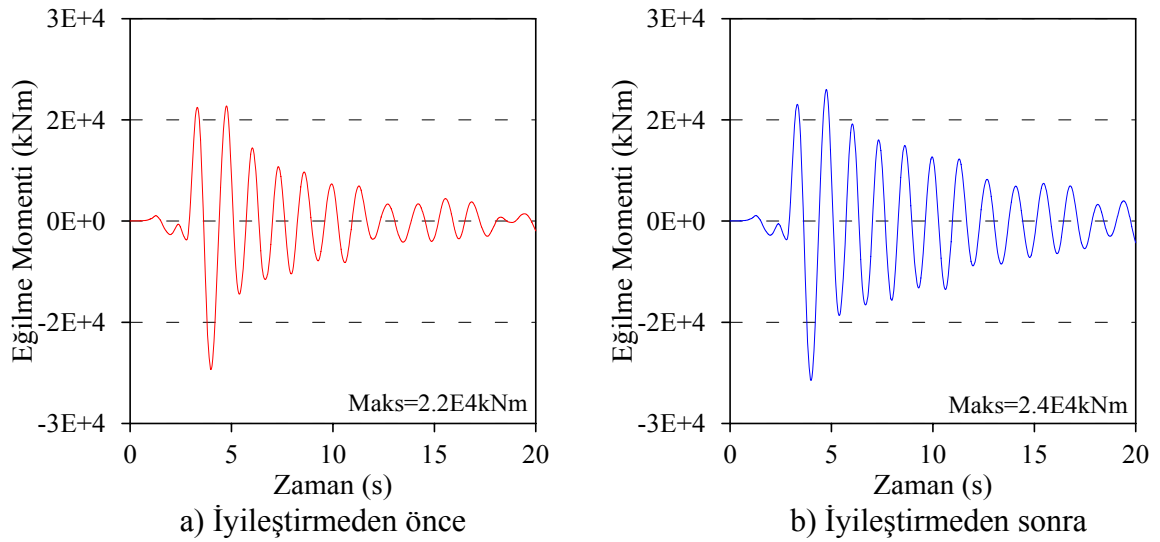


Şekil 2.96. Tabliye boyunca elde edilen maksimum yerdeğiştirmelerin zamana bağlı değişimi

Gülburnu Köprüsü'nün analizleri sonucunda elde edilen maksimum eğilme momentinin tabliye boyunca değişimi Şekil 2.97'de verilmektedir. Şekil 2.97'de görüldüğü gibi sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra elde edilen eğilme momentleri daha büyüktür. Maksimum eğilme momenti değeri model iyileştirmeden sonra $2.2E4$ kNm'den $2.4E4$ kNm'ye çıkmaktadır. Elde edilen maksimum eğilme momentinin zamana bağlı olarak değişimi Şekil 2.98'de verilmektedir.



Şekil 2.97. Gülburnu Köprüsü'nde tabliye boyunca elde edilen eğilme momentleri



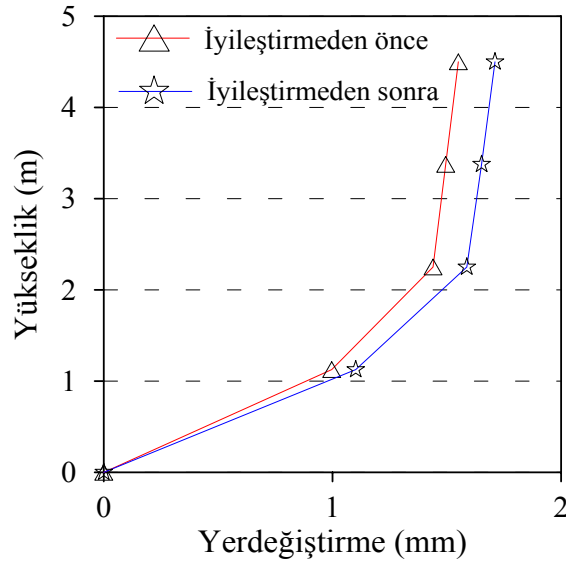
Şekil 2.98. Tabliye boyunca elde edilen maksimum eğilme momentinin zamana bağlı değişimi

2.3.2.5.2. Ayak Davranışı

Gülburnu Köprüsü'nün sonlu eleman model iyileştirmesinden önceki ve sonraki analizleri için köprü ayaklarında elde edilen maksimum yerdeğıştirmeler Tablo 2.41'de verilmektedir. Tablo 2.41'de görüldüğü gibi kullanılan deprem izolatörlerinden dolayı ayaklarda çok küçük yerdeğıştirmeler elde edilmiştir. Ayaklarda maksimum yerdeğıştirme boyuna doğrultuda elde edilmiştir. Bu nedenle, sadece boyuna doğrultuda elde edilen yerdeğıştirmelerin ayak yüksekliği boyunca değışimi ve maksimum yerdeğıştirmenin zamana bağılı değışimi Şekil 2.99'da verilmektedir.

Tablo 2.41. Gülburnu Köprüsü'nün analizleri sonucunda ayaklarda elde edilen maksimum yerdeğıştirmeler

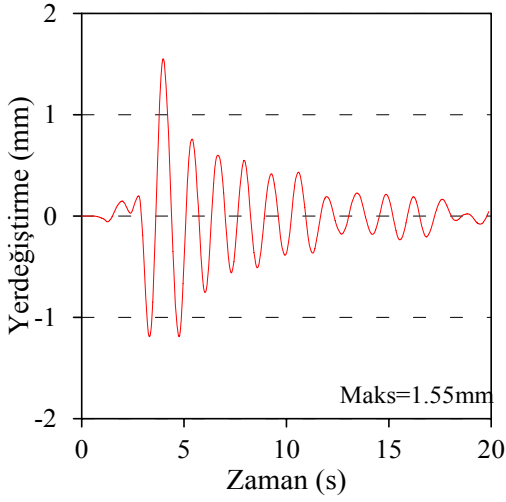
Doğrultu	Yerdeğıştirmeler (mm)	
	İyileştirmeden önce	İyileştirmeden sonra
Boyuna	1.550	1.710
Enine	0.340	0.380
Düşey	0.015	0.017



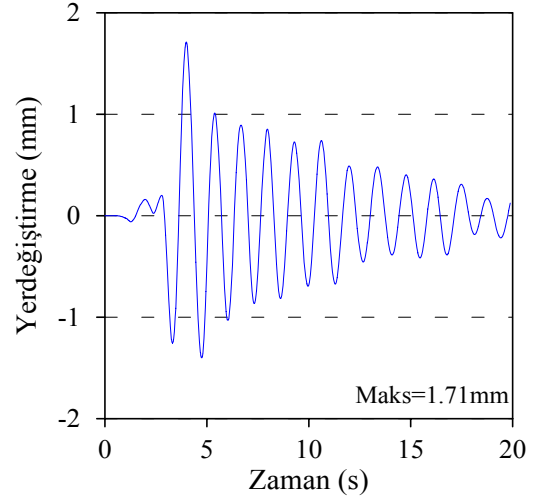
a) Boyuna yerdeğıştirmelerin ayak yüksekliği boyunca değışimi

Şekil 2.99. Ayak yüksekliği boyuca elde edilen boyuna yerdeğıştirmeler ve maksimum yerdeğıştirmelerin zamana bağılı değışimleri

Şekil 2.99'un devamı

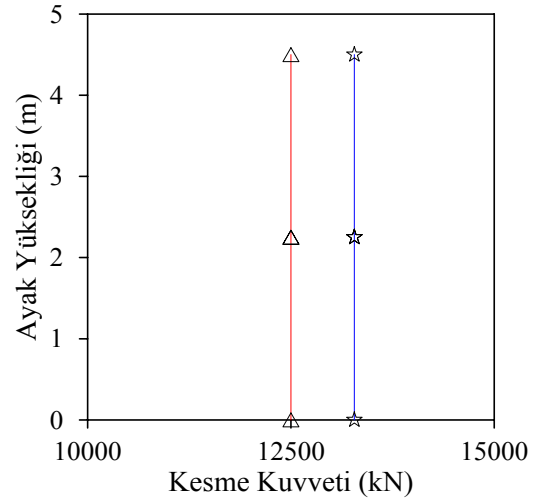
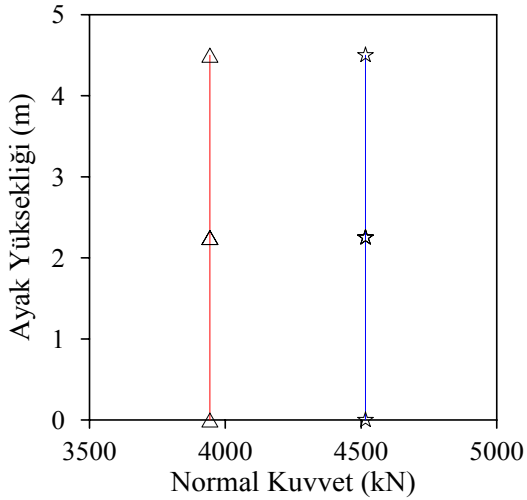


b) İyileştirmeden önce



c) İyileştirmeden sonra

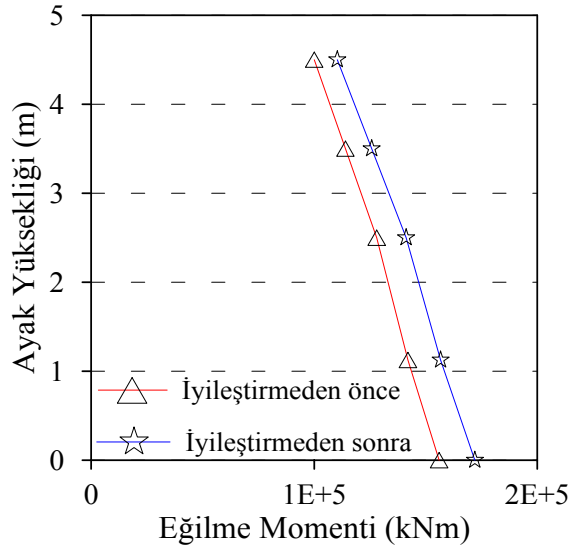
Ayak yüksekliği boyunca elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerleri Şekil 2.100'de verilmektedir. Şekil 2.100 incelendiğinde ayak yüksekliği boyunca normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin sabit kaldığı, sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin arttığı görülmektedir.



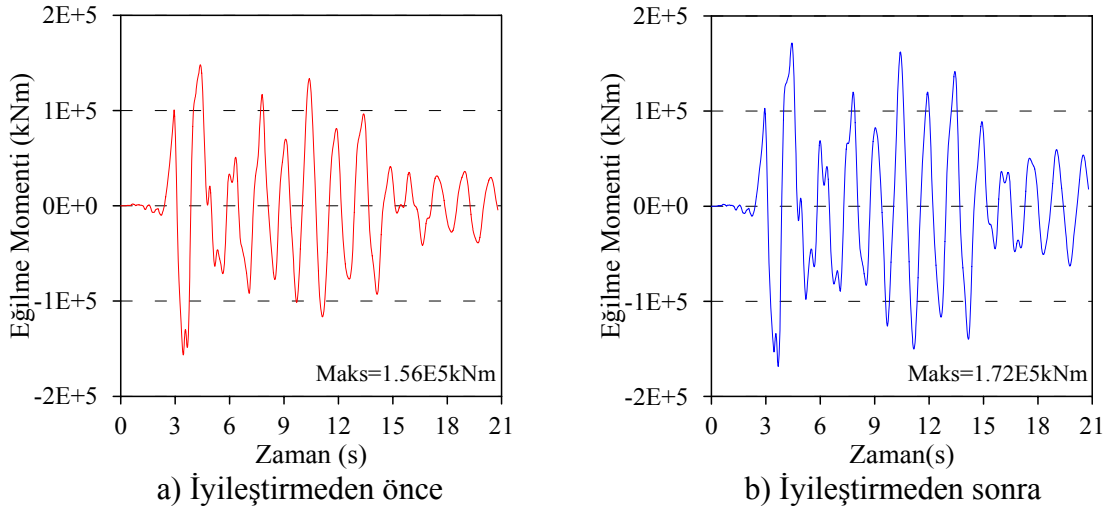
Şekil 2.100. Ayak yüksekliği boyunca elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerleri

Sonlu eleman model iyileştirmesinin öncesi ve sonrasında, ayak yüksekliği boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri Şekil 2.101'de verilmektedir. Şekil 2.101'de ayak

yüksekliği boyunca eğilme momenti değerlerinin azaldığı görülmektedir. Maksimum eğilme momenti değeri model iyileştirmeden sonra $1.56E4$ kNm'den $1.72E4$ kNm'ye çıkmaktadır. Elde edilen maksimum eğilme momentinin zaman bağılı olarak değişimi Şekil 2.102'de verilmektedir.



Şekil 2.101. Ayak yüksekliği boyunca elde edilen eğilme momenti değerleri

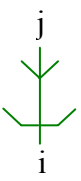


Şekil 2.102. Ayak yüksekliği boyuca elde edilen maksimum eğilme momenti değerlerinin zaman bağılı değişimi

2.3.2.5.3. İzolatör (Sismik Ayırıcı) Davranışı

İzolatör yüksekliği boyunca elde edilen yerdeğiştirme ve kesit tesirlerinin değişimi Tablo 2.42’de verilmektedir. Tablo 2.42’de görüldüğü gibi yerdeğiştirmeler, izolatör boyunca artmakta, eğilme momenti değerleri ise izolatör boyunca azalmaktadır. Normal kuvvet ve kesme kuvveti değerleri ise izolatör yüksekliği boyunca sabit kalmaktadır. Ayrıca, sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra elde edilen yerdeğiştirme ve kesit tesir değerleri daha büyüktür.

Tablo 2.42. İzolatör yüksekliği boyunca elde edilen yerdeğiştirmeler ve kesit tesirleri

İzolatör (Sismik Ayırıcı)			Yerdeğiştirmeler			Kesit Tesirleri		
			Boyuna (mm)	Enine (mm)	Düşey (mm)	Eğilme Momenti (kNm)	Normal Kuvvet (kN)	Kesme Kuvveti (kN)
	İyileş. Önce	j	314	87	1.6	1.4E3	14720	6131
		i	3.20	0.4	1.5	4.4E3	14720	6131
	İyileş. Sonra	j	338	93	1.7	1.5E3	16080	6638
		i	3.50	0.5	1.6	4.8E3	16080	6638

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, karayolu köprülerinin dinamik davranışları analitik ve deneysel yöntemlerle araştırılmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmalar, laboratuvar ve arazi çalışmaları olarak iki kısma ayrılmıştır. Birinci kısımda, arazi çalışmaları sırasında sonlu eleman analizleri ve çevresel titreşim testleri gerçekleştirilecek köprülerin taşıyıcı sistemine benzer üç açıklıklı ve kutu kesitli bir karayolu köprü modeli laboratuvar ortamında inşa edilmiştir. Model köprünün sonlu eleman modeli SAP2000 programında oluşturulmuş, modal analizler sonucunda dinamik karakteristikler analitik olarak belirlenmiştir. Analitik dinamik karakteristiklerle kıyaslamak amacıyla model köprüye çevresel ve zorlanmış titreşim testleri uygulanmış ve dinamik karakteristikler deneysel olarak elde edilmiştir. Tez çalışmasının ikinci kısmında, Ülkemizde bulunan ve dengeli konsol yöntemiyle inşa edilen iki köprü olma özelliğine sahip Kömürhan Köprüsü'nün ve Gülburnu Köprüsü'nün dinamik davranışı araştırılmıştır. Bu amaçla Kömürhan Köprüsü'nün ve Gülburnu Köprüsü'nün üç boyutlu sonlu eleman modelleri proje verileri dikkate alınarak SAP2000 programında oluşturulmuş ve köprülerin dinamik karakteristikleri (doğal frekanslar ve mod şekilleri) analitik olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Kömürhan Köprüsü ve Gülburnu Köprüsü üzerinde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerinden köprülerin dinamik karakteristikleri (doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları) deneysel olarak belirlenmiştir. Analitik ve deneysel olarak belirlenen dinamik karakteristikler birbirleriyle karşılaştırılmış, sonuçlar arasındaki farklılıklar malzeme özellikleri, sınır şartları ve diğer parametreler dikkate alınarak minimum düzeye indirilmiştir. Bu şekilde köprülerin mevcut durumlarını yansıtan sonlu eleman modelleri elde edilmiştir. Kömürhan Köprüsü'nün ve Gülburnu Köprüsü'nün iyileştirmeden önceki ve sonraki sonlu eleman modellerine köprülerin bulunduğu bölgelere yakın bir yerde meydana gelen deprem ivme kaydı uygulanmış, her iki durum için de deprem davranışı karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

✓ Model köprünün analitik modal analizinden elde edilen ilk sekiz doğal frekans 28.33-313.5 Hz arasında elde edilmiştir. Köprüye uygulanan çevresel titreşim testlerinden ise ilk sekiz doğal frekans 25.30-299.5 Hz arasında elde edilmiştir.

✓ Model köprüye 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.

✓ Model köprüye uygulanan zorlanmış ve çevresel titreşim testlerinden elde edilen doğal frekanslar birbirine çok yakın elde edilmiştir. Bu durum her iki yöntemin sonuçlarının birbirine göre doğru olduğunu göstermektedir.

✓ Model köprünün sonlu eleman analizlerinden ve deneysel ölçüm testlerinden (GFTAA ve SAB yöntemleri) elde edilen mod şekilleri birbirleriyle uyum içerisindedir. Mod şekilleri başlıca uzama, düşey ve enine modlardır.

✓ Model köprünün sonlu eleman modelinden elde edilen mod şekilleri ile deneysel mod şekilleri arasında modal güvence kriterine göre %85-100 uyum vardır. Bu durum Model köprü için oluşturulan sonlu eleman modelinin köprünün gerçek davranışını temsil ettiğini göstermektedir.

✓ Model köprüye uygulanan çevresel titreşim testlerinden elde edilen sönüm oranı değerleri arasında tam bir uyum yakalanamamış olup, bu değerler %0.239-5.715 arasında değişkenlik göstermektedir.

✓ Kömürhan Köprüsü'nün analitik modal analizinden elde edilen ilk sekiz doğal frekans 0.790-4.847 Hz arasında elde edilmiştir. Köprüye uygulanan çevresel titreşim testlerinden ise ilk sekiz doğal frekans 0.764-4.400 Hz arasında belirlenmiştir.

✓ Kömürhan Köprüsü'nün sonlu eleman analizlerinden ve deneysel ölçüm testlerinden elde edilen mod şekilleri birbirleriyle uyum içerisindedir. Birinci ve üçüncü modlar enine; ikinci, dördüncü, beşinci ve sekizinci modlar düşey; altıncı ve yedinci modlar ise boyuna doğrultuda uzama modu olarak elde edilmiştir.

✓ Kömürhan Köprüsü'ne uygulanan çevresel titreşim testlerinden elde edilen sönüm oranı değerleri arasında tam bir uyum yakalanamamış olup, bu değerler %0.417-5.412 arasında değişkenlik göstermektedir.

✓ Kömürhan Köprüsü için gerçekleştirilen analitik ve deneysel çalışmalardan elde edilen doğal frekanslar incelendiğinde, frekanslar arasında %10 civarında bir farklılığın bulunduğu görülmüştür. Doğal frekanslar arasındaki bu farkı giderebilmek veya minimum düzeye getirebilmek için Kömürhan Köprüsü'nün sonlu eleman modeli malzeme özellikleri, sınır şartları ve eleman kesit özellikleri gibi belirsiz parametrelerin deneysel ölçüm verileri dikkate alınarak kabul edilebilir sınırlar içerisinde değiştirilmesiyle

iyileştirilmiştir. Sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra frekanslar arasındaki maksimum fark %2 civarına indirilmiştir. Bu şekilde Kömürhan Köprüsü'nün mevcut durumunu yansıtan sonlu eleman modeli elde edilmiştir.

✓ Kömürhan Köprüsü'nün iyileştirilen sonlu eleman modelinden ilk sekiz doğal frekans 0.760-4.480 Hz arasında elde edilmiş, mod şekillerinde ise herhangi bir değişiklik olmamıştır. Birinci ve üçüncü modlar enine; ikinci, dördüncü, beşinci ve sekizinci modlar düşey; altıncı ve yedinci modlar ise uzama modu olarak elde edilmiştir.

✓ Kömürhan Köprüsü'nün iyileştirilen sonlu eleman modelinden elde edilen mod şekilleri ile deneysel mod şekilleri arasında modal güvence kriterine göre %84-91 uyum vardır. Bu durum Kömürhan Köprüsü için oluşturulan sonlu eleman modelinin köprünün gerçek davranışını temsil ettiğini göstermektedir.

Kömürhan Köprüsü'nün deprem davranışını belirlemek için zaman tanım alanında lineer analizler gerçekleştirilmiştir. Deprem analizleri, sonlu eleman model iyileştirmesinin etkisini görmek için hem iyileştirmeden önceki hem de iyileştirilmiş sonlu eleman modelleri için yapılmıştır. İyileştirmeden önceki dinamik analizlerde %5 sönüm oranı dikkate alınmıştır. İyileştirmeden sonra ise deneysel ölçümler sonucunda her bir mod için elde edilen sönüm oranları kullanılmıştır.

✓ Kömürhan Köprüsü'nün iyileştirmeden önceki ve sonraki modelleri üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden, yerdeğiştirmelerin köprü açıklık ortasına doğru arttığı ve sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra elde edilen yerdeğiştirme değerlerinin daha büyük olduğu görülmüştür. Maksimum düşey yerdeğiştirme değeri sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra 12.48 cm'den 16.13 cm'ye çıkmaktadır.

✓ Kömürhan Köprüsü'nün iyileştirmeden önceki ve sonraki modelleri üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden, tabliye boyunca eğilme momenti değerlerinin ayaklar üzerinde maksimum değerini aldığı ve tabliye orta noktasında bulunan genişleme derzinde sıfıra gittiği görülmüştür. Sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra elde edilen eğilme momentleri daha büyüktür. Maksimum eğilme momenti değeri model iyileştirmeden sonra 2.4E5 kNm'den 3.5E4 kNm'ye çıkmaktadır.

✓ Kömürhan Köprüsü'nün iyileştirmeden önceki ve sonraki modelleri üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden, ayaklarda maksimum yerdeğiştirmelerin boyuna doğrultuda ve köprü ayağının yerden 40 m yüksekliğinde elde edildiği görülmüştür. Maksimum yerdeğiştirme değeri model iyileştirmeden sonra 2.27 cm'den 2.48 cm'ye çıkmaktadır.

✓ Kömürhan Köprüsü'nün iyileştirmeden önceki ve sonraki modelleri üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden, ayak yüksekliği boyunca normal kuvvet değerlerinin biraz azaldığı, kesme kuvveti değerlerinin ise tabanda maksimum değerini alıp ayak yüksekliği boyunca değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin arttığı görülmektedir.

Kömürhan Köprüsü'nün yapısal davranışına yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının etkisini belirlemek amacıyla köprünün sonlu eleman modeli proje hesap raporları dikkate alınarak toplam 51 adımda oluşturulmuş, beton malzemesi için elastisite modülündeki değişimler, rötre ve s nme etkileri ile elik malzemesi için çeliğin relaksasyonu dikkate alınmıştır. Yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerin etkisini daha iyi belirlemek amacıyla elde edilen veriler yapım aşamalarının dikkate alınmadığı analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

✓ Kömürhan Köprüsü'nün yapım aşamalı analizleri sonucunda yerdeğiştirmelerin köprü açıklık ortasına doğru arttığı, eğilme momentlerinin ise ayaklar üzerinde maksimum değere ulaşıp köprü açıklık ortasında minimum değere indiği görülmüştür. Ayak yüksekliği boyunca boyuna yerdeğiştirmelerin arttığı, normal kuvvet değerlerinin azaldığı, kesme kuvveti değerlerinin hemen hemen aynı kaldığı, eğilme momenti değerlerinin ise değişiklik gösterip ayak ortasına doğru azalıp daha sonra tekrar arttığı görülmüştür. Analizler sonucunda, yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerden daha büyük kesit tesirlerinin elde edildiği belirlenmiştir.

✓ Gülburnu Köprüsü'nün analitik modal analizinden elde edilen ilk sekiz doğal frekans 1.086-5.960 Hz arasında elde edilmiştir. Köprüye uygulanan çevresel titreşim testlerinden ise ilk sekiz doğal frekans 0.984-5.668 Hz arasında elde edilmiştir.

✓ Gülburnu 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.

✓ Gülburnu Köprüsü'nün sonlu eleman analizlerinden ve deneysel ölçüm testlerinden (GFTAA ve SAB yöntemleri) elde edilen mod şekilleri birbirleriyle uyum içerisindedir. Birinci, dördüncü ve yedinci modlar düşey; ikinci ve sekizinci modlar

burulma; üçüncü ve beşinci modlar enine; altıncı mod ise uzama modu olarak elde edilmiştir.

✓ Gülburnu Köprüsü'ne uygulanan çevresel titreşim testlerinden elde edilen sönüm oranı değerleri arasında tam bir uyum yakalanamamış olup, bu değerler %0.178-4.662 arasında değişkenlik göstermektedir.

✓ Gülburnu Köprüsü için gerçekleştirilen analitik ve deneysel çalışmalardan elde edilen doğal frekanslar incelendiğinde, frekanslar arasında %9 civarında bir farklılığın bulunduğu görülmüştür. Doğal frekanslar arasındaki bu farkı giderebilmek veya minimum düzeye getirebilmek için Gülburnu Köprüsü'nün sonlu eleman modeli deneysel ölçüm verileri dikkate alınarak, malzeme özelliklerindeki değişimler ile birlikte iyileştirilmiştir. Sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra frekanslar arasındaki maksimum fark %2 civarına indirilmiştir. Bu şekilde Gülburnu Köprüsü'nün mevcut durumunu yansıtan sonlu eleman modeli elde edilmiştir.

✓ Gülburnu Köprüsü'nün iyileştirilen sonlu eleman modelinden ilk sekiz doğal frekans 0.994-5.665 Hz arasında elde edilmiş, mod şekillerinde ise herhangi bir değişiklik olmamıştır. Birinci, dördüncü ve yedinci modlar düşey; ikinci ve sekizinci modlar burulma; üçüncü ve beşinci modlar enine; altıncı mod ise uzama modu olarak elde edilmiştir.

✓ Gülburnu Köprüsü'nün iyileştirilen sonlu eleman modelinden elde edilen mod şekilleri ile deneysel mod şekilleri arasında modal güvence kriterine göre %89-96 uyum vardır. Bu durum Gülburnu Köprüsü için oluşturulan sonlu eleman modelinin köprünün gerçek davranışını temsil ettiğini göstermektedir.

Gülburnu Köprüsü'nün deprem davranışını belirlemek için zaman tanım alanında lineer analizler gerçekleştirilmiştir. Deprem analizleri, sonlu eleman model iyileştirmesinin etkisini görmek için hem iyileştirmeden önceki hem de iyileştirilmiş sonlu eleman modelleri için yapılmıştır. İyileştirmeden önceki dinamik analizlerde %5 sönüm oranı dikkate alınmıştır. İyileştirmeden sonra ise deneysel ölçümler sonucunda her bir mod için elde edilen sönüm oranları kullanılmıştır.

✓ Gülburnu Köprüsü'nün iyileştirmeden önceki ve sonraki modelleri üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden, boyuna yerdeğiştirmelerin tabliye boyunca sabit kaldığı, enine ve düşey doğrultuda elde edilen yerdeğiştirmelerin köprü açıklık ortasına doğru arttığı görülmüştür. Sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra elde edilen yerdeğiştirme değerleri daha büyüktür. Maksimum boyuna yerdeğiştirme değeri model

iyileştirmeden sonra 32 cm'den 34.6 cm'ye, maksimum enine yerdeğiştirme değeri 29.8 cm'den 32.2 cm'ye ve maksimum düşey yerdeğiştirme değeri ise 7.6 cm'den 8.8 cm'ye çıkmıştır.

✓ Gülburnu Köprüsü'nün iyileştirmeden önceki ve sonraki modelleri üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden, tabliye boyunca eğilme momenti değerlerinin ayaklar üzerinde maksimum değerini aldığı ve tabliye orta noktasına doğru azaldığı görülmüştür. Sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra elde edilen eğilme momentleri daha büyüktür. Maksimum eğilme momenti değeri model iyileştirmeden sonra 2.2E4 kNm'den 2.4E4 kNm'ye çıkmaktadır.

✓ Gülburnu Köprüsü'nün iyileştirmeden önceki ve sonraki modelleri üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden, deprem izolatörlerinden dolayı ayaklarda çok küçük yerdeğiştirmeler elde edildiği ve maksimum yerdeğiştirmelerin boyuna doğrultuda 1.55 mm'den 1.71 mm'ye çıktığı tespit edilmiştir.

✓ Gülburnu Köprüsü'nün iyileştirmeden önceki ve sonraki modelleri üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden, ayak yüksekliği boyunca normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin sabit kaldığı, sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra elde edilen normal kuvvet ve kesme kuvveti değerlerinin arttığı görülmektedir.

✓ Gülburnu Köprüsü'nün iyileştirmeden önceki ve sonraki modelleri üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden, ayak yüksekliği boyunca eğilme momenti değerlerinin azaldığı görülmektedir. Maksimum eğilme momenti değeri model iyileştirmeden sonra 1.56E4 kNm'den 1.72E4 kNm'ye çıkmaktadır.

✓ Gülburnu Köprüsü'nün iyileştirmeden önceki ve sonraki modelleri üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden, izolatör yüksekliği boyunca yerdeğiştirmelerin arttığı, eğilme momenti değerlerinin ise azaldığı görülmüştür. Ayrıca, sonlu eleman model iyileştirmesinden sonra izolatör boyunca elde edilen kesit tesir değerleri daha büyüktür.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, çevresel ve zorlanmış titreşim yöntemlerini içeren Deneysel Modal Analiz, karayolu köprülerinin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde etkin bir işleve sahiptir. Dolayısıyla, karayolu köprüleri için oluşturulacak sonlu eleman modellerinin doğruluğunu kontrol etmek için köpülerin deneysel modal analizinin gerçekleştirilmesi çok önem arz etmektedir. Ayrıca, karayolu köprüleri gibi yapımı uzun yıllar süren mühendislik yapılarının yapısal davranışlarının doğru bir şekilde belirlenmesi için yapım aşamalarının ve zaman bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması çok büyük önem arz etmektedir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında yapılan bazı öneriler maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

- Model köprünün laboratuvar modeli için gerçekleştirilen analitik ve deneysel çalışma sonuçlarının gerçek köprülerle ilişkisi araştırılabilir. Böylelikle, mevcut köprülerin davranışları küçültülmüş modelleri üzerinden belirlenebilir.

- Model köprünün temel, ayak ve tabliye birleşimleri sürekli olarak inşa edilmiştir. Ayaklar ve tabliye arasına farklı tür izolatörler yerleştirilerek dinamik davranışları araştırılabilir.

- Model köprünün tabliyesi değişken yükseklikte kutu kesit taşıyıcı sisteme sahip olacak şekilde inşa edilebilir. Böylece bu tip köprülerin yapısal davranışları model köprüler üzerinde detaylı olarak irdelenebilir.

- Model köprüye kenar ayak mesnetleri inşa edilerek farklı tür sınır şartları için model köprünün yapısal davranışı analitik ve deneysel olarak incelenebilir.

- Model köprü taşıyıcı sistem elemanları üzerinde gerçekleştirilecek çeşitli hasar durumları için analitik ve deneysel çalışmalar yapılabilir.

- Bu çalışmaya ilave olarak, sarsma masası üzerine yerleştirilecek olan bir karayolu köprüsü modelinin deprem davranışı incelenebilir.

- Bu çalışmada, Kömürhan ve Gülburnu Köprüsü'ne uygulanan çevresel titreşim testlerinden elde edilen dinamik karakteristikler köprülerin, ölçüm esnasındaki durumunu yansıtmaktadır. Bu ölçümler uzun süreli hale getirilerek köprülerin davranışları sürekli izlenebilir. Böylece her hangi bir olumsuz durumda gecikmeden müdahale edilebilir.

- Kömürhan ve Gülburnu Köprüsü'nün başlangıç ve iyileştirilmiş modelleri için gerçekleştirilen lineer analiz sonuçları köprülerin dinamik davranışını tam olarak temsil etmemektedir. Dolayısıyla köprülerin lineer olmayan davranışlarının belirlenmesi gerekmektedir.

- Deneysel ölçüm sonuçları kullanılarak karayolu köprülerinin hasar tespiti yapılabilir.

4. KAYNAKLAR

- ABAQUS, 2004. Analysis User's Manual, Version 6.5. Hibbit, Karlsson and Sorenson Inc.
- Achter, J.L., 2000. Full-Scale Bridge Bent Condition Assessment using Forced-Vibration Testing, Yüksek Lisans Tezi, Utah State University, Logan, Utah.
- Adanur, S., 1997. Asma Köprülerin Geometrik Olarak Lineer Olmayan ve Elastik Zemin Analajisi ile Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Adanur, S., 2003. Mesnetlerinden Farklı Dinamik Etkilere Mauz Asma Köprülerin Geometrik Olarak Lineer Olmayan Deterministik ve Stokastik Analizi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Alaylioglu, H. ve Alaylioglu, A., 1997. Dynamic Structural Assessment of a Highway Bridge via Hybrid FE Model in Situ Testing, Computers and Structures, 63, 3, 439-453.
- Allemang, R.J., 2003. The Modal Assurance Criterion: Twenty Years of Use and Abuse, Sound and Vibration, 37, 8, 14-23.
- Altunışık, A.C., Bayraktar, A., Sevim, B., Adanur, S. ve Domaniç, A., 2009a. 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., Bayraktar, A., Sevim, B., Adanur, S. ve Domaniç, A., 2010a. Construction Stage Analyses of Kömürhan Highway Bridge using Time Dependent Material Properties, Structural Engineering and Mechanics, (baskıda).
- Altunışık, A.C., Bayraktar, A. ve Sevim, B., 2010b. Output-Only System Identification of Post Tensioned Segmental Concrete Highway Bridges, Journal of Bridge Engineering, (baskıda).
- Andersen, P., Brincker, R., Goursat, M. ve Mevel, L., 2007. Automated Modal Parameter Estimation for Operational Modal Analysis of Large Systems, Proceedings of the 2nd International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC), Copenhagen, Denmark.
- Aref, A.J., Kitane, Y. ve Lee, G.C., 2005. Analysis of Hybrid FRP-Concrete Multi-Cell Bridge Superstructure, Composite Structures, 69, 346-359.

- Ateş, Ş., 2004. Sürtünmeli Sarkaç Sistemi ile İzolasyonlu Karayolu Köprülerinin Değişerek Yayılan Yer Hareketi İçin Stokastik Analizi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Ateş, Ş., Bayraktar, A. ve Dumanoglu, A.A., 2004. Sürtünmeli Sarkaç Mesnet Modeli ile Taban İzolasyonu Yapılan Köprülerin Deprem Davranışının Belirlenmesi, Türkiye İnşaat Mühendisliği On Yedinci Teknik Kongre ve Sergisi, Nisan, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, Bildiriler Kitabı.
- Ateş, Ş., Dumanoglu, A.A. ve Bayraktar, A., 2005. Stochastic Response of Seismically Isolated Highway Bridges with Friction Pendulum Systems to Spatially Varying Earthquake Ground Motions, Engineering Structures, 27, 1843-1858.
- Bagchi, A., 2005. Updating the Mathematical Model of a Structure using Vibration Data, Journal of Vibration and Control, 11, 12, 1469-1486.
- Bathe, K.J., 1996. Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- 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., Adanur, S. ve Akköse, M. 2009g. Experimental and Analytical Modal Analyses of a Prototype Arch Dam-Reservoir-Foundation Model, International Earthquake Symposium Kocaeli 2009, August, Kocaeli, Turkey, Bildiriler Kitabı: 256-269.
- 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, (baskıda).
- 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, (baskıda).
- 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, (baskıda).
- 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, (baskıda).
- 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, (baskıda).
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., 2010i. Ambient Vibration Tests of a Steel Footbridge, Journal of Nondestructive Evaluation, (baskıda).
- Bendat, J. ve Piersol, A., 1986. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 2nd Edition, John Wiley and Sons, USA.
- Bendat, J.S. ve Piersol, A.G., 2004. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 3th Edition, John Wiley and Sons, USA.
- 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., Andersen, P. ve Cantieni, R., 2001. Identification and Level I Damage Detection of the Z24 Highway Bridge, Experimental Techniques, 25, 6, 51-57.
- 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, Proceedings of 21st International Modal Analysis Conference on Structural Dynamics, Kissimmee, Orlando, USA.

- Brownjohn, J.M.W., Moyo, P., Omenzetter, P. ve Lu, Y., 2003. Assessment of Highway Bridge Upgrading by Dynamic Testing and Finite-Element Model Updating, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 8, 3, 162-172.
- Caetano, E., 2000. Dynamic of Cable-stayed Bridges: Experimental Assessment of Cable-Structure Interaction, Doktora Tezi, Engineering Faculty of University of Porto, Portugal.
- CALTRANS, 2001. Seismic Design Criteria Version 1.2, Division of Engineering Services, California Department of Transportation, California.
- 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.
- Carden, L.P., Itani, A.M. ve Buckle, I.G., 2006a. Seismic Performance of Steel Girder Bridges with Ductile Cross Frames using Single Angle X Braces, Journal of Structural Engineering, ASCE, 132, 3, 329-337.
- Carden, L.P., Itani, A.M. ve Buckle, I.G., 2006b. Seismic Performance of Steel Girder Bridges with Ductile Cross Frames using Buckling-Restrained Braces, Journal of Structural Engineering, ASCE, 132, 3, 338-345.
- Casas, J.R., 1999. Evaluation of Existing Concrete Bridges in Spain, Concrete International-Design and Construction, 21, 8, 48-53.
- 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.
- Catbas, F.N., Brown, D.L. ve Aktan, A.E., 2006. Use of Modal Flexibility for Damage Detection and Condition Assessment: Case Studies and Demonstrations on Large Structures, Journal of Structural Engineering, ASCE, 132, 11, 1699-1712.
- Chaudhary, M.T.A., Abe, M. ve Fujino, Y., 2001a. Identification of Soil-Structure Interaction Effect in Base-Isolated Bridges from Earthquake Records, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 21, 713-725.
- Chaudhary, M.T.A., Abe, M. ve Fujino, Y., 2001b. Performance Evaluation of Base-Isolated Yama-Age Bridge with High Damping Rubber Bearings using Recorded Seismic Data, Engineering Structures, 23, 902-910.
- Chaudhary, M.T.A., Abe, M. ve Fujino, Y., 2002. Investigation of a Typical Seismic Response of a Base-Isolated Bridge, Engineering Structures, 24, 945-953.
- Chopra, A.K., 2006. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Third Edition, Prentice Hall, USA.

- Chouw, N. ve Hao, H., 2004. Influence of SSI and Frequency Content of Non-Uniform Ground Motions on Bridge Girder POUNDINGS, Journal of Applied Mechanics, JSCE, 7, 841-851.
- Chouw, N. ve Hao, H., 2005. Study of SSI and Non-Uniform Ground Motion Effect on Pounding Between Bridge Girders, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25, 717-28.
- Chouw, N. ve Hao, H., 2008a. Significance of SSI and Nonuniform Near-Fault Ground Motions in Bridge Response I: Effect on Response with Conventional Expansion Joint, Engineering Structures, 30, 141-153.
- Chouw, N. ve Hao, H., 2008b. Significance of SSI and Non-Uniform Near-Fault Ground Motions in Bridge Response II: Effect on Response with Modular Expansion Joint, Engineering Structures, 30, 1, 154-162.
- Chuntavan, C., 1993. Structural Identification of Steel Stringer Bridges for Condition Assessment, Doktora Tezi, University of Cincinnati, Cincinnati, USA.
- Constantinou, M.C., Tsepelas, P., Kim, Y.S. ve Okamoto, S., 1993. Taisei Corporation Research Program of Sliding Seismic Isolation Systems for Bridges: Experimental and Analytical Study of Friction Pendulum System, Rapor No:MCEER-93-0020, State University of New York at Buffalo.
- Dicleli, M. ve Mansour, M.Y., 2003. Seismic Retrofitting of Highway Bridges in Illinois using Friction Pendulum Seismic Isolation Bearings and Modeling Procedures, Engineering Structures, 25, 1139-1156.
- Dicleli, M. ve Erhan, S., 2010. Effect of Soil-Bridge Interaction on the Magnitude of Internal Forces in Integral Abutment Bridge Components due to Live Load Effects, Engineering Structures, 32, 129-145.
- Dönmez, C. ve Karakan, E., 2009. Köprülerde Deneysel Modal Analiz Uygulamaları, Teknik Dergi, 318, 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.
- Erhan, S. ve Dicleli, M., 2009. İntegral Köprülerde Hareketli Yük Dağılımına Yapı-Zemin Etkileşimi ve Uç-Ayak Tabliye Sürekliliğinin Etkileri, Teknik Dergi, 317, 4833-4850.
- Eröz, M. ve DesRoches, R., 2008. Bridge Seismic Response as a Function of the Friction Pendulum System (FPS) Modeling Assumptions, Engineering Structures, 30, 3204-3212.
- Eurocode 8, 2000. Design of Structures for Earthquake Resistance, Part1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Building, Doc CEN/TC250/SC8/N269, Draft No.1.

- 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.
- Farrar, C.R. ve Jauregui, D.A., 1998. Comparative Study of Damage Identification Algorithms Applied to a Bridge: I. Experiment, Smart Materials and Structures, 7, 704-719.
- 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., Çelebi, N. ve Tulumtaş, F., 2007. Gülburnu Köprüsü, Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, Kasım, Antalya, Türkiye, Bildiriler Kitabı: 225-236.
- Hashimoto, K. ve Chouw, N., 2003. Investigation of the Effect of Kobe Earthquake on a Three-Dimensional Soil-Structure System, Journal of Earthquake Engineering, JSCE, 27, 1-8.
- Helba, A. ve Kennedy, J.B., 1994. Parametric Study on Collapse Loads of Skew Composite Bridges, Journal of Structural Engineering, ASCE, 120, 5, 1415-1433.
- Heylen, W., Lammens, S. ve Sas, P., 2007. Modal Analysis Theory and Testing, Leuven Katholieke Universtiy, Department of Mechanical Engineering, Leuven, Belgium.
- Huth, O., Feltrin, G., Maeck, J., Kilic, N. ve Motavalli, M., 2005. Damage Identification using Modal Data: Experiences on a Prestressed Concrete Bridge, Journal of Structural Engineering, ASCE, 131, 12, 1898-1910.
- Hwang, H., Jernigan, J.B. ve Lin, Y.W., 2000. Evaluation of Seismic Dynamic to Memphis Bridges and Highway Systems, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 5, 4, 322-330.

- 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.
- Jangid, R.S., 2004. Seismic Response of Isolated Bridges, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 9, 2, 156-166.
- Jeremic, B., Kunnath, S. ve Xiong, F., 2004. Influence of Soil-Foundation-Structure Interaction on Seismic Response of the I-880 Viaduct, Engineering Structures, 26, 391-402.
- Johnson, N.S., Saiidi, M.S. ve Sanders, D.H., 2006. Large-Scale Experimental and Analytical Seismic Studies of a Two-Span Reinforced Concrete Bridge System, Rapor No: CCEER-06-02, Center for Civil Engineering Earthquake Research, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Nevada, Reno.
- Kakinuma, T., Kawakami, K., Kamakura, K., Tani, H. ve Abe, N., 1994. Vibration Test of a Menshin Designed Multi-Span Continuous Prestressed Concrete Bridge, Proceedings of the 3rd US-Japan Workshop on Earthquake Protective System for Bridges, Rapor No: NCEER-94-0009, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo.
- Kappos, A.J., Manolis, G.D. ve Moschonas, I.F., 2002. Seismic Assessment and Design of R/C Bridges with Irregular Congiguration, Including SSI Effects, Engineering Structures, 24, 1337-1348.
- Karakaplan, A., Caner, A., Kurç, Ö., Domaniç, A. ve Lüleş, A., 2009. Yapı Çözümlemesinde Yeni Bir Devir: Yapım Aşaması, Teknik Dergi, 321, 4905-4917.
- Karim, K.R. ve Yamazaki, F., 2007. Effect of Isolation on Fragility Curves of Highway Bridges based on Simplified Approach, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27, 414-426.
- Kawashima, K., Unjoh, S. ve Mukai H., 1997. Seismic Strenthening of Highway Bridges, Second U.S.-Japan Workshop on Seismic Retrofit of Bridges, Rapor No: UCB/EERC-97/09, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Kim, J.T. ve Stubbs, N., 2003. Nondestructive Crack Detection Algorithm for Full-Scale Bridges, Journal of Structural Engineering, ASCE, 129, 10, 1358-1366.

- Kim, T.H., Kim, B.S., Chung, Y.S. ve Shin, H.M., 2006. Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete Bridge Piers with Lap Splices, Engineering Structures, 28, 935-945.
- 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.
- Kumar, S., 2003. Balanced Cantilever-A Specialist Method in Bridge Construction, Editio, 1, 1-16.
- Li, H., 1992. Thin-Walled Box Beam Finite Elements for Static Analysis of Curved Haunched and Skew Multicell Box Girder Bridges (Skew Bridges, Haunched Bridges, Box Girder Bridges), Doktora Tezi, Department of Civil Engineering, Carleton University, Canada.
- Li, X.M., 1989. Optimisation of Stochastic Response of a Bridge Isolation System with Hysteretic Dampers, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18, 951-964.
- Liu, C., DeWolf, J.T. ve Kim, J.H., 2009. Development of a Baseline for Structural Health Monitoring for a Curved Post-Tensioned Concrete Box-Girder Bridge, Engineering Structures, 31, 3107-3115.
- Luscher, D.J., Brownjohn, J.M.W., Sohn, H. ve Farrar, C.R., 2001. Modal Parameter Extraction of Z24 Bridge Data, The 19th International Modal Analysis Conference, February, Orlando, FL, USA.
- Maeck, J., Peeters, B. ve Roeck, G.D., 2001. Damage Identification on the Z24 Bridge using Vibration Monitoring, Smart Materials and Structures, 10, 512-517.
- 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.
- Mathworks Inc, 1999. MATLAB User Guide, Natick, MA.
- Mehta, P.K., 1986. Concrete: Structure, Properties, and Materials, Prentice Hall, INC., Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Mertlich, T.B., 2006. Dynamic Analysis of a Three-Span Curved-Girder Steel Bridge with Varying Boundary Conditions, Yüksek Lisans Tezi, Utah State University, Logan, Utah, USA.
- Monti, G., Pinto, P.E. ve Nuti, C., 1995. Response of Conventional and Isolated Bridges under Non-synchronous Seismic Motion, Proceedings of the Fifth SECED Conference, Rotterdam, Netherlands.
- Monti, G., Nuti, C. ve Pinto, P.E., 1996. Nonlinear Response of Bridges under Multi-support Excitation, Journal of Structural Engineering, ASCE, 122, 10, 1147-1159.

- Monzon, E.V., Buckle, I.G. ve Itani, A., 2007. Seismic Response of Isolated Bridge Superstructures Subjected to Incoherent Ground Motions, Proceedings of 2007 ANCER Meeting, Earthquake Engineering Research: From Strong Seismic Regions to Regions of Moderate Seismicity, HK, China.
- Mutobe, R.M. ve Cooper, T.R., 1999. Nonlinear Analysis of a Large Bridge with Isolation Bearings, Computers and Structures, 72, 279-292.
- 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.
- Park, S.W., Yen, W.P., Cooper, J.D. ve O'Fallon, J.D., 2001. Seismic Performance of RC Bridge Column under Repeated Ground Motions, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 6, 6, 461-467.
- Park, K.S., Jung, H.J. ve Lee, I.W., 2002. A Comparative Study on Seismic Performances of Base Isolated Systems for Multi-Span Continuous Bridge, Engineering Structures, 24, 1001-1013.
- PEER, 2009. Pacific Earthquake Engineering Research Centre, <http://peer.berkeley.edu/smcat/data>.
- Peeters, B., 2000. System Identification and Damage Detection in Civil Engineering, Doktora Tezi, K.U, Leuven, Belgium.
- Peeters, B. ve Roeck, G.D., 2000. Reference Based Stochastic Subspace Identification in Civil Engineering, Inverse Problems in Civil Engineering, 8, 47-74.
- Peeters, B. ve Roeck, G.D., 2001. One Year Monitoring of the Z24 Bridge: Environmental Effects Versus Damage Events, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30, 149-171.
- Peeters, B. ve Ventura, C.E., 2003. Comparative Study of Modal Analysis Techniques for Bridge Dynamic Characteristics, Mechanical Systems and Signal Processing, 17, 5, 965-988.
- 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.
- Ren, W.X., Sun, Z.S., Xia, Y., Hao, H. ve Deeks, A.J., 2008. Damage Identification of Shear Connectors with Wavelet Packet Energy: Laboratory Test Study, Journal of Structural Engineering, ASCE, 134, 5, 832-841.
- Reynders, E. ve Roeck, G.D., 2008. Reference-Based Combined Deterministic-Stochastic Subspace Identification for Experimental and Operational Modal Analysis, Mechanical Systems and Signal Processing, 22, 617-637.
- Rodrigues, J., 2004. Identificação Modal Estocástica, Métodos de Análise e Aplicações em Estruturas de Engenharia Civil, Doktora Tezi, Engineering Faculty of University of Porto, Portugal.
- Ruangrassamee, A. ve Kawashima, K., 2003. Control of Nonlinear Bridge Response with Pounding Effect by Variable Dampers, Engineering Structures, 25, 593-606.
- Saiidi, M., Maragakis, E. ve Sanders, D., 1998. Evaluation and Seismic retrofit of Highway Bridge Substructures with Tapered Columns, Construction and Building Materials, 12, 2-3, 161-173.
- Saiidi, M.S., Nelson, R., Sadrossadat-Zadeh, M. ve Buckle, I., 2007. Shake Table Studies of a 4-Span Reinforced Concrete Bridge Model, Proceedings of 2007 ANCER Meeting, Earthquake Engineering Research: From Strong Seismic Regions to Regions of Moderate Seismicity, HK, China.
- Salane, H.J. ve Baldwin, J.W., 1990. Identification of Modal Properties of Bridges, Journal of Structural Engineering, ASCE, 116, 7, 2008-2021.
- Salawu, O.S. ve Williams, C., 1995. Bridge Assessment using Forced-Vibration Testing, Journal of Structural Engineering, 121, 2, 161-173.
- 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, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Sevim, B., Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Adanur, S. ve Akköse, M., 2010. Modal Parameter Identification of a Prototype Arch Dam using Enhanced Frequency Domain Decomposition and Stochastic Subspace Identification Techniques, Journal of Testing and Evaluation, (baskıda).
- Sgambi, L., 2004. Fuzzy Theory based Approach for Three-Dimensional Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Two-Blade Bridge Piers, Computer and Structures, 82, 1067-1076.
- Shahrooz, B.M., Ho, I.K., Aktan, A.E., Borst, R., Blaauwendraad, J., Veen, C., Iding, R.H. ve Miller, R.A., 1994. Nonlinear Finite Element Analysis of Deteriorated RC Slab Bridge, Journal of Structural Engineering, 120, 2, 422-440.
- Shattarat, N.K., Symans, M.D., McLean, D.I. ve Cofer, W.F., 2008. Evaluation of Nonlinear Static Analysis Methods and Software Tools for Seismic Analysis of Highway Bridges, Engineering Structures, 30, 1335-1345.
- Song, H.W., You, D.W., Byun, K.J. ve Maekawa, K., 2002. Finite Element Failure Analysis of Reinforced Concrete T-Girder Bridges, Engineering Structures, 24, 151-162.
- Spyrakos, C.C., 1990. Assessment of SSI on the Longitudinal Seismic Response of Short Span Bridges, Engineering Structures, 12, 1, 60-66.
- Spyrakos, C.C., 1992. Seismic Behaviour of Bridge Piers Including Soil Structure Interaction, Computers and Structures, 43, 373-384.
- Spyrakos, C.C. ve Loannidis, G., 2003. Seismic Behavior of a Post-Tensioned Integral Bridge including Soil-Structure Interaction (SSI), Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 23, 53-63.
- Sritharan, S., Priestley, M.J.N. ve Seible, F., 2000. Nonlinear Finite Element Analyses of Concrete Bridge Joint Systems Subjected to Seismic Actions, Finite Elements in Analysis and Design, 36, 215-233.
- 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.
- TCK, 2010. Türkiye Cumhuriyeti Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.
- Teughels, A. ve Roeck, G.D., 2003. Damage Assessment of the Z24 Bridge by FE Model Updating, In Proceedings of DAMAS, July, Southampton, UK.
- Teughels, A. ve Roeck, G.D., 2004. Structural Damage Identification of the Highway Bridge Z24 by FE Model Updating, Journal of Sound and Vibration, 278, 589-610.

- Thakkar, S.K. ve Maheshwari, R., 1995. Study of Seismic Base Isolation of Bridge Considering Soil Structure Interaction, Proceedings of Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, University of Missouri-Rolla, Missouri.
- Tongaonkar, N.P. ve Jangid, R.S., 2003. Seismic Response of Isolated Bridges with Soil-Structure Interaction, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 23, 287-302.
- Tsai, M.H., Wu, S.Y., Chang, K.C. ve Lee, G.C., 2007. Shaking Table Tests of a Scaled Bridge Model with Rolling-Type Seismic Isolation Bearings, Engineering Structures, 29, 694-702.
- URL-1. http://www.spektra-dresden.com/images/erreger/APS_400_Data_Sheet_en.pdf, 10.05.2010.
- URL-2. <http://www.bksv.com/doc/bp2079.pdf>, 12.05.2010.
- URL-3. <http://mechatronics.colostate.edu/figures/9-50.gif>, 02.06.2010.
- URL-4. <http://www.bksv.fr/Products/TransducersConditioning/VibrationTransducers/Accelerometers/4507B005.aspx>, 05.06.2010.
- URL-5. <http://www.bksv.fr/Products/TransducersConditioning/VibrationTransducers/Accelerometers/8340.aspx>, 08.06.2010.
- URL-6. <http://www.bksv.fr/Products/TransducersConditioning/VibrationTransducers/Accelerometers/4506B003.aspx>, 10.06.2010.
- Vlassis, A.G. ve Spyrakos, C.C., 2001. Seismically Isolated Bridge Piers on Shallow Soil Stratum with Soil-Structure Interaction, Computers and Structures, 79, 2847-2861.
- Wahab, M.M. ve DeRoeck, G., 1999. Damage Detection in Bridges using Modal Curvatures: Application to a Real Damage Scenario, Journal of Sound and Vibration, 226, 2, 217-235.
- Wang, T.L. ve Zong, Z., 2002. Improvement of Evaluation Method for Existing Highway Bridges, Proje Sonuç Raporu, 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, Proje Sonuç Raporu, Rapor No: UT-99.15, Department of Civil and Environmental Engineering, Utah State University, Logan, Utah, USA.

- Wu, Q., Yoshimura, M., Takahashi, K., Nakamura, S. ve Nakamura, T., 2006. Nonlinear Seismic Properties of the Second Saikai Bridge A Concrete Filled Tubular (CFT) Arch Bridge, Engineering Structures, 28, 163-182.
- Xu, F., 2002. Health Assessment and Monitoring of a Post-Tensioned Segmental Concrete Bridge, Doktora Tezi, University of Illinois, Chicago, USA.
- Yashinsky, M., 1998. Performance of Bridge Seismic Retrofits during Northridge Earthquake, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 3, 1, 1-14.
- Yu, DJ. ve Ren, WX, 2005. EMD- Based Stochastic Subspace Identification of Structures from Operational Vibration Measurements, Engineering Structures, 27, 1741-1751.
- Yüksel Proje, 2007. Gülburnu Köprüsü'ne ait Proje Bilgileri, Yüksel İnşaat, Ankara.
- Zanardo, G., Hao, H., Xia, Y. ve Deeks, A., 2006. Stiffness Assessment through Modal Analysis of an RC Slab Bridge before and after Strengthening, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 11, 5, 590-601.
- 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.
- Zhang, L., Brincker, R. ve Andersen, P., 2002. An Overview of Operational Modal Analysis: Major Development and Issues, B&K Technical Paper, 152-161.
- Zhao, J. ve DeWolf, J.T., 2002. Dynamic Monitoring of Steel Girder Highway Bridge, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 7, 6, 350-356.
- Zheng, J. ve Takeda, T., 1995. Effects of Soil-Structure Interaction on Seismic Response of PC Cable-Stayed Bridge, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 14, 6, 427-437.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Can ALTUNIŞIK, 1982 yılında Trabzon'da doğdu. İlk okulu 1988-1993 yılları arasında Trabzon Milli Egemenlik İlkokulu'nda, orta okulu 1993-1996 yılları arasında Trabzon Kanuni İlköğretim Okulu'nda, orta öğrenimini ise 1996-2000 yılları arasında Trabzon Fatih Süper Lisesi'nde tamamladı. 2000 yılında girdiği Öğrenci Seçme Sınavı'nda gösterdiği başarı sonucu Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde "Lisans" eğitimi almaya hak kazandı. Lisans eğitimini 18/06/2004 tarihinde tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda "Doktora" eğitimine başladı ve 2005 yılında Araştırma Görevlisi olarak atandı. İyi derecede İngilizce bilen ALTUNIŞIK evli ve bir çocuk babasıdır. Bugüne kadar birçok akademik çalışma yapan ALTUNIŞIK'a ait yayın listesi aşağıda sunulmaktadır.

- **Altunışık, A.C.**, Bayraktar, A. ve Adanur, S., 2006. Effect of Hanger Shapes on the Geometric Nonlinear Static and Dynamic Responses of Bosphorus Suspension Bridge, Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering, October 11-13, Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey (ACE06-351).
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Sevim, B. ve Türker, T., 2007. Modal Testing and Finite Element Model Calibration of an Arch Type Steel Footbridge, Steel and Composite Structures, 7, 6 487-502.
- Bayraktar, A., Türker T., Sevim, B. ve **Altunışık A.C.**, 2007. Evaluation of Blasting Effects on Masonry Buildings By Operational Modal Analysis, International Colloquium on Seismic Design and Retrofit of Masonry Structures, 7-9 May, Istanbul Technical University, Turkey.
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Türker, T. ve Sevim, B., 2007. Elektrik İletim Kablolarının Çelik Direklerin Dinamik Karakteristiklerine Etkisinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile Belirlenmesi, 2. Çelik Yapılar Ulusal Sempozyumu, 10-11 Mayıs, Eskişehir, Türkiye, 58-65.
- Bayraktar, A., Türker, T., **Altunışık, A.C.** ve Sevim, B., 2007. Düzlem Kafes Taşıyıcı Sistemlerin Operasyonel Modal Analizi, 2. Çelik Yapılar Ulusal Sempozyumu, 10-11 Mayıs, Eskişehir, Türkiye, 273-281.
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Ateş, Ş. ve Hacıefendioğlu, K., 2007. Rezervuarın Kaya Dolgu Barajların Lineer Olmayan Deprem Davranışına Etkisi, Uluslararası Katılımlı I. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu, 28-30 Mayıs, Ankara, Türkiye, 319-328.

- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Ateş, Ş. ve Hacıfendioğlu, K., 2007. Toprak Dolgu Barajların Baraj-rezervuar-temel Etkileşimi Dikkate Alınarak Lineer Olmayan Deprem Davranışlarının İncelenmesi, Uluslararası Katılımlı I. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu, 28-30 Mayıs, Ankara, Türkiye, 351-362.
- Bayraktar, A., Sevim, B., **Altunışık, A.C.** ve Türker, T., 2007. Tarihi Yığma Minarelerin Deprem Güvenliklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 1, 27-29 Eylül, Ankara, Türkiye, 415-428.
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Türker, T. ve Sevim, B., 2007. Tarihi Yığma Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 1, 27-29 Eylül, Ankara, Türkiye, 429-440.
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Türker, T. ve Sevim, B., 2007. Tarihi Köprülerin Deprem Davranışına Sonlu Eleman Model İyileştirmesinin Etkisi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim, İstanbul, Türkiye, 2, 29-39.
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Sevim, B., Türker, T., Ateş, Ş. ve Adanur, S., 2007. Determination of Earthquake Behaviour of Highway Bridges by Operational Modal Analysis, International Earthquake Symposium Kocaeli 2007, 22-24 October, Kocaeli, Turkey.
- Bayraktar, A., Türker, T., **Altunışık, A.C.** ve Sevim, B., 2007. The Determination of Model Updating Effects on Earthquake Behaviour of Masonry Buildings, International Earthquake Symposium Kocaeli 2007, 22-24 October, Kocaeli, Turkey.
- Bayraktar, A., Türker, T., Sevim, B. ve **Altunışık, A.C.**, 2007. 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 24-26, Isparta-Antalya, Turkey, pp. 163-172.
- Bayraktar, A., Türker, T., Sevim, B. ve **Altunışık, A.C.**, 2007. Determination of Dynamic Characteristics of Turkish Style RC Minarets by Analytical and Experimental Modal Analyses, International Symposium on Advances in Earthquake and Structural Engineering AESE 2007, October 24-26, Isparta-Antalya, Turkey, pp. 185-194.
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Sevim, B. ve Ateş, Ş., 2007. Effects of Pulse Signal of Near-Fault Strong Ground Motion on Nonlinear Response of Concrete Gravity Dam-Reservoir-Foundation Systems, International Symposium on Advances in Earthquake and Structural Engineering AESE 2007, October 24-26, Isparta-Antalya, Turkey, pp. 370-382.
- Bayraktar, A., Sevim, B., **Altunışık, A.C.** ve Akköse, M., 2007. Comparison of Nonlinear Seismic Behavior of Arch Dams to Near-Fault Strong Ground Motion using Westergaard and Lagrangian Approaches, International Symposium on Advances in Earthquake and Structural Engineering AESE 2007, October 24-26, Isparta-Antalya, Turkey, pp. 393-405.

- Bayraktar, A., Sevim, B., **Altunışık, A.C.**, Kartal, M.E. ve Türker, T., 2007. Seismic Performance Evaluation of Concrete Dams, Dam Safety (edited by Zekai ŞEN), Turkish Water Foundation, İstanbul, November 5-15, ISBN:978-075-6455-31-9, pp. 173-198.
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Türker, T., Sevim, B. ve Ateş, Ş., 2007. Karayolu Köprülerinin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, 1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu, 29-30 Kasım, Antalya, Türkiye, 355-364.
- Bayraktar, A., Türker, T., **Altunışık, A.C.** ve Sevim, B., 2007. Determination of Dynamic Characteristics and Damage Pattern of Masonry Buildings Exposed to the Blast Loads, 7th International Conference on Shock and Impact Loads on Structures, 17-19 October, China.
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Sevim, B., Kartal, M.E. ve Türker, T., 2008. Near-Fault Ground Motion Effects on the Nonlinear Response of Dam-Reservoir-Foundation Systems, Structural Engineering and Mechanics, 8, 3, 411-442.
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Sevim, B., Türker, T., Akköse, M. ve Coşkun, N., 2008. 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., 2008. 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., 2008. 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., 2008. Ambient Vibration Testing of Steel Footbridges for Structural Identification, Proceedings of the Fifth International Engineering and Construction Conference (IECC'5), August 27-29, Irvine, USA, 87-94.
- Bayraktar, A., Sevim, B., **Altunışık, A.C.**, Türker, T., Adanur, S. ve Akköse, M., 2008. Finite Element Model Updating of Fluid-Structure Interaction Systems using Operational Modal Analysis, Proceedings of the Fifth International Engineering and Construction Conference (IECC'5), August 27-29, Irvine, USA, 849-858.
- Bayraktar, A., Sevim, B., **Altunışık, A.C.**, Türker, T. ve Adanur, S., 2008. 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 15-17, Eastern Mediterranean University, Famagusta, North Cyprus (ACE08-158), Vol.3, pp.557-565.
- Bayraktar, A., Sevim, B., **Altunışık, A.C.** ve Türker, T., 2009. 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., Kartal, M.E., Türker, T. ve Bilici, Y., 2009. Comparison of Near and Far Fault Ground Motion Effects on the Nonlinear Response of Dam-Reservoir-Foundation Systems, Nonlinear Dynamics, 58, 655-673.
- Bayraktar, A., Sevim, B., **Altunışık, A.C.**, Türker, T., Kartal, M.E., Akköse, M. ve Bilici, Y., 2009. Comparison of Near and Far Fault Ground Motion Effects on the Seismic Performance Evaluation of Dam-Reservoir-Foundation Systems, Journal of Dam Engineering, 19, 1-39.
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Sevim, B. ve Türker, T., 2009. 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., 2009. Vibration Characteristics of Kömürhan Highway Bridge Constructed with Balanced Cantilever Method, Journal of Performance of Constructed Facilities, 23, 2, 90-99.
- Bayraktar, A., Türker, T., Sevim, B., **Altunışık, A.C.** ve Yıldırım, F., 2009. Modal Parameter Identification of Hagia Sophia Bell-Tower via Ambient Vibration Test, Journal of Nondestructive Evaluation, 28, 1, 37-47.
- Bayraktar, A., Birinci, F., **Altunışık, A.C.**, Türker, T. ve Sevim, B., 2009. 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., **Altunışık, A.C.**, Sevim, B., Türker, T. ve Domaniç, A., 2009. Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi, Teknik Dergi, 20, 2, 4675-4700.
- **Altunışık, A.C.**, Bayraktar, A., Sevim, B., Adanur, S. ve Domaniç, A., 2009. Karayolu Köprülerinin Sonlu Eleman Analizinde Yapım Aşamalarının ve Zamana Bağlı Deformasyonların Dikkate Alınması, Yapı Dünyası Dergisi, 161, 11-15.
- Bayraktar, A., Sevim, B., **Altunışık, A.C.** ve Akköse, M., 2009. Yakın ve Uzak Fay Yer Hareketlerinin Kemer Barajların Deprem Davranışına Etkisi, İkinci Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu 12-14 Mayıs, Eskişehir, Türkiye.
- Bayraktar, A., Sevim, B., **Altunışık, A.C.**, Adanur, S. ve Akköse, M., 2009. Experimental and Analytical Modal Analyses of A Prototype Arch Dam-Reservoir-Foundation Model, International Earthquake Symposium Kocaeli 2009, 17-19 August, Kocaeli, Turkey.
- Bayraktar, A., Türker, T., Şahin, A., **Altunışık, A.C.** ve Sevim, B., 2009. Betonarme Binalarda İnşa Aşamalarının Dinamik Karakteristiklere Etkisinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Sakarya International Symposium of Earthquake Engineering, 1-2 October, Sakarya, Turkey, 29-39.

- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Sevim, B. ve Türker, T., 2009. Kömürhan Köprüsünün Deprem Davranışına Sonlu Eleman Model İyileştirilmesinin Etkisi, Sakarya International Symposium of Earthquake Engineering, 1-2 October, Sakarya, Turkey, 119-129.
- **Altunışık, A.C.**, Bayraktar, A., Sevim, B., Domaniç, A. ve Adanur, S., 2009. Yapım Aşamaları Dikkate Alınarak Köprülerin Davranışlarının Belirlenmesi, Sakarya International Symposium of Earthquake Engineering, 1-2 October, Sakarya, Turkey, 209-219.
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Birinci, F., Sevim, B. ve Türker, T., 2009. Tarihi Şenyuva Köprüsünün Dinamik Karakteristiklerinin Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Sakarya International Symposium of Earthquake Engineering, 1-2 October, Sakarya, Turkey, 609-619.
- Adanur, S., Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.** ve Sevim, B., 2009. Asma Köprülerin Linear Olmayan Davranışına Askı Şekillerinin Etkisi, 3. Ulusal Çelik Yapılar Sempozyumu, 8-10 Ekim, Gaziantep, Türkiye, 335-343.
- **Altunışık, A.C.**, Sevim, B. ve Adanur, S., 2009. Kemer Taşıyıcı Sistemli Çelik Bir Köprünün Laboratuvar Modelinin Oluşturulması, 3. Ulusal Çelik Yapılar Sempozyumu, 8-10 Ekim, Gaziantep, Türkiye, 345-352.
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Sevim, B., Birinci, F., Özcan, M. ve Türker, T., 2009. Tarihi Mikron Köprüsünün Restorasyon Sonrası Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 2, 15-17 Ekim, Diyarbakır, Türkiye, 367-378.
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Sevim, B., Birinci, F., Özcan, M. ve Türker, T., 2009. Osmanlı Tarihi Çift Kemer Köprüsünün Deneysel Titreşim Verilerinin Elde Edilmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 2, 15-17 Ekim, Diyarbakır, Türkiye, 189-198.
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.** ve Sevim, B., 2009. İskenderpaşa Camii Minaresi ve Restorasyon Çalışmaları, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 2, 15-17 Ekim, Diyarbakır, Türkiye, 669-678.
- Bayraktar, A., Türker, T., **Altunışık, A.C.** ve Sevim, B., 2010. Evaluation of Blast Effects on Reinforced Concrete Buildings Considering Operational Modal Analysis Results, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30, 310-319.
- Bayraktar, A., Sevim, B., **Altunışık, A.C.** ve Türker, T., 2010. 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., 2010. 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., Sevim, B., **Altunışık, A.C.**, Adanur, S. ve Akköse, M., 2010. Ölçeklendirilmiş Bir Kemer Barajın Laboratuvar Modelinin Oluşturulması, DSİ Teknik Bülteni, 107, 1-13.
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Sevim, B. ve Türker, T., 2010. 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., Türker, T. ve Birinci, F., 2010. Tarihi Yapıların Deprem Güvenliklerinin Tahribatsız Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, İMO İstanbul Şubesi Bülteni, 107, 12-22.
- **Altunışık, A.C.**, Bayraktar, A., Sevim, B., Adanur, S. ve Kartal, M.E., 2010. Boundary Condition Effects on the Dynamic Characteristics of a Steel Bridge Model, 6th International Engineering and Construction Conference (IECC'6), 28-30 June, Cairo, Egypt.
- Adanur, S., **Altunışık, A.C.** ve Keskin, A., 2010. Comparison of Analysis Results of Footbridges using Steel and CFRP Materials, 6th International Engineering and Construction Conference (IECC'6), 28-30 June, Cairo, Egypt.
- **Altunışık, A.C.**, Bayraktar, A., Sevim, B. ve Ateş, Ş., 2010. Seismic Safety Evaluation of Bridges by Ambient Vibration Test, 21st European Regional Earthquake Engineering Seminar, Seismic Assessment and Retrofit of Bridges, 16-18 June, Istanbul, Turkey.
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Sevim, B. ve Ateş, Ş., 2010. Earthquake Safety Evaluation of Highway Bridges by Operational Modal Testing, 14th European Conference on Earthquake Engineering, 30 August-03 September, Ohrid, Macedonia.
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.** ve Sevim, B., 2010. Dynamic Characteristics of Concrete Highway Bridges using Experimental Measurements, 9th International Congress on Advances in Civil Engineering, 27-30 September, Trabzon, Turkey.
- Bayraktar, A., Sevim, B. ve **Altunışık, A.C.**, 2010. Structural Identification of Concrete Arch Dams by Ambient Vibration Testing, 9th International Congress on Advances in Civil Engineering, 27-30 September, Trabzon, Turkey.
- Bayraktar, A., Sevim, B., **Altunışık, A.C.**, Akköse, M. ve Adanur, S., 2010. Reservoir Water Length Effects on the Dynamic Characteristics of a Prototype Arch Dam, 9th International Congress on Advances in Civil Engineering, 27-30 September, Trabzon, Turkey.
- Sevim, B., Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Adanur, S. ve Akköse, M. 2010. Modal Parameter Identification of a Prototype Arch Dam using Enhanced Frequency Domain Decomposition And Stochastic Subspace Identification Techniques, Journal of Testing and Evaluation, 38, 5, (baskıda).

- Sevim, B., **Altunışık, A.C.**, Bayraktar, A., Akköse, M. ve Calayır, Y., 2010. Water Length and Height Effects on the Earthquake Behavior of Arch Dam-Reservoir-Foundation Systems. KSCE Journal of Civil Engineering, (baskıda).
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Sevim, B. ve Türker, T., 2010. Earthquake Behaviour of Kömürhan Highway Bridge using Validated Finite Element Model, Journal of Testing and Evaluation, (baskıda).
- Bayraktar, A., Türker, T., **Altunışık, A.C.**, Sevim, B., Şahin, A. ve Özcan, M., 2010. Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Teknik Dergi, (baskıda).
- Bayraktar, A., Sevim, B. ve **Altunışık, A.C.**, 2010. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi Kullanılarak Berke Barajı'nın Deprem Performansının Belirlenmesi, DSİ Teknik Bülteni, 108, (baskıda).
- Sevim, B., Bayraktar, A. ve **Altunışık, A.C.**, 2010. Finite Element Model Calibration of Berke Arch Dam using Operational Modal Testing, Journal of Vibration and Control, (baskıda).
- Sevim, B., Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Adanur, S. ve Akköse, M. 2010. Dynamic Characteristics of a Prototype Arch Dam, Experimental Mechanics, (baskıda).
- Şahin, A., Bayraktar, A., Özcan, D.M., Sevim, B., **Altunışık, A.C.** ve Türker, T. 2010. Dynamic Field Test, System Identification and Modal Validation of a RC Minaret: Pre and Post Processing the Wind-Induced Ambient Vibration Data, Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, (baskıda).
- Sevim, B., Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Adanur, S. ve Akköse, M. 2010. Determination of Water Level Effects on the Dynamic Characteristics of a Prototype Arch Dam Model Using Ambient Vibration Testing, Experimental Techniques, (baskıda).
- Sevim, B., Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Atamtürktür, S. ve Birinci, F. 2010. Assessment of Nonlinear Seismic Performance of a Restored Historical Arch Bridge using Ambient Vibrations, Nonlinear Dynamics, (baskıda).
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Birinci, F., Sevim, B. ve Türker, T., 2010. Finite Element Analysis and Vibration Testing of a Two-Span Masonry Arch Bridge, Journal of Performance of Constructed Facilities, (baskıda).
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Sevim, B. ve Türker, T., 2010. Seismic Response of a Historical Masonry Minaret using a FE Model Updated with Operational Modal Testing, Journal of Vibration and Control, (baskıda).
- Bayraktar, A., **Altunışık, A.C.**, Sevim, B. ve Türker, T., 2010. Ambient Vibration Tests of a Steel Footbridge, Journal of Nondestructive Evaluation, (baskıda).

- **Altunışık, A.C.**, Bayraktar, A., Sevim, B., Adanur, S. ve Domaniç, A., 2010. Construction Stage Analyses of Kömürhan Highway Bridge using Time Dependent Material Properties, Structural Engineering and Mechanics, (baskıda).
- **Altunışık, A.C.**, Bayraktar, A. ve Sevim, B., 2010. Output-Only System Identification of Post Tensioned Segmental Concrete Highway Bridges, Journal of Bridge Engineering, (baskıda).
- **Altunışık, A.C.**, Bayraktar, A., Sevim, B., Kartal, M.E. ve Adanur, S., 2010. Finite Element Model Updating of an Arch Type Steel Laboratory Bridge Model Using Semi-Rigid Connection, Steel and Composite Structures, (baskıda).