



**TEK AÇIKLIKLI TARİHİ BİR KÖPRÜNÜN DİNAMİK
DAVRANIŞ PARAMETRELERİNİN DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

Ahmet Yasir KANBUR

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU**

**2021
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TEK AÇIKLI TARİHİ KEMER BİR KÖPRÜNÜN DİNAMİK DAVRANIŞ
PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Ahmet Yasir KANBUR

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2021

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

31 / 12 / 2021

Ahmet Yasir KANBUR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEK AÇIKLI TARİHİ KEMER BİR KÖPRÜNÜN DİNAMİK DAVRANIŞ PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Ahmet Yasir KANBUR

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU

Sayırsız medeniyete ev sahipliği yapmış olan Anadolu coğrafyası; üzerinde çok sayıda tarihi eser barındıran bir açık hava müzesi olarak kabul edilmektedir. Yapıldığı bölgeye ve karşıladığı ihtiyaca bağlı olarak büyük çeşitlilik arz eden mimari-kültür mirasımız içerisinde tarihi köprüler özel bir yer tutmaktadır. Tarihi köprülerin mevcut durumlarının incelenmesi ve geleceğe güvenle devredilmeleri konusunda çalışmalar yapılması önem arz etmektedir. Ülkemizde koruma altında olan tarihi köprüler üzerinde tahribatlı yöntemlerle inceleme yapılması yasal olarak mümkün değildir. Yapısal sistemin bütün olarak incelenebileceği ve dinamik davranış karakteristiklerinin deneysel olarak elde edilebileceği en uygun yöntem operasyonel modal analiz yöntemidir. Bu tez kapsamında, Erzurum il sınırları içerisinde yer alan tarihi Pehlivanlı (Kireçli) Köprüsü dinamik davranış parametrelerinin restorasyon öncesi, restorasyon esnası ve restorasyon sonrası dönemlerde operasyonel modal analiz yöntemi ile deneysel olarak elde edilmesi ve incelenmesine dair çalışmalar yapılmıştır. Pehlivanlı (Kireçli) Köprüsü mod şekillerinin restorasyondan yaklaşık iki yıl sonra tempan duvar hasarına bağlı olarak değiştiği operasyonel modal analiz uygulaması ile tespit edilmiştir. Hasarın onarımı sonrasında modal davranış parametrelerinin restorasyondan hemen sonraki hasarsız durumla özdeş hale getirmediği belirlenmiştir. Çalışma neticesinde periyodik olarak gerçekleştirilecek operasyonel modal analiz uygulaması ile deneysel olarak elde edilecek dinamik davranış parametreleri üzerinden tarihi köprülerin yapı sağlığı takibinin yapılabileceği sonucuna varılmıştır.

2021, 102 sayfa

Anahtar Kelimeler: Tarihi kemer köprü, Tahribatsız Muayene, Operasyonel modal analiz, Dinamik Kimliklendirme, Pehlivanlı Köprüsü

ABSTRACT

MS. Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DYNAMIC BEHAVIOR PARAMETERS OF A SINGLE SPAN HISTORICAL ARCH BRIDGE

Ahmet Yasir KANBUR

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Dilek OKUYUCU

Anatolian land, which has hosted countless civilizations, is considered to be an open-air museum with many historical artifacts. Historical bridges have a special place in our architectural-cultural heritage, which varies greatly depending on the region where they are built and the needs they meet. It is important to examine the current status of historical bridges and to carry out studies on their safely transfer into the future. In our country, it is not legally possible to examine the historical bridges under protection with destructive methods. The most suitable method in which the structural system can be examined as a whole and dynamic behavior characteristics can be obtained experimentally is the operational modal analysis method. Within the scope of this thesis, studies were carried out to experimentally obtain and analyze the dynamic behavior parameters of the historical Pehlivanlı Bridge, located within the borders of Erzurum province, by the operational modal analysis method in the pre-restoration, during the restoration, and post-restoration periods. With the operational modal analysis application, it was determined that the mode shapes of Pehlivanlı Bridge changed due to the spandrel wall damage approximately two years after the restoration. It was determined that the modal behavior parameters defined after the repair of the damage did not match with the undamaged state immediately after restoration. As a result, it was concluded that the structural health of historical bridges can be monitored through the dynamic behavior parameters to be obtained experimentally with the operational modal analysis application to be carried out periodically.

2021, 102 page

Keywords: Historical arch bridge, Non-Destructive Testing, Operational modal analysis, Dynamic Identification, Pehlivanlı Bridge

TEŞEKKÜR

Lisans ve Yüksek Lisans eğitimim süresince her zaman iyi bir mühendis olmam için bilgi birikimini esirgemeyen; her daim desteğini hissettiğim kıymetli danışmanım sayın Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU' ya teşekkür ederim.

Hayatım boyunca aldığım kararlarda arkamda duran, her zaman bana güvenen, dualarını eksik etmeyen kıymetli ailem; babam Çetin KANBUR'a, annem Semahat KANBUR'a, abilerim; Mehmet KANBUR ve Ömer Faruk KANBUR'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince saha çalışmalarında bana yardımcı olan değerli meslektaşlarım Yusuf GEDİK, Erdem ERKMEN'e ve kıymetli dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet Yasir KANBUR
Aralık 2021

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	6
3. MATERYAL ve YÖNTEM	15
3.1. Pehlivanlı Köprüsü.....	15
3.2. Bölgenin Depremselliği	21
3.3. Köprü Malzeme Özelliklerinin Tayini	24
3.4. Sonlu Elemanlar Modeli ve Teorik Modal Analiz Çalışması	29
3.4.1. Mikro modelleme yöntemi	30
3.4.2. Basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi.....	31
3.4.3. Makro modelleme yöntemi.....	31
3.4.4. Pehlivanlı Köprüsü sonlu eleman modelinin oluşturulması	33
3.5. Operasyonel Modal Analiz ve Dinamik Kimliklendirme Çalışması	34
3.5.1. Pehlivanlı Köprüsü operasyonel modal analiz aşamaları	36
3.5.2. Tarihi Pehlivanlı Köprüsü üzerinde operasyonel modal analiz çalışması yapılan dönemler	45
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	61
4.1. Operasyonel Modal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	61
4.2. Teorik Modal Analiz Sonuçlarının Kendi İçerisinde Değerlendirilmesi	78
4.2.1. Restorasyon sonrası hasarsız durumu temsil eden sonlu elemanlar model üzerindeki çalışmalar	80
4.2.2. Restorasyon sonrası hasarlı durumu temsil eden sonlu eleman modeli üzerindeki çalışmalar	85
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	89
KAYNAKLAR	91
EKLER	98
EK-1	98
EK-2	102

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
°	Derece
d	Birim ağırlık
E	Elastik modülü
f_b	Basınç mukavemeti
f_c	Taşların basınç mukavemeti
f_k	Duvar basınç mukavemeti
g	Yerçekimi ivmesi
Hz	Hertz
I	Atalet Momenti
K	Rijitlik
kg	Kilogram
m	Metre
m	Kütle
MPa	Megapasgal
R_h	Yatay yöndeki yüzey sertlik değeri
R_v	Düşey yöndeki yüzey sertlik değeri
sn	Saniye

Kısaltmalar

EFDD	Enhanced Frequency Domain Decomposition
FDD	Frequency Domain Decomposition
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
MAC	Modal Assurance Criterion
OMA	Operational Modal Analysis
SAP	Structral Modal Analysis

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Çobandede Köprüsü (Anonim, 2013).....	2
Şekil 3.1. Pehlivanlı Köprüsü coğrafi konumu (Anonim1 2021)	16
Şekil 3.2. Pehlivanlı Köprüsü genel görünümü	16
Şekil 3.3. Pehlivanlı Köprüsü döşeme ve kesit rölöve çizimleri (Anonim 2011).....	17
Şekil 3.4. Pehlivanlı Köprüsü boyuna ve enine kesit çizimleri	18
Şekil 3.5. Pehlivanlı Köprüsü restorasyon öncesi görünümü (Bayraktar 2012).....	19
Şekil 3.6. Pehlivanlı Köprüsü aktif Erzurum Fay Hattı'na uzaklığı (Anonim4 2021) ...	23
Şekil 3.7. Pehlivanlı Köprüsü' nün bulunduğu konum için yatay ve düşey elastik deprem tasarım spektrumları (Anonim5 2021).	24
Şekil 3.8. Pehlivanlı Köprüsü malzeme mekanik özellikleri tayini aşamaları	25
Şekil 3.9. Pehlivanlı Köprüsü Schmidt Çekici uygulaması	26
Şekil 3.10. Mikro modelleme tekniği (Jafarov et al. 2012)	31
Şekil 3.11. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği (Jafarov et al. 2012)	31
Şekil 3.12. Makro modelleme yöntemi (Lourenço, 1996).....	32
Şekil 3.13. Pehlivanlı Köprüsü SAP2000 (2018) katı (Solid) eleman modeli.....	33
Şekil 3.14. Pehlivanlı Köprüsü operasyonel modal analiz aşamaları	36
Şekil 3.15. Pehlivanlı Köprüsü ultra hassas ivmeölçerlerin yerleşim krokisi	37
Şekil 3.16. Üç eksenli ivmeölçerlerin köprü üzerine sabitlenmesi.....	38
Şekil 3.17. Senkronize edilmiş ultra hassas üç eksenli ivmeölçer	39
Şekil 3.18. Köprü üzerinden kayıt alınırken uygulanan çevresel etkiler	39
Şekil 3.19. Artemis Modal Pro (2021) yazılımında hazırlanan köprü analiz modeli	41
Şekil 3.20. Artemis Modal Pro (2021) yazılımında ivme ölçüm versinin model dosyasına tanıtılması.	41
Şekil 3.21. Artemis Modal Pro (2021) yazılımında ivme ölçüm verisinin modele işlenmesi.....	42
Şekil 3.22. Artemis Modal Pro (2021) yazılımı kullanılarak spektral yoğunluk grafiklerinin elde edilmesi.....	43
Şekil 3.23. Artemis Modal Pro (2021) yazılımı ile elde edilen mod şekillerinin tutarlılık kontrollerinin MAC parametresi ile yapılması.....	44
Şekil 3.24. Köprü üzerinde operasyonel modal analiz çalışması yapılan dönemler.....	45
Şekil 3.25. Pehlivanlı Köprüsü restorasyon öncesi görünümü (Bayraktar 2012).....	46

Şekil 3.26. Pehlivanlı Köprüsü restorasyon öncesi operasyonel modal analiz çalışmasına ait bir görsel (Bayraktar 2012)	47
Şekil 3.27. Restorasyon döneminde kireçli köprüsü görüntüsü (Okuyucu vd 2016)	48
Şekil 3.28. Restorasyon esnası Kireçli Köprüsü operasyonel modal analiz çalışmasından bir görüntü (Okuyucu vd 2016).....	48
Şekil 3.29. Kireçli Köprüsü restorasyon öncesi hasarlarına ait bazı görüntüler (Bayraktar 2012).	49
Şekil 3.30. Kireçli Köprüsü restorasyon sonrası genel görünümü (Okuyucu 2016)	50
Şekil 3.31. Pehlivanlı Köprüsü restorasyonu sonrası ana taşıyıcı kemerin yakın plan görüntüsü (Okuyucu vd 2016).....	50
Şekil 3.32. Kireçli Köprüsü restorasyon sonrası operasyonel modal analiz çalışmasından bir görüntü (Okuyucu vd 2016).....	51
Şekil 3.33. Pehlivanlı Köprüsü restorasyonundan 2 yıl sonra gerçekleştirilen operasyonel modal analiz uygulamasından bir görüntü.	52
Şekil 3.34. Pehlivanlı Köprüsü operasyonel modal analiz çalışması ile restorasyondan hemen ve 2 yıl sonra elde edilen birinci mod şekilleri.....	53
Şekil 3.35. Pehlivanlı Köprüsü restorasyon çalışmasından 2 yıl sonra tekrar yapılan operasyonel modal analiz çalışmasına ait bir görsel.	54
Şekil 3.36. Pehlivanlı Köprüsü restorasyonundan ~ 2 yıl sonrasında tempan duvarda meydana gelen çökme görüntüsü.	55
Şekil 3.37. Pehlivanlı Köprüsü restorasyonundan ~2 yıl sonrasında çökme meydana gelen tempan duvarın her iki tarafına ait görüntüler	56
Şekil 3.38. Pehlivanlı Köprüsü tempan duvar onarımı öncesi ve sonrasına ait görüntüler	57
Şekil 3.39. Tempan duvar onarımından hemen sonra yapılan saha çalışmasına ait bir görsel.	58
Şekil 3.40. Restorasyondan 6 yıl sonra yapılan saha çalışmasından bir görüntü	59
Şekil 3.41. Pehlivanlı Köprüsü tempan duvarında onarım sonrası yeniden meydana gelen çökmeye ait bir görsel.....	59
Şekil 3.42. Tempan duvar onarımı sonrası köprü gövdesi ile tempan duvar arasındaki düşey ayrışmanın yakın plan bir görüntüsü.....	60
Şekil 4.1. Pehlivanlı Köprüsü restorasyonu öncesinde gerçekleştirilen tabliye düzleştirme, betonarme tabliye eklentisi ve taş duvar ilavesi uygulamaları (Bayraktar 2012).....	64

Şekil 4.2. Pehlivanlı Köprüsü restorasyon esnası operasyonel modal analiz çalışması döneminden bir görsel (Okuyucu vd 2016).	65
Şekil 4.3. Pehlivanlı Köprüsü birinci mod şeklinin zaman içerisindeki değişiminin şematik olarak gösterimi.	69
Şekil 4.4. Restorasyon öncesi dönemde Pehlivanlı Köprüsü tempan duvarlarının yanına yapılan duvar eklentisi (Bayraktar 2012).	71
Şekil 4.5. Restorasyon öncesi dönemde Pehlivanlı Köprüsü tabliye düzleştirme çalışması amacıyla yapılan uygulamanın şematik gösterimi.	72
Şekil 4.6. Pehlivanlı Köprüsü' nün bulunduğu bölge için AFAD üzerinden hesaplanan yatay ve düşey elastik deprem tasarım spektrumları.	76
Şekil 4.7. Pehlivanlı Köprüsü hasarsız durumunu temsil eden sonlu elemanlar modeli üzerinde hesaplanan mod şekilleri ve modal frekanslar.	82
Şekil 4.8. Literatürde kullanılan farklı malzeme özellikleri için tez çalışması kapsamında oluşturulan Pehlivanlı Köprüsü sonlu elemanlar modeli üzerinde gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçlarının grafik halinde gösterimi. ..	85
Şekil 4.9. Pehlivanlı Köprüsü' nün hasarlı durumunu temsil eden sonlu eleman modeli üzerinde gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçları.	87

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Erzurum ve yöresi tarihsel depremleri (Anonim3 2021).....	22
Çizelge 3.2. Schmidt Çekici sertlik okumalarına göre hesaplanan taş basınç dayanım değerleri.	27
Çizelge 3.3. Taşların Basınç mukavemetlerinden Eurocode (1995) uyarınca hesaplanan duvar basınç dayanım değerleri.	27
Çizelge 3.4. Köprü birimleri için hesaplanan Elastik Modül değerleri	28
Çizelge 3.5. Kireçli Köprüsü'nün farklı çalışmalarda kullanılan malzeme özellikleri...	29
Çizelge 4.1. Pehlivanlı Köprüsü restorasyon dönemlerine ait operasyonel modal analiz sonuçları.....	62
Çizelge 4.2. Pehlivanlı Köprüsü Restorasyon dönemlerinde modal frekans değerlerinde meydana gelen değişim.....	63
Çizelge 4.3. Restorasyondan 2 ve 6 yıl sonra yapılan operasyonel modal analiz uygulamasından elde edilen sonuçlar.	68
Çizelge 4.4. Pehlivanlı Köprüsü üzerinde gerçekleştirilen tüm operasyonel modal analiz uygulaması sonuçları.	74
Çizelge 4.5. Pehlivanlı Köprüsü operasyonel modal analiz uygulaması ile elde edilen birinci mod şekillerine ait doğal titreşim periyotları.	75
Çizelge 4.6. Literatürdeki muhtelif çalışmalarda Pehlivanlı Köprüsü için yapılan hesaplamalarda kullanılan malzeme özellikleri.	80
Çizelge 4.7. Literatürde kullanılan farklı malzeme özellikleri için tez çalışması kapsamında oluşturulan Pehlivanlı Köprüsü sonlu elemanlar modeli üzerinde gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçları.	83
Çizelge 4.8. Literatürde kullanılan farklı malzeme özellikleri için tez çalışması kapsamında oluşturulan Pehlivanlı Köprüsü sonlu elemanlar modeli üzerinde gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçları ile operasyonel modal analiz sonuçları arasındaki (%) fark değerleri.	84
Çizelge 4.9. Pehlivanlı Köprüsü hasarlı durumunu temsil eden sonlu eleman modeli üzerinde gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçları ile restorasyondan 6 yıl sonra gerçekleştirilen operasyonel modal analiz sonuçları.	88

1. GİRİŞ

Sayırsız medeniyete ev sahipliğı yapmış olan Anadolu coğrafyası, üzerinde çok sayıda tarihi eser barındıran bir açık hava müzesi olarak kabul edilmektedir. Tarihi eserler kültürel miras ve kültürel kimliğın en paha biçilmez yansımasıdır. Bu tarihi eserler geçmiş ile bugün arasında bir medeniyet köprüsü olarak karşımıza çıkmaktadır. Medeniyet denilince akla su, elektrik, telekomünikasyon hizmetleri ve diğerk kamu hizmetleri gelmektedir. Ancak en önemlisi olan ve bu hizmetlerin ilgili topluma ulaşabilmesi için gerekli olan yoldur. Yol bir medeniyetin gelişmişliğini gösteren birincil faktördür. İnsanlığın ilk tarihinden itibaren barınma ve yol birincil ihtiyaçlar içerisinde. İnsanlık tamamen düz ovalarda yaşamamakta engebeli dağlık arazilerde ve akarsu kenarlarında da yaşamaktadır. İnsanlık nüfusu arttıkça barınma, yiyecek bulma sorunları ortaya çıkmıştır. Bu sebepten insanlık yeni yerler keşif edip yaşam alanını genişletme kaygısına düşmüştür. Bu keşifler esnasında karşısına çıkan engebeleri, akarsuları, nehirleri aşmak, ulaşımı en kısa ve ekonomik yoldan sağlamak için köprülere ihtiyaç duymuşlardır. Gelişen dünya teknolojisiyle insanların ulaşımındaki rahatlığını sağlamak adına yığma taş köprüler yerini sanat yapıları diye adlandırılan menfez, köprü, tünel, viyadük gibi yapılara bırakmıştır.

Ülkemiz büyük bir çeşitlilik içeren zengin bir kültürel mirasın sahibidir. Yapıldığı bölgeye ve karşıladığı ihtiyaca bağılı olarak büyük çeşitlilik arz eden mimari-kültür mirasımız içerisinde tarihi köprüler özel bir yer tutmaktadır. Ülkemizde de farklı dönemlere ait geçmişten günümüze kadar ulaşan birçok tarihi yığma köprü bulunmaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından hazırlanan tarihi köprüler envanterine göre yurt içinde büyük çoğunluğu Osmanlı dönemine ait toplam 1646 adet tarihi köprü bulunmaktadır (Özmen ve Sayın 2020). Yüzlerce yıllık geçmişe sahip olan bu köprüler doğal afetler veya insanlar tarafından zarar görebilmekte ya da yıkılabilmektedir. Ayrıca köprüde kullanılan malzemelerin zamanla dayanımını yitirmesi, zemin oturmaları ve köprünün inşa edildiğı dönemde düşünölmeyen yüklere maruz kalması gibi sebepler de tarihi köprülerin zarar görmesine sebep olabilmektedir. Zarar görmesinin yanı sıra eski zamanlarda kullanılan tasarım metotları sayesinde göçme riski olmadan günümüz trafik yüklerini taşıyacağı kabul edilir. Tarihi köprülerin çoğu

büyük depremlere maruz kalmış olsalar bile günümüze kadar ayakta kalmayı başarmışlardır (Özkaya 2019).

Akarsuyun iki yakası arasında ulaşımı ve iletişimi sağlayan tarihi köprülerin eşsiz örneklerine Erzurum ili ve çevresinde sıklıkla rastlamak mümkündür. T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü 12. Bölge Müdürlüğü, Erzurum ili ve çevresindeki tarihi köprülerin sorumluluğunu üstlenen devlet kurumumuzdur. Bölgedeki bazı tarihi köprüler arasında; Mülk Köprüsü, Derviş Ağa Köprüsü, Kız Köprüsü, Tifnik Köprüsü, Karaz Köprüsü, Nebi Hanları Köprüsü, Ağaver Köyü Köprüsü bulunmaktadır. Erzurum ilinde bulunan tarihi köprülerin en önemlileri arasında sayılan Çobandede Köprüsü tarihi İpek Yolu güzergâhında inşa edilmiştir. Köprü, İlhanlı Hükümdarı Gazan Han'ın (1295-1304) Veziri Salduzlu Emir Çoban Noyin tarafından 1298 yılında yaptırılmıştır.



Şekil 1.1. Çobandede Köprüsü (Anonim 2013)

Kuzey-güney doğrultusunda, doğuya doğru hafif içerlek biçimde kurulmuş olup 220 metre uzunluğundadır. Bugün sivri kemerli altı adet açıklığı mevcut olup suyun geliş yönünde (menba) altı adet selyaran, gidiş yönünde (mansap) sekiz adet topuk (mahmuz) bulunmaktadır. Köprünün önemli özelliklerinden biri de batıdan üçgen kaideli selyaranlar, doğudan yuvarlak kaideli topuklarla takviye edilen kemer ayaklarının içerisinde boş bir mekân olarak değerlendirilmesidir. Bu mekânların soğuk mevsimlerde sığınma yeri ya da geçiş ücreti alan görevlilerce barınma alanı olarak veya yapı

sağlamlığını artırmak için oldukları tahmin edilmektedir. Bu boş mekanlarla yapı ağırlığını azaltarak deprem yüklerinin daha az etki etmesini sağladıkları düşünülmektedir. Köprü geometrik motifler ve silmelerle hareketlendirilmiştir. Köprünün kemerleri siyah, kırmızı ve gri renkli kesme taşlardan yapılmıştır. Köprü ayaklarının altına ardış ağaçları döşenmiştir (Anonim 2013).

XI. ve XII. yüzyıldan itibaren Anadolu'ya yerleşen Türk toplulukları, siyasi gücü ve sosyal gelişmeyi sağladıktan sonra, köprü mimarisinin en güzel örneklerini ortaya koymuşlardır. İnşa edilen köprülerle Anadolu'nun ticaret hayatı en yüksek düzeye çıkarılmıştır. Arazinin geniş ve bataklık olduğu bölgelerde akarsuyun yayılma alanına göre geniş, çok gözlü ve yayvan bir şekillendirme esas alınmış, dar ve dik vadilerden akan suları geçmek için de geniş açıklıklı ve yüksek kemerli köprüler uygulanmıştır. Anadolu'da ilk örnekleri Romalılar döneminden kalan taş köprülerin en güzel ve görkemli örneklerinden biri de bu tez çalışması kapsamında olan Erzurum İli Tortum-Uzundere İlçeleri yolu üzerinde bulunan Pehlivanlı Beldesi giriş kısmında yer alan tek açıklıklı sivri kemerli Pehlivanlı (Kireçli) Köprüsü'dür. Pehlivanlı Köprüsü, yöre halkı arasında Pehlivanlı Köprüsü olarak bilinmektedir. Köprü üzerinde kitabe veya herhangi bir yazılı bilgi bulunmamaktadır. Köprünün hangi tarihte ve kim tarafından inşa edildiği kesin olarak bilinmemektedir. Fakat Bayraktar (2012)'a göre köprünün genel mimarisi, yapım malzemesi, teknik özellikleri dikkate alındığında ve Doğu Anadolu'daki (Van, Muş, Bitlis, Ağrı, Erzurum vb.) diğer taş köprülerin mimari yapıları ile kıyaslandığında, XIX. yüzyılın ilk yarısında Osmanlı döneminde inşa edildiği düşünülmektedir.

Tarihi kültür mirasımızın ve bu tez çalışması özelinde köprülerin korunması ve geleceğe güvenle devredilmesi çalışmaları nitelikli mühendislik hizmeti kapsamında değerlendirilen çalışmalardır. Tahribatlı muayene yöntemlerinin kültür mirasımızın mühendislik özelliklerinin tayininde kullanılamaması mühendisleri tahribatsız ama nispeten güvenilir yöntemler bulmaya ve kullanmaya sevk etmektedir. Tarihi yapıların sonlu eleman modellerinin oluşturulması ve bu modeller üzerinde yapılan analizler ile yapısal davranışlarının incelenmesi son derece yaygın çalışmalar olarak karşımıza çıkmaktadır. Abidevi bir eser olarak kabul edilen Arge-Tebriz yapısının incelendiği Hoveidae et al. (2021), Antalya ilinde bulunan tarihi minarelerin sismik davranışlarının çalışıldığı Usta (2021) ve Avrupa' nın en eski kiliselerinden birisi olduğu ifade edilen

tarihi bir kilise yapısının incelendiği Kujawa et al. (2020) çalışmaları son yıllarda literatürde yer alan ve tarihi yapıların sonlu eleman modellerini konu edinen çalışmalara örnek olarak sunulabilmektedir. Bununla birlikte, Lourenco (2002) çalışmasında da net bir şekilde belirtildiği gibi teorik model oluşturma çalışmaları çok sayıda belirsizlik içermekle beraber bilinmeyen fazlalığı nedeniyle pek çok kabulü de zorunlu kılmaktadır. Yığma yapı malzemesinin heterojen oluşu, işçilik farklılıkları, yapım dönemindeki imalat pratiklerinin bilinmeyişi, temel ve zemin hakkındaki bilgi eksikliği, vb. hususlar kabuller yapılmasına ve bu nedenle gerçek yapıyı temsil kabiliyeti zayıf sonlu eleman modellerinin oluşturulmasına neden olmaktadır. Bu modeller üzerinde gerçekleştirilen analiz sonuçları dahilinde tarihi bir yapının yapısal davranışı hakkında değerlendirme yapılması da tartışmalı bir hal almaktadır. Araştırmacı ve uygulamacı mühendisler bu noktada yardımcı olan tahribatsız deneysel bir yöntem olarak karşımıza operasyonel modal analiz uygulaması çıkmaktadır. Operasyonel modal analiz mevcut bir yapının dinamik davranış parametrelerinin yerinde elde edilmesine imkân sağlayan tahribatsız ve deneysel bir uygulamadır (Birinci 2010).

Operasyonel modal analiz yöntemi ile elde edilen dinamik davranış parametreleri aynı yapı için sonlu eleman modeli üzerinden hesaplanan değerler ile kıyaslanarak teorik modelin mevcut yapıyı dinamik davranış parametreleri üzerinden ne derecede temsil ettiği konusunda değerlendirme yapılması mümkündür ve bu çalışma son yıllarda yoğun olarak yapılmaktadır. Sonlu eleman modellerinin deneysel olarak elde edilen modal davranış parametrelerini verecek şekilde güncellenmesi mümkündür. Aslay ve Okuyucu (2020), Özdoğan (2018), Kocaman vd (2018) çalışmaları bu uygulamalara örnek olarak gösterilebilecek çalışmalar olarak literatürde yer almaktadır.

Sonlu eleman modellerinin doğrulanması çalışmalarının yanı sıra, operasyonel modal analiz uygulaması kullanılarak yapıların yapı sağlığı izlemelerinin ve mevcut durum değerlendirmelerinin yapılması da mümkündür (Karbhari et al. 2009). Dinamik davranış parametreleri olarak değerlendirilen mod şekilleri, modal frekanslar ve sönüm değerleri yapısal sistemlerdeki kütle ve rijitlik değişimlerinden doğrudan etkilenen parametrelerdir. Bu nedenledir ki; modal parametrelerde meydana gelen bir değişimin yapının kütlesi, rijitliği ve mesnet koşulları gibi parametreleri üzerinden değerlendirilmesi ve bu değişimin olası bir hasar göstergesi olarak ele alınması

mümkündür. Bu tez çalışmasının çıkış noktası bu husus olup inceleme materyali ise Erzurum ili Tortum ilçesi Pehlivanlı Mahallesi'nde bulunan Pehlivanlı (Kireçli) Taş Köprüsü' dür.

Tarihi köprülerin yapısal sistemlerinin incelenmesi, mevcut durumların araştırılması ve geleceğe güvenle devredilmesi alanındaki çalışmalar inşaat mühendisliği disiplini tarafından son yıllarda sıklıkla gerçekleştirilen çalışmalardır. Ulusal ve uluslararası literatürde tarihi köprüler üzerinde gerçekleştirilmiş çok sayıda çalışmaya erişim sağlamak mümkündür. Bu çalışmalar arasında tarihi köprülerin mevcut durumlarının bütün olarak ele alınması ve dinamik davranış karakteristiklerinin yerinde elde edilmesi çalışmaları dikkat çekmektedir. Yapıların dinamik davranış karakteristikleri olarak tanımlanan doğal titreşim periyotları, mod şekilleri ve sönüm oranları her yapı için karakteristik değer taşır ve yapının sağlığı hakkında önemli bilgi sunar.

Bu tez çalışması kapsamında Erzurum ili Tortum ilçesi Pehlivanlı Mahallesi'nde bulunan Pehlivanlı (Kireçli) Taş Köprüsü üzerinde operasyonel modal analiz uygulaması yapılarak dinamik davranış karakteristikleri deneysel olarak elde edilmiş ve takibi yapılmıştır. Köprü'nün 2012 yılındaki restorasyonu öncesi dinamik davranış karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik teknik çalışma Bayraktar (2012) tarafından yapılmıştır. Restorasyon esnasında köprü tabliyesindeki çok katmanlı tabliye eklentileri kaldırıldıktan sonra dinamik davranış karakteristikleri operasyonel modal analiz ile Okuyucu vd (2016) tarafından gerçekleştirilen bilimsel araştırma projesi kapsamında incelenmiştir. Restorasyon sonrası, restorasyondan iki ve altı yıl sonrasındaki modal davranış parametreleri ise bu tez çalışması kapsamında incelenmiştir. Pehlivanlı (Kireçli) Köprüsü üzerinde bir bakıma restorasyonu öncesinden başlayan ve tez çalışması dahilinde geçen 9 yıllık süre içerisindeki yapı sağlığı izlemesi çalışması olarak kurgulanan ve gerçekleştirilen araştırmanın detayları ve sonuçları takip eden bölümlerde sunulmaktadır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde, erişim sağlanabilen ulusal ve uluslararası dizinde yer alan ve konu ile ilgili olduğu kabul edilen nispeten güncel çalışmaların bir derlemesi sunulmaya çalışılmıştır.

Fanning and Boothby (2001) çalışmalarında üç yığma köprüyü sonlu elemanlar metodu ile üç boyutlu olarak modellemişlerdir. Köprülerin sonlu eleman modellerinin servis yükleri altında statik analizlerini yapmışlar ve bu modellerden elde edilen sonuçları köprü üzerinde yapılan test sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır.

Aoki vd (2004) Japonya’da bulunan Rakanji taş kemer köprüsünün deneysel ve teorik dinamik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu amaç doğrultusunda ilk olarak sonlu eleman modelini oluşturmak için ihtiyaç duyulan köprüde kullanılan malzeme mekanik özelliklerini belirleme testleri gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak köprünün sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve yapılan analizler sonucunda köprü teorik mod şekilleri ile doğal frekansları hesaplanmıştır. Daha sonra köprü üzerinde çevresel titreşimlerin neden olduğu ivme ölçümleri yapılmış elde edilen bu deneysel veriler yardımıyla köprü deneysel dinamik karakteristiklerini belirlemişlerdir. Son olarak elde edilen deneysel ve teorik dinamik karakteristikler karşılaştırılmıştır.

Toker ve Ünay (2004) çalışmalarında tarihi yapıların yapısal davranışlarının tam olarak anlaşılması, korunmaları için gerekli bir öncelik olduğunu belirtmişlerdir. Yığma kemer köprüler, kolaylıkla hesaplanabilen tipik kemer davranışı nedeniyle, yığma yapılar için geliştirilecek analiz yöntemlerinde çalışılacak en uygun yapılardır. Tuğla ve/veya taştan yığma yapılar için en uygun analiz yöntemi sonlu elemanlar analizidir. Doğru bir yapısal analiz için model tam olarak tanımlanmalıdır. Bu çalışmada, farklı yükleme koşulları altında ortak bir kemer köprüsünün prototip modeli üzerinde matematiksel modelleme teknikleri incelenmiştir.

Ural (2005) çalışmada Trabzon’un Maçka ilçesi yakınlarında bulunan Coşandere (Kınalı) Köprüsü, SAP2000 programında modellenerek önce statik olarak kendi ağırlığından dolayı oluşan gerilme ve şekil değiştirmeler bulunmuş ve modelin lineer

elastik deprem davranışı incelemiştir. Bunun için elde edilen matematik modele 1940-Elcentro depreminin ivme kaydı altında deprem davranışını incelemiştir. Günümüzde en uygun yöntemlerden biri olarak kabul edilen sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılmıştır.

Brencich and Sabia (2008) tarafından yapılan bu çalışmada 1866 yılında inşa edilen tarihi Tanaro köprüsü ilk olarak köprü malzeme özelliklerini belirlemek amacıyla yassı veren testi, sonik test ve schmidt darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Malzeme testlerinden elde edilen verilerle köprünün teorik modeli oluşturulmuş ve mod şekilleri ve doğal frekansları elde edilmiştir. Daha sonra köprünün tamamında, iki açıklığında ve dolgu duvarların olmadığı durumlarda, ivmeölçerler yardımıyla köprünün dinamik testleri her bir durum için doğal frekansları, sönüm oranları ve mod şekilleri belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda dinamik testler yardımıyla köprü dinamik karakteristikleri doğru olarak belirlenmek isteniyorsa köprünün büyük bir kısmının incelenmesi gerektiği sonucu çıkarılmıştır.

Bayraktar vd (2009) çalışmalarında Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirmesi çalışmasında; Malatya-Elâzığ karayolu üzerinde bulunan Kömürhan Köprüsü'nün dinamik karakteristikleri SAP2000 programı kullanılarak analitik olarak elde edilmiştir. Operasyonel modal analiz yöntemi kullanılarak ise deneysel ölçümlerle elde edilmiştir. Çalışma sonucunda, analitik ve deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristikler birbirleriyle karşılaştırılmış, malzeme mekanik özellikleri ve sınır değerlerinde ki değişimler dikkate alınarak köprünün mevcut durumunu yansıtan gerçek sonlu eleman modeli elde edilmiştir.

Bayraktar vd (2009) çalışmalarında Rize ili Çamlıhemşin'de 1696 yılında inşaa edilen senyuva tarihi kemer köprüsü uygulama olarak seçilmiştir. Köprünün analitik dinamik özelliklerini elde etmek için ANSYS yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Daha sonra, deneysel olarak dinamik karakteristiklere ulaşmak için ortam titreşimleri kullanılarak, operasyonel modal analiz yönteminden faydalanılmıştır. Modal parametreler tanımlanırken pik toplama yöntemi kullanılmıştır. Daha sonra analitik ve deneysel olarak birbirleriyle karşılaştırılan dinamik özellikler tarihi köprünün sınır koşulları gibi belirsiz modelleme parametrelerini değiştirerek mod parametreleri

arasındaki farkları en aza düşürecek şekilde güncellenmiştir. Sonuç olarak; doğal frekanslar arasındaki farklar % 27'den % 3'e düşürülür ve FEM güncellemesinden sonra analitik ve deneysel dinamik özellikler arasında iyi bir uyum sağlanmıştır.

Wang et al. (2010) hayati bir altyapı parçası olan köprülerin, tasarım kapasitesinin üzerinde bir yükte çalıştığından bahsetmiştir. Bu sebepten yapı sağlı izleme prosedürünün ulaşım ağı ve köprü yapıları için her zaman güvenli bir çalışma olacaktır. Titreşim tabanlı hasar tespit yöntemleri, doğal frekanslardaki değişiklikler, eğrilik veya gerinim modları, modal gerinim enerjisi, dinamik esneklik, yapay sinir ağları, hasar öncesi ve sonrası ve Wavelet gibi diğer sinyal işleme yöntemleri teknikleri, ampirik mod ayrıştırma ve Hilbert spektrum yöntemleri bu çalışmada tartışılmaktadır.

Birinci (2010) tarafından yapılan bu çalışmada, taş kemer köprülerin dinamik karakteristiklerini (mod şekilleri, doğal frekansları ve sönüm oranları) teorik ve deneysel olarak belirlenmesini amaçlamaktadır. Teorik modelleri sonlu elemanlar yöntemiyle ANSYS programı kullanılarak, deneysel çalışmalarını operasyonel modal analiz yöntemini kullanarak yapmıştır. Yapılan deneysel ve teorik çalışmalar neticesinde sonuçlar değerlendirilerek teorik model deneysel verilerden elde edilen değerlere yaklaştırılmıştır. Sonuç olarak, uygun ölçüm cihazları kullanılarak gerçekleştirilen operasyonel modal analiz yönteminin, taş kemer köprülerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde ve sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesinde güvenle kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Oliveira et al. (2010) çalışmalarında 59 tarihi yığma yapı üzerinde yaptıkları çalışmada tarihsel ampirik kurallar kısaca sunulmaktadır. Geometrik sonuçların ayrıntılı bir tartışmasından yola çıkarak kemer geometrisi, dolgu kalınlığı ve fiziksel özelliklerin nihai yük taşıma açısından büyük önem taşıdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Ramos et al. (2010) çalışmalarında, Portekiz'deki Mogadouro Saat Kulesi ve Lizbon'daki Jerónimos Manastırı Kilisesi'nin modal ve yapısal tanımlanmasına ilişkin iki vaka incelemesini ele almışlardır. Bu yapılar, Minho Üniversitesi tarafından titreşim, sıcaklık ve bağıl hava nemi sensörleri ile izlenmiştir. Modal parametreleri tahmin etmek için operasyonel modal analiz yöntemi kullanılmıştır. Amaç, yığma yapılarda hasar

değerlendirmesi gerçekleştirmektir. Tarihi yapıların korunmasına yardımcı olan bir sağlık izleme sürecinin bir parçası olarak titreşim kayıtları ile erken aşamada yapı hasarı belirlenmektedir. Çalışma, izleme sisteminin kurulumunu, sistem tanımlamasını ve müteakip FE modeli güncelleme analizini, otomatik mod tanımlamasını ve belirlenen mod parametreleri üzerindeki ortamın etkisinin araştırılmasını içeren dinamik analiz adımlarını sunmaktadır.

Aras vd (2011) çalışmalarında, İstanbul'da 1861-1865 yılları arasında inşa edilmiş tarihi bir kâgir sarayın modal özelliklerinin belirlenmesini sunmaktadır. Hem deneysel hem de sayısal bir çalışma yapılmıştır. Deneysel çalışma ortam titreşim araştırmasına dayalıyken, sayısal analiz yapının sonlu elemanlar modelinden faydalanılmıştır. Deneysel çalışmanın sonuçları en şüpheli parametre olan, duvarın elastik modülü, basit işlemlerle sayısal model ile deneysel sonuçlarla kalibre edilmiştir. Deneysel ve sayısal analizler arasında iyi bir tutarlılık elde edilen çalışma, sarayın dinamik özelliklerini ortaya çıkarmıştır.

Callaway et al. (2012) çalışmalarında yığma kemer köprülerinde dolgu varlığının etkisini araştırmışlardır. Bu araştırma kapsamında 27 adet küçük ölçekli köprüler üzerinde deneysel yapılmıştır. Yapılan deneysel testler analiz yazılım ile karşılaştırılarak dolgu malzemesinin köprü taşıma kapasitesine önemli ölçüde katkıda bulunduğu sonucuna varılmıştır.

Pastor et al. (2012) çalışmalarında Modal Güvence Ölçütü'nün (MAC) mod şekillerinin ayrıklığının tayini amacıyla kullanımını incelemişlerdir. Çalışmaya göre MAC; istatistiksel bir gösterge olup mod şekilleri arasındaki tutarlılık derecesini belirleyen bir parametre olarak değerlendirilmekte ve sayısal değeri 0 ile 1 arasında sınırlandırılmaktadır.

Uçak (2012) çalışmasında tarihi yığma kubbelerin dinamik karakteristiklerini operasyonel modal analiz ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak belirlenmesini amaçlamaktadır. Hamza Paşa Türbesi ve Kavak Meydan Şadırvanının sonlu elemanlar modelini deneysel çalışmadan elde ettiği verilere göre iyileştirerek oluşturmuştur. Çalışma sonucunda operasyonel modal analiz yönteminin yığma kubbelerin dinamik

karakteristiğinin belirlenmesinde ve sonlu elemanlar modelinin iyileştirilmesinde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Milani and Lourenço (2012) yığma kemer köprülerin statik davranışı bir 3D aracılığıyla sayısal olarak analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma için deneysel olarak iki gerçek ölçekli yığma köprü için gerçekleştirilmiştir. Hem 2D hem 3D limit analizleri yapılarak karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte dolgunun neden olduğu güçlendirme etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak 3D modelleme sadece eğik geometriler ve simetrik olmayanlar için geçerlidir.

Korkmaz vd (2013) çalışmalarında taş kemer köprülerin deprem davranışlarının belirlenmesi amacıyla, Rize-Ardeşen Çamlıhemşin yolu üzerindeki, 19-20. yy Osmanlı dönemi Timisvat tarihi köprüsü ele almışlardır. Tarihi köprü, sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş, model üzerinde deprem ivme kayıtları ile zaman tanım alanında dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Gerilme değerlerinde en yüksek sonuçlar kobe depreminde en düşük sonuçlar ise anza depreminde çıkmıştır. Yer Değiştirme sonuçları karşılaştırıldığında en büyük yer değiştirme kobe depreminde ve en küçük yer değiştirme değeri anza depreminde meydana gelmiştir.

Sarhosis et al. (2014) eğiklik açısının yük taşıma üzerindeki etkisini araştırmak için kullanılan Eleman Yöntemi (DEM) 28 farklı geometride tek açıklıklı taş kemer modellenmiştir. Kemerler üzerine yükleme yapılarak çökme değerine karşılık çatlak gelişimi ve düşey sehim profili kaydedilmiştir. Sonuç olarak eğiklik açısının yığma kemerlerin taşıyabileceği nihai yük kapasitesi üzerindeki etkisi fazladır.

Türker vd (2015) çalışmalarında tarihi bir taş kemer köprünün laboratuvar ortamında oluşturulmuş 1/10 ölçekli modelinin dinamik davranışı deneysel olarak incelenerek dinamik parametreleri bulunmuştur. SAP2000 ortamında üç boyutlu katı modelleme yapılarak dinamik karakteristikler analitik olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda deneysel ve analitik olarak bulunan dinamik karakteristikler karşılaştırılmış ve farklılıklar ortaya konulmuştur.

Nohutçu vd (2015) çalışmalarında Manisa Türkiye'de Hafsa Sultan adlı tarihi bir camide gerçekleştirilen model kalibrasyonunun sonuçlarını sunmaktadır. Caminin sonlu eleman modeli, yapının ortam titreşim testlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak kalibre edilmiştir. Yapının katı bir modelinin geliştirilmesi için yapının boyutları, yapıdaki çatlak ve malzeme bozulmaları gibi kusurlar ve farklı bölümlerde kullanılan malzemeler tespit edilmiştir. Yapının malzeme özelliklerinin değerlendirilmesi için tahribatsız ve tahribatlı muayene yöntemleri kullanılmıştır. Yapının sayısal ve deneysel mod parametreleri sırasıyla sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ve operasyonel modal analiz (OMA) ile elde edilmiştir. Doğal frekanslar ve karşılık gelen mod şekilleri hem FEM hem de OMA'dan elde edilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Mod şekilleri arasında iyi bir uyum sağlanırken, doğal frekanslar arasında bazı farklılıklar oluşmuştur. Farklılıkların, Young'ın duvarcılık modülündeki değişikliklerden, elemanlardaki çatlaklardan veya sınır koşullarından kaynaklandığı düşünülmüştür. Bu nedenle sonlu elemanlar modeli malzeme parametreleri değiştirilerek kalibre edilmiştir. Son olarak caminin daha gerçekçi bir sayısal modeli ortaya konmuş ve sonuçlar detaylı olarak tartışılmıştır.

Ataei et al. (2016) seksen yıllık bir tarihi yığma köprünün kapasite değerlendirilmesi yapılmıştır. 40 metre uzunluğunda 30 metre yüksekliğinde ana açıklığın deplasman ölçümü 0,01 milimetre hassasiyetle gerçekleştirilmiştir. Yer değiştirme sonuçlarına göre sonlu eleman modeli güncellenmiştir. Kalibre edilen model üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda köprünün mevcut durumda hizmet verebileceği kararlaştırılmıştır.

Costa et al. (2016) çalışmalarında bir ortam titreşim testinden tahmin edilen dinamik modal parametreleri kullanarak taş duvar kemerli bir demiryolu köprüsünün sayısal modelinin kalibrasyonu yapılmıştır. Geliştirilen 3B sayısal model, köprü yapısal bileşenlerinin ve malzemelerinin deneysel mekanik özelliklerine göre sonlu elemanlar yöntemi ile teorik model oluşturulmuştur. Köprü kalibrasyonu köprü dinamik ölçümlerinden yararlanılmıştır. Güncellenmiş köprü malzemesi özelliklerinin parametrelerinin doğrulanması, malzeme testinin sonuçlarına, mevcut köprü tasarım verilerine ve ortam titreşim testlerine dayanmaktadır. Köprü model kalibrasyonu ile teorik modelin gerçek yapıyı temsil etmesi sağlanmıştır.

Alparslan vd (2017) çalışmasında 15.5m uzunluğa ve 4.75m genişliğe sahip olan Ordu, Ulubey’de bulunan tek açıklıklı tarihi Sarp Dere Köprüsü’nün dinamik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Tek açıklıklı tarihi köprünün modal parametreleri teorik ve deneysel analiz yöntemleri kullanılarak elde edilmiştir. Tarihi yığma köprünün modal parametrelerinin elde edilmesinde deneysel yöntem olarak operasyonel modal analiz yöntemi, teorik çözümde ise ANSYS analiz programı kullanılmıştır. Deneysel çalışmada hassas üç eksenli ivmeölçerler köprünün kritik noktalarına yerleştirilmiştir ve ivmeölçerlerden elde edilen kayıtlar ile yapının doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları bulunmuştur. Teorik çözümlemede ise ANSYS programı kullanılarak yapının üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur ve tarihi köprünün doğal frekansları ve mod şekilleri elde edilmiştir. Daha sonra, deneysel ve teorik olarak elde edilen doğal frekanslar ve mod şekilleri karşılaştırılmıştır. Tarihi yığma köprünün sonlu elemanlar modelinde kabul edilen malzeme özelliği ve sınır koşulları gibi belirsizliklerin en aza indirgenmesi sağlanarak tarihi köprü iyileştirilmiştir. Çalışma sonucunda, deneysel ve teorik çözümlemede elde edilen sonuçlar arasında önemli ölçüde farklar olduğu ortaya çıkmıştır.

Conde et al. (2017) yığma kemer köprülerin yapısal değerlendirilmesi için mutidisipliner bir yaklaşım önermektedir. Tamamen tahribatsız muayene tekniklerine dayalı kapsamlı bir saha araştırması ile lazer tarama, sonik testler ve ortam titreşimi testiyle birlikte entegre eden bir yöntem önerildi. Sonlu eleman yöntemi kullanılarak yapı teorik analizleri yapılmıştır. Daha sonra deneysel olarak farklılıkları en aza indirerek model kalibrasyonu yapılmıştır. Yapılan analizler neticesinde çekme gerilmesinin önemli etkisi gösterilmektedir. Aynı zamanda dolgu malzemesinin kemer köprüsü performansına katkısından bahsetmektedir.

Barbieri (2019) bir tarihi yığma kemer köprü üzerinde yaptığı çalışmada yığma köprülerin sismik durumunu değerlendirmek için iki metodu karşılaştırmıştır. Tarihi yığma kemer köprü modellenerek üzerinde doğrusal olmayan statik analiz yapılmıştır. Köprü üzerinde ilgili mekanik parametreler (yapı geometrisi ve yapı malzeme özellikleri) ve sismik parametreler üzerinden yapılan çalışmalar olasılık değerleri ilişkilendirilmiştir.

Zhang et al. (2018) çalışmalarında yığma kemer köprüler, kemer, yan duvarlar ve dolgu malzemesi dahil olmak üzere farklı yapısal ve yapısal olmayan bileşenler arasındaki etkileşim tarafından belirlenen karmaşık bir üç boyutlu davranış sergilediğini savunmaktadır. Bu çalışma, kemer gövdesinin orta ölçekli bir tanımını dolgu ve köşebent duvarlar için plastisiteye dayalı bir süreklilik yaklaşımıyla birleştiren, yığma kemer köprülerinin dikey yükleme altındaki davranışını incelemek için gelişmiş bir sonlu eleman modelleme stratejisi sunmaktadır. Sonlu eleman modeli mevcut deneysel laboratuvar test sonuçlarıyla doğrulanmıştır.

Pulatsu et al. (2019) çalışmalarında gelişmiş modelleme stratejilerini kullanarak yığma kemer köprülerin yapısal davranışının daha iyi anlaşılmasını sağlamayı amaçlamaktadır. İlk olarak yığma kemer köprü modelleri sonlu elemanlar modeli ile modellenmiştir. Farklı geometride yığma köprüler modellenerek analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler neticesinde duvar kırılmalarından kaynaklı ciddi kapasite düşüşü ve zemin dolgusunun önemi gösterilmiştir.

Alpaslan (2019) çalışmasında tek açıklıklı tarihi Sarpdere Köprüsü'nün laboratuvar ortamında küçük ölçekli bir prototip modeli oluşturmuştur. operasyonel modal analiz yöntemi kullanılarak prototip ve küçük ölçekli modelin dinamik parametreleri karşılaştırılmıştır ve davranışların benzerlik sergilediğine kanaat getirilmiştir. Model yapı üzerinde bölgesel hasarlar oluşturulmuş bu hasarların dinamik parametreler üzerinde meydana getireceği değişimler araştırılmıştır. Sonuç olarak tarihi yapıda oluşacak hasarlar yapının dinamik karakteristik özellikleri üzerinde önemli etkisi olduğunu göstermektedir.

De Castro et al. (2019) çalışmalarında bir yığma kemer köprü üzerinde doğru sayısal analizler oluşturmak için yersel lazer tarama, yerden geçen radar ve yüzey dalgalarının çok kanallı analizi, darbe yankı testlerini ve ortam titreşimi yaklaşımlarını birleştiren sağlam bir multidisipliner yöntem önermektedir. Bu yöntemler sağlam bir kalibrasyon stratejisine dayanan sonlu eleman modeli güncelleme yöntemi ile tamamlanmaktadır. Elde edilen sonuçlar, %1.21 frekanslarda ortalama nispi hata ve 0.93 ortalama modal güvence kriteri ile önerilen metodolojinin uygulanabilirliğini desteklemektedir.

Scozzese et al. (2019) çalışmalarında Orta İtalya'da bulunan ve Aralık 2013'te şiddetli bir sel sırasında temel oyulması nedeniyle yedi açıklıktan ikisinin yıkıldığı çok açıklıklı bir yığma kemer köprüsü olan Rubbianello Köprüsü'nü ele alarak yığma kemer köprülerinde sel kaynaklı oyulma sorununu incelemektedir. Çalışmanın iki amacı vardır: Sayısal bir modelle ile 2013 yılında köprünün yıkılmasına neden olan oyulma seviyesi ve buna karşılık gelen çökme mekanizması ile birlikte köprünün mod özelliklerinin (titreşim frekansları ve mod şekilleri) farklı oyulma seviyelerine duyarlılığının değerlendirilmesidir. Doğrusal olmayan üç boyutlu bir köprü modeli oluşturularak model elastik özellikleri, köprünün kalan kısmında operasyonel modal analiz (OMA) ile gerçekleştirilen dinamik parametreler kullanılarak teorik model kalibre edilmiştir. Çalışma sonucunda hem köprünün çökmesinin nedeni hem de OMA'nın köprü oyulmasının izlenmesi için uygunluğu hakkında faydalı bilgiler sunulmuştur.

Onat (2020) literatürden derlediği 22 adet tarihi yığma köprü için deneysel olarak elde edilen doğal titreşim frekanslarını sunmuştur. Bununla birlikte literatürde bulunan doğal titreşim frekansı için önerilen ampirik formülleri derlemiştir. Bu bilgiler ışığında tarihi yığma köprülerin fiziksel özelliklerine göre doğal titreşim frekansını veren ampirik bir formül üretmiştir.

Sözen ve Çavuş (2020) çalışmalarında tarihi Yılanlı (Leylekli) kemer köprüsünün özgün ve değişime uğramış formu üzerinde 3D katı model olarak ANSYS paket programında modellenmiştir. Her iki model üzerinde statik ve zaman tanım alanında analizler gerçekleştirerek gerilme deformasyonları irdelenmiştir. Gerek statik gerekse dinamik verilerden elde edilen sonuçlara göre asimetric kemer köprü modelinin daha az zorlandığı sonucuna varılmıştır.

Okuyucu ve Kanbur (2020) çalışmalarında tarihi bir yığma köprünün restorasyon öncesinde esnasında ve sonrasında operasyonel modal analiz yöntemi ile modal parametreleri incelemişlerdir. Köprünün tüm deneysel modal analizleri tüm restorasyon aşamaları için aynı verilmiştir. Fakat köprüde gözle görülür herhangi bir hasar yokken restorasyondan iki yıl sonraki ölçümde köprünün tempan duvarlarında hasar meydana geldiği görülmüştür. Sonuç olarak ise operasyonel modal analiz yöntemi ile hasarların önceden tespit edilebileceği kanısına varılmıştır.

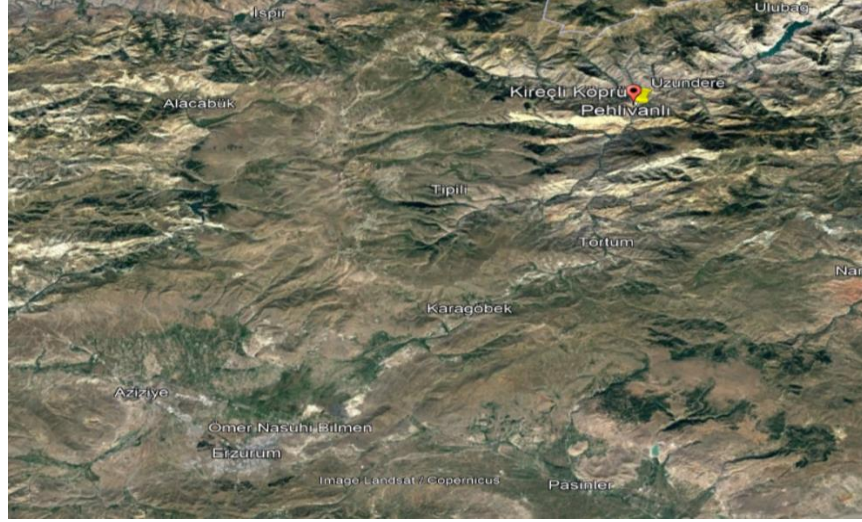
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Tez çalışmaları kapsamında Erzurum ili Tortum-Uzundere yolu üzerindeki Tarihi Pehlivanlı (Kireçli) Köprüsü üzerinde inceleme ve araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Esas olarak farklı zamanlarda köprü yapısı üzerinde operasyonel modal analiz uygulamaları yapılmış ve dinamik davranış parametreleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu bağlamda tez çalışmasının materyalinin Pehlivanlı (Kireçli) Köprüsü; çalışmada takip edilen ana yöntemin operasyonel modal analiz olduğunu ifade etmek mümkündür.

Tek açıklı kemer köprü sınıfında incelenen yığma bir köprü olan yapı Erzurum Karayolları 12. Bölge Müdürlüğü sorumluluk alanı içerisinde yer almaktadır. Çalışma öncesi sorumlu kuruluştan yasal izinler alınmış ve sonrasında saha çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 2015 yılında restorasyona alınan köprünün dinamik davranış parametrelerinin restorasyon öncesi, restorasyon esnası ve sonrasında değişimleri operasyonel modal analiz yöntemi ile elde edilen değerler üzerinden incelenmiştir. Bu bölümde çalışmanın öznesi olan Pehlivanlı (Kireçli) Köprüsü hakkında teknik detaylar, bölgenin depremselliği ile köprünün malzeme mekanik özellikleri hakkında teknik bilgi sunulmakla birlikte takip edilen yöntem detaylandırılmaktadır. Halk arasında köprü; Kireçli Köprüsü olarak da adlandırılmakla birlikte muhtelif kaynaklarda Pehlivanlı Köprüsü olarak tanımlandığından bu bölüm ve sonrasında köprü için Pehlivanlı Köprüsü ifadesi kullanılacaktır.

3.1. Pehlivanlı Köprüsü

Tarihi Pehlivanlı Köprüsü, Erzurum İlinin Tortum-Uzundere yolu üzerinde yer alan ve coğrafi konumu Şekil 3.1’ de gösterilen Pehlivanlı beldesinin girişinde Tortum Çayı üzerindedir. Köprü akarsu üzerinde doğu-batı yakalar arasındaki ulaşımı sağlayacak tek açıklıklı sivri kemer şeklinde inşa edilmiştir.



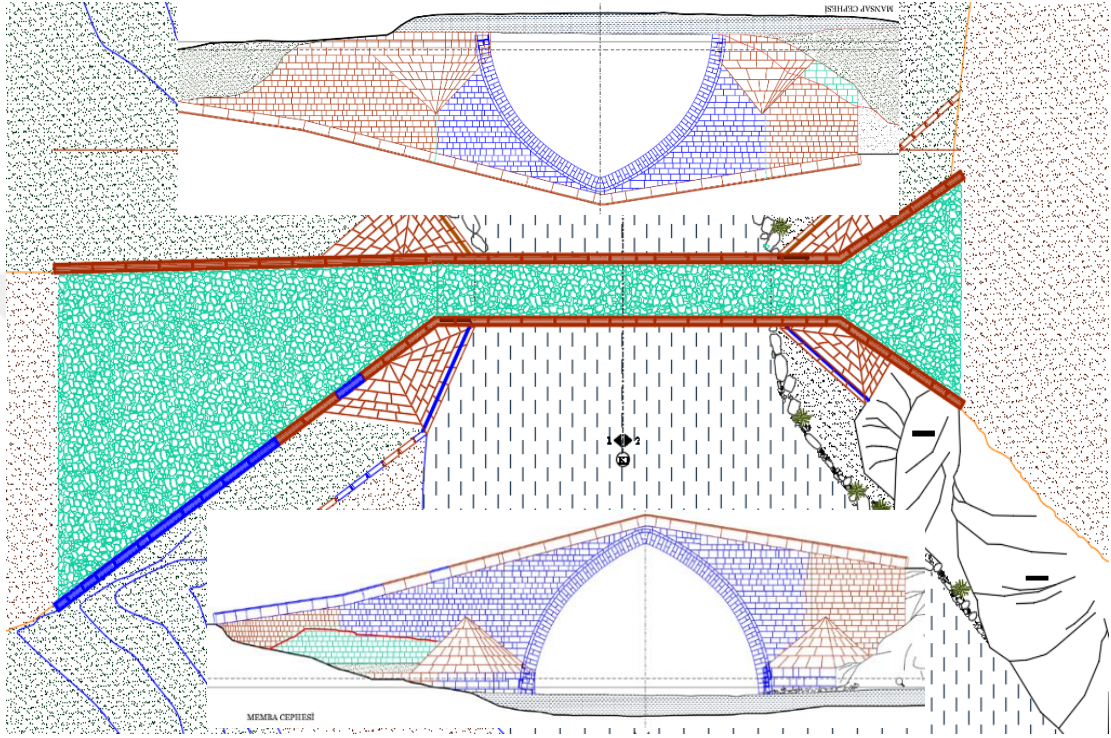
Şekil 3.1. Pehlivanlı Köprüsü coğrafi konumu (Anonim1 2021)

Köprü üzerinde kitabe veya herhangi bir yazılı bilgi bulunmamaktadır. Bayraktar (2012)’a göre köprünün genel mimarisi, kemer formu, inşa tarzı, yapım malzemesi ve teknik özellikleri dikkate alındığında muhtemelen XIX. yüzyılın ilk yarısında Osmanlı döneminde inşa edildiği düşünülmektedir. Bununla birlikte, Tortum – Uzundere yolunun 24. kilometresinde Pehlivanlı beldesi girişinde ve Tortum Çayı üzerinde bulunan Kireçli köprüsünün, ilk yapımının prehistorik devirlere uzanmakta olduğu, 13. yüzyılda Selçuklular tarafından yenilendiği ve son şeklini Osmanlı döneminde aldığının tahmin edildiği Anonim2 (2021) tarafından sunulmaktadır. Şekil 3.2 ’de Pehlivanlı Köprüsü’ne ait genel görünüm sunulmaktadır.



Şekil 3.2. Pehlivanlı Köprüsü genel görünümü

Tek açıklıklı sivri kemer formuna sahip olan Pehlivanlı Köprüsü'nün Karayolları 12. Bölge Müdürlüğü (2021)'nden alınan rölöve çizimlerinden elde edilen bilgilere göre; köprü uzunluğu 43,47 metre, köprü açıklığı 15,17 metre, kemer yüksekliği 11,13 metre ve dıştan dışa köprü genişliği 5,60 metredir. Köprü genel rölöve çizimleri Şekil 3.3'te sunulmaktadır.

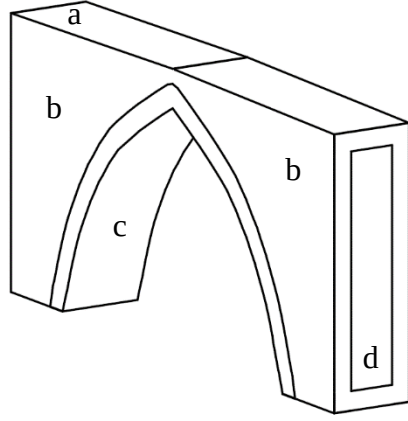


Şekil 3.3. Pehlivanlı Köprüsü döşeme ve kesit rölöve çizimleri (Anonim 2011)

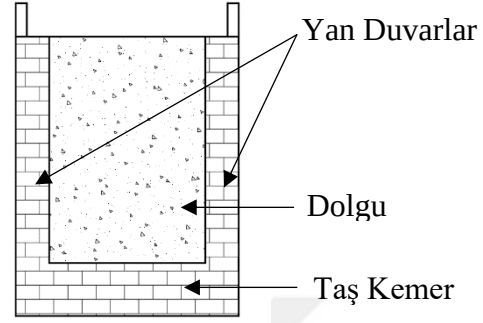
Tarihi yapıların mevcut durumlarının incelenmesi aşamasında; yapıda kullanılan malzeme özellikleri, taşıyıcı elemanların iç çekirdek yapısının doğru belirlenmesi çok önemlidir. Lourenco (2002) çalışmasında bu gibi bazı unsurlar hakkında bilgi toplamada ki zorluklardan bahsetmektedir. Bu aşamada ulusal ve uluslararası literatürde tarihi yığma köprüler için benzer çalışmalar incelenmiştir. Bayraktar vd (2009); Callaway et al. (2012); Bayraktar (2012); Korkmaz vd (2013); Çoruhlu (2017); Conde et al. (2017); Zhang et al. (2018); Özkaya (2019); Onat (2020); Özmen ve Sayın (2020) çalışmalarında ki yığma kemer köprü enkesitleri incelendiğinde tempan duvarlar ve taş kemer arasındaki malzemenin dolgu malzemesi olarak kabul edildiği görülmektedir. Bu tez çalışmasında incelenen Pehlivanlı Köprüsü boyuna ve enine enkesit görüşleri Şekil 3.4'te sunulmuştur. Pehlivanlı Köprüsü'nün restorasyonunda taş

malzemesi olarak andezit kullanıldığı Karayolları 12. Bölge Müdürlüğü’den temin edilen ve EK-1, EK-2’ de sunulan deney raporları üzerinden tespit edilmiştir.

a) Tabliye (Taş) b) Tempan Duvar (Taş) c) Kemer (Taş) d) Dolgu Malzemesi



Köprü Boyuna Kesit



Köprü Enine Kesit

Şekil 3.4. Pehlivanlı Köprüsü boyuna ve enine kesit çizimleri

Tarihi Pehlivanlı Köprüsü 2015 yılında T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından restore edilmiş ve çalışmalar Karayolları Erzurum 12. Bölge Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilmiştir. Bayraktar (2012) tarafından restorasyon öncesi hazırlanan teknik değerlendirme raporuna göre köprü üzerinde daha önceki dönemlerde yapının mimari yapısına uygun olmayan uygulamalar gerçekleştirildiği ifade edilmiştir. Köprüdeki trafik akışındaki konforu sağlamak amacıyla köprü tabliyesi düzleştirilmiş, tempan duvarlar üzerine yeni duvarlar ilave edilmiş, tabliye düzleştirildikten sonra üzerine yaklaşık 1m yüksekliğinde betonarme tabliye inşa edilmiş, yaya güvenliği açısından betonarme tabliyenin kenarlarına demir korkuluklar yapılmıştır. Restorasyon öncesine ait köprü görüntüsü Şekil 3.5’te sunulmaktadır.



Şekil 3.5. Pehlivanlı Köprüsü restorasyon öncesi görünümü (Bayraktar 2012)

Yapılan bu müdahaleler mimari açıdan tarihi yapı dokusunu bozan; statik açıdan köprüye aşırı ilave yükler getirerek yapıda hasara neden olan uygulamalar olarak nitelendirilmiştir. Restorasyon aşamasında tempan duvarlara müdahale edilmiş ve uygun bulunan müdahaleler yapılmıştır. Betonarme döşemenin kaldırılarak yaklaşık 15 cm kalınlığında doğal taş döşeme oluşturulmuştur. Köprü kenarlarına doğal taştan korkuluklar yapılmıştır. Mahmuzlar onarılmış ve selkıran külahları orijinal ölçülerine göre tamamlanmıştır. Köprü ile yollar arasına yapılan taş duvarlarının düzenlenmiş ve köprü dokusuna uygun hale getirilmiştir. Köprü ayaklarının oyulmamaları için uygulamalar yapılmıştır. Köprü üzerindeki yağmur suyu tahliyesini sağlamak amacıyla çörtenler eklenmiştir.

Pehlivanlı Köprüsü birçok akademik çalışmaya konu olmuştur. Bayraktar (2012) Pehlivanlı Köprüsü restorasyon çalışmaları için teknik bir rapor hazırlamış ve Pehlivanlı Köprüsü üzerinde teorik gerilme analizleri yaparak restorasyonun nasıl yapılması gerektiği hakkında bilgiler vermiştir.

Özkaya vd (2015) çalışmalarında tarihi Pehlivanlı Köprüsü üzerinde restorasyon gerçekleşmeden önce köprünün dinamik özelliklerini belirlemek üzere köprü üzerine yerleştirilen ivmeölçerler aracılığıyla çevresel titreşimler ve yaya yürüyüşleri kullanılarak yapının frekansları ve mod şekilleri belirlenmiştir. Oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli üzerinde gerçekleştirilen modal analizlerle tarihi köprünün hesaplanan doğal frekansları ve mod şekilleri deneysel ölçüm verileriyle karşılaştırılmıştır. İyileştirilmesi tamamlanan model üzerinde 1992 Erzincan deprem kaydı esas alınarak zaman tanım alanında lineer olmayan analizler yapılmıştır. Ayrıca köprü üzerinde düşey ve yatay yönde lineer olmayan statik itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Dinamik analiz sonuçları statik itme analizi sonuçlarıyla karşılaştırılarak, itme analizi yönteminin köprü davranışını belirlemek üzere kullanılabilmesi için bazı kurallar belirlenmiştir. Analizlerden elde edilen yer değiştirmeler ve asal gerilmeler değerlendirilerek yapının deprem güvenliği incelenmiştir.

Çoruhlu (2017) Doğu Karadeniz Doğu Karadeniz Bölgesi'nde bulunan 30 adet tarihi taş kemer köprü üzerinde farklı köprü genişliği, kemer açıklığı ve yüksekliğine sahip köprüleri SAP2000 (2018) paket programında Sonlu Eleman Yöntemi'yle modellenmiş; sabit yük, hareketli yük ve bulunduğu bölgedeki deprem yükleri etkisi altında analizlerini gerçekleştirmiştir. Analizler neticesinde tarihi taş kemer köprülerin doğal frekansları ile statik ve dinamik yükler altındaki davranışına ait yer değiştirme ve gerilme hesabı için muhtelif bağıntılar önerilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen kemer köprülerden birisi de Pehlivanlı Köprüsü olmuştur.

Ülkemiz aktif fay hatlarının oldukça yoğun olduğu bir konumda yer almaktadır. Bu sebepten kültürel mirasımız olan tarihi eserlerimizi deprem analizleri de önem kazanmaktadır. Bu amaçla Özkaya (2019) çalışmasında performansa bağlı analiz yöntemlerinden “Kapasite Spektrumu Yöntemi” ile tek açıklıklı tarihi yığma kemer köprülerin performans analizlerinin yapılması amaçlamıştır. Farklı geometrilere sahip 5 adet tek açıklıklı yığma kemer köprü ele alınmış olup, bu yapıların yatay yükleme ile itme analizleri yapılarak kapasite spektrumları elde etmiştir. Çalışma kapsamında incelenen köprülerden birisi de Pehlivanlı Köprüsü' dür.

Pehlivanlı Köprüsü' nü konu edinen bir başka çalışma olan Okuyucu ve Kanbur (2020) akademik çalışmasında köprünün dinamik davranış parametrelerinin operasyonel modal analiz uygulaması ile takip edildiği dönemde köprünün değişen mod şekilleri üzerinden tempan duvarda meydana gelen hasarın tespit edildiğine dair teknik incelemelere yer verilmiştir.

Tez kapsamında yapılacak çalışmalar öncesinde Pehlivanlı Köprüsü' ne birkaç kez gidilerek yerinde inceleme ve tespit çalışmaları yapılmıştır. Operasyonel modal analiz uygulamaları için sensör yerleştirme yönteminin kararlaştırılması, gerekmesi durumunda elektrik enerjisinin temini gibi hususlarla; köprünün mevcut durumunun incelenmesi konularında sahada çalışmalar yapılmıştır.

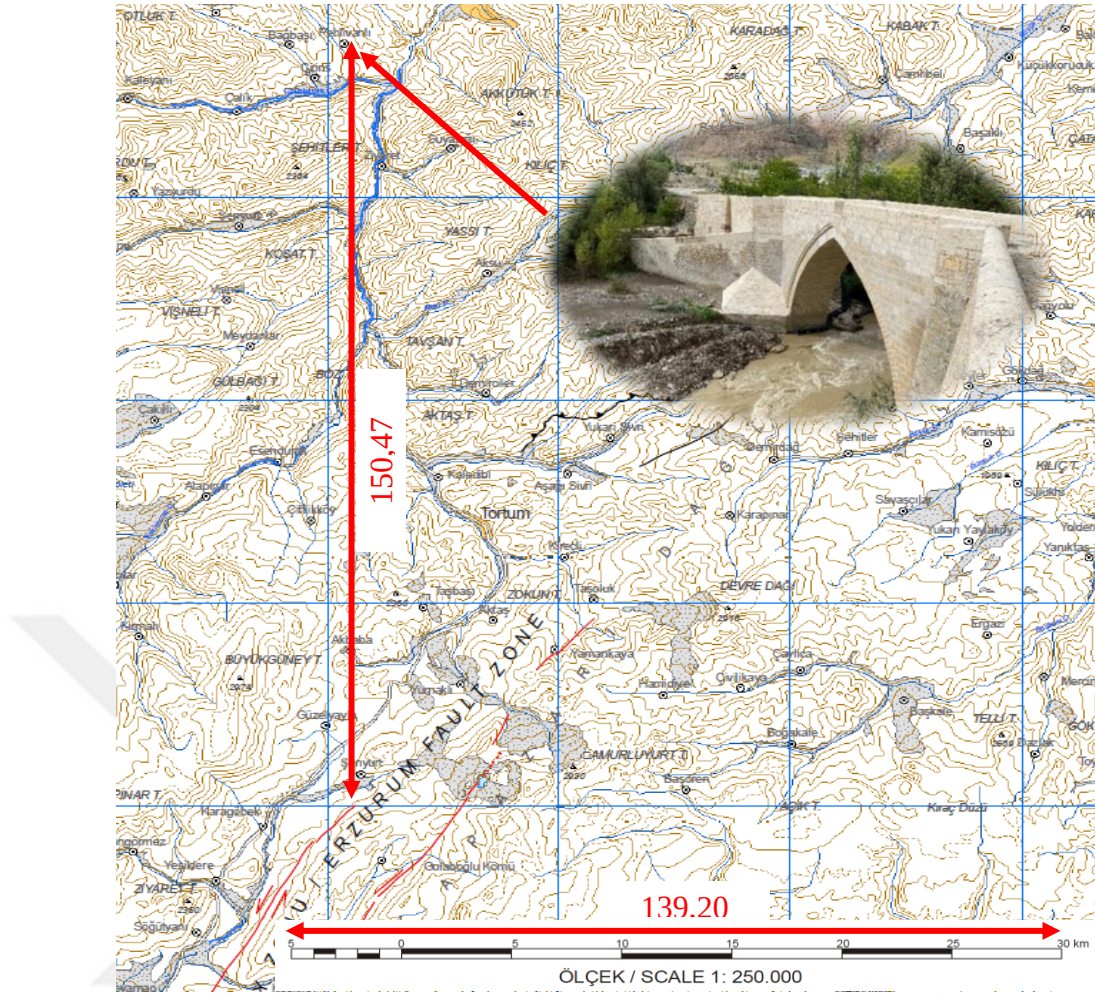
3.2. Bölgenin Depremselliği

Erzurum ili jeotektonik bakımdan Avrasya ve Arap levhalarının yakınsadığı Doğu Anadolu Sıkışma Bölgesi'nde yer almaktadır. Sismotektonik hareketler bakımından hayli etkin olan bölgenin Erzurum ili ile sınırlı kesiminde kalan fayların önemli bir bölümü diri faydır. Bu faylar neotektonik dönemle (Geç-Orta Miyosen) başlayan çarpışma tektoniği etkisinde, kıtasal kabuğun darlaşarak kalınlaşmasının eseridir. Nitekim bölgede sıkışma tektonik rejimi etkisinde sol ve sağ yönlü doğrultu atımlı faylarla bunlara eşlik eden ters ve normal faylar gelişmiştir. Erzurum il sınırları içindeki bu faylar Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) içinde kalmaktadır. DAFZ'nun Erzurum il sınırlarındaki önemli faylar; Erzurum Fayı, Pasinler (Hasankale) Fayı, Palandöken Fayı, Dumlupınar Fayı, Aşkale Fayı, Tercan Fayı, Çat Fayı, Kandilli-Başköy Fayı, Horasan Fayı ve Karayazı Fayı'dır (Kuşçu vd 2019). Erzurum ili ve çevresi için Afet ve Acil Durum Müdürlüğü'nden (AFAD) elde edilen tarihsel depremler ve büyüklükleri Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Erzurum ve yöresi tarihsel depremleri (Anonim3 2021)

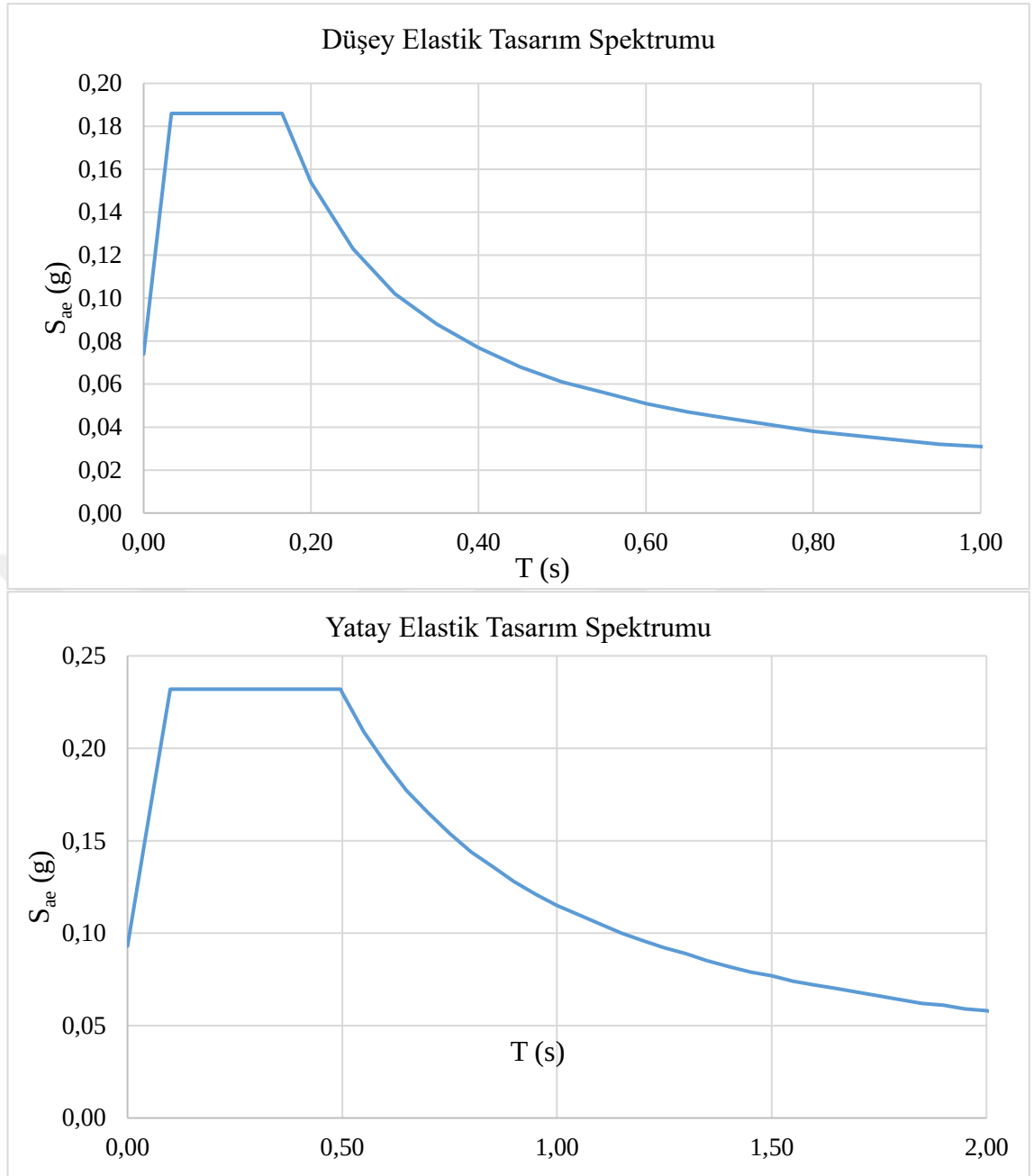
Yıl	Enlem	Boylam	Yer	Büyüklik	Açıklama
1844	40.000	41.000	Erzurum	VII	1843(2), I=VI(8)
1850	40.000	41.000	Erzurum ve Yöresi	VII	
1852	40.000	41.000	Erzurum	IX	
1859	40.000	41.000	Erzurum ve Yöresi	IX	
1859	40.000	42.000	Pasinler – Erzurum	VIII	10:00(20),500 ölü(2)
1860	40.000	41.000	Erzurum	VII	1861/1862(8)
1866	40.000	41.000	Erzurum	VIII	1866(8), I0=VI(8), I0=IX(20), M=6.7(20)
1868	40.000	42.000	Pasinler- Erzurum	VIII	M=5.7(5), H=15km(5)
1875	40.000	41.000	Erzurum Yöresi	X	M=7.3(20,40)
1877	40.000	41.000	Erzurum	VI	1877(8), M=4,9(20)
1886	40.000	41.000	Erzurum Yöresi	VI	

Erzurum ili ve çevresi aktif fay hatlarının yoğun olduğu bir bölge olduğundan tarihi Pehlivanlı Köprüsü'nün bulunduğu bölgenin depremselliğinin irdelenmesi gerekli görülmüştür. Maden Teknik Arama Kurumu tarafından yayımlanmış aktif fay hatları haritası üzerinde Pehlivanlı Köprüsü'nün faya yakınlığı ile ilgili çalışma yapılmıştır ve Şekil 3.6' da sunulmuştur. Ölçekli harita üzerinden yapılan çalışmalar neticede köprünün bulunduğu konum aktif Erzurum Fay hattına uzaklığı yaklaşık 32 km olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.6. Pehlivanlı Köprüsü aktif Erzurum Fay Hattı'na uzaklığı (Anonim4 2021)

İnşaat mühendisliği disiplini bakımından bir yapının depremde maruz kalacağı ivmelerin incelenmesi esastır. Bu bağlamda, Pehlivanlı Köprüsü' nün inşa edildiği bölgenin yatay ve dikey elastik deprem spektrumu AFAD uygulamasından alınmış ve Şekil 3.7'de sunulmuştur. Pehlivanlı Köprüsü' nün doğal titreşim periyodu köprü yapısının depremde maruz kalacağı spektral ivmenin belirlenmesi bakımından önemlidir. Restorasyon sürecinde köprü dinamik davranış parametrelerinin incelenmesi, köprü'nün gelecekte maruz kalabileceği deprem etkileri altındaki davranışının incelenmesi bakımından önem arz etmektedir. Bu noktada köprü'nün bulunduğu bölgenin zemin yapısı hakkında yeterli teknik bilgi bulunmadığı ifade edilmelidir. Yetkili kurumdan alınan raporda zeminin kumlu çakıllı tanecikli bir yapıya sahip olduğu ifade edilmiş; zemin sınıfını tayin etme amacıyla kullanılacak kayma dalgası hızı değerine dair bir bilgiye yer verilmemiştir. Sahada yapılan görsel incelemeler de dikkate alınarak zemin sınıfı ZD olarak kabul etmiştir.



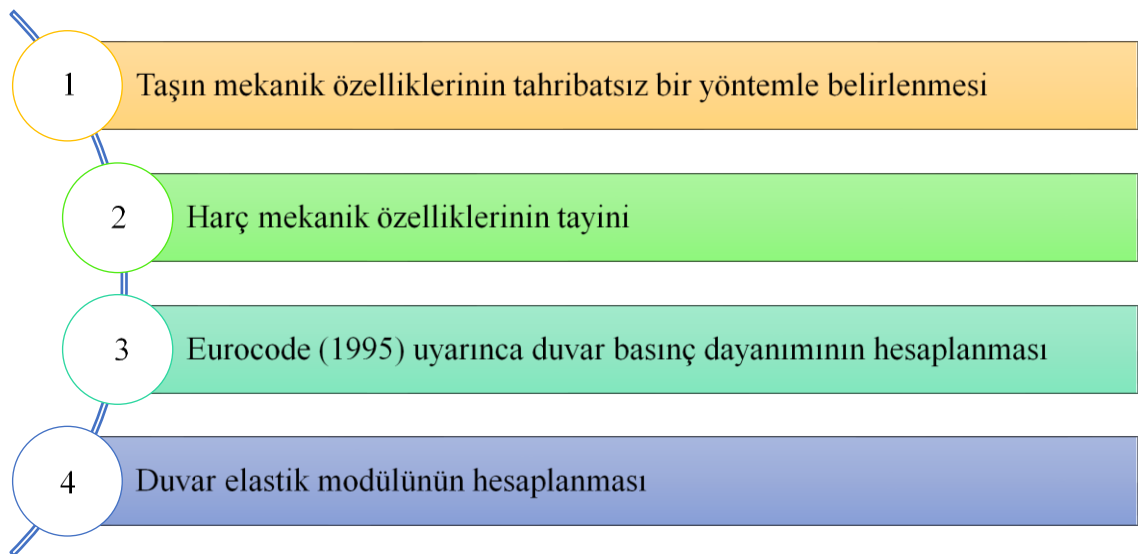
Şekil 3.7. Pehlivanlı Köprüsü' nün bulunduğu konum için yatay ve düşey elastik deprem tasarım spektrumları (Anonim5 2021).

3.3. Köprü Malzeme Özelliklerinin Tayini

Pehlivanlı Köprüsü üzerinde gerçekleştirilen çalışmada kullanılan temel yöntem operasyonel modal analiz'dir. Bu yöntem çok basit bir şekilde yapının kaynağı bilinmeyen ortam titreşimlerine verdiği tepkilerin ölçülmesi ve bu ölçümlerin işlenerek modal davranış parametrelerinin elde edilmesini ilke edinmektedir. Uygulamanın sağlıklı ve güvenilir sonuç vermesi için yapısal tepkilerin (bu çalışmada ivme değerleri)

ölçüleceği ve sensörlerin konumlandırılacağı noktaların tayini son derece önemlidir. Sensör yerleşim planının sonlu eleman modeli üzerinde gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçlarına, *mod şekillerine*, göre yapılması genel olarak benimsenen bir yaklaşımdır (Okuyucu 2020). Bu nedenle, köprü yapısının sonlu eleman modelinin oluşturulması çalışmanın ilk aşamasını oluşturmuştur. Sonlu eleman modeline tanımlanacak yığma yapı mekanik özelliklerinin tahribatsız bir yöntemle elde edilmesi konusunda çalışmalar yapılmış ve çalışma detayları bu bölümde sunulmuştur.

Çalışma kapsamında köprü yapısının makro modelleme tekniği ile sonlu elemanlar modeli SAP2000 (2018) yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu model üzerinde teorik modal analiz çalışmaları yapılmış ve modal davranış parametreleri hesaplanmıştır. Makro modelleme tekniği, köprü yığma yapısının homojenleştirilmesini esas alan bir uygulamadır. Bu nedenle, köprü yapısı malzeme özelliklerinin mümkün olan en güvenilir yöntemler kullanılarak belirlenmesi esastır. Yığma yapı; yığma birim (taş, tuğla, vb.) harç ve yığma birim-harç arası geçiş bölgesi olmak üzere genel olarak 3 farklı fazda malzeme birleşiminden oluşmaktadır. Yığma yapının bu karmaşık yapısı makro modelleme tekniği ile çalışılması durumunda çok sayıda kabul yapılmasını gerekli kılmaktadır. Pehlivanlı Köprüsü malzeme mekanik özellikleri belirlenirken Özdoğan (2018) tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır. Yöntem şematik olarak Şekil 3.8’de özetlenmiştir.



Şekil 3.8. Pehlivanlı Köprüsü malzeme mekanik özellikleri tayini aşamaları

Yapıların malzeme özelliklerini belirlemek için kullanılan tahribatlı ve tahribatsız birçok yöntem mevcuttur. Fakat konu tarihi yapılar olunca kültürel mirasımıza zarar verecek olan tahribatlı yöntemlerin kullanılması mümkün değildir. Bu tez kapsamında malzeme özelliklerinin tayini için tahribatsız yöntemlerden Schmidt çekici yöntemi kullanılmıştır. Köprünün tüm bölümlerinden Şekil 3.9’ da gösterildiği şekilde yüzey sertliği okumaları alınmıştır. Çalışmada kullanılan Schmidt çekici beton için üretilmiş olup, taşın sertlik değeri kullanılarak çekiç üzerindeki kalibrasyon eğrisinden elde edilen basınç mukavemeti değeri taş malzeme için yanıltıcı olacaktır. Bu aşamada; Özdoğan (2018) çalışmasında beton Schmidt çekici ile andezit türü taşın basınç dayanımının elde edilemesi amacıyla Özdoğan (2018) çalışmasında önerilen bağlantılar kullanılmıştır.



Şekil 3.9. Pehlivanlı Köprüsü Schmidt Çekici uygulaması

Özdoğan (2018) çalışmasında andezit türü doğal taşın basınç mukavemetinin tayininde kullanılması önerilen bağıntılar Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 ‘de verilmiştir. Burada R_h olarak ifade edilen değer Schmidt çekici ile yatay R_v olarak ifade edilen değer ise Schmidt çekici ile düşey vuruşla ölçülen taşın sertlik değerlerinin ortalamasıdır.

$$f_c = 1,01 * (R_h)^{0,97} \quad (3.1)$$

$$f_c = 1,10 * (R_v)^{0,97} \quad (3.2)$$

Köprünün her bir elemanı için en az 45 sertlik okuması alınmış ve bu değerlerin ortalaması alınıp Denklem 3.1 ile Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanan taş basınç dayanımı değerleri Çizelge 3.2’ de sunulmaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çizelge 3.2 incelendiğinde hesaplanan en yüksek ve en düşük taş basınç dayanımlarının sırasıyla 48.7 MPa ve 40.0 MPa olduğu; ortalama değerin ise 44.6 MPa olarak tayin edildiği görülmektedir.

Çizelge 3.2. Schmidt Çekici sertlik okumalarına göre hesaplanan taş basınç dayanım değerleri.

Andezit Basınç Mukavemeti-Yatay Vuruş (MPa) ($f_c=1.01 \times R_h^{0.97}$)					Andezit Basınç Mukavemeti- Düşey Vuruş (MPa) ($f_c=1.10 \times R_v^{0.97}$)				
	Korkuluk		Ana Kemer	Köy Tarafı İstinat		Korkuluk		Üst Yol	
	Yeni Taş	Eski Taş		Yeni Taş	Eski Taş	Yeni Taş	Eski Taş	Kenar	Orta
R_h	48,4	50,3	46,3	50,3	46,7	49,8	47,6	49,4	40,6
f_c	43,5	45,2	41,7	45,2	42,0	48,7	46,7	48,3	40,0

Taşların hesaplanan ve Çizelge 3.2’ de özetlenen basınç mukavemetleri kullanılarak Denklem 3.3’te sunulan Eurocode6 (1995) bağıntısına göre köprü yığma duvar türü elemanlarının basınç mukavemetleri hesaplanmıştır. Eurocode6 (1995)’a göre $\alpha=0,7$ ve $\beta=0,30$ alınmıştır. Özdoğan (2018)’e göre harç basınç dayanımı $f_m=1,15$ MPa alınmıştır. Burada f_k yığma duvar basınç dayanımını temsil etmektedir.

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (3.3)$$

Çizelge 3.3. Taşların Basınç mukavemetlerinden Eurocode (1995) uyarınca hesaplanan duvar basınç dayanım değerleri.

Yığma Duvar Basınç Mukavemeti (MPa) ($f_k=K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta$)							
	Korkuluk		Ana Kemer	Köy Tarafı Tempan Duvar		Üst Yol	
	Yeni Taş	Eski Taş		Yeni Taş	Eski Taş	Kenar	Orta
f_b	46,1	45,9	41,7	45,2	42,0	48,3	40,0
f_k	11,3	11,3	10,6	11,2	10,6	11,7	10,2

Basınç mukavemeti hesaplanan yığma bileşenlerin Denklem 3.4 kullanılarak (Eurocode6 1995)'a göre elastik modülleri hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 3.4' te sunulmuştur.

$$E = 200 \cdot f_k \quad (3.4)$$

Çizelge 3.4. Köprü birimleri için hesaplanan Elastik Modül değerleri

Elastik Modül (MPa) $E = 200 \times f_k$							
	Korkuluk		Ana Kemer	Köy Tarafı Tempan Duvar		Üst Yol	
	Yeni Taş	Eski Taş		Yeni Taş	Eski Taş	Kenar	Orta
f_k	11,4	11,3	10,6	11,2	10,6	11,7	10,3
E	2262	2256	2109	2230	2119	2337	2047

Çizelge 3.4' te köprü yapısı yığma elemanları için hesaplanan elastik modül parametresinin en küçük ve en büyük değerlerinin sırasıyla 2047 MPa ve 2337 MPa olduğu görülmektedir. Tüm elemanla için ortalama elastik modül değeri ise 2194 MPa olarak hesaplanmıştır. Erişilebilen literatür incelemesinde Pehlivanlı Köprüsü'nü konu alan Özkaya (2019), Bayraktar (2012) ve Çoruhlu (2017) çalışmalarında yapısal analizlerde kullanıldığı ifade edilen yığma birim elastik modül, Poisson oranı ve kütle yoğunluğu değerleri Çizelge 3.5'te da toplu bir şekilde sunulmaktadır.

Çizelge 3.5. Pehlivanlı Köprüsü'nün farklı çalışmalarda kullanılan malzeme özellikleri

<i>Malzeme Özellikleri</i>		<i>Elastik Modül (MPa)</i>	<i>Poisson Oranı</i>	<i>Kütle Yoğunluğu (kg/m³)</i>
Bu tez çalışması	Kemer	2109	0,20	2350
	Gövde	2209	0,20	2350
	Dolgu	1800	0,15	1600
(Özkaya 2019)	Kemer	3000	0,20	2350
	Gövde	3000	0,20	2350
	Dolgu	2000	0,15	1600
(Bayraktar 2012)	Kemer	10740	0,20	2350
	Gövde	10740	0,20	2350
	Dolgu	8593	0,15	1600
(Çoruhlu 2017)	Kemer	3000	0,20	2400
	Gövde	2500	0,20	2400
	Dolgu	1500	0,05	1600

Pehlivanlı Köprüsü restorasyonunda kullanılan malzemelerin laboratuvar inceleme sonuçları Karayolları Erzurum 12. Bölge Müdürlüğü'nden tez çalışması kapsamında temin edilmiştir. Temin edilen doğal taş deney sonuçları ve zemin etüt raporu tez çalışmasının sonunda EK-1, EK-2 olarak sunulmuştur. İncelenen raporlarda restorasyonda kullanılan taşın cinsi andezit olup basınç dayanımı 150 MPa olarak ifade edilmektedir. Taşın kütle yoğunluğu 2350kg/m³ olarak rapor edilmektedir. Bu değerler göz önüne alınarak kayaç sınıfı ile ilgili değerlendirme yapıldığında, kullanılan kayaçların çok sağlam kaya sınıfına girdiği belirlenmiştir. Pehlivanlı Köprüsü'nün inşa edildiği bölgenin zemin etüt raporunda zeminin kum ve çakıllı bir yapıya sahip olduğu belirtilmektedir.

3.4. Sonlu Elemanlar Modeli ve Teorik Modal Analiz Çalışması

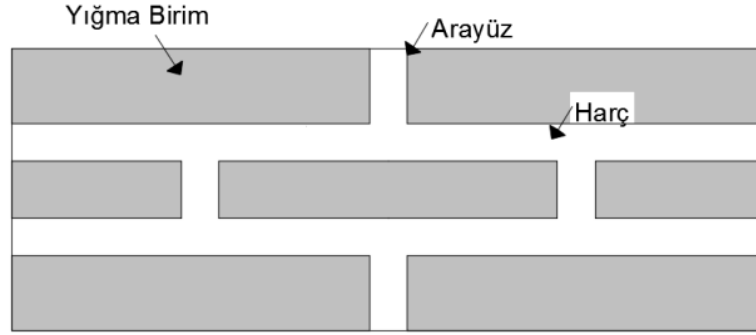
Mühendislik yapılarının dinamik karakteristiklerinden doğal frekanslarını, mod şekillerini ve sönüm oranlarını belirlemek amacıyla yapılarda oluşan titreşimleri incelemek için yapılan teorik ve deneysel çalışmaların tümü modal analiz olarak

isimlendirilmektedir. Teorik modal analiz yapılabilmesi için sonlu eleman modeli hazırlanır. Bu sebeple ilk önce yapının geometrisi belirlenir. Geometri belirlenebilmesi için yapıya ait rölöve planı kullanılır. Yapıya ait mevcut bir rölöve planı yoksa öncelikle bir rölöve oluşturulur. Elde edilen plan doğrultusunda yapıdaki taşıyıcılar sonlu eleman programına aktarılarak model oluşturulur. Yapıya ait eleman boyutları ve yapıyı oluşturan malzemenin özellikleri programa girilir ve analiz yapılır. Analiz sonucunda yapıya ait modal parametreler belirlenir (Güneş 2017).

Yığma yapıların taşıyıcı elemanlarını oluşturan malzemelerde ki çeşitlilik nedeniyle sonlu eleman oluşturmak oldukça zordur. Bu sebepten dolayı kabullere dayanan modelleme teknikleri geliştirilmiştir. Literatüre bakıldığında yığma yapıların sonlu eleman modellerinin oluşturulmasında yaygın olarak üç modelleme tekniği kullanılmaktadır. Bunlar, makro modelleme, basitleştirilmiş makro modelleme ve mikro modelleme yöntemleridir (Lourenço 1996).

3.4.1. Mikro modelleme yöntemi

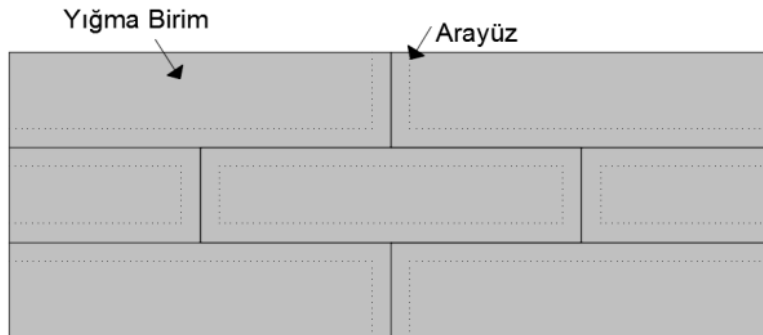
Çoğu araştırmacıya göre bu modelleme tekniği en gelişmiş modelleme tekniğidir. Yığma birim (yapı malzemesi) ve harç elemanlar birbirinden bağımsız olarak modellenir. Birleşim yerlerinde yüzey elemanları tanımlanır (Bayraktar vd 2014). Mikro modelleme tekniğinde yığma yapı elemanını meydana getiren yapı malzemelerinin (taş, tuğla, harç vb.) ayrı ayrı her birinin mekanik özellikleri dikkate alınmaktadır. Bu yaklaşımda çatlakların yığma birim ve harcın arasındaki birleşim yüzeylerde meydana geleceği varsayılmaktadır (Oliviera 2003). Şekil 3.10'da tuğla ve harç kullanılarak oluşturulan duvarın mikro modelleme tekniğinde nasıl değerlendirileceğine ilişkin bir örnek verilmektedir.



Şekil 3.10. Mikro modelleme tekniği (Jafarov et al. 2012)

3.4.2. Basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi

Bu teknikte taş, tuğla gibi yapı elemanlarının boyutları, harcın yarısı kadar genişletilerek harç tabakası ihmal edilir. Yığma birimler ortalama ara yüzey ile birbirinden ayrılmaktadır (Şekil 3.11). Meydana gelebilecek çatlaklar ise bu ara yüzey çizgilerinde olacağı kabul edilmektedir (Romano 2006). Bu modelleme tekniğinde yapılan kabule göre yapı elemanında meydana gelebilecek olan çekme, kayma çatlaklarının ve tüm hasarın ara yüzeylerde meydana geleceği kabul edilmektedir. Yapı malzemelerinde meydana gelecek hasarlar ise yapı malzemesinin orta kısmında düşey olarak gerçekleşeceği kabul edilmektedir.

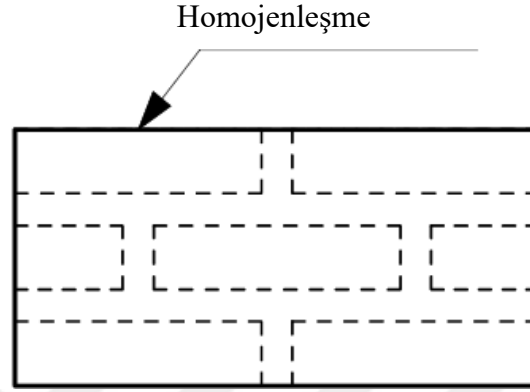


Şekil 3.11. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği (Jafarov et al. 2012)

3.4.3. Makro modelleme yöntemi

Makro modelleme tekniğinin ana kabulü, yığma yapı elemanını homojenleştirerek kompozit malzeme olarak düşünülmesidir (Anthoine 1997). Sadece malzeme özellikleri değil, mekanik özellikler de homojenleştirme işlemi sonucunda elde edilir.

Homojenleştirme işlemi sonucu taş, tuğla, harç vb. malzemeden meydana gelmiş yapı elemanı için tek bir malzeme özelliği elde edilmektedir. (Zucchini and Lourenço 2002). Şekil 3.12’de ki bir yığma duvarın makro modellenmesinde duvarda kullanılan taşın ve harcın katılım oranlarına bağlı olarak tek bir malzeme olarak kabul edilecektir.



Şekil 3.12. Makro modelleme yöntemi (Lourenço 1996)

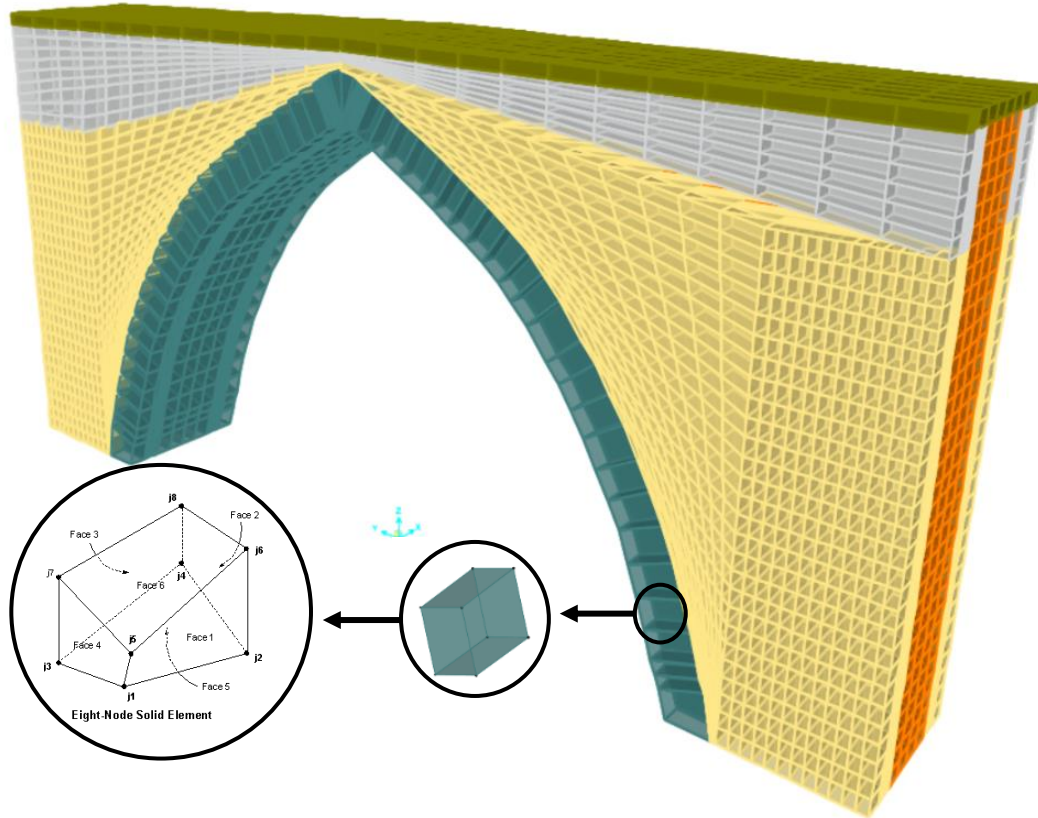
Tarihi yığma yapıların sonlu elemanlar modeli oluşturulurken pek çok bilinmezlik nedeniyle kabuller yapılması zorunlu bir hal almaktadır ki; bu durum Pehlivanlı Köprüsü için de geçerli olmuştur. Lourenço (2002) tarihi yığma yapıların mevcut durumlarının incelenmesi ve bu aşamada yapılar hakkında bilgi toplama sürecinde;

- Yapının geometrisi hakkında eksik veriler
- Taşıyıcı elemanların iç çekirdek yapısı hakkında bilgi eksikliği
- Homojen olmayan duvar malzemesinin karakterizasyonunun zorluğu ve pahalılığı,
- Doğal malzeme kullanımı ve işçilik nedeniyle duvarın mekanik özelliklerinde önemli farklılıklar bulunması,
- Bilinmeyen inşaat sırası,
- Uzun inşaat periyotları ile ilişkili çekirdek yapıda ve yapısal elemanların yapısında önemli değişiklikler,
- Yapının mevcut ancak gözle görülmeyen hasarı,
- Tarihi yığma yapılar için uygulanamayan mevzuat ve yapım yönetmelikleri

gibi bazı zorlayıcı unsurlar sıralamaktadır. Bu sıralanan hususlar dikkate alındığında sonlu elemanlar modeli oluşturulurken çok sayıda kabul yapılması zorunluluğu kendiliğinden ortaya çıkmaktadır. Bu koşullar altında oluşturulmuş model üzerinde yapılacak analizler ışığında yapısal davranışın incelenmesi sorgulamaya açık bir durum olarak değerlendirilebilmektedir. İncelenen yapının dinamik davranış parametrelerinin yerinde elde edilmesi ve teorik değerlerle kıyaslanarak daha güvenilir sonlu elemanlar modeli oluşturulması bu bağlamda önem kazanmaktadır. İlerleyen bölümlerde köprü yapısı üzerinde gerçekleştirilen deneysel modal analiz çalışmaları hakkında detaylı bilgi sunulacaktır.

3.4.4. Pehlivanlı Köprüsü sonlu eleman modelinin oluşturulması

Tarihi Pehlivanlı Köprüsü' nün sonlu elemanlar modeli Erzurum Teknik Üniversitesi lisanslı yazılımı kullanılarak SAP2000 (2018) ortamında oluşturulmuştur. Köprü Şekil 3.13' te sunulan 8 noktalı katı (solid) eleman kullanılarak modellenmiştir.



Şekil 3.13. Pehlivanlı Köprüsü SAP2000 (2018) katı (solid) eleman modeli

Şekil 3.13'te genel bir görüntüsü sunulan sonlu elemanlar modeli 30214 düğüm noktası, 25596 katı (solid) elemandan oluşmaktadır. Modelleme aşamasında ana taşıyıcı kemer, dış duvarlar, dolgu duvar ve köprü tabliyesi için ayrı ayrı katı elemanlar tanımlanmıştır. Köprü üzerinde bulunan taş korkuluklar herhangi bir taşıyıcılığı olmadığı için modellenmemiştir. Fakat yapının teorik model analizinde, doğal titreşim periyodu yapı ağırlığına bağlı olarak değişiklik göstereceğinden sadece taş korkulukların ağırlıkları köprü üzerine sabit yük olarak girilmiştir. Köprünün zemine ve tempan duvarlara ankastre olarak mesnetlendiği kabul edilmiştir. Pehlivanlı Köprüsü sonlu elemanlar modelinde kullanılan elemanların malzeme özellikleri Bölüm 3.3 Çizelge.3.5'te sunulmaktadır.

Tez çalışmasının ilk aşamasında; oluşturulan sonlu eleman modeli üzerinde teorik modal analiz yapılarak modal davranış parametreleri hesaplanmıştır. Bu çalışmanın amacı hesaplanan mod şekilleri dikkate alınarak operasyonel modal analiz uygulamasında yapı tepkilerinin ölçülmesi amacıyla kullanılacak ivmeölçer sensör yerleşim planının çıkarılmasıdır. Bununla birlikte, Çizelge 3.5'te sunulan tüm çalışmalarda dikkate alınan malzeme özellikleri kullanılarak teorik modal analizler yapılmış ve deneysel modal analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak ayrıca irdelenmiştir.

3.5. Operasyonel Modal Analiz ve Dinamik Kimliklendirme Çalışması

Mevcut yapıların dinamik davranış parametrelerinin tahribatsız olarak elde edilmesi mümkündür. Bu amaçla, yapıların dinamik kimliklendirme çalışmalarında takip edilen iki yöntem bulunmaktadır. Bunlar deneysel modal analiz ve operasyonel modal analiz olarak sınıflandırılmaktadır (Özdoğan 2018). Deneysel modal analiz uygulamasında yapının kaynağı ve teknik özellikleri bilinen bir titreşim etkisine verdiği tepkiler ölçülür ve bu ölçümler üzerinden dinamik davranış parametreleri elde edilir. Yönteme “zorlanmış titreşim” adı da verilmektedir. Operasyonel modal analiz yönteminde ise yapının “ortam titreşimlerine” verdiği tepkiler ölçülür ve analiz edilerek dinamik davranış parametrelerinin elde edilmesine çalışılır. Bu yöntemde yapıyı titreştirmek için deprem, rüzgâr, insan ve taşıt gibi çevresel etkenlerden faydalanılmaktadır. Deneysel modal analiz yöntemi bir titreştirici cihaz kullanılarak uygulandığından tarihi yapılar için uygun bir yöntem olarak görülmemektedir. Bu nedenle, köprü yapısının dinamik davranış parametrelerinin yerinde elde edilmesi

amacıyla tahribatsız deneysel bir yöntem olan operasyonel modal analiz uygulaması tercih edilmiştir.

Operasyonel modal analiz yöntemi uygulama kolaylığı ve yapıyı bütüncül olarak analizler gerçekleştirildiği deneysel analizlerde çokça kullanılan bir yöntemdir. Yapı performans değerlendirmesinde yapının malzeme mekanik değerlerinin belirlenmesi, zemin parametrelerinin belirlenmesi gibi teferruatlı işlemler uygulanmadığından daha hızlı bir yöntemle ve yapıya hasar vermeden yapı performans değerlendirmesi yapılabilmektedir. Geçmişimizin aynası olan tarihi yapıların hasarsız bir şekilde performans değerlendirmesi yapılarak korunması ve onarılması için tercih edilebilecek bir yöntemdir.

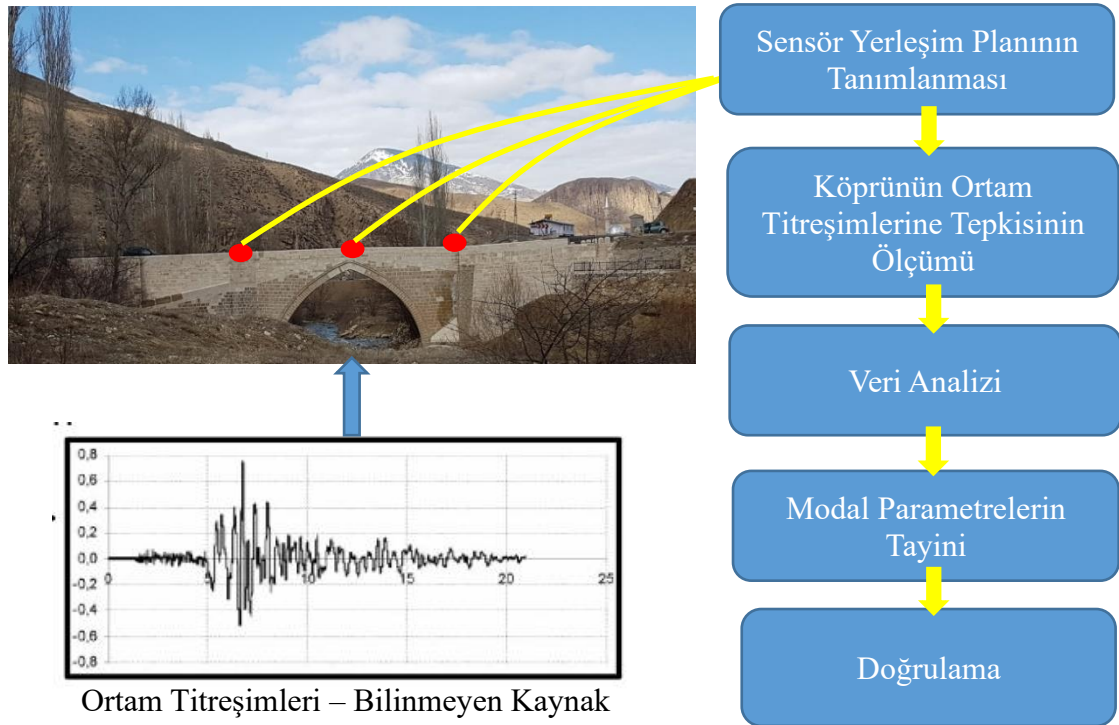
Deneysel modal analizde frekansı belli olan bir cisim ile yapı zorlanmaya çalışılırken, operasyonel modal analiz uygulamasında bina frekansı belli olmayan çevresel etkiler sonucunda titreşime maruz kalır ve binanın hâkim periyodu hakkında bizlere bilgiler verir. Bu tarz küçük titreşimleri ise ileri bir teknoloji ile donatılmış yüksek hassasiyetli mikro düzeyde ölçüm yapabilen ivmeölçerler sayesinde yapılabilmektedir. Bu sayede deneysel modal analizdeki gibi binaya ek bir sarsıntı vermemize gerek kalmamaktadır. Yapıya uygulanan operasyonel modal analiz yöntemi sonucun da elde edilen veriler direkt olarak yapının kendisinden alındığı için hem malzeme özellikleri hem yapı zemin etkileşimini birebir yansıtmaktadır. Teorik analizlerde ise mesnet şartları, malzeme özellikleri, yapının bir bütün halde çalıştığı gibi kabuller yapılarak analizler yapılmaktadır. Bu sebepten operasyonel modal analiz ile elde edilen modal davranış parametreleri teorik modal analiz sonuçlarından farklılık gösterebilmektedir. Bu durumda ise teorik modelin gerçek yapıyı temsil etmesi için mesnet şartları, malzeme özellikleri ve yapıda hasar varsa hasarı modele yansıtacak şekilde güncellenmesi durumu gündeme gelmektedir.

Operasyonel modal analiz yöntemi yapılarda proje sonrasında teorik model analiz sonuçlarının teyidi, operasyonel modal analiz sonucu elde edilen veriler ışığında daha önce yapılmış olan teorik modal analiz ile elde edilen sonlu elemanın iyileştirilmesi, teorik analizin yapılması zor veya imkânsız olduğu durumlarda ve yapısal hasarların belirlenmesi yapı kullanılabilirliği gibi durumlarda kullanılır (Binici 2010).

3.5.1. Pehlivanlı Köprüsü operasyonel modal analiz aşamaları

Tez çalışması kapsamında Erzurum ili Tortum ilçesi Pehlivanlı mahallesinde bulunan Pehlivanlı Köprüsü dinamik davranış parametrelerinin deneysel olarak elde edilmesi ve karşılaştırmalı olarak irdelenmesi amaçlanmıştır. Dinamik davranış parametrelerinin elde edilmesi amacıyla operasyonel modal analiz yönteminin kullanılması tercih edilmiştir. Köprü restorasyon çalışmaları 2015 yılında tamamlanmış olup, köprünün restorasyon öncesi ve restorasyon esnasındaki dinamik davranış parametreleri sırasıyla Bayraktar (2012) ve Okuyucu vd (2016) tarafından yapılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında ise restorasyondan 2 ve 6 yıl sonraki dinamik davranış parametreleri operasyonel modal analiz uygulaması ile elde edilmiştir.

Operasyonel modal analiz çalışmasında, yapının rastgele ortam titreşimlerine verdiği tepkilerin ölçülmesi ve bu verinin işlenmesi suretiyle modal davranış parametrelerinin elde edilmesi esastır. Köprü yapısı üzerinde gerçekleştirilen operasyonel modal analiz uygulaması detayları bu bölümde sunulmakta ve çalışma aşamaları kısaca Şekil 3.14’te özetlenmektedir.

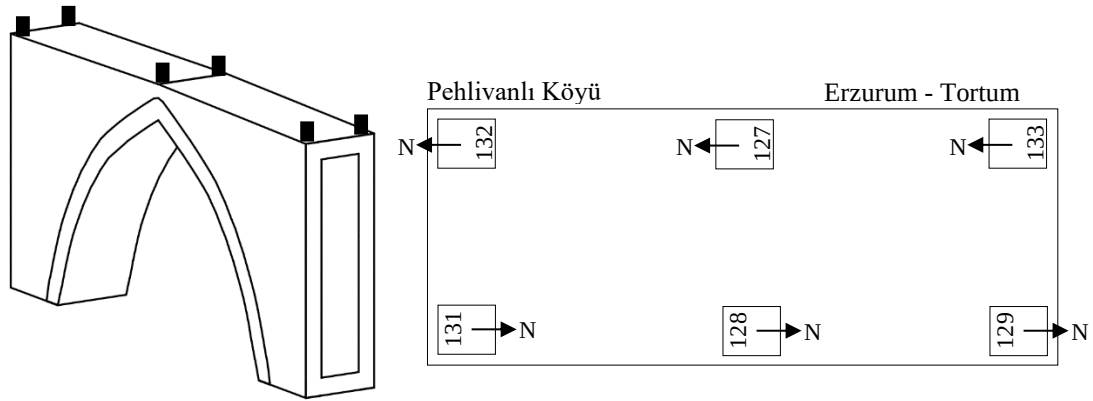


Şekil 3.14. Pehlivanlı Köprüsü operasyonel modal analiz aşamaları

Pehlivanlı Köprüsü üzerinde uygulanan operasyonel modal analiz aşamaları, çalışma detayları ve göz önünde bulundurulması gereken önemli hususlar aşağı sunulmaktadır.

- ***Sensör yerleşim planının tanımlanması***

Operasyonel modal analiz çalışmasında, yapı tepkisinden (*ölçülen ivme kayıtları*) modal davranış parametrelerinin elde edilebileceği bir titreşim kaydının alınması son derece önemlidir. Bu sebepten Tarihi Pehlivanlı Köprüsü üzerinde operasyonel modal analiz çalışması yapılmadan önce tarihi köprü SAP2000 (2018) ortamında makro modelleme yöntemi kullanılarak katı modeli oluşturulup köprü modal davranışı hakkında bilgi edinilmiştir. Köprü modeli üzerinde modal analizler yapılarak köprünün mod şekilleri irdelenmiştir. Köprünün ilk dört teorik mod şeklinin yanal ve düşey öteleme ile yanal ve düşey burulma hareketlerinden oluştuğu görülmüştür. Bu yöndeki mod şekillerinin tayini için köprünün kemer ortası ve kemer uçları hizasında yatay ve düşey tepkilerinin ölçülmesinin gerekli olduğuna karar verilmiş ve bu noktalara üç eksenli ivmeölçer sensörlerin yerleştirilmesi uygun bulunmuştur. Teorik modelden elde edilen modal davranışa göre köprü üzerinde ölçüm noktaları belirlenmiş Şekil 3.15'te ölçüm krokisi sunulmuştur.



Şekil 3.15. Pehlivanlı Köprüsü ultra hassas ivmeölçerlerin yerleşim krokisi

Operasyonel modal analiz saha çalışmasında toplam 6 adet 3 eksenli ölçüm alan kablolu ultra yüksek duyarlı ivmeölçerler kullanılmıştır. Köprü modal davranışını elde edebileceğimiz noktalara sensörler yerleştirilerek kuzey yönü belirlenmiştir. Bu yön

belirleme ve kroki çalışmasındaki amaç ARTeMIS Modal Pro (2021) yazılımında modellenen köprü üzerine sinyal verilerinin hangi noktadan ve hangi yönden aldığımızı doğrulayarak sağlıklı bir analiz yapmaktır.

- ***Köprünün ortam titreşimlerine verdiği tepkisinin ölçümü***

Pehlivanlı Köprüsü üzerinde ölçüm krokisi oluşturulduktan sonra ivme ölçerlerin köprü üzerine sabitleme işlemi yapılmıştır. Sabitleme işlemi yapılırken yapı ile ivmeölçer arasında tam aderans olması beklenir. Bu sebepten ivmeölçerlerin yan aparatları kullanılarak vidalı montaj işlemi yapılır. Fakat bu montaj işlemi tarihi yapılar için uygun bir yöntem olarak görülmemektedir. Şekil 3.16’da sunulduğu üzere yapı üzerinde ivme ölçerlerin altı temizlenerek aderansı en yüksek seviyede tutacak olan hızlı donan alçı ile sabitleme işlemi yapılmıştır.



Şekil 3.16. Üç eksenli ivmeölçerlerin köprü üzerine sabitlenmesi

Sensör yerleşimi tamamlandıktan sonra, öncelikle birkaç kez pilot ölçüm alınmış, bazı sensörler için uydu bağlantı kablosu değişimi uygulaması gerekli görülmüştür. Sensörlere manuel olarak uydu bağlantısı yapılarak sensörlerin içerisinde bulunan bilgisayarların senkronize olması için GPS bağlantısının tesis edilmesi beklenilmiştir. Saha çalışmasının ön hazırlıkları yapıldıktan sistemde gerekli tüm kontroller yapıp

titreşim kaydı aşamasına geçilmiştir. Titreşim kaydı aşamasına ait bir ivmeölçer görüntüsü şekil 3.17’de sunulmuştur.



Şekil 3.17. Senkronize edilmiş ultra hassas üç eksenli ivmeölçer

Operasyonel modal analiz çalışmasında, yapının rastgele ortam titreşimlerine verdiği tepkilerin ölçülmesi ve bu verinin Artemis Modal Pro yazılımı ile birlikte işlenmesi sonucu modal davranış parametrelerinin elde edilmesi esastır. Bu nedenle, yapı tepkisinden (ölçülen ivme kayıtları) modal davranış parametrelerinin elde edilebileceği bir titreşim kaydının alınması son derece önemlidir. Çalışma yapılan köprünün bulunduğu bölgede yapının tepki verdiği en önemli titreşimler yapıya yaklaşık 3 m mesafede bulunan ana yoldan geçen araç kaynaklı zemin titreşimleridir. Buna ek olarak yapı üzerine tokmakla vurularak ve tekerlekli çanta yürüterek ölçülen ivme kayıtlarından verilerin daha net alınması amaçlanmıştır. (Şekil 3.18)



Şekil 3.18. Köprü üzerinden kayıt alınırken uygulanan çevresel etkiler

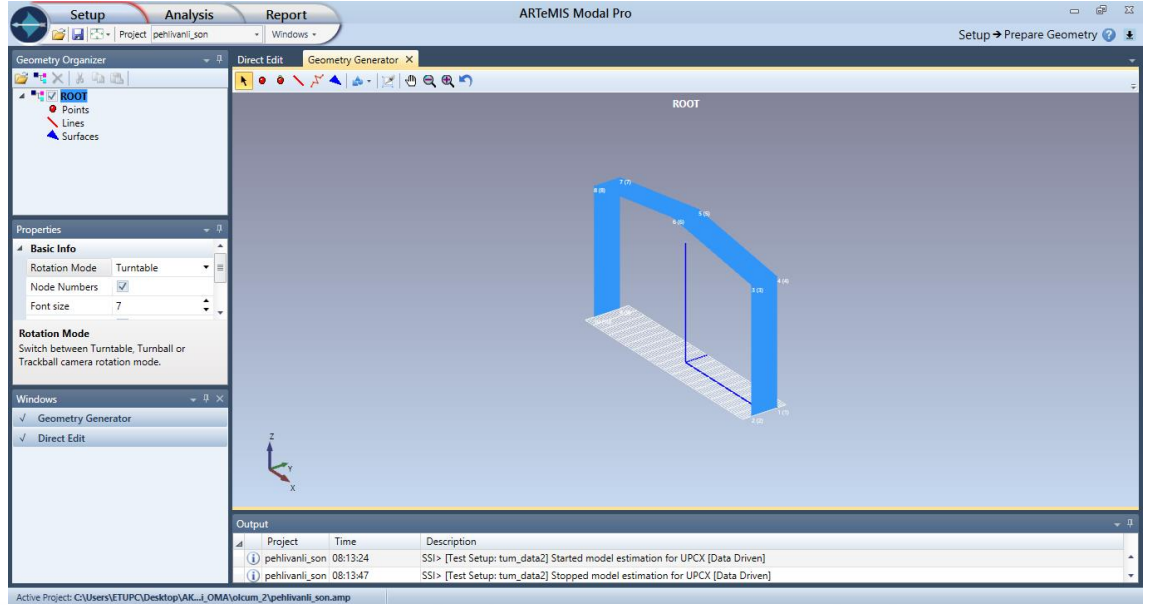
Titreşim kayıt süresi; yapıyı titreştiren sinyalin spektral şekli ve süresi, harmonik titreşimlerin varlığı, deneye tabi tutulan yapının karmaşıklığı, ölçüm ekipmanlarının kalitesi, vb. pek çok parametreye bağlıdır. Ancak, kabaca bir yaklaşımla dikkate alınan en düşük mod şekline ait periyot değerinin 500 katından daha az süre ile ölçüm alınması pratikte önerilmektedir. Buna ek olarak, ölçülen tepkilerde baskın harmonik titreşimlerin bulunması durumunda kayıt süresinin daha da uzun tutulması gerekmektedir (Jacobsen and Andersen 2008). Bu noktadan hareketle, saha çalışması yapılmadan evvel yapının teorik modal analizinin yapılarak mod şekilleri ve ilgili periyotların hesaplanması sağlıklı bir sensör yerleşim düzeni ve ölçüm süresi belirlenmesi için büyük önem arz etmektedir (Okuyucu 2020). Bu hususlar göz önüne alındığında yapıdan 45 dakika süreli ölçümler alınmıştır. İvme ölçüm ve kayıt frekansı 200 Hz ($\Delta_t = 0.005$ saniye)' dir. Ölçüm birimi “g” dir.

- ***İvme kayıtları kullanılarak mod şekilleri ve frekanslarının elde edilmesi***

Yapının ortam titreşimlerine verdiği tepkiler ivme kayıtları olarak ölçülmüş ve Artemis Modal Pro (2021) isimli yazılımına işlenerek yapının dinamik davranış parametreleri elde edilmiştir. Çalışma 5 aşamada gerçekleştirilmiştir.

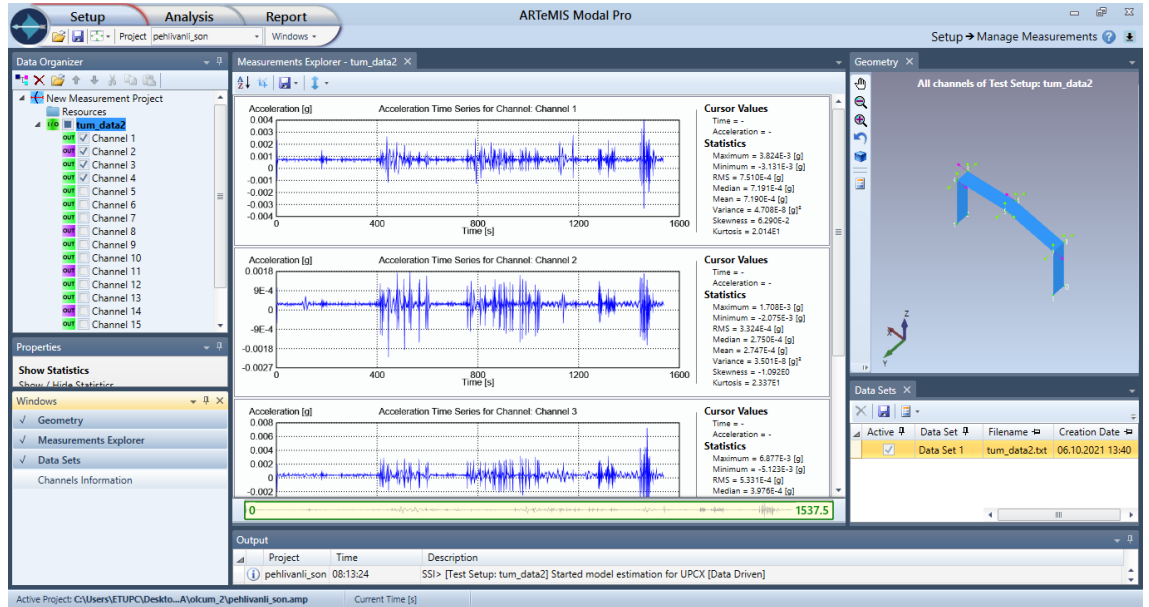
İlk aşamada yapı geometrisine uygun, toplam 8 birleşim noktalı katı model oluşturulmuştur. Model oluşturulurken yapının gerçek boyutlarına uygun oranlar kullanılmıştır. Ana taşıyıcı olmaması sebebiyle köprü korkulukları modele eklenmemiştir. Artemis Modal Pro (2021) yazılımında modellenen köprü modeli görüntüsü Şekil 3.19’da sunulmaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM



Şekil 3.19. Artemis Modal Pro (2021) yazılımında hazırlanan köprü analiz modeli

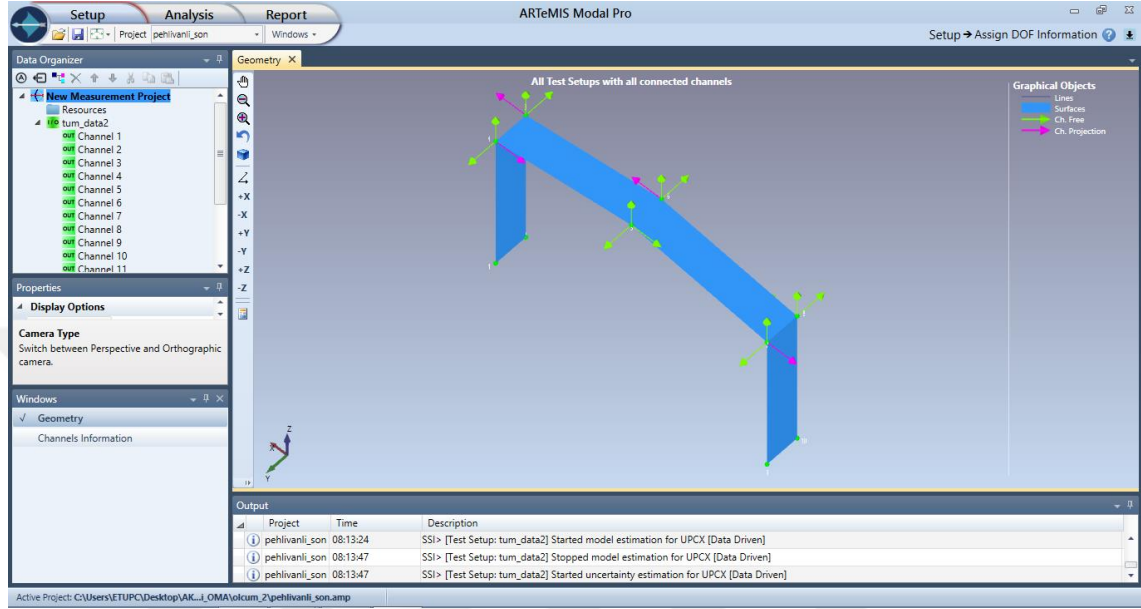
İkinci aşamada Tarihi Pehlivanlı Köprüsü'nün üzerinden alınarak kaydedilen ivme dosyaları Artemis Modal Pro (2021) yazılımına tanıtılmıştır. Ölçüm aralığı, ölçüm birimi gibi parametreler dikkate alınarak ivme kayıtları model üzerine işlenmiştir. Kayıt dosyalarının model üzerine işlenmesine ilişkin görüntü Şekil 3.20'de sunulmaktadır.



Şekil 3.20. Artemis Modal Pro (2021) yazılımında ivme ölçüm versinin model dosyasına tanıtılması.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Üçüncü aşamada titreşim kaydı alınan noktalara ölçüm yerine ve yönüne sadık kalmak kaydıyla titreşim kayıtları tanıtılmıştır. Kaydedilen toplam 18 set veri kullanılarak her bir ivmeölçerin kayıt aldığı noktaya E,N,Z olmak üzere üç ekseninde ivme kayıtları girilmiştir. Bu çalışmaya ilişkin bir ekran görüntüsü Şekil 3.21’de sunulmaktadır.

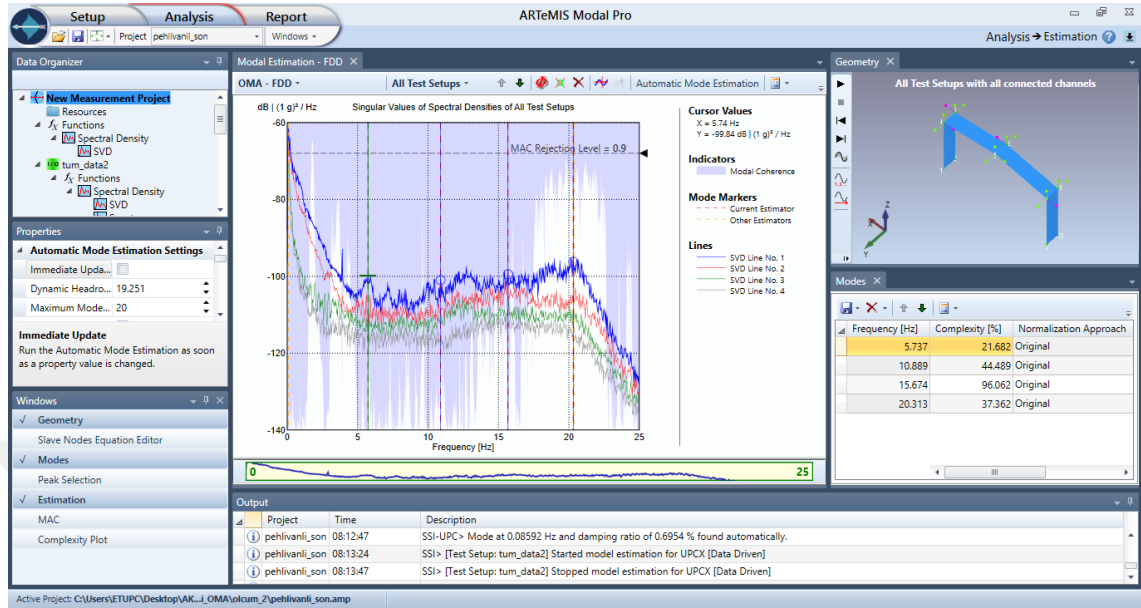


Şekil 3.21. Artemis Modal Pro (2021) yazılımında ivme ölçüm verisinin modele işlenmesi.

Dördüncü aşamada veri tanıtımı yapılmış nihai model üzerinde analiz çalışması yapılarak modal davranış parametreleri elde edilmeye çalışılmıştır. Operasyonel Modal Analiz yönteminde yapının çevresel bir etki ile titreştirildiği kabul edilmekte ve yapının bu titreşime göstermiş olduğu tepki ölçülmektedir. Tepkilerin ölçülüp değerlendirilmesinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Kullanılan yöntemlerin temel esasları hemen hemen aynı olup, yöntemler arasında veri kısıtlamaları, denklem çözümleri ve matris formları gibi birkaç uygulama farklılıkları bulunmaktadır. (A. Bayraktar vd 2014). Bu amaçla Tarihi Pehlivanlı Köprüsü üzerinde yapının teorik frekans değerleri dikkate alınarak; 0-20 Hz aralığında spektral yoğunluk fonksiyonları hesaplanmıştır. İlk olarak Frekans Alanında Çözümleme (Frequency Domain Decomposition – FDD) tekniği kullanılarak otomatik olarak mod şekli belirleme çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada ilk dört mod şeklini doğrudan belirlenmesi mümkün olmuştur. FDD tekniği ile yapılan analiz çalışmasında sönüm değerlerinin elde edilmesi söz konusu değildir (Okuyucu 2020). Bu nedenle, ikinci yöntem olan Geliştirilmiş Frekans Alanında Çözümleme (Enhanced Frequency Domain Decomposition – EFDD)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

tekniki kullanılarak ikinci bir analiz yapılmış ve sönüm oranları da hesaplanmıştır. Çalışmaya ilişkin genel bir görüntü Şekil 3.22’de sunulmaktadır.



Şekil 3.22. Artemis Modal Pro (2021) yazılımı kullanılarak spektral yoğunluk grafiklerinin elde edilmesi.

Beşinci aşama olarak elde edilen mod şekillerinin güvenilirliği genel kabul gören bir yöntemle irdelenmiştir. Bu amaçla, Modal Güvence Kriteri (Modal Assurance Criterion – MAC) mod şekillerinin birbirinden bağımsız olup olmadıklarının tayini amacıyla kullanılan bir istatistiki göstergedir.

Modal Güvence Kriteri; mod şekillerindeki büyük farklılıklara karşı oldukça hassas, küçük farklılıklara karşı nispeten duyarsız bir istatistiki göstergedir. Bu güçlü istatistiki parametre, mod şekilleri arasındaki tutarlılık derecesine ilişkin önemli bilgi sunar. Altı çizilerek ifade edilmelidir ki; Modal Güvence Kriteri sadece tutarlılık gösterir; mod şeklinin geçerliliği ile ilgili olarak bilgi sunmaz.

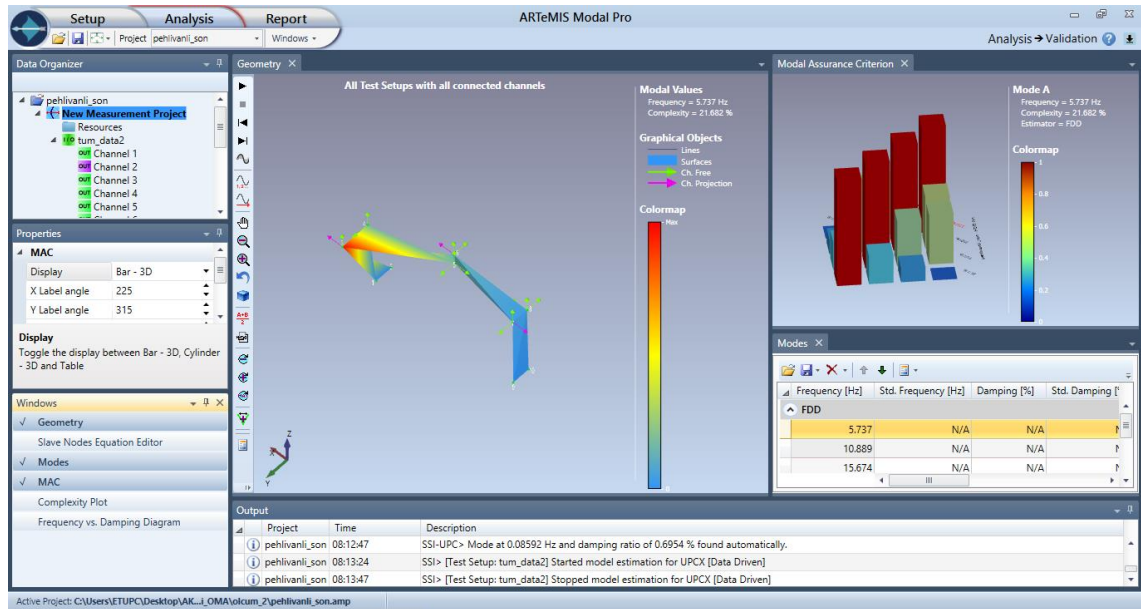
Modal Güvence Kriteri matrisinde iki farklı mod şekli vektörünün birbirine olan diklikleri incelenir. Bu matriste deneysel mod şekilleriyle sonlu elemanlar analiziyle elde edilen mod şekilleri karşılaştırılabileceği gibi farklı eğri uydurma yöntemleriyle elde edilen iki farklı mod şekli vektörü de karşılaştırılabilir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

MAC genellikle deneysel olarak elde edilenlerle analitik modellerden türetilen biçimleri eşleştirmek için kullanılmakla birlikte; kendi içerisinde mod şekillerinin tutarlılığının irdelenmesi amacıyla da kullanılır. Bununla birlikte, farklı veri setlerinden aynı sistem için hesaplanan mod şekillerinin tutarlılığının değerlendirilmesi amacıyla da kullanılabilir. Uygulaması kolaydır ve sistem matrislerinin tahmini gerektirmez.

MAC, sayısal olarak 0 ile 1 arasında değerler almaktadır. 1 değeri tam tutarlı mod şeklini ifade ederken; Pastor et al. (2012) çalışmasında belirttiği gibi 0' a yakın değerler modların ayrık olduğunu ifade etmektedir. Anonim6 (2021) Bir başka ifadeyle; karşılaştırılan iki farklı mod şekli vektörü birbiriyle uyumlu ise modal güvence matrisinin diyagonal terimlerinin 1, diğer terimlerinin 0 olması gerekmektedir. Diyagonal terimlerden bazılarının 1 değerinden oldukça düşük değerler alması, o terimle kesişen modların birbirinden çok farklı olduğunun göstergesi olup elde edilen mod şekil vektörlerinin yeniden gözden geçirilmesi gerekliliğini göstermektedir. (Yeniceli 2014)

Çalışma kapsamında, operasyonel modal analiz neticesinde elde edilen mod şekillerinin tutarlılığının incelenmesi amacıyla Modal Güvence Kriteri (MAC) değerleri hesaplanmıştır. Bu çalışmaya ilişkin bir ekran görüntüsü Şekil 3.23'de sunulmaktadır.



Şekil 3.23. Artemis Modal Pro (2021) yazılımı ile elde edilen mod şekillerinin tutarlılık kontrollerinin MAC parametresi ile yapılması.

3.5.2. Tarihi Pehlivanlı Köprüsü üzerinde operasyonel modal analiz çalışması yapılan dönemler

Bu tez çalışmasının amacı tarihi Pehlivanlı Köprüsü dinamik davranış parametrelerinin restorasyon öncesi, esnası ve sonrası değişiminin operasyonel modal analiz yöntemi ile incelenmesi ve takibidir. Bu şekilde restorasyon uygulamalarının yapısal davranış üzerindeki etkilerinin irdelenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla restorasyon öncesi, esnası, hemen sonrası, üç yıl sonrası ve altı yıl sonrası operasyonel modal Analiz sonuçları toplanarak değerlendirilmiştir. Şekil 3.24’de operasyonel modal analiz uygulaması ile köprü yapısının dinamik kimliklendirme çalışmalarının yapıldığı dönemler özetlenmektedir.



Restorasyondan Önce
OMA: Bayraktar (2012)



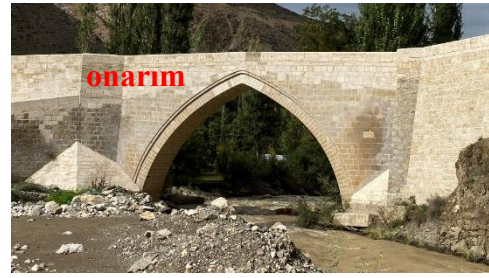
Restorasyon Esnasında
OMA: Okuyucu vd (2016)



Restorasyondan Kısa Bir Süre Sonra
OMA: Okuyucu vd (2016)



Restorasyondan 3 Yıl
OMA: Tez Çalışması



Onarımdan Sonra
OMA: Tez Çalışması

Şekil 3.24. Köprü üzerinde operasyonel modal analiz çalışması yapılan dönemler

- **Restorasyon öncesi (Bayraktar 2012) – Şubat 2012**

Pehlivanlı Köprüsü Restorasyon geçirmeden önce hazırlanan Bayraktar (2012) raporunda; köprüdeki trafik akışındaki konforu sağlamak amacıyla köprü tabliyesinin düzeltildiğinden bu amaçla tempan duvarlar üzerine yeni duvarlar ilave edildiğinden tabliye düzleştirildikten sonra üzerine yaklaşık 1m yüksekliğinde betonarme tabliye inşa

edildiğinden ayrıca, yaya güvenliği açısından betonarme tabliyenin kenarlarına demir korkuluklar yapıldığından bahsetmiştir. (Şekil 3.25) Köprü üzerine yapılan bu ilavelerin yanı sıra memba ve mansap taraflarına taş duvarlar inşa edilmiştir. Bu uygulanan yanlış çalışmalar, köprü'nün mimari özelliklerini bozan ve köprüye aşırı ilave yükler gelmesine sebep olan uygulamalar olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.25. Pehlivanlı Köprüsü restorasyon öncesi görünümü (Bayraktar 2012)

Restorasyon öncesi Bayraktar (2012) tarafından yapılan operasyonel modal analiz çalışması neticesinde 0-25 Hz frekans aralığında köprü'nün ilk beş mod şekli ve modal frekans değerleri elde edilmiş ve bu sonuçlar takip eden bölümde sunulmuştur. Bu çalışmaya ait genel bir görüntü Şekil 3.26'da sunulmaktadır.



Şekil 3.26. Pehlivanlı Köprüsü restorasyon öncesi operasyonel modal analiz çalışmasına ait bir görsel (Bayraktar 2012).

- ***Restorasyon esnası (Okuyucu vd 2016) – Mart 2015***

Tarihi Pehlivanlı Köprüsü'nün restore edildiği dönemde köprü üzerinde Operasyonel Modal Analiz çalışması yapılarak köprü dinamik davranış parametreleri deneysel olarak elde edilmiştir. Erzurum Teknik Üniversitesi tarafından desteklenen ETÜBAP 2013/15 kod numaralı proje kapsamında yapılan çalışmanın sonuç raporu Okuyucu vd (2016) referansında yayınlanmıştır. Köprü'nün restorasyon dönemine ait bir görüntü Şekil 3.27'de ve bu dönemdeki operasyonel modal analiz çalışmasına ilişkin bir görsel Şekil 3.28'de sunulmaktadır.



Şekil 3.27. Restorasyon döneminde kireçli köprüsü görüntüsü (Okuyucu vd 2016)



Şekil 3.28. Restorasyon esnası Kireçli Köprüsü operasyonel modal analiz çalışmasından bir görüntü (Okuyucu vd 2016).

Restorasyon uygulamaları kapsamında köprü orijinal taş tabliyesi üzerindeki muhtelif kalınlıkta katmanlardan oluşan ve sonradan yapıya eklenen kaplamaların tamamı kaldırılarak köprü kütlesi azaltılmıştır. Bununla birlikte Bayraktar (2012) tarafından sunulan ve Şekil 3.29’da gösterilen eleman hasarları için onarımlar yapılmıştır. Ana taşıyıcı durumundaki kemer yapısındaki onarımın tempan duvarlardaki onarımlarla birlikte köprü rijitliğini artırdığını ifade etmek mümkündür.



Şekil 3.29. Kireçli Köprüsü restorasyon öncesi hasarlarına ait bazı görüntüler (Bayraktar 2012).

Restorasyon uygulamasının restorasyon öncesi döneme kıyasla köprü kütlesinde azalmaya ve köprü rijitliğinde artışa yol açan bir müdahale olduğu değerlendirilmektedir. Restorasyonun kemer güçlendirme ve onarım işlerinin önemli ölçüde tamamlandığı, ancak tabliye kaplama, korkuluk uygulamaları gibi son aşama çalışmalarının yapılmadığı bir dönemde gerçekleştirilen operasyonel modal analiz uygulaması sonucu elde edilen dinamik karakteristikler sonraki bölümde sunulmaktadır.

- **Restorasyon sonrası (ETUBAP 2013/15) – Eylül 2016**

Tarihi Kireçli Köprüsü restorasyon uygulamasının tamamlanması sonrasında ETÜBAP 2013/15 kod numaralı proje kapsamında operasyonel modal analiz çalışması yapılarak restorasyon sonrası dinamik davranış karakteristikleri elde edilmiştir (Okuyucu vd 2016). Köprü yapısının restorasyondan sonrasına ait genel bir görüntüsü ve onarım sonrası ana taşıyıcı kemerin yakın plan bir görüntüsü Şekil 3.31’de sunulmaktadır.



Şekil 3.30. Kireçli Köprüsü restorasyon sonrası genel görünümü (Okuyucu 2016)



Şekil 3.31. Pehlivanlı Köprüsü restorasyonu sonrası ana taşıyıcı kemerin yakın plan görüntüsü (Okuyucu vd 2016).

Bu dönemde gerçekleştirilen operasyonel modal analiz çalışmasına ilişkin genel bir görünüm ise Şekil 3.32’de sunulmaktadır. Benzer şekilde bu çalışmadan elde edilen deneysel bulgular sonraki bölümde sunulmaktadır.



Şekil 3.32. Kireçli Köprüsü restorasyon sonrası operasyonel modal analiz çalışmasından bir görüntü (Okuyucu vd 2016).

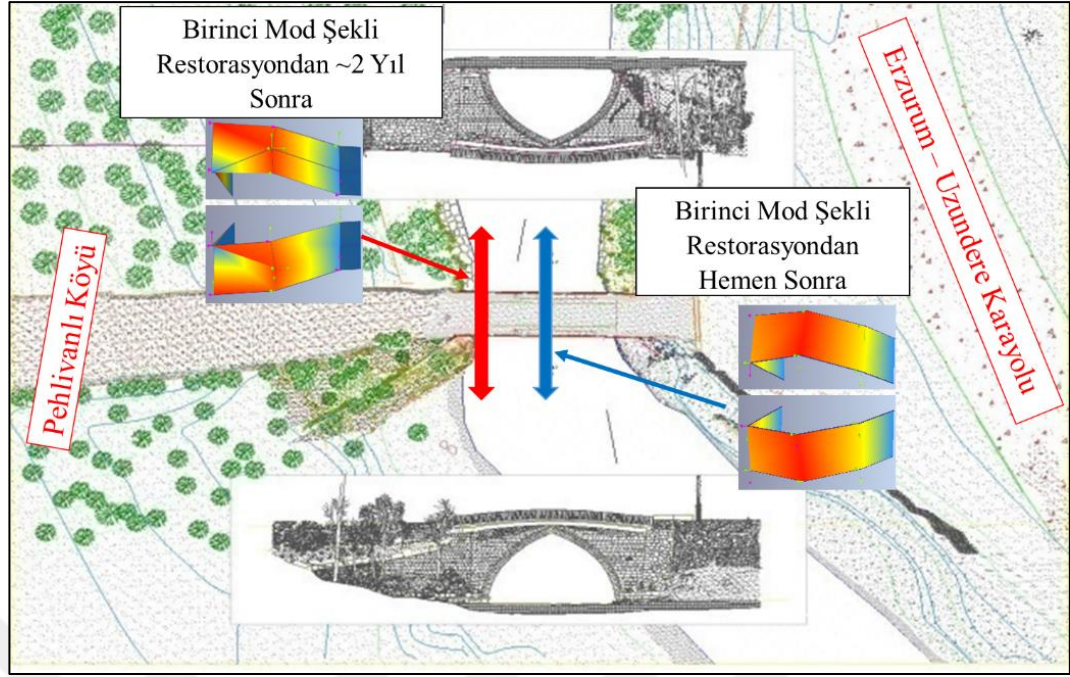
- ***Restorasyondan 2 yıl sonrası – Temmuz 2017***

Tarihi Pehlivanlı Köprüsü'nün restorasyon çalışmalarının tamamlanmasından yaklaşık 2 yıl sonraki durumu ve bu dönemdeki dinamik davranış parametrelerinin elde edilmesi bu tez çalışması kapsamında yapılan bir çalışma olmuştur. Köprü yapısı üzerinde operasyonel modal analiz uygulaması gerçekleştirilmiş ve dinamik davranış parametreleri deneysel olarak elde edilmiştir. Bu dönemde gerçekleştirilen saha çalışmasına ilişkin bir görüntü Şekil 3.33'de sunulmaktadır.



Şekil 3.33. Pehlivanlı Köprüsü restorasyonundan 2 yıl sonra gerçekleştirilen operasyonel modal analiz uygulamasından bir görüntü.

Bu aşamada köprü üzerinden ivme cinsinden alınan tepki kayıtları analiz edildikten sonra mod şekillerinin daha önceki operasyonel modal analiz sonuçlarından farklı olduğu belirlenmiştir. Örneğin, Bayraktar (2012) ve Okuyucu vd (2016) tarafından gerçekleştirilen daha önceki üç operasyonel modal analiz çalışmasında da köprü gövdesi yanal öteleme hareketi olarak belirlenen ilk mod şeklinin köprü'nün yanal öteleme hareketine Pehlivanlı Köyü tarafındaki tempan duvarı hizasında bir yanal ayrışmanın katılımı ile gerçekleştiği görülmüştür. Daha yalın bir ifade ile köprü'nün birinci mod şeklinde köprü gövdesi ile Pehlivanı Köyü tarafındaki tempan duvar arasında bir ayrışma hareketi olduğu belirlenmiştir. Sonraki bölümde bu husus üzerinde durulacak olmakla birlikte; restorasyon sürecinde ve restorasyondan 2 yıl sonra yapılan operasyonel modal analiz neticesinde deneysel olarak belirlenen birinci mod şeklinin şematik görüntüsünün Şekil 3.34'de sunulmasında yarar görülmektedir.



Şekil 3.34. Pehlivanlı Köprüsü operasyonel modal analiz çalışması ile restorasyondan hemen ve 2 yıl sonra elde edilen birinci mod şekilleri.

Şekil 3.34’de sunulan görsel incelendiğinde, restorasyondan hemen sonra yapılan deneysel çalışmada elde edilen birinci mod şeklinin köprü gövdesinin bütün olarak yanal öteleme hareketi olduğu görülmektedir. Ancak, restorasyondan 2 yıl sonra bu mod şeklinde değişim olduğu ve yine yatay bir öteleme hareketi olarak nitelendirilen ilk modal titreşim hareketinin köprü gövdesinin Pehlivanlı Köyü tarafındaki tempın duvar birleşiminden ayrışması şeklinde gerçekleştiği görülmektedir. Restorasyon esansı, öncesi ve hemen sonrasında deneysel olarak tayin edilen ilk dört mod şekli aynı olmakla birlikte, bu çalışma için sonlu elemanlar modeli üzerinde yapılan teorik modal analiz sonucunda hesaplanan mod şekilleri birebir örtüşmüştür. Bu nedenle, mod şeklinde meydana gelen bir değişimin hatalı ölçümden, hatalı sensör yerleşiminden ya da yapıda meydana gelmiş bir hasar nedeniyle olduğu düşüncesi gündeme gelmiştir. Ölçümlerin alındığı tarihte köprü yapısı üzerinde gözle görülür bir hasar olmayışı; veri kaydında sorun olabileceği hususunu gündeme getirmiş ve bu aşamada tekrar ölçüm alınmasına karar verilmiştir. Bu dönemde köprü üzerinde tekraren yapılan saha çalışmalarına ait bir görsel de ayrıca Şekil 3.35’te sunulmaktadır.



Şekil 3.35. Pehlivanlı Köprüsü restorasyon çalışmasından 2 yıl sonra tekrar yapılan operasyonel modal analiz çalışmasına ait bir görsel.

İlk ölçümden birkaç hafta sonra yapılan saha ziyareti esnasında farklı bir tablo ile karşılaşmış; köprünün hasar aldığı Pehlivanlı Köyü tarafındaki tempan duvarında düşey çökme ve bu çökmeye bağlı olarak kaplama hasarları ile köprü gövdesi ve tempan duvar arasında ayrışmanın işareti olarak kabul edilen boyuna çatlaklar meydana geldiği görülmüştür. Tempan duvarda meydana gelen çökme hasarına ilişkin bir görsel Şekil 3.36’da sunulmaktadır.



Şekil 3.36. Pehlivanlı Köprüsü restorasyonundan ~ 2 yıl sonrasında tempan duvarda meydana gelen çökme görüntüsü.

Hasar incelendiğinde tempan duvar dolgusunda yer yer 8-10 cm ölçüsünde düşey çökmelerin meydana geldiği ve bu düşey çökme etkisi ile köprü-tempan duvar birleşiminde düşey bir hat boyunca ayrışmalar olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak, bu düşey ayrışma çatlağı köprünün sadece bir tarafında, Pehlivanlı Köyü yönünde sağ tarafta, meydana gelmiştir. Hasarın meydana geldiği tempan duvarın her iki tarafından alınan görüntüler Şekil 3.37’de sunulmaktadır.



Şekil 3.37. Pehlivanlı Köprüsü restorasyonundan ~2 yıl sonrasında çökme meydana gelen tempan duvarın her iki tarafına ait görüntüler.

Köprü yapısı hasarına ilişkin görsel kayıt alındıktan sonra bir kez daha hasarlı yapı üzerinde tepki titreşimleri kaydedilerek dinamik kimliklendirme çalışması yapılmış ve hasar durumu yetkili birimlere bildirilmiştir.

- **Restorasyondan 6 yıl sonrası – Eylül 2021**

Pehlivanlı Köprüsü restorasyonun tamamlanmasından yaklaşık iki yıl sonra yapılan çalışmada Pehlivanlı Köyü tarafı tempan duvarı dolgusundaki düşey çökmeye bağlı hasar oluşumu tespit edilmiş ve bu durum yetkili birimlere bildirilmiştir. Sonrasında duvarda meydana gelen hasar için onarım çalışması yapılmış ve köprü yaya kullanımı için açık hale getirilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde tempan duvardaki çökme onarılmış; yeniden dolgu işlemi yapıldığı rapor edilmiştir. Bu onarım çalışmasının önce ve sonrasına ilişkin bir görsel Şekil 3.38’de sunulmaktadır. Onarımın sadece çöken bölgedeki dolgunun yenilenmesi şeklinde olduğu; köprü gövdesi ve tempan duvar arasındaki düşey ayrışma için herhangi bir müdahale yapılmadığı görülmüştür.



Şekil 3.38. Pehlivanlı Köprüsü tempan duvar onarımı öncesi ve sonrasına ait görüntüler

Tempan duvar onarımından sonra bir kez daha, 18.08.2018 tarihinde, sahada operasyonel modal analiz çalışması yapılmıştır. Ancak, köprü yapısının tepki titreşimleri ölçülürken veri toplama sisteminde meydana gelen arıza nedeniyle kaydedilen veri üzerinde yapılan analizden sağlıklı bir sonuç elde edilememiştir. Her ne kadar sonuç alınamamış olsa da bu dönemde yapılan saha çalışmasına ilişkin bir görsel Şekil 3.39'da sunulmaktadır. Onarım sonrasında köprü'nün yaya ve yasaklanmış olmasına rağmen taşıtlar tarafından kullanıldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.39. Tempan duvar onarımından hemen sonra yapılan saha çalışmasına ait bir görsel.

Veri toplama sisteminin yeniden çalışır hale getirilmesi ile birlikte; restorasyonun tamamlanmasından yaklaşık altı yıl ve tempan duvardaki hasarın onarımından yaklaşık üç yıl sonra köprü yapısında bir kez daha Operasyonel Modal Analiz çalışması yapılmış ve köprü dinamik davranış karakteristikleri deneysel olarak elde edilmiştir. Esasen veri toplama sisteminin onarımı sonrası hemen saha çalışması yapılmak istenmiş ancak; 2020 yılı başında dünya genelinde yaşanan Covid19 pandemisi nedeniyle bu mümkün olmamıştır. Seyahat yasaklarının olmadığı bir dönemde; 25 Eylül 2021 tarihinde bu çalışma gerçekleştirilebilmiştir. Bu dönemde yapılan saha çalışmasına ilişkin genel bir görüntü Şekil 3.40'ta sunulmaktadır. Çalışma sonucunda elde edilen dinamik davranış parametreleri takip eden bölümde sunulmaktadır.



Şekil 3.40. Restorasyondan 6 yıl sonra yapılan saha çalışmasından bir görüntü

Bu dönemde yapılan inceleme sonucunda köprü tempan duvarındaki onarım sonrasında tekrar çökme meydana geldiği ve bu çökmenin kaplama taşlarına zarar verdiği görülmüştür. Çökmeye ilişkin bir görüntü sunulmaktadır.



Şekil 3.41. Pehlivanlı Köprüsü tempan duvarında onarım sonrası yeniden meydana gelen çökmeye ait bir görsel.

Şekil 3.41’de görüldüğü şekilde onarım sonrası tempan duvarda *tekrar* meydana gelen çökme köprü gövdesi ile tempan duvar arasındaki düşey ayırışma miktarını önemli ölçüde artırmıştır. Söz konusu hasara ilişkin bir yakın plan görüntüsü Şekil 3.42’de sunulmaktadır.



Şekil 3.42. Tempan duvar onarımı sonrası köprü gövdesi ile tempan duvar arasındaki düşey ayrışmanın yakın plan bir görüntüsü.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında tarihi Pehlivanlı Köprüsü üzerinde köprünün restorasyonu öncesi, restorasyonu esnası ve restorasyonu sonrasında muhtelif zamanlarda gerçekleştirilen Operasyonel Modal Analiz uygulaması ile köprü dinamik davranış parametrelerindeki değişimin incelenmesi amaçlanmıştır. Deneysel olarak elde edilen modal karakteristikler kendi içerisinde değerlendirilmiş; ilaveten SAP2000 (2018) yazılımı kullanılarak oluşturulan sonlu eleman modeli üzerinde analizler yapılarak davranış ayrıca nümerik olarak irdelenmiştir.

Erişilebilen literatürde Pehlivanlı Köprüsü' nün muhtelif çalışmalarda incelendiği görülmektedir. Bayraktar (2012) Pehlivanlı Köprüsü restorasyonu öncesi köprünün mevcut durumunun değerlendirildiği ve restorasyonu öncesi dinamik davranış parametrelerinin Operasyonel Modal Analiz çalışması ile elde edilmesine ilişkin detayların sunulduğu teknik bir rapor olarak erişim sağlanmıştır. Özkaya (2019) çalışmasında performansa bağlı analiz yöntemlerinden “Kapasite Spektrumu Yöntemi” ile tek açıklıklı tarihi yığma kemer köprülerin performans analizlerinin yapılması amaçlanmış ve bu maksatla incelenen tarihi köprülerden birisi de Pehlivanlı Köprüsü olmuştur.

Bu bölümde köprü üzerinde gerçekleştirilen Operasyonel Modal Analiz uygulaması ile elde edilen deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar modeli üzerinde gerçekleştirilen analiz sonuçları ilgili literatür ile karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

4.1. Operasyonel Modal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Pehlivanlı Köprüsü üzerinde restorasyondan önce, restorasyon esnasında, restorasyondan hemen sonra, restorasyondan 2 yıl sonra ve restorasyondan 6 yıl sonra olmak üzere farklı zamanlarda operasyonel modal analiz çalışmaları yapılmıştır. Restorasyon öncesi çalışma Bayraktar (2012); restorasyon esnası ve restorasyondan hemen sonraki çalışma ise Okuyucu vd (2016) çalışmalarından alınmıştır. Restorasyondan 2 ve 6 yıl sonraki operasyonel modal analiz çalışmaları ise bu tez çalışması kapsamında yapılmıştır.

Operasyonel modal analiz uygulaması yapının ortam titreşimlerine verdiği tepkilerin ölçülmesi ile başlayan ve bu ölçüm verisinin işlenmesi neticesinde dinamik davranış parametrelerinin elde edilmesi ile sonuca ulaşılan tahribatsız deneysel bir yöntemdir. Uygulamanın yapıya herhangi bir tahribat vermemesi ve kaynağı belirsiz ortam titreşimlerine yapının verdiği tepki üzerinden sonuca ulaşılması tarihi yapılar üzerinde dinamik kimliklendirme çalışmaları yapılması amacıyla tercih edilen bir yöntem olmasının temel nedenleridir (Rainieri and Fabbrocino 2014). Bu gerekçelerle tez çalışmasında yöntem olarak operasyonel modal analiz tercih edilmiştir.

Araştırma kapsamında değerlendirmeye alınan operasyonel modal analiz uygulamaları Bayraktar (2012) ve Okuyucu vd (2016) tarafından raporlanan restorasyon süreci çalışmalar ve restorasyon uygulamasından 2 ve 6 yıl sonrası çalışmalar olarak irdelenecektir. Zira, restorasyon süreci olarak tanımlanan üç ayrı dinamik kimliklendirme çalışmasında yapının mod şekilleri ayrı kalmakla birlikte modal frekanslar restorasyon uygulamasının bir sonucu olarak değişim göstermiştir. Köprü yapısının restorasyon öncesi, esnası ve restorasyondan hemen sonraki dönemlerde operasyonel modal analiz uygulaması ile elde edilen dinamik davranış parametreleri Çizelge 4.1’de toplu olarak sunulmaktadır.

Çizelge 4.1. Pehlivanlı Köprüsü restorasyon dönemlerine ait operasyonel modal analiz sonuçları.

Mod	Mod Şekli Açıklaması	Frekans (Hz)		
		Restorasyon Öncesi (Bayraktar 2012)	Restorasyon Esnası (Okuyucu vd 2016)	Restorasyondan Kısa Süre Sonrası (Okuyucu vd 2016)
1	Köprü gövdesi yanal öteleme hareketi	5,28	5,44	7,42
2	Köprü gövdesi yanal burulma hareketi	7,35	7,62	15,70
3	Köprü gövdesi düşey öteleme hareketi	10,09	10,55	17,95
4	Köprü gövdesi düşey burulma hareketi	13,23	14,81	19,46

Çizelge 4.1 incelendiğinde restorasyon sürecinde mod şekillerinin sıralı olarak aynı kaldığı ve değişmediği; ancak restorasyon tamamlandıktan sonra incelenen ilk dört mod şekli için frekans değerlerinin arttığı ve dolayısıyla periyot değerlerinin düştüğü görülmektedir. Köprünün restorasyon öncesi, esnası ve hemen sonrasındaki birinci mod şekli köprü gövdesinin kemer açıklığına dik yönde yanal öteleme, ikinci mod şeklinin aynı doğrultuda yanal burulma, üçüncü mod şeklinin düşey öteleme ve dördüncü mod şeklinin ise düşey burulma hareketi olarak belirlendiği görülmektedir.

Bilindiği üzere tek serbestlik dereceli sistemlerin periyot değeri Denklem.4.1’de sunulduğu gibi hesaplanmaktadır. Bu bağıntıdan hareketle frekans değerinin kütle ile ters, rijitlik ile doğru orantılı olduğu ifade edilebilir. Frekansın birim zamandaki salınım sayısı olduğu dikkate alındığında; herhangi bir frekans değerindeki artışın, restorasyondan önce köprü üzerinde bulunan muhtelif özellikte kaplama kaldırıldıktan sonra kütlelerinde meydana gelen azalma ve restorasyon ile birlikte köprünün rijitliğinde meydana gelen artışa bağlı olarak geliştiği düşünülmektedir. Bu husus Kanbur ve Okuyucu (2020) çalışmasında da detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

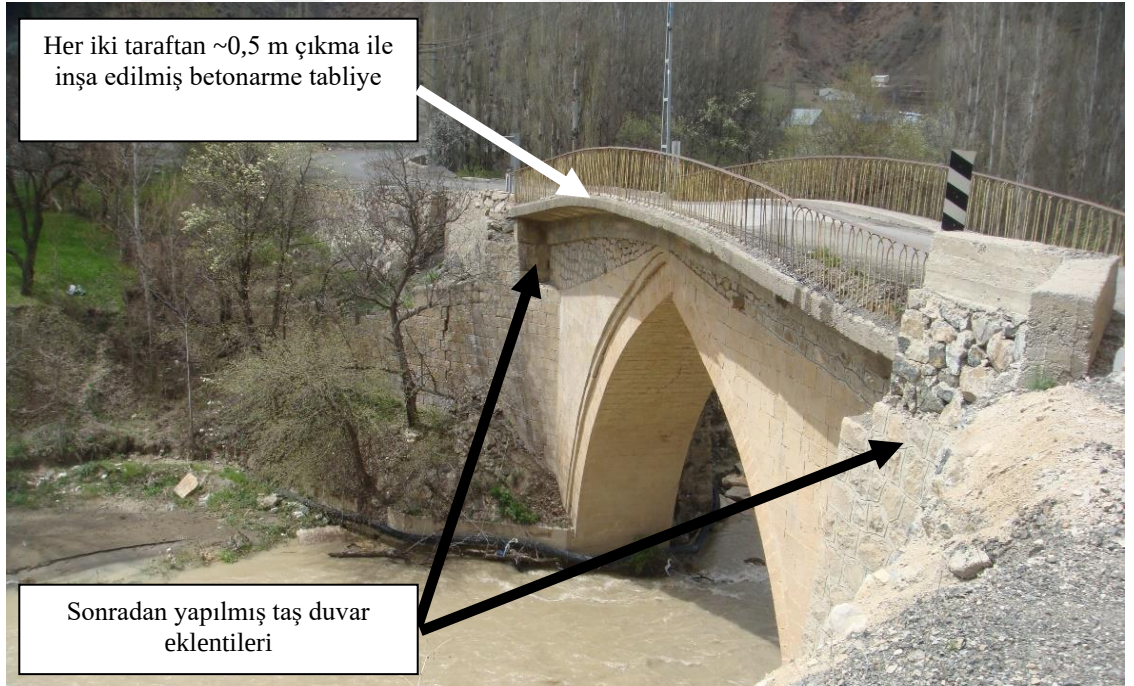
$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (4.1)$$

Sayısal bir irdeleme yapılabilmesi amacıyla bu süreçte modal frekans değerlerinde meydana gelen değişim restorasyon öncesindeki değerlere kıyasla hesaplanmış ve Çizelge 4.2’de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Pehlivanlı Köprüsü Restorasyon dönemlerinde modal frekans değerlerinde meydana gelen değişim.

Mod	Mod Şekli Açıklaması	Frekansta Meydana Gelen Artış (%)		
		Restorasyon Öncesi	Restorasyon Esnası	Restorasyondan Kısa Süre Sonrası
1	Köprü gövdesi yanal öteleme hareketi	Referans	3,0	40,5
2	Köprü gövdesi yanal burulma hareketi	Referans	3,7	113,6
3	Köprü gövdesi düşey öteleme hareketi	Referans	4,6	77,9
4	Köprü gövdesi düşey burulma hareketi	Referans	11,9	47,1

Çizelge 4.2’de sunulan frekans farklarının restorasyon uygulamaları dahilinde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bayraktar (2012) çalışmasında restorasyon öncesi dönemde Pehlivanlı Köprüsü üzerinde trafik akışındaki konforu sağlamak amacıyla köprü tabliyesi düzleştirildiği ve bu amaçla, tempan duvarlar üzerine yeni duvarlar ilave edildiği ifade edilmektedir. Yine aynı raporda tabliye düzleştirme işleminden sonra üzerine yaklaşık 1m yüksekliğinde genel görünümü Şekil 4.1’de sunulan betonarme tabliye ile yaya güvenliği açısından betonarme tabliyenin kenarlarına demir korkuluklar inşa edildiği belirtilmektedir. İlaveten Şekil 4.1’de gösterildiği şekilde köprü üzerine yapılan bu ilavelerin yanı sıra memba ve mansap taraflarına taş duvarlar inşa edildiği ifade edilmektedir. Raporda; belirtilen müdahalelerin restorasyon amaçlı uygulamalar olmadığı köprü’nün mimari özelliklerini bozan ve köprüye aşırı ilave yükler gelmesine sebep olan uygulamalar olarak değerlendirildiği görülmektedir. Bu nedenle, restorasyon öncesi ve restorasyon sonrası modal frekans değerlerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesinin restorasyon uygulamasının yapısal sistem üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi bakımında daha doğru bir yaklaşım olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.1. Pehlivanlı Köprüsü restorasyonu öncesinde gerçekleştirilen tabliye düzleştirme, betonarme tabliye eklentisi ve taş duvar ilavesi uygulamaları (Bayraktar 2012).

Restorasyon esnası operasyonel modal analiz uygulamasının, Şekil 4.1’de gösterildiği üzere, köprü tabliyesi orijinal taş kaplama seviyesi üzerine sonradan eklenmiş öncelikle betonarme tabliye olmak üzere tüm kaplamaların, korkulukların ve taş duvar eklentilerinin kaldırıldığı bir dönemde yapıldığı Okuyucu vd (2016) çalışmasında ifade edilmekte ve bu durum Şekil 4.2’de sunulan görsel ile desteklenmektedir. Betonarme tabliye ile taş duvar eklentilerinin sistemden uzaklaştırılmasının köprü kütlesinde önemli ölçüde azalma meydana getirdiği açıktır. Basit bir hesaplama; sadece toplamda 1 m çıkma ile betonarme tabliyenin ayrılması ile birlikte sistem kütlesinde meydana gelen azalmanın $15,17 \times 6,60 \times 0,15 \times 2500 = 37546$ kg olduğunu ifade etmek mümkündür. Bu yaklaşık değere tabliye düzleştirme amacıyla yapılan dolgu ve sistemden ayrılan duvar eklentilerinin dahil değildir. Restorasyon esnası saha çalışması döneminde köprü kütlesinin, restorasyon öncesi saha çalışması dönemine kıyasla önemli ölçüde azaldığı görülmekle birlikte onarımla beraber köprü rijitliğinde meydana gelen artış konusunda teknik bir değerlendirme yapılamamaktadır. Zira Okuyucu vd (2016) çalışmasında restorasyon esnası çalışmanın yapıldığı dönemde ana taşıyıcı sistem üzerindeki onarım/güçlendirme çalışmalarının düzeyi hakkında net olarak teknik bir bilgi sunulmayışı bu değerlendirmenin sağlıklı bir şekilde yapılmasını olanaksız kılmıştır.



Şekil 4.2. Pehlivanlı Köprüsü restorasyon esnası operasyonel modal analiz çalışması döneminden bir görsel (Okuyucu vd 2016).

Çizelge 4.2 incelendiğinde; restorasyon öncesi ve sonrası modal frekans değerleri arasında yaklaşık olarak %41 - %114 oranında artış meydana geldiği görülmektedir. Denklem 4.1 ile birlikte değerlendirildiğinde, sistem kütlesindeki azalma ile birlikte onarım sonucu gelişen rijitlik artışının frekans değerlerinde artış ile sonuçlandığı değerlendirilmektedir.

Restorasyon sonrası modal frekans artışı sonucunu destekleyen benzer içerikli çalışmalara literatürde erişim sağlamak mümkün olmuştur. Romero et al. (2018) çalışmasında 15. yüzyılda yapıldığı ifade edilen San Juan de los Caballeros Kilisesi' nin bir parçası olan Jura Şapeli' nin restorasyon öncesi ve sonrası dönemlerde dinamik davranış parametreleri operasyonel modal analiz uygulaması ile takip edilmiştir. Restorasyon uygulamasında genel olarak tonoz yapısı üzerinde çalışma yapıldığı ifade edilmekle birlikte, yapı kütlesinde değişime yol açacak bir uygulama yapıldığına dair herhangi bir ifade bulunmamaktadır. Çalışma sonucunda restorasyon öncesi ve sonrası mod şekilleri aynı kalmakla birlikte değerlendirme yapılan ilk beş mod şekli için %9 - %20 oranında modal frekansta artış meydana geldiği ve bunun restorasyon neticesinde system rijitliğinin artmasına bağlı olarak geliştiği ifade edilmektedir. Pehlivanlı Köprüsü restorasyon uygulamasında da mod şekilleri değişmemiş; ancak modal frekanslarda artış meydana gelmiştir.

Benzer şekilde Ramos et al. (2010) çalışmasında Portekiz' de bulunan ve yapımı 16. yüzyıla tarihlenen Magodouro Saat Kulesi' nin restorasyon öncesi ve sonrası dinamik davranış parametreleri Operasyonel Modal Analiz uygulaması ile takip edilmiştir. Yaklaşık 20 m yüksekliğindeki saat kulesi restorasyon öncesi duvarlarda bulunan oldukça geniş düşey çatlaklar ve malzeme kayıpları nedeniyle ağır hasarlı olarak tanımlanmıştır. Onarım sürecinde duvar konsolidasyonu için kireç enjeksiyonu, hasarlı bölgelerde duvar yenileme, boşluklara dolgu yapılması ve iki noktaya çelik kuşaklama uygulaması yapıldığı ifade edilmiştir. Bu uygulamalarda kayda değer bir kütle değişimi olmamakla birlikte, rijitlik artışına bağlı olarak modal frekanslarda %7 - %98 oranlarında artış meydana geldiği rapor edilmiştir. Ramos et al. (2010) çalışmasının da Pehlivanlı Köprüsü'nün restorasyon sonrası modal frekans değerlerindeki artışla benzer bir davranışı rapor ettiğini ifade etmek mümkündür.

Bu tez çalışmasının temel amacı Pehlivanlı Köprüsü üzerinde belirli dönemlerde yapılan operasyonel modal analiz uygulaması ile elde edilen dinamik davranış parametreleri kullanılarak tarihi köprünün yapı sağlığı takibinin yapılmasıdır. Mod şekillerinde ve modal frekanslarda meydana gelecek bir değişim doğrudan yapı kütlesi ve rijitliği ile ilgili değişimlerin sonucu olarak ortaya çıkacaktır. Bu bağlamda, modal davranış parametrelerindeki değişim köprü yapısının hasarlı hale gelmesi, kütlece değişime uğraması gibi durumların habercisi olabilecektir. Tez çalışması kapsamında Pehlivanlı Köprüsü restorasyonunun tamamlanmasından yaklaşık 2 ve 6 yıl sonraki dönemlerde yapılan operasyonel modal analiz uygulaması ile elde edilen dinamik davranış parametreleri köprü yapısının hasar aldığını ve hasarın onarımından sonra da modal davranış parametrelerinin restorasyondan hemen sonraki durumlarına dönmediğini göstermiştir. Çizelge 4.3’de restorasyondan 2 ve 6 yıl sonraki durum ve bu dönemde operasyonel modal analiz uygulaması ile elde edilen mod şekilleri ve modal frekanslar sunulmaktadır. Devamında ise Çizelge 4.3’e referansla modal davranıştaki değişim üzerindeki değerlendirmeler sunulacaktır.

Restorasyonun tamamlanmasından yaklaşık 2 yıl sonra yapılan dinamik kimliklendirme çalışması köprünün mod şekillerinde değişim olduğunu ortaya koymuştur. Buradaki değişimin öncelikle birinci mod şekilleri üzerinden değerlendirilmesinin uygun olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 4.3. Restorasyondan 2 ve 6 yıl sonra yapılan operasyonel modal analiz uygulamasından elde edilen sonuçlar.

Uygulama Dönemi:	Restorasyondan 2 yıl sonra Temmuz 2017	Restorasyondan 6 Yıl sonra Eylül 2021
Mevcut Durum	Tempan duvarda dolgunun oturmasına bağlı düşey çökme ve buna bağlı olarak köprü gövdesi – tempan duvar birleşiminde düşey doğrultuda ayrışma meydana gelmesi	Tempan duvardaki çökmenin ilave dolgu ile onarılması ve sonrasında yeniden çökme meydana gelmesi
Kütle ve Rijitlik Değerlendirmesi	- Kütlede değişim yok - Hasar ile birlikte köprü rijitliğinde azalma	- Tempan duvar dolgusunun artırılması ile birlikte kütlede artış - Dolgu uygulaması esnasında düşey doğrultuda sıkıştırma ile yatay doğrultudaki genişlemeye bağlı olarak düşey çatlaklarda genişleme ve ilerleme sonucunda köprü rijitliğinde ilave azalma
Tempan Duvar – Köprü Gövdesi Birleşimindeki Hasara İlişkin Görsel	Yaklaşık 5-6 mm genişliğinde düşey çatlak 	Yaklaşık 15-20 mm genişliğinde ve köprü ayağına doğru ilerlemiş düşey çatlak 
Operasyonel Modal Analiz Uygulaması ile Elde Edilen Mod Şekilleri ve Modal Frekanslar		
Mod Şekli	Modal Frekans (Hz)	Modal Frekans (Hz)
Mod 1 Pehlivanlı Mahallesi tarafında köprü bağıntı noktası ve tempan duvarın katılımıyla köprü gövdesinin yerel yanal öteleme hareketi	7,51	5,86
Mod 2 Yanal Burulma hareketi	10,87	11,21
Mod 3 Pehlivanlı Mahallesi tarafında köprü bağıntı noktası ve tempan duvarın katılımıyla düşey öteleme hareketi	15,72	15,75
Mod 4 Pehlivanlı Mahallesi tarafında köprü bağıntı noktası ve tempan duvarın katılımıyla düşey burulma hareketi	19,98	20,26

Restorasyondan 2 yıl sonraki Operasyonel Modal Analiz uygulaması ve saha çalışması neticesinde tempan duvarda dolgu oturmasına bağlı düşey çökme ile bu çökmenin etkisiyle tempan duvar-köprü gövdesi birleşiminde ayrışma meydana geldiği tespit edilmiş ve bu durum yetkili birimlere iletilmiştir. Takip eden dönemde Pehlivanlı Köyü tarafındaki tempan duvardaki dolgu malzemesi oturmasına bağlı çökme ilave dolgu yapılarak restorasyon sonrası kot seviyesine çıkarılmış ve sonrasında doğal taş ile yüzey kaplaması tamamlanmıştır. Birleşimdeki düşey ayrışma için herhangi bir yapısal önlem alınmamıştır. Ancak bir süre sonra bahsi geçen tempan duvar dolgusunda tekrar oturma ve bu oturmaya bağlı olarak zemin kaplamasında düşey çökme meydana gelmiştir. Bu düşey çökmenin etkisi ile daha önce oluşan düşey ayrışma hem genişlemiş hem de köprü tabliyesinden ayağına doğru ilerlemiştir. Restorasyonun tamamlanmasından yaklaşık 6 yıl sonra yapılan operasyonel modal analiz uygulaması tam olarak ifade edilen hasarlı durum üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.3 incelendiğinde restorasyondan 2 ve 6 yıl sonrasında, *tempan duvardaki çökmenin meydana geldiği ve onarım amacıyla dolgu eklentisi şeklinde müdahalenin yapıldığı dönem*, köprünün mod şekillerinde bir değişim olmadığı açıkça görülmektedir. Ancak, bu mod şekillerinin restorasyonun tamamlanmasından hemen sonraki hasarsız dönemden farklı olduğu ve buradaki değerlendirmenin hasarlı dönem içerisindeki değerler için yapıldığının altı çizilmelidir. Her iki çalışmada da hasarlı tempan duvar-köprü gövdesi birleşimindeki ayrışma üzerinden meydana gelen yanal öteleme/salınım hareketi olarak tayin edilen birinci mod şekline ilişkin frekanslarda önemli ölçüde değişiklik söz konusudur. Restorasyondan 2 yıl sonraki hasarlı durum için birinci modal frekans 7,51 Hz olarak belirlenirken, dolgu eklentisi ile birlikte köprü kütlelerinin arttığı 6 yıl sonraki durumda bu değer 5,86 Hz olarak belirlenmiştir. Yani, köprüdeki hasarın giderilmesi amacıyla yapılan dolgu eklentisi şeklindeki uygulama birinci mod şeklini değiştirmemekle birlikte frekans değerini önceki duruma göre ~%22 oranında azaltmıştır. Bu durum, *yani mod şekillerinin aynı kalmış olması*, dolgu çökmesinin giderilmesi amacıyla yapılan dolgu eklentisinin birleşimdeki hasarı gidermediğini ve o noktadaki ayrışmanın sistemin davranışını etkilediğini açıkça ortaya koymaktadır. Son uygulama ile kütlelerin arttığı açıktır. Bununla birlikte, düşey ayrışmanın ilerlemesi ve çatlak genişliklerinin önemli ölçüde (5-6 mm’ den 15-20 mm’ye) artmış olması köprü rijitliğinde azalmanın göstergesi olarak kabul edilmektedir.

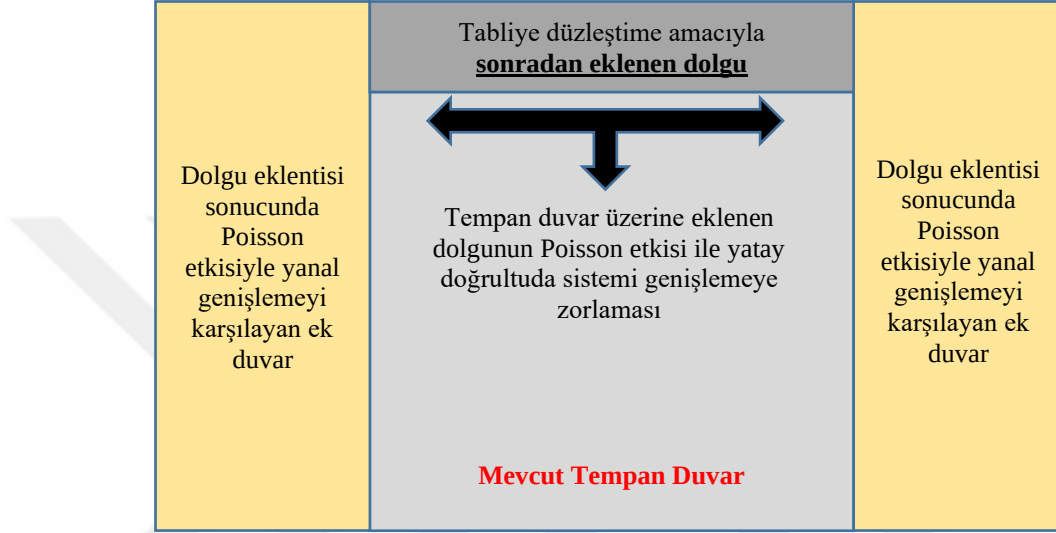
Denklem 4.1 uyarınca yapının tek serbestlik dereceli bir sistem olarak değerlendirilmesi halinde; mod şekli aynı kalan birinci modal frekanstaki ~%22 oranındaki azalmanın köprünün kütle/rijitlik oranının (m/k) tempan duvar için dolgu eklemesi yapıldıktan sonraki dönemde %64 oranında arttığı sonucu ortaya çıkmaktadır. Uygulama neticesinde kütlede artış kesindir. Ancak, yapılan dolgu eklentisinin miktarı bilinmediğinden kütledeki artış için sayısal bir değerlendirme yapılamayışı, rijitlikteki azalma için de sayısal bir kıyaslama yapılamamasına neden olmaktadır. Bu bölümde değerlendirilen Operasyonel Modal Analiz sonuçları, hasarlı tempan duvar onarımı için yapılan uygulamanın köprünün birinci doğal titreşim periyodunda artışa neden olduğunu açıkça göstermektedir.

Bu noktada Pehlivanlı Köprüsü restorasyonu öncesi teknik değerlendirme raporu olarak erişim sağlanan Bayraktar (2012) çalışmasındaki bir hususun tartışmaya açılmasında yarar görülmektedir. Raporun önceki dönemlerde köprü üzerinde gerçekleştirilmiş müdahalelerin açıklandığı bölümünde *köprüdeki trafik akışındaki konforu sağlamak amacıyla köprü tabliyesinin düzleştirildiği ve bu amaçla, tempan duvarlar üzerine yeni duvarlar ilave edildiği ve tabliye düzleştirildikten sonra üzerine yaklaşık 1m yüksekliğinde betonarme tabliye inşa edildiği* ifade edilmektedir. İlâveten *müdahalelerin restorasyon uygulamaları olmadığı, köprünün mimari özelliklerini bozan ve köprüye aşırı ilave yükler gelmesine sebep olan uygulamalar olduğu* şeklinde değerlendirmelere yer verildiği görülmektedir. Tempan duvarların yanına eklenen duvarlara ilişkin bir görüntü Şekil 4.4’de sunulmaktadır.



Şekil 4.4. Restorasyon öncesi dönemde Pehlivanlı Köprüsü tempan duvarlarının yanına yapılan duvar eklentisi (Bayraktar 2012).

Restorasyon öncesi dönemde yapıldığı ifade edilen tabliye düzeltirme çalışmalarında köprü yapısının *hasar almaması* için mevcut tempan duvarların yanal yöndeki ilave itkileri karşılamak amacıyla bir nevi dayanma yapısı olarak çalışacak ilave duvarlar ile desteklenmiş olmasının o dönemin koşullarında yerinde bir uygulama olduğu düşünülmektedir. Şekil 4.5 bu uygulamanın teknik olarak yalın bir şekilde açıklanabilmesi amacıyla oluşturulmuş şematik bir gösterimi içermektedir.



Şekil 4.5. Restorasyon öncesi dönemde Pehlivanlı Köprüsü tabliye düzeltirme çalışması amacıyla yapılan uygulamanın şematik gösterimi.

Bayraktar (2012) raporundan hareketle, önceki dönemlerde tabliyenin düzeltilmesi amacıyla köprü ortasından daha düşük kotta olan tempan duvar üstüne dolgu yapılmasının gerekli görüldüğü anlaşılmaktadır. Bu ilave dolgunun gerek etkisinin bir sonucu olarak yatay yönde çekme gerilmeleri doğuracağı bu gerilmelerin sistemi yatay yönde genişlemeye zorlayacağı açıktır. Şekil 4.5'te şematik olarak gösterilen duvar eklentileri bu ilave yanal itkileri karşılamak amacıyla yapılmış olmalıdır ve esasen statik olarak betonarme tabliyenin eklendiği dönemde yük taşıyıcı elemanlar oldukları düşünülmektedir.

Restorasyon döneminde tempan duvar üzerindeki ilave dolgu ve onun üzerindeki betonarme tabliye kaldırılmış ve bu durumda tempan duvara destek amacıyla yapıldığı düşünülen ilave duvarlar da sökülerek sistemden ayrılmıştır.

Restorasyonun tamamlanmasından 2 yıl sonra Pehlivanlı Köyü tarafındaki tempan duvarda meydana gelen çökmenin onarılması ve tempan duvar üst kotunun eski haline getirilmesi amacıyla duvar üstüne dolgu takviyesi yapılmıştır. Restorasyon sonrası gelişen bu durumun Şekil 4.3’de sunulan durumla benzerlik gösterdiği düşünülmektedir. İlave dolgu sistemde yanal itkiler oluşturmuş; ancak yanal itkileri karşılayacak yeterli dayanım ve rijitliğe sahip tempan duvar olmaması nedeniyle tempan duvar-köprü gövdesi birleşiminde ayrışma meydana gelmiş ve bu hasar sistemin modal davranışını bütünüyle değiştirmiştir. Onarımın beraberinde getirdiği bir hasar durumunun söz konusu olduğu düşünülmektedir.

Pehlivanlı Köprüsü restorasyon öncesi ve sonraki dönemlerde Operasyonel Modal Analiz uygulaması ile deneysel olarak elde edilen mod şekilleri ve modal frekanslar toplu olarak Çizelge 4.4’de sunulmaktadır. Çizelge 4.4 incelendiğinde restorasyondan hemen sonraki mod şekillerinin uygulamadan 2 yıl sonra tempan duvardaki dolgu oturmasına bağlı olarak gelişen birleşim bölgesi hasarı ile birlikte değiştiği görülmektedir. Burada mod şekilleri değişmekle birlikte modal frekanslarda da hasara bağlı olarak artışlar meydana geldiğini ifade etmek mümkündür.

Çizelge 4.4. Pehlivanlı Köprüsü üzerinde gerçekleştirilen tüm operasyonel modal analiz uygulaması sonuçları.

Mod	Mod Şekli	Frekans (Hz) (Okuyucu et al., 2016)			Mod Şekli	Frekans (Hz)	
		Restorasyon öncesi (Bayraktar 2012)	Restorasyon esnası (Okuyucu et al., 2016)	Restorasyon hemen sonrası (Okuyucu et al., 2016)		Restorasyon üç yıl sonrası	Restorasyon altı yıl sonrası
1	Köprü gövdesi yanal öteleme hareketi	5,28	5,44	7,42	Pehlivanlı Mahallesi tarafında köprü bağıntı noktası ve tempan duvarın katılımıyla köprü gövdesinin yerel yanal öteleme hareketi	7,51	5,86
2	Köprü gövdesi yanal burulma hareketi	7,35	7,62	15,70	Yanal Burulma hareketi	10,87	11,21
3	Köprü gövdesi düşey öteleme hareketi	10,09	10,55	17,95	Pehlivanlı Mahallesi tarafında köprü bağıntı noktası ve tempan duvarın katılımıyla düşey öteleme hareketi	15,72	15,75
4	Köprü gövdesi düşey burulma hareketi	13,23	14,81	19,46	Pehlivanlı Mahallesi tarafında köprü bağıntı noktası ve tempan duvarın katılımıyla düşey burulma hareketi	19,98	20,26

Pehlivanlı Köprüsü' nün bulunduğu bölgenin sismik olarak aktif bir alan olduğuna dair açıklamalar Bölüm 3.2' de sunulmuştur. Operasyonel modal analiz uygulamaları sonucunda elde edilen ve Çizelge 4.4'de toplu olarak sunulan modal frekans değerlerinin yapının sismik davranışının yorumlanması amacıyla kullanılması önem arz etmektedir. Bu noktada, deprem tasarım spektrumu olarak tanımlanan grafiklerin kullanılması mümkündür.

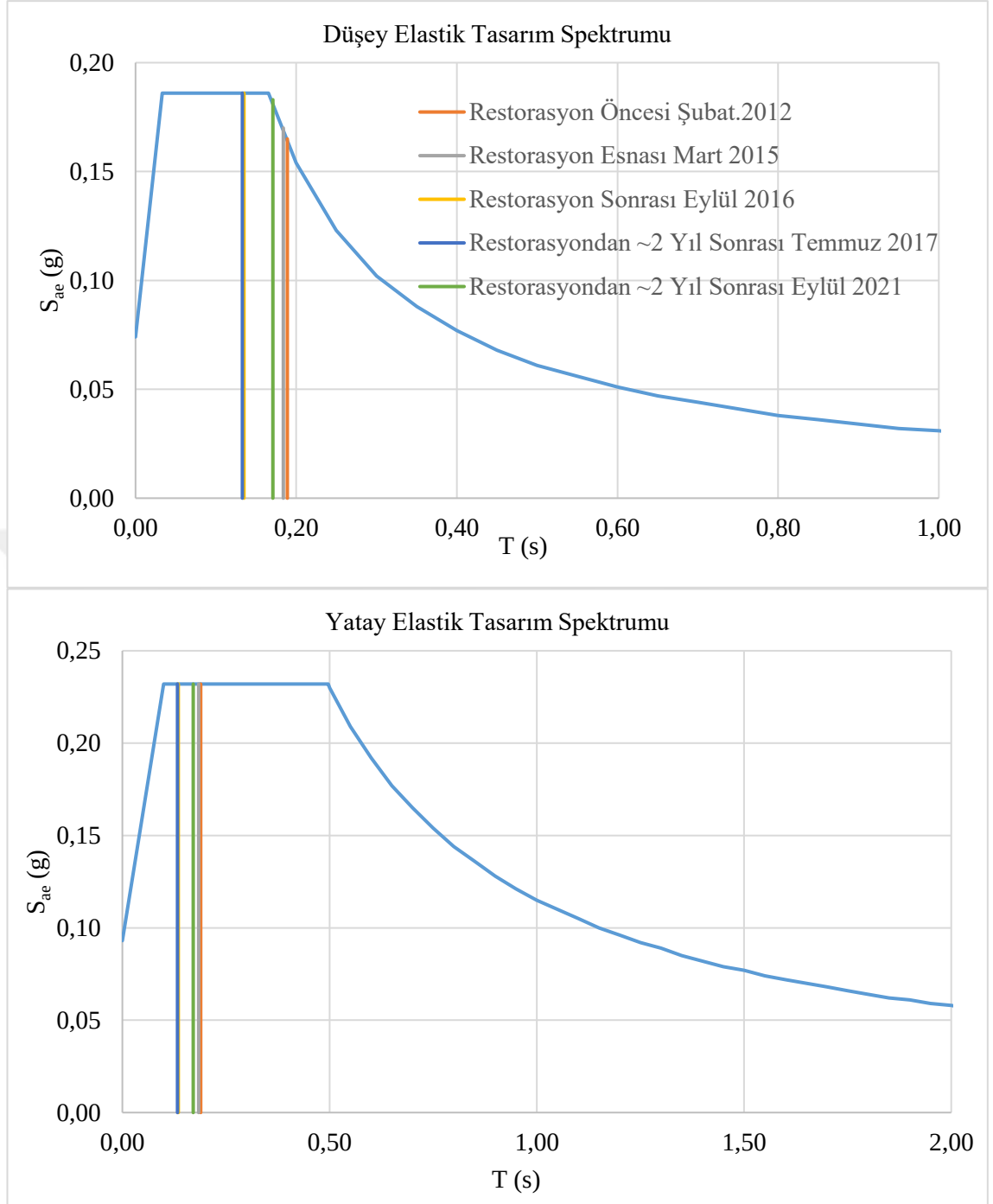
Tasarım spektrumları, yeni yapıların tasarımında kullanılacak deprem yükünü belirlemekte kullanılır. Başka bir deyişle, tasarım spektrumu, kaydedilmiş bir deprem için değil, gelecekte ortaya çıkması olası depremler için belirlenir. Doğaldır ki, bir bölgede, gelecekte ortaya çıkması olası depremlere ilişkin bir tasarım spektrumu hazırlamak için, aynı bölgede geçmişte ortaya çıkmış depremlerden yararlanılır. Eğer, o bölgede, geçmişte yeteri kadar kayıt elde edilememişse, bu durumda benzer özelliklere sahip (deprem odağının kayıt yerinden olan uzaklığı, fay mekanizması, sismik dalgaların yayıldığı zemin cinsi ve yerel zemin koşulları gibi) başka bir bölgede elde edilmiş kayıtlardan yararlanılır. Yapılmış olan çalışmalar neticesinde Türkiye Deprem Tehlike Haritası oluşturulmuş olup tüm bu verilere AFAD uygulaması üzerinde sunulan bu harita üzerinden ulaşılabilmektedir.

Depremde her yapı, bir yapısal davranış karakteristiği olarak kabul edilen, doğal titreşim periyoduna bağlı olarak deprem tasarım spektrumundaki yerini alır ve depremde maruz kalacağı spektral ivme doğal titreşim periyoduna bağlı olarak belirlenir. AFAD uygulaması üzerinden Pehlivanlı Köprüsü' nün bulunduğu konuma ait yatay ve düşey elastik tasarım spektrumları elde edilmiş ve Şekil 4.6'da sunulmuştur. Köprü'nün bulunduğu bölge zeminin kumlu-çakıllı bir zemin olduğu Bayraktar (2012) çalışmasında rapor edilmektedir. Spektrum için hesaplamalar yapılırken bu tanıma uygun olarak zemin sınıfı ZD olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.3'de sunulan köprü'nün birinci mod şekillerine ait frekanslarına karşılık gelen doğal titreşim periyotları Çizelge 4.5'te özetlenmiş ve bu değerler Şekil 4.6'da sunulan spektrumlar üzerinde gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Pehlivanlı Köprüsü operasyonel modal analiz uygulaması ile elde edilen birinci mod şekillerine ait doğal titreşim periyotları.

Uygulama Dönemi:	Restorasyon Öncesi <i>Şubat 2012</i>	Restorasyon Esnası <i>Mart 2015</i>	Restorasyon Sonrası <i>Eylül 2016</i>	Restorasyondan ~2 Yıl Sonrası <i>Temmuz 2017</i>	Restorasyondan ~2 Yıl Sonrası <i>Eylül 2021</i>
Periyot (sn)	0,189	0,184	0,135	0,133	0,171



Şekil 4.6. Pehlivanlı Köprüsü' nün bulunduğu bölge için AFAD üzerinden hesaplanan yatay ve düşey elastik deprem tasarım spektrumları.

Çizelge 4.5 incelendiğinde köprünün doğal titreşim periyodunun restorasyonun tamamlandığı dönemde 0,133 saniye ile en düşük değerini alırken, tempan duvarda meydana gelen hasar neticesinde periyotta artış meydana geldiği ve bu değer Eylül 2021 dönemi itibariyle 0,171 saniye olarak tespit edildiği görülmektedir. Köprünün restorasyon öncesinden son çalışmanın yapıldığı döneme kadar değişim gösteren periyot değerleri Şekil 4.6'da sunulan spektrum grafikleri üzerine işlenmiştir. Restorasyon ve sonrasında

onarım uygulamaları ile değişen periyot değerlerinin değerlerin yatay elastik tasarım spektrumu üzerinde köprünün maruz kalabileceği spektral ivme değerini değiştirmedeği ve bu değer 0,232g olduğu görülmektedir.

Köprü doğal titreşim periyodundaki 0,133 – 0,189 saniye aralığındaki değişimin düşey elastik tasarım spektrumu üzerinde spektral ivme değerini değiştirdiği görülmektedir. Restorasyon öncesindeki durumda ~0,147g düşey spektral ivmeye maruz kalması beklenen köprünün, restorasyondan hemen sonra ~0,186g ve Eylül 2021 dönemi itibariyle hasarlı durumda ise ~0,188g mertebesinde bir düşey spektral ivmeye maruz kalabileceği görülmektedir.

Köprünün bulunduğu bölgede incelenen Pehlivanlı Köprüsü üzerinde gerçekleştirilen restorasyon ve onarım uygulamalarının yatay elastik tasarım spektrumu üzerinden hesaplanan spektral ivme değerinin değiştirmedeğini; ancak, düşey elastik tasarım spektrumu üzerinden hesaplanan ivme değerinin restorasyon sonrası periyotta meydana gelen düşme ile birlikte arttığı ve tempan duvardaki hasara bağlı olarak periyottaki artışa istinaden ~0,188g değerinden ~0,186g mertebesine düştüğü görülmektedir. Burada yapılan değerlendirmeler köprünün muhtemel bir depremde maruz kalabileceği spektral ivme ve dolayısıyla deprem kuvvetleri ile ilgilidir. Köprünün sismik yük taşıma kapasitesi bu çalışmanın konusu olmadığından bu konuda bir değerlendirme yapılmamaktadır. Pehlivanlı Köprüsü' nün sismik yük taşıma kapasitesi konusunda Özkaya (2019) çalışması önemli bir kaynak olarak değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.4'de toplu olarak sunulan operasyonel modal analiz sonuçları esasen bu uygulama ile tarihi bir köprü üzerinde yapı sağlığı izlemesi yapılabileceği sonucunu ortaya çıkarmaktadır. İlgili literatürde operasyonel modal analiz uygulaması ile bu tez çalışması kapsamında üzerinde araştırma yapılan Pehlivanlı Köprüsü' ne benzer şekilde yapı sağlığı inceleme ve takibine yönelik çalışmalara erişim sağlanması mümkündür.

Restorasyondan 2 yıl sonra yapılan operasyonel modal analiz uygulaması ile başlangıçta çok görünür olmayan ama sonrasında belirgin hale gelen tempan duvar hasarı mod şekillerindeki değişim ile birlikte tespit edilmiştir. Bir başka ifadeyle, operasyonel modal analiz uygulaması sonucunda tarihi bir yapı üzerinde hasar tespiti yapılabilmektedir.

Bunun teknik olarak mümkün olduğu, Aguilar et al. (2012) çalışması ile de desteklenmektedir. Söz konusu çalışmada uzun süre kullanılmayan ve yapımı 19. yüzyıla tarihlenen bir otel yapısı üzerinde gerçekleştirilen operasyonel modal analiz uygulaması ile hasar tespiti yapıldığı ifade edilmektedir. Benzer bir çalışmanın Scozzese et al. (2019) metninde rapor edildiği görülmektedir. Bu çalışmada 2013 yılındaki bir selde iki açıklığı yıkılan çok açıklıklı Rubbianello kemer köprüsü' nün ayakta kalan kısmı üzerinde operasyonel modal analiz uygulaması ile dinamik kimliklendirme çalışması yapıldığı ve ayakta kalan kısmının hasar durumu, yapı sağlığı üzerine değerlendirmeler yapıldığı ifade edilmektedir. Ramos et al. (2010) çalışmasında ise yapımı 16. yüzyıla tarihlenen Lizbon'daki Jerónimos Manastırı Kilisesi'nin yapı sağlığı takibinin Operasyonel Modal Analiz uygulaması ile yapılmasına ilişkin çalışma detayları sunulmaktadır. Sampaio et al. (2021) çalışması ise operasyonel modal analiz uygulamasının eski eserlerde yapı sağlığı takibi amacıyla kullanılabilecek tahribatsız bir yöntem olduğu sonucunu ortaya koyan çalışmaların derlendiği ve bu tez çalışmasında yapılan uygulamalardan elde edilen sonuçları destekler nitelikte, güncel bir eser olarak değerlendirilmektedir.

4.2. Teorik Modal Analiz Sonuçlarının Kendi İçerisinde Değerlendirilmesi

Bu tez çalışması kapsamında Pehlivanlı Köprüsü' nün dinamik davranış parametrelerinin operasyonel modal analiz uygulaması ile deneysel olarak elde edilmesi ile köprü üzerinde gerçekleştirilen restorasyon ve onarım uygulamalarının modal davranış parametreleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma esasen bir *deneysel* çalışmadır. Ancak, operasyonel modal analiz uygulaması ile dinamik kimliklendirme çalışmasının birinci aşaması yapının ortam titreşimlerine verdiği tepkilerin ölçülmesini gerektirir. Bu ölçümlerin alınabilmesi için yapı üzerinde uygun noktalara sensör yerleşimi yapılmalıdır ki; bu uygulama sensör yerleşim planının çıkarılmasını zorunlu kılar. Sensör yerleşim planı ise yapının sonlu elemanlar modeli üzerinde gerçekleştirilen teorik modal analiz sonucu hesaplanan mod şekilleri uyarınca çıkarılır (Okuyucu 2020). Bu nedenle, tez çalışmasının ilk safhasında Pehlivanlı Köprüsü' nün ortam titreşimlerine verdiği tepkilerin ivme cinsinden ölçülebilmesi için bir sensör yerleşim planı çıkarılması amacıyla yapının SAP2000 (2018) yazılımı kullanılarak hazırlanan sonlu eleman modeli üzerinde teorik modal analiz çalışması

yapılmıştır. Sonlu eleman modelinin oluşturulması safhasına ilişkin detay bilgi ise Bölüm 3.4’ te sunulmuştur.

Köprü yapısı üzerindeki dinamik kimliklendirme çalışmaları tamamlandıktan sonra köprünün Pehlivanlı Köyü tarafındaki tempan duvarındaki hasara bağlı olarak mod şekillerinin değiştiği görülmüştür. Çalışma her ne kadar deneysel modal analiz üzerine kurgulanmış olsa da; literatürde muhtelif çalışmalarda da incelenmiş olan Pehlivanlı Köprüsü’ nün hasarsız ve hasarlı durumlarını temsil eden sonlu eleman modeli üzerinde teorik modal analizler yapılarak davranış ayrıca nümerik olarak incelenmiştir.

Pehlivanlı Köprüsü’ nün “hasarsız durum” olarak tanımlanan dönemi restorasyon öncesi, esnası ve restorasyondan hemen sonraki durumunun incelendiği dönemdir. Literatürde yer alan çalışmaların Pehlivanlı Köprüsü’ nün hasarsız durumunu temsil eden sonlu elemanlar modeli üzerindeki analizleri konu edindiğini ifade etmek mümkündür. Ancak, bu tez çalışması kapsamında köprünün restorasyonunun tamamlanmasından yaklaşık iki yıl sonra “hasarlı duruma” geçtiği ve modal davranış parametrelerinin değiştiği tespit edilmiştir. Bu nedenle köprü için üretilen sonlu elemanlar modeli hasarlı durumu temsil edecek şekilde güncellenmiş ve bu model üzerinde teorik modal analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Sonlu elemanlar modeli üzerindeki teorik modal analiz çalışmaları hakkında bilgi sunulmadan önce Çoruhlu (2017) çalışmasının Pehlivanlı Köprüsü için değerlendirilmesinde yarar görülmektedir. Bu çalışma sonucunda tek açıklıklı tarihi yığma kemer köprüler için kemer yüksekliği (h), köprü yüksekliği (H), kemer açıklığı (l) ve köprü uzunluğu (L) parametrelerine bağlı olarak birinci modal frekansın hesaplanması için kullanılacak Denklem (4.2) bağıntısı önerilmiştir.

$$f_1 = 35,28938 - 2,23815*h + 0,969321*H - 0,52579*l - 0,23352*L \quad (4.2)$$

Pehlivanlı Köprüsü için Denklem (4.2) kullanılarak ($h=9,40m$, $H=11,13m$, $l=15,17m$, $L=20,67m$) birinci modal frekans değeri $f_1=12,24$ Hz olarak hesaplanmıştır. Operasyonel modal analiz uygulaması ile restorasyondan hemen sonraki hasarsız durum için birinci modal frekans deneysel olarak $f_1= 7,42$ Hz olarak belirlenmiştir. Çoruhlu

(2017) tarafından önerilen Denklem (4.2) ile hesaplanan birinci modal frekans değerinin deneysel olarak tespit edilen değerin 1,65 katı olduğu görülmektedir. Bu farkın Denklem (4.2)'nin çok sayıda tek açıklı kemer köprüünün sonlu elemanlar modeli üzerinde gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçları kullanılarak üretilmiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.2.1. Restorasyon sonrası hasarsız durumu temsil eden sonlu elemanlar model üzerindeki çalışmalar

Pehlivanlı Köprüsü sonlu elemanlar modeli 8 noktalı katı elemanlar kullanılarak makro modelleme tekniği ile SAP2000 (2018) yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Literatürde muhtelif çalışmalara konu olan Pehlivanlı Köprüsü yığma malzeme özellikleri için farklı kabuller yapıldığı görülmekte ve bu değerler Çizelge 4.6'da toplu bir şekilde sunulmaktadır.

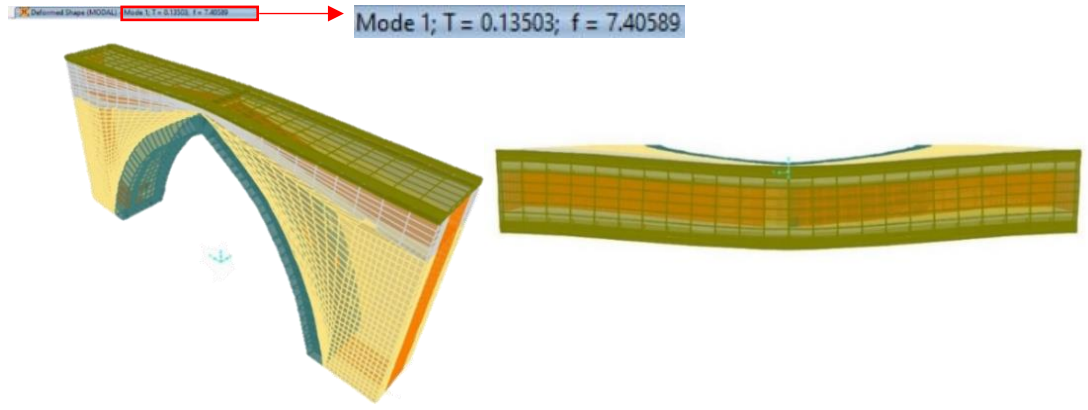
Çizelge 4.6. Literatürdeki muhtelif çalışmalarda Pehlivanlı Köprüsü için yapılan hesaplamalarda kullanılan malzeme özellikleri.

<i>Malzeme Özellikleri</i>		<i>Elastik Modül (MPa)</i>	<i>Poisson Oranı</i>	<i>Kütle Yoğunluğu (kg/m³)</i>
Bu tez çalışması	Kemer	2109	0,20	2350
	Gövde	2209	0,20	2350
	Dolgu	1800	0,15	1600
(Özkaya 2019)	Kemer	3000	0,20	2350
	Gövde	3000	0,20	2350
	Dolgu	2000	0,15	1600
(Bayraktar 2012)	Kemer	10740	0,20	2350
	Gövde	10740	0,20	2350
	Dolgu	8593	0,15	1600
(Çoruhlu 2017)	Kemer	3000	0,20	2400
	Gövde	2500	0,20	2400
	Dolgu	1500	0,05	1600

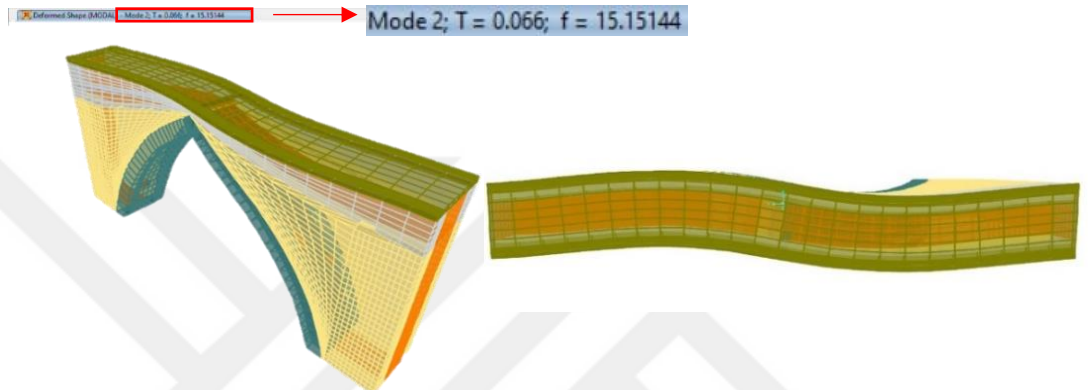
Çalışmanın bu bölümünde hasarsız durumu temsil eden sonlu elemanlar modeline Çizelge 4.6'nın birinci bölümünde sunulan ve Bölüm 3.3' te detayı sunulan Schmidt çekici uygulaması ile hesaplanan malzeme mekanik özellikleri kullanılarak

gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçları sunulmaktadır. Şekil 4.7’de bu çalışma sonucunda hesaplanan mod şekilleri ve modal frekanslar görsel olarak sunulmaktadır.

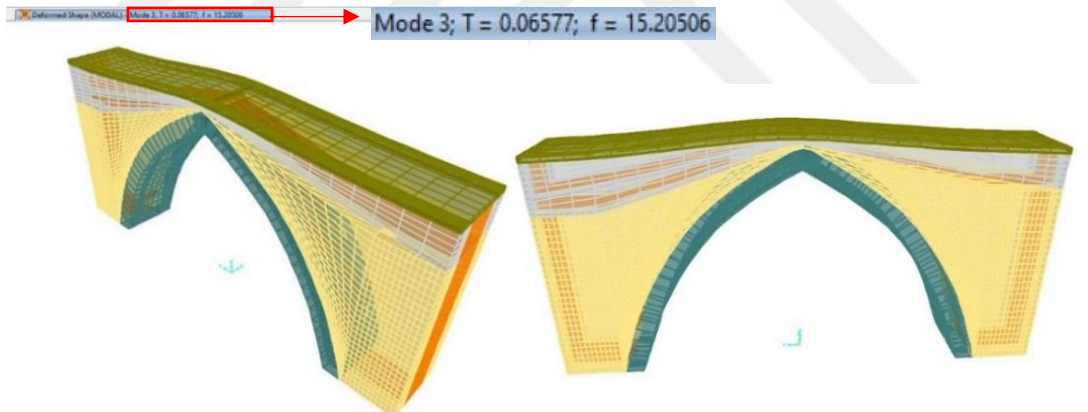




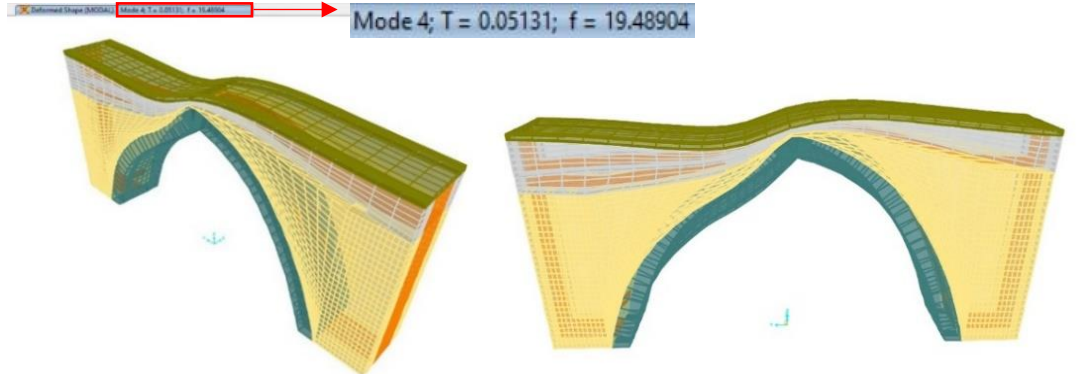
a) Mod-1 Yanal öteleme hareketi



b) Mod-2 Yanal burulma hareketi



c) Mod-3 Düşey öteleme hareketi



d) Mod-4 Düşey burulma hareketi

Şekil 4.7. Pehlivanlı Köprüsü hasarsız durumunu temsil eden sonlu elemanlar modeli üzerinde hesaplanan mod şekilleri ve modal frekanslar.

Şekil 4.7 incelendiğinde, teorik modal analiz ile hesaplanan mod şekillerinin operasyonel modal analiz ile hasarsız durum için tespit edilen mod şekilleri ile birebir örtüştüğü görülmektedir. Bununla birlikte, Bölüm 3.3’ te detayı sunulan yöntem ile tahribatsız bir şekilde hesaplanan malzeme özellikleri kullanılarak gerçekleştirilen teorik modal analiz sonucunda hesaplanan frekans değerlerinin de deneysel sonuçlara oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu noktada teorik ve deneysel modal frekanslar arasındaki farkın sadece bu tez çalışması kapsamında tayin edilen yığma malzeme özellikleri üzerinden değerlendirilmesinin yetersiz olacağı düşünülmektedir. Bu nedenle, Çizelge 4.6’da sunulan tüm çalışmalarda kullanılan malzeme özellikleri bu tez çalışmasında hazırlanan sonlu elemanlar modeline girilerek hepsi için ayrı ayrı teorik modal analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma neticesinde elde edilen teorik modal frekans değerleri toplu olarak Çizelge 4.7’de sunulmaktadır.

Çizelge 4.7. Literatürde kullanılan farklı malzeme özellikleri için tez çalışması kapsamında oluşturulan Pehlivanlı Köprüsü sonlu elemanlar modeli üzerinde gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçları.

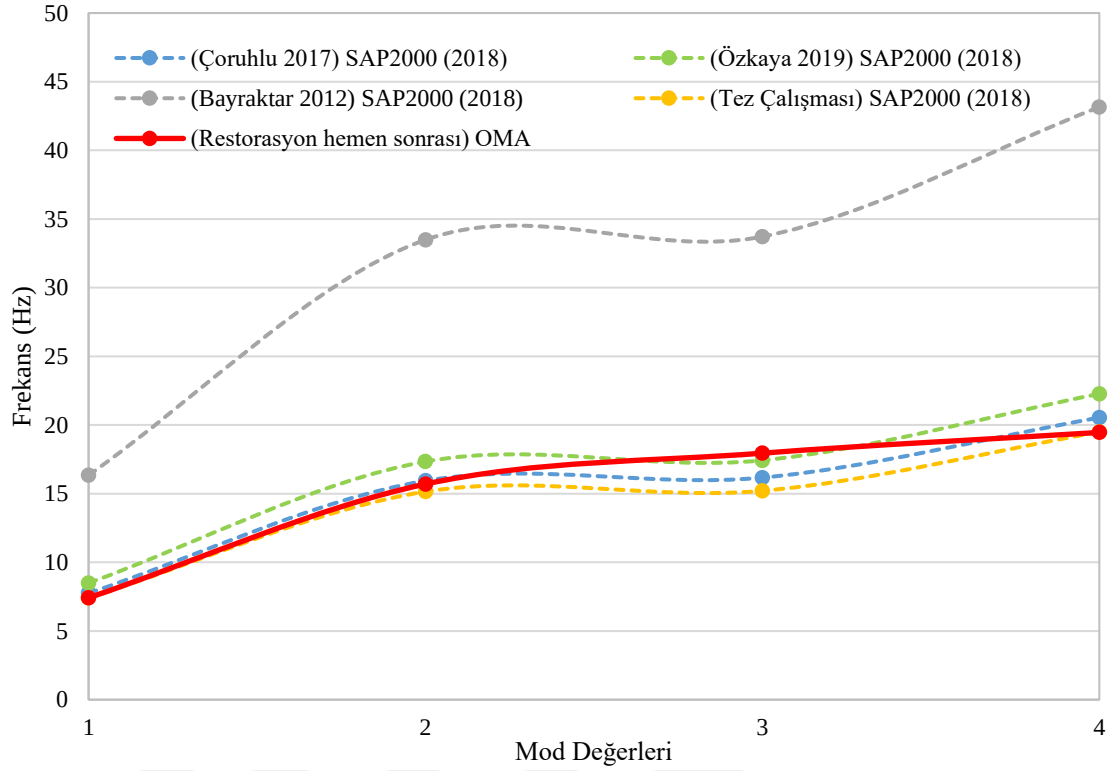
Mod	Mod Şekli	(Çoruhlu, 2017)	(Özkaya 2019)	(Bayraktar 2012)	Bu Tez Çalışması	Operasyonel Modal Analiz (Restorasyon hemen sonrası)
1	Köprü gövdesi yanal öteleme hareketi	7,76	8,50	16,35	7,41	7,42
2	Köprü gövdesi yanal burulma hareketi	15,94	17,34	33,49	15,15	15,70
3	Köprü gövdesi düşey öteleme hareketi	16,17	17,43	33,72	15,21	17,95
4	Köprü gövdesi düşey burulma hareketi	20,54	22,27	43,15	19,49	19,46

Çizelge 4.7’de sunulan teorik modal frekans değerleri ile operasyonel modal analiz sonuçları arasındaki % farklar hesaplanarak Çizelge 4.8’de sunulmuştur.

Çizelge 4.8. Literatürde kullanılan farklı malzeme özellikleri için tez çalışması kapsamında oluşturulan Pehlivanlı Köprüsü sonlu elemanlar modeli üzerinde gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçları ile operasyonel modal analiz sonuçları arasındaki (%) fark değerleri.

Mod	Mod Şekli	(Çoruhlu, 2017)	(Özkaya 2019)	(Bayraktar 2012)	Bu Tez Çalışması	Operasyonel Modal Analiz (Restorasyondan hemen sonra)
1	Köprü gövdesi yanal öteleme hareketi	4,6	14,6	120,4	0,1	Referans
2	Köprü gövdesi yanal burulma hareketi	1,5	10,4	113,3	3,5	Referans
3	Köprü gövdesi düşey öteleme hareketi	9,9	2,9	87,9	15,3	Referans
4	Köprü gövdesi düşey burulma hareketi	5,5	14,4	121,7	0,2	Referans

Çizelge 4.8 incelendiğinde deneysel modal frekans değerlerine en yakın teorik modal analiz sonuçlarının bu tez çalışması kapsamında tayin edilen malzeme özellikleri ile elde edildiği görülmektedir. Bu analiz için farklar %0,1 - %15,3 arasında değişmektedir. İkinci en yakın teorik modal frekans değerleri ise %1,5 - %9,9 arasında değişen farklarla Çoruhlu (2017) çalışmasında kullanılan malzeme özellikleri ile hesaplanan değerler olmuştur. Bayraktar (2012) çalışmasında kullanılan malzeme özelliklerinin %122' ye varan fark değerleri ile restorasyon sonrası durumu temsil etmekten oldukça uzak olduğu görülmektedir. Bu durumun grafiksel bir sunumu ise Şekil 4.8'de sunulmaktadır.



Şekil 4.8. Literatürde kullanılan farklı malzeme özellikleri için tez çalışması kapsamında oluşturulan Pehlivanlı Köprüsü sonlu elemanlar modeli üzerinde gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçlarının grafik halinde gösterimi.

4.2.2. Restorasyon sonrası hasarlı durumu temsil eden sonlu eleman modeli üzerindeki çalışmalar

Pehlivanlı Köprüsü restorasyon çalışmaları tamamlandıktan 2 yıl sonra yapılan saha çalışması ve operasyonel modal analiz uygulamasında köprünün Pehlivanlı Köyü tarafındaki tempan duvarında dolgu çökmesine bağlı hasar olduğu ve bu hasarın mod şekillerini ve modal frekansları değiştirdiği tespit edilmiştir. Sonrasında bir onarım yapılmışsa da restorasyondan 6 yıl sonra yapılan operasyonel modal analiz çalışmasında mod şekillerinin hasarlı durumu temsil eder şekilde aynı kaldığı belirlenmiştir.

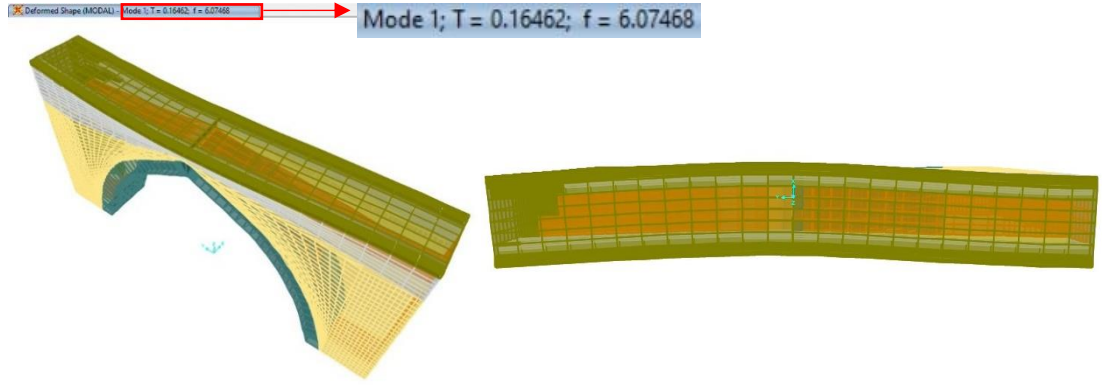
Bu durumun teorik modal analiz ile sonlu elemanlar modeli üzerinde çalışılması amacıyla hasarsız durumu temsilen oluşturulan sonlu eleman modelinin kalibre edilmesi yoluna gidilmiştir. Zira, köprünün mevcut durumu hasarlıdır. Mod şekilleri restorasyon sonrası hasarsız durumdan farklı olacak şekilde değişmiştir. Köprünün mevcut durumu için statik ya da dinamik etkiler altında yapısal davranışın incelenmesi amacıyla

gerçekleştirilecek bir analizin hasarlı durumu temsil eden kalibre bir sonlu elemanlar modeli üzerinde yapılması gerektiği açıktır.

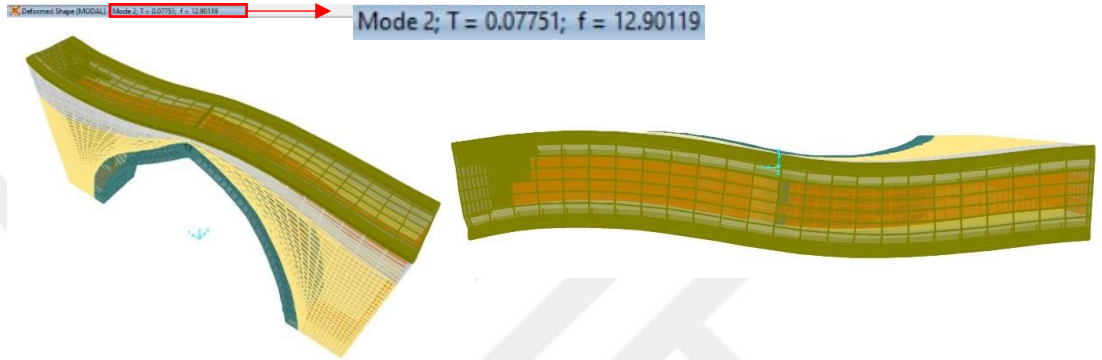
Sonlu eleman modellerinin deneysel modal analiz sonuçlarına mümkün olduğu kadar yakın teorik modal analiz sonucu verecek şekilde kalibre edilmesi mümkündür. Bu amaçla modelin geometrisinin kontrol edilmesi, malzeme özelliklerinin değiştirilmesi ve mesnet koşullarının güncellenmesi şeklinde uygulamalar yapılmaktadır (Okuyucu 2020).

Pehlivanlı Köprüsü hasarlı durumunu temsil eden SAP2000 (2018) modeli hasarsız durumu temsil eden model üzerinde hasarlı bölge elemanlarının elastik modülü ve mesnet koşulları değiştirilmesi suretiyle oluşturulmuştur. Öncelikle hasarlı bölge için yeni bir katı kesit ve malzeme tanımlanmış ve malzeme elastik modülü hasarsız durum için atanan değerlerin yaklaşık 0,1 katı olarak tanımlanmıştır. Hasarlı durumu temsilen üretilen sonlu eleman modeli üzerinde gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçları mod şekilleri ile birlikte Şekil 4.9’da sunulmaktadır.

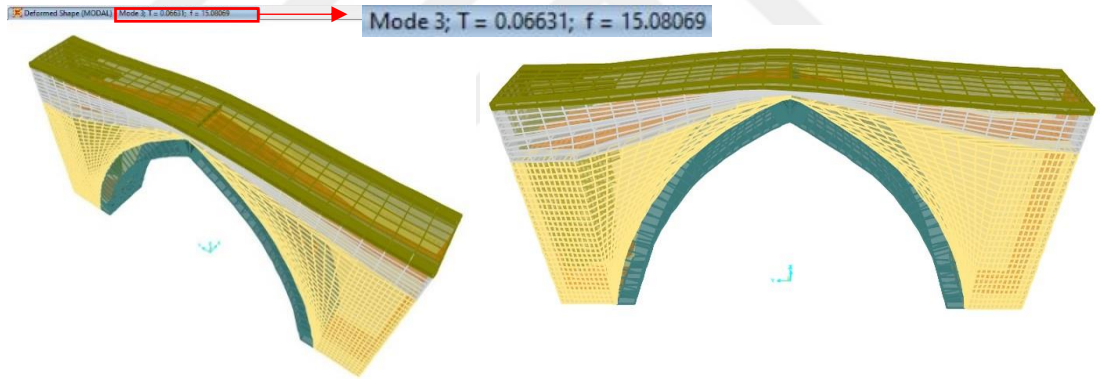
Sonlu eleman model kalibrasyonu için malzeme elastik modül değerlerinin değiştirilmesi uygulaması literatürde sıklıkla karşılaşılan bir uygulamadır. Bu amaçla tarihi yapılar için üretilen sonlu eleman model kalibrasyonu uygulamalarını içeren çalışmalara Özdoğan (2018), Kocaman vd (2018), Genç vd (2019), Aslay ve Okuyucu (2020), çalışmaları örnek olarak gösterilebilir.



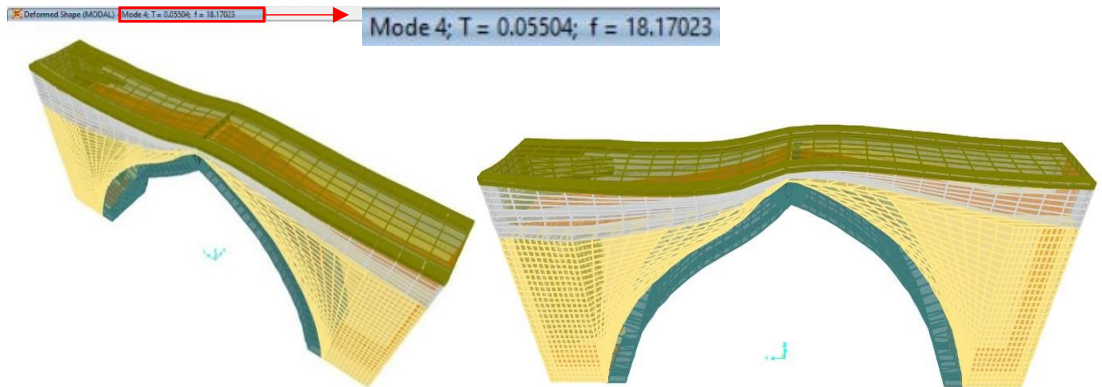
a) Mod-1 Pehlivanlı Mahallesi tarafı tepman duvarın katılımıyla köprü gövdesi yanal hareketi



b) Mod-2 Pehlivanlı Mahallesi tarafı tepman duvar katılımıyla yanal burulma hareketi



c) Mod-3 Pehlivanlı Mahallesi tarafı tepman duvar katılımıyla düşey öteleme hareketi



d) Mod-4 Pehlivanlı Mahallesi tarafı tepman duvar katılımıyla düşey burulma hareketi

Şekil 4.9. Pehlivanlı Köprüsü' nün hasarlı durumunu temsil eden sonlu eleman modeli üzerinde gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçları.

Şekil 4.9’da görsel olarak sunulan teorik modal analiz sonuçları Eylül 2021 döneminde gerçekleştirilen operasyonel modal analiz uygulaması ile elde edilen deneysel modal analiz sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.9’da sunulmuştur.

Çizelge 4.9. Pehlivanlı Köprüsü hasarlı durumunu temsil eden sonlu eleman modeli üzerinde gerçekleştirilen teorik modal analiz sonuçları ile restorasyondan 6 yıl sonra gerçekleştirilen operasyonel modal analiz sonuçları.

Mod	Teorik Modal Analiz		Operasyonel Modal Analiz		Frekans Farkı (%)
	Mod Şekli	Frekans (Hz)	Mod Şekli	Frekans (Hz)	
1	Pehlivanlı Mahallesi tarafında köprü bağıntı noktası ve tempan duvarın katılımıyla köprü gövdesinin yerel yanal öteleme hareketi	6,07	Pehlivanlı Mahallesi tarafında köprü bağıntı noktası ve tempan duvarın katılımıyla köprü gövdesinin yerel yanal öteleme hareketi	5,86	3,6
2	Pehlivanlı Mahallesi tarafında köprü bağıntı noktası ve tempan duvarın katılımıyla yanal burulma hareketi	12,90	Yanal burulma hareketi	11,21	15,1
3	Pehlivanlı Mahallesi tarafında köprü bağıntı noktası ve tempan duvarın katılımıyla dikey öteleme hareketi	15,08	Pehlivanlı Mahallesi tarafında köprü bağıntı noktası ve tempan duvarın katılımıyla dikey öteleme hareketi	15,75	4,3
4	Pehlivanlı Mahallesi tarafında köprü bağıntı noktası ve tempan duvarın katılımıyla düşey burulma hareketi	18,17	Pehlivanlı Mahallesi tarafında köprü bağıntı noktası ve tempan duvarın katılımıyla düşey burulma hareketi	20,26	10,3

Çizelge 4.9 incelendiğinde hasarlı durumu temsilen oluşturulan sonlu elemanlar modeli üzerinden teorik olarak hesaplanan mod şekillerinin deneysel olarak elde edilen mod şekilleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, teorik ve deneysel frekanslar arasındaki farkın %3,6 - %15,1 arasında değiştiği görülmektedir. Hasarlı durumu temsilen oluşturulan sonlu eleman modelinin muhtelif statik ve dinamik analizlerle köprü davranışının incelenmesi çalışmalarında kullanılabileceği düşünülmektedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında Erzurum ili sınırları içerisinde yer alan tarihi Pehlivanlı Köprüsü dinamik davranış parametrelerinin restorasyon öncesi, restorasyon esnası ve restorasyon sonrası dönemlerde operasyonel modal analiz yöntemi ile elde edilmesi ve incelenmesine dair bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlara istinaden geliştirilen öneriler aşağıda sıralanmaktadır.

- Operasyonel Modal Analiz uygulaması ile Pehlivanlı Köprüsü dinamik davranış parametreleri tahribatsız bir şekilde deneysel olarak elde edilebilmiştir.
- Restorasyon uygulamasının Pehlivanlı Köprüsü mod şekillerinde bir değişim meydana getirmemekle birlikte modal frekanslarda restorasyon öncesi döneme göre artışa neden olduğu görülmüştür. Frekans değerlerindeki artışın köprü kütlesindeki azalma ile köprü rijitliğindeki artışın ortaklaşa bir sonucu olduğu değerlendirilmiştir.
- Restorasyon uygulamasından yaklaşık iki yıl sonra Pehlivanlı Köyü tarafındaki tempan duvarda meydana gelen hasar nedeniyle köprünün modal davranışının hasarı gösterir şekilde değiştiği operasyonel modal analiz sonucunda tespit edilmiştir. Bu durum, operasyonel modal analiz uygulaması ile benzer köprülerde hasar tespitinin yapılabileceği sonucunu ortaya çıkarmıştır.
- Tempan duvarda meydana gelen çökmenin ilave dolgu uygulaması ile onarımı köprünün hasarlı durumundaki modal davranışını hasarsız durumdaki modal davranışına çevirmemiş; ancak, uygulama ile birinci modal frekansta artış meydana geldiği tespit edilmiştir.
- Çalışma neticesinde Pehlivanlı Köprüsü benzeri tarihi köprülerde periyodik olarak yapılacak operasyonel modal analiz uygulamasından elde edilecek dinamik davranış parametreleri üzerinden bir yapı sağlığı izlemesi yapılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonucun desteklenmesi için daha fazla sayıda köprü üzerinde benzer çalışmanın yapılması önerilmektedir.

- Köprü elemanlarının mekanik özelliklerinin tahribatsız olarak ultrases geçiş hızı yöntemiyle tayin edilmesi mümkün olmamıştır. Buna köprü elemanları içerisindeki boşluklu yapının neden olduğu düşünülmektedir.
- Köprü malzemesi için mekanik özelliklerin tayininde Schmidt çekici uygulaması ile başlayan ve detayı tez metninde sunulan yöntemin başarılı sonuç verdiği ifade edilebilmektedir. Zira, bu yöntemle elde edilen malzeme mekanik özellikleri ile sonlu elemanlar modeli üzerinde yapılan teorik modal analiz aynı durumu temsilen gerçek yapı üzerinde yapılan operasyonel modal analiz ile oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Ancak, uygulamanın daha fazla sayıda tarihi köprü üzerinde tekrarlanması gerekli görülmekte ve önerilmektedir.
- SAP2000 (2018) yazılımı kullanılarak oluşturulan sonlu eleman modelinin köprünün hasarlı durumunu temsil edecek şekilde kalibre edilmesi mümkün olmuştur. Bu aşamada hasarlı bölgedeki malzeme özelliklerinin değiştirilmesi yeterli olmamış, mesnet koşulları da güncellenmiştir.
- Restorasyondan iki yıl sonra meydana gelen tempan duvar dolgusunda çökme için *ilave dolgu yapma* şeklindeki onarımın tempan duvar-köprü gövdesi birleşimindeki ayrışmayı artırdığı ve bu bölgedeki çatlak genişliklerinde önemli ölçüde artışa neden olduğu görülmüştür. *Onarımın getirdiği bu hasar tarihi köprülerde her türlü müdahalenin son derece kapsamlı değerlendirmeler sonucunda yapılması gerektiği sonucunu bir kez daha ortaya koymuştur.*
- Hasar gören tempan duvarın mevcut durumunun teknik olarak değerlendirilmesi ve Poisson etkisi ile oluşan yanal itkiler nedeniyle oluşan çatlak ve ayrışmaların desteklenmesi amacıyla yapısal müdahalelerin çalışılması gerektiği düşünülmektedir.
- Pehlivanlı Köprüsü' nün hasarlı durumda olması ve onarım sonrasında dolgunun tekrar çökmüş olması nedeniyle operasyonel modal analiz uygulaması ile köprü yapı sağlığı takibinin gelecekte de yapılması gerektiği düşünülmekte ve önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Aguilar, R., Torrealva, D., Ramos, L. F., Lourenço, P. B. 2012. Operational Modal Analysis Tests On Peruvian Historical Buildings: The Case Study Of The 19th Century Hotel Comercio, In 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon Portugal.
- Alparslan, E., Dinç, B., Karaca, Z., Birinci, F., Köktan, U. 2017. Tek Açıklıklı Yığma Bir Köprü'nün Modal Parametrelerinin Araştırılması, 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-14 Ekim, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Alpaslan, E. 2019. Tarihi yığma köprü hasarlarının analitik model ve deneysel yöntemlerle belinmesi. Doktora Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 240, Samsun.
- Anonim, 2011. Karayolları 12. Bölge Müdürlüğü Pehlivanlı Köprüsü Rölöve Çizimleri. Erzurum, Türkiye.
- Anonim, 2013. Web Sitesi: <https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/erzurum/gezilecekyer/cobandede-koprusu> Erişim Tarihi: 08/10/2021.
- Anonim 1, 2021. Web Sitesi: [Google Earth](https://earth.google.com/). 2021 tarihinde <https://earth.google.com/> Erişim Tarihi: 08/10/2021.
- Anonim 2, 2021. Web Sitesi: <http://www.gazeteguncel.com/kirecli-koprusu-yuzyillara-meydan-okuyor-124737h.htm> Erişim Tarihi: 09/10/2021.
- Anonim 3, 2021. Web Sitesi: <https://deprem.afad.gov.tr/tarihseldepremler> Erişim Tarihi: 09/10/2021.
- Anonim 4, 2021. Web Sitesi: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/yenilenmis-diri-fay-haritalari> Erişim Tarihi: 10/10/2021.
- Anonim 5, 2021. Web Sitesi: <https://www.turkiye.gov.tr/afad-turkiye-deprem-tehlike-haritalari> Erişim Tarihi: 10/10/2021.
- Anonim 6, 2021. Web Sitesi: http://www.svibs.com/resources/ARTEMIS_Modal_Help/Generic%20Modal%20Assurance%20Criterion%20Window.html Erişim Tarihi: 01/11/2021.
- Anthoine, A. 1997. Homogenization of periodic masonry: plane stress, generalized plane strain or 3d modeling. International Journal of Solids and Structures, 13(5), 319-326.
- Aoki, A., Komiyama, T., Sabia, D., Rivalla, D. 2004. Theoretical and Experimental Dynamic Analysis of Rakanji Stone Arch Bridge, Paper Presented at the 7th International Conference on Motion and Vibration Control, 4(9), Japan.

- Aras, F., Krstevska, L., Altay, G., Tashkov, L. 2011. Experimental and numerical modal analyses of a historical masonry palace. *Construction and Building Materials*, 1(25), 81-91.
- Artemis Modal Pro V. 7.0., Operational Modal Analysis Program, Erzurum Teknik Üniversitesi, 2021.
- Aslay, S. E., Okuyucu, D. 2020. Erzincan Değirmenliköy kilisesi apsis hasarının teknik olarak araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(1), 387-402.
- Ataei, S., Alikamar, M. J., Kazemiashtiani, V. (2016). Evaluation of axle load increasing on a monumental masonry arch bridge based on field load testing. *Construction and Building Materials*, 116, 413-421.
- Atamtürktür, S., Asce, M., & Sevim, B. (2012). Seismic performance assessment of masonry tile domes through nonlinear finite-element analysis. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 26(4), 410-423.
- Barbieri, D. M. 2019. Two methodological approaches to assess the seismic vulnerability of masonry bridges. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 6(1), 49-64.
- Bayraktar, A. 2012. Tarihi Erzurum Pehlivanlı (Kireçli) Köprüsü'nün Yapısal Güvenlik Değerlendirmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Sevim, B., Türker, T. 2009. Kömürhan Köprüsünün sonlu eleman model iyileştirmesi. *İMO Teknik Dergi*, 20(94), 4675-4700.
- Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Türker, T., Sevim, B., Ateş, Ş. 2014. Karayolu köprülerinin sonlu eleman modellerinin operasyonel modal analiz yöntemiyle iyileştirilmesi. *İMO Dergisi*, Trabzon.
- Bayraktar, A., Birinci, F., Altunışık, A. C., Türker, T., Sevim, B. 2009. Finite element model updating of senyuva historical arch bridge using ambient vibration tests. *The Baltic Journal of Road And Bridge Engineering*, 4(4), 177-185.
- Birinci, F. 2010. Taş kemer köprülerin sonlu eleman modellerinin operasyonel modal analiz yöntemiyle iyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 86, Trabzon.
- Brencich, A., Sabia, D. 2008. Experimental identification of a multi-span masonry bridge: the tanaro bridge. *Construction and Building Materials*, 22(10), 2087-2099.
- Callaway, P., Gilbert, M., Smith, C. C. 2012. Influence of backfill on the capacity of masonry arch bridges. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Bridge Engineering*, 165(3), 147-157.

- Conde, B., Ramos, L. F., Oliveira, D. V., Riveiro, B., Solla, M. 2017. Structural assessment of masonry arch bridges by combination of non-destructive testing techniques and three-dimensional numerical modelling: application to vilanova bridge. *Engineering Structures*, 148, 621-638.
- Costa, C., Ribeiro, D., Jorge, P., Silva, R., Arêde, A., Calçada, R. 2016. Calibration of the numerical model of a stone masonry railway bridge based on experimentally identified modal parameters. *Engineering Structures*, 123, 354-371.
- Çoruhlu, B. 2017. Doğu Karadeniz bölgesinde tek açıklıklı kemer köprüler için doğal frekans, yer değiştirme ve gerilme formülleri. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 208, Trabzon
- De Castro, Á. B., Aparicio, L., García, P., Ramos, L. F., Aguileraa, D. G. 2019. A multidisciplinary approach to calibrating advanced numerical simulations of masonry arch bridges. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 129, 337-365.
- Dönmez, C., Karakan, E. 2009. Köprülerde deneysel modal analiz uygulamaları. İMO Teknik Dergi, 20(99), 4851-4863.
- Eurocode 6, 1996. Design of Masonry Structures, 1995. Part 1.1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. European Committee for Standardization, ENV 1996-1-1:1995
- Fanning, P. J., Boothby, T. E. 2001. Three-Dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges. *Computers & Structures*, 79 (29-30), 2645-2662.
- Genç A. F., Ergün M., Günaydin M., Altunışık A. C., Ateş Ş., Okur F. Y., Mosallam A. S. 2019. Dynamic analyses of experimentally-updated fe model of historical masonry clock towers using site-specific seismic characteristics and scaling parameters according to the 2018 turkey building earthquake code. *Engineering Failure Analysis*, 105, 402-426.
- Güneş, S. 2017. Operasyonel modal analiz tekniği ile yığma yapıların dinamik davranışının belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 75, Ankara.
- Hoveidae, N., Fathi, A., Karimzadeh, S. 2021. Seismic damage assessment of a historic masonry building under simulated scenario earthquakes: a case study for Arge-Tabriz. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 147(3), 106732.
- Jacobsen, N.-J., Andersen, P. 2008. Operational Modal Analysis on Structures With Rotating Parts, In ISMA Conference.
- Jafarov, O., Köksal, H., Doran, O., Karakoç, C. 2012. An investigation on the nonlinear behavior of unreinforced masonry walls. *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 30, 133-143.

- Karbhari, V., Guan, H., Sikorsky, C. 2009. Operational modal analysis for vibration-based structural health monitoring of civil structures. *Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Systems*, 213-259.
- Kocaman, İ., Kazaz, İ., Okuyucu, D. 2018. Tarihi erzurum yakutiye medresesi'nin yapısal davranışının incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(58), 36-51.
- Kocaman, İ., Okuyucu, D., Kazaz, İ. 2019. Tarihi yapı malzeme özelliklerinin belirlenmesinde yeni bir yöntem önerisi: Lala Paşa Camii örneği. *Teknik Dergi*, 30(3), 9125-9146.
- Korkmaz, K. A., Zabin, P., Çarhoğlu, A. I., Nuhoglu, A. 2013. Taş kemer köprülerin deprem davranışının değerlendirilmesi: Timisvat Köprüsü örneği. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2(1), 66-75.
- Kujawa, M., Lubowiecka, I., Szymczak, C. 2020. Finite element modelling of a historic church structure in the context of a masonry damage analysis. *Engineering Failure Analysis*, 107, 104233.
- Kuşçu, İ., Kopar, İ., Bakırtaş, İ. 2019. Erzurum ilinde (türkiye) 1907-2018 yılları arasında kaydedilen $m \geq 3.0$ depremlerin mekânsal analizi. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 23(4), 1607-1624.
- Lourenço, P. B. 1996. Computational strategies for masonry structures. Delft University of Technology, PhD Thesis, the Netherlands.
- Milani, G., Lourenço, P. B. 2012. 3D non-linear behavior of masonry arch bridges. *Computers and Structures*, (110-111), 133-150.
- Nohutçu, H., Demir, A., Ercan, E., Hokelekli, E., Altıntaş, G. 2015. Investigation of a historic masonry structure by numerical and operational modal analyses. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 24, 821-834.
- Okuyucu, D. 2020. Tek katlı betonarme bir yapı üzerinde operasyonel modal analiz uygulaması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(3), 1404-1419.
- Okuyucu, D., Kanbur, A. Y. 2020. Damage Detection Of A Historic Bridge By Operational Modal Analysis, *Istanbul Bridge Conference (IBridge2020)*, 16-17 November, 112-118, Istanbul.
- Okuyucu, D., Kazaz, İ., Çodur, M. Y. 2016. Operasyonel modal analiz yöntemi kullanılarak tarihsel köprü sismik davranış parametrelerinin belirlenmesi. *Proje Koordinasyon Ofisi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Erzurum*
- Okuyucu, D., Kazaz, İ., Yücel, A., Çodur, M. 2016. Tarihi köprü sismik davranış parametrelerinin operasyonel modal analiz yöntemiyle belirlenmesi. *Erzurum Teknik Üniversitesi, Erzurum*.

- Oliveira, D. V., Lourenço, P. B., Lemos, C. 2010. Geometric issues and ultimate load capacity of masonry arch bridges from the northwest iberian peninsula. *Engineering Structures*, 32(12), 3955-3965.
- Oliveira, C. S. 2003. Seismic vulnerability of historical constructions: a contribution. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1(1), 37-82.
- Onat, O. 2020. Impact of mechanical properties of historical masonry bridges on fundamental vibration frequency. *Structures*, 27, 1011-1028.
- Özdoğan, D. B. 2018. Schmidt çekici test yönteminin tarihi yığma yapılarda malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmasının araştırılması: erzurum Kadana Camii uygulaması. Yüksek Lisans Tezi. Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 135, Erzurum.
- Özkaya, S. G. 2019. Yığma köprülerin deprem davranışlarının doğrusal olmayan statik yöntemlerle tahmini. Doktora Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 380, Erzurum.
- Özkaya, S. G., Kazaz, İ., Okuyucu, D. 2015. Kemerli Yığma Köprünün Sismik Davranışının Sonlu Eleman Yöntemiyle İncelenmesi. 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu. 1-3 Ekim, İnşaat Mühendisleri Odası, Erzurum.
- Özmen, A., Sayın, E. 2020. Tarihi yığma bir köprünün deprem davranışının değerlendirilmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(2), 956-965.
- Pastor, M., Binda, M., Harcarik, T. 2012. Modal assurance criterion. *Procedia Engineering*, 48, 543-548.
- Pulatsu, B., Erdogmus, E., Lourenço, P. B. 2019. Comparison of in-plane and out-of-plane failure modes of masonry arch bridges using discontinuum analysis. *Engineering Structures*, 178, 24-36.
- Rainieri, C., Fabbrocino, G. 2014. Operational modal analysis of civil engineering structures: an introduction and guide for applications. Springer, 342, Almanya.
- Ramos, L. F., Marques, L., Lourenco, P. B., Roeck, G., Costa, A., Roque, J. 2010. Monitoring historical masonry structures with operational modal analysis: two case studies. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(5), 1291-1305.
- Romano, A. 2006. Modelling, analysis and testing of masonry structures. PhD Thesis, The University of Naples Federico II, 306, Italy.
- Romero, M., Pachon, P., Compan, V., Camara, M. 2018. Operational modal analysis: a tool for assessing changes on structural health state of historical constructions after consolidation and reinforcement works-jura chapel. *Hindawi*, 1, 1-12.

- Sampio, R., Wagner, G., Lima, R. 2021. Operational modal analysis and structure health monitoring. *Current Trends in Civil & Structural Engineering*, 2643-6876.
- SAP2000 V., 18 Structural Analysis Program, Erzurum Teknik Üniversitesi, 2018.
- Sarhosis, V., Oliveria, D. V., Lemos, J. V., Lourenço, P. B. 2014. The effect of skew angle on the mechanical behaviour of masonry arches. *Mechanics Research Communications*, 61, 53-59.
- Scozzese, F., Ragni, L., Tabaldi, E., Gara, F. 2019. Modal properties variation and collapse assessment of masonry arch bridges under scour action. *Engineering Structures*, 199, 109665.
- Sözen, Ş., Çavuş, M. 2020. Tek Açıklıklı Tarihi taş köprülerde form değişikliğinin köprünün sismik davranışına etkisinin değerlendirilmesi: Niksar Yılanlı (Leylekli) köprü örneği. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 48-59.
- Toker, S., Ünay, A. İ. 2004. Mathematical modeling and finite element analysis of masonry arch bridges. *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi*, 17(2), 129-139.
- Türker, T., Yanık, Y. 2020. İlyasbey Camisi'nin yapısal davranışının çevresel titreşim testi ve sonlu eleman yöntemleriyle incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(2), 1431-1453.
- Türker, T., Bayraktar, A., Kocaman, İ., Çoruhlu, B. 2015. Ölçekli Yığma Taş Kemer Köprü Modelinin Dinamik Davranışının Deneysel ve Analitik Olarak İncelenmesi, 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, 1-3 Ekim, Erzurum İnşaat Mühendisleri Odası, 113-126. Erzurum.
- Uçak, Ş. 2012. Tarihi yığma kubbelerin dinamik davranışlarının operasyonel modal analiz yöntemiyle belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana bilim Dalı, 114, Trabzon.
- Ural, A. 2005. Tarihi Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Metoduyla Analizi, Deprem Sempozyumu, 23-25 Mart, 408-413, Kocaeli.
- Usta, P. 2021. Assessment of seismic behavior of historic masonry minarets in Antalya, Turkey. *Case Studies in Construction Materials*.15,66-69.
- Wang, L., Chan, T., Thambiratnam, D., Tan, A. 2010. Structural Health Monitoring: Vibration-Based Damage Detection and Condition Assessment of Bridges. *Rethinking Sustainable Development: Urban Management, Engineering and Design*, 230-243.
- Yeniceli, S. C. 2014. Hava Aracı Geliştirme Projelerinde Yer Titreşim Testi ve Önemi, V. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, 8-9 Eylül, Erciyes Üniversitesi, Kayseri

- Zhang, Y., Tubaldi, E., Macorini, L., Izzuddin, B. A. 2018. Mesoscale partitioned modelling of masonry bridges allowing for arch-backfill interaction. *Construction and Building Materials*, 173, 820-842.
- Zucchini, A., Lourenço, P. B. 2002. A micro-mechanical model for the homogenisation of masonry. *International Journal of Solids and Structures*, 46(3-4), 871-886.



EKLER

EK-1

	KAYA MÜHENDİSLİK ZEMİN-YAPI MALZ.LABORATUVARI DOKÜMANIN ADI KABA AGREGA(ÇAKIL) ÖZGÜL AĞIRLIK-ABSORBSİYON DENEY FORMU	
---	--	---

PROJE ADI	ERZURUM İLİ ALACA , SARIGÜL, PEHLİVANLI (KİREÇLİ) VE KIZ TARIHI KÖPRÜLERİNİN RESTORASYON UYGULAMA PROJESİ YAPIM İŞİ
Nümunenin Alındığı Ocak	1
Numuneyi Gönderen	MUKADDES ATAMAN
Numune Kod No	S 2011 /790
Rapor Kod No / BRN	S 890 / 2011
Deney Tarihi	22.09.2011
Rapor Tarihi	30.09.2011
Malzeme Tanımı Ve Boyutu	Kırılmış Agrega (15 -25 mm)
Deney Standardı	TS EN 1097-6 /Mart 2002

DENEY NO	1	2	3	4
DOYGUN VE HAVADA YÜZEYİ KURUTULMUŞ AGREGANIN KÜTLESİ(g) M1	2582,5			
DOYGUN AGREGA NUMUNESİNİ İHTİVA EDEN SEPETİN SUDAKİ GÖRÜNÜR KÜTLESİ(g) M 2	1510			
ETÜVDE KURUTULMUŞ DENEY NUMUNESİ KÜTLESİ (g) M4	2520			
BOŞ SEPETİN SUDAKİ GÖRÜNÜR KÜTLESİ (g) M3	0			
KURU ÖZGÜL AĞIRLIK($P_{sd}=(M4/M1)-(M2-M3)$)	2,35			
DOYGUN YÜZEY ÖZGÜL AĞIRLIK($P_{sat}=(M1/M1)-(M2-M3)$)	2,41			
ZAHİRİ ÖZGÜL AĞIRLIK($P_a=(M4/M4)-(M2-M3)$)	2,50			
ABSORBSİYON (%) $W_A=100*(M1-M4)/M4$	2,48			

NOT: Numuneler laboratuvarımız tarafından alınmamıştır. Numunelerin temsili olma özelliğinden laboratuvar sorumlu değildir. Deney sonuçları sadece deneye tabi tutulan numunelerle ilgilidir. Numunelerin alındığı yere ait bilgiler müşteri beyanıdır. Bu deney raporu, ilgili laboratuvarın yazılı izni olmadıkça kısmen çoğaltılamaz. Laboratuvarımız; Türk Standartları Enstitüsü(TSE) 05/05/2010 tarihli Tageron Laboratuvar İzin Belgesine Sahiptir.



KAYA MÜHENDİSLİK ZEMİN-YAPI
MALZ. LABORATUVARI

LOSANGELES DENEY RAPORU



Proje Adı	ERZURUM İLİ ALACA, SARIĞUL PEHLIVANLI (KIREÇLİ) VE KIZ TARIHI KÖPRÜLERİNİN RESTORASYON UYGULAMA PROJESİ YAPIM İŞİ
Numunenin Alındığı Ocaklar	1
Numuneyi Gönderen	MUKADDES ATAMAN
Numune kod no	S2011/790
Rapor no / BRN	S 890 / 2011
Deney tarihi	22.09.2011
Rapor tarihi	30.09.2011
Deney Standardı	TS EN 1097-2

BİLYE ADEDİ	11
DÖNÜŞ SAYISI	500
NUM. İLK AĞIRLIĞI (A)	5040,9
NUM. SON AĞIRLIĞI (B)(1 60mm elekte kalan)	4159
FARK	881,9
AŞINMA YÜZDESİ (A - B / A x 100)	17,49

NOT :Numuneler laboratuvarımız tarafından alınmamıştır. Numunelerin temsili olma özelliğinden laboratuvar sorumlu değildir. Deney sonuçları sadece deneye tabi tutulan numunelere aittir. Numunelerin alındığı yere ait bilgiler müşteri beyanıdır. Bu deney raporu, ilgili laboratuvarın yazılı izni olmadıkça kısmen çoğaltılamaz. Laboratuvarımız, Türk Standartları Enstitüsü(TSE) 05/05/2010 tarihli Tazeyon Laboratuvar İzin Belgesine Sahiptir.



DOKÜMAN ADI

TEK EKSENLİ BASINÇ DAYANIMI DENEY RAPORU

PROJE ADI	KAZURUM HJ. ALAFA, SAMRILLI, PHILINASTILIKIRU(L)IYR KIZI TASHIH KIRUCHURINDA RESTORATYON TUGUTLAMA PROJESI YAPIMI ISE		Rapor Tarixi	30.09.2011
Deney Rapor Numarası Kot Notu	S11/ N90.809/11	Numune Hazırlama Standartı	Deneyin Rapor No	TSE 2028

DENEY SONUÇLARI

[illegible]

Not: Analizci işgüçün numunesi tarayıcıdan alınmamıştır. Numunenin doğru şekilde paketlenmiş ve doğru şekilde etiketlenmiş laboratuvar ortamı değildir. Densiy numuneleri sadece deneyde kabi tutulmuş numunelerle ilgilidir.

KLAVUZ PLANI

ÖLÇEK : 1 / 1000 000

11-2-1968
810
675-12/75-04
P-10