

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TAŞ KEMER KÖPRÜLERİN SONLU ELEMAN MODELLERİNİN
OPERASYONEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİYLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Müh. Fatma BİRİNCİ

**OCAK 2010
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TAŞ KEMER KÖPRÜLERİN SONLU ELEMAN MODELLERİNİN
OPERASYONEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİYLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

İnşaat Müh. Fatma BİRİNCİ

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“İnşaat Yüksek Mühendisi”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 31.12.2009
Tezin Savunma Tarihi : 28.01.2010**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Süleyman ADANUR
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Muzaffer DOĞAN**

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2010

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

Son yıllarda geçmiş dönemlere ait yapılara olan ilgideki artış, medeniyetimizin zenginliğini en iyi şekilde yansıtan taş kemer köprülerin önem kazanmasını sağlamıştır. Bu yapıların sorunlarını giderme amaçlı yapılacak olan çalışmalarda öncelikle köprülerin mevcut yapısal durumlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla da köprülerin sonlu eleman modelleri oluşturulmakta fakat modelleme sırasında veri eksikliklerinden dolayı bazı kabuller yapılmaktadır. Bu tezde, deneysel bir yöntem kullanılarak, bu kabullerin doğruluğu araştırılmış ve model iyileştirme işlemi ile bu yapıların gerçek davranışını yansıtan en iyi sonlu eleman modelinin oluşturulması amaçlanmıştır.

Tez konumu önererek, dekanlık gibi önemli bir görevi olmasına rağmen çalışmamın her aşamasını takip eden, bana olan güvenini her fırsatta belirterek beni sürekli teşvik edip destekleyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım yönetici Hocam Sayın Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR'a minnet ve şükranlarımı sunmayı bir görev sayarım.

Değerli zamanlarını ayırarak tezimi değerlendiren Sayın Yrd. Doç. Dr. Süleyman ADANUR'a ve Prof. Dr. Muzaffer DOĞAN'a teşekkür ederim. Öğrenim hayatı boyunca bana emeği geçen tüm hocalarımı saygıyla anar, kendilerine minnettar olduğumu belirtmek isterim. Üniversite hayatım boyunca beni teşvik eden ve bana olan güvenini her fırsatta hissettiğim Sayın Hocam Prof. Dr. Ragıp ERDÖL'e şükran ve saygılarımı sunmayı çok zevkli bir görev sayarım.

Çalışmamın çeşitli konularında yardımlarını gördüğüm Araş. Gör. Ahmet Can ALTUNIŞIK'a, Araş. Gör. Temel TÜRKER'e, Araş. Gör. Barış SEVİM'e ve Araş. Gör. D. Mehmet ÖZCAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca desteklerini arkamda hissettiğim annem Havva BİRİNCİ'ye ve babam Doç. Dr. Ahmet BİRİNCİ'ye müteşekkir olduğumu belirtir, bu tez çalışmasının benzer çalışmalara kaynak ve örnek teşkil etmesini ve Ülkemize yararlı olmasını içtenlikle dilerim.

Bu tez çalışmasından aşağıdaki yayınlar üretilmiştir:

- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., **Birinci, F.**, Sevim, B., Türker, T., Finite Element Analysis and Vibration Testing of a Two-Span Masonry Arch Bridge, Journal of Performance of Constructed Facilities, 2009, (accepted) (SCI).
- Bayraktar, A., **Birinci, F.**, Altunışık, A.C., Türker, T., Sevim, B., Finite Element Model Updating of Senyuva Historical Arch Bridge using Ambient Vibration Tests, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 4, 4 (2009) 177-185 (SCI).
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., **Birinci, F.**, Özcan, M., Türker, T., Osmanlı Tarihi Çift Kemer Köprüsünün Deneysel Titreşim Verilerinin Elde Edilmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 2, Ekim 2009, Diyarbakır, Bildiriler Kitabı, 189-198.

Fatma BİRİNCİ
Trabzon 2009

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
TABLolar DİZİNİ.....	IX
SEMBOLLER DİZİNİ.....	X
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Konuyla İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar.....	2
1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	4
1.4. Teorik Modal Analiz Yöntemi.....	6
1.4.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler.....	6
1.4.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler.....	10
1.5. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi.....	13
1.5.1. Kullanılan Test Aletleri	15
1.5.1.1. Titreştiriciler.....	15
1.5.1.2. Tepki Dönüştürücüler.....	18
1.5.1.3. Veri Toplama Sistemleri.....	20
1.5.2. Dinamik Karakteristikleri Belirleme Yöntemleri.....	21
1.5.2.1. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemi.....	22
1.5.2.2. Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemi.....	23
1.6. Sonlu Eleman Model İyileştirme Yöntemleri.....	26
1.7. Tarihi Yapıların Sonlu Eleman Modellenmesinde Kullanılan Yöntemler....	27
1.8. Tarihi Taş Köprüler.....	29
1.8.1. Taş Köprü Çeşitleri ve Bölümleri.....	31
1.8.2. Türkiye'deki Taş Kemer Köprü Örnekleri.....	37
1.8.3. Uygulama İçin Seçilen Tarihi Taş Kemer Köprülerin Özellikleri.....	45

1.8.3.1.	Şenyuva Köprüsü.....	45
1.8.3.2.	Osmanlı Köprüsü.....	48
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	52
2.1.	Tarihi Taş Kemer Köprülerin Teorik Modal Analizleri.....	52
2.1.1.	Şenyuva Köprüsü Teorik Modal Analizi.....	52
2.1.1.1.	Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli.....	52
2.1.1.2.	Dinamik Karakteristikleri.....	54
2.1.2.	Osmanlı Köprüsü Teorik Modal Analizi.....	56
2.1.2.1.	Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli.....	56
2.1.2.2.	Dinamik Karakteristikleri.....	56
2.2.	Tarihi Taş Kemer Köprülerin Operasyonel Modal Analizleri.....	59
2.2.1.	Şenyuva Köprüsü Deneysel Modal Analizi.....	61
2.2.1.1.	Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi.....	62
2.2.1.1.1.	Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemiyle Elde Edilen Dinamik Karakteristikler.....	62
2.2.1.1.2.	Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemiyle Elde Edilen Dinamik Karakteristikler.....	63
2.2.2.	Osmanlı Köprüsü Deneysel Modal Analizi.....	66
2.2.2.1.	Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi.....	66
2.2.2.1.1.	Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemiyle Elde Edilen Dinamik Karakteristikler.....	67
2.2.2.1.2.	Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemiyle Elde Edilen Dinamik Karakteristikler.....	68
2.3.	Deneysel ve Teorik Dinamik Karakteristiklerinin Karşılaştırılması.....	70
2.3.1.	Şenyuva Köprüsü Dinamik Karakteristiklerinin Karşılaştırılması.....	70
2.3.2.	Osmanlı Köprüsü Dinamik Karakteristiklerinin Karşılaştırılması.....	73
2.4.	Tarihi Taş Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin İyileştirilmesi.....	75
2.4.1.	Şenyuva Köprüsü Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi.....	75
2.4.2.	Osmanlı Köprüsü Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi.....	77
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	79
4.	KAYNAKLAR.....	82
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

Bu tez çalışmasında, taş kemer köprülerin dinamik karakteristikler olarak bilinen doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranlarının deneysel ve teorik olarak belirlenmesi ve köprülerin sonlu eleman modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.

Tez çalışması dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde yapı dinamik karakteristiklerini belirlemenin neden önemli olduğu ve hangi yöntemlerle belirlenebileceği ile ilgili genel bilgi verildikten sonra bu konu ile ilgili daha önce yapılan bazı çalışmalardan bahsedilmektedir. Daha sonra Teorik Modal Analiz Yöntemi ve bu yöntemde kullanılan formülasyonlar tek ve çok serbestlik dereceli sistemler için ayrı ayrı anlatılmaktadır. Bu bölümde, dinamik karakteristikleri deneysel olarak belirlemek için kullanılan Operasyonel Modal Analiz Yöntemi'nden, yöntemde kullanılan test aletlerinden bahsedilmektedir. Ayrıca, deneysel verilerin işlenip dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde kullanılan yöntemler ile ilgili formülasyonlar verilmektedir. Tarihi yapıların sonlu eleman modelleri oluşturulurken kullanılan yöntemler ve taş köprüler hakkında kısa bir özet verilmekte, son olarak da çalışmada uygulama olarak seçilen köprüler tanıtılmaktadır. İkinci bölümde, seçilen köprülerin sonlu eleman modelleri, deneysel ve teorik dinamik karakteristikleri verilmektedir. Deneysel ve teorik dinamik karakteristiklerin karşılaştırılması ve köprülerin sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesi aşamaları da bu bölüm içerisindedir. Üçüncü bölümde deneysel ve teorik analizler sonucunda elde edilen verilerin değerlendirilmesiyle ortaya çıkan sonuçlar ve öneriler sunulmaktadır. Son bölüm olan dördüncü bölümde ise, bu çalışmanın hazırlanması esnasında yararlanılan konu ile ilgili kaynaklar verilmektedir.

Çalışma sonunda, uygun ölçüm cihazları kullanılarak gerçekleştirilen Operasyonel Modal Analiz Yöntemi'nin, karmaşık geometrik ve malzeme özelliklerine sahip taş kemer köprülerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde ve sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesinde güvenle kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Operasyonel Modal Analiz, Dinamik Karakteristikler, Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi, Taş Kemer Köprüler

SUMMARY

Finite Element Model Updating of Stone Arch Bridges Using Operational Modal Analysis

One of the purposes of this thesis is to obtain natural frequencies, mode shapes and damping ratios called dynamic characteristics of stone arch bridges as experimental and theoretical. The other purpose is to update the finite element model of stone arch bridges by using Operational Modal Analysis Method.

This thesis consists of four chapters. In the first chapter, general information about why is important to determine dynamic characteristics of structures and which methods can be used to obtain these is given. After that some studies which have been made about this subject previously are presented. In addition these, Theoretical Modal Analysis Method and the formulations used in this method are explained for one and multi degree of freedom systems separately. In this chapter, Operational Modal Analysis Method, the equipments used in this method and testing procedures are given. Also, formulations used to obtain experimental dynamic characteristics have been given. Finally, the methods are used to generate finite element model of the historical structures and a little information about stone arch bridges are presented. In the second chapter, finite element models, experimental and theoretical dynamic characteristics of selected bridges have been given. After analytically and experimentally identified dynamic characteristics are compared with each other, the finite element models are updated in this chapter. In the third chapter, conclusions and recommendations obtained from the experimental and theoretical analysis have been given. In the last chapter which is the fourth, the references used in this thesis are presented.

In the end of this study, it has been seen that Operational Modal Analysis method which carried out by adequate measuring devices and equipments can be apply to obtain dynamic characteristics and to update finite element models of stone arch bridges which have sophisticated geometric features, material types, complex dynamic behaviour.

Key Words: Operational Modal Analysis, Dynamic Characteristics, Finite Element Model Updating, Stone Arch Bridges

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1.	TSDS teorik modeli6
Şekil 1.2.	TSDS serbest cisim diyagramı.....7
Şekil 1.3.	ÇSDS sönümsüz serbest teorik modeli.....10
Şekil 1.4.	Deneyisel modal analiz13
Şekil 1.5.	Operasyonel modal analiz.....14
Şekil 1.6.	Çeşitli sarsıcılar16
Şekil 1.7.	Yaygın olarak kullanılan çekiç türü17
Şekil 1.8.	Farklı modellerdeki darbe çekiçleri17
Şekil 1.9.	Tokmak sistemi18
Şekil 1.10.	Üç eksenli ivmeölçer19
Şekil 1.11.	Tek eksenli piezoelektrik bir ivmeölçer19
Şekil 1.12.	Piezoelektrik ivmeölçer şematik gösterimi20
Şekil 1.13.	Brüel&Kjaer 3560-C veri toplama ünitesi21
Şekil 1.14.	Değişik dizilişlere sahip taş yığma şekilleri27
Şekil 1.15.	Makro modelleme28
Şekil 1.16.	Basitleştirilmiş mikro modelleme29
Şekil 1.17.	Detaylı mikro modelleme29
Şekil 1.18.	Şematik olarak taş kemer köprü yapım şekli31
Şekil 1.19.	Biçimlerine göre taş köprüler32
Şekil 1.20.	Açıklık sayılarına göre taş köprüler33
Şekil 1.21.	Planına göre taş köprüler33
Şekil 1.22.	Kesik köprüler34
Şekil 1.23.	Üzerinde odacıklar bulunan köprüler34
Şekil 1.24.	Kemer biçimlerine göre köprüler34
Şekil 1.25.	Selyaran biçimlerine göre köprüler35
Şekil 1.26.	Döşeme kısmı basamaklı köprüler36
Şekil 1.27.	Kemer köprü bölümleri36
Şekil 1.28.	Tarihi köprülerin buldukları yollara göre dağılımı38

Şekil 1.29.	Cendere Köprüsü, Adıyaman	38
Şekil 1.30.	Misis Köprüsü, Adana	39
Şekil 1.31.	Beş Köprü, Sakarya	39
Şekil 1.32.	Malabadi Köprüsü, Diyarbakır	40
Şekil 1.33.	Akköprü, Ankara	40
Şekil 1.34.	Kesik Köprü, Kırşehir	41
Şekil 1.35.	Uzunköprü, Edirne	42
Şekil 1.36.	Meriç Köprüsü, Edirne	42
Şekil 1.37.	Babaeski Köprüsü, Kırklareli	42
Şekil 1.38.	Çifte Köprü, Artvin	43
Şekil 1.39.	Şenyuva Köprüsü doğu kanadı	45
Şekil 1.40.	Şenyuva Köprüsü batı kanadı	46
Şekil 1.41.	Şenyuva Köprüsü mansap görünüşü	46
Şekil 1.42.	Şenyuva Köprüsü memba görünüşü	46
Şekil 1.43.	Şenyuva Köprüsü kesit özellikleri	47
Şekil 1.44.	Osmanlı Köprüsü memba görünüşleri	48
Şekil 1.45.	Osmanlı Köprüsü mansap görünüşleri	49
Şekil 1.46.	Güneybatı yönündeki boşaltma gözü	50
Şekil 1.47.	Osmanlı Köprüsü kesit özellikleri	51
Şekil 2.1.	Şenyuva taş kemer köprüsü sonlu eleman modeli	54
Şekil 2.2.	Şenyuva Köprüsü teorik dinamik karakteristikleri	55
Şekil 2.3.	Osmanlı taş kemer köprüsü sonlu eleman modeli	56
Şekil 2.4.	Osmanlı Köprüsü teorik dinamik karakteristikleri	58
Şekil 2.5.	Brüel Krajer 8340 tek eksenli ivmeölçer	59
Şekil 2.6.	Brüel Krajer 3650 veri toplama ünitesi	60
Şekil 2.7.	Yatay ve düşey yönde yerleştirilen ivmeölçerler	60
Şekil 2.8.	Şenyuva Köprüsü üzerindeki ivmeölçerlerin şematik yerleşim düzeni.....	61
Şekil 2.9.	Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma Yöntemi ile elde edilen tekil değerler	62
Şekil 2.10.	Stokastik Altalan Belirleme Yöntemi ile elde edilen yığılımlı tekil değerler	63
Şekil 2.11.	Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma ve Stokastik Altalan Yöntemleri kullanılarak elde edilen Şenyuva köprüsü deneysel mod şekilleri.....	65

Şekil 2.12.	Osmanlı Köprüsü üzerindeki ivmeölçerlerin şematik yerleşim düzeni.....	66
Şekil 2.13.	Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemi ile birinci ölçüm sonucunda elde edilen tekil değerler.....	67
Şekil 2.14.	Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemi ile ikinci ölçüm sonucunda elde edilen tekil değerler.....	67
Şekil 2.15.	Stokastik Altalan Belirleme Yöntemi ile birinci ölçüm sonucunda elde edilen yığışımlı tekil değerler.....	68
Şekil 2.16.	Stokastik Altalan Belirleme Yöntemi ile ikinci ölçüm sonucunda elde edilen yığışımlı tekil değerler	79
Şekil 2.17.	Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma ve Stokastik Altalan Belirleme Yöntemleri kullanılarak elde edilen Osmanlı köprüsü deneysel mod şekiller	70
Şekil 2.18.	Şenyuva Köprüsü teorik ve deneysel mod şekilleri	72
Şekil 2.19.	Osmanlı Köprüsü teorik ve deneysel mod şekilleri	74
Şekil 2.20.	Şenyuva Köprüsü yan duvarlarındaki mesnetleşmeler	76
Şekil 2.21.	Osmanlı Köprüsü yan duvarlarındaki mesnetleşmeler	77

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Doğu Karadeniz köprülerinden bazıları ve temel özellikleri.....	44
Tablo 2.1. Taş kemer köprü teorik analizinde kullanılan malzeme özellikleri.....	53
Tablo 2.2. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma Yöntemi ile elde edilen dinamik karakteristikler.....	63
Tablo 2.3. Stokastik Altalan Belirleme Yöntemi ile elde edilen dinamik karakteristikler.....	64
Tablo 2.4. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma Yöntemi ile elde edilen dinamik karakteristikler.....	68
Tablo 2.5. Stokastik Altalan Belirleme Yöntemi ile elde edilen dinamik karakteristikler.....	69
Tablo 2.6. Şenyuva Köprüsü deneysel ve teorik doğal frekanslarının karşılaştırılması.....	71
Tablo 2.7. Osmanlı Köprüsü deneysel ve teorik doğal frekanslarının karşılaştırılması.....	73
Tablo 2.8. Şenyuva Köprüsü model iyileştirilmesinden sonraki teorik ve deneysel dinamik karakteristikler.....	76
Tablo 2.9. Osmanlı Köprüsü model iyileştirilmesinden sonraki teorik ve deneysel dinamik karakteristikler.....	78

SEMBOLLER DİZİNİ

a_k	: Ayrık zaman durum vektörü
A_s	: Sabit değer
$\{A\}$: Genlik vektörü
$\{A_r\}$: Öz vektör
A_k	: Rezidü matrisi
$\{A_c\}$: Durum matrisi
A	: Ayrık durum matrisi
B_s	: Sabit değer
$[B(t)]$: Etki matrisi
B	: Ayrık etki matrisi
c	: Sönüm katsayısı
C_1	: Sabit değer
C_2	: Sabit değer
$[C]$: Sönüm matrisi
C_r	: Sabit değer
C_a	: İvme olarak elde edilen tepki matrisi
C_v	: Hız olarak elde edilen tepki matrisi
C_d	: Yer değiştirme olarak elde edilen tepki matrisi
d_k	: Sabit değer
D	: Direk iletim matrisi
E	: Tepki matrisi
F_I	: Atalet kuvveti
F_D	: Sönüm kuvveti
F_S	: Kütle hareketlerinden dolayı yayda oluşan kuvvet
$F(t)$: Uygulanan dış kuvvet
f	: Frekans

$\{F(t)\}$: Kuvvet vektörü
$G_{xx}(\omega)$: Etki sinyaline ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu
$G_{yy}(\omega)$: Tepki sinyaline ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu
GFOA	: Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma
$H(\omega)$: Frekans davranış fonksiyonu
$[I]$: Birim diyagonal matris
k	: Yay katsayısı
$[K]$: Rijitlik matrisi
$[K_r]$: Genelleştirilmiş rijitlik matrisi
m	: Yapının kütlesi
$[M]$: Kütle matrisi
$[M_r]$: Genelleştirilmiş kütle matrisi
OMA	: Operasyonel Modal Analiz
SAAB	: Stokastik Alt Alan Belirleme
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
s	: Sabit değer
s_{ij}	: Tekil değer
S_i	: s_{ij} tekil değerlerinden oluşan diyagonal matris
T	: Periyot
u_{ij}	: Tekil vektör
U_i	: u_{ij} tekil vektörlerinden oluşan birim matris
$\{u(t)\}$: Durum vektörü
v_k	: Sensör hatalarından meydana gelen gürültü sinyali
ω	: Sönümsüz doğal açısal frekans
w_k	: Arızalardan ve hatalardan dolayı meydana gelen gürültü sinyali
$x(t)$: Kütlenin yer değiştirmesi
$\dot{x}(t)$: Kütlenin hızı
$\ddot{x}(t)$: Kütlenin ivmesi
x_0	: Başlangıç yer değiştirmesi

\dot{x}_0	: Başlangıç hızı
$\{x(t)\}$: Yer değiştirme vektörü
$\{\dot{x}(t)\}$: Hız vektörü
$\{\ddot{x}(t)\}$: İvme vektörü
$y(t)$: Tepki sinyali
$\{\phi\}_r$: Modal vektör
$[\Phi]$: Modal matris
ψ_k	: Mod Şekil vektörü
λ_r	: Öz değer

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Titreşim olayını anlamak araştırmacılar ve mühendisler için daima önemli bir olay olmuştur. Mühendislik yapıları deprem, rüzgâr, dalga ve patlama gibi hareketlerden dolayı engellenemez titreşim etkilerine maruz kalmaktadırlar. Bu titreşimler meydana gelirken yapı doğal frekansı ile yapıyı etkileyen titreşimin frekansının eşit olması halinde rezonans olayı meydana gelmektedir. Rezonans olayının sonucu olarak yapılar çok büyük gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu gerilmeler yapılarda büyük hasarlara ya da yapıların yıkılmasına neden olmaktadır. Yapılara etki eden titreşimlerin engellenmesinin imkânsız olmasından dolayı, yapıların bu etkilere karşı göstermiş oldukları dinamik davranışların belirlenmesi ve ona uygun önlemlerin alınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır [1]. Yapıların dinamik davranışlarını anlamak onların dinamik karakteristikleri ya da modal parametreleri olarak bilinen sönüm oranları, mod şekilleri ve doğal frekanslarını belirlemekle mümkün olmaktadır. Günümüzde yapı dinamik karakteristiklerini belirlemek için teorik ve deneysel yöntemler kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan teorik yöntem Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) olurken, bunun tamamlayıcısı olan deneysel yöntem ise Operasyonel Modal Analiz (OMA) Yöntemi'dir.

Teorik yöntem olarak kullanılan Sonlu Elemanlar Yöntemi ile bir yapının sonlu eleman modeli oluşturulurken yapı malzeme özelliklerinden sınır şartlarına kadar pek çok kabul yapılmaktadır. Bu kabullerin sonucu olarak elde edilen model, gerçek modeli dolayısı ile yapının gerçek dinamik davranışını tam anlamıyla doğru şekilde temsil edemez. Bu problemlerden dolayı teorik modeller deneysel yöntemler kullanılarak doğrulanmalıdırlar.

Modern toplumların temel problemlerinden biri de tarihi değere sahip yapıların korunmasıdır. Tarihi önemlerinin yanında, bu eserler mimari çekicilikleriyle buldukları şehirlerin dolayısı ile ülkelerin ekonomilerine katkı sağlarlar. Turizm, ülkelerin temel ekonomik kaynaklarından birisidir ve özellikle son yıllarda kültür turizmine olan ilgi artmıştır. Bu nedenle tarihi yapıların korunmasının gerekliliği sadece kültürel bir ihtiyaç değil, aynı zamanda ekonomik gelişmeye yönelik bir eylemdir [2]. Bu yapılar günümüze kadar ulaşma sürecinde trafik, rüzgâr yükleri, deprem hareketleri vb. dinamik etkilere

maruz kalmışlardır ve ayakta kalabilmeleri için önlemler alınması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bunu sağlamak için de onların mevcut yapısal davranışları çok iyi belirlenmelidir. Tarihi yapıların gerçek davranışlarını öğrenmek için onların sahip oldukları dinamik karakteristiklerin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Özellikle tarihi yapılar gibi karmaşık yapılarda malzeme özelliklerinin tam anlamıyla doğru belirlenmesindeki sıkıntılar nedeniyle bu yapıların gerçek davranışları dolayısı ile dinamik karakteristikleri (doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları) Sonlu Elemanlar Yöntemi ile kesin olarak belirlenememektedir. Bu yüzden teorik olarak elde edilen bu karakteristiklerin deneysel ölçümlere dayanan Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile doğrulanması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

1.2. Konuyla İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Bu çalışmada, tarihi taş kemer köprüler ile ilgili daha önce yapılmış teorik ve deneysel çalışmalara yer verilmektedir.

Araştırmacılar ilk olarak, köprü teorik modelleri ve bu modeller üzerinde yapılan teorik analizler konusunu araştırmaya başlamışlardır. Bu amaçla Frunzio vd. [3] tarihi taş kemer bir Roma köprüsünün 3-boyutlu sonlu eleman modelini oluşturmuş, teorik analizlerini gerçekleştirmiş ve dolgu duvarlar ve kemer üstü dolgu duvarlarındaki lineer olmayan malzeme davranışlarını incelemişlerdir. Karaveziroğlu vd. [4] iki farklı teorik yöntem kullanarak tarihi taş kemer köprülerin statik analizlerini gerçekleştirmiş ve her iki yöntemden elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ve ayrık sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonuç olarak her iki yöntemden elde edilen sonuçların uyum içinde oldukları fakat sonlu elemanlar yönteminin taş köprü analizleri için daha uygun bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır. Toker ve Ünay [5] farklı yük durumları altında örnek bir tarihi kemer köprüünün teorik modelleme teknikleri üzerinde çalışmışlar ve yığma yapım tekniğiyle inşa edilmiş yapılar için en iyi hesap yönteminin sonlu elemanlar yöntemi olduğu sonucuna varmışlardır. Ural [6] sonlu elemanlar yönteminin kemer tipindeki yığma köprülerin yapısal analizlerinde de kullanılabileceği konusunda bir araştırma yapmıştır. Bu amaçla taş kemer bir köprüünün, önce statik olarak kendi ağırlından dolayı oluşan gerilme ve şekil değiştirmeleri hesaplanmış ve köprüünün üzerindeki yükleri güvenle taşıyabildiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca modelin lineer elastik deprem davranışı da incelenmiştir. Fanning vd. [7] tek

açıklıklı taş kemer bir köprünün 3 boyutlu sonlu eleman modeli oluşturmuş ve lineer olmayan analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Modelleme stratejisi köprünün servis yükleri altında gerçekleştirilirken, teorik model sonuçları bu modelleme tekniğinin yüksek yük seviyelerinde de kullanılabileceğini kanıtlamıştır. Oliveira vd. [8] bir yenileme çalışması kapsamında 20. yüzyılda inşa edilen yığma kemer bir köprünün mevcut durumunu araştırmak için üç farklı yük durumu altında köprü davranışlarını incelemişlerdir. Sonuçta deneysel çalışmalar olmadan oluşturulan lineer olmayan bir sonlu eleman modelinin yapının gerçek davranışını tam olarak temsil edemeyeceği sonucuna varmışlardır.

Araştırmacılar daha sonra yığma yapılar için oluşturdukları sonlu eleman modellerinin, yapıların gerçek davranışlarını ne kadar iyi yansıttığı konusunda araştırmalara başlamışlardır. Bu amaçla pek çok deneysel yöntem geliştirmişlerdir. Bunların içinde en etkili olanlardan bir tanesi de Deneysel Modal Analiz yöntemidir. Fanning vd. [9] 3 adet tarihi kemer köprünün sonlu eleman analizlerini ve çevresel etkilerin kullanıldığı Operasyonel Modal Analiz Yöntemi'ni kullanarak deneysel analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Köprülerin 3-boyutlu lineer olmayan sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Bu tarihi köprüler servis yükleri altında modellenmiş ve teorik modelden elde edilen sonuçlar çevresel titreşim testleriyle karşılaştırılmıştır. Aoki vd. [10] Japonya'daki 3 açıklıklı Rakanji taş kemer köprüsünün deneysel ve teorik dinamik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla ilk olarak sonlu eleman modelini oluşturmak için ihtiyaç duyulan köprü malzeme özelliklerini belirleme testleri gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak köprü 3-boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve yapılan analizler sonucunda köprü teorik mod şekilleri ile doğal frekansları hesaplanmıştır. Daha sonra köprü üzerinde çeşitli ölçüm noktalarından, çevresel titreşimlerin neden olduğu ivme ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen bu deneysel veriler yardımıyla köprü deneysel dinamik karakteristiklerini belirlemişlerdir. Deneysel yöntemde mod şekilleri ve doğal frekansları hesaplamak için zaman tanım alanındaki veri işleme yöntemleri kullanılmıştır. Son olarak elde edilen deneysel ve teorik dinamik karakteristikler karşılaştırılmış ve aralarındaki uyum gözlemlenmiştir. Beconcini vd. [11] 5 açıklıklı tarihi bir taş kemer köprünün dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi konusunda çalışmışlardır. Başlangıç olarak köprünün sonlu eleman modeli yapılmış ve teorik sonuçları doğrulamak için operasyonel modal analiz uygulanmıştır. Bayraktar vd. [12] Operasyonel Modal Analiz yöntemini kullanarak tarihi bir köprünün dinamik karakteristiklerini belirlemişlerdir. Köprünün sonlu eleman modeli, sınır şartlarındaki değişimler göz önünde tutularak, deneysel sonuçlar

yardımıyla iyileştirilmiş böylece tarihi köprünün mevcut yapısal davranışı elde edilmiştir. Bu çalışmada malzeme özellikleri ve sınır şartlarının gerçek sonlu eleman modelini elde etmede çok önemli faktörler olduğu kanıtlanmıştır. Literatürde bu konu ile ilgili yapılan bir başka çalışma Brencich ve Sabia [13] tarafından yapılmıştır ve bu çalışmada 1866 yılında inşa edilen 18 açıklıklı tarihi Tanaro köprüsü servis yükleri için farklı hasar durumları altında incelenmiştir. Çalışmada ilk olarak köprü malzeme özelliklerini belirlemek amacıyla yassı veren testi, sonik test ve Schmidt darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Malzeme testlerinden elde edilen verilerle köprü için 5 farklı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur ve teorik mod şekilleri ile doğal frekansları bu modeller için hesaplanmıştır. Daha sonra köprünün tamamında, 2 açıklığında ve dolgu duvarların olmadığı durumlarda, ivmeölçerler kullanılarak köprünün dinamik testleri gerçekleştirilmiş ve her bir durum için doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda dinamik testler sonucunda köprü dinamik karakteristikleri doğru olarak belirlenmek isteniyorsa köprünün büyük bir kısmının incelenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Diğer bir çalışmada Ramos vd. [14] yığma bir kemeri laboratuvar ortamında modellemiş ve hasar analizlerini gerçekleştirmişlerdir. İlk aşamada prototip kemerin hasarsız durumda dinamik analizleri gerçekleştirilmiş, daha sonra aşamalı olarak hasara maruz bırakılarak her bir aşama için tekrar dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Sonuçta benzer bir çalışmanın gerçek bir yapıya uygulanması durumunda titreşim tabanlı hasar tespit tekniklerinin tarihi öneme sahip yığma yapıların korunmasında etkili olabileceği sonucuna varılmıştır.

1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın yapılmasında iki amaç esas alınmıştır. Bu amaçlardan biri, Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak tarihi taş kemer köprülerin deneysel ve teorik dinamik karakteristiklerini belirlemektir. Diğeri ise tarihi köprülerin sonlu eleman modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak iyileştirilebileceğini, başka bir deyişle tarihi köprülerin mevcut davranışlarını en iyi şekilde yansıtabilecek olan sonlu eleman modellerini elde edebilmek için Operasyonel Modal Analiz Yöntemi'nin gerekliliğini ve uygulanabilirliğini göstermektir. Bu düşünce esas alınarak uygulama olarak tek kemer ve çift kemer açıklıklı Şenyuva ve Osmanlı tarihi taş kemer köprüleri seçilmiştir.

Çalışmanın ilk bölümü olan “Genel Bilgiler” başlığı, Teorik Modal Analiz Yöntemi ve Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile bu yöntemde kullanılan test aletleri hakkında bilgileri ve her iki yönteme ait formülasyonları kapsamaktadır. Bu bölümde ayrıca tarihi yapıların sonlu eleman modellenmesinde kullanılan yöntemler ile tarihi taş köprüler hakkında bilgiler verilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünü oluşturan “Yapılan Çalışmalar” başlığı altında ise ilk olarak her iki taş kemer köprünün ANSYS [15] programı kullanılarak 3-boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve bu modellerin teorik analizleri yapılarak köprülere ait teorik mod şekilleri ve doğal frekans değerleri belirlenmiştir. Teorik analizlerde 3 boyutlu katı elemanlar kullanılarak oluşturulan modellerin sadece modal analizleri yapılmıştır.

Daha sonra her iki köprü üzerinde Operasyonel Modal Analiz yöntemi gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçümlerde titreştirici olarak yaya hareketleri ve rüzgâr yükleri kullanılmıştır ve köprülerin bu etkilere vermiş olduğu tepkiyi ölçmek için Brüel Krajer 8340 tek eksenli ivmeölçerler, ivmeölçerlerden elde edilen sinyalleri toplamak için ise 17 kanallı Brüel Krajer 3650 veri toplama ünitesi kullanılmıştır. Ölçüm süresi, frekans aralığı ve etkin mod sayısı benzer çalışmalardan ve literatüre uygun olarak seçilmiştir. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerinden elde edilen veriler frekans ortamında Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) ve zaman ortamında Stokastik Alt Alan Belirleme (SAAB) Yöntemleri kullanılarak işlenmiş ve köprülerin deneysel dinamik karakteristikleri elde edilmiştir.

Çalışmada, köprülerin deneysel ve teorik olarak elde edilen doğal frekanslar ve mod şekilleri ayrı ayrı olmak üzere birbirleriyle karşılaştırılmış, bu karşılaştırma sonucunda deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki farklılıklar gösterilmiş ve bu farklılıkların nedenleri konusunda bilgiler verilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümde son olarak deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki farklılıkları en aza indirecek şekilde köprünün sonlu eleman modeli sınır şartlarındaki değişim göz önüne alınarak iyileştirilmiştir. Tarihi taş kemer köprülerin gerçek davranışlarını elde etmede teorik modelin, Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak iyileştirilmesinin gerekliliği, elde edilen diğer sonuçlar ve öneriler çalışmanın son bölümü olan “Sonuçlar ve Öneriler” başlığı altında sunulmuştur.

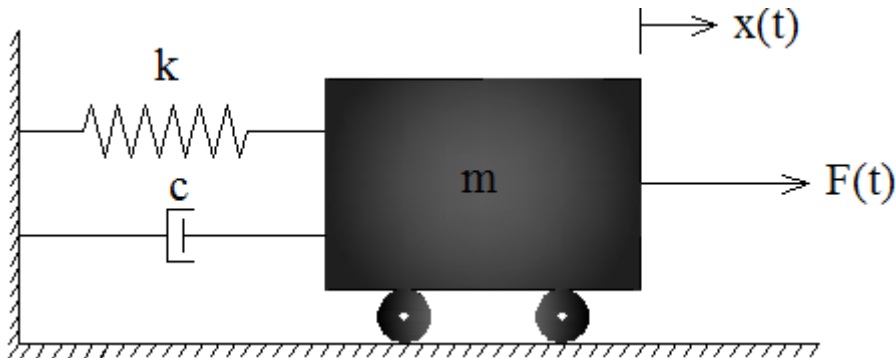
1.4. Teorik Modal Analiz Yöntemi

Bir yapıya ait dinamik karakteristikler olan doğal frekanslar, sönüm oranları ve yapısal deformasyonuna bağlı bir değer olan mod şekillerinin belirlenmesi için yapılan deneysel ve teorik çalışmalara modal analiz denir. Modal analizleri anlayabilmek için öncelikle titreşim teorisini bilmek gerekmektedir. Bir sistemin, başlangıç şartları veya uygulanan dış yükler etkisi altında göstermiş olduğu tepkiye titreşimi denir. Serbest titreşim ve zorlanmış titreşim olmak üzere iki temel titreşim vardır. Bir başlangıç şartı (başlangıç yer değiştirmesi ve/veya başlangıç hızı) ile başlayan ve sonra serbestçe salınmaya bırakılan sistemlerde oluşan titreşime serbest titreşim, değişen dış yükler sisteme uygulandığında meydana gelen titreşime ise zorlanmış titreşim denir.

Bu çalışmanın temelinde sönümsüz serbest titreşim olduğu için öncelikle Tek Serbestlik Dereceli Sistemler'in (TSDS) serbest titreşimi, sonra da Çok Serbestlik Dereceli Sistemler'in (ÇSDS) serbest titreşim teorisi anlatılacaktır.

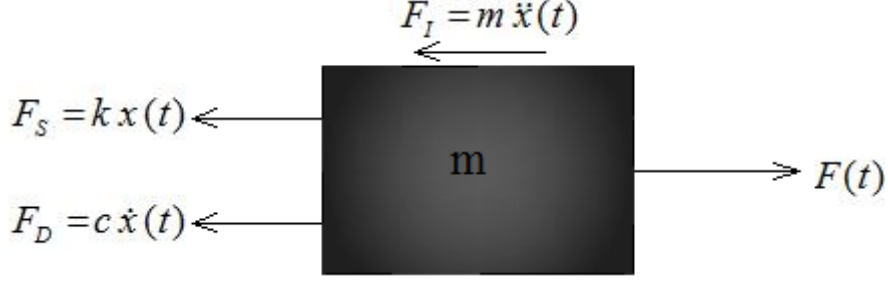
1.4.1. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

Pratikteki yapılar çok serbestlik dereceli olmalarına rağmen bu sistemlerin çözümleri tek serbestlik dereceli sistemlerin birleşimi ile elde edilir. Titreşim analizleri basit bir kütle-yay modeli incelenerek anlaşılabilir. Tek serbestlik dereceli sistemler için teorik model Şekil 1.1'de verilmektedir.



Şekil 1.1. TSDS teorik modeli

Şekil 1.1'deki teorik model kullanılarak elde edilen serbest cisim diyagramı Şekil 1.2'de gösterilmektedir.



Şekil 1.2. TSDS serbest cisim diyagramı

Şekil 1.2'deki serbest cisim diyagramı üzerinden denge denklemi yazılarak,

$$F_I + F_D + F_S = F(t) \quad (1)$$

elde edilir. (1) nolu denklemde gerekli ifadeler yerine yazılırsa TSDS için genel hareket denklemi,

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + k x(t) = F(t) \quad (2)$$

olarak elde edilir. (1) ve (2) nolu denklemlerdeki, F_I atalet kuvveti, F_D sönüm kuvveti, F_S yaydaki elastik şekil değişiminden dolayı yayda oluşan kuvveti, m yapının kütlesi, c sönüm katsayısı, k yay katsayısı, $\ddot{x}(t)$ kütlelin ivmesi, $\dot{x}(t)$ kütlelin hızı, $x(t)$ kütlelin yer değiştirmesi, $F(t)$ uygulanan dış kuvvet olarak adlandırılır. Bu çalışmanın konusu olan sönümsüz serbest titreşim hareket denklemi için ise genel hareket denklemi olan (2) nolu denklemdeki sönüm sabiti $c=0$ ve titreşime başlangıç şartlarının neden olduğu düşünülerek de uygulanan dış kuvvet $F(t) = 0$ kabul edilmektedir. (2) nolu denklem bu şartlar altında düzenlenirse, TSDS için sönümsüz serbest titreşim hareket denklemi,

$$m \ddot{x}(t) + k x(t) = 0 \quad (3)$$

olarak elde edilir. Denklem (3) düzenlenirse,

$$\ddot{x}(t) + \omega^2 x(t) = 0 \quad (4)$$

ve buradan da

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

elde edilir. (5) nolu denklemdeki ω , sönümsüz doğal açısal frekanstır. (4) nolu denklem ikinci dereceden adi bir homojen diferansiyel denklem olduğu için çözüm [16],

$$x(t) = C e^{st} \quad (6)$$

şeklinde aranır. Buradaki C ve s değerleri sabit değerlerdir. Bu ifade, (3) nolu denkleme göre türetilirse,

$$\ddot{x}(t) = C s^2 e^{st} \quad (7)$$

ifadesi bulunur. Denklem (6) ve (7), (4) nolu denklemde yerine yazılıp, denklem yeniden düzenlenirse aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$C e^{st} (m s^2 + k) = 0 \quad (8)$$

Burada $C \neq 0$ ve $e^{st} \neq 0$ olduğu için,

$$(m s^2 + k) = 0 \Rightarrow s_{1,2} = \mp i \sqrt{\frac{k}{m}} = \mp i \omega \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} x_1(t) &= C_1 e^{s_1 t} = C_1 e^{i \omega t} \\ x_2(t) &= C_2 e^{s_2 t} = C_2 e^{-i \omega t} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemde görülen C_1 ve C_2 keyfi sabitlerdir. Sistem lineer olarak dikkate alındığında toplam davranış,

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) = C_1 e^{i \omega t} + C_2 e^{-i \omega t} \quad (11)$$

olarak elde edilir. Denklem (11)'e aşağıdaki Euler formülü,

$$\left. \begin{aligned} e^{i \omega t} &= \cos(\omega t) + i \sin(\omega t) \\ e^{-i \omega t} &= \cos(\omega t) - i \sin(\omega t) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

uygulanıp ve düzenlenirse sistemin yer değiştirmesi,

$$x(t) = A_s \cos(\omega t) + B_s \sin(\omega t) \quad (13)$$

olarak elde edilir. Bu ifadede görülen A_s ve B_s sabit değerler olup aşağıdaki denklemlerde görüldüğü gibi tanımlanır.

$$\left. \begin{aligned} A_s &= C_1 + C_2 \\ B_s &= i(C_1 - C_2) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} x(0) &= x_0 \\ \dot{x}(0) &= \dot{x}_0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

başlangıç şartları kullanılarak, (13) nolu denklem yeniden düzenlenirse sistem davranışı,

$$x(t) = A_s \cos(\omega t) + B_s \sin(\omega t) = x_0 \cos(\omega t) + \frac{\dot{x}_0}{\omega} \sin(\omega t) \quad (16)$$

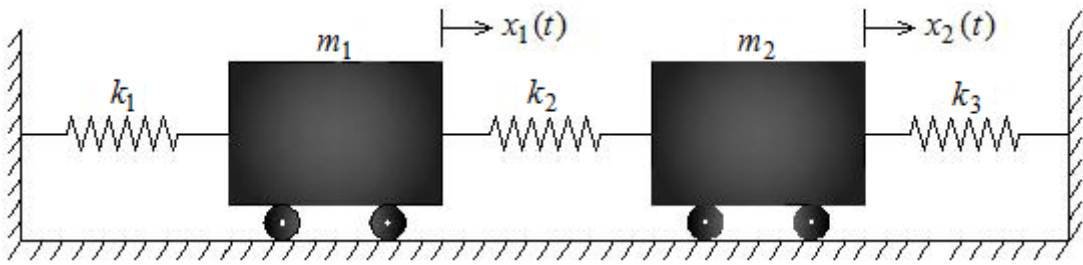
olarak elde edilir [16].

1.4.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

Gerçekte sistemlerin çoğu çok serbestlik dereceli sistemlerdir. Her serbestlik derecesi bir hareket denklemi ve doğal frekansa karşılık gelir. Tek serbestlik dereceli sistemlerin titreşimindeki skaler değerlerin yerini, çok serbestlik dereceli sistemlerde vektörel ve matris büyüklükler alır. Çok serbestlik dereceli sistemlerde genel hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (17)$$

dir. Burada, $[M]$ kütle matrisi, $[C]$ sönüm matrisi, $[K]$ rijitlik matrisi, $\{x(t)\}$ yer değiştirme vektörü, $\{\dot{x}(t)\}$ hız vektörü, $\{\ddot{x}(t)\}$ ivme vektörü, $\{F(t)\}$ kuvvet vektörüdür. Bu çalışmada sönümsüz serbest titreşim kullanıldığı için bu bölümde çok serbestlik dereceli sistemlerin sönümsüz serbest titreşiminden bahsedilecektir. Bunun için sönüm matrisi $[C] = 0$ ve kuvvet vektörü $\{F(t)\} = 0$ kabul edilecektir. Çok serbestlik dereceli sistemleri temsil etmek amacıyla iki serbestlik dereceli bir sistemin sönümsüz serbest kütle-yay teorik modeli Şekil 1.3'te verilmiştir.



Şekil 1.3. ÇSDS sönümsüz serbest teorik modeli

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

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (18)$$

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

$$\{x(t)\} = \{A\} \sin(\varphi + \omega t) \quad (19)$$

olduğu varsayılır [16]. Burada; $\{A\}$, zamana bağlı olmayan bir vektör olup genlik vektörü olarak adlandırılır. (19) nolu denklem türetilip, (18) nolu denklemde yerine yazılacak olursa,

$$-\omega^2 [M] \{A\} \sin(\omega t + \varphi) + [K] \{A\} \sin(\omega t + \varphi) = \{0\} \quad (20)$$

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

$$[[K] - \omega^2 [M]] \{A\} = \{0\} \quad (21)$$

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

$$[[D] - \lambda [I]] \{A\} = \{0\} \quad (22)$$

standart öz değer problemi elde edilir [16]. Burada,

$$[D] = [M]^{-1} [K] \quad (23)$$

dır. $[I]$ birim diyagonal matris ve $\lambda = \omega^2$ öz değerlerdir. (21) nolu denklemin sıfırdan farklı çözümü için,

$$|[K] - \omega^2 [M]| = 0 \quad (24)$$

karakteristik determinant denklemi elde edilir. Denklemin çözümünden n serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal açılmal frekans (öz vektör) $(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n)$ elde

edilir. Doğal frekansların büyükten küçüğe sıralanması sonucunda elde edilen en küçük frekans temel frekans ve bu frekansa karşılık gelen mod şekli temel mod şekli olarak adlandırılır. Her λ_r öz değeri vektörüne karşılık bir A_r öz vektör veya doğal mod şekli belirlenir.

$$\{A_r\} = \left\{ \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_n \end{array} \right\}_r \quad r = 1, 2, 3, \dots, n \quad (25)$$

Doğal titreşim modlarını elde etmek için (22) nolu eşitlik düzenlenirse,

$$[D] \{A\} = \lambda \{A\} \quad (26)$$

olur ve r . mod için,

$$[D] \{A\}_r = \lambda_r \{A\}_r \quad (27)$$

elde edilir. (27) nolu eşitlik, C_r sabiti ile çarpılırsa ve

$$C_r \{A\}_r = \{\phi\}_r \quad (28)$$

yazılırsa,

$$[D] \{\phi\}_r = \lambda_r \{\phi\}_r \quad (29)$$

eşitliği elde edilir [16]. Bu eşitlikte $\{\phi\}_r$, λ_r 'ye karşılık gelen modal vektördür. $\{A\}_r$ vektörü küçük C_r sabiti ile normalize edilmektedir

$\{\phi\}_r$ modal vektörlerinin beraber yazılmasıyla $[\Phi]$ modal matrisi elde edilir ve (30) nolu eşitlikteki gibi gösterilir.

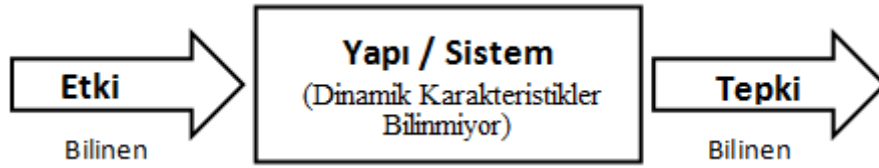
$$[\Phi]_{n \times n} = [\{\phi\}_1 \quad \{\phi\}_2 \quad \dots \quad \{\phi\}_n] \quad (30)$$

1.5. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi

Deneysel Modal Analiz Yöntemi yapılarda meydana gelen titreşimleri dikkate alarak yapıların dinamik karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir [1]. Bu yöntem üç aşamadan meydana gelir. Bunlar;

- Titreşim verilerinin elde edilmesi,
- Ölçülen verilerin analiz edilmesi ve dinamik karakteristiklerin belirlenmesi,
- Elde edilen dinamik karakteristikleri kullanarak yapı ya da sistem dinamik davranışlarının belirlenmesidir [17].

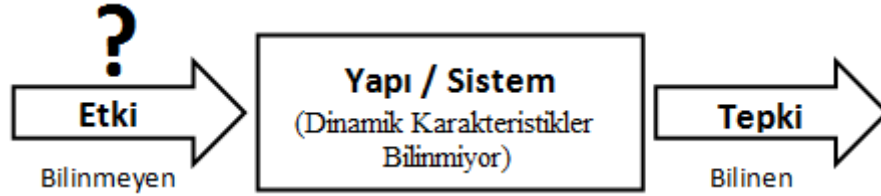
Geleneksel deneysel modal analizler (Şekil 1.4), bilinen ve ölçülebilen bir etki (elektro dinamik sarsıcılar, sarsma tablaları, darbe çekiçleri vb.) ile yapıyı titreştirme ve yapının bu kuvvetlere karşı göstermiş olduğu tepkiyi ölçme işlemlerini kapsar. Daha sonra bilinen etki ve ölçülen tepki kullanılarak sistem ya da yapı dinamik karakteristikleri belirlenir.



Şekil 1.4. Deneysel modal analiz

Araştırmacılar son yıllarda sadece yapı tepkilerini kullanarak dinamik karakteristiklerin belirlenebileceği bir yöntem üzerinde çalışmışlardır. Dinamik karakteristiklerin yalnızca ölçülen yapı tepkilerinden elde edilebildiği bu tekniği geleneksel deneysel modal analizlerden ayırmak için verdikleri isim Operasyonel Modal Analiz Yöntemi (Şekil 1.5) olmuştur. Araştırmacıların yaygın olarak kullanılan deneysel modal analiz yöntemi yerine Operasyonel Modal Analiz Yöntemi'ni geliştirmelerinin temel

nedenlerinden biri köprüler, barajlar, stadyumlar ve kamu binaları gibi karmaşık sistemli ve büyük yapıları titreştirmede karşılaşılan zorluklardır [18]. Örneğin; bir karayolu köprüsü üzerinde Deneysel Modal Analiz Yöntemi gerçekleştirilmek istendiğinde, köprünün titreştirilmesi için trafiğe kapatılması gerekmekte ve bu bazı aksaklıklara neden olmaktadır. Benzer şekilde hastane, çağrı merkezleri ve güvenlik binaları vb. yerlerde de aynı sorun ortaya çıkmaktadır. Ayrıca barajlar, stadyumlar vb. büyük yapıların mekanik araçlarla yapay olarak titreştirilmesi zor veya aşırı maliyetli olmaktadır. Karşılaşılan diğer bir sorun da yapının yapay olarak titreştirilmesi sırasında yapıda meydana gelen hasarlardır. Bu problemlerden dolayı Deneysel Modal Analiz Yöntemi uygulamalarında aksaklıklar meydana gelmekte ve yapı analizlerinin, bilinmeyen kuvvetler/etkiler kullanılarak yapılabildiği Operasyonel Modal Analiz Yöntemi geliştirilmiştir. Bu yeni yöntemde bilinmeyen kuvvetler/etkiler ya da yapı titreştiricileri olarak rüzgâr yükleri, yaya ve taşıt trafiği, dalga hareketleri vb. çevresel etkiler kullanılmaktadır. Özellikle tarihi yapılar üzerinde yapılan çalışmalarda, Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile uygulanan etkiler yapıya zarar verdiği için pek tercih edilmemekte, onun yerine titreştirici olarak çevresel etkilerin kullanıldığı Operasyonel Modal Analiz Yöntemi (Şekil 1.5) daha çok kullanılmaktadır. Bu çalışmada da Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 1.5. Operasyonel modal analiz

Deneysel ve operasyonel modal analizlerde, herhangi bir matematik model olmaksızın direkt gerçek yapı kullanıldığı için bu analizler, teorik analizlere göre daha güvenli sonuçlar verirler.

Genel olarak deneysel modal analiz sonuçlarının kullanım alanlarını,

- Yapılar projelendirilirken teorik analizlerde yapılan kabullerin gerçekte sağlanıp sağlanmadığının belirlenmesi,

- Teorik analiz sonucu elde edilen dinamik karakteristiklerin deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristiklerle karşılaştırılmasının yapılması ve sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi,
- Teorik analizlerin yapılmasının zor olduğu yapılarda dinamik karakteristiklerin deneysel olarak belirlenmesi,
- Hasar görmüş veya kullanılmış yapıların kullanılabilirlik durumlarının ve yapısal hasarların belirlenmesi şeklinde sıralamak mümkündür [1].

1.5.1. Kullanılan Test Aletleri

Önceki bölümlerde deneysel modal analizin iki gruba ayrıldığından bahsedilmiştir. Bunlar bilinen ve ölçülebilen bir etki ile yapıyı titreştirme ve yapının bu kuvvetlere karşı göstermiş olduğu tepkiyi ölçme işlemlerini kapsayan Deneysel Modal Analiz Yöntemi ve titreştirici olarak çevresel titreşimlerin kullanıldığı ve sadece yapı tepkilerinin ölçülebildiği Operasyonel Modal Analiz yöntemidir. Bu bölüm ise her iki yöntemde kullanılan test aletlerini ve test prosedürlerini kapsamaktadır. Test ekipmanları genel olarak 3 grupta toplanır. Bunlar; titreştiriciler, etki-tepki ölçerler ve veri toplama sistemleridir.

1.5.1.1. Titreştiriciler

Yapıları titreştirmek için çeşitli cihazlar kullanılmaktadır. Bunlar yapıya bütün ölçüm boyunca temas eden ve ölçüm boyunca ya yapıyla herhangi bir teması olmayan ya da yapıyla kısa süreli teması olan yapay titreştiriciler olarak iki kısma ayrılır [1]. Mühendislik yapılarının dinamik testlerinde kullanılan mekanizmalardan mekanik sarsıcılar (shakers) yapıyla sürekli temas halinde olan, darbe çekiçleri (impact hummers) yapıyla kısa süreli temas halinde olan ve tokmak sistemleri (drop weight) ise yapıyla hiçbir teması olmayan titreştiricilerdir.

Sarsıcılar yapı üzerinde büyük kuvvetlere neden olur ve sabit dinamik tepkileri incelemek için kullanılırlar. Bu mekanizmalar doğru güç aktarımları için yapıya çok iyi sabitlenmelidir. Sarsıcıların kullanımı genelde çok pahalıdır ve bazen üzerinde çalışılan yapının kullanımının sınırlandırılması gerekir. Örneğin; bir köprü üzerinde çalışılıyorsa ve titreştirici olarak sarsıcılar kullanılıyorsa köprünün trafiğe kapatılması gereklidir ki bu

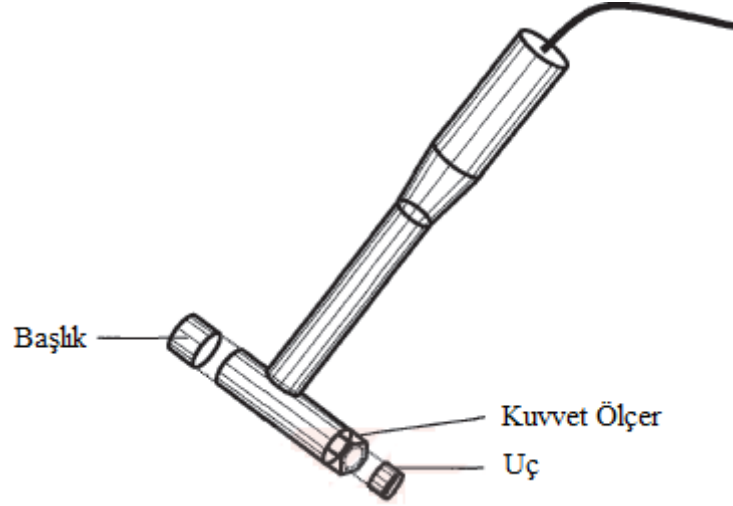
sosyal hayatta aksamalara neden olur. Aynı şekilde bu aksamalar hastane binaları, çağrı merkezleri vb. yapılar için de geçerlidir. Sarsıcılar dışında kullanılan darbe çekiçleri ve tokmak sistemleri yapı üzerinde geçici etkilere neden olduğu için, geçici tepkileri incelemek üzere kullanılırlar. Sarsıcılara göre daha ucuz olmaları bu mekanizmaların kullanımını avantajlı hale getirmesine rağmen, yapıya aktarılan kuvvetin düşük enerjili olması bir dezavantajdır [2].

Mekanik, elektro manyetik ve elektro hidrolik olmak üzere üç tip sarsıcı vardır. Şekil 1.6’da çeşitli tiplerdeki sarsıcılar görülmektedir.



Şekil 1.6. Çeşitli sarsıcılar [URL-1].

Yapıların titreştirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir diğer titreştirici darbe çekiçleridir. Bu aletlerle yapıyı titreştirmek kolay olmasına rağmen uygulanması özen gerektirmektedir. Darbe çekiçlerinde esas kısım değiştirilebilir başlıklar ve uçlardır. Çekiçle yapıya uygulanan kuvvet, çekicinin ucuna yerleştirilen kuvvetölçerlerle ölçülür ve ölçülen kuvvetin yapıya uygulanan kuvvete eşit olduğu kabul edilir [1]. Şekil 1.7’de yaygın olarak kullanılan çekiç türü ve Şekil 1.8’de ise farklı modellerdeki darbe çekiçleri görülmektedir. Çekiçle uygulanan kuvvetin büyüklüğü, çekiç başlığının kütlesine ve çekicinin yapıya vurulduğu andaki hızına bağlı olarak belirlenebilir. Dolayısı ile istenilen seviyede kuvvet uygulamak için en uygun yol çekiç başlığının kütlesinin değiştirilmesidir [1].



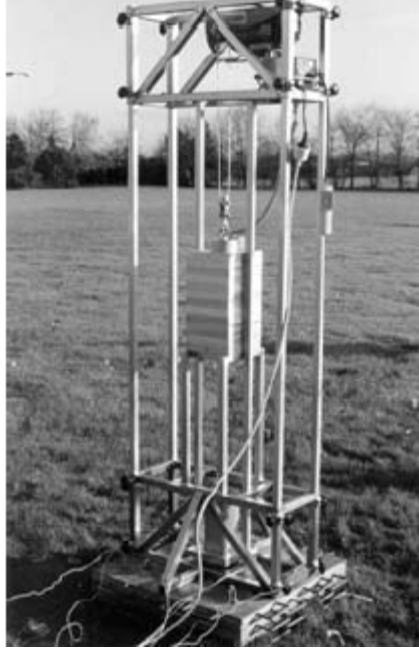
Şekil 1.7. Yaygın olarak kullanılan çekiç türü [1].



Şekil 1.8. Farklı modellerdeki darbe çekiçleri [2].

Çekiç testlerinde bazı zorluklar vardır. Bu zorluklar her bir darbenin bir öncekiyle aynı veya ona yakın olması ve kuvvetin yüzeyin normali doğrultusunda uygulanması olarak sıralanabilir. Ayrıca, çekiçle vurulduktan sonra çekicinin geri tepmemesi gerekir, yani her ölçüm için yapıya bir kez vurmaya gerekir [1].

Tokmak sistemleri (drop weight) daha fazla kütle ekleyerek ve sönüm özelliklerini değiştirerek darbe frekanslarını kontrol etme konusunda darbe çekiçlerinden daha avantajlı durumdadır. Şekil 1.9'da bir tokmak sistemi görülmektedir.



Şekil 1.9. Tokmak sistemi (drop weight system) [2].

1.5.1.2. Tepki Dönüştürücüler

Dönüştürücü, yer değiştirme, hız, ivme, kuvvet gibi sistem tepkileri olarak tanımlanan fiziksel bir büyüklüğü, sinyal işlemeye hazır bulunan bir veri alma ünitesinde orantılı bir elektrik sinyali biçimine dönüştürmeye yarayan bir alettir. Dinamik tepkilerin ölçümü yer değiştirme, hız veya ivme olarak gerçekleştirilebilir.

Mühendislik yapıları ile ilgili, yer değiştirme ölçümleri tüm algılayıcıların harici bir referans noktası ile ilişkilendirilmesine ihtiyaç duymaktadır ki bu da çoğu kez pahalıdır. Bu yüzden, genelde düşük maliyetine oranla, doğru sonuçlar elde edilmesini sağlayan, ivmeölçerleri esas alan test ekipmanları tercih edilir. Ayrıca yer değiştirmeler ivme kayıtlarının sayısal entegrasyonu ile da hesaplanabilir [2].

Geniş frekans ve dinamik aralığa sahip olmaları ve nispeten küçük ve hafif olmalarından dolayı en çok tercih edilen dönüştürücü tipi ivmeölçerlerdir. İvmeölçerler uygulanacakları yüzeye, vida, çeşitli yapıştırıcılar, mıknatıslı sistemler ve balmumu gibi bağlantılarla sabitlenirler. Kullanılacakları yapı veya sisteme uygun olarak tek veya üç eksenli ivmeölçerler mevcuttur. Şekil 1.10'da Brüel&Kjaer 4524 tipte üç eksenli ve genelde modal testler için ideal olan bir ivmeölçer gösterilmektedir.



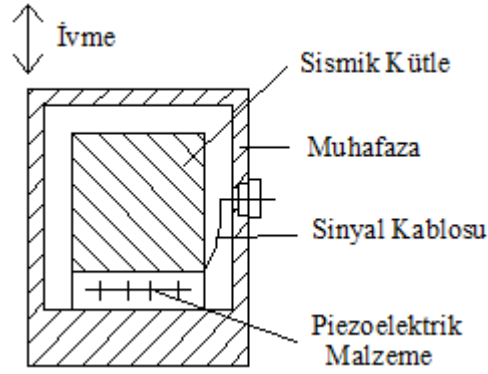
Şekil 1.10. Üç eksenli ivmeölçer [URL-2].

Piezoelektrik, piezorezistif, kapasitif ve kuvvet-balans ivmeölçerleri olmak üzere dört çeşit ivmeölçer vardır. Bu çalışmada sadece piezoelektrik ivmeölçerler kullanıldığı için sadece bu tip dönüştürücüler açıklanacaktır.

Piezoelektrik ivmeölçerler rezonans frekanslarından daha düşük bir frekans aralığında ivme ile orantılı sinyaller üreten kütle-yay-sönüm sistemleridir. İvmeölçerlerinin aktif bölümleri ivme ile orantılı elektrik sinyalleri üreten kuvars kristali veya seramik malzemelerden yapılmışlardır. Bir piezoelektrik ivmeölçer ve şematik gösterimi sırasıyla Şekil 1.11 ve Şekil 1.12’de gösterilmektedir. Bu tip ivmeölçerler ölçülen sistemin ivme seviyesini yerçekimi ivmesi (g) veya mm/s^2 biriminde verirler.



Şekil 1.11. Tek eksenli piezoelektrik bir ivmeölçer [URL-2].



Şekil 1.12. Piezoelektrik ivmeölçer şematik gösterimi [URL-3].

Piezoelektrik ivmeölçerler genellikle okuma, kaydetme veya analiz ekipmanlarına bağlanılmaya ihtiyaç duyarlar. Sinyal sağlayıcı ya uzaktan kontrol edilir ya da ivmeölçerin içerisine yerleştirilir. Harici güç kaynağına ihtiyaç duymamaları, stabil olmaları (hareket eden parçalarının olmaması), iyi sinyal – gürültü oranına (gürültüden etkilenme dereceleri çok düşük) ve geniş bir frekans ve dinamik ölçüm aralığına sahip olmaları diğer ivme ölçerlere göre avantajlarıdır.

1.5.1.3. Veri Toplama Sistemleri

Veri toplama işlemi, test ve ölçümün ilk aşamasıdır. Sıcaklık, basınç, kuvvet, ivme, gerilme gibi gerçek hayattan fiziksel büyüklüklerin ölçülmesi ve incelenmesi için öncelikle bu analog işaretlerin sayısallaştırılması gerekir. Veri toplama işleminde dönüştürücüler (ivmeölçerler) fiziksel bir büyüklüğü elektrik sinyaline çevirir. Bu elektrik sinyali ya doğrudan ya da çeşitli sinyal koşullama ünitelerinden geçtikten sonra veri toplama sistemine gelir. Analog sinyaller burada dinamik yapılarına uygun bir hızda ve çözünürlükte örneklendikten sonra bilgisayar ortamında gerçek zamanda işlenir ya da saklanır. Veri toplama donanımları, birlikte çalıştıkları bilgisayarın işletim sistemine ve veri toplamanın yönetildiği uygulama yazılımına, sürücü yazılımları ile tanıtılırlar [URL-4]. Şekil 1.13'te bu çalışmada da kullanılan Brüel&Kjaer 3560-C veri toplama ünitesi görülmektedir.



Şekil 1.13. Brüel&Kjaer 3560-C veri toplama ünitesi [URL-2]

1.5.2. Dinamik Karakteristikleri Belirleme Yöntemleri

Operasyonel Modal Analiz Yöntemi'nde yapının çevresel bir etki ile (rüzgâr, taşıt yükü, yaya hareketi ve darbe çekici gibi) titreştirildiği kabul edilmekte ve yapının bu titreşime göstermiş olduğu tepki ölçülmektedir. Tepkilerin ölçülüp değerlendirilmesinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Kullanılan yöntemlerin matematik tabanları hemen hemen benzer olup denklem indirgeme teknikleri ve matris oluşturma biçimleri gibi bazı noktalarda farklılıklar bulunmaktadır [19]. Bu yöntemler temelde iki değişkene göre sınıflandırılırlar. Bu yöntemler değişkenin zaman olduğu zaman ortamındaki ve değişkenin frekans olduğu frekans ortamındaki yöntemlerdir. Frekans ortamındaki yöntemler, Piklerin Seçilmesi, Frekans Ortamında Ayırıştırma, Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma ve Polimaks yöntemleridir [2]. Zaman ortamındaki yöntemler ise Rastgele Azalım Yöntemi, Rekürsif Teknikler, En Büyük Olabilirlik Yöntemleri ve Stokastik Alt Alan Belirleme yöntemleridir [2]. Literatürde önemli mühendislik yapılarının deneysel ölçüm yöntemlerine bağlı olarak ölçülmesinde ve bu çalışmada olduğu gibi bu yöntemlerden iki tanesi kullanılmaktadır. Bunlar; frekans ortamında Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma ve zaman ortamında Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemleri'dir.

1.5.2.1. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemi

Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemi frekans ortamına dayalı bir yöntem olup bu gruptaki yöntemler, basitlikleri, işlem hızları ve altyapı gibi nedenlerden dolayı daha çok tercih edilirler. Ancak bu yöntemler geçici bilginin ortalamasını içerdikleri

için detaylar çoğunlukla ihmal edilmektedir. Bu yöntemin teorik olarak bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajlar;

1. Piklerin seçilmesi her zaman subjektif bir konudur,
2. Mod şekilleri yerine operasyonel defleksiyon şekilleri elde edilir,
3. Sadece orantılı sönümlü yapıların gerçek modları elde edilebilir,
4. Sönüm tahminleri güvenilir değildir,

şeklinde sıralanabilir [19, 20]. Bu dezavantajlara rağmen bu yöntem, çevresel titreşim testlerine dayalı inşaat mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma yönteminde bilinmeyen etki ve ölçülen tepki arasındaki bağıntı,

$$[G_{yy}(\omega)] = [H(\omega)]^* [G_{xx}(\omega)] [H(\omega)]^T \quad (31)$$

şeklinde yazılabilir [21, 22]. (31) nolu denklemde, $G_{xx}(\omega)$ etki sinyaline ait güç spektral yoğunluk fonksiyonunu, $G_{yy}(\omega)$ tepki sinyaline ait güç spektral yoğunluk fonksiyonunu ve $H(\omega)$ frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. Ayrıca denklemdeki * ve T sırasıyla fonksiyonun eşleniğini ve transpozisini göstermektedir. Bazı matematiksel işlemlerden sonra tepki sinyaline ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu, tek kutuplu artık değer fonksiyonu olarak,

$$[G_{yy}(\omega)] = \sum_{k=1}^m \left(\frac{[A_k]}{j\omega - \lambda_k} + \frac{[A_k]^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{[B_k]}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{[B_k]^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right) \quad (32)$$

gibi elde edilir [21, 22]. Burada A_k , güç spektral yoğunluk fonksiyonuna ait k. rezidü matrisidir. (32) nolu denklem yeniden düzenlenerek,

$$[G_{yy}(\omega)] = \sum_{k=Sub(\omega)}^m \left(\frac{d_k \psi_k \psi_k^T}{j\omega - \lambda_k} + \frac{d_k^* \psi_k^* \psi_k^H}{j\omega - \lambda_k^*} \right) \quad (33)$$

olarak belirlenir [21, 22]. Burada, d_k sabit bir değerini, ψ_k k. mod şekli vektörünü ve H kompleks eşleniğın transpozunu göstermektedir. Tepki sinyali güç spektral yoğunluk fonksiyonu, tekil değer ayrışımı gerçekleştirilerek ayrıık değerler olarak,

$$\widehat{G}_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^H \quad (34)$$

elde edilir [21, 22]. Burada, U_i , u_{ij} tekil vektörlerinden oluşan birim matrisi ve S_i , s_{ij} tekil değerlerinden oluşan diyagonal matrisi göstermektedir. Spektrumlarda k. moda yakın bölgelerde k. mod baskındır ve güç spektral yoğunluk fonksiyonu tek matris olarak,

$$\widehat{G}_{yy}(j\omega_i) = s_i u_{i1} u_{i1}^H \quad \omega_i = \omega_k \quad (35)$$

olarak belirlenir [21, 22]. Bu yöntemde, doğal frekanslar tekil değerlerin dağılımında pikler olarak, mod şekilleri ise tekil vektörler olarak elde edilmektedir. Modal sönüm oranları ise tekil pik değerlerin hızlı fourier dönüşümü ile zaman ortamına aktarılması ve logaritmik azalım yöntemi ile hesaplanmaktadır [23].

1.5.2.2. Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemi

Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemi zaman ortamına dayalı bir yöntemdir. Bu yöntem zaman verileri ile hiçbir korelasyon veya spektral dönüşümüne gerek kalmaksızın direkt olarak çalışır. Bu yöntemde dikkate alınan bağıntı ve formülasyonlar aşağıda verilen dinamik hareket denklemlerinden elde edilmektedirler [20, 24, 25].

$$[M] \{\ddot{x}(t)\} + [C] \{\dot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} = \{F(t)\} = [B(t)] \{u(t)\} \quad (36)$$

(36) nolu denklemdeki $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini $\{\ddot{x}(t)\}$, $\{\dot{x}(t)\}$, $\{x(t)\}$ ve $\{F(t)\}$ ise sırasıyla zamana bağlı ivme, hız, yer değiştirme ve dış kuvvet vektörlerini ifade etmektedir.

Görüldüğü gibi $F(t)$ dış yük vektörü çarpanlarına ayrılarak etki matrisi olarak tanımlanan $B(t)$ ve bir $u(t)$ vektörünün çarpımı şeklinde yazılır. (36) nolu denklem ile titreşen bir yapının davranışı oldukça iyi belirlenebilmesine rağmen, Stokastik Alt Alan Belirleme Yönteminde bu denklem direkt olarak kullanılmaz. Bu nedenle (36) nolu denklem daha kullanışlı bir form olan ayrık zamanlı stokastik durum uzay modeline aşağıdaki ifadeler kullanılarak dönüştürülebilir [20, 24, 25].

$$a(t) = \begin{pmatrix} \{x(t)\} \\ \{\dot{x}(t)\} \end{pmatrix} \quad (37)$$

$$A_c = \begin{pmatrix} 0 & I_{n2} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{pmatrix} \quad (38)$$

$$B_c = \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}B \end{pmatrix} \quad (39)$$

Yukarıdaki denklemler kullanılarak (36) nolu denklem, aşağıdaki gibi bir durum denklemine dönüştürülebilir [20, 24, 25].

$$\dot{a}(t) = A_c a(t) + B_c u(t) \quad (40)$$

(40) nolu denklemdeki A_c durum matrisi, B_c etki matrisi, $u(t)$ durum vektörü olarak tanımlanır.

Ölçümlerin yalnızca bir sensörden (ivmeölçer, hızölçer vb.) elde edildiği varsayılırsa ortaya çıkacak denklem,

$$y(t) = C_a \ddot{X}(t) + C_v \dot{X}(t) + C_d X(t) \quad (41)$$

şeklinde yazılabilir [20, 24]. Burada, $y(t)$ tepki, C_a ivme olarak elde edilen tepki matrisi, C_v hız olarak elde edilen tepki matrisi, C_d yer değiştirme olarak elde edilen tepki matrisi olarak adlandırılır. Denklem (65) ve (66) kullanılarak,

$$E = [C_d - C_a M^{-1}K \quad C_v - C_a M^{-1}C] \quad (42)$$

$$D = C_a M^{-1}B \quad (43)$$

denklemleri kullanılarak (41) nolu denklem yeniden düzenlenirse,

$$y(t) = E a(t) + D u(t) \quad (44)$$

elde edilir [20, 23]. Burada, E tepki matrisi, D direk iletim matrisi olarak ifade edilir. (40) ve (44) nolu denklemler, sürekli zaman tanımlı durum uzay modelini meydana getirir. Durum uzay modeli [20, 24, 25],

$$a_{k+1} = A a_k + B u_k \quad (45)$$

$$y_k = E a_k + D u_k \quad (46)$$

şeklinde ifade edilebilir [20, 24, 25]. Burada, $a_k = a(k\Delta t)$ ayrık zaman durum vektörü, $A = \exp(A_c \Delta t)$ ayrık durum matrisi, $B = [A I] A_c^{-1} B_c$ ayrık etki matrisidir. Durum uzay modeli,

$$a_{k+1} = A a_k + B u_k + w_k \quad (47)$$

$$y_k = E a_k + D u_k + v_k \quad (48)$$

ifade edilebilir [20, 24, 25]. Burada, w_k arızalardan ve hatalardan dolayı meydana gelen gürültü sinyali, v_k sensör hatalarından meydana gelen gürültü sinyalidir. w_k ve v_k ölçülemeyen vektörler oldukları için sıfır kabul edilirler.

1.6. Sonlu Eleman Model İyileştirme Yöntemleri

Deneysel ve Operasyonel Modal Analiz Yöntemleri'nin sonuçlarının kullanıldıkları yerlerden biri de yapıların sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesi aşamasıdır. Model iyileştirme, yapıyı temsil etmesi beklenen mevcut teorik modelin, deneysel sonuçlar kullanılarak düzenlenmesi olarak tanımlanabilir. Bu durumda, yapı dinamik davranışlarını en doğru şekilde temsil eden model, iyileştirilmiş sonlu eleman modeli olarak adlandırılır [17].

Deneysel ve teorik olarak elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında aralarında farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklılıkların nedenleri olarak; yapı malzemelerinin mekanik özelliklerinin tam olarak belirlenebilmesi konusundaki sıkıntılar ve veri eksiklikleri, yeterince doğru temsil edilemeyen sınır şartları, yapı eleman boyutları ile bilgilerin yetersiz oluşu, oldukça büyük kesit boyutlarına sahip yapı elemanlarının dışarıdan görünmeyen iç bölümlerindeki malzeme özelliklerinin bilinmemesi vb. sıralanabilir. Bu nedenlerden dolayı oluşturulan model gerçek modeli tam anlamıyla doğru şekilde temsil edemez. Bu durumda teorik olarak elde edilen model, deneysel yöntemler kullanılarak doğrulanmalıdır. Deneysel olarak elde edilen sonuçların doğru kabul edilip, iyileştirme işleminin bu değerler üzerinden yapılmasının nedeni ise deneysel modal analizlerde gerçek yapının kullanılmasıdır.

Sonlu eleman model iyileştirilmesi üç aşamadan meydana gelir. Bunlar;

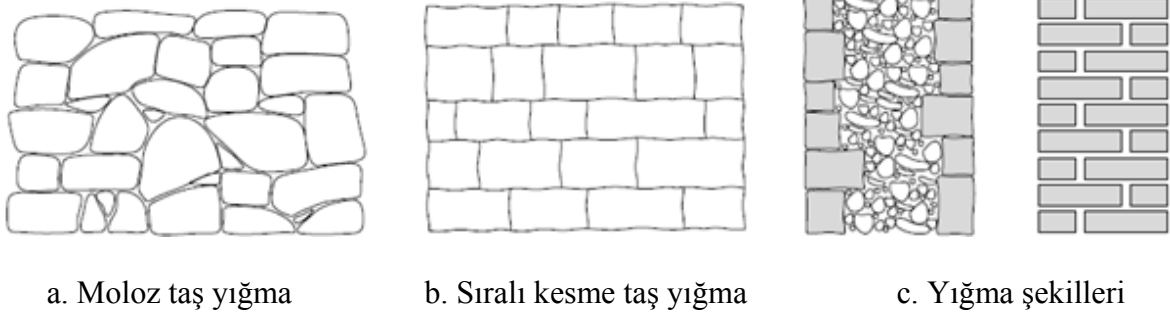
- Teorik ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristiklerin birbiriyle karşılaştırılması,
- Teorik sonuçların, deneysel sonuçlarla çakışması ya da aralarındaki farkların en aza indirilmesi için sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi,
- Teorik ve deneysel sonuçlar çakışana kadar iyileştirilmiş sonlu eleman modelinin analiz edilmesi ve birinci adımın tekrarlanmasıdır.

Yapı sonlu eleman modelini iki şekilde iyileştirmek mümkündür. Bunlar Deneme Yanılma Yöntemi ve Optimizasyon Yöntemleridir [26]. Deneme Yanılma Yöntemi'nde, bir yapının sonlu eleman modeli oluşturulurken kullanılan yapı malzeme özellikleri ve sınır şartları gibi belirsiz parametreler yeniden düzenlenerek sonlu eleman model iyileştirilmesi yapılır. Bu çalışmada da model iyileştirme yöntemi olarak Deneme Yanılma Yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyon Yöntemi ise temelde Deneme Yanılma Yöntemi'ni kullanır. Malzeme özellikleri ve sınır şartları gibi belirsiz parametreler için tanımlanan

belli bir aralıktaki bütün değerler için sonlu eleman modeli tek tek analiz edilir. Her bir analiz sonucu elde edilen teorik değerler ile deneysel sonuçlar karşılaştırılır ve deneysel verilere en yakın sonucu veren belirsiz parametreler kullanılarak oluşturulan model elde edilir. Elde edilen bu model iyileştirilmiş sonlu eleman modeli adını alır.

1.7. Tarihi Yapıların Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulmasında Kullanılan Yöntemler

Bilindiği gibi tarihi yapılar genelde değişik şekillerde işlenmiş veya doğal taşlar, yapay tuğla veya briket malzemeler ve bu malzemeleri yapıştırmak için kullanılan değişik özelliklerdeki harçlar kullanılarak inşa edilen yığma yapılardır. Şekil 1.14'te değişik dizilişlere sahip taş yığma şekilleri verilmektedir. Bu yapıların teorik olarak modellenmesi, lineer olmayan malzeme özellikleri, malzemelerin mekanik özelliklerinin tam olarak bilinmemesi ve geometrik özelliklerle ilgili veri eksikliklerinden dolayı oldukça zor bir konu haline gelmektedir.



Şekil 1.14. Değişik dizilişlere sahip taş yığma şekilleri [27].

Geçmişte tarihi yapılar deneme yanılma yöntemiyle inşa edilmişlerdir. Geleneksel yöntemler bir sonraki nesle geçmiş ve her yeni nesil önceki yönteme bir şeyler ekleyerek eski yöntemi geliştirmişlerdir. Herhangi bir sayısal yöntem kullanılmadan bu gün dahi var olan pek çok muhteşem yapı inşa edilmiştir.

Lourenço [27], Oliveira [28] ve Romano [29] yığma yapıların teorik olarak modellenmesinde kullanılabilecek yöntemleri aşağıdaki gibi üç gruba ayırmıştır.

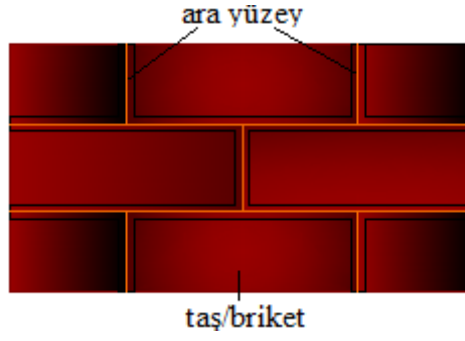
- Makro Modelleme
- Basitleştirilmiş Mikro Modelleme
- Detaylı Mikro Modelleme

İlk yöntem olan makro modellemede yapının homojen izotrop veya anizotrop bir malzeme olduğu düşünülür. Bu yöntemde yığma yapı, kullanılan yapay tuğla/doğal taş ve harcın özellikleri birleştirilerek kompozit malzeme olarak düşünülmektedir. Diğerlerine oranla uygulanması kolay bir yöntemdir. Şekil 1.15'te makro modelleme örneği gösterilmektedir.



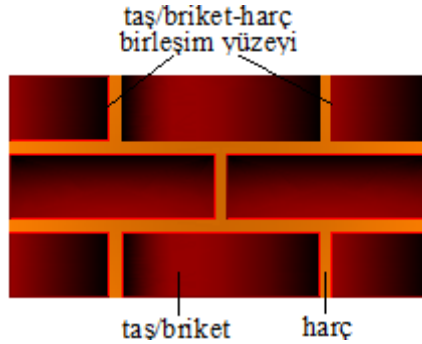
Şekil 1.15. Makro modelleme [27, URL-7].

Basitleştirilmiş mikro modellemede taş/briket, harç kalınlığının orta noktasından geçtiği düşünülen bir ara yüzeye ya da birleşim yüzeyine kadar genişletilen elemanlarla temsil edilir. Başka bir ifadeyle bir taş/briket eleman, harç kalınlığının ortasından geçtiği varsayılan bir ara yüzey boyunca oluşacağı kabul edilen çatlaklarla çevrilidir. Bu modellemede harcın poisson oranı ihmal edilir. Makro modelden farklı olarak harç ve taşların birleşim yüzeyleri ayrıca tanımlanır [29]. Şekil 1.16'da basitleştirilmiş mikro modelleme örneği gösterilmiştir.



Şekil 1.16. Basitleştirilmiş mikro modelleme [27, URL-7].

Detaylı mikro modelleme en gelişmiş modelleme yöntemidir. Taş ve harç elemanlar birbirinden bağımsız olarak modellenir. Birleşim yerlerinde yüzey elemanları tanımlanır [12]. Detaylı mikro modellemede yığma duvarı meydana getiren yapı taşlarının (taş/tuğla/briket ve harcın) ayrı ayrı her birinin mekanik özellikleri yani elastisite modülleri, poisson oranları ve elastik olmayan özellikleri dikkate alınmaktadır. Bu yaklaşımda çatlaklar yığma birim ve harcın arasındaki birleşim yüzeylerde meydana geleceği varsayılmaktadır [28]. Şekil 1.17'de detaylı mikro modelleme örneği gösterilmektedir.



Şekil 1.17. Detaylı mikro modelleme [27, URL-7].

1.8. Tarihi Taş Köprüler

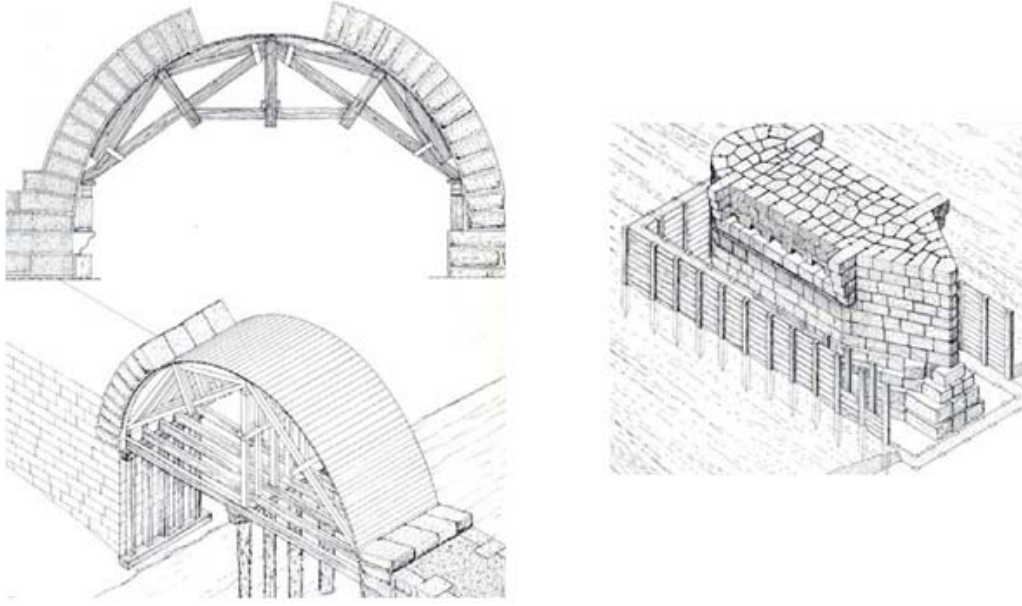
Sivil mimari eserler arasında yer alan köprüler, toplumun ekonomik ve ticari gelişmesine yarayacak olan ticaret ve posta yolları üzerinde kurulduğu gibi, orduların stratejik durumları da dikkate alınarak yapılmıştır. İnsanların ilk çağlardan beri derin vadileri ve suları aşmak için basit şekilli köprüler yaparak ulaşımı sağlamaya çalıştıkları

görülür. Akarsuları, ağaç dallarından ve sarmaşık yapraklarından faydalanarak geçmeye çalışmışlardır. Taş ve ağaç ayaklar üzerine ahşap kirişler yerleştirerek köprüler kurmuşlardır. Köprünün dayanıklılığı açısından zamanla kemerlerden oluşan taş köprüler yapmaya başlamışlardır [30].

Köprüler aralarında stratejik, ekonomik ve sosyal amaçların da olduğu pek çok değişik neden için inşa edilmişlerdir. Bu köprülerin günümüze kadar ulaşma sürecinde depremler, savaşlar ve seller vb. olaylardan dolayı pek çok hasar meydana gelmiş, hatta bazıları yıkılmışlardır.

Söz konusu köprülerin bazıları günümüze kadar ulaşmıştır ve bunun iki temel nedeni vardır. Bunlardan birincisi köprü yapımında kullanılan malzemelerin çok dayanıklı malzemelerden seçilmesidir. İkinci neden ise inşa edildikleri dönemler ve sahip oldukları teknolojiler düşünüldüğünde, herhangi bir mühendislik hesabı ve malzeme testi yapılmaksızın, iyi tasarlanmış kemer formlarıdır. Taş köprüleri inşa eden ustalar ya da mimarlar büyük açıklıkları geçebilmek için köprülerde kullanılması gereken en uygun formun kemer formu olduğunu keşfetmişlerdir [31]. Kemer formunun en önemli avantajı basınç gerilmelerini taşıyıp, çekme gerilemelerinin oluşmasına izin vermemesidir. Bu sebepten dolayı köprüler, kemer elemanları kullanılarak inşa edilmişlerdir. Şekil 1.18'de bir taş kemer köprünün yapım şekli şematik olarak gösterilmektedir.

Tarihi köprüler inşa edildikleri dönemde maruz kalacakları yaya trafiği ve at arabası yükleri gibi kuvvetler düşünülerek tasarlanmalarına rağmen, günümüzde, gelişen teknolojinin sonucu olarak ağır trafik yüklerine maruz kalmışlardır. Bu köprülerin günümüze kadar ulaşmış olması ve halen artan yükleri taşıyor olmaları onların yapısal durumlarının çok iyi olduğu anlamına gelmemektedir. Bu nedenle, tarihi köprülerin maruz kaldıkları yükleri ne kadar güvenli taşıdıkları ve bu yapıların ne kadar sağlam olduklarının araştırılması, bu eski köprülerin giderek artan yükleri taşıyabilmeleri için uygun güçlendirmelerin yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Eski bir köprünün gerçekten güçlendirmeye ihtiyacı olup olmadığını, eğer ihtiyaç varsa hangi yöntemin kullanılması gerektiğini belirlemek için onun mevcut yapısal davranışının ve geçmeye neden olacak yüklerin çok iyi belirlenmesi gerekmektedir. Mühendislik deneyimleri sonucu, bu yapıların yıkılmasının temel nedeni olarak yapı malzemelerinin dayanımı kaybetmesi değil, yapı geometrik formunun bozulması olduğu ortaya çıkmıştır [31].



Şekil 1.18. Şematik olarak taş kemer köprü yapım şekli

1.8.1. Taş Köprü Çeşitleri ve Bölümleri

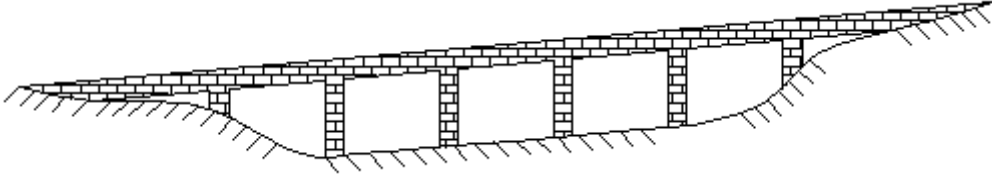
Köprü tipini doğuran en büyük etken, nehir ya da vadi yatağının derinliği ve genişliği olmaktadır. Geniş bir yatakta, yüksek ve geniş açıklıklara gereksinim duyulmaz. Aksine yakın genişlikteki gözler, suyu rahatlıkla geçirebilirler. Dere yatağın yaygın oluşu, köprü boyunu uzatır, göz adedi fazlaşır. Bu durumda tabliyede düz olur. Derin yataklı sularda, ana yatak için teknik bakımdan ayakları oturtmak olanaksız veya güçtür. Bu nedenle, zeminin yükseldiği sığ uçlara yerleştirilen ayakların arası geniş ve yüksek bir kemerle bağlanır. Böylece kurulan, ana göz veya gözler, etrafındaki yardımcı açıklıklarla, güçlü eğimlerle her iki sahilden yükselen dik köprüleri doğurur [32].

Taş köprülerin çeşitliliği konusunda iki farklı kaynakta farklı biçimlerde sınıflandırma vardır. İltter [33] taş köprüleri akarsu yatağının derinliği ve genişliğine bağlı olarak iki sınıfta toplamıştır. Şöyle ki;

1. Ortadaki geniş ve yüksek ana kemere doğru her iki yandan güçlü bir çıkışla yükselen dik köprüler,
2. İki veya çok sayıdaki kemer gözler arasında yükseklik ve genişlik bakımından büyük fark göstermeyen köprü yolunun düz veya hemen hemen düz olduğu köprülerdir.

Çulpan ve Altınsapan [34, 35] ise tarihi köprüleri farklı özelliklerine göre sekiz gruba ayırmıştır. Bunlar;

1. Biçimlerine göre köprüler (Şekil 1.19)
 - a. Yatay şekilli köprüler (düz köprüler)
 - b. Her iki kıyıdan itibaren büyük kemere doğru çıkış ve inişli (tek, çift veya çok hörgüçlü) şekilliler (dik köprüler)
 - c. Her iki kıyıdan itibaren hafif meyille başlayıp sonra yatay şekil alanlar



a. Düz köprü



b. Dik köprü



c. Hafif meyille başlayıp sonra yatay olan köprü

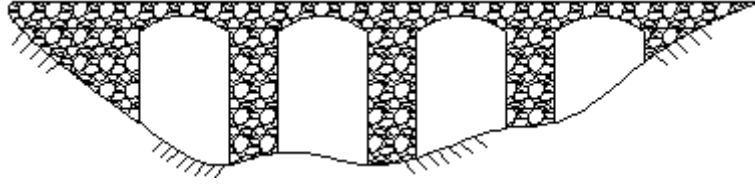
Şekil 1.19. Biçimlerine göre taş köprüler [35].

2. Açıklıklarının sayısına göre köprüler (Şekil 1.20)

- a. Tek gözlü, ayaksız (bir kıyıdan diğerine uzatılmış) köprüler
- b. Çok gözlü köprüler



a. Tek gözlü köprüler



b. Çok gözlü köprüler

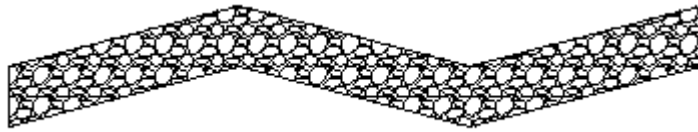
Şekil 1.20. Açıklık sayılarına göre taş köprüler [35].

3. Planına göre köprüler (Şekil 1.21)

- a. Tek ve geniş açılı kırık şekilliler
- b. Birkaç geniş açılı zikzak şekilliler



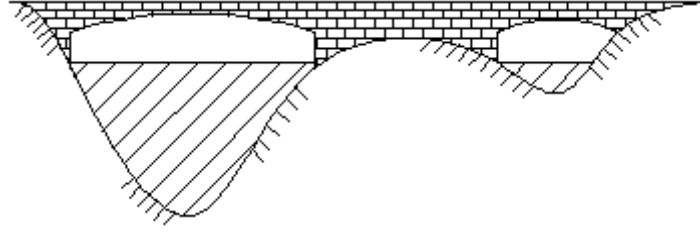
a. Tek ve geniş açılı kırık şekilliler



b. Birkaç geniş açılı zikzak şekilliler

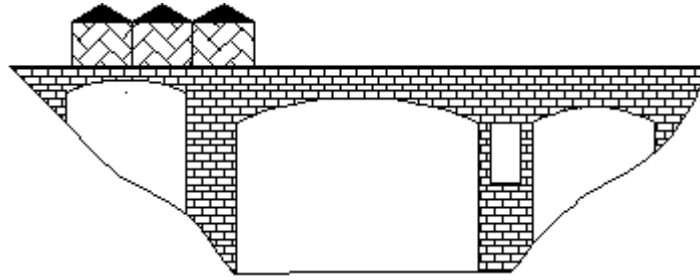
Şekil 1.21. Planına göre taş köprüler [35].

4. İnşa edildikleri arazinin topografyasına göre yapılan kesik köprüler (Şekil 1.22)



Şekil 1.22. Kesik köprüler [35].

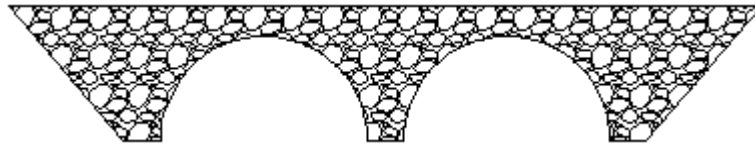
5. Üzerinde veya bazı ayakları içinde ev, dükkân veya odacıklar bulunan köprüler



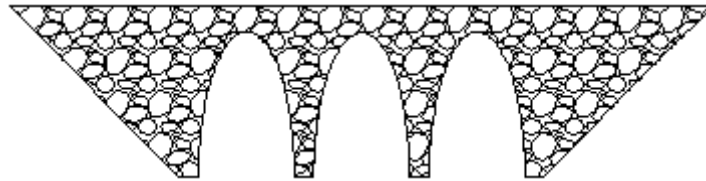
Şekil 1.23. Üzerinde odacıklar bulunan köprüler [35].

6. Kemer biçimlerine göre köprüler (Şekil 1.24)

- a. Yuvarlak kemerli köprüler
- a. Sivri kemerli köprüler



a. Yuvarlak kemerli köprüler



b. Sivri kemerli köprüler

Şekil 1.24. Kemer biçimlerine göre köprüler [35].

7. Selyaran (payanda) biçimlerine göre köprüler (Şekil 1.25)

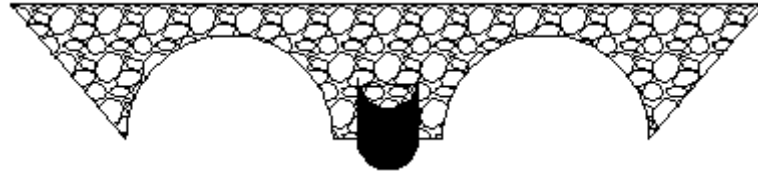
- a. Üçgen payandalı köprüler
- b. Çokgen payandalı köprüler
- c. Yuvarlak payandalı köprüler
- d. Merdiven basamağı gibi kademeli yapılmış payandaları olan köprüler



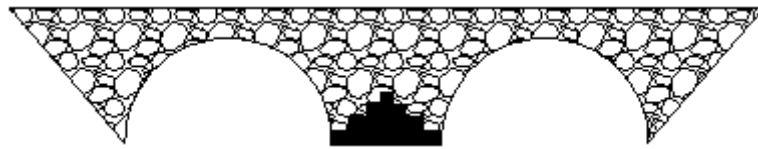
a. Üçgen payandalı köprüler



b. Çokgen payandalı köprüler



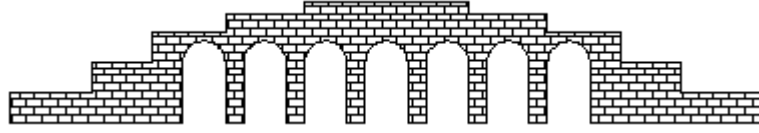
c. Yuvarlak payandalı köprüler



d. Kademeli payandalı köprüler

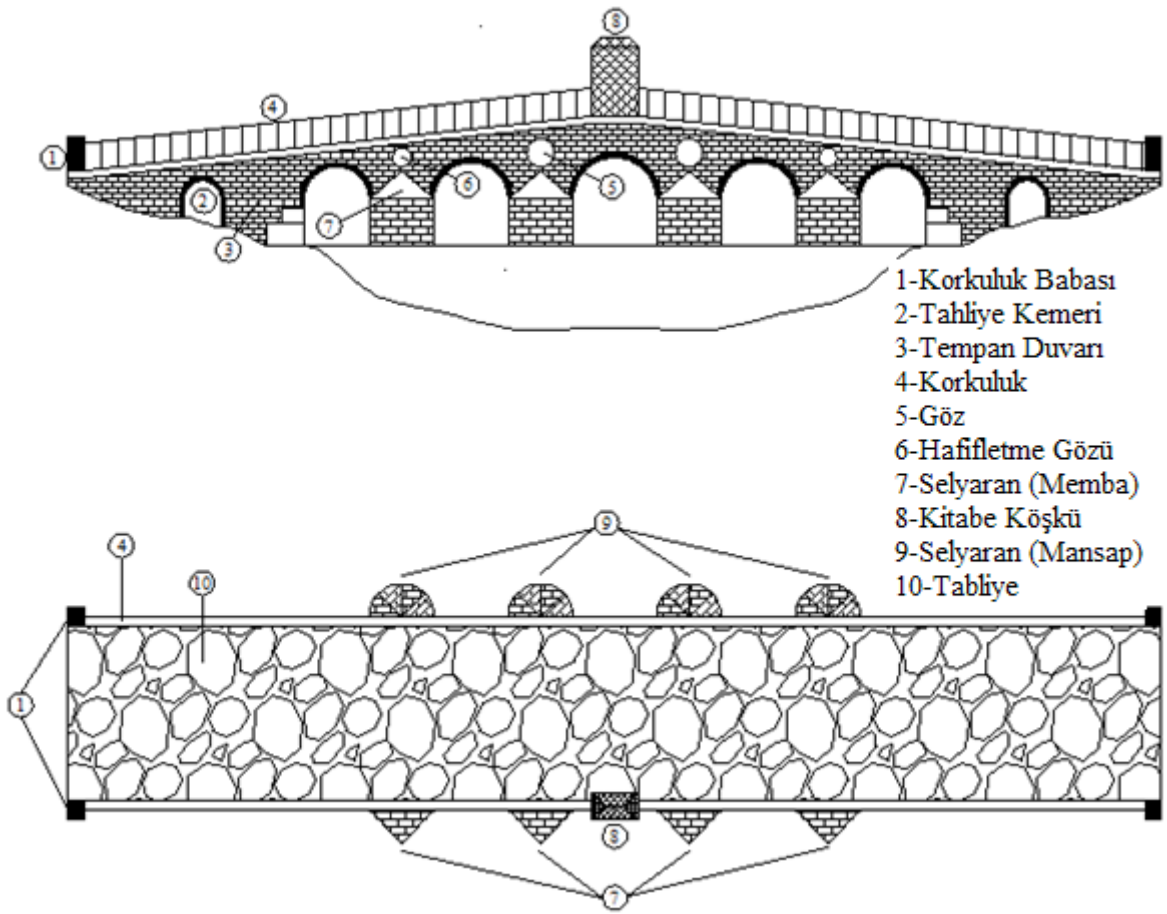
Şekil 1.25. Selyaran biçimlerine göre köprüler [35].

8. Döşeme kısmı, merdiven basamakları gibi kademeli yapılmış olan köprüler (Şekil 1.26)



Şekil 1.26. Döşeme kısmı basamaklı köprüler [35].

Tarihi günümüze bağlayan köprüleri meydana getiren elemanlar Şekil 1.27'de gösterilmektedir.



Şekil 1.27. Kemer köprü bölümleri [URL-6].

Şekil 1.27'deki terimleri kısaca açıklamak gerekirse [30] ;

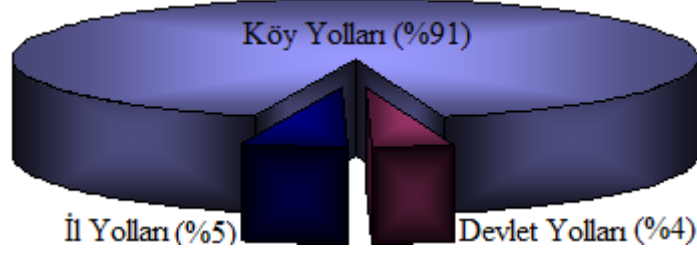
- Ayak: Köprü kemerlerinin ve tabliyenin taşıma gücünü yüklenen taş, tuğla veya ağaçtan yapılan dayanaktır.

- Kemer: İki duvar veya ayak arasındaki bir açıklığın üstünü örtmek için, birer ucu belli ayaklara oturtularak, yuvarlak şekilde yapılan ahşap veya kargir inşaata denir. Burada meydana gelen boşluğa da köprü gözü denir.
- Kemer Açıklığı: Bir kemerin bindiği iki duvar, iki ayak veya sütun arasındaki mesafeye denir.
- Tempan Duvarı: Köprünün taşıyıcı taş duvarına denir.
- Tabliye: Köprü yapımında ilk olarak yerleştirilen ve köprüyü oluşturan bölümdür.
- Selyaran: Suyun açıklara yönelmesi ve çarparak köprüye zarar vermemesi için, köprü ayaklarının memba tarafına yapılan üçgen planlı masif taş bölümdür. Taş köprülerin günümüze taşınmasında önemi büyüktür.
- Korkuluk: Tabliyenin iki tarafında ve tempan duvarının üzerinde yükselen ve geçişte güveni sağlayan kısımlardır.
- Korkuluk Babası: Köprülerin başlarına ve korkulukların başlangıç kısımlarına yerleştirilen dikey taşlardır.
- Hafifletme Gözü: Köprülerde taşıyıcı kemerin üst kısımlarında, köprü ağırlığını azaltmak için kullanılan dairesel açıklıklardır.
- Göz: Mimari terminolojide birkaç ayrı anlama gelen terim, köprülerde kemer açıklıklarını belirtmek için kullanılan terimdir.

1.8.2. Türkiye'deki Taş Kemer Köprü Örnekleri

Anadolu'da tarih öncesinden bu yana yaşayan toplumlar ulaşım amacıyla bazı yapılar inşa etmişlerdir. Bu arada da yollar üzerindeki büyük suları ve vadileri geçebilmek için köprüler yapmışlardır. Bugün Türkiye'de konum, biçim, yapım tekniği, kemer formu, kullanılan malzeme vb. bakımlardan çeşitlilik gösteren 1266 adet kayıtlı köprü bulunmaktadır. Yapım tekniklerine göre bu köprülerin 1221 tanesi taş kemer köprü, 3 tanesi ahşap köprü, 28 tanesi demir köprü ve 14 tanesi de betonarme köprüdür [URL-5].

Türkiye'deki tarihi köprülerin köy, devlet ve il yolları üzerindeki dağılımı Şekil 1.28'de gösterilmektedir.



Şekil 1.28. Tarihi köprülerin buldukları yollara göre dağılımı [URL-5].

Yapıldıkları dönemlere göre Türkiye’de bulunan tarihi köprülerin 1 tanesi Hitit dönemi, 80 tanesi Roma dönemi, 10 tanesi Bizans dönemi, 90 tanesi Selçuklu dönemi, 413 tanesi Selçuklu dönemi köprüleridir. Türkiye’de bulunan 672 tane tarihi köprünün ise yapıldıkları dönemler belli değildir [URL-5].

Roma döneminde inşa edilen taş kemer köprülerden en önemlileri Adıyaman’da Cendere deresi üzerinde 130m uzunluğunda ve 7m genişliğindeki 2 gözlü Cendere Köprüsü, Adana’da Ceyhan nehri üzerinde 9 gözlü, 135m uzunluğunda ve 6.5m genişliğindeki bilinen ilk Roma köprüsü olan Misis Köprüsüdür. Şekil 1.29 ve Şekil 1.30’da Cendere ve Misis Köprüleri gösterilmektedir. Antalya’da bulunan 22.8m uzunluğundaki tek kemer gözlü Oluk Köprüsü, Adana’da Seyhan nehri üzerinde bulunan 310m uzunluğundaki 14 gözlü Taş Köprü, Balıkesir’de bulunan Güvercin Köprüsü ve Hatay’daki Asi Nehri Köprüsü diğer Roma taş kemer köprülerinden bazılarıdır.



Şekil 1.29. Cendere Köprüsü, Adıyaman [URL-8].



Şekil 1.30. Misis Köprüsü, Adana [URL-9].

Sakarya ili sınırları içerisinde bulunan 336.50m uzunluğundaki ve 10.10m genişliğindeki Sangarios Köprüsü, Bizans döneminde inşa edilen köprülerden bir tanesidir. 12 gözlü olarak inşa edilen köprünün en büyük kemer açıklığı 33m'dir. Bir diğer Bizans köprüsü olan Beş Köprü ya da diğer adıyla Jüstinyen Köprüsü 429m uzunluğunda ve 8 kemer gözlü bir köprüdür. Şekil 1.31'de Beş köprü gösterilmektedir.



Şekil 1.31. Beş Köprü, Sakarya [URL-10].

Selçuklular döneminde inşa edilen köprülerden bazıları ise Malabadi Köprüsü, Akköprü, Kesik Köprü, Tekgöz Köprüsü, Çobandere Köprüsü ve Murat Köprüsüdür. Şekil 1.32'de Malabadi Köprüsü Dünyada günümüze kadar ulaşan en geniş açıklıklı taş kemer köprüsüdür. Bu köprü toplam 240m uzunluğunda ve 40.80m genişliğindedir. Günümüze

kadar sağlam ulaşabilen ve halen kullanılan bir Selçuklu köprüsü olan Akköprü Ankara sınırları içerisinde yer alan 7 gözlü bir kemer köprüdür (Şekil 1.33). Kırşehir ilinde bulunan Kesik Köprü 220m uzunluğuna sahip 13 gözlü bir kemer köprüdür. Murat Nehri üzerinde bulunan 189m uzunluğunda olan 12 gözlü Murat köprüsü Muş-Varto yolu üzerindedir. Bir diğer çok gözlü Selçuklu köprüsü Erzurum-Kars yolu üzerinde bulunan Çobandere Köprüsüdür. Toplam 204m uzunluğunda ve 7.35m genişliğinde olan bu köprü toplam 6 göze sahip bir kemer köprüdür. Selçuklu dönemi köprülerinden bir diğeri ise 13 kemer açıklığına sahip Kesikköprü'dür. Eski Kırşehir-Konya yolu Kızılırmak Nehri üzerinde bulunan, 50m eninde ve 220m uzunluğundaki Kesikköprü Şekil 1.34'te gösterilmektedir.



Şekil 1.32. Malabadi Köprüsü, Diyarbakır [URL-11].



Şekil 1.33. Akköprü, Ankara



Şekil 1.34. Kesik Köprü, Kırşehir [URL-12].

Edirne’de bulunan Uzunköprü, Yalnız Göz Köprüsü, Beyazıt Köprüsü, Saray Köprüsü ve Meriç Köprüsü, Kırklareli’ndeki Babaeski Köprüsü de Osmanlı döneminde inşa edilen tarihi kemer köprülerdir. 1392m uzunluğunda, 6.80metre genişliğindeki Uzunköprü 174 gözlü bir kemer köprüdür. Edirne-İzmir Devlet karayolu halen bu köprü üzerinden geçmektedir. Uzunköprü Şekil 1.35’te gösterilmektedir. Şekil 1.36’da gösterilen Meriç Köprüsü, 263m uzunluğunda, 7m genişliğinde ve 13 ayak üzerinde 12 sivri kemerli bir köprüdür. Edirne’de inşa edilen bir diğer Osmanlı Köprüsü olan Beyazid Köprüsü’nün uzunluğu 100m, genişliği ise 6m’dir. Kesme taşlardan inşa edilen Beyazid Köprü’nün 6 adet sivri kemerli gözü vardır. Köprü’nün ortasındaki en büyük kemerin açıklığı 10 m’dir. Tunca Nehri üzerinde inşa edilen Saray Köprüsü 60m uzunluğunda ve 4 sivri kemer gözlü bir köprüdür. Köprü en büyük açıklığı 10m’dir. Bir diğer Osmanlı köprüsü olan Babaeski Köprüsü 72.40m uzunluğundadır ve toplam 6 kemer gözden meydana gelmektedir. Genişliği 7m olan ve Şekil 1.37’de gösterilen Babaeski Köprüsü’nün en büyük kemer açıklığı da 7.50m’dir.



Şekil 1.35. Uzunköprü, Edirne [URL-13].



Şekil 1.36. Meriç Köprüsü, Edirne [URL-14].



Şekil 1.37. Babaeski Köprüsü, Kırklareli [URL-15].

Anadolu köprülerinin önemli bir grubunu da Doğu Karadeniz bölgesindeki tek kemer gözlü köprüler oluşturmaktadır. Bunlar belli mevsimlerde şiddetli akan dereler üzerinde inşa edildikleri için mümkün olduğunca yüksek kemerli inşa edilmişlerdir. Çoğu kere kemerler iki yanda kayalara oturtulurdu. Bu muhteşem yapılar köylüler ya da önde gelen ailelerce inşa ettirilirdi. Sınırlı sayıda insana hizmet veren bu yapıların inşa kitabeleri yoktur. Kimin, ne zaman, hangi mimara ya da kalfaya yaptırdığını kesin olarak bilmek zordur. Genellikle 18.- 19. yüzyıla tarihlenirler [URL-6]. Köprülerin tümü, akarsu yatağının iki yanında karşılıklı birer ayak üzerine yükselen yuvarlak ya da hafif sivri kemerli bir yay formundadır. Tablo 1.1’de kesin olarak kim tarafından ve ne zaman yapıldıkları belli olmayan Karadeniz bölgesinde bulunan bazı köprülerin temel özellikleri ve nerelerde buldukları verilmiştir.



Şekil 1.38. Çifte Köprü, Artvin [URL-16].

Doğu Karadeniz bölgesinde Osmanlı döneminde inşa edilen ve Artvin’de bulunan Çifte Köprü adıyla bilinen köprüler esasen iki tanedir. Bu köprüler birbirine dik gelecek şekilde inşa edilmişlerdir. Birinci köprü Keramet Deresi üzerinde inşa edilmiş olup, 35m uzunluğunda ve 2.60m genişliğindedir. Tek kemer gözlü olan köprüünün kemer açıklığı ise 21m’dir. İkinci köprü ise Soğucak suyu üzerinde bulunmakta olup, 27m uzunluğunda ve 2.50m genişliğindedir. Bu köprü de tek kemer gözlü olup kemer açıklığı 17m’dir. Hafif sivri kemere sahip bu köprüler Şekil 1.38’de gösterilmektedir.

Tablo 1.1. Doğu Karadeniz köprülerinden bazıları ve temel özellikleri [36]

İL	İLÇE	KÖPRÜ ADI	DÖŞEME UZUNLUĞU (m)	DÖŞEME GENİŞLİĞİ (m)	KEMER TİPİ	KEMER YÜKSEKLİĞİ ve ADETİ (m / adet)	KEMER AÇIKLIKLARI (m)
Trabzon	Maçka	Bağışlı Köprüsü	18,20	3,60	Çift Merkezli, Basık Sivri	5,00 / 1	10,00
		Coşandere Köprüsü	25,50	4,00		7,00 / 1	13,60
	Söğütlü	Söğütlü Köprüsü	39,40	4,50		4,60 / 2	8,70 – 7,90
	Arsin	Yeniköy Köprüsü	27,75	4,20 – 6,20		6,65 / 1	15,60
		Kaşıkçı Köprüsü	20,20	3,40 – 4,60		5,40 / 1	12,00
	Şalpazarı	Güdün Köprüsü	30,00	3,70		8,00 / 1	11,20
	Vakfikebir	Folderesi Köprüsü	29,50	5,00		8,50 / 1	15,00
Yomra	Gürpınar Köprüsü	19,50	3,40	Tek Merkezli, Dairesel	6,20 / 1	12,40	
Rize	Çamlıhemşin	Mikron Köprüsü	33,80	3,00	Tek Merkezli, Dairesel	10,60 / 1	19,50
		Şenyuva Köprüsü	52,40	2,50		12,40 / 1	24,80
		Osmanlı Köprüsü	51,70	3,50		13,00 – 3,00 / 2	25,20 – 6,00
		Ham Köprüsü	31,00	2,90		8,20 / 1	16,40
		Kale Köprüsü	32,70	2,70		7,40 / 1	14,80
	İkizdere	Güneyce Köprüsü	46,50	2,80	Dairesel	6,25 / 1	12,50
		Dereköy Köprüsü	30,00	3,10		7,25 / 1	16,00
	Merkez	Ambarlık Köprüsü	36,00	3,20	Çift Merkezli Sivri	6,00 / 1	20,00
	Pazar	Suçatı Köprüsü	49,91	2,40	Dairesel	10,70 / 1	21,27
	Ardeşen	Yukarıdurak Köprüsü	42,00	3,20		8,60 – 7,60 / 2	17,20 – 15,20
Gümüşhane	Torul	İlecik Köprüsü	22,70	3,60	Çift Merkezli, Sivri	6,70 / 1	11,70
		Köprübaşı Köprüsü	71,5	6,2		6,20 / 1	24,00
		Harşit Köprüsü	68,25	6	Dairesel Kemer	9,30 / 3	18,6
	Şiran	Dibekli Köprüsü	39,00	4,20	Dairesel Kemer	6,10 / 1	13,50
	Merkez	Tohumoğlu Köprüsü	64,80	5,30		8,00 – 7,00 / 2	16,00 – 14,00

1.8.3. Uygulama İçin Seçilen Tarihi Taş Kemer Köprülerin Özellikleri

Bu çalışma için Rize ili Çamlıhemşin ilçesinde Fırtına Deresi üzerinde inşa edilmiş olan bir adet tek açıklıklı ve bir adet çift açıklıklı tarihi taş kemer köprü seçilmiştir. Köprüler kemer biçimlerine göre yuvarlak kemerli köprüler, biçimlerine göre ise dik köprüler sınıfları içerisinde yer almaktadırlar.

1.8.3.1. Şenyuva Köprüsü

Bu çalışmada ilk olarak 1696 yılında bölge halkı tarafından nehrin diğer tarafındaki arazilere geçmek için inşa edilen tarihi Şenyuva taş kemer köprüsü seçilmiştir. Köprü Rize'nin Çamlıhemşin ilçesindeki Fırtına Deresi üzerinde inşa edilmiştir. Köprü yapımında kesme taş ve moloz taş kullanılmıştır. Kemerler düzenli taş örgü yan duvarlar ise düzenli moloz taş örgülüdür. Köprü batı ayağı 1958-1959 yılları arasında, güney istikametinde beton bir payanda ile desteklenmiştir. Köprü korkuluk duvarı 1997 yılında tamir edilerek üzerine demir bir kısım daha ilave edilmiş ve duvarları temizlenmiştir. Fakat esas yapısal elemanlar olan taş kemer, yan ve dolgu duvarlar herhangi bir onarım görmemiştir [36]. Şenyuva Köprüsü doğu kanadı, batı kanadı, mansap tarafı ve memba tarafı görünüşleri sırasıyla Şekil 1.39, Şekil 1.40, Şekil 1.41 ve Şekil 1.42'de gösterilmektedir. Köprü döşeme kısmı, merdiven basamakları gibi kademeli yapılmış olan köprülerdendir. Doğu kanadında altı basamak, batı kanadında ise yirmi iki basamak yer alır.



Şekil 1.39. Şenyuva Köprüsü doğu kanadı



Şekil 1.40. Şenyuva Köprüsü batı kanadı

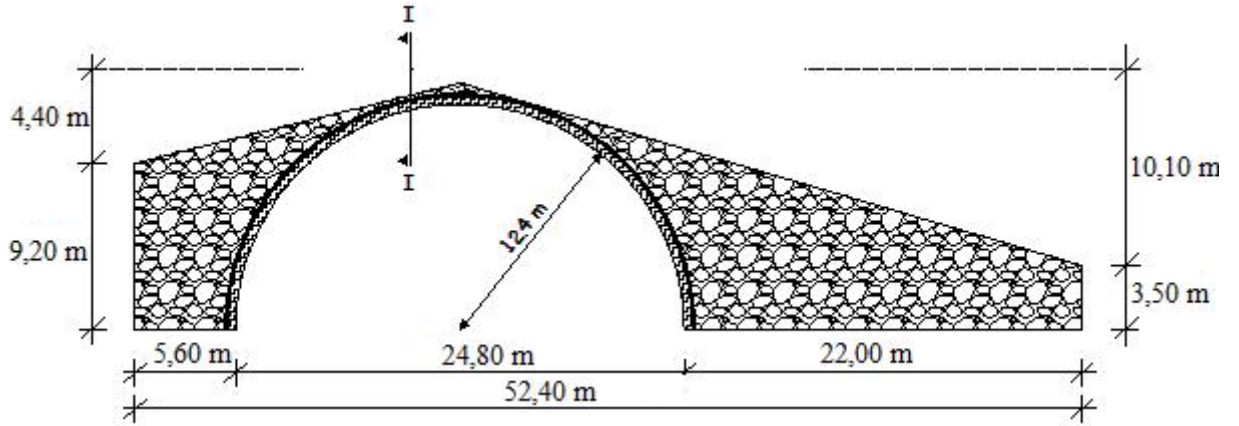


Şekil 1.41. Şenyuva Köprüsü mansap görünüşü

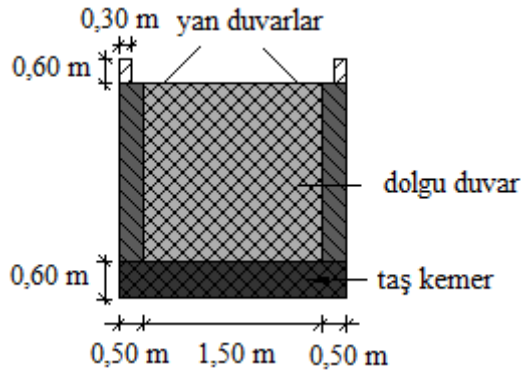


Şekil 1.42. Şenyuva Köprüsü memba görünüşü

Köprü tek açıklıklı bir kemer köprü olup, toplam genişliği 52.40m, köprü kemer açıklığı 24.80m, kemer yüksekliği 12.40m ve köprü genişliği 2.50m'dir. Tarihi kemer köprüyü oluşturan elemanların kesit görünüşü ve özellikleri Şekil 1.43'te verilmektedir.



a) Köprü boyuna kesiti



b) Köprü enine kesiti (I-I kesiti)

Şekil 1.43. Şenyuva Köprüsü kesit özellikleri

Köprü kemer yarıçapı ve kalınlığı sırasıyla 12.40m ve 0.60m; yan duvarların kalınlığı 0.50m ve yan duvarlar arasındaki dolgu duvarın kalınlığı ise 1.50m'dir. Yan duvarların yükseklikleri her iki tarafta sırasıyla 9.20m ve 3.50m'dir. Ayrıca köprüün her iki tarafında 30*60cm boyutlarında korkuluklar mevcuttur.

1.8.3.2. Osmanlı Köprüsü

Uygulama için seçilen ikinci köprü 19. yüzyılın ikinci yarısı ile 20. yüzyıl başı arasında inşa edildiği düşünülen tarihi Osmanlı taş kemer köprüsüdür. Bu köprü iki açıklıklı bir taş kemer köprüdür. Köprünün temel yapısal bölümleri olan taş kemerler, yan duvarlar ve dolgu duvar günümüze kadar herhangi bir restorasyon çalışmasına uğramamıştır. Köprü memba görünüşü Şekil 1.44 ve mansap görünüşü ise Şekil 1.45'deki resimlerde verilmektedir. Köprü yapımında kesme taş ve moloz taşlar kullanılmıştır. Kemerler, kesme taş, yan duvarlar ve köprü yolu düzenli moloz taş örgülüdür [36].



Şekil 1.44. Osmanlı Köprüsü memba görünüşleri



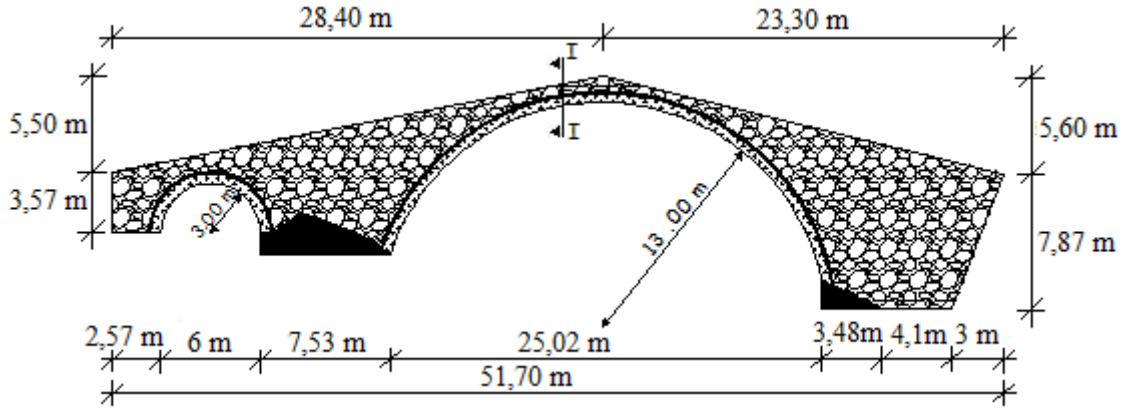
Şekil 1.45. Osmanlı Köprüsü mansap görünüşleri

Köprü kuzeydoğu-güneybatı doğrultusunda inşa edilmiş olup Şekil 1.46'da gösterilen köprünün güneybatı tarafındaki yuvarlak kemere sahip gözü boşaltma gözü olarak inşa edilmiştir.

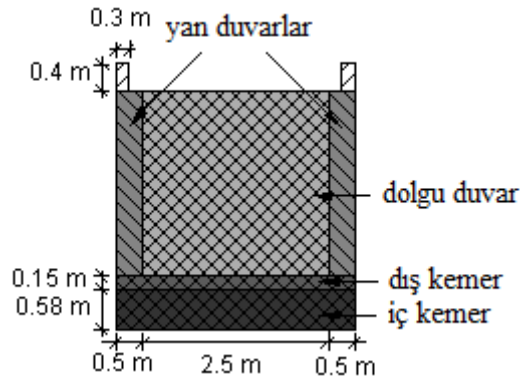


Şekil 1.46. Güneybatı yönündeki boşaltma gözü

Köprü toplam 51,70m uzunluğunda olup, taş kemer açıklıkları sırasıyla 25.20m ve 6m olup dairesel kesitlidirler. Her iki açıklıkta bulunan taş kemerler iç ve dış kemer olmak üzere iki parçadan meydana gelmişlerdir ve kalınlıkları sırasıyla 0.58m ve 0.15m'dir. Her iki yan duvar genişliği 0.50m olup, bu duvarlar arasında kalan dolgu duvar genişliği ise 2,50m'dir. Osmanlı Köprüsü kesit özellikleri Şekil 1.47'da ayrıntılı olarak verilmektedir.



a) Köprü boyuna kesiti



b) Köprü enine kesiti (I-I kesiti)

Şekil 1.47. Osmanlı Köprüsü kesit özellikleri

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak, tarihi taş kemer köprülerin deneysel ve teorik dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ve köprülerin mevcut davranışlarını en iyi şekilde yansıtacak sonlu eleman modellerinin deneysel sonuçlar yardımıyla iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla tek kemer açıklıklı tarihi Şenyuva Köprüsü ve çift kemer açıklıklı tarihi Osmanlı Köprüsü üzerinde uygulamalar yapılmıştır. Çalışmada ilk olarak, köprülerin teorik doğal frekansları ve mod şekillerini elde etmek için, ANSYS [15] programı kullanılarak tarihi köprülerin 3-boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş teorik dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Daha sonra çevresel titreşimler olarak yaya hareketlerinden ve rüzgâr yüklerinden yararlanılarak köprüler üzerinde Operasyonel Modal Analiz Yöntemi gerçekleştirilmiş ve deneysel dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Her iki köprü için ayrı ayrı olarak teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen dinamik karakteristikler birbirleriyle karşılaştırılmış ve bu sonuçlar arasındaki farklılıkları en aza indirecek şekilde köprü sonlu eleman modelleri sınır şartlarındaki değişimler göz önüne alınarak iyileştirilmiştir.

2.1. Tarihi Taş Kemer Köprülerin Teorik Modal Analizleri

2.1.1. Şenyuva Köprüsü Teorik Modal Analizi

2.1.1.1. Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli

Tarihi yapıların teorik analizlerinde, yapıyı oluşturan elemanlara ait malzeme özelliklerinin doğru seçilmesi çok önemlidir. Zira yapı sonlu eleman modeli oluşturulurken gerekli verilerden biri olan malzeme özellikleri ne kadar doğru girilirse, oluşturulan model gerçek yapıyı ve davranışlarını o kadar iyi temsil eder. Tarihi yapıların malzeme özelliklerini belirlemek oldukça zor, pahalı ve bazen tarihi öneme sahip bu yapılarda tahrip edici sonuçlara neden olabilir. Bu çalışmada bu yönde bir çalışma yapılmamış, onun yerine literatürde tarihi köprülerle ilgili benzer çalışmalar araştırılmış ve bu çalışmalardan elde edilen malzeme özellikleri kullanılmıştır [3, 12, 13]. Bu çalışmalarda köprülerde taş kemer,

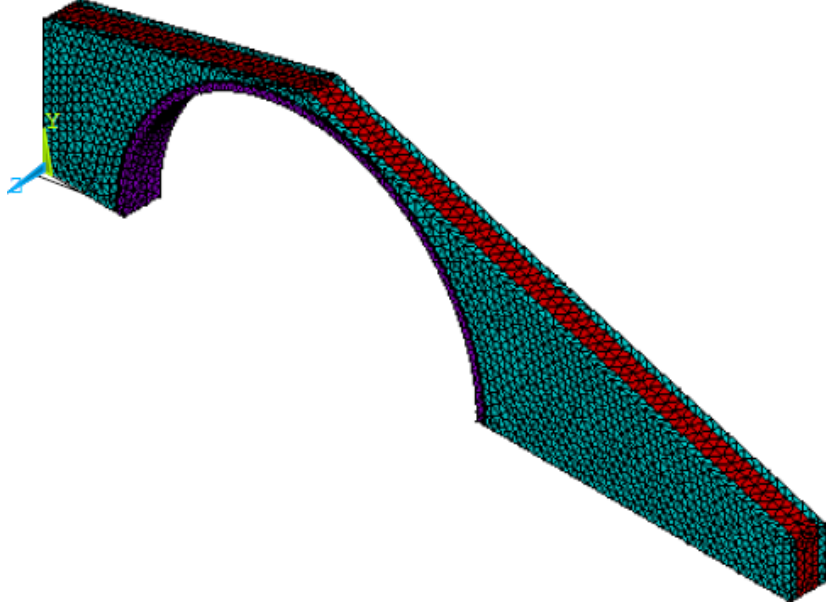
dolgu duvar ve yan duvarlar için farklı malzemeler kullanıldığı düşünülmüştür. Köprü sonlu eleman modeli oluşturulurken kullanılan malzemelerin özellikleri Tablo 2.1’de gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Taş kemer köprü teorik analizinde kullanılan malzeme özellikleri [3, 12, 13].

Malzeme	Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı	Yoğunluk (kg/m ³)
Taş Kemer	3.0E9	0.25	1600
Dolgu Duvar	1.5E9	0.05	1300
Yan Duvarlar	2.5E9	0.20	1400

Köprü sonlu eleman modeli oluşturulurken ANSYS [15] programı kullanılmıştır. Eleman tipi olarak ANSYS’te Solid186 olarak tanımlanan 3-boyutlu katı elemanlar seçilmiştir.

Sonlu eleman modeli oluşturulurken dikkate alınması gereken başka bir nokta modelin sınır şartlarının ne olacağıdır. Bu çalışmada, köprü ayakları altındaki ve enine doğrultudaki yan duvarlarındaki serbestliklerin tutulu olduğu kabul edilmiştir. Şenyuva taş kemer köprüsü sonlu eleman modelinde, 26391 katı eleman ve bu elemanları oluşturmak için de 41018 adet düğüm noktası kullanılmıştır. Çalışmanın birinci bölümünde tanıtılan ve Şekil 1.43’te gösterilen Şenyuva Köprüsü eleman boyutları ve kesit özellikleri kullanılarak oluşturulan taş kemer köprü 3-boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 2.1’de verilmektedir.

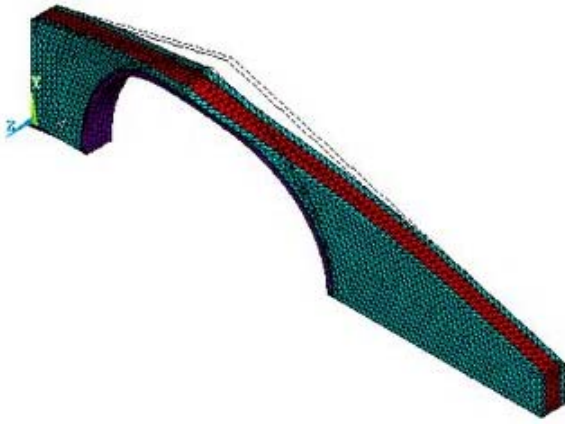


Şekil 2.1. Şenyuva taş kemer köprüsü sonlu eleman modeli

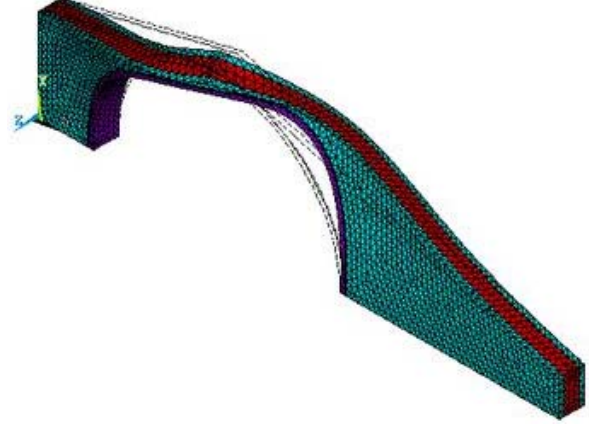
2.1.1.2. Dinamik Karakteristikleri

Köprü 3-boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulduktan sonra modal analiz gerçekleştirilmiş ve köprü teorik dinamik karakteristikleri olan mod şekilleri ve doğal frekans değerleri belirlenmiştir.

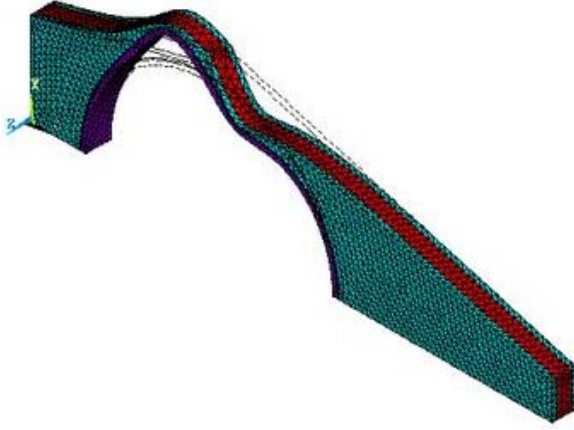
Tarihi Şenyuva Köprüsü teorik modal analizi sonucunda elde edilen ilk beş teorik mod şekli ve bu mod şekillerine karşılık gelen doğal frekans değerleri Şekil 2.2’de verilmektedir. Analiz sonuçlarına göre ilk beş teorik doğal frekans 3-11Hz arasında değerler almaktadır. Bu doğal frekans değerlerine karşılık gelen mod şekilleri incelendiğinde ise birinci ve ikinci modun yanal, üçüncü ve dördüncü modun düşey modlar ve beşinci modun ise burulma modu olduğu görülmektedir.



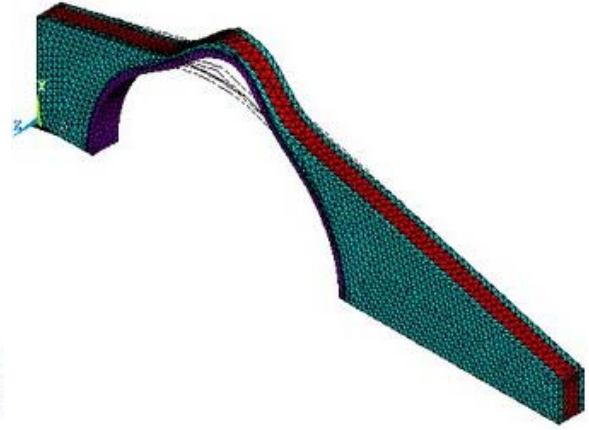
$$f_1 = 3.347 \text{ Hz (Yanal Mod)}$$



$$f_2 = 5.772 \text{ Hz (Yanal Mod)}$$



$$f_3 = 7.754 \text{ Hz (Düsey Mod)}$$



$$f_4 = 9.055 \text{ Hz (Düsey Mod)}$$



$$f_5 = 10.044 \text{ Hz (Burulma Modu)}$$

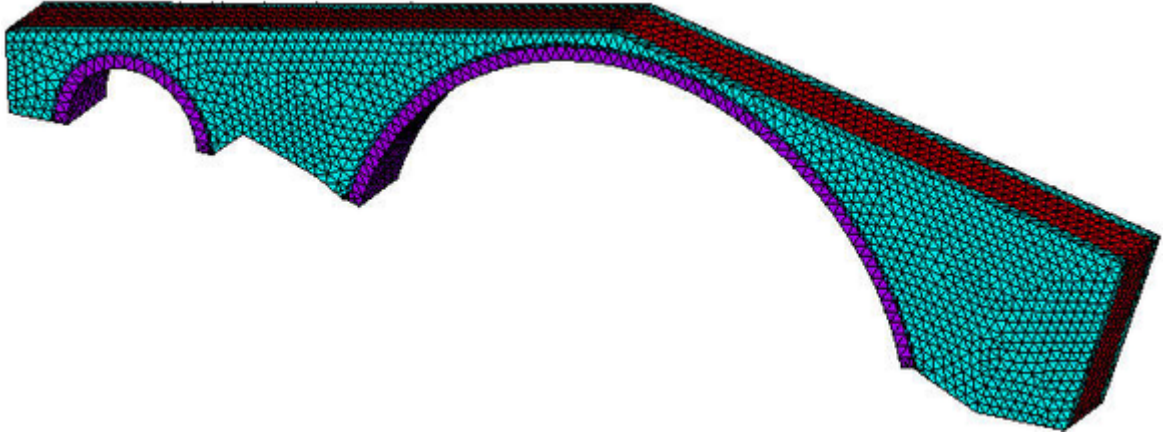
Şekil 2.2. Şenyuva Köprüsü teorik dinamik karakteristikleri

2.1.2. Osmanlı Köprüsü Teorik Modal Analizi

2.1.2.1. Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli

Bu çalışmada uygulama olarak seçilen ikinci taş kemer köprü, 19. yüzyılda inşa edilen tarihi Osmanlı Köprüsü'dür. Bu köprüyü bulunduğu bölgedeki diğer köprülerden farklı kılan şey, çift kemer açıklığına sahip olmasıdır.

Şekil 1.47'de verilen özellikler dikkate alınarak köprünün sonlu eleman modeli ANSYS [15] programıyla oluşturulmuştur. Modelleme sırasında sınır şartları olarak köprünün orta ve kenar ayakları altındaki serbestlikler ile enine doğrultudaki yan duvar serbestliklerin tutulu olduğu kabul edilmiştir. Osmanlı Köprüsü'nün oluşturulan 3-boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 2.3'te gösterilmektedir. Sonlu eleman modelinde 38771 adet 3-boyutlu katı eleman ve 59369 adet düğüm noktası kullanılmıştır.



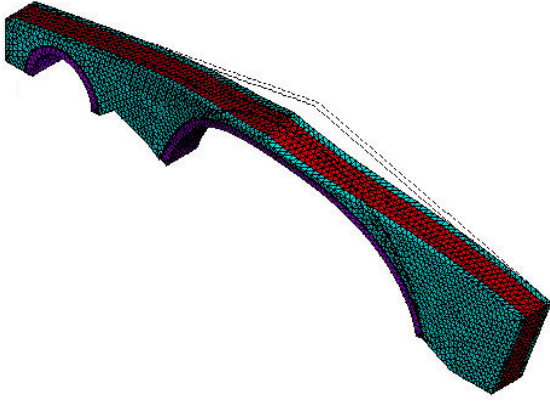
Şekil 2.3. Osmanlı taş kemer köprüsü sonlu eleman modeli

2.1.2.2. Dinamik Karakteristikleri

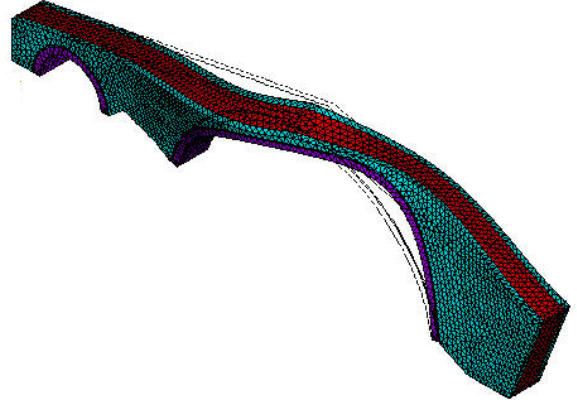
Osmanlı taş kemer köprüsünün teorik dinamik karakteristiklerini elde etmek için, köprünün sonlu eleman modelinin teorik modal analizi Tablo 2.1'de verilen malzeme özellikleri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve istenen değerler elde edilmiştir.

Analiz sonuçlarında ilk beş mod şekli ve bu mod şekillerine karşılık gelen ilk beş doğal frekans değeri dikkate alınmıştır. Elde edilen ilk beş doğal frekans değeri 3-15Hz arasında değerler almıştır. Mod şekillerine dikkat edildiğinde ise modların yanal, düşey ve

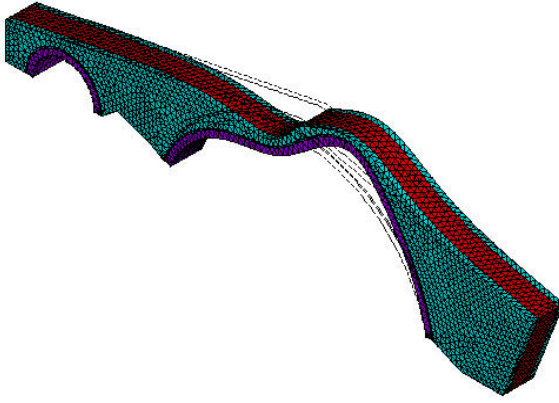
burulma modları oldukları gözlemlenmiştir. Osmanlı Köprüsü teorik analizleri sonucunda elde edilen dinamik karakteristikleri Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



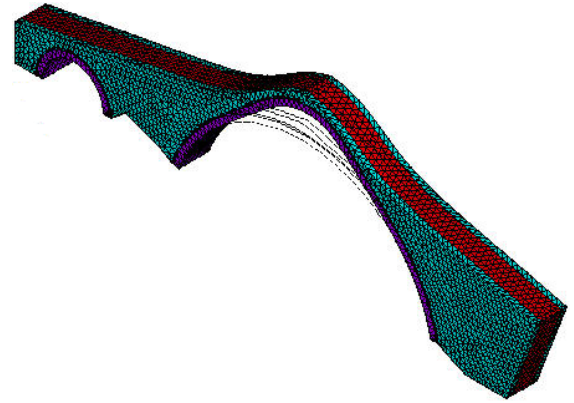
$$f_1 = 3.843 \text{ Hz (Yanal Mod)}$$



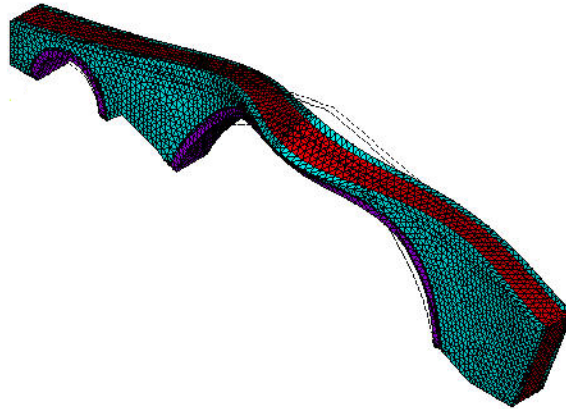
$$f_2 = 7.527 \text{ Hz (Yanal Mod)}$$



$$f_3 = 9.371 \text{ Hz (Düsey Mod)}$$



$$f_4 = 10.638 \text{ Hz (Düsey Mod)}$$



$$f_5 = 14.563 \text{ Hz (Burulma Modu)}$$

Şekil 2.4. Osmanlı Köprüsü teorik dinamik karakteristikleri

2.2. Tarihi Taş Kemer Köprülerin Operasyonel Modal Analizleri

Sonlu elemanlar yöntemi mühendislik problemlerine kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan sayısal bir yöntemdir. Sonlu elemanlar Yöntemi gibi teorik yöntemlerin kullanımı yapı dinamik karakteristiklerini belirleme yönünde yardımcı olur. Fakat yapıyı oluşturan elemanların malzeme özelliklerinin tam olarak bilinmemesi, yapı geometrik boyutları ile ilgili veri eksiklikleri, yapı üzerinde meydana gelen zamana bağlı deformasyonlar ve sınır şartlarındaki belirsizlikler bu tekniğin kullanımını kısıtlamaktadır. Bu nedenle yapıların gerçek davranışları dolayısıyla dinamik karakteristikleri Sonlu Elemanlar Yöntemi ile kesin olarak belirlenemez. Teorik olarak belirlenen dinamik karakteristiklerin deneysel yöntemlerle doğrulanması gerekliliği ortaya çıkar. Deneysel yöntem Operasyonel Modal Analiz yöntemi en yaygın kullanılan yöntemdir

Şenyuva ve Osmanlı taş kemer köprüleri üzerinde Operasyonel Modal Analiz Yöntemi gerçekleştirilirken kullanılan bazı ortak ekipmanlar; düşük frekans aralığı ve hassasiyetleri 0.1Hz-10v/g olan Brüel Krajer 8340 tek eksenli ivmeölçerler (Şekil 2.5), 17 kanallı Brüel Krajer 3650 veri toplama ünitesi (Şekil 2.6-2.7), çevresel titreşim verilerinden dinamik karakteristikleri elde etmek için kullanılan OMA [37] yazılımı, standart bir dizüstü bilgisayar, tek eksenli sinyal kabloları ve ivme ölçerleri köprüye sabitlemede gerekli olan vidalama aparatlarıdır.



Şekil 2.5. Brüel Krajer 8340 tek eksenli ivmeölçer



Şekil 2.6. Brüel Krajer 3650 veri toplama ünitesi



Şekil 2.7. Yatay ve düşey yönde yerleştirilen ivmeölçerler

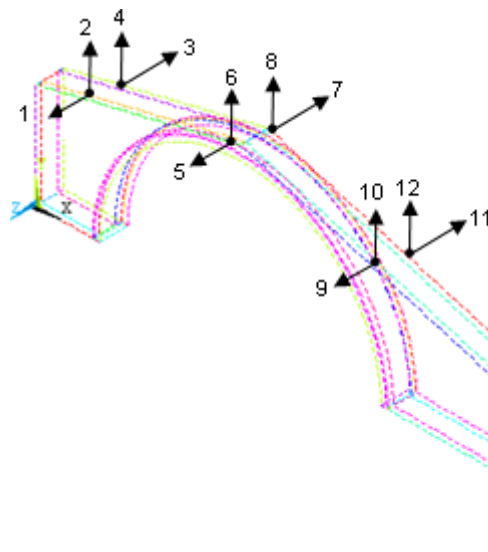
Ölçüme başlamadan önce ivmeölçerler vidalama aparatlarıyla köprü üzerindeki daha önceden belirlenmiş olan noktalara Şekil 2.5 ve Şekil 2.7’de görüldüğü gibi yatay ve düşey yönlerde karşılıklı olarak ikişer adet olmak üzere sabitlenmişlerdir. Daha sonra her bir ivmeölçer üzerinden çıkan bir tek eksenli sinyal kablosu veri toplama ünitesi üzerindeki kanallara bağlanmıştır. Ölçüme başlamadan önceki son işlem ise köprü tabliyelerinde,

ivmeölçerlerin yerleri ve yönlerinin OMA [37] yazılımına tanıtılmasıdır. Ölçüm öncesi bu hazırlık aşamasından sonra sırasıyla,

- Tek eksenli ivmeölçerler kullanılarak köprünün tepkileri ölçülmüştür.
- İvmeölçerlerden elde edilen sinyaller veri toplama ünitesinde birleştirilip PULSE [URL-17] yazılımına aktarılmıştır.
- Sinyaller PULSE [URL-17] yazılımında işlendikten sonra OMA [37] yazılımı kullanılarak dinamik karakteristikler elde edilmiştir.

2.2.1. Şenyuva Köprüsü Operasyonel Modal Analizi

Şenyuva tarihi kemer köprüsünün deneysel dinamik karakteristiklerini belirlemek için Operasyonel Modal analiz yöntemi kullanılmıştır. Ölçümler sırasında 12 adet tek eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Köprü dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için yapısal tepkiler yatay ve düşey yönlerde uygun yerlere yerleştirilen ivmeölçerler yardımıyla toplanmıştır. Köprü kemer açıklığı iki parçaya bölünmüş ve ivmeölçerler karşılıklı olarak taş kemerin orta noktası ile kemer başlangıç ve bitiş noktalarına yerleştirilmiştir. İvmeölçerlerin yerleri Şekil 2.8’de şematik olarak gösterilmektedir. Çevresel titreşim testleri yaya hareketleri ve rüzgar yükleri gibi çevresel titreşimler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



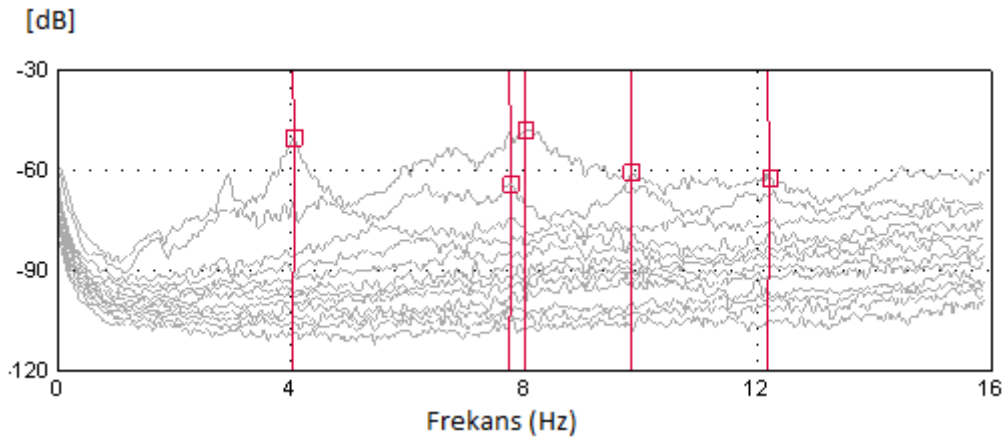
Şekil 2.8. Şenyuva Köprüsü üzerindeki ivmeölçerlerin şematik yerleşim düzeni

2.2.1.1. Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Şenyuva Köprüsü'nün deneysel dinamik karakteristikleri, Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerinden frekans ortamında Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma (GFOA) ve zaman ortamında Stokastik Alt Alan Belirleme (SAAB) Yöntemleri kullanılarak elde edilmiştir. Bu yöntemlerden Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma Yöntemi'nin tercih edilme nedeni yöntemin basitliği ve işlem hızı olurken, Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemi'nin tercih edilme nedeni yöntem zaman verileri ile çalıştığı için işlem adımlarında herhangi bir dönüşüm gerektirmemesidir.

2.2.1.1.1. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma Yöntemiyle Elde Edilen Karakteristikler

Dinamik karakteristikler Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma Yöntemi'nden her bir titreşim sinyalinden tekil değerler olarak elde edilir. Bu yöntemde yalnızca mod şekilleri ve doğal frekans değerleri değil, sönüm oranları da elde edilebilmektedir. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma (GFOA) Yöntemi için bütün sinyallerden elde edilen tekil değerler Şekil 2.9'da ve bu tekil değerlerden elde edilen doğal frekans değerleri ile sönüm oranları Tablo 2.2'de verilmektedir.



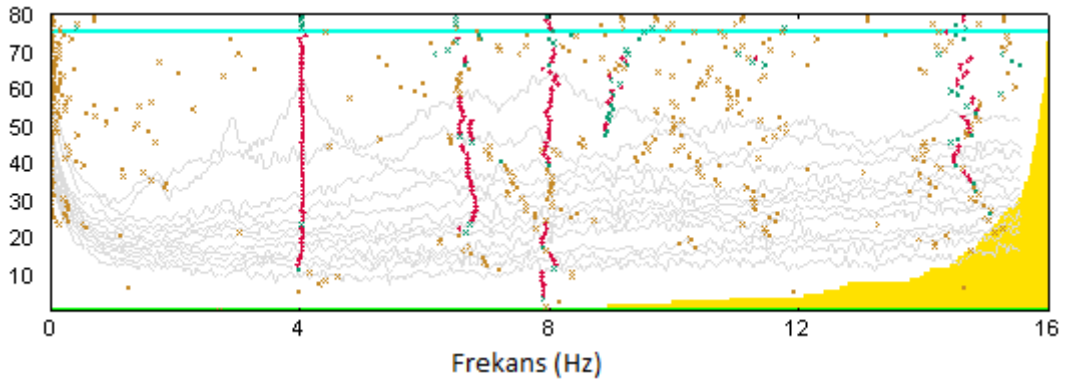
Şekil 2.9. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma Yöntemi ile elde edilen tekil değerler

Tablo 2.2. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemi ile elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Doğal Frekanslar, f (Hz)	Sönüm Oranları, ξ (%)
1	4.045	2.377
2	7.750	1.318
3	8.020	4.288
4	10.000	0.265
5	12.160	0.345

2.2.1.1.2. Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemiyle Elde Edilen Dinamik Karakteristikler

Ölçümler sonucunda köprü deneysel dinamik karakteristikleri, Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemi ile sinyallerin yığılımlı toplamından tekil değerler olarak elde edilmiştir. Stokastik Alt Alan Belirleme (SAAB) Yöntemi ile elde edilen yığılımlı tekil değerler Şekil 2.10'da ve elde edilen doğal frekans değerleri ile sönüm oranları ise Tablo 2.3'te gösterilmektedir.

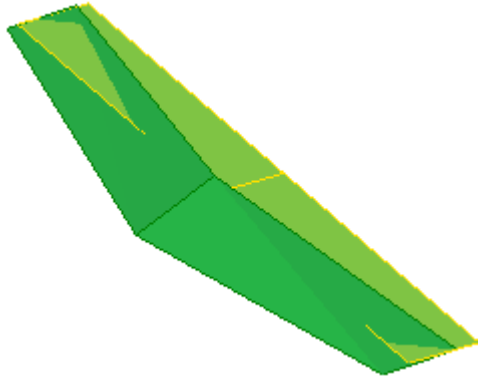


Şekil 2.10. Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemi ile elde edilen yığılımlı tekil değerler

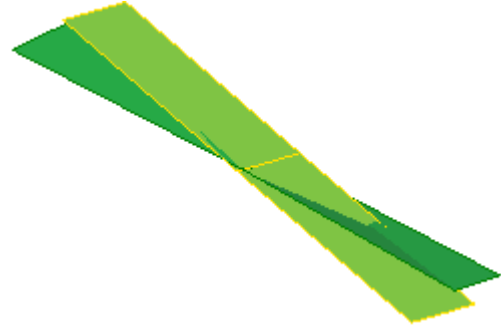
Tablo 2.3. Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemi ile elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Doğal Frekanslar, f (Hz)	Sönüm Oranları ξ (%)
1	4.066	2.255
2	7.960	1.615
3	8.044	6.780
4	10.100	4.355
5	11.750	2.514

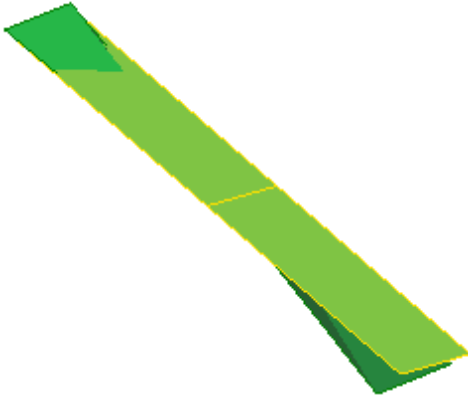
Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma ve Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemleri kullanılarak elde edilen ilk beş deneysel mod şekli aynıdır ve Şekil 2.11’de gösterilmektedir.



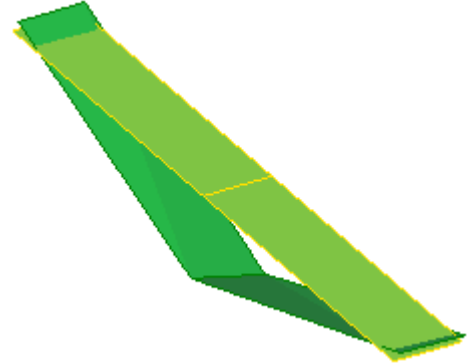
1-Yanal Mod



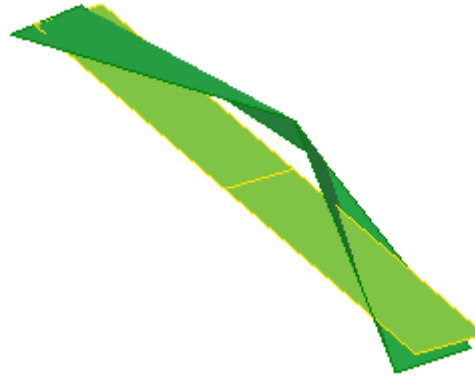
2-Yanal Mod



3-Düsey Mod



4-Düsey mod

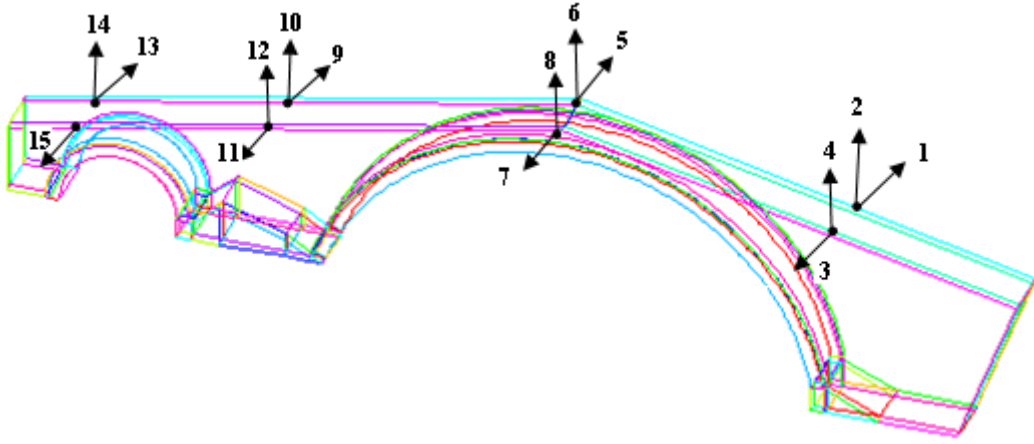


5-Burulma modu

Şekil 2.11. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma ve Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemleri kullanılarak elde edilen Şenyuva Köprüsü deneysel mod şekilleri

2.2.2. Osmanlı Köprüsü Operasyonel Modal Analizi

Köprü'nün doğal frekanslarını ve titreşim modlarını elde edebilmek amacıyla sekiz farklı noktadan tek eksenli ivmeölçerler kullanılarak köprü'nün titreşim verileri toplanmıştır. Ölçüm işleminde Şekil 2.12'de şematik olarak gösterilen ölçüm düzeneği kullanılmıştır. Bu düzende 15 adet tek eksenli ivmeölçer Şekil 2.12'deki gibi yerleştirilmiştir. Tarihi köprüyü titreştirmek için yaya hareketleri ve rüzgâr gibi çevresel etkilerden yararlanılmıştır.



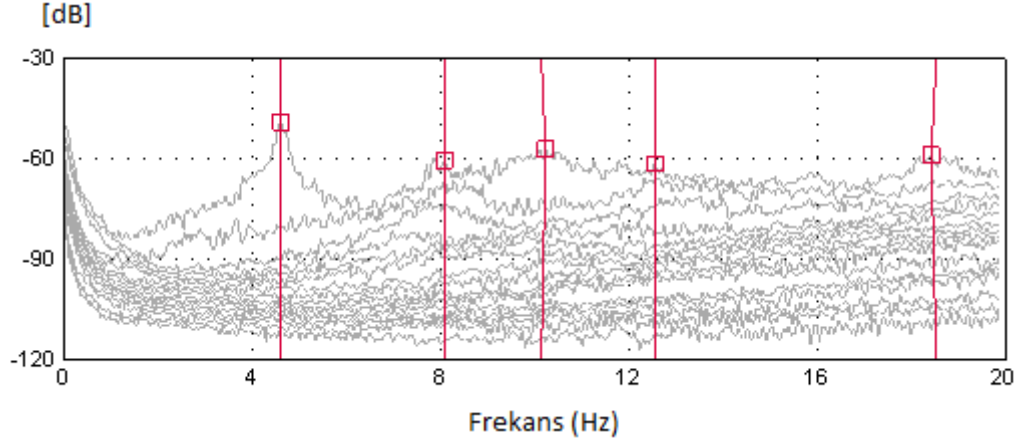
Şekil 2.12. Osmanlı Köprüsü üzerindeki ivmeölçerlerin şematik yerleşim düzeni

2.2.2.1. Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

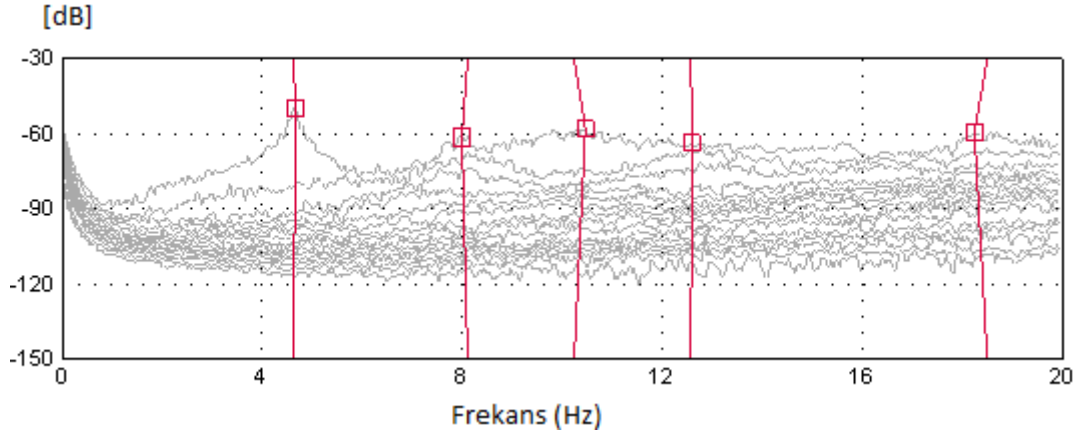
Osmanlı Köprüsü deneysel dinamik karakteristikleri belirlenirken Şenyuva Köprüsü'nde olduğu gibi iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlar, zaman tanım alanındaki Stokastik Alt Alan Belirleme ve frekans tanım alanındaki Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemleri'dir. Bu çalışmada Şenyuva Köprüsü'nden farklı olarak iki adet ölçüm gerçekleştirilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Osmanlı Köprüsü için gerçekleştirilen iki ölçüm düzeneğinde de aynı ivmeölçer düzeni kullanılmıştır.

2.2.2.1.1. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemiyle Elde Edilen Dinamik Karakteristikler

Köprü üzerinde gerçekleştirilen iki ölçüm sonrasında, Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) Yöntemi ile elde edilen tekil değerler Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'te gösterilmektedir.



Şekil 2.13. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemi ile birinci ölçüm sonucunda elde edilen tekil değerler



Şekil 2.14. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemi ile ikinci ölçüm sonucunda elde edilen tekil değerler

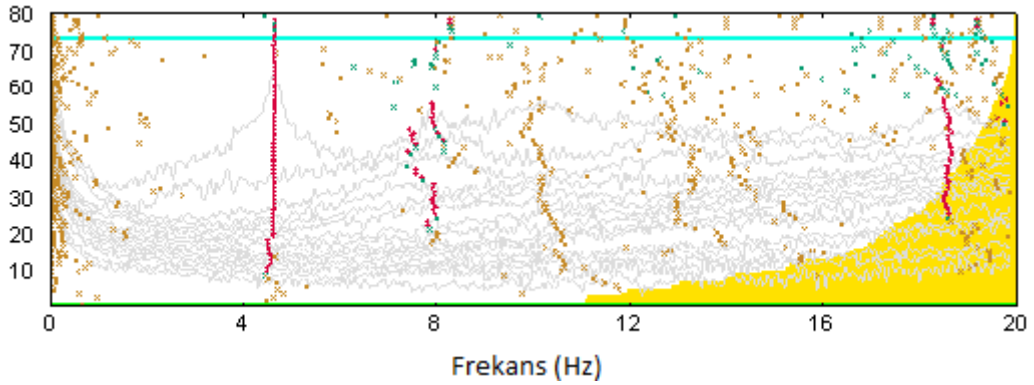
İki ölçüm sonucunda elde edilen tekil değerler değerlendirildiğinde elde edilen doğal frekans ve sönüm değerleri Tablo 2.4'te gösterilmektedir.

Tablo 2.4. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemi ile elde edilen dinamik karakteristikler

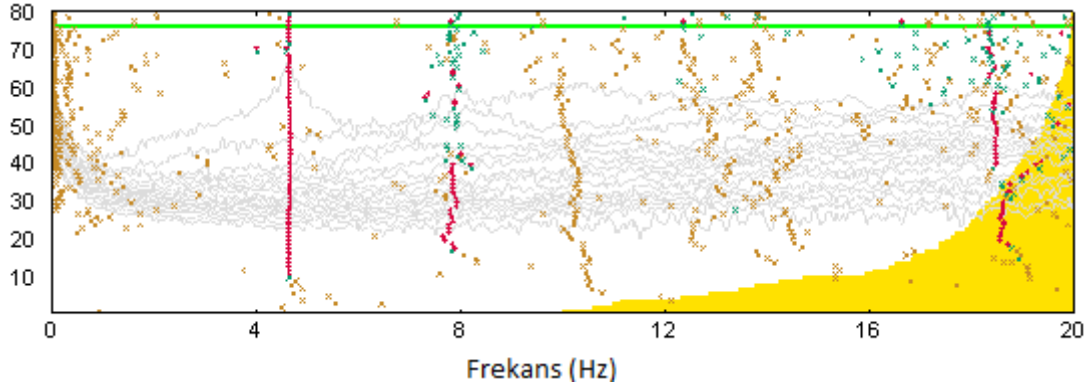
Mod	1. Ölçüm		2. Ölçüm	
	Doğal Frekanslar, f (Hz)	Sönüm Oranı, ξ (%)	Doğal Frekanslar, f (Hz)	Sönüm Oranı, ξ (%)
1	4.640	1.634	4.644	1.644
2	8.094	1.035	8.114	0.720
3	9.879	6.157	9.858	5.939
4	12.340	0.256	12.560	0.206
5	15.840	0.159	15.580	0.159

2.2.2.1.2. Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemiyle Elde Edilen Dinamik Karakteristikler

İki farklı ölçüm sonucunda Stokastik Alt Alan Belirleme (SAAB) Yöntemiyle elde edilen yığılımlı tekil değerler Şekil 2.15 ve Şekil 2.16’da gösterilmektedir.



Şekil 2.15. Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemi ile birinci ölçüm sonucunda elde edilen yığılımlı tekil değerler

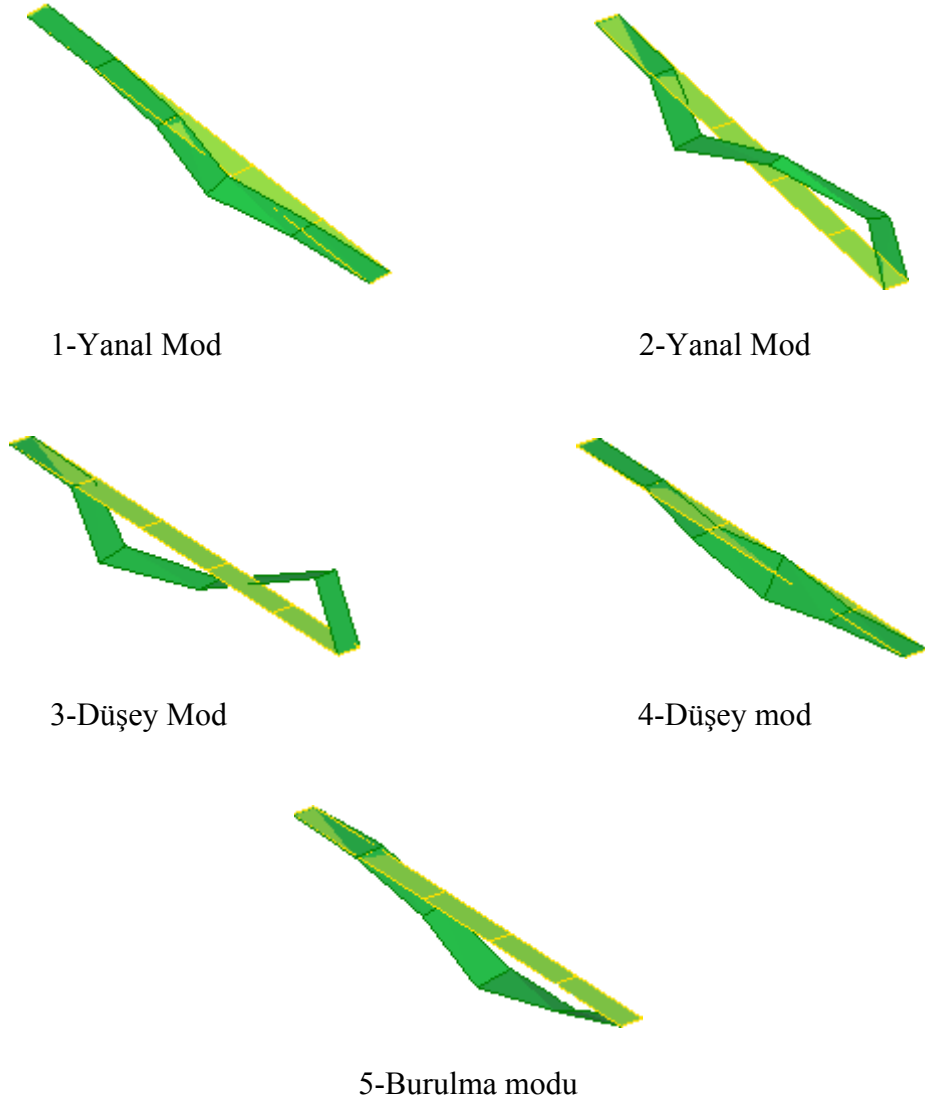


Şekil 2.16. Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemi ile ikinci ölçüm sonucunda elde edilen yığışımlı tekil değerler

Tablo 2.5'te iki ölçüm sonucunda Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemi ile elde edilen yığışımlı tekil değerler değerlendirildiğinde elde edilen doğal frekans değerleri ve sönüm oranları verilmektedir. Tablo 2.5'ten de anlaşılacağı üzere Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemi ile 5.moda ait sönüm oranı belirlenememiştir. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma ve Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemleri kullanılarak elde edilen mod şekilleri aynıdır. Şekil 2.17, Osmanlı Köprüsü'nün ilk beş deneysel mod şeklini göstermektedir.

Tablo 2.5. Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemi ile elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	1. Ölçüm		2. Ölçüm	
	Doğal Frekanslar f (Hz)	Sönüm Oranları ξ (%)	Doğal Frekanslar f (Hz)	Sönüm Oranları ξ (%)
1	4.642	2.100	4.645	1.995
2	8.325	2.850	8.325	2.650
3	9.735	8.260	9.636	8.500
4	11.910	6.263	12.380	5.600
5	15.420	Elde Edilemedi	15.650	Elde Edilemedi



Şekil 2.17. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma ve Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemleri kullanılarak elde edilen Osmanlı Köprüsü deneysel mod şekilleri

2.3.Deneysel ve Teorik Dinamik Karakteristiklerin Karşılaştırılması

2.3.1. Şenyuva Köprüsü Dinamik Karakteristiklerinin Karşılaştırılması

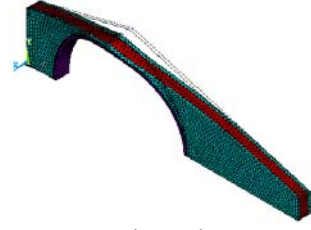
İlk olarak Şenyuva Köprüsü'nün deneysel ve teorik doğal frekans değerleri Tablo 2.6'da karşılaştırılmıştır. Tablo 2.6'dan da anlaşılacağı üzere Şenyuva Köprüsü'nün deneysel ve teorik olarak elde edilen doğal frekansları arasındaki en büyük fark yaklaşık %27'dir. Oluşan bu farklılıkların nedenleri arasında teorik analizler sırasında malzeme özellikleri ve sınır şartlarında yapılan kabullerin gerçekte tam olarak sağlanamaması yer

almaktadır. Deneysel ve teorik doğal frekans değerleri arasındaki farklılıkları minimuma indirmek için Şenyuva tarihi taş kemer köprüsünün sonlu eleman modeli iyileştirilmelidir.

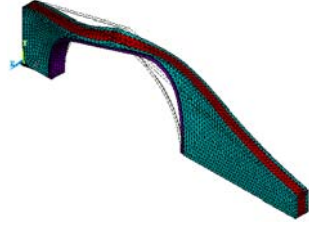
Tablo 2.6. Şenyuva Köprüsü deneysel ve teorik doğal frekanslarının karşılaştırılması

Mod	Teorik Doğal Frekanslar (Hz)	Deneysel		Deneysel ve Teorik Sonuçlar Arasındaki Fark	
		Frekanslar (Hz) GFOA	Frekanslar (Hz) SAAB	GFOA (%)	SAAB (%)
1	3.347	4.045	4.066	17	17
2	5.772	7.750	7.960	25	27
3	7.554	8.020	8.044	5	3
4	9.055	10.000	10.100	9	10
5	10.044	12.160	11.750	17	14

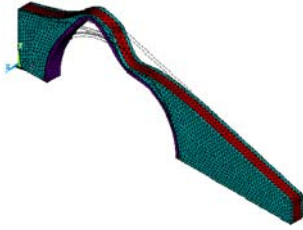
Köprü deneysel ve teorik doğal frekans değerleri arasında bir karşılaştırma yapıldıktan sonra bir de köprü deneysel ve teorik mod şekilleri arasında Şekil 2.18'de gösterilen karşılaştırma yapılmıştır. Bu karşılaştırmadan görüleceği gibi deneysel ve teorik olarak elde edilen mod şekilleri arasında oldukça iyi bir uyum vardır.



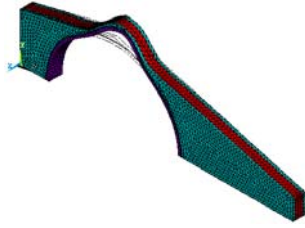
1-Yanal mod



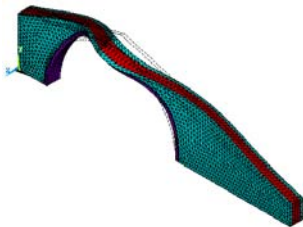
2-Yanal Mod



3-Düsey Mod

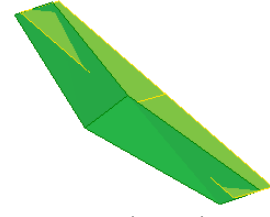


4-Düsey Mod



5-Burulma Modu

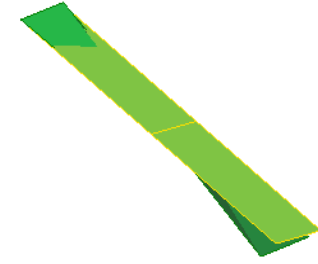
a. Teorik Modlar



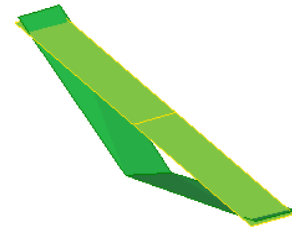
1-Yanal Mod



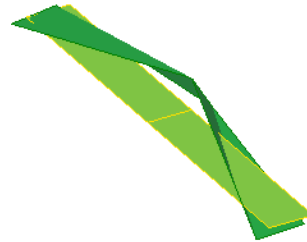
2-Yanal Mod



3-Düsey Mod



4-Düsey Mod



5-Burulma Modu

b. Deneysel Modlar

Şekil 2.18. Şenyuva Köprüsü teorik ve deneysel mod şekilleri

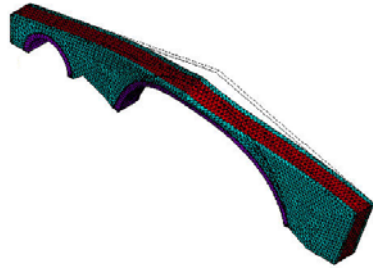
2.3.2. Osmanlı Köprüsü Dinamik Karakteristiklerinin Karşılaştırılması

Osmanlı Köprüsü'nün deneysel ve teorik çalışmalar sonucu elde edilen doğal frekans değerleri Tablo 2.7'de karşılaştırılmaktadır. Bu tablodan da anlaşılacağı üzere köprü sonlu eleman modeli oluşturulurken yapılan bazı kabullerin neden olduğu en büyük fark yaklaşık olarak %17 civarındadır ve bu fark sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

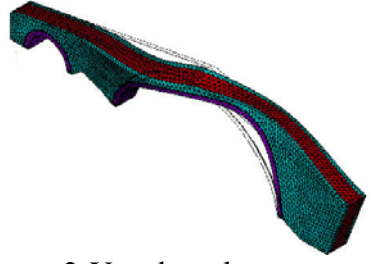
Tablo 2.7. Osmanlı Köprüsü deneysel ve teorik doğal frekanslarının karşılaştırılması

Mod	Teorik Frekanslar (Hz)	Deneysel				Deneysel ve Teorik Sonuçlar Arasındaki Fark			
		1. Ölçüm		2. Ölçüm		1. Ölçüm		2. Ölçüm	
		GFOA (Hz)	SAAB (Hz)	GFOA (Hz)	SAAB (Hz)	GFOA (%)	SAAB (%)	GFOA (%)	SAAB (%)
1	3.843	4.640	4.642	4.644	4.645	17	17	17	17
2	7.527	8.094	8.325	8.114	8.325	7	9	7	9
3	9.371	9.879	9.735	9.858	9.636	5	3	5	3
4	10.638	12.340	11.910	12.560	12.380	13	10	15	14
5	14.563	15.840	15.420	15.580	15.650	8	5	6	7

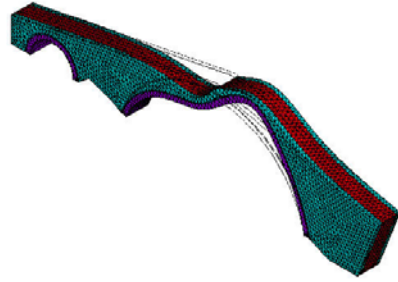
Köprü deneysel ve teorik mod şekilleri Şekil 2.19'da karşılaştırılmaktadır. Şekil 2.19'dan de anlaşılacağı gibi deneysel ve teorik olarak elde edilen mod şekilleri arasında oldukça iyi bir uyum vardır.



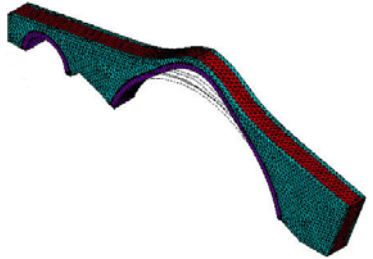
1-Yanal mod



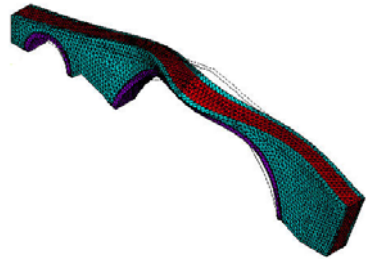
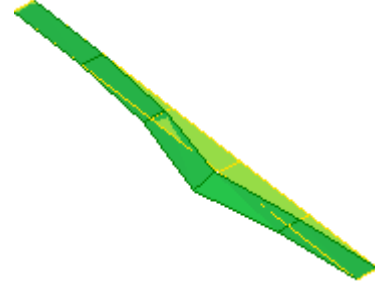
2-Yanal mod



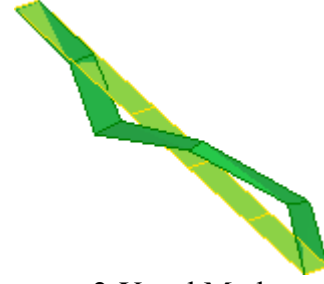
3-Düsey Mod



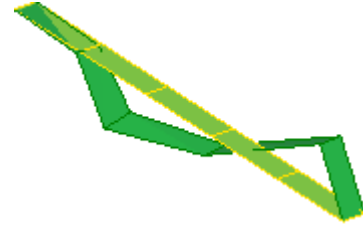
4-Düsey Mod

5-Burulma Modu
a. Teorik Modlar

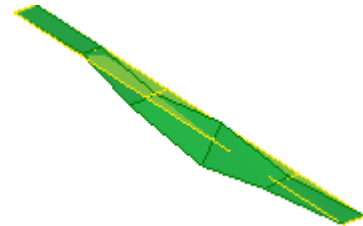
1-Yanal Mod



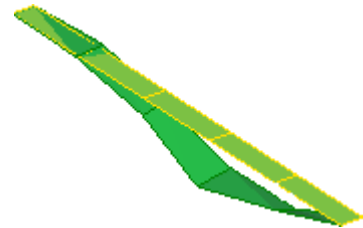
2-Yanal Mod



3-Düsey Mod



4-Düsey Mod

5-Burulma Modu
b. Deneysel Modlar

Şekil 2.19. Osmanlı Köprüsü teorik ve deneysel mod şekilleri

2.4. Tarihi Taş Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin İyileştirilmesi

Osmanlı ve Şenyuva taş kemer köprülerinin deneysel ve teorik olarak elde edilen dinamik karakteristikleri ayrı ayrı karşılaştırılmış ve mod şekilleri arasında oldukça iyi bir uyum varken, doğal frekans değerleri arasında bazı farklılıkların olduğu görülmüştür. Bu farklılıkların sonucu olarak her iki köprü sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesi gerekliliğine karar verilmiştir.

2.4.1. Şenyuva Köprüsü Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi

Şenyuva taş kemer köprüsü deneysel ve teorik doğal frekans değerleri arasındaki farka analizlerde kullanılan malzeme özellikleri ile sınır şartlarında yapılan kabullerin neden olduğu düşünülmektedir.

Daha öncede belirttiğimiz gibi tarihi yapıların malzeme özelliklerinin belirlenmesi oldukça zor ve pahalı bir süreçtir. Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri literatürdeki çalışmalar yardımıyla belirlenmiştir. Model iyileştirme işlemi yapılırken kemer köprüünün malzeme özellikleri değiştirilmemiş, onun yerine Şekil 2.20’de gösterilen ve köprüünün boyuna doğrultuda yan duvarlarında zamanla biriken malzemelerin oluşturduğu mesnetleşmeler dikkate alınmıştır.



Şekil 2.20. Şenyuva Köprüsü yan duvarlarındaki mesnetleşmeler

Tablo 2.8’de sınır şartlarındaki değişimler dikkate alınarak iyileştirilen sonlu eleman modelinden ve deneysel sonuçlardan elde edilen frekans değerleri verilmektedir. Tablo 2.8 incelendiğinde model iyileştirme işleminden sonra, teorik ve deneysel frekanslar arasındaki en büyük farkın %27’den %7’e düştüğü görülmektedir.

Tablo 2.8. Şenyuva Köprüsü model iyileştirme işleminden sonra teorik ve deneysel frekansların karşılaştırılması

Mod	Teorik Frekanslar (Hz)	İyileştirilmiş Teorik Frekanslar (Hz)	Deneysel Frekanslar (Hz)		Fark	
			GFOA	SAAB	GFOA (%)	SAAB (%)
1	3.347	4.070	4.045	4.066	0,6	0,1
2	5.772	7.780	7.750	7.960	0,4	3
3	7.554	8.020	8.020	8.044	0	0,3
4	9.055	10.670	10.000	10.100	7	6
5	10.044	12.090	12.160	11.750	0,5	3

2.4.2. Osmanlı Köprüsü Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi

Osmanlı Köprüsü için deneysel ve teorik doğal frekans değerleri arasındaki fark, sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu amaçla deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki farklılıkların en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada sonlu eleman modeli iyileştirilirken yine literatürden alınan malzeme özellikleri kullanılmamış, onun yerine köprü yan duvarlarındaki mesnetleşmeler dikkate alınmış ve köprü sınır şartları yeniden düzenlenmiştir. Köprü yan duvarlarındaki mesnetleşmelerden bazı görünüşler Şekil 2.21’de gösterilmektedir.



Şekil 2.21. Osmanlı Köprüsü yan duvarlarındaki mesnetleşmeler

Şekil 2.21’de gösterilen mesnetleşmeler dikkate alınıp köprü yan duvarlarındaki mesnetleşmeler yeniden düzenlendiğinde teorik ve deneysel doğal frekanslar arasındaki en büyük farkın %17’den %8’ye düştüğü görülmüştür. Sonlu eleman modeli iyileştirilmesi yapıldıktan sonra elde edilen teorik frekansların deneysel frekanslarla karşılaştırılması Tablo 2.9’de verilmektedir.

Tablo 2.9. Osmanlı Köprüsü model iyileştirilmesinden sonraki teorik ve deneysel dinamik karakteristikler

Mod	Teorik Frekanslar (Hz)	İyileştirilmiş Teorik Frekanslar (Hz)	Deneysel Frekanslar (Hz)				Fark			
			1. Ölçüm		2. Ölçüm		1. Ölçüm		2. Ölçüm	
			GFOA	SAAB	GFOA	SAAB	GFOA (%)	SAAB (%)	GFOA (%)	SAAB (%)
1	3.843	4.640	4.640	4.642	4.644	4.645	0	0	0,1	0,1
2	7.527	8.757	8.094	8.325	8.114	8.325	8	5	8	5
3	9.371	9.875	9.879	9.735	9.858	9.636	0	1	0,1	2
4	10.638	11.967	12.340	11.910	12.560	12.380	3	0,5	5	3
5	14.563	15.703	15.840	15.420	15.580	15.650	0,9	2	0,8	0,3

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, tarihi taş kemer köprülerin deneysel ve teorik dinamik karakteristiklerini Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak belirlemek ve köprülerin mevcut davranışlarını en iyi şekilde yansıtacak sonlu eleman modellerini oluşturmak amaçlanmıştır. Bu amaçla uygulama olarak, 1696 yılında inşa edilen tek kemer açıklıklı Şenyuva Köprüsü ile 19. yüzyılda inşa edilen çift kemer açıklıklı Osmanlı Köprüsü seçilmiştir.

İlk olarak ANSYS [15] programı kullanılarak her iki köprünün 3-boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve katı elemanlar kullanılarak oluşturulan bu modellerin modal analizleri yapılarak köprülerin teorik mod şekilleri ve doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Daha sonra her iki tarihi köprü üzerinde Operasyonel Modal Analiz Yöntemi gerçekleştirilmiştir. Deneysel yöntemde titreştirici olarak yaya hareketleri ve rüzgâr yükleri gibi çevresel etkilerden yararlanılmıştır. Köprülerin bu çevresel etkilere göstermiş oldukları tepkileri ölçmek için Brüel&Krajer firmasının ürettiği 8340 tipteki tek eksenli ivmeölçerler kullanılırken, ivmeölçerlerden elde edilen verileri toplayıp daha sonra işlemek üzere saklamak için ise aynı firmanın ürettiği 17 kanallı 3650 tipteki veri toplama ünitesi kullanılmıştır. Veri toplama ünitesinde toplanan sinyaller daha sonra OMA [34] yazılımı aracılığı ile işlenerek dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Verilerin işlenip dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde frekans ortamında Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) ve zaman ortamında Stokastik Alt Alan Belirleme (SAAB) Yöntemleri kullanılmıştır. Mevcut sonlu eleman modelinin köprülerin gerçek davranışını temsil edip etmediğinin kontrolü için deneysel ve teorik olarak elde edilen köprü dinamik karakteristikleri karşılaştırılmış ve aralarında farklılıklar olduğu görülmüştür. Son olarak teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki bu farklılıkları en aza indirerek, köprülerin mevcut davranışlarını en iyi şekilde yansıtacak olan modeli elde etmek için köprülerin sonlu eleman modelleri deneysel sonuçlar kullanılarak iyileştirilmiştir.

Genellikle 0-200Hz veya 0-400Hz frekans aralığında yapıların ilk 3- 10 doğal frekansları elde edilebilir. Bu nedenle bu çalışmada 0-200Hz frekans aralığında çalışılmıştır.

Bu tez çalışmasında Operasyonel Modal Analiz Yöntemi'nin uygulanması, deneysel ve teorik olarak elde edilen dinamik karakteristiklerin karşılaştırılması ve köprü sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesine dair aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

1. Tek açıklıklı Şenyuva taş kemer köprüsünün teorik analiz sonuçlarına göre köprünün ilk 5 teorik frekansı 3-11Hz aralığında değerler alırken, çift kemer açıklıklı Osmanlı Köprüsü'nün ilk 5 teorik doğal frekans değeri 3-15Hz arasında değerler almaktadır.
2. İlk 5 teorik mod şekillerine bakıldığında her iki köprü için de birinci ve ikinci mod şekillerinin yanal mod ve geri kalan 3 mod şeklinin ise sırasıyla düşey mod ve burulma mod şekilleri oldukları görülmüştür.
3. Şenyuva Köprüsü üzerinde gerçekleştirilen Operasyonel Modal Analiz Yöntemi sonuçlarına bakıldığında Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemi kullanılarak elde edilen ilk 5 deneysel doğal frekans değerinin 4-13Hz, sönüm oranlarının %0.3–2.4 arasında değerler aldıkları gözlemlenirken Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemi kullanılarak elde edilen ilk 5 doğal frekans değerinin 4-12Hz ve sönüm oranlarının ise %1.6–6.8 arasında oldukları gözlemlenmiştir.
4. Osmanlı Köprüsü üzerinde iki farklı deneysel ölçüm gerçekleştirilmiş ve bu iki ölçüm sonucunda Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemi kullanılarak elde edilen ilk 5 doğal frekans değerinin birinci ve ikinci ölçüm sonucunda 4-16Hz arasında, sönüm oranlarının ise %0.1–6.2 arasında değerler aldıkları gözlemlenmiştir. Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemi ile belirlenen ilk 5 doğal frekans değeri ise yine 4-16 Hz arasında oldukları fakat bu yöntemle belirlenen sönüm oranlarının ise 5. mod için elde edilemediği, ilk 4 mod şekli için ise %1-8.6 arasında oldukları gözlemlenmiştir.
5. Her iki tarihi köprü için deneysel olarak elde edilen sönüm oranları incelenmiştir. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma ve Stokastik Alt Alan Belirleme Yöntemleri ile elde edilen sönüm oranları arasında uyum olmadığı ve sönüm oranlarını belirlemede bu yöntemlerin yetersiz kaldıkları gözlemlenmiştir.
6. Her iki köprü için Operasyonel Modal Analiz Yöntemi sonuçlarından elde edilen ilk 5 deneysel mod şekli incelendiğinde, köprülerin teorik mod şekillerinde olduğu gibi ilk iki modun yanal mod, üçüncü ve dördüncü modların düşey mod, beşinci modun ise burulma modu oldukları görülmüştür.
7. Köprülerinin deneysel ve teorik mod şekilleri karşılaştırıldıklarında aralarında oldukça iyi bir uyumun olduğu gözlemlenmiştir.

8. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma ve Stokastik Alt Alan Belirleme yöntemleriyle ayrı ayrı hesaplanan dinamik karakteristikler arasında her iki köprü içinde iyi bir uyum vardır.
9. Şenyuva Köprüsü teorik ve deneysel doğal frekans değerleri karşılaştırıldığında aralarındaki en büyük farkın %27'ye kadar çıktığı aynı işlemin Osmanlı Köprüsü için gerçekleştirilmesi durumunda ise teorik ve deneysel doğal frekanslar arasındaki en büyük farkın %17'ye kadar çıktığı görülmüştür. Bu farklılıklardan dolayı her iki köprü için model iyileştirilmesi işleminin gerekliliğine karar verilmiştir.
10. Köprülerin deneysel ve teorik dinamik karakteristikleri arasındaki farklılıkların teorik analizler sırasında kullanılan malzeme özellikleri ve sınır şartlarında yapılan kabullerin gerçekte tam olarak sağlanamamasından dolayı olduğu düşünülmüştür ve bu parametrelerde değişiklikler yaparak sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu düşünceden yola çıkılarak, köprülerin boyuna doğrultuda yan duvarlarında zamanla biriken malzemelerin oluşturduğu mesnetleşmeler dikkate alınarak teorik analizlerdeki sınır şartları yeniden düzenlenmiştir. Bununla beraber tarihi yapıların malzeme özelliklerinin belirlenmesi oldukça zor ve pahalı bir süreç olduğu için analizlerde kullanılan malzeme özellikleri literatürdeki çalışmalar yardımıyla belirlenmiş ve bundan dolayı model iyileştirme işlemi yapılırken kemer köprünün malzeme özelliklerinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.
11. Her iki köprü için teorik ve deneysel sonuç farklılıklarını minimuma indirmek amacıyla yapılan 3-boyutlu sonlu eleman modeli iyileştirilmesi işleminden sonra, teorik ve deneysel doğal frekanslar arasındaki farkın Şenyuva Köprüsü için %27'den %7'e, Osmanlı Köprüsü için ise %17'den %8'ye düşürülmüştür.

Bu çalışma ile yeterli ölçüm cihazı ve ilave ekipmanlar kullanılarak gerçekleştirilen Operasyonel Modal Analiz yönteminin, karmaşık geometrik ve malzeme özelliklerine sahip olan tarihi yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde ve sonlu eleman model iyileştirilmesi işleminde güvenle kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

4. KAYNAKLAR

1. Türker, T., Çelik Çerçeve Sistemlerin Dinamik Karakteristiklerinin Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2005.
2. Ramos, J. L. F., Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, PhD Dissertation, Minho University, Portugal, 2007.
3. Frunzio, G., Monaco, M. ve Gesualdo, A., 3D FEM Analysis of a Roman Arch Bridge, Historical Constructions, (2001) 591-598.
4. Karaveziroglu, M., Stavrakakis, E., Lazarides, P., Liolios, A., Giannopoulou, M., Roukounis, Y. ve Yeroyianni, M., A Comparative Analysis of Some Historical Stone Arch Bridges in Greece by Two New Numerical Approaches, Historical Constructions, (2001) 749-755.
5. Toker, S. ve Ünay, A.I., Mathematical Modelling and Finite Element Analysis of Masonry Arch Bridges, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 17, 2 (2004) 129-139.
6. Ural, A., Tarihi Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Metoduyla Analizi, Deprem Sempozyumu, Mart 2005, Kocaeli, Bildiriler Kitabı, 408-413.
7. Fanning, P., Sobczak, L., Boothby, T. ve Salamoni, V., Design and Construction, 1, 4 (2005) 367-378.
8. Oliviera, D. V., Maruccio, C. ve Lourenço, P. B., Numerical Modelling of a Load Test on a Masonry Arch Bridge, 5th International Conference on Arch Bridges, September 2007, Madeira, Portugal, Proceedings, 577-584.
9. Fanning, P. J. ve Boothby, T. E., Three-Dimensional Modelling and Full-Scale Testing of Stone Arch Bridges, Computers and Structures, 79 (2001) 2645-2662.
10. Aoki, A., Komiyama, T., Sabia, D. ve Rivella, D., Theoretical and Experimental Dynamic Analysis of Rakanji Stone Arch Bridge, Oita, Japan, 7th International Conference on Motion and Vibration Control, August 2004, St. Louis, Proceedings, USA, 1-9.
11. Beconcini, M.L., Buratti, G., Mengozzi, M., Orsini, P., Dynamic Characterization of a Five Spans Historical Masonry Arch Bridge, 5th International Conference on Arch Bridges, September 2007, Madeira, Portugal, Proceedings, 399-407.
12. Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Türker, T. ve Sevim, B. , Tarihi Yığma Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-1, Eylül 2007, Ankara, Bildiriler Kitabı, 429-440.

13. Brencich, A. ve Sabia, D., Experimental Identification of A Multi-Span Masonry Bridge: The Tanaro Bridge, Construction and Building Materials, 22, 10 (2008) 2087-2099.
14. Ramos, L. F., De Roeck, G., Lourenço, P. B. ve Campos-Costa, A. Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, Engineering Structures, 32 (2009) 146-162.
15. ANSYS V10., Swanson Analysis System, U.S.A., 2008.
16. Chopra, A. K., Dynamics of Structures, Prentice Hall International, Inc., Toronto, 1995.
17. Kaya, H., Experimental Modal Analysis of a Steel Grid Frame, MSc Thesis, The Middle East Technical University, Ankara, 2004.
18. Chauhan, S., Parameter Estimation and Signal Processing Techniques for Operational Modal Analysis, PhD Dissertation, University of Cincinnati, Ohio, USA, 2008.
19. Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Sevim, B., Türker, T. ve Domaniç, K. A., Köprülerin Dinamik Karakteristiklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Yapı Dünyası, 150 (2008) 44-57.
20. Peeters, B., System Identification and Damage Detection in Civil Engineering, PhD Thesis, Katholieke University, Leuven, Belgium, 2000.
21. Bendat JS, Piersol AG. Random data: analysis and measurement procedures, John Wiley & Sons, 1986.
22. Brincker, R., Zhang, L. ve Andersen P., Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition, Proceedings 18th International Modal Analysis, February 2000, San Antonio, Texas, USA, Proceedings, 625-630.
23. Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Türker, T., Sevim, B. ve Ateş, Ş., Karayolu Köprülerinin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, 1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu, Kasım 2007, Antalya, Bildiriler Kitabı, 355-364.
24. Overschee P.V. ve Moor B.D., Subspace identification for linear systems: theory, implementation and applications, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1996.
25. Peeters, B. ve De Roeck, G., Reference Based Stochastic Subspace Identification in Civil Engineering, Inverse Problems in Science and Engineering, 8, 1 (2000) 47-74.

26. Şahin, A., Yapıların Deneysel ve Operasyonel Modal Analizleri İçin Sayısal Sinyal İşleme, Dinamik Karakteristik Belirleme ve Sonlu Eleman Model İyileştirme Yazılımları: SignalCAD - ModalCAD – FemUP, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2009.
 27. Lourenço, P.B., Historical Structures: Models And Modelling, EPMESC VII: International Conference on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science, August, 1999 , Amsterdam, The Netherlands, Proceedings, 433-442.
 28. Oliviera, D. V., Experimental and Numerical Analysis of Blocky Masonry Structures Under Cyclic Loading, PhD Dissertation, Minho University, Portugal, 2003.
 29. Romano, A., Modelling, Analysis and Testing of Masonry Structures, PhD Dissertation, The University of Naples Federico II, Italy, 2005.
 30. Tunç, G., Taş Köprülerimiz, Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara, 1978.
 31. Özer, O., Assessment of Masonry Arch Bridges By Mechanism Method, MSc Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 2004.
 32. Gürer, C., Akbulut, H. ve Çetin, S., Tek Açıklıklı Kemer Sistemli Rize Köprülerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi, 1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu, Kasım 2007, Antalya, Bildiriler Kitabı, 435-445.
 33. İlter, F., Osmanlılara Kadar Anadolu Türk Köprüleri, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 1978.
 34. Çulpan, C., Türk Taş Köprüleri; Ortaçağdan Osmanlı Devri Sonuna Kadar, Türk Tarih Kurumu, Ankara, 2002.
 35. Altınsapan, E., Tek Kemer Gözlü Rize Köprüleri, Anadolu Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Yayınları, Ankara, 2001.
 36. 10. Bölge Müdürlüğü Arşivi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Trabzon, 2009.
 37. OMA., Operational Modal Analysis, Release 4.0, Structural Vibration Solution A/S, Denmark, 2006.
- URL-1, www.usinenouvelle.com/.../lds-2546/of-p1033.html. 12 Kasım 2008.
- URL-2, <http://www.directindustry.com/prod/endevco/low-noise-piezoelectric-accelerometer-5413-397134.html>. 23 Eylül 2009.
- URL-3, <http://www.elektrik.gen.tr/content/view/46/30/1/1/>. 23 Eylül 2009.
- URL-4, <http://www.marmatek.com/urunler/veri-toplama-sistemleri/>. 18 Temmuz 2009.

- URL-5, <http://www.kgm.gov.tr/asps/KGM/koprucalisma/tarihikopruler.pdf>. 3 Nisan 2009.
- URL-6, http://kitap.ntvmsnbc.com/orneksayfa/100kp/100Kopru_orneksayfalar.pdf. 16 Eylül 2009.
- URL-7, http://www.gorgulu-home.com/Index_files/Pages/Studies/studies/safer_study/Computational%20Modeling%20of%20Masonry.pdf. 13 Ağustos 2009.
- URL-8, http://i.radikal.com.tr/2009/05/15/1_13145.jpg. 2 Mart 2009.
- URL-9, http://www.adanadan.biz/dosyalar/site_resim/icerik/buyuk/0094101.jpg. 2 Mart 2009.
- URL-10, <http://www.sakarya.bel.tr/pictures/ogaleri/resim593.jpg>. 3 Mart 2009.
- URL-11, http://www.resimmotoru.com/data/media/526/batman_malabadi_koprusu.jpg. 3 Mart 2009.
- URL-12, http://www.flickr.com/groups/beautiful_moment/discuss/72157606246196189/. 3 Mart 2009.
- URL-13, <http://www.e-sergi.com/berken/fotos/18-uzunköprü.jpg>, 2 Mart 2009.
- URL-14, <http://www.biltek.tubitak.gov.tr/gelisim/sanalsergi/mart08/54427.jpg>. 1 Mart 2009.
- URL-15, http://tr.wikipedia.org/wiki/Dosya:Babaeski_Koprusu.JPG. 3 Mart 2009.
- URL-16, http://www.karadenizbolgesi.com/v1/galeri/artvin_cifte_kopru.jpg. 1 Mart 2009.
- URL-17, <http://www.varg.unsw.edu.au/Assets/link%20pdfs/Pulse%20Labshop%20Primer%20Rev%202.pdf>. 28 Ocak 2008.

ÖZGEÇMİŞ

Fatma BİRİNCİ 1985 yılında Trabzon'un Çaykara ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Trabzon'da tamamladı. 2002 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2006 yılında İnşaat Mühendisliği bölümündeki lisans eğitimini tamamlayarak aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Ocak 2009'da Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane Meslek Yüksekokulu'na Öğretim Görevlisi olarak atandı. Bekar olan ve iyi derecede İngilizce bilen Fatma BİRİNCİ halen Gümüşhane Üniversitesi'ndeki görevine devam etmektedir.