

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ANADOLU ÜNİVERSİTESİ ORTAK PROGRAMI

**MUŞ İLİNDE BULUNAN TARİHİ KÖPRÜLER VE
TARİHİ MURAT KÖPRÜSÜNÜN YAPISAL DEĞERLENDİRMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CÜNEYT ARTAN

TEZ DANIŐMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ AYLİN ÖZODABAŞ

BİLECİK, 2021

10411444

T.C.
BİLECİK ŐEHY EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ANADOLU ÜNİVERSİTESİ ORTAK PROGRAMI

**MUŞ İLİNDE BULUNAN TARİHİ KÖPRÜLER VE
TARİHİ MURAT KÖPRÜSÜNÜN YAPISAL DEĞERLENDİRMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CÜNEYT ARTAN

TEZ DANIŐMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ AYLİN ÖZODABAŞ

BİLECİK, 2021

10411444

BEYAN

Muş İlinde Bulunan Tarihi Köprüler ve Tarihi Murat Köprüsünün Yapısal Değerlendirmesi adlı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel ahlak kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırmalar Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte beyan edilmiştir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	X
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum:			
Desteklerin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TUBİTAK			
DİĞER;.....			

Cüneyt Artan

Tarih

.....

İmza

.....

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının yazılmasında, çalışmamı sahiplenerek takip eden danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Aylin ÖZODABAŞ'a değerli katkı ve emekleri için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Savunma sınavı sunumu sırasında değerli jüri üyeleri Sayın Prof. Dr. Kemalettin YILMAZ'a ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali Erdem ÇERÇEVİK'e çalışmamın son haline gelmesindeki değerli katkıları adına teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Son olarak bu günlere ulaşmamdaki emekleri adına özellikle değerli babam Ramazan ARTAN'a ve diğer aile bireylerime teşekkür ederim.

Cüneyt Artan

2021

ÖZET

MUŞ İLİNDE BULUNAN TARİHİ KÖPRÜLER VE TARİHİ MURAT KÖPRÜSÜNÜN YAPISAL DEĞERLENDİRMESİ

Bu tez çalışmasında, Muş İlinde bulunan Tarihi Murat Köprüsünün farklı analizlerle gerilme ve deformasyon bölgeleri belirlenmiştir. Tarihi Murat Köprüsü, ANSYS programı yardımıyla sonlu elemanlar yöntemi ile modellenip, analiz edilmiştir. Bu analizler doğrultusunda tarihi köprünün gerilme ve deformasyon bölgeleri belirlenmiştir.

Tez dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde tarihi yığma köprüler hakkında bilgiler verilmiştir. Yapılan önceki çalışmalara yer verilmiş, tarihi yığma köprülerde kullanılan malzemelerden bahsedilmiş, kemer formlarına değinilmiş ve Anadolu da farklı dönemlerde farklı uygarlıkların yapmış olduğu yığma köprüler hakkında bilgiler verilmiştir. Birinci bölümün sonunda Muş ilinde bulunan tarihi köprülerden bahsedilmiştir. İkinci bölümde Murat köprüsünden detaylı bir şekilde bahsedilmiş olup; köprünün tarihsel gelişimi araştırılmış, mevcut mimari yapısı hakkında bilgiler verilmiş, yapılmış olan restorasyonlar ve köprünün mevcut durumu değerlendirilmiştir. Üçüncü bölümde yapısal analiz ve sonlu elemanlar yönteminden kısaca bahsedilmiştir. Devamında yapılan analizlere detaylı bir şekilde yer verilmiş, analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Dördüncü bölümü sonuç bölümü oluşturmaktadır.

Çalışmanın sonucunda yapılan analizlerin köprüde oluşturduğu gerilmeler değerlendirilmiş, etki ettirilen yüklerin oluşturduğu gerilmeler karşılaştırılmış ve bunlara nelerin sebep olabileceği üzerinde durulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Tarihi Yığma Köprüler, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Yapısal Analiz, Tarihi Murat Köprüsü, Doğrusal Analiz Yöntemi.

ABSTRACT

HISTORICAL BRIDGES IN MUS AND STRUCTURAL EVALUATION OF THE HISTORICAL MURAT BRIDGE

In this thesis, the stress and deformation zones of the Historical Murat Bridge in Muş were determined by different analysis. The historical Murat Bridge was modeled and analyzed with the finite element method by the help of ANSYS program. The stress and deformation zones of the historical bridge were determined in line with these analysis.

The thesis consists of four chapter. Information about historical masonry bridges are given in the first chapter. Previous studies are included, materials used in historical masonry bridges and arch forms are mentioned and information is given about masonry bridges built by different civilizations in different periods in Anatolia. At the end of the first chapter, historical bridges in Muş province are mentioned. In the second chapter, the Murat Bridge is mentioned in detail; The historical development of the bridge has been researched, information about its current architectural structure has been given, the restorations that have been made and the current situation of the bridge have been evaluated. In the third chapter, structural analysis and finite element method are briefly mentioned. Afterwards, the analysis were given in detail and their results were evaluated. The fourth chapter is the conclusion chapter.

As a result of the study, the stresses that are created by the analysis on the bridge were evaluated, the stresses created by the loads that are operated were compared and it was emphasized what could cause these stresses.

Keywords: Historical Masonry Bridges, Finite Element Method, Structural Analysis, Historical Murat Bridge, Linear Analysis Method.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
GRAFİKLER LİSTESİ.....	ix
SEMBOLLER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Araştırmanın Yöntemi.....	2
1.2. Literatür Tarama.....	2
1.3. Anadolu'da Köprülerin Tarihsel Gelişimi.....	9
1.3.1. Roma-Bizans Dönemi köprüler.....	10
1.3.2. Selçuklu Dönemi Köprüleri.....	11
1.3.3. Osmanlı Dönemi Köprüler.....	12
1.4. Köprülerin Kemer Formları.....	15
1.4.1. Dairesel Kemerler.....	17
1.4.2. Basık Sivri Kemerler.....	18
1.4.3. Sivri Kemerler.....	19
1.5. Yığma Köprülerde Kullanılan Malzemeler.....	20
1.5.1. Malzemelerin Aşınma Durumu.....	21
1.6. Muş İli Sınırları İçinde Bulunan Tarihi Köprüler.....	22
1.6.1. Malazgirt (Hatun) Köprüsü.....	23
1.6.2. Kaynarca Köprüsü.....	24

1.6.3.	Abdurrahman Paşa Köprüsü	26
1.6.4.	Kız Köprüsü.....	27
2.	TARİHİ MURAT KÖPRÜSÜ	28
2.1.	Murat Köprüsü Tarihsel Gelişim.....	28
2.2.	Tarihi Murat Köprüsünde Yapılan Restorasyonlar	28
2.3.	Tarihi Murat köprüsünün mevcut durumu	31
2.3.1.	Murat Köprüsü Plan ve Mimari Özellikleri	32
2.3.2.	Murat Köprüsü Kullanılan Malzemeler	36
2.3.3.	Murat Köprüsü Oluşan Bozulmalar	37
3.	MATERYAL VE METOT.....	41
3.1.	Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEM)	41
3.2.	Yapılan Analizler	44
3.2.1.	Zati Yük Analizi ve Modal Analiz	44
3.2.2.	Deprem Analizleri	45
3.2.3.	Taşıt Analizi	48
3.2.4.	Hidrostatik Analiz	50
3.3.	Analiz Sonuçları.....	51
3.3.1.	Modal Analiz Sonucu	51
3.3.2.	Deprem Analiz Sonuçları.....	53
3.3.3.	Zati Yük, Taşıt Yükü ve Hidrostatik Yük Analiz Sonuçları.....	58
4.	SONUÇ.....	64
	KAYNAKÇA.....	65

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Sonlu Elemanlar Modelinin Dügüm ve Eleman Sayısı.....	43
Tablo 3.2. Köprünün Analizlerinde Dikkate Alınan Malzeme Özellikleri	44
Tablo 3.3. 2011 Van Depreminde Ölçülen Maksimum İvme Değerleri	47
Tablo 3.4. Modal Analiz Sonucu Köprüde Oluşan Doğal Frekanslar.....	51
Tablo 3.5. Modal Analiz Sonucu Kütle Katılım Oranları	53
Tablo 3.6. TBDY 2018 Deprem Analiz Sonucu Toplam Deformasyon	54
Tablo 3.7. 2011 Van Deprem Analizi Donucu Toplam Deformasyon.....	54
Tablo 3.8. TBDY 2018 Deprem Analiz Sonucu Elastik Şekil Değiştirme	55
Tablo 3.9. 2011 Van Depremi Analiz Sonucu Elastik Şekil Değiştirme.....	55
Tablo 3.10. TBDY 2018 Deprem Analiz Sonucu Eşdeğer Gerilme	56
Tablo 3.11. 2011 Van Depremi Analiz Sonucu Eşdeğer Gerilme.....	56
Tablo 3.12. TBDY 2018 Deprem Analiz Sonucu Normal Gerilme	57
Tablo 3.13. 2011 Van Depremi Analiz Sonucu Normal Gerilme	57
Tablo 3.14. TBDY 2018 Deprem Analiz Sonucu Kayma Gerilmesi	58
Tablo 3.15. 2011 Van Depremi Analiz Sonucu Kayma Gerilmesi	58
Tablo 3.16. Zati Yük, Taşıt Yüğü ve Hidrostatik Yük Analizleri Sonucu Toplam Deformasyon	59
Tablo 3.17. Zati Yük, Taşıt Yüğü ve Hidrostatik Yük Analizleri Sonucu Eşdeğer Elastik Şekil Değiştirme	59
Tablo 3.18. Zati Yük, Taşıt Yüğü ve Hidrostatik Yük Analizleri Sonucu Normal Gerilme...	60
Tablo 3.19. Zati Yük, Taşıt Yüğü ve Hidrostatik Yük Analizleri Sonucu Eşdeğer (von-Mises) Gerilme.....	61
Tablo 3.20. Zati Yük, Taşıt Yüğü ve Hidrostatik Yük Analizleri Sonucu Kayma Gerilmesi.	61
Tablo 3.21. Zati Yük, Taşıt Yüğü ve Hidrostatik Yük Analizleri Sonucu Maksimum Asal Gerilme.....	62

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Roma Dönemi Köprüleri	11
Şekil 1.2. Bizans Dönemi Köprüleri	11
Şekil 1.3. Selçuklu Dönemi Köprüler	12
Şekil 1.4. Osmanlı Dönemi Köprüler.....	13
Şekil 1.5. Kabuağası (Kapıağası) Köprüsü	14
Şekil 1.6. Artvin Arhavi Çifte Köprü.....	15
Şekil 1.7. Kemerlerin Genel Yapısı	16
Şekil 1.8. Köprülerin Kemer Formları	17
Şekil 1.9. Dairesel Kemer Formu.....	17
Şekil 1.10. Gediz Mecrası ve Kız Köprüsü.....	18
Şekil 1.11. Basık Kemer Formu.....	18
Şekil 1.12. Kırkgöz Kemer (Limyra Köprüsü), Antalya/Finike	19
Şekil 1.13. Sivri Kemer Formu	20
Şekil 1.14. Malabadi Köprüsü Silvan/Diyarbakır	20
Şekil 1.15. Muş İli Sınırları İçinde Yapılmış Tarihi Köprüler.....	23
Şekil 1.16. Malazgirt (Hatun) Köprüsü Memba Cephesi.....	24
Şekil 1.17 Malazgirt (Hatun) Köprüsü Memba Cephesi.....	24
Şekil 1.18. Kaynarca Köprüsü Memba Cephesi	25
Şekil 1.19. Kaynarca Köprüsü Onarımdan Sonraki Hali	26
Şekil 1.20. Muş Abdurrahman Paşa Köprüsü Planı ve Cephe Görünüşü	26
Şekil 1.21. Abdurrahman Paşa Köprüsü	27
Şekil 1.22. Kız Köprüsü	27
Şekil 2.1. Murat Köprüsü Yıkılan Kemerler Mansap Görünüşü	29
Şekil 2.2. Murat Köprüsü Yıkılan Kemerler Mansap Görünüşü 2	29
Şekil 2.3. Murat köprüsü Yıkılan Kemerler Memba Görünüşü.....	30
Şekil 2.4. Murat Köprüsü Onarım Çalışmaları	31
Şekil 2.5. Murat Köprüsü Mansap Görünüşü	32
Şekil 2.6. Murat Köprüsü Memba Görünüşü	32
Şekil 2.7. Murat Köprüsü Plan Görünüşü	33
Şekil 2.8. Murat Köprüsü Genel Görünüşü.....	33
Şekil 2.9. K9 Kemer K1-K1 Kesiti	34

Şekil 2.10. K9 Kemerinin K2-K2 Kesiti	34
Şekil 2.11. Memba Yönünde Yapılan Tahkimat.....	35
Şekil 2.12. Mansap Bölgesinde Yalan Tahkimat	35
Şekil 2.13. Murat Köprüsü Tempan Duvarında Kullanılan Farklı Taşlar	37
Şekil 2.14. Nehir Kıyısı Birleşim Ayağında Kullanılan Moloz Taşları.....	37
Şekil 2.15. Murat Köprüsü K2 Kemerinin İç Yüzeyinde ve Ayak Diplerinde Oluşan Kireçlenmeler	38
Şekil 2.16. Murat Köprüsü A7 Ayağı Oluşan Derz Boşalmaları ve Nehir Suyu Kaynaklı Kireçlenme ve Kararmalar.	39
Şekil 2.17. Murat Köprüsü A1 Ayağında Oluşan Temel Boşalmaları ve Kemer İç Yüzeyinde Oluşan Kirlenmeler, Kireçlenmeler.	39
Şekil 2.18. Murat Köprüsü Döşemesinde (K5 Kemerinin Üstü) Oluşan Oturmalar ve Korkuluktaki Derz Kayıpları.....	40
Şekil 2.19. Murat Köprüsü A1 Ayağında Oluşan Bitkilenmeler ve A2 Ayağında Oluşan Malzeme Kayıpları	40
Şekil 3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi Açıklama Örneği	41
Şekil 3.2. Yığma Yapı Modelleme Teknikleri	43
Şekil 3.3. Solid 185 Elemanı Şematik Görünümü	43
Şekil 3.4. Tarihi Murat Köprüsü Modeli ve Mesh Görüntüsü	44
Şekil 3.5. Zati Yük ve Modal Analiz Modeli.....	45
Şekil 3.6 Türkiye Deprem Tehlike Haritasına Girilen Veriler.....	46
Şekil 3.7. H30-S24 Taşıt Yükü Diyagramı	49
Şekil 3.8. Taşıt Yükleme Analiz Modeli	49
Şekil 3.9. Batmış Yüzeyle Etkiyen Hidrostatik Basınç Diyagramı	50
Şekil 3.10. Hidrostatik Analiz Modeli	50

GRAFİKLER LİSTESİ

Sayfa

Grafik 3.1. TBDY 2018 Tarihi Muş Murat Köprüsü Konumu Periyot-Spektral İvme Grafiği	46
Grafik 3.2. TBDY 2018 Tarihi Muş Murat Köprüsü Konumu Frekans-Spektral İvme Grafiği	47
Grafik 3.3. 2011 Van Depremi İvme Spektrum Grafiği	48
Grafik 3.4. 2011 Van Depremi Frekans-Spektral İvme Grafiği.....	48

SEMBOLLER VE KISALTMALAR LİSTESİ

M : Metre

mm : Milimetre

F : Frekans

T : Periyot

Hz : Hertz

Sn : Saniye

Pa : Pascal

MPa : Mega Pascal

N : Newton

kN : Kilo Newton

BT : Bilgisayar Teknolojileri

TBDY : Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze su geçişleri üzerine ulaşım kolaylığı için türlü köprüler yapılmıştır. Geçmişte yapılan bu yapılar genellikle yığma taş yapılar veya taş ayaklı ahşap tabliyeli köprüler olmuştur. Dönemin teknolojiyle yapılabilecek yapılarda çok büyük açıklıklı nehirlerde bile küçük açıklıklı kemerlerle bir geçiş yapılmıştır. Günümüzde kullanılan malzeme ve yapım tekniği değişse de benzer ihtiyaçlar doğrultusunda köprüler inşa edilmiştir. Günümüzde daha geniş su yatağı açıklıkları daha az köprü ayağıyla ve daha büyük giriş açıklıklarıyla geçilmiştir. Günümüzde artık modern ve teknik malzemelerle elde edilen betonarme ve çelik köprüler daha popüler durumdadır. Fakat eski tarihlerde daha çok yığma taş köprü ve ahşap köprüler büyük önem taşımaktadır (Çulpan, 1975).

Bu çalışma da Tarihi Muş Murat Köprüsü ele alınmıştır. Tarihi köprünün mevcut durumu incelenmiş ve çıkarımlarda bulunulmuştur ve Tarihi köprünün kendi yükü, sel suyunun oluşturduğu yük, taşıt yükleri ve deprem etkisi davranışları incelenmiş ve bu yükler altında köprüde oluşan gerilme noktaları sonlu elemanlar analiz yöntemi ile belirlenmiştir. Bölgenin 1. dereceden deprem bölgesi olması, köprünün murat nehrinin üzerinde bulunması ve yakın geçmişte köprünün üzerinden geçen taşıtların olmasından dolayı bu yüklemelere ihtiyaç duyulmuştur. Köprüden şimdi sadece yaya geçişi yapılmaktadır. Daha önce yapılmış olan tarihi köprüler araştırılmış; kemer yapıları ve mimari özellikleri incelenmiştir. İleride yapılacak restorasyon çalışmalarına ışık tutması hedeflenmektedir.

Tarihi kemer köprülerle ilgili bugüne kadar pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğunluğu, kemer formunun ve kemer köprünün yapısal davranışını incelemeye yönelik olmuştur. Eski yıllarda basit yaklaşımlarla analiz edilen köprüler, teknolojinin gelişmesiyle bilgisayar yazılımları sayesinde daha geniş analiz yöntemleri kullanılarak değerlendirilmeye başlanmıştır. Bu analiz yöntemlerinin gerçekçiliğini araştırmak için çok sayıda deneysel çalışmalar da yapılmıştır. Son yıllarda ise gerçek köprüler üzerinde alınan deneysel verilerin sayısal analizlere aktarılmasıyla gerçek davranışa daha fazla yaklaşım amaçlanmıştır. Tarihi Muş Murat köprüsünün belirli yükler altında gerilme noktalarını belirlemek için sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapılmıştır. Yapısal analiz yapmak ve bir yapının yapısal durumunu tayin etmek için birçok analiz programı mevcuttur. Bu çalışmada yapılan analizler ANSYS programı yardımıyla yapılmıştır.

1.1. Araştırmanın Yöntemi

Araştırmaya öncelikle Anadolu da bulunan tarihi köprüler incelenerek başlanmıştır. Daha sonra Muş ili sınırları içerisinde bulunan köprüler üzerinde yoğunlaşma olmuştur. Tarihi yapıların kemer formları, yapım tekniği ve yapımda kullanılan malzemeler incelenmiştir. Yapılan bu araştırmalar sonucunda teze konu olan tarihi Muş Murat köprüsü modellenip yapısal analizi yapılmıştır. Yapı modelini oluşturmak için önceden hazırlanmış olan köprü verileri (kullanılan malzemenin laboratuvar örnekleri, rölöve bilgileri vs.) Karayolları Genel Müdürlüğünden alınmıştır. Modelleme Karayollarından alınan ve AutoCAD programındaki rölöve çizimleri Solidworks programına aktarılarak yapının katı modeli oluşturulmuş ve oluşturulan katı model ANSYS programında sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Analiz sonucunda alınan veriler detaylı bir şekilde tez de yer almaktadır.

1.2. Literatür Tarama

(Simos vd., 2018) Yaptıkları bir çalışmada uzun açıklıklı tarihi köprülerin, bulunduğu konuma göre uzak ve yakın bölgelerde olan depremlerin yapıya etkisi araştırılmıştır. Örnek olarak Konista köprüsü seçilmiş ve o bölgede olan dört deprem parametresi etki ettirilmiştir. Yapı non-lineer olarak analiz edilmiş ve çıkan sonuca göre yapının uzağında olan depremler, yapıya yakın olan depremlerden çok daha yıkıcı olduğu ortaya çıkmıştır.

(Chen vd., 2020) Yapılan çalışmada Guyue köprüsü ele alınmış ve ultrasonik bilgisayar tomografisi ile köprünün yıpranma derecesi ve mekanik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Tarihi yapıda gerilme etkisi; taşların deformasyonuna ve kırılmasına sebep olmakta ve atmosfer etkisi aşınmaya karşı direncini düşürür, aşınma oranını açık bir şekilde artırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

(Gönen vd., 2013) Elazığ ilinde bulunan Palu köprüsü SAP 2000 programında modellenmiş, yapının lineer olarak analizi gerçekleştirilmiştir. Yapıda ölü yükleri altında ve deprem etkisi altında analizler yapılmıştır. Yapının onarımı sonrasında kullanılan malzemelerden bahsedilmiştir. Köprünün onarımı için farklı zaman dilimlerinde sırasıyla ahşap, betonarme ve çelik kullanılmıştır. Oluşturulan köprü modeline yapılan analizler sonucu, köprünün orta kısmında nispeten daha yüksek olan bölgesinde gerilmelerin maksimum değerinde olduğu görülmüştür.

(Castro vd., 2018) Portekiz'deki erken dönem bir betonarme köprüyü karakterize etmek için karasal lazer tarayıcı, ortam titreşim testleri ve küçük tahrip edici testler yapılmıştır. Yapılan bu testler sonlu eleman modeli oluşturulduktan sonra yapılmıştır. Yapılan

bir dizi analizden sonra köprünün gerilme noktaları belirlenmiştir. Yapılan çalışmayla köprünün yapısal olarak en kritik parçasının orta açıklıktaki kirişi olduğu saptanmıştır. Aynı zamanda köprünün bulunduğu bölgenin deprem bölgesi olmaması nedeniyle sismik analizlerin gerekli olmayacağı sonucuna varılmıştır.

(Tanrıverdi, 2019) Yüksek lisans tezinde kemer ve köprü kemerlerini ele almıştır. Kemerlerin tarihsel süreçte değişimlerini ve kullanılan farklı malzemeleri araştırıp kemerlerin avantaj ve dezavantajlarını incelemiştir. Son olarak Siirt'te bulunan Çarpıran köprüsünü ele almış, yapıyı SAP 2000 programında sonlu elemanlar yöntemiyle modellemiştir. Doğrusal (lineer) elastik analiz yöntemiyle köprünün zati yükü ve deprem etkisi altındaki davranışı analiz edilmiştir.

(Yılmaz, 2016) Yüksek lisans tezinde yığma köprülerin kemer geometrisinin etkisini araştırmıştır. Yaptığı çalışmada kemer kalınlığının ve kemer yüksekliğinin yapı üzerindeki etkisini incelemiştir. Kemerlerin kalınlığı ve yüksekliği değiştirilerek zati yük analizi, deprem analizi ve hareketli yükler için analizler yapıp değer karşılaştırması yapmıştır. Kemer kalınlıkları arttıkça, yer değiştirmeler ve çekme gerilmesi değerleri azalırken, basınç gerilmesinin buna bağlı olarak arttığı görülmüştür. Kemer yükseklikleri arttıkça, yer değiştirmeler ve basınç gerilmesi değeri azalırken, çekme gerilme değerinin arttığı görülmüştür.

(Korkmaz vd., 2013) Yaptıkları çalışmada yığma köprüler üzerine deprem davranışlarını incelemişlerdir. Örnek olarak Rize de bulunan Osmanlı dönemine ait Timisvat köprüsü ele alınmıştır. Zaman tanım alanında analizler yapılmış ve köprüde oluşan yer değiştirmeler ve gerilmeler incelenmiştir.

(Şen, 2019) Yapmış olduğu çalışmada Muş ili sınırlarında bulunan tarihi köprüleri ele almıştır. Tarihi köprülere ait Osmanlı arşivlerinde bulunan belgeleri incelemiş, bulduğu belgelerle tarihi köprülerin o dönemdeki durumlarını incelemiştir.

(Öztürk, 2019) Yapmış olduğu çalışmada Muş ilinde bulunan Kaynarca köprüsünü ele almıştır. Tarihi köprünün tarihsel gelişiminden söz etmiş, köprüye ait restorasyon ve restitüsyon projelerini çizmiştir. Köprüde 2007-2013 yılları arasında yapılan onarım çalışmalarını ele almıştır. Aynı zamanda Muş ili sınırları içerisinde bulunan tarihi köprülerin bir haritasını oluşturmuştur. Muş ilinde bulunan günümüze kadar ulaşamamış tarihi köprüleri araştırmış ve köprülerin konumunu hazırladığı haritaya işlemiştir.

(Onat ve Sayın, 2015) Yaptıkları çalışmada tarihi köprülerde deprem davranışını belirlemeyi amaçlamışlardır. Örnek olarak Tunceli ilinde bulunan Tarihi Tağar köprüsünü ele almışlardır. Köprünün üç boyutlu makro modeli oluşturulup, ANSYS programında Erzincan ilinde 1992 yılında gerçekleşmiş olan deprem verileriyle analizini yapmışlardır. Doğrusal olmayan analiz yöntemiyle köprünün sismik analizini yapıp, köprüde oluşan yer değiştirmeleri ve gerilme oluşan bölgelerini incelemişleridir. Yaptıkları incelemeyle köprüde ilk çatlakların köprünün kemer ile temel birleşim bölgelerinde olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan yüklemeler boyunca çatlaklar oluşmaya ve daha derin olmaya devam etmiştir. Ancak oluşan bu hasarlar köprünün performansını etkileyecek düzeye ulaşmamıştır.

(Arede vd., 2019) Tarihi yığma yapılarda kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerini belirleme üzerine bir çalışma yapmışlardır. Portekiz'in Porto şehrinde bulunan Serra do Pillar kilisesi ve D. Zameiro, Lagoncinha ve Vila Fria köprülerinden yerinde örnekler almış bir dizi testler yapmışlardır. Yaptıkları testlerle tarihi yığma yapılarda kullanılan malzemelerin mekanik karakterizasyonlarını belirlemeye çalışmışlardır.

(Özkok vd., 2015) Rumeli bölgesinde bulunan Osmanlı'nın erken ve klasik dönemine ait köprüleri incelenmiş, yapım nedenleri ve yapım teknikleri araştırılmıştır. Örnek olarak Edirne Uzun köprü ele alınmış, köprünün tarihsel gelişimi ve mimari özellikleri incelenmiştir.

(Acar, 2016) Uşak'ta bulunan tarihi köprüleri ele almıştır. Yaptığı çalışmada bölgede bulunan köprüleri mimari özelliklerine göre sınıflandırmıştır. Bölgede bulunan köprüler Selçuklu ve Osmanlı dönemine ait köprülerdir.

(Jiang ve Esaki, 2002) Tarihi yapılarda hava etkisiyle oluşan aşınmaları ele almışlardır. Japonya'nın Kagoshima kentindeki beş tane köprü üzerine incelemeler yapılmıştır. Kemer taşlarının yüzeyinden içindeki derinliğe doğru, fiziksel, kimyasal ve mekanik yönlerini kapsayan detaylı bir araştırma yapmışlardır. Daha önce yaptıkları çalışmalar doğrultusunda bir aşınma yüzdesi endeksi oluşturmuşlardır.

(Saydan vd., 2020) Konya Sille ilçesinde bulunan ve sille taşından yapılan Mısıroğlu Köprüsü üzerine çalışma yapmışlardır. Köprüde kullanılan üç farklı sille taşından örnek alıp laboratuvarında donma-çözülme deneyleri yapmışlardır. Taşın laboratuvar deneyleri sonucunda donma-çözülme verilerini almışlardır. Aldıkları verilere göre köprüyü modelleyip analiz etmişlerdir. Donma-çözülme öncesi ve sonrası olarak bir dizi analiz yapıp, köprüde oluşan şekil değiştirme ve gerilme durumlarını incelemişlerdir.

(Genç, 2015) Yaptığı Yüksek Lisans tez çalışmasıyla tarihi köprülerde yapılan restorasyon etkilerini incelemiştir. Örnek olarak Aydın ili Karacasu ilçesinde bulunan tarihi Dandalaz Köprüsünü ele almıştır. Köprünün restorasyon öncesi ve sonrası analizlerini yapmıştır. Yaptığı zati yük, hareketli yük ve deprem yükleri analizleri doğrultusunda değerlendirmelerde bulunmuştur. Tarihi yapının restorasyon öncesi durumuna bakılınca kemer iç yüzeyinde (kemer karnı) ciddi malzeme kayıpları görülmektedir. Restorasyon çalışmasıyla malzeme eksiklikleri giderilmiştir.

(Alkan vd., 2011) Anadolu'da bulunan köprüleri ele alarak bir sınıflandırma yapmışlardır. Tarihi köprüleri dönemlerine göre ve mimari özelliklerine göre sınıflandırmışlardır. Tarihi köprüleri dönem olarak Roma-Bizans dönemi, Selçuklu ve Osmanlı dönemi olarak, tiplerine göre; sürekli kemerli, tek sayıda gözlü yükselen ve alçalan, çift sayıda gözlü yükselen ve alçalan olarak sınıflandırmışlardır. Yaptıkları sınıflandırmaya göre çizelgeler oluşturmuşlardır.

(Erözemen vd., 2020) Yapılan çalışma İstanbul'daki tarihi yapılar için kullanılan temizleme tekniklerinin malzemeler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Küfeki taşları örnek olarak alınmıştır. Örnek alınan taşlar üzerinde hızlı eskitme yöntemleri kullanılarak bozulma sağlanmıştır. Eskitilen örnekler, lazer ve basınçlı mikro kumlama yöntemi ile temizlenmiştir. Temizlenen örneklerin kütle değişimi ve görünümü incelenmiştir. Temizleme yöntemi seçilirken taşın iç yapısının değerlendirilmesinin, büyük bir önem arz ettiği görülmüştür. Lazer yöntemi ile temizlemenin daha az hasar verdiği saptanmıştır.

(Camara vd., 2021) İspanya Sevilla'daki San Jerónimo de Buenavista Manastırı'nın farklı yapısal unsurların durumu hakkında bilgi sağlamak için bir çalışma yapılmıştır. Yapıda yerinde alınan örneklerle deneyler yapılmış, belirlenen malzeme özellikleriyle sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Oluşan hasarlar, kemerlerin ve tonozların kilit taşlarında ve sütun tabanlarında olduğu saptanmıştır. 1969 yılında gerçekleşen bir depremde çöken bir kolonun, yapıda bulunan kulenin titreşimi dolayısıyla çökmüş olabileceği düşünülmüştür.

(Paviva vd., 2020) Detaylı bir modelleme tekniği olan nokta bulutu tekniği ile modelleme yapılmıştır. Tarihi yapılarda bulunan detayların, kültürel ve mimari bir yönle bağlantısı olabileceğinden dolayı, detaylı bir modelleme yöntemine ihtiyaç duyulmuştur. Hiyerarşik havza dönüşümü ve bölge yetiştirme yöntemlerinden eğrilik analizini birleştirmişlerdir. Drone ve karasal lazer tarayıcı kullanılarak veri toplanmış ve veriler birleştirilerek model oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin gerçeğe daha yakın olduğu saptanmıştır.

(Stavroulaki vd., 2016) Köprü modeli oluşturmak için karasal fotogrametri ve yere geçebilen radar kullanılmıştır. Bu sayede köprüdeki tempın duvar kalınlıkları ve dolgu kalınlıkları belirlenmiştir. Aynı zamanda bu yöntemle köprüde bulunan çatlaklarda dikkate alınmış ve köprü modeline eklenmiştir. Oluşturulan model sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiş ve köprünün hasar analizi yapılmıştır. Yapılan analize göre yapıda bulunan çatlak açıklıklarının etkisi ve malzemenin çekme mukavemetinin etkisi görülmüştür. Dolgu malzemesinin elastite modülü değerinin değişmesi, çatlak açıklıklarını büyük ölçüde değiştirdiği saptanmıştır.

(Pachon vd., 2018) İspanya Cordoba'da bulunan tarihi Posadas köprüsünün doğal frekanslarını belirlemek amaçlanmıştır. Tarihi köprüye sensörler yerleştirilip veriler toplanmıştır. Aynı zamanda tarihi köprünün sonlu elemanlar yöntemi ile modeli oluşturulup modal analizi yapılmıştır. Farklı sayılarda sensörler yerleştirilerek veriler incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda tarihi köprünün doğal frekansları elde edilmiştir. Az sayıda sensör yerleştirilse bile köprünün titreşim frekans değerinin belirlenebileceği saptanmıştır.

(Zucchini ve Lorenço, 2004) Yığma yapılarda, doğrusal olmayan hareketlerden dolayı oluşan çatlakların, yığma yapılarda kullanılan düşük çekme mukavemetli malzemelerin sebep olduğu düşünülmektedir. Bu çalışmada, duvar bileşenleri için bir mikro-mekanik homojenizasyon modeli ile izotropik bir hasar modeli arasındaki bağlantının formülasyonu ve uygulaması ele alınmıştır. Oluşturulan formülasyon ile çıkan sonuçlar literatürde bulunan sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ortaya çıkan formülasyonun sonlu elemanlar yöntemi ile iyi bir uyum gösterdiği saptanmıştır.

(Karaton vd., 2017) Diyarbakır'da bulunan Malabadi köprüsü üzerine çalışma yapılmıştır. Yapı malzeme dayanımları için bazı deneyler yapılmış ve yapı makro modelleme tekniği ile modellenmiştir. Yapılan model üzerinde doğrusal olmayan deprem analizleri yapılmıştır. Üç farklı deprem verisi etki ettirilmiştir ve köprüde oluşan hasarlar incelenmiştir. Plastik deformasyonların köprünün dolgu malzemesinde olduğu görülmüş ve deprem etkisi altında, köprünün ana kemerinin büyük hasarlar aldığı saptanmıştır.

(Birinci vd., 2011) Yapılan çalışmada iki farklı yığma köprü ele alınmıştır. Köprüler ANSYS programı yardımıyla modellenmiş doğal frekansları ve deformasyonları araştırılmıştır. Köprüler için yerinde deneyler yapılarak sonlu elemanlar modeline kalibre edilmiştir. Kalibrasyon öncesi ve kalibrasyon sonrası analizler yapıp değerler karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, en iyi mühendislik uygulamalarıyla oluşturulan ve bilgilendirilen, kalibre edilmemiş sonlu elemanlar modelinin, gerilme ve deformasyon gibi

değerleri ciddi bir şekilde fazla tahmin ettiği anlaşılmıştır. Bu nedenle, bir ortam testi ve model kalibrasyon şeması, tarihi yığma kemer köprülerine uygulandığında daha doğru sonuçların elde edileceği sonucuna varılmıştır.

(Proske ve Curbach, 2005) Almanya'nın iç su yolları güzergahında bulunan iki tane tarihi köprüyü, olası gemi çarpma riskine karşı değerlendirmişlerdir. Darbeye karşı, yapıların en hassas olabileceği noktalar basit sayısal hesaplamalarla bulunmuş ve bu noktalardan malzeme özelliklerini belirlemek için örnekler alınmıştır. Alınan malzeme özellikleri doğrultusunda köprüler ANSYS programında modellenmiştir. Yapılan modellere gemilerin köprülere olası çarpma bölgelerinden, gemi çarpma analizleri yapılmıştır. Fazla hasar alan yapı elemanları için güçlendirme önerilerinde bulunmuşlardır.

(Zani vd., 2020) İtalya'da bulunan tarihi Azzone Visconti köprüsünü ele almışlardır. Tarihi köprü için deneysel ve sayısal deneyler yapılmıştır. Zemin-yapı etkileşimini içerecek şekilde temellerin mekanik davranışını tanımlayan üç farklı model oluşturmuşlardır. Modellerin birinde temel etkileşimi hesaba katılmamış, birinde zeminin sıkışabileceği ihtimali göze alınmış ve diğer modelde ise mevcut zemin verileri kalibre edilerek oluşturulmuştur. Temel etkileşimi hesaba katılmayan modelde (köprü ayaklarının zemine sabit olduğunu kabul edilen model), güvenli olmayan taşıma kapasitesi tahmin edebilir sonucuna varılmıştır. Zeminin sıkışabileceği ihtimali göz önüne alınan model düşük seviyelerde taşıma kapasitesi sonucu verebileceği sonucuna varılmıştır. Mevcut zemin verileriyle kalibre edilen modelin ise optimum taşıma kapasitesi vereceği sonucuna ulaşılmıştır.

(Ademoviç, 2021) Saraybosna'da bulunan tarihi betonarme Careva Cuprija köprüsünü ele almıştır. Ortam titreşim testleri ve küçük tahribatlı testler yapılarak mevcut malzemenin özellikleri elde edilmiştir. Tarihi köprünün güçlendirilmiş modeli ve orijinal modeli analiz edilip karşılaştırılmıştır. Doğal frekanslar ve modlar karşılaştırılmış, çıkan sonuçların arasındaki farkın çok küçük değerlerde olduğu görülmüştür.

(Gönen ve Soyöz, 2021) Birden fazla sismik analiz yöntemi kullanılarak bir yığma kemer köprünün analizi yapılmıştır. Köprünün sismik analizi için üç farklı analiz yöntemi seçilmiştir. Doğrusal olmayan statik analiz, doğrusal olmayan dinamik analiz ve atımlı dinamik analiz yapılmış ve çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapının yüksek titreşim modlarında, doğrusal olmayan statik analizin yetersiz kalacağı, doğrusal olmayan dinamik analizlerin daha doğru sonuçlar vereceği ancak büyük ve ayrıntılı sonlu eleman modeli oluşturmanın uzun zamanlar alacağı saptanmıştır. Atımlı dinamik analizin ise en doğru

bilgileri sunabilmesine rağmen, hesaplama yöntemlerinin daha zorlu olmasından dolayı her zaman mümkün olmayacağı sonucuna varılmıştır.

(Dorji vd., 2021) Avustralya'da bulunan demir yolu güzergahlarında halen kullanılmakta olan, yığma kemer köprülerin malzeme özelliklerini belirlemek için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu amaçla tipik bir yığma kemer köprüden, numuneler alınmış ve çekme-basınç deneyleri yapılmıştır. Alınan numunelerin basınç testi için numunelere yüksek mukavemetli başlıklar eklenmiştir. Çekme testi için Brazilian test yöntemi kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda yığma kemer köprülerin düşünüldüğünden daha iyi dayanımda oldukları ve mevcut tren yüklerini kaldırabilecekleri sonucuna ulaşılmıştır.

(Verstrynge vd., 2021) Yığma yapıların hasar tespitinin yapılabilmesi için akustik emisyon izleme üzerine bir çalışma yapılmıştır. Saha izleme ve hasar tespiti için kullanılan akustik emisyon izleme yönteminin, yığma yapıların heterojen doğası ve hızlı sinyal zayıflaması, yaşatmasına rağmen yöntemin yüksek hassasiyeti özellikle tarihi yapıların hasar tespitinde kullanılması için uygun olabileceği düşünülerek bu çalışma yapılmıştır. Yığma kemer köprülerin kritik hasar bölgeleri tespit edilmiş ve harç alt tabakasında bulunan nem içeriğindeki döngüsel değişikliklerin, çatlakların büyümesine neden olduğu görülmüştür.

(Zampieri vd., 2019) Düzensiz geometriye sahip yığma kemerlerin sismik kapasitelerini araştırmak için çalışma yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi ve yapılan küçük çaplı deneylerin sonuç karşılaştırılması yapılmış ve sonuçlar birbirine yakın değerler vermiştir. Sonuç olarak kemer et kalınlıklarının ve kemerin oturduğu iki ayak arasındaki yükseklik farkının sismik analize etki ettiği saptanmıştır.

(Civera vd., 2021) Yığma köprülerin yapısal sağlık analizleri için, hızlı rahat vektör bağlantısı (FRVF) ile sistem tanımlaması yapmaya çalışmışlardır. Bu yaklaşımın sistem tanımlama (SI) için verimli bir araç olduğu saptanmıştır. Sistem tanımlama yaklaşımlarından biri olan Eigensystem Realization Algorithm (ERA) gibi sistem tanımlama yaklaşımlarıyla benzer değerler verildiği saptanmış ve hasat tespiti için güvenli olduğu sonucuna varılmıştır.

(Pepi vd., 2021) İtalya Todi'de bulunan ve yaygın malzeme bozulması ve yapısal hasarları içeren ciddi hasar koşulları ile karakterize edilen bir taş kemer köprüsü üzerine bir çalışma yapılmıştır. Köprünün, insansız hava araçları yardımıyla elde edilen yüksek çözünürlüklü yakın mesafe fotogrametrisi ve ciddi şekilde hasar görmüş tarihi yığma yapının, sonlu elemanlar modelinin doğru oluşturulabilmesi için ortam titreşim testleri yapılmıştır. Elde edilen verilerle iki ayrı model oluşturmuşlardır. Modellerin birine yığma yapının hasarlı

bölgeleri işlenmiş, diğer modelde hasarlar göz önüne alınmadan standart prosedürlerle model oluşturulmuştur. Yapılan karşılaştırmada özellikle dinamik etkiler için hasar bölgelerinin göze alınması gerektiği vurgulanmıştır.

(Solla vd., 2011) İspanya’da bulunan Roma dönemine ait yığma kemer köprü olan, Lugo köprüsü üzerinde çalışma yapılmıştır. Köprünün iç yapısını öğrenmek için yer altı radarı (Ground Penetrating Radar, GPR) kullanılmıştır. Çalışma tarihi, arkeolojik ve yapısal olarak üç yönlü yapılmıştır. Köprünün antik yapısı yanı sıra, farklı dolgulara sahip birçok toprak altı dolgu bölgesinin olduğu ortaya çıkarılmıştır. GPR yönteminin, arkeologlar ve inşaat mühendislerinin yapıların iç özelliğini öğrenmelerinde yararlı bir yöntem olacağı düşünülmüştür.

(Günaydın, 2019) Yangına maruz kalmış tarihi bir yapının sismik analizi, güncellenmiş bir sonlu elemanlar modeli ile yapılmıştır. Model güncellemesi tahribatsız deneyler ile yapılmıştır. Yapılan güncelleme ile sayısal ve deneysel doğal frekanslar arasında hesaplanan hata oranı ciddi miktarda azalmıştır. Yapılan analiz sonucunda maksimum yer değiştirmeler ve asal gerilme değerleri elde edilmiştir.

(Yurdakul vd., 2021) Bayburt’ta bulunan tarihi kagir bir minarenin deprem analizini yapmışlardır. Yapının bulunduğu bölgeye yakın üç farklı deprem yer hareketi verisi kullanılmıştır. Yapı SAP2000 programında modellenmiş ve analiz edilmiştir. Analiz sonucunda yapıda kullanılan malzemenin çekme dayanımı, deprem etkisi altında oluşacak çekme gerilmesinin altında kalacağı saptanmıştır. Bu nedenle yapının orta bölgelerinde hasarların oluşabileceği sonucuna varılmıştır.

(Saygılı ve Lemos, 2021) Yığma kemer köprülerde, kemer açıklığının etkisini araştırmak için bir çalışma yapılmıştır. Çalışma için farklı kemer açıklığına sahip iki tane yığma köprü modellenmiştir. Oluşturulan modellerin sismik analizi yapılmıştır. Sonuç olarak açıklığın fazla olduğu kemerlerde, gerilme değerlerinin daha büyük olduğu saptanmıştır. Bu nedenle büyük açıklıklı kemerlerde oluşacak hasarların daha büyük olabileceği sonucuna varılmıştır.

1.3. Anadolu’da Köprülerin Tarihsel Gelişimi

Anadolu’da Roma ve Bizans dönemi, Selçuklu dönemi ve Osmanlı dönemlerinde yapılmış olan çok sayıda taş köprü vardır. Yapılan bu taş köprüler genellikle;

* Sürekli kemerli (Köprü boyunca benzer açıklıkta kemerli ve kemerlerin üst noktalarının aynı hizada veya birbirine yakın hizada olan köprüler);

* Tek sayıda kemerli, yükselip ve alçalan (En yüksek kemerin ortada bulunduğu);

* Çift sayıda kemerli, yükselip ve alçalan (En yüksek kemerin ortada bulunduğu)

Bu köprü tiplerinden ilki batı ülkelerinde daha çok kullanılmıştır. İkinci köprü tipi ise daha çok doğu ülkelerinde uygulanmış bir tiptir (Öziş vd., 2007: 504).

1.3.1. Roma-Bizans Dönemi köprüler

Tarihte bilinen ilk taş köprüler roma döneminde yapılmıştır. Aynı zamanda bu dönemde taş köprü inşasında en ileri teknik düzeye ulaşılmıştır. Roma döneminde en üst seviyeye ulaşmış olan taş köprü yapım teknikleri ve kemer kullanım tarzı büyük farklılıklar göstermeden birçok dönemde kullanılmıştır (Troyano, 2003). Anadolu bulunan taş köprülerde de benzer teknikler kullanılmıştır. Fakat coğrafi farklılıklar kemer formlarında, bölgede bulunan taş ocaklarında çıkarılan farklı taş çeşitleri ve farklı teknik bilgiler, örgü tekniklerinde farklılaşmalar olmasına sebep olmuştur.

Roma köprülerinin yapım aşamasında köprünün statik yeterliliği ön planda tutulmuştur (Troyano, 2003). Genelde dairesel kemer formları kullanılan Roma köprülerinde tasarımı etkileyen en büyük etken kemer açıklığı olmuştur. Roma köprülerinde tanımlayıcı bir özellik gösteren teknik yöntem ise, büyük kesme taşların düzenli ve özenli bir işçilikle uygulamada kullanılmış olmasıdır. Fakat bazı Roma köprülerinde tuğla veya tuğla ile birlikte taş kullanıldığı da görülmektedir (Marta,1991). Roma yapılarının büyük bir çoğunluğunda kullanılmış olan bosajlı (dışa doğru çıkıntılı taş) taş, köprü yapılarında da çoğunlukla kullanılmıştır. Tempan duvarlarda kullanılmış olan kesme taşlar, köprü cephelerinde enine ve boyuna geçmeli olarak kullanılmıştır. Taş sıralarından biri boyuna doğrultuda yerleştirilmiş, bir sonraki enine doğrultuda yerleştirilmiştir. Bu uygulamayla dolgu ile tempan duvarın bütünlüğü sağlanmıştır. Taşları birbirleriyle bağlantılarını güçlendirmek için de kenetler ve zıvanalar kullanılmıştır (Adam, 1999). Roma köprülerinde kullanılan kemer yükseklikleri genellikle kendi aralarında büyük bir fark göstermezler. Yapılan köprüler genellikle düşük eğimli köprüler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tip köprülerde genelde basık kemerler veya dairesel kemerlerden oluşmaktadır (Alaboz, 2008: 7).

Roma imparatorluğunun Anadolu'dan doğu tarafına genişlemesi, güçlü bir yol ağının oluşmasına neden olmuştur. Bu durum başlıca akarsular üzerinde köprülerin yapılmasına sebep olmuştur. Bizans yollarının büyük bir çoğunluğu Justinianos tarafından tamamlanmıştır. Önemli bir yol güzergâhı olan Kayseri-Sivas yolu güzergâhında yer alan Kızılırmak ise

geçilmesi zor nehirlerdendir (Alaboz, 2008: 8). Şekil1.1’de Roma dönemi köprüleri, Şekil 1.2’de Bizans döneminde yapılan köprüler harita üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Roma Dönemi Köprüleri
Kaynak: (Yeşilbaş, 2016: 6)



Şekil 1.2. Bizans Dönemi Köprüleri
Kaynak: (Alaboz, 2008: 9)

1.3.2. Selçuklu Dönemi Köprüleri

Anadolu’da bulunan Selçuklu ve Osmanlı dönemi köprülerde, nehirlerin belirsiz bir debiye sahip olmasından dolayı, özellikle ilkbaharda sel sularının ulaşacakları yükseklik ve oluşturdukları etki kuvvetleri göz önünde bulundurularak, nehirlerin ortasına en büyük açıklıklı ve daha büyük yüksekliğe sahip kemerler kullanılmıştır. Nehir kıyısına doğru

gidildikçe, nispeten daha küçük kemer açıklığı ve daha düşük yüksekliklere sahip yani yüksek eğimli olarak yapılan köprüler karşımıza çıkmaktadır. Kemerlerde genellikle sivri kemer formu kullanılmıştır (Alaboz. 2008: 10).

Selçukluların Anadolu'yu yurt edinmesiyle; 12. Yüzyılda Doğu Anadolu'da, 13. Yüzyılda Orta Anadolu'da çok sayıda köprü inşa edilmiştir (Alkan vd., 2011: 14). Selçuklu ve Artukoğlu köprüleri özenli kesme taş ve birbirinden farklı malzemelerden oluşan düzenli, bezemeli köprülerdir. Doğu Anadolu da tempan duvarların ve kemerlerin farklı taş tipleriyle örüldüğü örnekler karşımıza çıkmaktadır. Kemerler büyük ve ince işçilikli taşlarla, tempan duvarlar ise bölgede bulunan taşlar veya moloz örgüler şeklinde olabilmektedir (Tanyeli, 2006). Şekil 1.3'te Selçuklu dönemine ait köprüler harita üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Selçuklu Dönemi Köprüler
Kaynak: (Yeşilbaş, 2016: 7)

1.3.3. Osmanlı Dönemi Köprüler

Osmanlı İmparatorluğu dönemi; fetih dönemleri sefere gidilen yollar arası ve fetih sonrası alınan bölgelerde ulaşımı kolaylaştırmak için ilk olarak nispeten daha basit sayılabilecek geçici ahşap köprüler inşa edilmiştir, daha sonra bu ahşaptan yapılan köprüler taş malzemelerle güçlendirilip yenilenecek, sabit köprüler olmaktadır (Çulpan, 1975). Osmanlı döneminde yapılan köprülerin büyük bir çoğunluğu günümüze kadar gelebilmesine karşın; akarsu geçişlerinin değişmesi, hava koşullarının aşındırıcı etkileri, sel suları gibi doğal ve insanların yanlış müdahaleleri sonucunda kullanılmaz halde olan veya yıkılmış birçok köprü örneği de karşımıza çıkmaktadır (Çulpan, 1975; Tanyeli, 2006). Osmanlı Dönemi köprüleri Erken Osmanlı Dönemi, Mimar Sinan Dönemi ve Geç Osmanlı Dönemi Köprüleri

olarak 3 döneme ayrılmıştır. Şekil 1.4' te Osmanlı dönemine ait köprüler harita üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Osmanlı Dönemi Köprüleri

Kaynak: (Yeşilbaş, 2016: 7)

Mimar Sinan Dönemi Köprüleri:

Osmanlı'nın en güçlü olduğu dönem olan 16. Yüzyılda Mimar-Sinan'ın köprü inşaatı üstünde etkisi çok büyüktür. Bu dönemde köprüler genellikle Trakya bölgesinde yapılmıştır. İstanbul'un başkent olduğu bu dönemde, başkent batısına ve doğusuna asker ve sivillerin geçişini kolaylaştırmak için birçok köprü inşa edilmiştir (Alkan vd, 2011: 16).

Akarsuların yoğun olduğu Trakya-Marmara bölgesinde yapılan Osmanlı köprülerinin en gözde olanları Mimar Sinan'ın yaptığı köprüler olarak karşımıza çıkmaktadır. Lüleburgaz Sokullu Mehmet Paşa, Alpullu Mehmet Paşa, bataklık bir alanı geçmek için yapılan Silivri Köprüsü, Roma dönemine ait bir köprünün yerine yapılmış olan ve Mimar Sinan'ın en güzel eserlerinden biri olan Büyükçekmece Köprüsü dönemin mimari ve teknik birikimini gösteren yapıtlardandır (Alaboz, 2008: 12).

Osmanlı imparatorluğunun klasik mimari döneminde ise; Mimar Sinan döneminin sınırlarını zorlayan mühendislik fikirlerini köprülerde de uygulamıştır. Örneğin; bataklık alan içinde yapılmış olan Büyükçekmece köprüsü bulunduğu alanın zor şartlarına rağmen o zamana kadar benzeri görülmemiş bir teknikle yapılmıştır. Su alanında setler yapılmış ve ayakların yapımı bu şekilde tamamlanmıştır. Bataklık alana kendisinin oluşturduğu mesnet noktalarına dört parçadan oluşan strüktürü beraber planlamıştır. Mimar Sinan'ın anıtsallık ve

azami sadelik anlayışı, yapmış olduğu köprülerde de görülmektedir. Roma köprülerinde görülen masiflik giderek incelen kemer yapılarına, adeta kendi kendini taşıyan yapı tiplerine dönüşmüştür. Bunun en iyi örneği, Mimar Sinan'ın öğrencilerinden biri olan Mimar Hayrettin'in yapmış olduğu Mostar köprüsünde görülmektedir (Özkök vd, 2015).

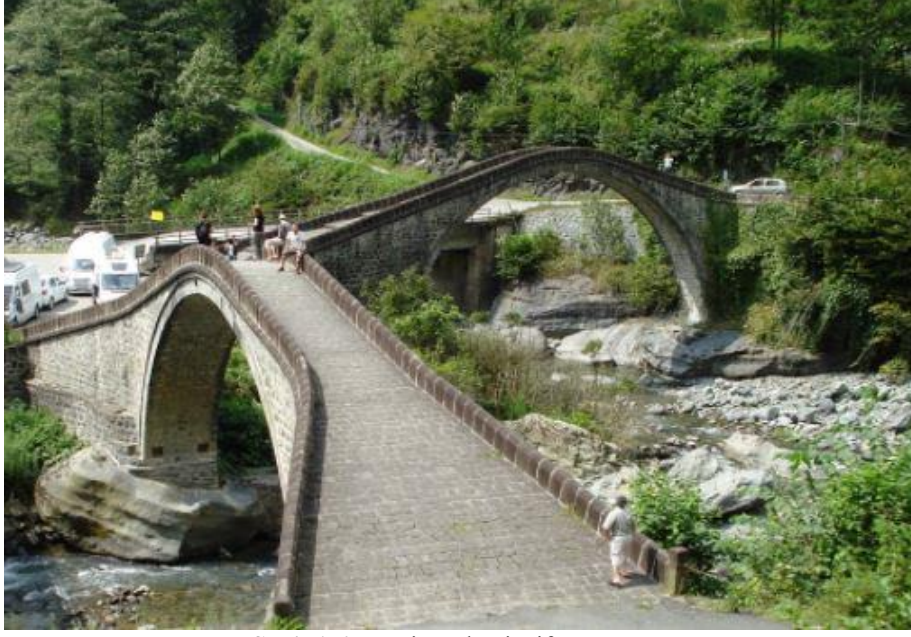
Mimar Sinan dönemi köprülerinden olan Kabuağası (Karıağası) Üç kemerden oluşan bu köprüde kemer formu olarak sivri kemer kullanılmıştır. En geniş açıklıklı kemeri olan orta kemerin ölçüsü 8.79 m'dir. Köprü üzerinde, akarsuyun kıyısına doğru taşkın gözleri bulunmaktadır. Köprü'nün ayaklarında memba tarafında selyaranlar bulunmaktadır. Şekil 1.5'te köprü'nün memba görünüşü verilmiştir (Eyice, 1997: 107).



Şekil 1.5. Kabuağası (Karıağası) Köprüsü
Kaynak: (Eyice, 1997: 107)

Geç Osmanlı Dönemi Köprüleri:

Osmanlı döneminin 17. Yüzyıldan 20. Yüzyılın başına kadar olan döneminde yapılan köprüler; köprü yapılması gereken önemli noktaların daha az olması ve Osmanlı imparatorluğunun eski mali gücünde olmaması, bu dönem içinde yapılmış olan köprülerin sayıca az olmasına, daha küçük boyutlarda yapılmasına neden olmuştur (Alkan vd., 2011: 16). Artvin'in Arhavi ilçesinde bulunan Arhavi Çifte Köprü; akarsu yatağının birbirinden ayrıldığı bir noktada akarsuyun her iki yakasını geçebilmek için yapılmış, tek gözlü ve eğimli iki benzer köprüden oluşmaktadır. Arhavi Çifte köprü 18. Yüzyılda yapılmış bir köprüdür. Köprülerin her biri 52 metre uzunluğa ve 25,2 metre kemer açıklığına sahiptir. Şekil 1.6'da köprü'nün görünüşü verilmiştir (Artvin İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, 2020).



Şekil 1.6. Artvin Arhavi Çifte Köprü
Kaynak: (Artvin İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, 2020)

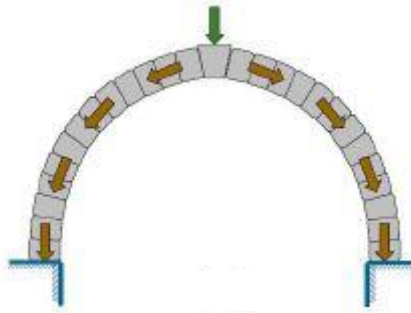
1.4. Köprülerin Kemer Formları

Köprüler içerisinde, günümüze kadar inşa edilmiş en önemli köprü tipi yığma kemer köprülerdir. Bu köprü tipini oluşturan ve köprüye de adını veren kemerlerdir. Kemer formu, tasarımı ile pek çok tarihi yapının vazgeçilmez yapı elemanı haline gelmiştir. Kemer formu, yığma yapılarda yapısal ve estetik kaygılardan dolayı sıklıkla kullanılmaktadır. Daha geniş açıklıkları geçebilmek için uygun olan ve bu nedenle sıklıkla kullanılan kemer formu, geometrik şeklinden dolayı çoğunlukla basınç etkisinde kalmaktadır. Yüksek basınç dayanımından dolayı taşlar, kemer formunun temel yapı malzemesi olmuştur. Zaman içerisinde kullanılan malzeme ve inşaat tekniklerinde büyük bir değişiklik olmamasına rağmen kemer tiplerinde değişiklikler gözlenmiştir. Farklı uygarlıklarda, kendilerine has işlevsel ve süsleme amaçlı, farklı kemer formları kullanılmıştır (Toker ve Ünay, 2004: 133).

Tarihi köprüler, kültürel miras olarak, tarih itibarıyla ulaşım sistemlerinin bir parçası olarak işlevlerini sürdürmektedir. Yaşamları boyunca bu tür yapılar çeşitli doğal afetlere maruz kalırlar, bu nedenle koruyucu önlemler almak bir gerekliliktir. Yapısal ve yapısal olmayan yığma kemer köprülerin unsurları; kemerler, tempan duvarlar, dolgu ve temellerden oluşur. Bu yapılar, yığma duvar tekniği kullanılarak inşa edilmiştir. Yığma köprülere uygulanan yükler, kendi ağırlıkları, dikey yönde ağır trafik yükü ve düzlem dışı yönde; deprem, sel ve rüzgâr yükleridir. Bu yükler arasında deprem ve sel yükleri en büyük hasarı oluşturdukları için en etkili olanlar olarak kabul edilir. Tarihi köprülerde kullanılan yüksek basınç dayanımlı malzemeler nedeniyle, dikey yüklerden kaynaklanan gerilmeler kolaylıkla

karşılır. Ayrıca uzun mesafelerde kullanılan farklı kemer formlarının oluşması, basınç gerilmelerine karşı gelmede önemli bir faktördür. Önemli ölçüde diğer köprülere göre daha yüksek kemerlere sahip köprüler, daha yüksek sismik yüklere maruz kalır. Yapıyı oluşturan ana malzemenin arasında kullanılan daha düşük çekme dayanımına sahip harçlar daha fazla hasara (ayrışmaya) neden olur. Özellikle tempan duvar dolgusunda oluşan hasarlar tempan duvar-kemer ara yüzlerinde daha fazla hasar görür. Depremler sırasında köprü duvarının (tempan duvar) çökmesi ve dolgu kaybına sıklıkla rastlanır. Tempan duvar-dolgu ve tempan duvar-kemer etkileşimlerini ve yapısal davranışlarının belirlenmesi, yığma köprülerin yapısal bütünlüklerini korumak ve olası hasarları en aza indirmek için gereklidir (Hokelekli ve Yılmaz, 2019: 927).

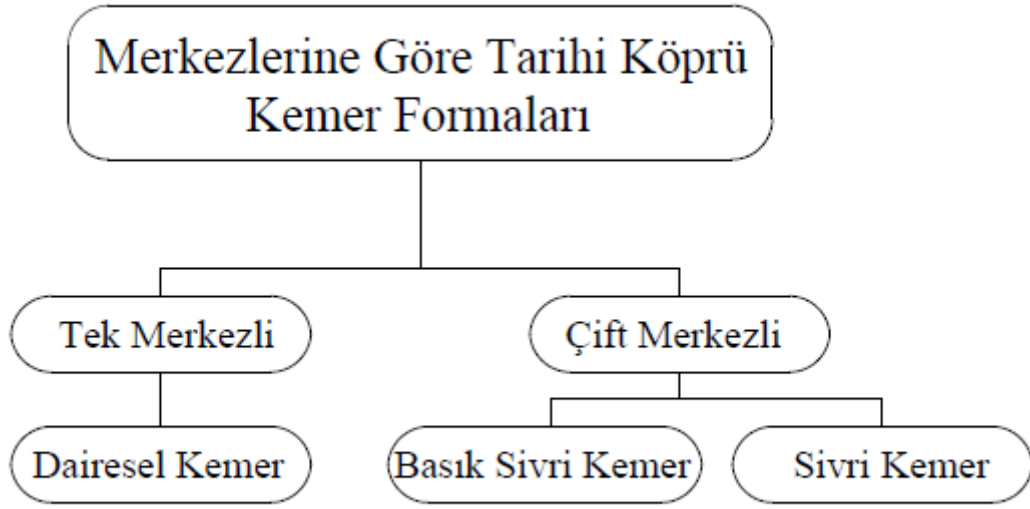
Kemer köprüler hareketli yükler haricinde genellikle basınç etkisinde bulunurlar. Hareketli yüklere maruz kalınca eğilmeye çalışırlar. Bu sebepten dolayı çekme dayanımı zayıf olan taş beton dökme çelik gibi elemanlardan yapılabilirler. Günümüzde tuğla, ahşap, alüminyum ve dövme çelikten yapılmış kemer köprüler de mevcuttur. Kemerler bir anlamda köprü için en basit yapıdır, çünkü taş veya kayadan yapıldığı takdirde kemer formunu oluşturmaktan başka bir şeye ihtiyaç duyulmaz. Şekil 1.7'de kemerlerin genel yapısı gösterilmiştir (Yağcı, 2009: 7).



Şekil 1.7. Kemerlerin Genel Yapısı
Kaynak: (Yağcı, 2009: 7)

Tarihi kemer köprülerde kullanılan kemer formları; dönemseller ve bölgesel farklılıkların yanı sıra köprünün yapıldığı alanın fiziksel özelliğine göre de farklılık göstermektedir (Sert, 2002).

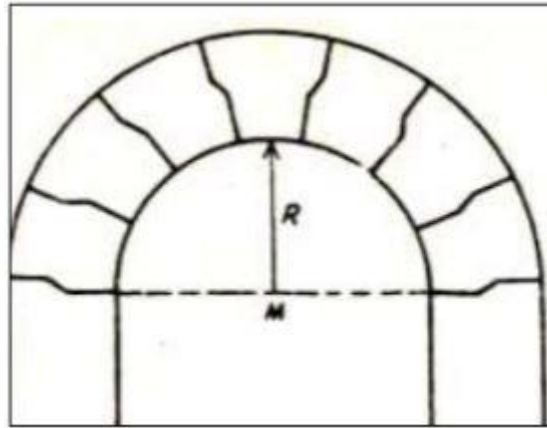
Köprü kemer formları Şekil 1.8'de gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Köprülerin Kemer Formları
Kaynak: (Ceylan, 2013: 13)

1.4.1. Dairesel Kemerler

Şekil 1.9’da gösterildiği üzere başladığı noktadan bittiği noktaya kadar tek bir dairesel eğimle dizilen, yüksekliği yarısına eşit olan kemer formudur. Yapısal olarak bir açıklığı geçmekten ziyade, yük taşıma amacıyla yapılan köprü ve su kemeri gibi yapılarda daha sık kullanılmıştır. Roma köprülerinde en çok kullanılmış olan kemer formudur (Alaboz, 2008: 23). Şekil 1.10’da dairesel kemer örneği verilmiştir.



Şekil 1.9. Dairesel Kemer Formu
Kaynak: (Terminoloji, 2017)

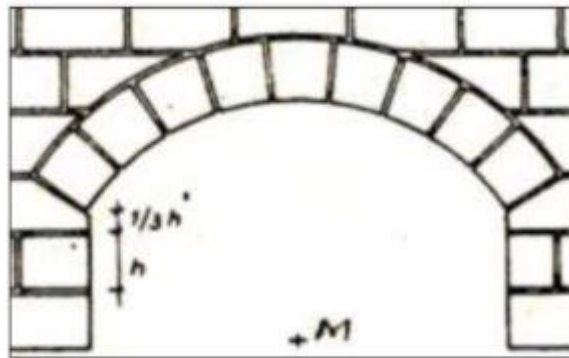


Şekil 1.10. Gediz Meccrası ve Kız Köprüsü
Kaynak: (Ceylan, 2009: 116)

Farklı şekillerde yapılan dairesel kemerlerin performanslarının karşılaştırılabilmesi için, üç farklı dairesel kemer, blokların birleşme yüzeyi düz çimento harçlı, düz harçsız ve geçmeli birleşimli-çimento harçlı olarak yapılmışlardır. Çalışma sonucunda en fazla yük taşıyan dairesel kemer formu; birleşme yüzeyi düz çimento harçlı dairesel kemer olmuştur. Birleşme yüzeyi düz harçsız olan dairesel kemer en düşük yük taşıyan kemer olmuştur (Işık ve Gökdemir, 2005).

1.4.2. Basık Sivri Kemerler

Yay merkezi, açıklık ortasında üzengi seviyesinin altında bulunan, yüksekliği açıklığın yarısından küçük olan kemer formudur. Düşey yük taşıma kapasitesi dairesel kemere göre daha azdır. Yatay kuvvetlerin artması güçlü ayaklar veya gergilerin kullanılmasını gerektirmektedir (Alaboz, 2008: 24). Genellikle Selçuklu ve Osmanlı dönemi Türk köprülerinde kullanılmıştır. Ancak Osmanlı ve Selçuklu Dönemi köprülerinin tümü sivri kemerli olmadığı gibi, Roma ve Bizans dönemi köprülerinin de bazıları sivri kemer formuna sahiptir. Şekil 1.11’de basık kemer formu gösterilmiş, Şekil 1.12’te basık kemer formunda yapılmış köprü kemer örneği verilmiştir.



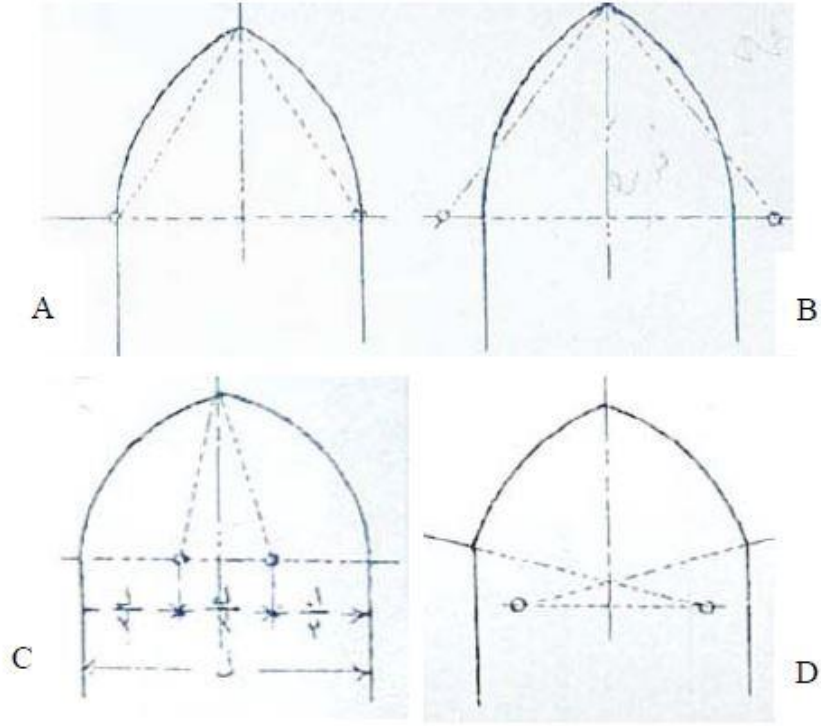
Şekil 1.11. Basık Kemer Formu
Kaynak: (Terminoloji, 2017)



Şekil 1.12. Kırkgöz Kemer (Limyra Köprüsü), Antalya/Finike
Kaynak: (Finike Belediyesi, 2020)

1.4.3. Sivri Kemerler

Orta Çağda ve Gotik dönem mimarilerinde sıklıkla kullanılmış, kemeri oluşturan yayların yarıçapı kemer açıklığının yarısından büyük simetrik iki yayın bir araya gelmesiyle oluşan kemer formudur. Yayların merkezi, kemerlerin ayak birleşiminden başladığı noktanın hizasında veya altında olabilir. Kemeri oluşturan yay merkezlerinin birbirine olan mesafesi arttıkça, kemerin tepe noktası yükselmekte ve kemerdeki sivri görünüm artmaktadır. Dairesel kemere göre köprü ayaklarına aktardığı yükler düşeye daha yakındır. Kemer yüksekliğinin açıklığından daha fazla olması bu durumu gerçekleştiren etken olmaktadır. Selçuklu Döneminde akarsu geçişlerinde yapılan köprülerde ve su kemerlerinde yoğunlukla kullanılmıştır. Osmanlı köprülerinde genellikle sivri kemerler kullanılsa da dairesel kemerlerde çok sık tercih edilmiştir. Şekil 1.13'te sivri kemer formu gösterilmektedir. Şekil 1.14'te sivri kemer örneği verilmiştir (Alaboz, 2008: 23).



Şekil 1.13. Sivri Kemer Formu

Kaynak: (Alaboz, 2008: 23)



Şekil 1.14. Malabadi Köprüsü Silvan/Diyarbakir

Kaynak: (Karaton vd, 2017: 409)

1.5. Yığma Köprülerde Kullanılan Malzemeler

Yığma köprü yapımında farklı malzemeler kullanılmıştır. Doğrudan doğadan elde edildikleri ve ilk dönemde işlenmeden kullanıldıkları için ahşap ve taş doğal malzeme olarak kabul edilebilir. Tuğlalar da kullanılmıştır, ancak bunlar genellikle taş köprülerin bir alt grubu olarak nitelendirilmiştir. Uzun bir süre sonra, dayanıklı malzemeler sayesinde taş köprülerin

çoğu hala korunmaktadır. Buna karşılık, yangın, su, sel vb. nedenlerle malzemelerin kolay ve hızlı bir şekilde bozulması sebebiyle, az sayıda ahşap köprü hizmet vermeye devam etmektedir. Bu dönemde köprüler, esas olarak malzemeler temelinde gelişirken, malzemeler (taş, ahşap vb) köprü yapılandırılmasında önemli bir rol oynamıştır. Çelik ve beton yapay malzemelerdir. Doğadan alınan ham maddeler fiziksel özelliklerini değiştiren karmaşık işlemlere ihtiyaç duyduğundan. Çelik ve beton köprüler ikinci dönem köprüleri olarak düşünülebilir ve aynı zamanda bu malzemelerle yapılan köprüler modern köprü mühendisliğinin başlangıcı olmuştur. Çoğu durumda modern köprüler, çelik ve beton veya diğer yeni malzemelerle inşa edilen köprüler anlamına gelir. Ayrıca günümüzde yüksek mukavemetli malzemelerden ve liflerden oluşan kompozit malzemeler sadece yeni köprüler için değil aynı zamanda mevcut köprülerin güçlendirilmesi için de kullanılmaktadır (Lin ve Yoda, 2017: 72).

Tarihi yapıların malzeme özelliklerini belirlemek, taş kâgir olanlar, kurucu malzemelerin ve bunların ara yüzlerinin test edilmesini içerir. Malzemeler tipik olarak taş bloklardan (az çok düzenli veya düzensiz şekillerde), harçsız veya harçla doldurulmuş ara yüz derzlerinden (zayıf kireç bazlı harç veya diğer hidrolik bağlayıcılar) ve dolgu granül malzemenin oluşur. Her malzeme türü tek başına test edilebilir veya birleştirilebilir. Tipik olarak, taş normalde büyük zorluklar olmadan test edilerek sınıflandırılabilir. Mevcut olduğu yerde harç ile ilgili olarak, standart testlerin (örneğin eğilme ve sıkıştırma) basit olduğu yeni harçtan farklı olarak, test için uygun numunelerin çıkarılmasındaki bariz zorluklar nedeniyle tarihi harç malzemesi üzerinde test yapmak kolay değildir. Aslında, taş-harç birleşimlerinin mekanik davranışı hakkında bilgi toplamak daha önemlidir, çünkü bunlar mevcut durumda bulunan malzemenin özelliğinde belirleyici rol oynamaktadır. Son olarak, en önemlisi, dolgu malzemesinin kendi kendine sınıflandırılabilmesi, yerinde veya laboratuvarında, bir tür toprakmış gibi, toprak mekaniği test teknikleri kullanılarak gerçek yapıdan alınan örneklerle başvurulması önemlidir (Arede vd., 2019: 505).

1.5.1. Malzemelerin Aşınma Durumu

Yüzeyden kemer taşı içindeki derinliğe kadar aşınma durumunun dağılımı, sırasıyla fiziksel, kimyasal ve mekanik yönleri içeren kapsamlı bir yöntem kullanılarak detaylı olarak incelenmiştir (Esaki ve Jiang, 2002: 84). Aşınma koşullarının bu parametrelerine dayanılarak bu yollar izlenir;

Yaşlandırma mekanizmaları;

Taş aşınmasının değerlendirilmesi için etkili laboratuvar yöntemleri

Hava etkisinin derecesini doğru bir şekilde tanımlayabileceğimiz yöntemler

Mekanik özelliklerin hava etkisinin derecesi ile değiştiği yollar

(Esaki ve Jiang, 1999). Bir toplam ayrışma derecesi (TWD) indeksini önermişlerdir. Bu indeks fiziksel ayrışma indeksi (PWD) ve kimyasal ayrışma indeksinden (CWD) elde edilmektedir.

$$TWD = (a(CWD) + b(PWD))(\%) \quad (1.1)$$

a: Kimyasal ayrışma derecesi ve ağırlığı

b: Fiziksel ayrışma derecesi ve ağırlığı

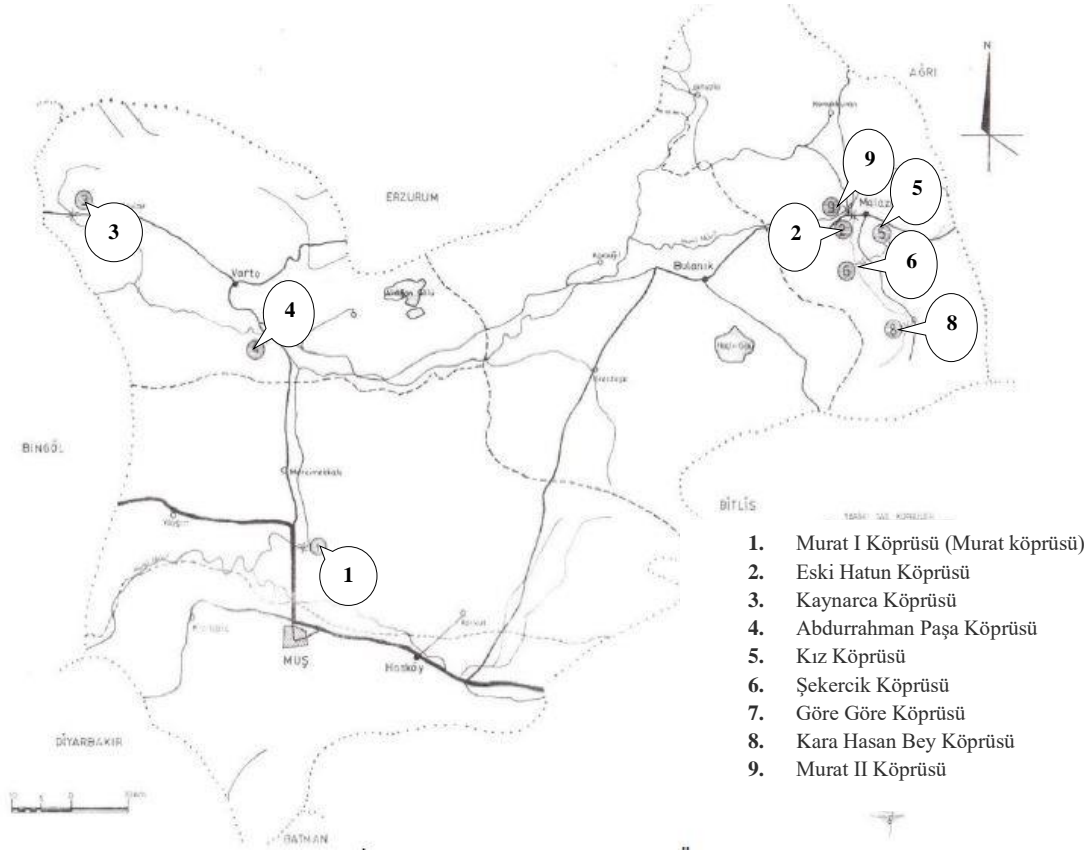
Fiziksel ayrışma derecesi, kimyasal ayrışma derecesinin 3 katı olarak düşünülüp bağıntı (1.2) elde edilmiştir.

$$TWD = (0,25(CWD) + 0,75(PWD))(\%) \quad (1.2)$$

Yapılan bu indekse göre toplam ayrışma derecesi elde edilmektedir (Esaki ve Jiang 2002: 86).

1.6. Muş İli Sınırları İçinde Bulunan Tarihi Köprüler

Coğrafik olarak Doğu Anadolu Bölgesi'nin merkezinde bulunan Muş ilinde farklı dönemlerde çok sayıda köprüler inşa edilmiştir. Muş ili sınırları içinde yapılmış, tarihi kaynaklarda bahsedilen dokuz adet taş köprü vardır. Bunlardan; Murat I, Kaynarca, Hatun, Kız ve Abdurrahman Paşa köprüleri günümüzde mevcuttur. Diğerleri Murat II, Gör Göre, Şekercik ve Kara Hasan Bey köprüleri hakkında herhangi bir kalıntı ve bilgiye ulaşılmamıştır (Öztürk, 2019: 535). Bölgede bulunan köprülerin harita üzerindeki konumu Şekil 1.15'te verilmiştir. Tarihi Murat Köprüsü 2. bölümde ele alınmıştır.

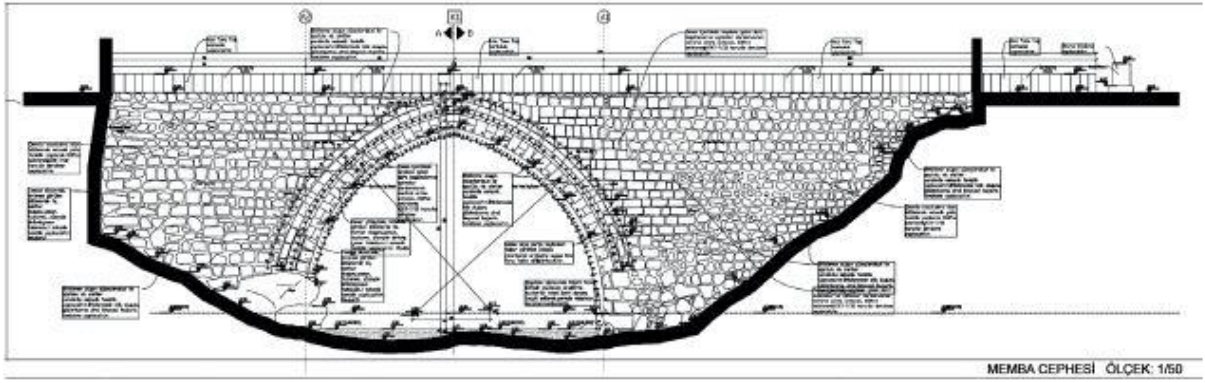


Şekil 1.15. Muş İli Sınırları İçinde Yapılmış Tarihi Köprüler

Kaynak: (Öztürk, 2019: 534)

1.6.1. Malazgirt (Hatun) Köprüsü

Muş ili Malazgirt ilçesinde bulunan tarihi köprü, Şeker deresi üzerine yapılmıştır. Yanında Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yapılan mevcut yol geçişinin sağlandığı betonarme bir köprü bulunmaktadır. Köprü tek gözden oluşmaktadır, sivri kemer formunda bir kemer ile inşa edilmiştir. Doğu-Batı istikametinde konumlandırılmış olan köprü'nün uzunluğu 37.48 m'dir. Köprü'nün yol genişliği 6.61 m ve kemer açıklığı 9.02 m'dir. Yapının tempan duvarları düzgün kesme taştan yapılmış, üzerinde süslemeleri yoktur. Zamanında Muş-Malazgirt yol ağının bağlantısını oluşturmuştur. Tarihi köprü araç trafiğine kapalı olup yaya geçişlerinde kullanılmaktadır (Şen, 2019: 538). Şekil 1.16'da köprüye ait çizim yer almaktadır.



Şekil 1.16. Malazgirt (Hatun) Köprüsü Memba Cephesi
Kaynak: (Öztürk, 2019: 540)

Osmanlı arşivlerinde bulunmuş verilere göre Malazgirt (Hatun) Köprüsünün yıkıldığı ve sadece ayaklarının kaldığı belirtilmektedir (Bitlis Gazetesi, H1308). Köprü'nün daha sonra hangi tarihte restore edildiği bilinmemekle birlikte, şimdiki hali Şekil 1.17'de gösterilmiştir.



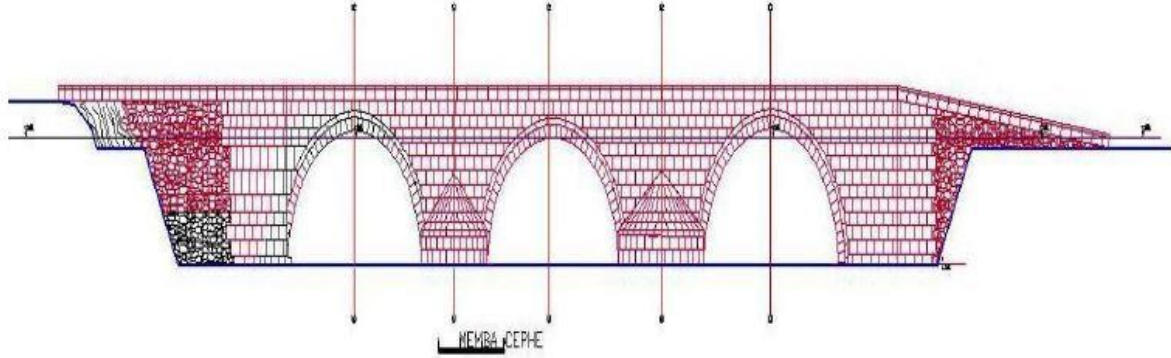
Şekil 1.17 Malazgirt (Hatun) Köprüsü Memba Cephesi
Kaynak: (Muş İl Kültür Turizm Müdürlüğü-Köprüler, 2020)

1.6.2. Kaynarca Köprüsü

Köprü'nün memba cehesinde orta kemerinin üstünde Osmanlıca kitabesi bulunmuştur. Bulunan bu kitabe çok fazla tahrip olduğundan okunamamıştır. Bu nedenle köprü'nün hangi tarihte yapıldığı bilinmemektedir. Ancak, köprü bölgede bulunan diğer taş köprülerle kıyaslandığında, mimarı yapısı ve teknik yapım özellikleriyle, 16. Yüzyılın sonlarıyla 17. Yüzyılın başlangıcında yapılmış olan bir Osmanlı Dönemi köprüsü olduğu düşünülmektedir. Köprüde farklı dönemlere ait onarım izleri bulunmaktadır (Öztürk, 2002).

Köprü'nün, rölöve, restitüsyon çizimleri ve restorasyon projeleri, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Van Meslek Yüksekokulu Restorasyon Programı tarafından 2003 yılında hazırlanmıştır. Bu çalışmayla köprü tescillenmiştir. Köprüye ait projeler Erzurum Kültür

Varlıkları Koruma Bölge Kurulu tarafından onaylanmıştır. Tarihi Köprü Karayolları Genel Müdürlüğü 11. Van Bölge Müdürlüğü tarafından 2006-2007 yılları arasında onarımı yapılmış ve tamamlanmıştır. Bölgede 2012 yılının Nisan ayında oluşan tahrip edici sel suları yüzünden köprüde memba ve mansap cephelerinde aşınmalar olmuştur (Öztürk, 2019: 545). Şekil 1.18’de köprünün memba görünüşünün çizimi verilmiştir.



Şekil 1.18. Kaynarca Köprüsü Memba Cephesi
Kaynak: (Öztürk, 2019: 540)

Kaynarca Köprüsüne, ait onaylanmış olan restorasyon projeleri dahilinde Karayolları 11. Van Bölge Müdürlüğü 2013 yılında köprünün restorasyon ihalesi yapılmıştır. Köprü, onarım çalışmaları Karayolları 11. Van Bölge Müdürlüğü’nün ilgili teknik kadrosu, yüklenici firmanın bünyesinde bulunan teknik elemanlar ve proje müelliflerinin koordineli olarak çalışmasıyla yapı onarım çalışmaları başlatılmıştır.

Tarihi köprü, onaylanan projeler dahilinde gerekli tüm restorasyon çalışmaları yapılarak tamamlanmıştır. Ayrıca dere suyunun özellikle sel dönemlerinde kontrol altına alınabilmesi için dere yatağında köprü ayak çevrelerinde belirli ölçülerle tahkimat çalışması yapılmış ve taşkınlara karşı köprünün her iki tarafına, nehir yatağı doğrultusunda kayalar düzenli bir şekilde istiflenerek dere ıslahı yapılmıştır. Yapılan tahkimatla köprü temelinde oluşacak oyulmalar ve nehir doğrultusunda köprü kenar ayaklarına yakın bölgelerde yapılan ıslahla, kenar ayakları oyulmalara karşı korunması hedeflenmiştir (Öztürk, 2019: 543). Şekil 1.19’da köprünün onarımdan sonraki durumu verilmiştir.

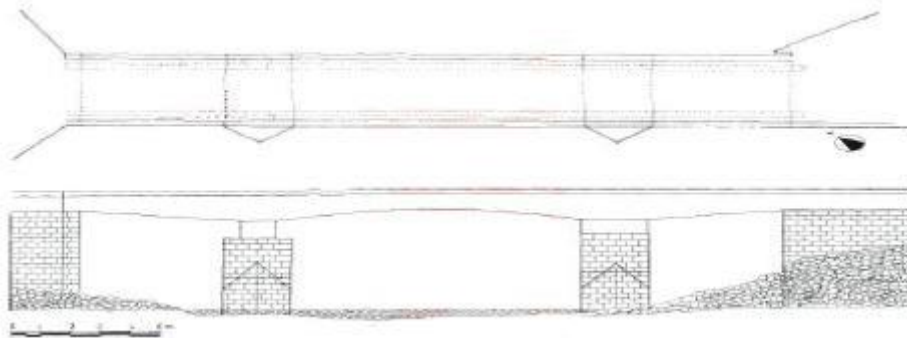


Şekil 1.19. Kaynarca Köprüsü Onarımdan Sonraki Hali
Kaynak: (Öztürk, 2019: 545)

1.6.3. Abdurrahman Paşa Köprüsü

Muş-Varto karayolunun 44. km'sinde, Murat Nehri'ni besleyen Bingöl suyu üzerinde yer almaktadır. Yapının herhangi bir kitabesi bulunmamaktadır. Selçuklu döneminde yapılmış bir yapı olabileceği düşünülmüştür. Aynı zamanda Abdurrahman Paşa Köprüsü, aldığı isimden dolayı Muş beylerinden olan Abdurrahman Paşa tarafından yaptırılmış olabileceği de düşünülmektedir.

Köprü güneybatı-kuzeydoğu yönünde konumlandırılmıştır. Köprü'nün uzunluğu 30 m, yüksekliği 6,50 m ve genişliği 4.40 m'dir (Şen, 2019: 538). Köprüyü oluşturan dört ayak vardır. Tarihi köprü bu haliyle eğimsiz, düz bir yapıdır. Yapının memba cephesinde ayak muhafazası için sivri uçlu üçgen formlu selyaranlar vardır. Köprü'nün mansap tarafında topuk bulunmamaktadır (Kılavuz, 1996: 87). Tarihi Köprü şu anda bölgede yapılan baraj sularının altında kalmıştır. Şekil 1.20'de köprüye ait plan görüntüsü ve Şekil 1.21'de köprü'nün resmi yer almaktadır.



Şekil 1.20. Muş Abdurrahman Paşa Köprüsü Planı ve Cephe Görünüşü
Kaynak: (Kılavuz, 1996: 89)



Şekil 1.21. Abdurrahman Paşa Köprüsü
Kaynak: (Muş İl Kültür Turizm Müdürlüğü-Köprüler, 2020)

1.6.4. Kız Köprüsü

Hangi dönem de yapıldığından ya da kimin tarafından yapıldığı bilinmemektedir. Malazgirt'e 2 km uzaklıktadır. İki bütün taştan oluşmaktadır. Köprü 3 m uzunluğunda, 1 m genişliğindedir. Köprü'nün görüntüsü Şekil 1.22'te verilmiştir.



Şekil 1.22. Kız Köprüsü
Kaynak: (Muş İl Kültür Turizm Müdürlüğü-Köprüler, 2020)

2. TARİHİ MURAT KÖPRÜSÜ

Murat köprüsü Muş ilinde şehir merkezinden 10 km uzaklıkta Varto yolu güzergâhında bulunmaktadır. Tarihi Murat Köprüsünün dünya üzerindeki konumu 38.8627° enlem, 41.5125° boylam noktasıdır.

12 kemer gözü ile teşkilatlandırılan köprü, bugün araç trafiğine kapalı olup sadece yayalar tarafından kullanılmaktadır. Köprü 1990 yılında Diyarbakır Kültür ve Tabiat varlıklarını Koruma Bölge Kurulu tarafından tescil edilmiştir (Yeşilbaş, 2016: 3).

2.1. Murat Köprüsü Tarihsel Gelişim

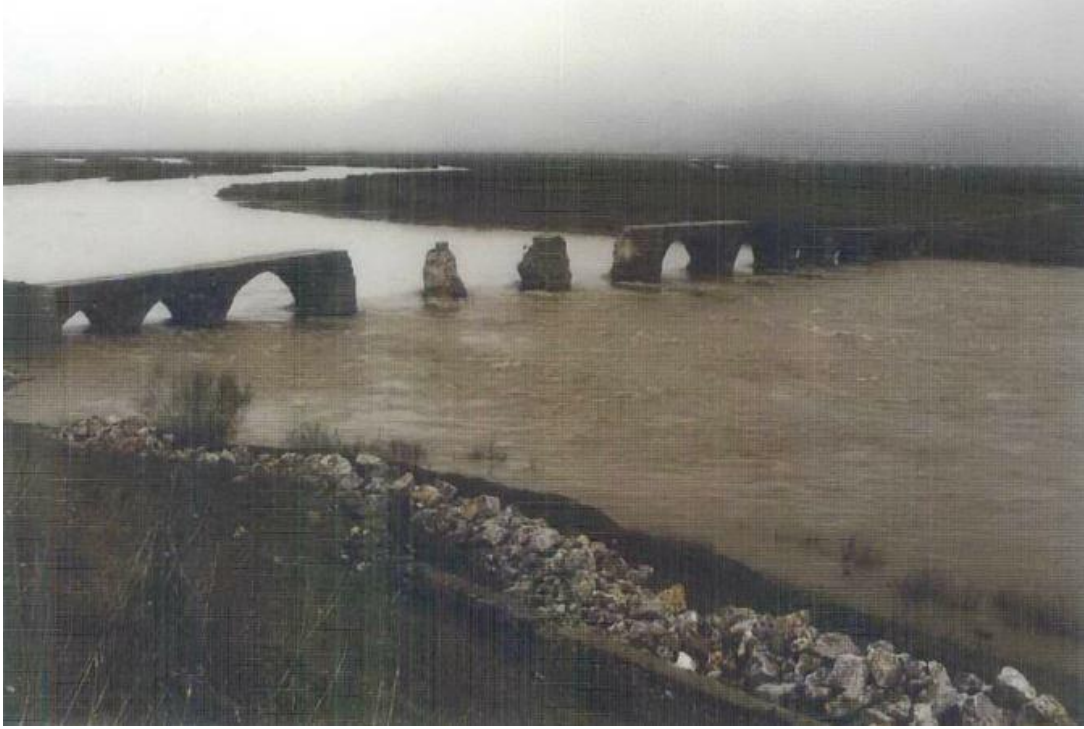
Selçuklu dönemi mimari yapılarıyla kıyasladıklarında kesin olmamakla birlikte 12. Yüzyılda, bazı kaynaklarda ise 13. Yüzyılın üçüncü çeyreğinde inşa edilmiş olabileceği de düşünülmektedir (Tunç, 1975).

Arşiv belgelerinden köprünün yapım tarihi ile ilgili bir bilgi bulunamamıştır. Osmanlı arşivlerinden Muş'taki tarihi köprüler hakkındaki detaylı bilgiler yazar Korkmaz Şen tarafından yapılan bir çalışmada yer almaktadır (Şen, 2019).

Osmanlı arşivlerinde, Muş Murat Köprüsünden, Muş Ulu Köprü olarak bahsedilmesi ve özellikle arşivlerde köprünün 18 kemer gözlü olarak yer alması dikkat çekicidir. Tarihi Murat Köprüsünün şimdiki hali 12 kemer gözlüdür. Ayrıca bazı kaynaklarda Murat Köprüsünden, Çarpık Köprü olarak bahsedilmektedir (Alkan vd, 2011: 17).

2.2. Tarihi Murat Köprüsünde Yapılan Restorasyonlar

Köprüde yapılan ilk restorasyon çalışması, Osmanlı döneminde H.1233/M.1817 tarihinde yapıldığı, köprüde bulunan ve şu an akıbetinin belli olmadığı kitabeden anlaşılmaktadır. Bu dönemde nasıl bir tamiratın yapıldığı bilinmemektedir. Daha sonra Osmanlı arşivlerinden anlaşıldığı üzere köprü 1900'lü yılların başında köprünün kısmen yıkık olduğu sonucuna varılmaktadır. Bu dönemlerde köprüyle ilgili herhangi bir onarım çalışmasının olup olmadığı bilgisine ulaşılammıştır. Bu dönemi takip eden süreçte yazar Volkan Tunç'un 'Van Gölü Havzası'nda kamu yatırımları ve harcamaları 1946-1960' adlı kitabında Murat Köprüsü ile ilgili; 1946'da ABD'nin Marshall planına Türkiye'nin de dâhil edildiği ve bu kapsamda Murat Köprüsü ile ilgili de bir onarım bütçesinin ayrıldığı belirtilmiştir (Tunç, 2020). Şekil 2.1, Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te köprünün yıkılmış olan kemerleri gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Murat Köprüsü Yıkılan Kemerler Mansap Görünüşü
Kaynak: (Öztürk, 2005: 8)



Şekil 2.2. Murat Köprüsü Yıkılan Kemerler Mansap Görünüşü 2
Kaynak: (Öztürk, 2005: 8)



Şekil 2.3. Murat köprüsü Yıkılan Kemerler Memba Görünüşü
Kaynak: (Öztürk, 2005: 7)

Köprü'nün ortasındaki beş ve altıncı (Bu çalışmada yapılan köprü isimlendirilmesine göre yedi ve sekizinci kemerler.) kemerler, 1995 yılında, yakın çevredeki kum ocaklarının ağır tonajlı kamyonlarının baskısına maruz kalması sonucu yıkılmıştır (Öztürk, 2005: 3).

Köprü, 1986 yılında Karayolları Genel Müdürlüğü 11. Van Bölge Müdürlüğü, Köprüler Dairesi Başkanlığı tarafından, tabliyesi beton malzeme ile kaplanıp, metal korkuluklar yerleştirilerek onarılmıştır. Köprüye ait rölöve, restitüsyon, restorasyon ve çevre düzenleme projeleri 1997 yılında Yüzüncü Yıl Üniversitesi tarafından hazırlanarak Erzurum Kültür ve Tabiat Varlıkları Bölge Müdürlüğü tarafından onaylanarak kabul edilmiştir. 2002 yılında Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından onarım ihalesi yapılarak restorasyon çalışmaları başlamıştır. Köprü'nün ayaklarına gelen su basıncını azaltmak için ilgili firma tarafından memba ve mansap yönlerine yaklaşık olarak 5 m genişliğinde kayalar istiflenmiştir. Köprü'nün dördüncü kemer gözü (Bu çalışmada yapılan Köprü Kemer isimlendirilmesine göre dokuzuncu kemer.) nehir suyu etkisiyle kendiliğinden 2004 yılında tamamen yıkılmıştır (Öztürk, 2005: 3). Köprü'nün döşemesinde yapılan onarım çalışması Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Murat Köprüsü Onarım Çalışmaları
Kaynak: (Evrensel, 2004)

Murat köprüsünün onarım çalışmaları, 2002 yılında başlayıp 2009 yılına bitmiştir. Köprü'nün mevcut durumunda ciddi bir onarım gerektirecek bir durum görülmemektedir.

2.3. Tarihi Murat Köprüsünün Mevcut Durumu

Murat köprüsü, Muş ilinin gözde tarihi yapılarından biridir. Yüzyıllar boyunca geçirdiği onarımların da yardımıyla ayakta kalmayı başarmış, türlü olaylara şahitlik etmiş Murat nehrinin yüksek debili sularına direnmiştir. Bu günlerde Muş'un en fazla insan çeken yapısı olmayı başarmıştır. Sadece yaya geçişi için kullanılan köprü görüntüsüyle seyir zevki vermektedir. Köprü etrafında bulunan, işletmeler ve 2020 yılında yapılan rekreasyon alanı sayesinde de insanlar için vazgeçilmez bir mekandır. Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da köprü'nün genel görünüşleri verilmiştir.



Şekil 2.5. Murat Köprüsü Mansap Görünüşü

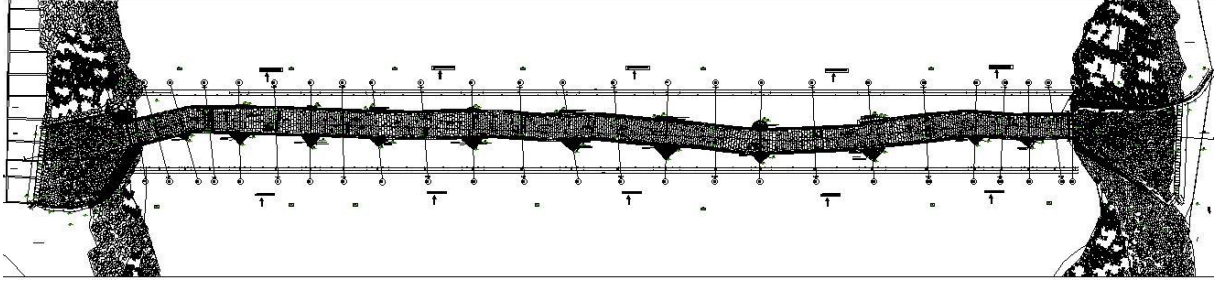


Şekil 2.6. Murat Köprüsü Memba Görünüşü

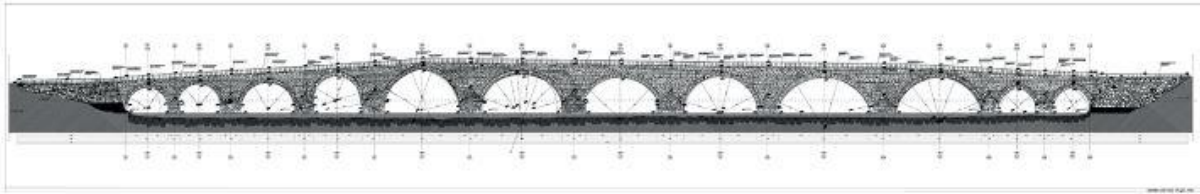
2.3.1. Murat Köprüsü Plan ve Mimari Özellikleri

Köprü, Murat nehri üzerinde olup Kuzeydoğu-Güneybatı doğrultusunda uzanmaktadır. Genel olarak 183,34 m uzunluğunda ve 4,67 metre genişliğinde ölçülere sahiptir. 12 gözden oluşmaktadır. Bu gözler kalın taş ayaklar üzerine oturtulmuş kemerlerden oluşur. En geniş açıklığa sahip kemeri 14,13 m ile K9 kemeridir. En yüksek ayaklara sahip kemeri 8,45 m ile K5 kemeridir. Tarihi yapıda genellikle sivri kemer formu kullanılmıştır. K7 kemeri, tek bir dairesel eğimle oluşmuştur. Diğer kemerlere bakıldığında, kemer oluşumları, farklı

yarıçaplara sahip yayların birleşmesi ile sağlanmıştır. Köprü boyuna doğrultuda tek bir aks üzerine oturtulmamış, köprüde çarpıklık vardır. (Şekil 2.7) Bu durumun sebebi suyun akış yönü ve debisi dikkate alınarak, böyle bir planlamaya ihtiyaç duyulduğu düşünülmektedir. Fakat çarpıklığın bariz olduğu bölgenin köprünün orta kısmında değil, nehrin bir kenarına yakın olduğu gerçeği, yapı yapılırken nehrin iki kıyısından imalatın başladığı ve yapıyı birleştirme sırasında böyle bir sıkıntıyla karşılaşıldığı da akıllara gelmektedir.

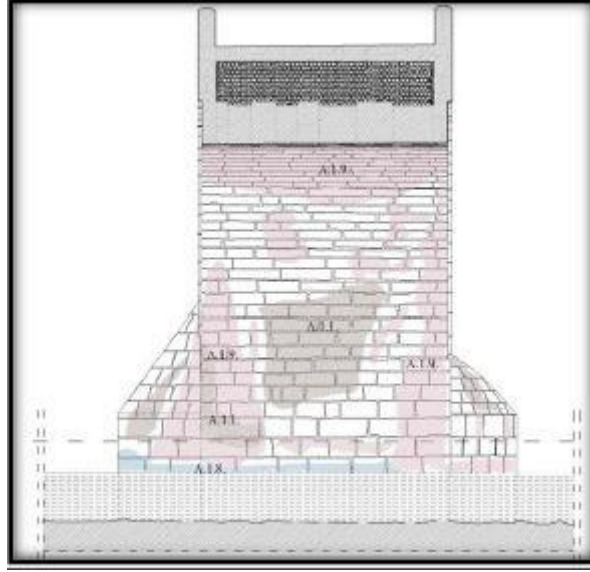


Şekil 2.7. Murat Köprüsü Plan Görünüşü
Kaynak: (KGM, TKŞMA B.11/İ.49/N.04)

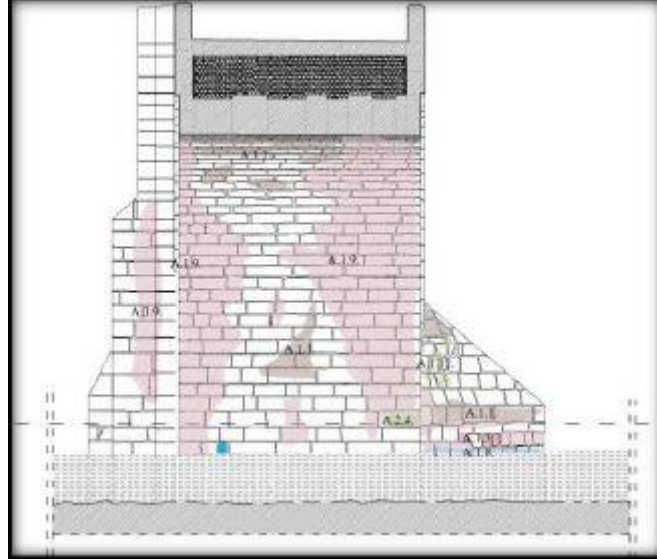


Şekil 2.8. Murat Köprüsü Genel Görünüşü
Kaynak: (KGM, TKŞMA B.11/İ.49/N.04)

Yapının her iki ucu nehir kenarındaki mevcut zemine bağlanmıştır. Nehir içinde bulunan köprü ayaklarının, zeminle bağlantısının nasıl olduğu hakkında bir bilgi bulunmamaktadır. Yapıya gelebilecek olası zararlardan kaçınmak için ayak temellerine bir araştırma çalışması yapılmamıştır. Ayak temelleri için hendekler açılıp temel zeminini güçlendirmek için kaya dolgusu yapıldığı düşünülmektedir. Yapının ayaklarında memba tarafında üçgen tabanlı üçgen birleşimli selyaranlar vardır. Mansap bölgesinde ise dikdörtgen tabanlı eğimli birleşimli veya yarım daire tabanlı eğimli birleşimli topuklar vardır. Nehir kıyısına yakın olan ayaklarda, selyaran bulunmasına rağmen, topuk bulunmamaktadır. Bunun sebebinin nehir kenarında suyun debisi, nehrin orta kısmına oranla nispeten daha düşük olması olduğu düşünülmektedir. Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da ayaklarda bulunan selyaran ve topuk gösterimleri yapılmıştır.



Şekil 2.9. K9 Kemer K1-K1 Kesiti
Kaynak: (Güler, 2016: 14)



Şekil 2.10. K9 Kemer K2-K2 Kesiti
Kaynak: (Güler, 2016: 16)

Köprü yanlardan orta kısma doğru yükselmekte ve buna karşılık köprünün kemerleri de değişkenlik göstermektedir. Yapının en yüksek kısmı orta kısmına denk gelmemekte, K5 kemerinin üst kısmına denk gelmektedir. Yapının kuzeydoğusundaki nehir kenarı birleşim yerinin ilk kemer ayağının, su seviyesinden korkuluklara kadar olan yüksekliği 5.70 m'dir. Yapının güneybatıdaki nehir kenarı birleşim yerinin ilk kemer ayağının, su seviyesinden korkuluklara kadar olan yüksekliği ise 5.23 m'dir. Yapının en yüksek olduğu K5 kemerinin, su seviyesinden korkuluklara kadar olan yüksekliği 8.45 m'dir. Yapın K5 kemeri baz alındığında kuzeydoğu yönünde %2.63 eğimde, güney batı yönünde ise % 6.97 eğimdedir.

Köprünün her iki tarafına nehir suyunu daha geniş alana yayıp su hızını düşürmek için kaya taşlarından tahkimat yapılmıştır. Yapının memba bölgesinde su hızını kontrol etmek için

yapay bir gölet yapılmıştır. Bu sayede nehir suyu daha yavaş bir hızda köprüye temas etmektedir. Aynı zamanda köprünün memba ve mansap tarafında nehir kıyısının genişlemesi için belli seviyelerde ıslah yapılmıştır. (Şekil 2.11 ve Şekil 2.12)



Şekil 2.11. Memba Yönünde Yapılan Tahkimat



Şekil 2.12. Mansap Bölgesinde Yalan Tahkimat

2.3.2. Murat Köprüsü Kullanılan Malzemeler

Köprüde nehir üzerinde bulunan gözlerin kemerlerinde, göz tonozlarında, selyaranlarında ve harpuştalarında kesme taşların, gözlerin tempan duvarları ile kara bölümünde bulunan tempan duvarlarında ise yarı yonu taşların kullanıldığı gözlenmiştir (Güleç vd., 2015: 10). Tempan duvarda kesme taş olarak sıklıkla bazalt taşı kullanılmıştır. Bazı kısımlarda kireç taşının da kullanıldığı görülmektedir. Bunun sebebi köprünün farklı dönemlerde onarım geçirmesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Köprünün nehir kıyısıyla birleşim bölgesinde bulunan ayaklarında moloz taşı, döşemesinde 20 cm kalınlığında bazalt taşı kullanılmıştır (Güleç vd., 2015: 10).

Mardin Müze Müdürlüğünün Restorasyon-Konservasyon ve Analiz Laboratuvarı tarafından yapılan harç analizleri sonucunda, yapıda kullanılan harcın bağlayıcısı %5-15 arası oranında kireç ilave edilmiş 100-200 arası dozlu portland çimentosu olduğu saptanmıştır. Bu tespitler doğrultusunda kullanılan harcın 20. yüzyılın ikinci yarısı onarım harçlarının olduğu saptanmıştır (Güleç vd., 2015: 4) Ayrıca harç örneklerinin içinde çok az oranda proteinin varlığı görülmüştür. Bunun sebebi olarak kuş, böcek vb. hayvansal ve bitkisel kalıntılar olduğu düşünülmüştür. Agregata olarak, 4mm elek altı boyutta bol kuvars ve volkanik kayalık içerikli dere-kara kumu ve 8mm elek altı boyutta kuvars ve volkanik kayalık içerikli şistik ve tufik kökenli dere-kara kumu kullanılmıştır. Ayrıca köprünün ilk yapıldığında kullanılan harç özellikleri alınamadığından tespit edilememiştir. Analizi yapılan harcın onarımlar zamanında kullanıldığı düşünülmektedir. Şekil 2.13'te kullanılan farklı taşlar gösterilmiştir. Şekil 2.14'te nehir kıyısına birleşim bölgelerinde kullanılan moloz taşları gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Murat Köprüsü Tempan Duvarında Kullanılan Farklı Taşlar



Şekil 2.14. Nehir Kıyısı Birleşim Ayağında Kullanılan Moloz Taşları

2.3.3. Murat Köprüsü Oluşan Bozulmalar

Genel anlamda köprüye bakıldığında statik açıdan herhangi bir sıkıntı görülmemektedir. Yapıda en fazla göze çarpan bozulma derz kayıplarıdır. Köprü'nün çeşitli

yerlerinde kirlenmeler ve sudan kaynaklı kireçlenmeler (tuzlanma) mevcuttur. Kemer iç yüzeylerinde (karınlarında) de yer yer tuzlanmalar gözlenmiştir (Şekil 2.15, Şekil 2.16). Memba cephesindeki kemer taşları, tempan duvar ve bazı selyaran taşlarının yer yer koptuğu (malzeme kayıpları) gözlemlenmiştir. Cephe ve korkuluklarda yer yer kirlenme ve bazı taş yüzeylerinde erimeler gözlemlenmiştir. Tempan duvar taşlarında ve bazı kemer taşlarında derz boşalmaları da görülmüştür. Köprünün bazı korkuluk taşlarında çatlamlar ve bazı taşların birbirinden ayrıldığı, derzlerin boşaldığı ve taşların yerlerinden düştüğü görülmüştür. Köprünün döşemesinde yer yer oturmalar olmuştur (Şekil 2.18). Döşeme altındaki dolgudan kaynaklandığı düşünülmektedir. Köprüde harç arasında bazı bölgelerde bitki oluşumu gözlenmiştir (Şekil 2.19). Köprü ayaklarının diplerinde küçük oranlarda temel boşalması olmuştur (Şekil 2.17).



Şekil 2.15. Murat Köprüsü K2 Kemerinin İç Yüzeyinde ve Ayak Diplerinde Oluşan Kireçlenmeler



Şekil 2.16. Murat Köprüsü A7 Ayağı Oluşan Derz Boşalmaları ve Nehir Suyu Kaynaklı Kireçlenme ve Kararmalar.



Şekil 2.17. Murat Köprüsü A1 Ayağında Oluşan Temel Boşalmaları ve Kemer İç Yüzeyinde Oluşan Kirlenmeler, Kireçlenmeler.



Şekil 2.18. Murat Köprüsü Döşemesinde (K5 Kemerinin Üstü) Oluşan Oturmalar ve Korkuluktaki Derz Kayıpları.



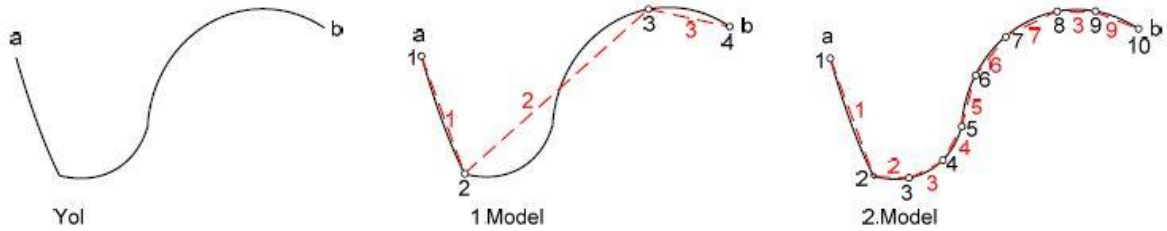
Şekil 2.19. Murat Köprüsü A1 Ayağında Oluşan Bitkilenmeler ve A2 Ayağında Oluşan Malzeme Kayıpları

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEM)

Statikçe belirli ve belirsiz yapı sistemlerinin çeşitli yükler altında çözümlenmesi için gerekli bir hesap yöntemidir. Karmaşık olan mühendislik problemleri aynı karmaşıklıkta olan çözümler içerir. Çözümde oluşan bu karmaşa çözüm aşamasını hassasiyetten uzaklaştırır. Karmaşık problemlerin en kısa yoldan ve doğru sonuca en yakın çözüme götürülmesi sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılabilir. Çözumsuz gibi görünen problemler bile bu metotla çözülebilmektedir (Ural, 2017: 15).

Yapı sistemi ne kadar karmaşık olursa olsun, sistemi klasik mekanikte çözümü bilinen sonlu sayıda elemana bölüp çözüme mantığından ibarettir. Asıl olan tüm sistemi çözümü bilinen elemanlara böldükten sonra sistemin çözümünü bulmak için eleman çözümlerinin nasıl birleştirilecek olmasıdır. Bu çözüm, elemanların birbirine bağlantısının sadece düğüm noktalarından olduğu ve bu noktalarda oluşan yer değiştirmelerin birbirlerine eşit olduğu varsayımıyla yapılmaktadır. Sistemin sonlu sayıda elemana bölünmesine "Sistemin modellenmesi" denilmektedir. Şekil 3.1'de daha iyi anlaşılması için bir örnek verilmiştir (Topçu, 2015: 6).



Şekil 3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi Açıklama Örneği
Kaynak: (Topçu, 2015: 7)

Şekil 3.1'de görüldüğü üzere a-b noktaları arasında karmaşık bir yol bulunmaktadır. Bu yolun uzunluğunu bulmak için yolun koordinatları ve eğrinin fonksiyonu verilmiş olsa uzunluğu integral alınarak bulmak mümkündür. Yolun fonksiyonu bilinmiyorsa veya biliniyor ama karmaşık durumdan dolayı integral almak zor oluyorsa yol 1. model ve 2. model gibi modellenebilir. Yol sisteminin uzunluğunu bulmak için yol bütünü oluşturulan parçaların toplamı kullanılır. 1. modelde daha az hesap yüküyle, 2. modelde daha fazla hesap yüküyle çözüme ulaşırlar. Yapılmış olan her iki çözüm de yolun yaklaşık bir değerini verir. Ancak 2. modelde yapılacak çözüm daha doğru değer vermiş olacaktır. Sistemin bölündüğü eleman sayısı arttıkça, sonucun doğruluğuna daha fazla yaklaşılır. Yolun uzunluğu bir skaler (sabit bir sayı) değer olduğu için koordinat sisteminden bağımsızdır. Yol koordinat sisteminde nerede

olursa olsun uzunluğu sabittir. Bundan dolayı yol sistemini bölen parça elemanların toplam uzunluğu yol sisteminin uzunluğunu verir, ancak sonuç yaklaşık bir değerdir. Sonlu elemanlar metodu da tamamen bu mantığa benzer bir mantıkla çalışmaktadır. Sonuç olarak sistemin koordinat sisteminden bağımsız ve sabit bir değeri vardır. Sistem sonucu bilinen elemanlara (çubuk, üçgen, dörtgen, küp, vb.) bölünür, her bir elemanın toplam potansiyeli bulunur ve bunlar toplanarak sistemin toplam potansiyeli bulunur. Geometrinin, yüklerin ve sınır koşullarının modellenmesi sonucunda oluşan kayıplar sonucun yaklaşık olmasına neden olur (Topçu, 2015: 8).

Murat köprüsüne yapılan analizler sonlu elemanlar yöntemine göre çözüm üreten ANSYS programı ile gerçekleştirilmiştir. ANSYS, mühendislik uygulamalarını, bilimsel deneyleri dijital olarak modelleyen bir yazılımdır. Fiziksel problemleri çözmek için bilgisayar tabanlı birtakım metotlar kullanır. ANSYS programlarından biri olan ANSYS Workbench'te yapısal analizler yapılabilmektedir.

Murat köprüsünün yapısal davranışını öğrenmek amacıyla, ANSYS Workbench programında sonlu elemanlar yöntemi ile analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde taşıyıcı sistem elemanlarına ait genel bilgiler, eleman boyutları ve malzeme özellikleri köprü'nün rölöve ve restorasyon projelerinden, sanat tarihi raporlarından, mimari raporlardan ve Karayolları Genel Müdürlüğü'nden elde edilmiştir.

Yapılan analizler

Zati yük analizi

Modal analiz

TBDY 2018'e göre analiz

2011 Van depremi etkisine göre analiz

Hidrolik analiz

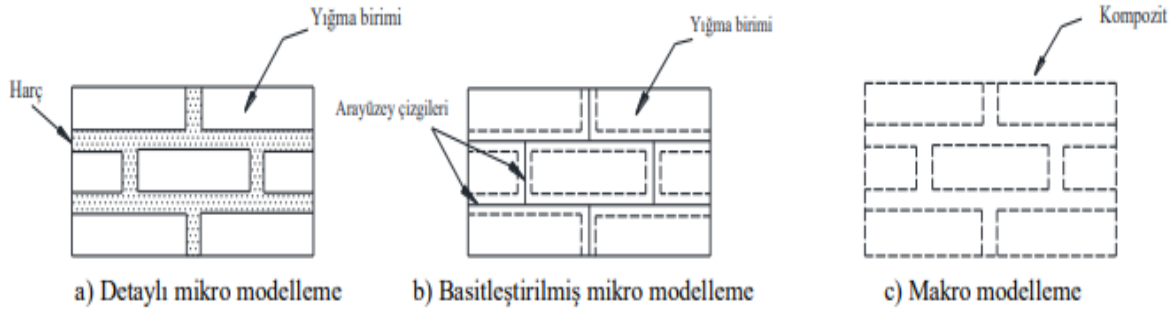
H30-S24 taşıt yüklemesine göre analiz

Yapılan bu analizlerle köprü'nün gerilme noktaları belirlenmiştir. Analiz için oluşturulan sonlu eleman modeli 94797 elemandan oluşmaktadır. Modelde 84576 tane düğüm noktası bulunmaktadır. Tüm analizler doğrusal (lineer) elastik olarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.1'de sonlu eleman modelinde kullanılan düğüm noktası ve eleman sayısı verilmiştir.

Tablo 3.1. Sonlu Elemanlar Modelinin Dügüm ve Eleman Sayısı

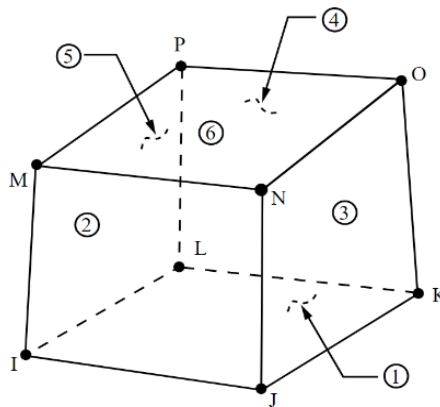
	Dügüm Nok.	Eleman
Model	84733	95145

Yığma yapıların sayısal analizi için 3 farklı modelleme tekniği vardır. Mikro modelleme, birleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme teknikleri ile modelleme yapılır. Mikro modelleme, çözüm süresi çok uzun olduğu için genellikle küçük yapıların çözümünde kullanılır veya büyük bir yapının bir parçasını analiz etmek için kullanılan bir yöntemdir. Birleştirilmiş mikro modellemede, yapıda kullanılan bloklar harç tabakasının yarısı kadar genişletilerek harç tabakası ihmal edilir ve blok birleşimler birbirinden yüzey çizgi ile ayrılır. Makro modellemede ise, bloklar ve bloklar arası harçlar bir bütünmüş gibi kabul edilip modelleme yapılır. (Özmen ve Sayın, 2020) Bu tez çalışmasında makro modelleme ile çözüm yapılmıştır. Şekil 3.2’de modelleme teknikleri verilmiştir.



Şekil 3.2. Yığma Yapı Modelleme Teknikleri
Kaynak: (Zucchini ve Lorenço, 2004: 920)

Sonlu elemanlar modelinde katı yapılar, SOLID 185 eleman tipi ile modellenmiştir. SOLID 185 elemanı üç boyutlu doğrusal şekil fonksiyonlarına sahip ve 8 düğüm noktası içeren bir eleman türüdür. Her bir düğüm noktasında öteleme ve dönme yönlerinde toplamda 6 serbestlik derecesi bulunmaktadır. Elemanın şematiki Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Solid 185 Elemanı Şematik Görünümü

Köprü geometrisi Hex dominant metoduna göre meshlenmiştir. Aşağıda mesh'in genel görüntüsü ve köprü modeli Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Tarihi Murat Köprüsü Modeli ve Mesh Görüntüsü

Tarihi köprüde kullanılan ana malzemenin bazalt taşı olduğu bilinmektedir (Ural, 2017). Bu çalışma yapılırken yapıda kullanılan malzemelerle ilgili bir laboratuvar çalışması yapılmamıştır. Malzeme özellikleri tarihi köprüyle ilgili daha önce yapılmış olan bir çalışmadan alınmıştır (Ural, 2017). Analiz için kullanılan malzeme özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Köprünün Analizlerinde Dikkate Alınan Malzeme Özellikleri

Malzeme	Elastite modülü (N/mm ²)	Poisson oranı	Malzeme yoğunluğu (kN/m ³)	Basınç Dayanımı (MPa)
Kemer taşı	6960	0,3	26,2	81
Tempan duvar	6960	0,3	26,2	81

Kaynak: (Ural, 2017: 17)

3.2. Yapılan Analizler

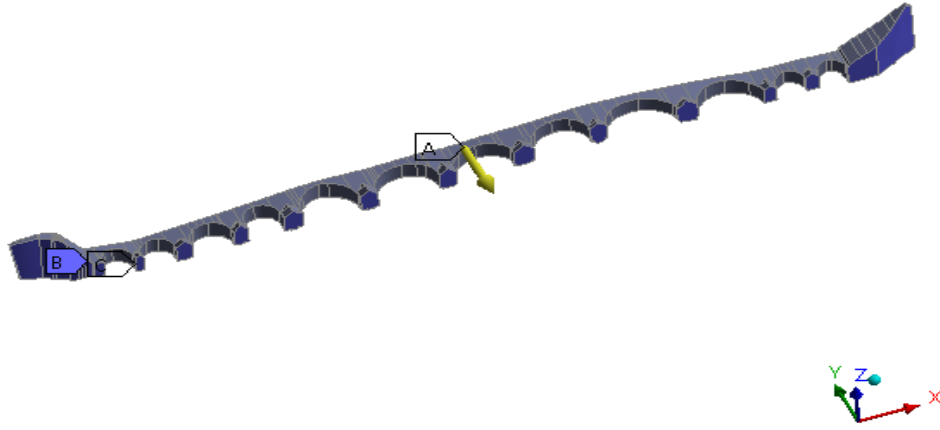
3.2.1. Zati Yük Analizi ve Modal Analiz

ANSYS programında girilen malzeme özellikleri doğrultusunda köprünün yer çekimi etkisine bağlı olarak analizi yapılmıştır. Yapı katı model olarak modellenmiştir. Yapıda kullanılan dolgu malzemesi hakkında bir bilgiye ulaşılmamış, dolgu malzemesi tempan duvarda kullanılan malzemenin %50'si dayanımında kabul edilmiş ve hesaba katılmıştır.

Tarihi köprünün serbest titreşim davranışının elde edilebilmesi için yer çekimi ön gerilmeli modal analizi yapılmıştır. Analizde 20 mod hesaba katılmıştır. Şekil 3.5'te köprünün zati yük ve modal analiz modeli verilmiştir.

B: Static Structural
Figure

- A** Standard Earth Gravity: 9806.6 mm/s²
- B** Fixed Support
- C** Fixed Support



Şekil 3.5. Zati Yük ve Modal Analiz Modeli

3.2.2. Deprem Analizleri

Tarihi köprünün deprem davranışını belirlemek amacıyla deprem analizleri yapılmıştır. Bölgede olabilecek olası depremlere karşı göstereceği davranışı incelenmek için “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018)” dikkate alınarak deprem analizi yapılmıştır. Ayrıca yakın geçmişte, bölgeye yakın konumda gerçekleşen 2011 Van depremine göre de analizler yapılmıştır.

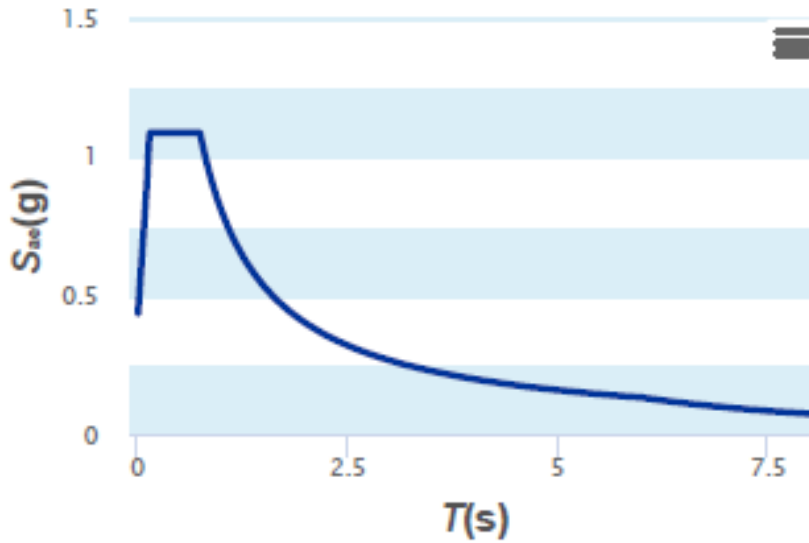
Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre yapılan deprem analizinde, analiz için gerekli deprem verileri Türkiye Deprem Tehlike Haritasından alınmıştır. Türkiye Deprem Haritasına Tarihi Muş Murat Köprüsünün enlem ve boylam değerleri girilmiştir. Zemin etüt verileri bilinmediği için ZE zemin tipi seçilmiştir. Deprem verileri tarihi köprüye 3 boyuttan etki ettirilmiştir. Deprem haritasına girilen değerler Şekil 3.6'da verilmiştir.

Kullanıcı Girdileri

Rapor Başlığı:	murat köprüsü	
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	DD-2	50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
Yerel Zemin Sınıfı	ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak - katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \% 40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ($C_u < 25$ kPa) içeren profiller
Enlem:	38.8627°	
Boylam	41.5125°	

Şekil 3.6 Türkiye Deprem Tehlike Haritasına Girilen Veriler.

Girilen bu veriler doğrultusunda tarihi köprünün konumuna ait periyot spektral ivme grafiği elde edilmiştir. Grafik 3.1’de köprünün konumuna ait periyot spektral ivme grafiği verilmiştir.



Grafik 3.1. TBDY 2018 Tarihi Muş Murat Köprüsü Konumu Periyot-Spektral İvme Grafiği
Kaynak: (AFAD, 2020)

ANSYS programı yardımıyla yapılan deprem analizleri frekans tanım alanına göre yapılmıştır. Bu nedenle elde edilen periyot spektral ivme grafiği, frekans spektral ivme grafiğine dönüştürülmüştür.

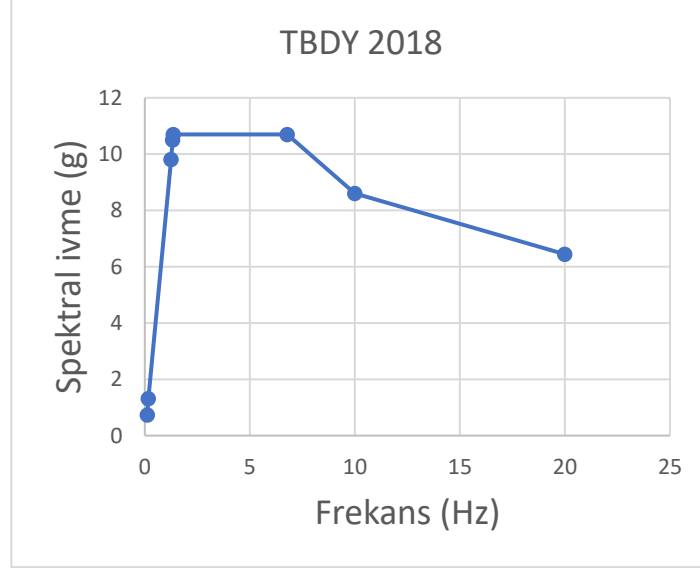
Periyot değerleri frekans değerlerine dönüştürülerek grafik elde edilmiştir. Bu dönüştürme frekans ve periyot arasındaki mevcut bağıntı ile yapılmıştır.

$$F=1/T$$

F= frekans (s^{-1})

T= Periyot (s)

Bu bağıntıdan yardım alınarak Grafik 3.2 elde edilmiştir.



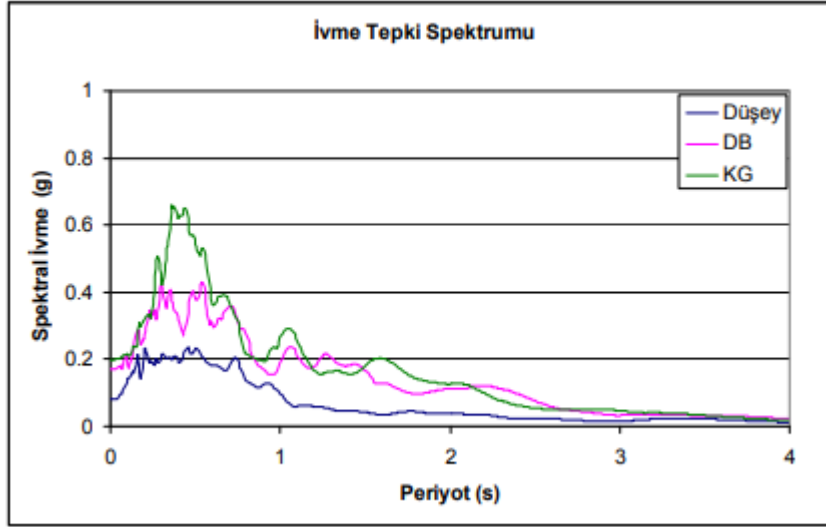
Grafik 3.2. TBDY 2018 Tarihi Muş Murat Köprüsü Konumu Frekans-Spektral İvme Grafiği

2011 yılında meydana gelen Van depremi verileri, Yıldız Teknik Üniversitesi tarafından deprem etkisini araştırmak için hazırlanan “Yıldız Teknik Üniversitesi 23 Ekim 2011 Van Depremi Teknik İnceleme Raporu” teknik raporundan alınmıştır. Depreme ait verileri ölçen ivmeölçer istasyonları Tablo 3.3’te verilmiştir. Ölçüm alınan istasyonlardan biri olan Muş Malazgirt istasyonu tarihi köprüye yaklaşık 90 km uzaklıktadır. Grafik 3.3’te depreme ait ivme spektrum grafiği verilmiştir.

Tablo 3.3. 2011 Van Depreminde Ölçülen Maksimum İvme Değerleri

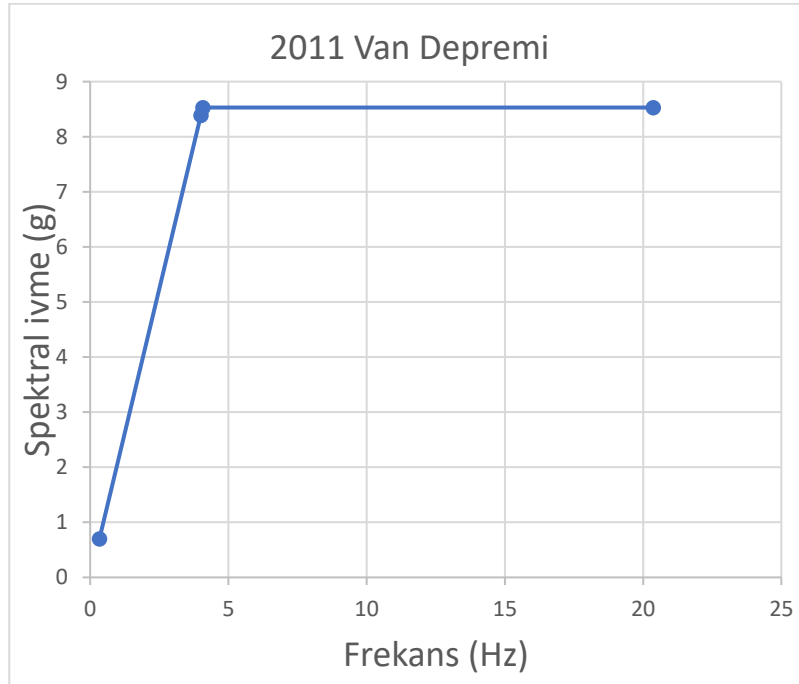
İl	İlçe	Koordinat	KG (cm/s^2)	DB (cm/s^2)	Dikey (cm/s^2)	Mesafe (km)
Van	Muradiye	38.99011 43.76302	178,5	168,5	75,5	42
Muş	Malazgirt	39.14394 42.53072	44,5	25,5	95	95
Bitlis	Merkez	38.466 42.15	89,66	102,24	35,51	116
Ağrı	Merkez	39.71978 43.0164	18,45	15,08	7,21	121

Kaynak: (Güney, 2011: 15)



Grafik 3.3. 2011 Van Depremi İvme Spektrum Grafiği
Kaynak: (Güney, 2011: 21)

2011 Van depremine ait periyot-spektral ivme grafiği önceki deprem verisi ile aynı temel mantıkla frekans spektral ivme grafiğine dönüştürülmüştür. 2011 Van depremine ait frekans ivme grafiği Grafik 3.4'te verilmiştir.

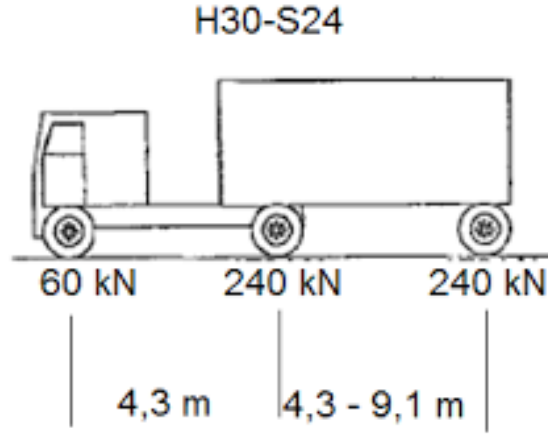


Grafik 3.4. 2011 Van Depremi Frekans-Spektral İvme Grafiği

3.2.3. Taşıt Analizi

Taşıt analizi için H30-S24 taşıt yüklemesi yapılmıştır. Köprünün genel ölçüleri; 183,34 m uzunlukta ve 4,67 m genişliktedir. Köprüdeki genişliğin az olmasına rağmen, köprü üzerinde 2 adet aracın yan yana geçtiği kabul edilmiştir. H30-S24 yüklemesinde aracın en düşük aks aralıkları seçilmiş ve buna göre köprüye taşıt yerleşimi yapılmıştır. Bu kabullere

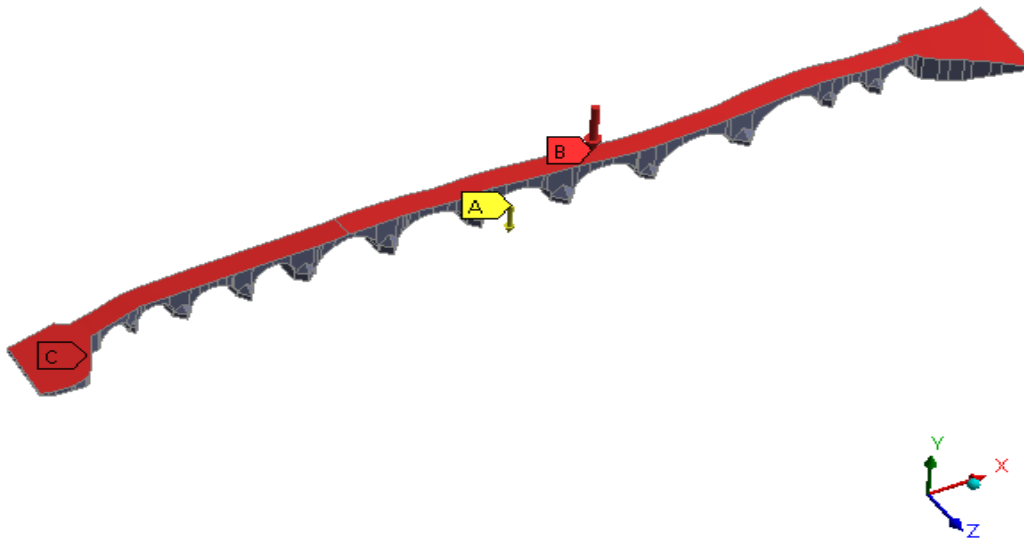
göre köprü ölçüleri göz önüne alınarak köprü yüzeyine toplamda 42 adet taşıt yerleştirilmiş ve bu yükler sabit kabul edilerek hesap yapılmıştır. Bu kabullerle yapılan hesapta 22.126 kN/m^2 değeri bulunup buna göre yayılı yük yüklemesi yapılmış ve buna göre analiz gerçekleştirilmiştir. H30-S24 taşıt yükü Şekil 3.7’ de verilmiştir. Yükleme yapılan yüzeyler Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. H30-S24 Taşıt Yükü Diyagramı

K: Copy of Copy of Static Structural
Figure

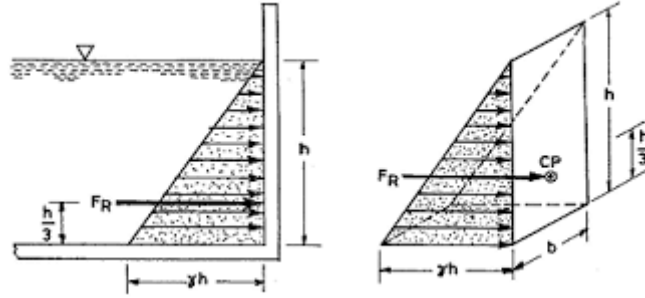
- A** Standard Earth Gravity: 9806.6 mm/s^2
- B** Pressure: $2.2126\text{e-}002 \text{ MPa}$
- C** Fixed Support 3



Şekil 3.8. Taşıt Yükleme Analiz Modeli

3.2.4. Hidrostatik Analiz

Tarihi köprü nehir yatağı üzerinde bulunmakta, nehrin debisi hakkında herhangi bir bilgiye ulaşılmamış ve belirli kabullerle hidrostatik analiz yapılmıştır. Köprünün memba yönünde, nehir yatağı boyunca, köprü tabliyesi seviyesinde su varmış gibi düşünülüp analiz yapılmıştır. Su hareketinin oluşturacağı dinamik etki hesaba katılarak, etki ettirilen basınç %10 oranında arttırılmıştır (Ural, 2017). Batmış yüzeylere etki ettirilen hidrostatik basınç diyagramı Şekil 3.9’da hidrostatik analiz modeli Şekil 3.10’de verilmiştir.



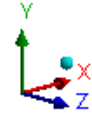
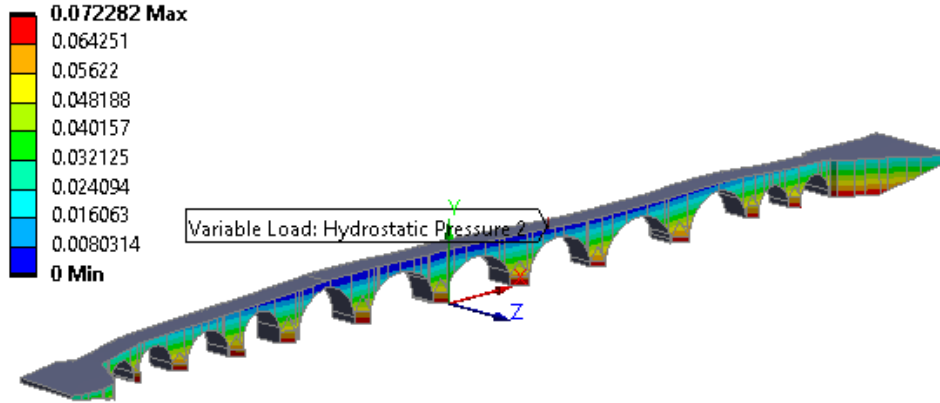
Şekil 3.9. Batmış Yüzeylere Etkiyen Hidrostatik Basınç Diyagramı

J: Copy of Static Structural

Figure

Time: 0.42857 s

Unit: MPa



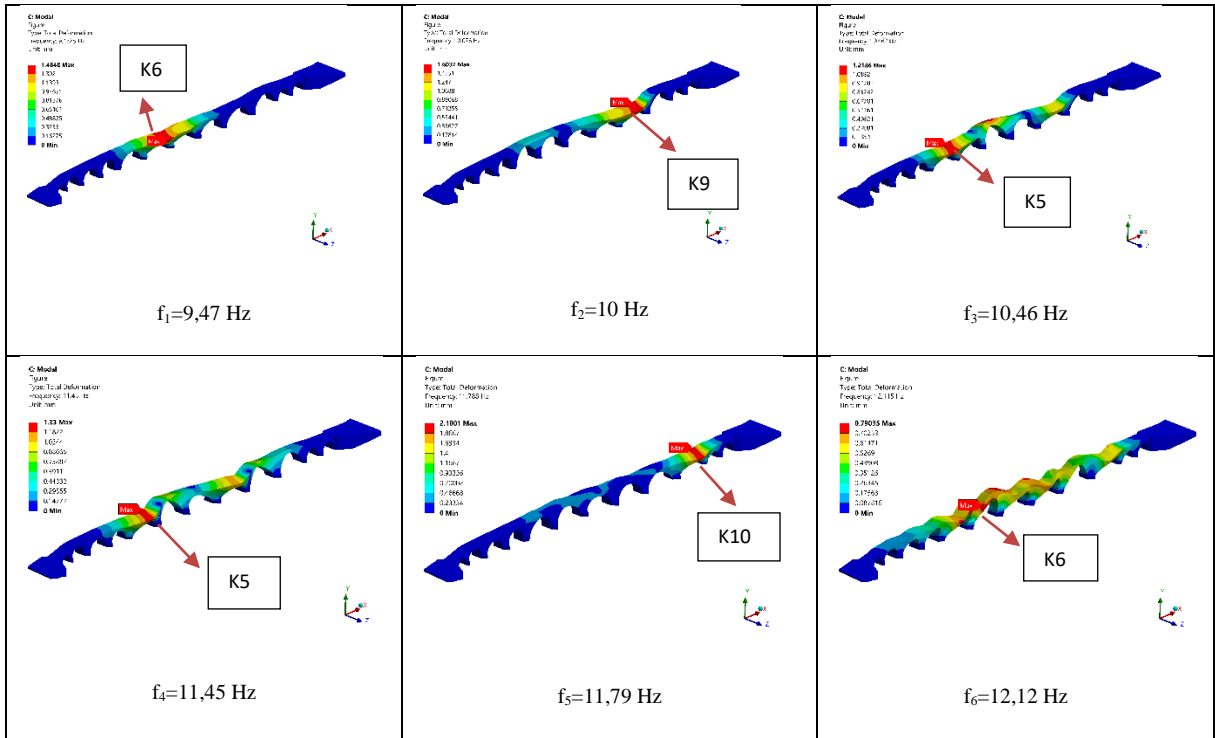
Şekil 3.10. Hidrostatik Analiz Modeli

3.3. Analiz Sonuçları

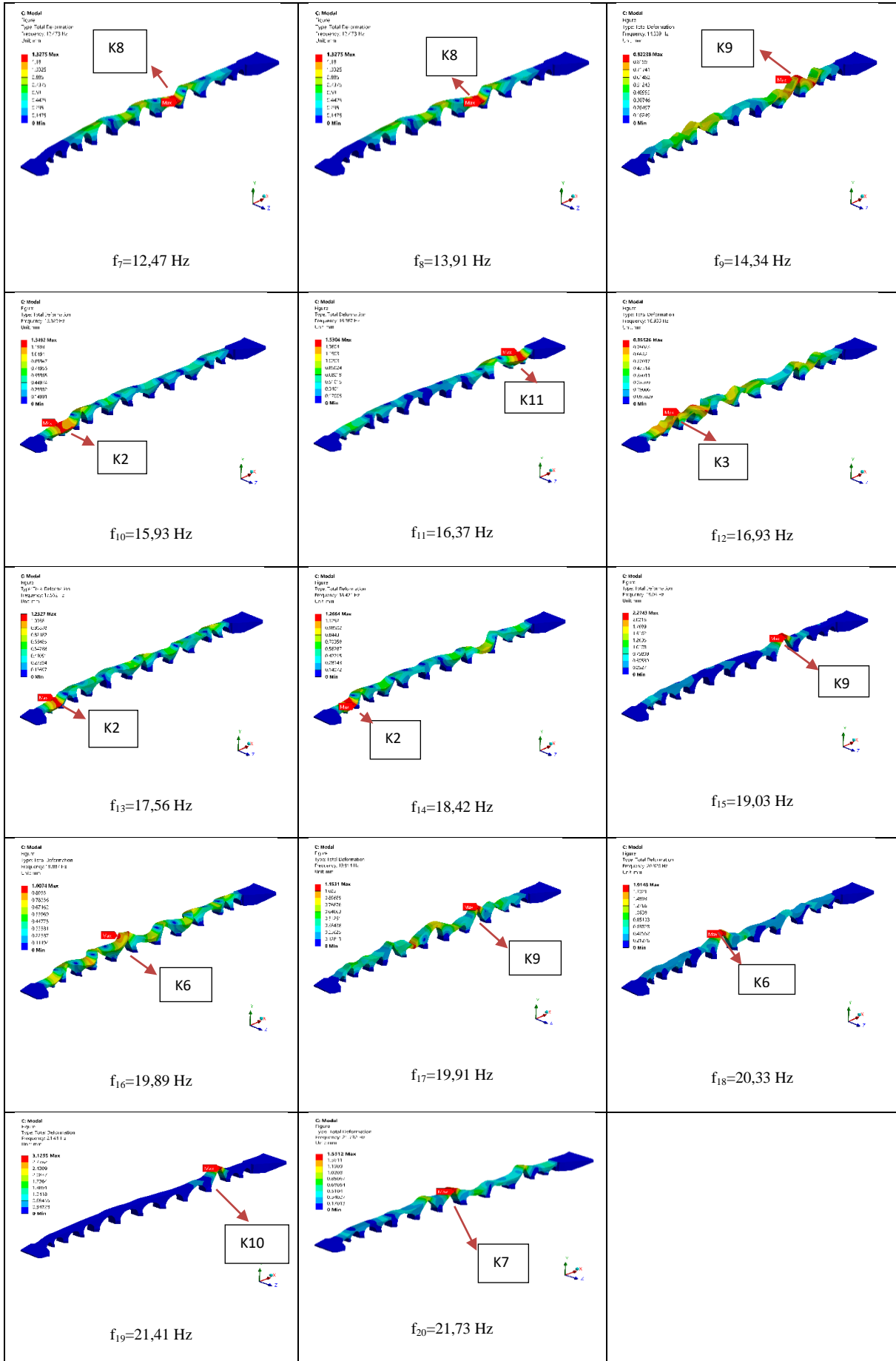
3.3.1. Modal Analiz Sonucu

Yapılan analiz sonucunda yapının 20 mod da frekansı bulunmuştur. Frekans değerleri 9,47 Hz ile 21.73 Hz arasında oluşmuştur. Tarihi köprü yapı itibari le yükselip alçalan bir köprüdür (Alkan vd, 2011). Köprünün ilk frekansı, diğer kemerlere göre daha yüksek olan K5 ve K6 kemerlerinde oluşmuştur. Oluşan frekanslar genel itibari ile köprünün yüksek kemerlerinde ve geniş açıklıklı (K9, K10) kemerlerinde meydana gelmiştir. Yapıda oluşan doğal frekanslar Tablo 3.4'te verilmiştir. Kütle katılım oranları Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.4. Modal Analiz Sonucu Köprüde Oluşan Doğal Frekanslar



Tablo 3.5. Tablonun Devami



Tablo 3.6. Modal Analiz Sonucu Kütle Katılım Oranları

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (sn)	Kütle katılım oranları		
			X yönü	Y yönü	Z yönü
1	9.47246	0.10557	0.123139E-02	0.143175E-03	0.186868
2	10.0760	0.99245E-01	0.287793E-03	0.635984E-06	0.720014E-01
3	10.4621	0.95583E-01	0.434279E-02	0.133541E-06	0.230525E-01
4	11.4501	0.87335E-01	0.268219E-01	0.630251E-04	0.105403E-01
5	11.7880	0.84832E-01	0.322840E-01	0.130782E-03	0.762533E-01
6	12.1152	0.82541E-01	0.345620	0.644617E-05	0.166571E-01
7	12.4726	0.80176E-01	0.144311E-04	0.200159E-05	0.285677E-02
8	13.9083	0.71900E-01	0.320387E-03	0.522119E-04	0.595986E-01
9	14.3390	0.69740E-01	0.371342E-02	0.138815E-04	0.247580E-03
10	15.9293	0.62777E-01	0.133694E-02	0.505664E-04	0.852354E-02
11	16.3673	0.61097E-01	0.282693E-03	0.155448E-03	0.235701E-01
12	16.9330	0.59056E-01	0.541414E-01	0.764426E-04	0.832090E-03
13	17.5615	0.56943E-01	0.314788E-02	0.882839E-05	0.254497E-04
14	18.4212	0.54285E-01	0.104457E-02	0.110792E-02	0.202193E-01
15	19.0296	0.52550E-01	0.375999E-02	0.112405E-01	0.415688E-02
16	19.8869	0.50284E-01	0.208645E-02	0.215102E-02	0.166535E-02
17	19.9142	0.50215E-01	0.625758E-03	0.368621E-02	0.239803E-03
18	20.3259	0.49198E-01	0.552397E-03	0.769944E-02	0.815728E-04
19	21.4097	0.46708E-01	0.296683E-05	0.309358E-01	0.105638E-02
20	21.7317	0.46016E-01	0.372559E-02	0.276663E-01	0.375241E-02
Toplam			0.485343	0.851908E-01	0.512198

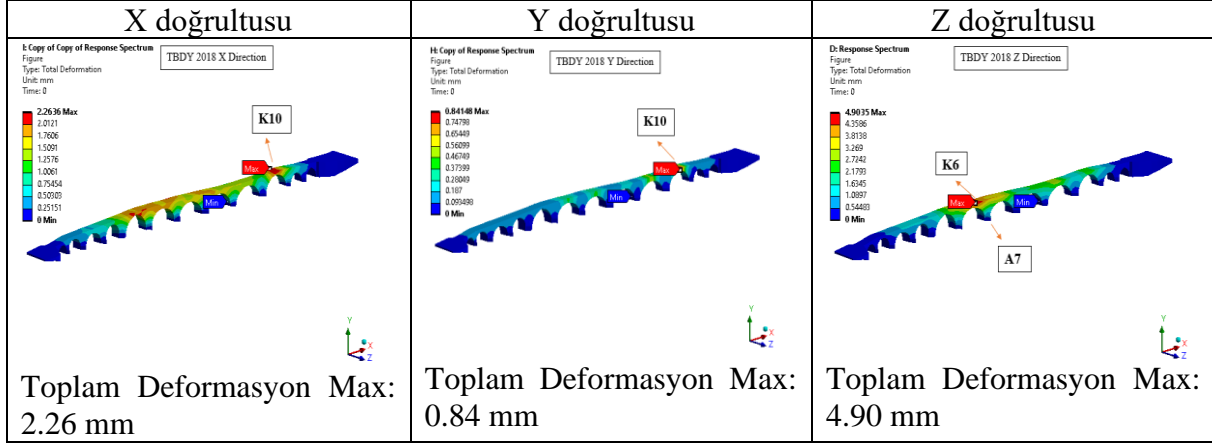
3.3.2. Deprem Analiz Sonuçları

Yapılan deprem analizleri sonucu, tarihi yapıda oluşan gerilmeler, şekil değiştirmeler ve deformasyon bölgeleri incelenmiştir.

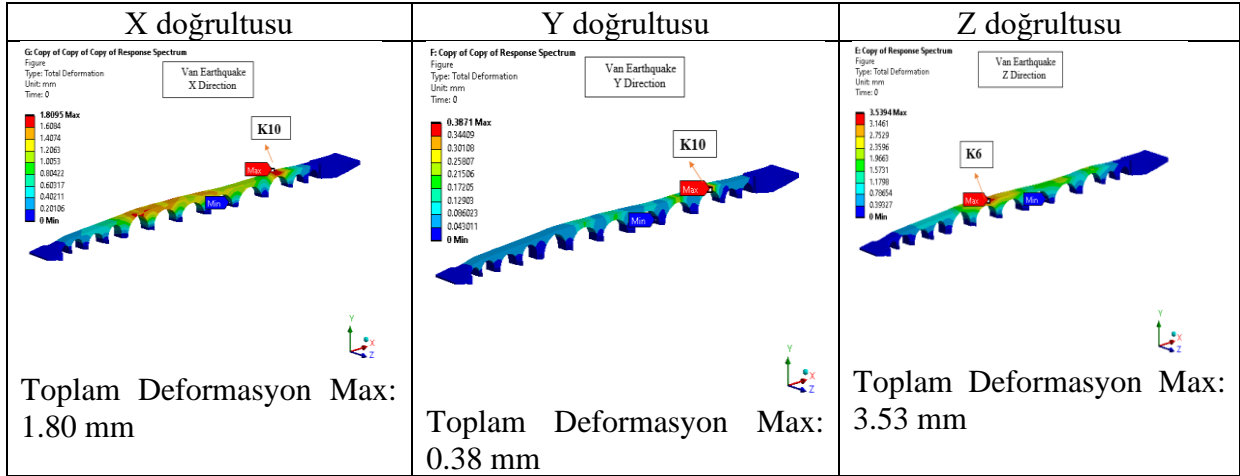
Tarihi yapıya üç doğrultuda deprem verileri etki ettirilmiştir. Z doğrultusunda etki ettirilen deprem verileri sonucunda köprüde oluşan maksimum deformasyon, köprünün 1. modunda gerçekleşmiştir. Gerçekleşen deformasyon bölgesi, köprünün en fazla yüksekliğe sahip kemerlerinden biri olan K6 kemerinde oluşmuştur. Y doğrultusunda etki ettirilen deprem etkileri, yapının geniş açıklıklı K9 ve K10 kemerlerinde daha fazla deformasyona sebep olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda oluşacak depremlerin yapının 5. modunda deformasyon oluşturacağı saptanmıştır. Yapı itibari ile tarihi köprüde bu bölgede, boyuna doğrultuda bir eğrilik bulunmaktadır. Bu eğrilik durumunun da bu deformasyonlara sebep olabileceği düşünülmektedir. X doğrultusundaki deprem etkisine bakıldığında, köprünün farklı noktalarında deformasyon oluşturduğu görülmektedir. Maksimum deformasyonu tarihi köprünün 5. modunda ve K10 kemerinde oluşturmuştur. Aynı zamanda köprünün orta bölgelerinde ve en yüksek kemer olan K5 kemerinde deformasyon oluşturduğu görülmektedir.

Maksimum deformasyon ise köprünün K6 kemerinde oluşmuştur. Bu değer Z doğrultusunda etki ettirilen TBDY 2018 deprem etkisi sonucu 4.9 mm olarak hesaplanmıştır. TBDY 2018 deprem etkisi sonucu oluşan deformasyonlar Tablo 3.6’da ve 2011 Van depremi etkisi sonucu oluşan deformasyonlar Tablo 3.7’de renklendirilmiş şekillerle verilmiştir.

Tablo 3.7. TBDY 2018 Deprem Analiz Sonucu Toplam Deformasyon



Tablo 3.8. 2011 Van Deprem Analizi Donucu Toplam Deformasyon



Tarihi köprüde oluşan şekil değiştirmeler, deprem etkisinin yönüne bağlı olarak değişim göstermiştir. X doğrultusunda etki ettirilen deprem verileri sonucunda köprünün en yüksek kemeri olan K5 kemerinde maksimum elastik şekil değiştirme oluşmuştur. Y doğrultusunda etki ettirilen deprem verisi sonucunda, köprünün en geniş açıklığa sahip kemerlerinden biri olan K10 kemerinde elastik şekil değiştirme değeri daha büyük olmuştur. Z doğrultusunda etki ettirilen deprem sonucunda ise köprünün orta ayağı olan A7 ayağında maksimum elastik şekil değiştirme oluşmuştur. TBDY 2018 deprem etkisi sonucu oluşan elastik şekil değiştirme bölgeleri Tablo 3.8’de ve 2011 Van depremi etkisi sonucu oluşan elastik şekil değiştirme bölgeleri Tablo 3.9’da renklendirilmiş şekillerle verilmiştir.

Maksimum elastik şekil değıştirme değeri TBDY 2018 deprem verisinin X doğrultusunda etki ettirilmesiyle K5 kemerinde oluşmuştur. Bu değeri 2.12E-04 mm olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3.9. TBDY 2018 Deprem Analiz Sonucu Elastik Şekil Değıştirme

X doğrultusu	Y doğrultusu	Z doğrultusu
<p>H Copy of Copy of Response Spectrum Figure Type: Normal Elastic Strain(X Axis) Unit: mm/mm Solution Coordinate System Time: 0 5/1/2021 10:23 PM</p> <p>Elastik şekil değıştirme Max: 2.12E-04 mm</p>	<p>H Copy of Response Spectrum Figure Type: Normal Elastic Strain(Y Axis) Unit: mm/mm Solution Coordinate System Time: 0</p> <p>Elastik şekil değıştirme Max: 8.86E-05 mm</p>	<p>D: Response Spectrum Figure Type: Normal Elastic Strain(Z Axis) Unit: mm/mm Solution Coordinate System Time: 0</p> <p>Elastik şekil değıştirme Max: 1.75E-04 mm</p>

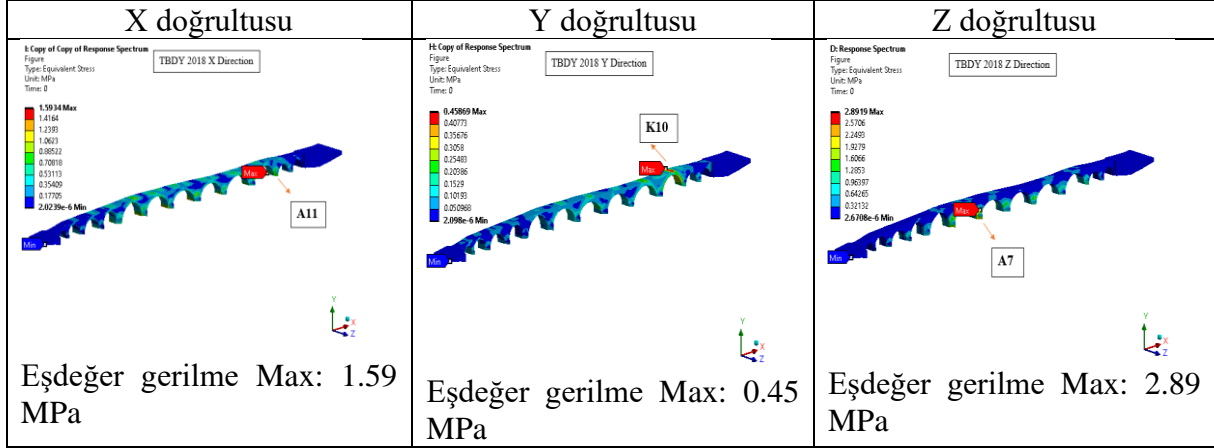
Tablo 3.10. 2011 Van Depremi Analiz Sonucu Elastik Şekil Değıştirme

X doğrultusu	Y doğrultusu	Z doğrultusu
<p>G: Copy of Copy of Copy of Response Spectrum Figure Type: Normal Elastic Strain(X Axis) Unit: mm/mm Solution Coordinate System Time: 0</p> <p>Elastik şekil değıştirme Max: 1.71E-04 mm</p>	<p>F: Copy of Copy of Response Spectrum Figure Type: Normal Elastic Strain(Y Axis) Unit: mm/mm Solution Coordinate System Time: 0 5/1/2021 10:23 PM</p> <p>Elastik şekil değıştirme Max: 4.08E-05 mm</p>	<p>E: Copy of Response Spectrum Figure Type: Normal Elastic Strain(Z Axis) Unit: mm/mm Solution Coordinate System Time: 0</p> <p>Elastik şekil değıştirme Max: 1.26E-04 mm</p>

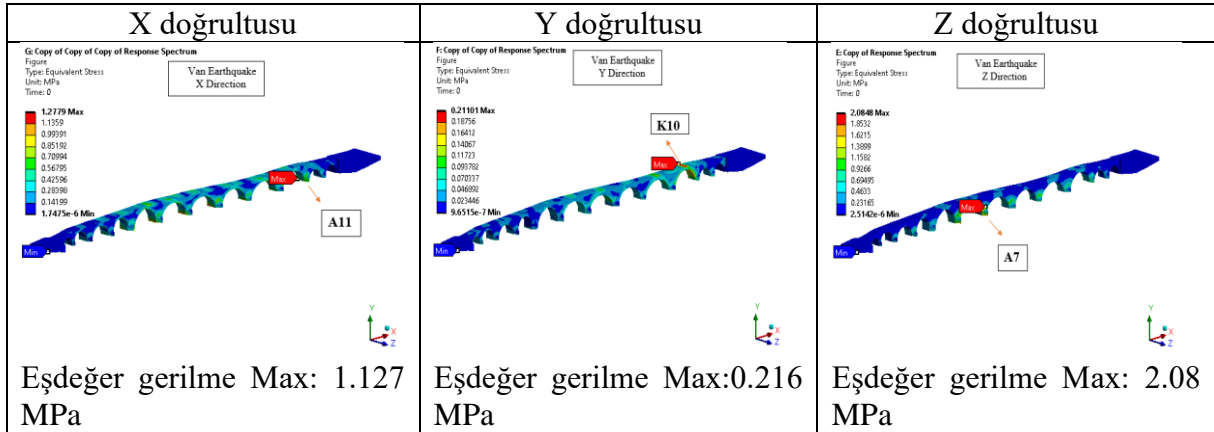
Tarihi köprüde deprem etkisi altında gerilmeler araştırılmıştır. Deprem etki yönüne göre gerilme bölgeleri değışiklik göstermiştir. Eşdeğer gerilme bölgeleri incelendiğinde X doğrultusunda etki eden deprem verisi tarihi köprünün A11 ayağında maksimum eşdeğer gerilme oluşmuştur. Tarihi köprüde, K10 kemerinin ve A11 ayağının bulunduğu bölgede köprünün boyuna doğrultusunda bir eğrilik bulunmaktadır. Tarihi köprüde bulunan bu eğriliğin bu gerilmelere sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca Y doğrultusundaki deprem etkisi incelendiğinde, köprünün K10 kemerinde maksimum gerilmelerin oluşmasının sebebi, tarihi köprüde bulunan bu eğriliğin olduğu düşünülmektedir. Deprem etkisinin Z doğrultusunda olması, tarihi köprünün orta bölgesinde bulunan A7 ayağında maksimum eşdeğer gerilme oluşmasına sebep olmuştur. Maksimum eşdeğer gerilme değeri TBDY 2018

deprem verilerinin Z doğrultusunda etki ettirilmesi sonucu, A7 ayağında bulunan selyarının üst kısmında oluşmuştur. Bu değer 2.89 MPa olarak hesaplanmıştır. TBDY 2018 deprem etkisi sonucu oluşan eşdeğer gerilme bölgeleri Tablo 3.10’da ve 2011 Van depremi etkisi sonucu oluşan eşdeğer gerilme bölgeleri Tablo 3.11’de renklendirilmiş şekillerle verilmiştir.

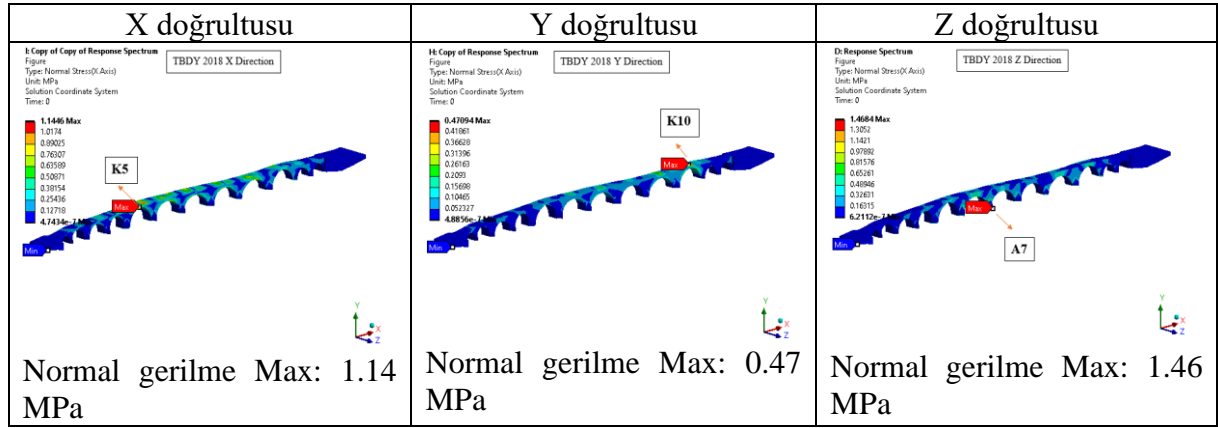
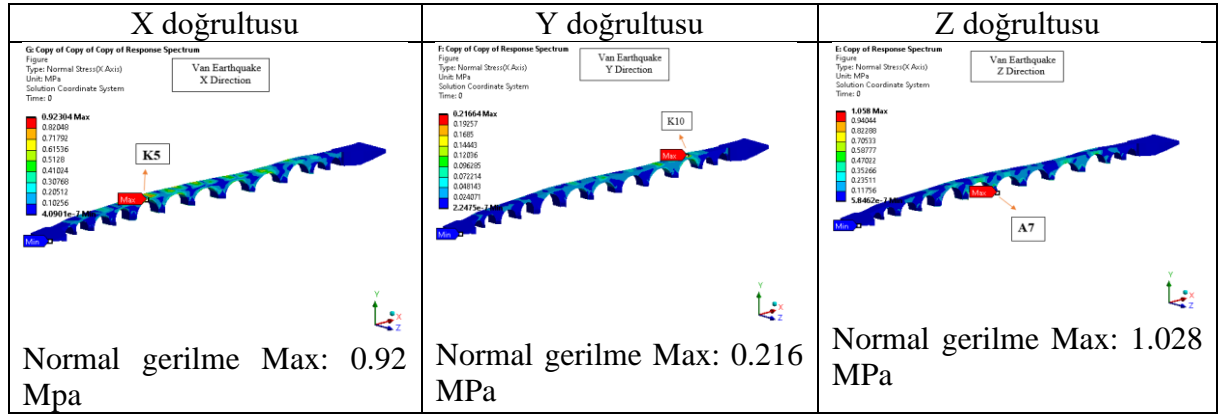
Tablo 3.11. TBDY 2018 Deprem Analiz Sonucu Eşdeğer Gerilme



Tablo 3.12. 2011 Van Depremi Analiz Sonucu Eşdeğer Gerilme



Tarihi köprüde oluşan normal gerilmeler incelenmiştir. X doğrultusunda normal gerilme, maksimum K5 kemerinde oluşmuştur. K5 kemeri tarihi köprünün en yüksek ayaklara sahip kemeridir. Y ve Z doğrultusunda oluşan normal gerilme bölgeleri, eşdeğer gerilme bölgeleriyle benzer olmuştur. Z doğrultusunda normal gerilme değeri, A7 ayağında bulunan selyarının altında oluşmuştur. Normal gerilme değeri, TBDY 2018 deprem verilerinin Z doğrultusunda etki ettirilmesi sonucunda bu bölgede maksimum değerde oluşmuştur. Bu değer 1.46 MPa olarak hesaplanmıştır. TBDY 2018 deprem etkisi sonucu oluşan normal gerilme bölgeleri Tablo 3.12’de ve 2011 Van depremi etkisi sonucu oluşan normal gerilme bölgeleri Tablo 3.13’te renklendirilmiş şekillerle verilmiştir.

Tablo 3.13. TBDY 2018 Deprem Analiz Sonucu Normal Gerilme**Tablo 3.14.** 2011 Van Depremi Analiz Sonucu Normal Gerilme

Tarihi köprüde oluşan kayma gerilmesi bölgeleri incelendiğinde, Y doğrultusunda etki ettirilen deprem verileri, köprünün A11 ayağında maksimum kayma gerilmesi oluşturmuştur. Y doğrultusunda etki ettirilen deprem etkileri sonucunda genellikle köprüde bulunan boyuna doğrultudaki eğri bölgede, gerilmelerin maksimum olduğu görülmüştür. Deprem etki yönünün, dikey olması da bu bölgede maksimum gerilmelerin oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. X doğrultusunda etki ettirilen deprem verileri sonucunda maksimum kayma gerilmesi köprünün A7 ayağında oluşmuştur. Z doğrultusundaki deprem etkisi köprünün A7 ayağında, selyaran ve köprü ayağı birleşim bölgesinde oluşmuştur. Tarihi köprüye etki edecek depremlerin, Z doğrultusunda olması maksimum gerilmelere sebep olacağı saptanmış ve bu gerilmelerin köprünün orta bölgesinde oluşacağı sonucuna varılmıştır. Deprem etkisi sonucu maksimum kayma gerilmesi TBDY 2018 deprem verilerinin Z doğrultusunda etki ettirilmesi sonucu, köprünün A7 ayağında oluşmuştur. Bu değer 0.80 MPa olarak hesaplanmıştır. TBDY 2018 deprem etkisi sonucu oluşan kayma gerilmesi bölgeleri Tablo 3.14'te ve 2011 Van

depremi etkisi sonucu oluşan kayma gerilmesi bölgeleri Tablo 3.15'te renklendirilmiş şekillerle verilmiştir.

Tablo 3.15. TBDY 2018 Deprem Analiz Sonucu Kayma Gerilmesi

X doğrultusu	Y doğrultusu	Z doğrultusu
<p>I: Copy of Copy of Response Spectrum Figure Type: Shear Stress(XY Component) Unit: MPa Solution Coordinate System Time: 0</p> <p>TBDY 2018 X Direction</p> <p>Kayma gerilmesi Max: 0.56 MPa</p>	<p>H: Copy of Response Spectrum Figure Type: Shear Stress(XY Component) Unit: MPa Solution Coordinate System Time: 0</p> <p>TBDY 2018 Y Direction</p> <p>Kayma gerilmesi Max: 0.18 MPa</p>	<p>D: Response Spectrum Figure Type: Shear Stress(XY Component) Unit: MPa Solution Coordinate System Time: 0</p> <p>TBDY 2018 Z Direction</p> <p>Kayma gerilmesi Max: 0.80 MPa</p>

Tablo 3.16. 2011 Van Depremi Analiz Sonucu Kayma Gerilmesi

X doğrultusu	Y doğrultusu	Z doğrultusu
<p>G: Copy of Copy of Copy of Response Spectrum Figure Type: Shear Stress(XY Component) Unit: MPa Solution Coordinate System Time: 0</p> <p>Van Earthquake X Direction</p> <p>Kayma gerilmesi Max: 0.45 MPa</p>	<p>F: Copy of Copy of Response Spectrum Figure Type: Shear Stress(XY Component) Unit: MPa Solution Coordinate System Time: 0</p> <p>Van Earthquake Y Direction</p> <p>Kayma gerilmesi Max: 0.216 MPa</p>	<p>E: Copy of Response Spectrum Figure Type: Shear Stress(XY Component) Unit: MPa Solution Coordinate System Time: 0</p> <p>Van Earthquake Z Direction</p> <p>Kayma gerilmesi Max: 0.58 MPa</p>

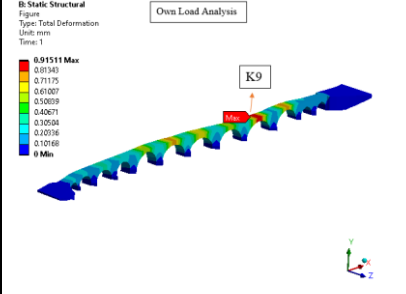
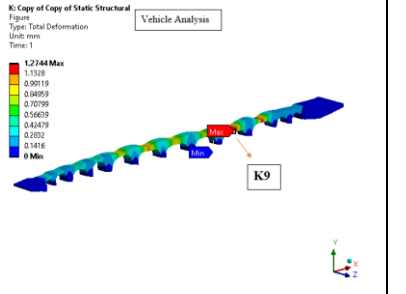
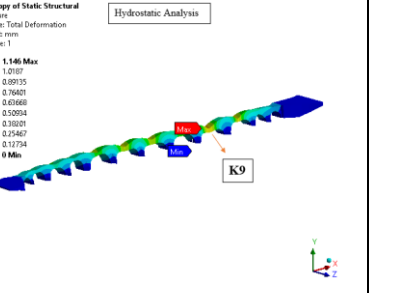
3.3.3. Zati Yük, Taşıt Yükü ve Hidrostatik Yük Analiz Sonuçları

Yapılan yüklemeler sonucu tarihi köprüde oluşan gerilme bölgeleri, şekil değiştirmeler ve deformasyon bölgeleri incelenmiştir.

Tarihi köprüye yapılan zati yük, taşıt yükü ve hidrostatik yük yüklemeleri sonucunda köprünün K9 kemerinde maksimum deformasyon olduğu saptanmıştır. K9 kemeri köprünün en geniş kemer açıklığına sahip kemeridir. Bu bölgede oluşan deformasyon değerinin daha yüksek olmasının sebebi, köprünün geniş açıklıklı olması olduğu düşünülmektedir. Hidrostatik yük analizi sonucunda maksimum deformasyonun, yükleme yönü farklı olmasına rağmen K9 kemerinde oluşması dikkat çekicidir. Maksimum deformasyon taşıt analizi

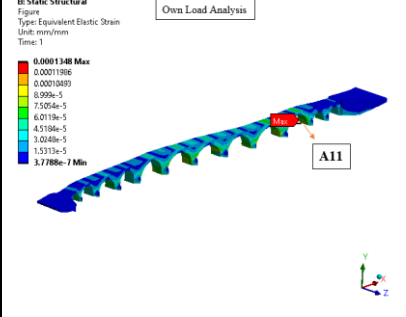
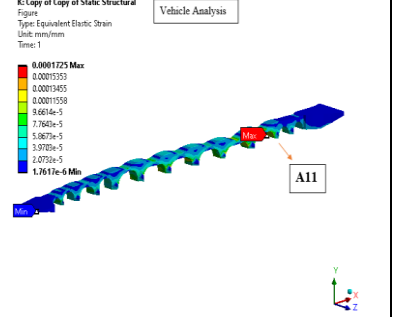
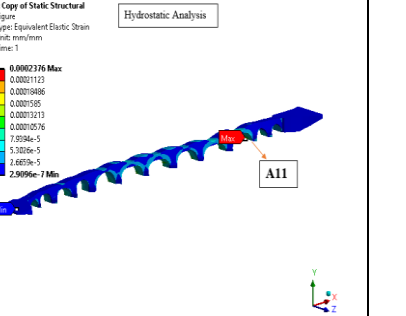
sonucunda oluşmuştur. Bu değer 1.27 mm olarak hesaplanmıştır. Tablo 3.16'da yüklemeler sonucu oluşan deformasyon bölgeleri renklendirilmiş şekillerle verilmiştir.

Tablo 3.17. Zati Yük, Taşıt Yükü ve Hidrostatik Yük Analizleri Sonucu Toplam Deformasyon

Zati yük analizi	Taşıt analizi	Hidrostatik analiz
 <p>Toplam deformasyon Max: 0.91 mm</p>	 <p>Toplam Deformasyon Max: 1.27 mm</p>	 <p>Toplam Deformasyon Max: 1.14 mm</p>

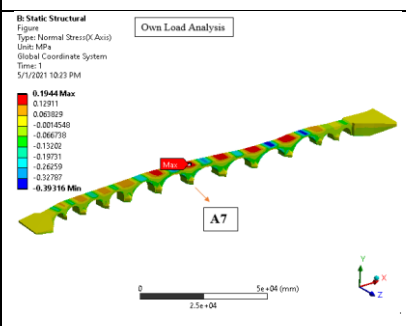
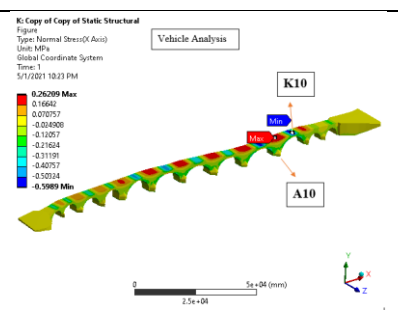
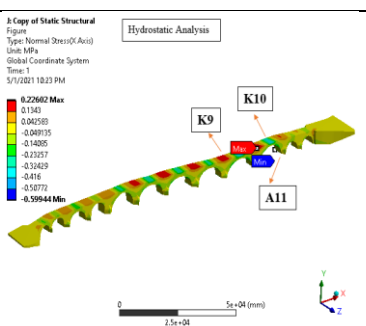
Yapılan yüklemeler sonucu tarihi köprünün A11 ayağında maksimum eşdeğer elastik şekil değiştirme değeri oluşmuştur. Tarihi köprüde bu bölgede, boyuna doğrultuda bir eğrilik bulunmaktadır. Maksimum şekil değiştirmenin, bu bölgede oluşmasının sebebi, bulunan eğrilik olduğu düşünülmektedir. Maksimum gerilme hidrostatik analiz sonucu köprünün A11 ayağında oluşmuştur. Bu değer $2.37E-04$ mm olarak hesaplanmıştır. Tablo 3.17'de yüklemeler sonucu oluşan eşdeğer elastik şekil değiştirme bölgeleri renklendirilmiş şekillerle verilmiştir.

Tablo 3.18. Zati Yük, Taşıt Yükü ve Hidrostatik Yük Analizleri Sonucu Eşdeğer Elastik Şekil Değiştirme

Zati yük analizi	Taşıt analizi	Hidrostatik analiz
 <p>Eşdeğer elastik şekil değiştirme Max: $1.34E-04$ mm</p>	 <p>Eşdeğer elastik şekil değiştirme Max: $1.72E-04$ mm</p>	 <p>Eşdeğer elastik şekil değiştirme Max: $2.37E-04$ mm</p>

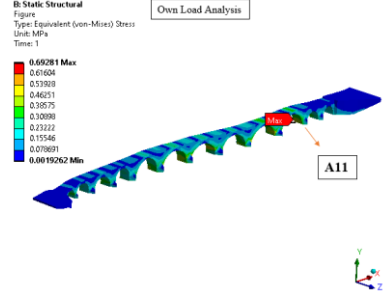
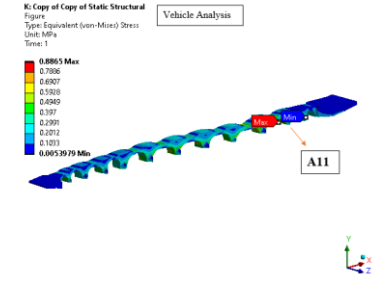
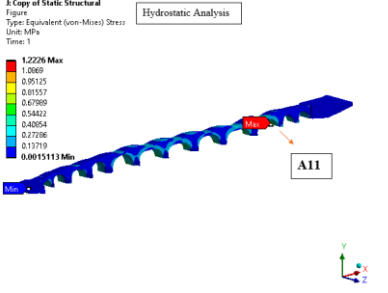
Normal gerilme değerleri incelendiğinde, gerilme ekseninin zıt yönünde gerilmelerin de olduğu görülmektedir. Yapının kendi yükü altında maksimum normal gerilme köprünün A7 ayağında olduğu saptanmıştır. Taşıt yüklemesi sonucunda gerilme ekseninin zıt yönünde köprünün K10 kemerinde olduğu görülmüştür. K10 kemerinin geniş açıklıklı olması ve taşıt yükünün etki doğrultusunun bu duruma sebep olduğu düşünülmektedir. Hidrostatik analiz sonucunda ise aynı şekilde gerilme eksenine zıt yönde ve köprünün A11 ayağında maksimum normal gerilme oluşmuştur. Maksimum normal gerilme, taşıt analizi sonucu köprünün K10 kemerinde ve hidrostatik analiz sonucu A11 ayağında olduğu saptanmıştır. Bu değer 0.59 MPa olarak hesaplanmıştır. Tablo 3.18’de yüklemeler sonucu oluşan normal gerilme bölgeleri renklendirilmiş şekillerle verilmiştir.

Tablo 3.19. Zati Yük, Taşıt Yükü ve Hidrostatik Yük Analizleri Sonucu Normal Gerilme

Zati yük analizi	Taşıt analizi	Hidrostatik analiz
 <p>Normal gerilme Max(+): 0.19 MPa Max (-): 0.39 MPa</p>	 <p>Normal gerilme Max(+): 0.26 MPa Max (-): 0.59 MPa</p>	 <p>Normal gerilme Max(+): 0.22 MPa Max (-): 0.59 MPa</p>

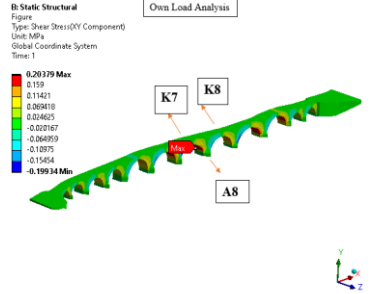
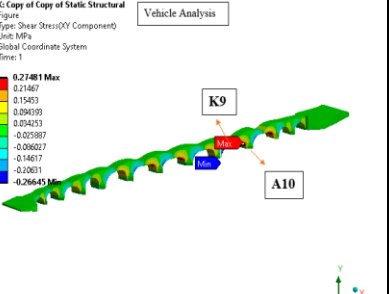
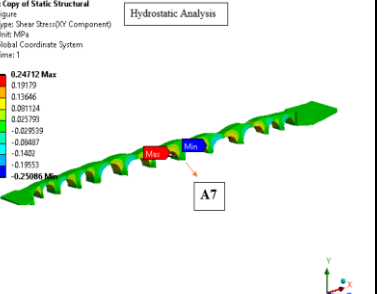
Yapılan tüm yüklemeler sonucu maksimum eşdeğer (von-Mises) gerilmesi köprünün A11 ayağında oluşmuştur. Bu bölgede eğrilik olması, bu noktada eşdeğer (von-Mises) gerilmesinin daha büyük olmasına neden olduğu düşünülmektedir. Hidrostatik yükleme sonucu köprünün A11 ayağında 1.22 MPa değerinde maksimum eşdeğer (von-Mises) gerilme değeri oluşmuştur. Tablo 3.19’da yüklemeler sonucu oluşan eşdeğer (von-Mises) gerilme bölgeleri renklendirilmiş şekillerle verilmiştir.

Tablo 3.20. Zati Yük, Taşıt Yükü ve Hidrostatik Yük Analizleri Sonucu Eşdeğer (von-Mises) Gerilme

Zati yük analizi	Taşıt analizi	Hidrostatik analiz
<p>B: Static Structural Figure Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 1</p>  <p>Eşdeğer (von-Mises) gerilme Max: 0.69 MPa</p>	<p>K: Copy of Copy of Static Structural Figure Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 1</p>  <p>Eşdeğer (von-Mises) gerilme Max: 0.88 MPa</p>	<p>J: Copy of Static Structural Figure Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 1</p>  <p>Eşdeğer (von-Mises) gerilme Max: 1.22 MPa</p>

Oluşan kayma gerilmeleri incelendiğinde, zati yük analizi sonucunda köprü'nün K7 kemerinin iç yüzeyinde, A8 ayağına daha yakın bir bölgede maksimum kayma gerilmesi oluşmuştur. Hidrostatik analiz sonucu köprü'nün orta bölgesinde bulunan A7 ayağında maksimum kayma gerilmesi oluşmuştur. En fazla oluşan kayma gerilmesi değeri taşıt yükü analizi sonucunda köprü'nün K9 kemerinin iç yüzeyinde, A10 ayağına yakın bir bölgede olduğu saptanmıştır. Bu değer 0.27 MPa olarak hesaplanmıştır. Tablo 3.20'de yüklemeler sonucu oluşan kayma gerilmesi bölgeleri renklendirilmiş şekillerle verilmiştir.

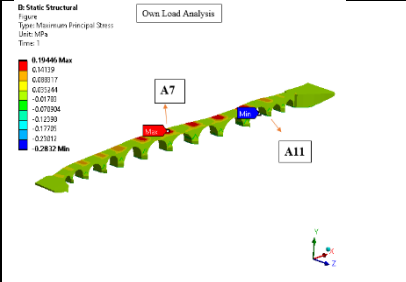
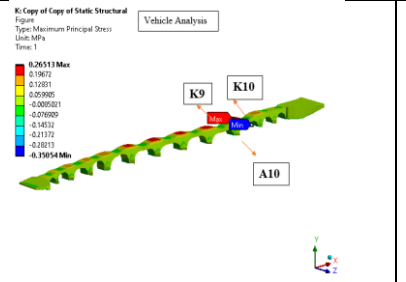
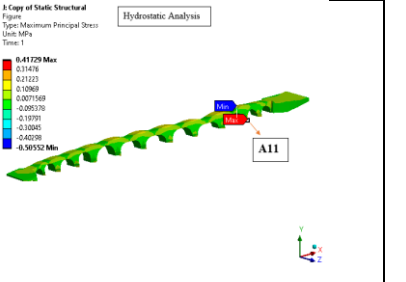
Tablo 3.21. Zati Yük, Taşıt Yükü ve Hidrostatik Yük Analizleri Sonucu Kayma Gerilmesi

Zati yük analizi	Taşıt analizi	Hidrostatik analiz
<p>B: Static Structural Figure Type: Shear Stress (XY Component) Unit: MPa Global Coordinate System Time: 1</p>  <p>Kayma gerilmesi Max: 0.20 MPa</p>	<p>K: Copy of Copy of Static Structural Figure Type: Shear Stress (XY Component) Unit: MPa Global Coordinate System Time: 1</p>  <p>Kayma gerilmesi Max: 0.27 MPa</p>	<p>J: Copy of Static Structural Figure Type: Shear Stress (XY Component) Unit: MPa Global Coordinate System Time: 1</p>  <p>Kayma gerilmesi Max: 0.24 MPa</p>

Maksimum asal gerilme değeri, oluşan basınç ve çekme gerilmelerinin değerini vermektedir. Artı (+) olarak verilen değerler çekme gerilmesi değerini, eksi (-) olarak verilen değerler basınç gerilmesi değerini göstermektedir. Taşıt analizi sonucunda köprü'nün en geniş iki kemeri olan, K9 ve K10 kemerlerinin arasında bulunan A10 ayağının üzerinde maksimum

çekme gerilmesi oluşmuştur. Hidrostatik analiz sonucunda ise maksimum çekme gerilmesi, köprünün A11 ayağının selyaran bölgesinde oluşmuştur. Buna karşılık yine hidrostatik analiz sonucu köprünün A11 ayağının topuk kısmında maksimum basınç gerilmesi değeri hesaplanmıştır. Yapılan tüm yüklemeler sonucunda köprünün maksimum basınç gerilmesine maruz kalan bölgesi A11 ayağı olmuştur. En büyük basınç gerilmesi değeri hidrostatik analiz sonucu köprünün A11 ayağının topuk bölgesinde oluşmuş ve bu değer 0.50 MPa olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda en büyük çekme gerilmesi değeri de hidrostatik analiz sonucu köprünün A11 ayağının selyaran bölgesinde oluşmuş ve bu değer 0.41 MPa olarak hesaplanmıştır. Tablo 3.21’de yüklemeler sonucu oluşan maksimum asal gerilme bölgeleri renklendirilmiş şekillerle verilmiştir.

Tablo 3.22. Zati Yük, Taşıt Yükü ve Hidrostatik Yük Analizleri Sonucu Maksimum Asal Gerilme

Zati yük analizi	Taşıt analizi	Hidrostatik analiz
 <p>Maksimum asal gerilme; Max: 0.19 MPa (çekme) Min: -0.28 MPa (basınç)</p>	 <p>Maksimum asal gerilme; Max: 0.26 MPa (çekme) Min: -0.35 MPa (basınç)</p>	 <p>Maksimum asal gerilme; Max: 0.41 MPa (çekme) Min: -0.50 MPa (basınç)</p>

Bu çalışmanın, Doç. Dr. Ali Ural tarafından hazırlanan “Muş Murat Köprüsünün Yapısal Analiz ve Değerlendirme Raporu” adlı çalışması ile arasındaki farklar ve benzerlikler (Ural, 2017);

Yazar Ural’ın yaptığı çalışmada; Muş Tarihi Murat Köprüsünde 2002-2009 yılları arasında yapılan onarım çalışmalarının, tarihi köprü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Köprüde yapılan analizler, LUSAS analiz programı yardımıyla yapılmıştır. Bu çalışmada daha çok tarihi köprünün, yapı elemanları ve köprüde bulunan çarpıklık üzerinde durulmuştur. ANSYS analiz programı yardımı ile analizler yapılmıştır. Köprü de oluşan gerilme ve deformasyon bölgeleri incelenmiş ve yapısal olarak nelerin sebep olacağı üzerinde durulmuştur.

Yazar Ural, TBDY 2007 yönetmeliğine göre deprem analizi yapmıştır. Deprem verisini, tarihi köprünün Y (düşey) doğrultusuna etki ettirmiştir. Yapmış olduğu deprem analizlerini zaman-tanım alanında yapmıştır. Bu çalışmada, TBDY 2018 yönetmeliğine göre çözüm yapılmış ve tarihi köprünün X, Y, Z doğrultularında deprem verisi etki edilmiştir. Yapılmış olan deprem analizleri frekans-tanım alanında yapılmıştır.

Yazar Ural yapmış olduğu çalışmada taşıt analizi için doğrusal olmayan analizler yapıp, köprünün taşıma kapasitesini araştırmıştır. Bu çalışmada, H30-S24 taşıt yüklemesi yapılmış ve bu taşıt yükleri altında, köprünün yapı elemanlarında oluşan gerilme ve deformasyonlar incelenmiştir.

Yazar Ural, hidrostatik analiz için, batmış yüzeylere etki eden hidrostatik yük modelini tanımlayan üçgen yayılı yük diyagramını, düzgün yayılı yük haline getirip etki ettirmiştir. Bu çalışmada, hidrostatik yük modeli üçgen yayılı yük olarak tanımlanmıştır.

Yazar Ural, yaptığı çalışmada, deprem etkisi ile birlikte taşıt yüklemesi ve hidrolik etkiyi de aynı analizde incelemiştir. Bu çalışmada etki ettirilen deprem verileri ve yükler sadece ayrı ayrı etki ettirilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda köprünün deformasyon ve gerilme bölgeleri benzerlik göstermiş olsa da yapılan yükleme tiplerinin ve etki ettirilen deprem verilerinin farklı yönlü olması, köprüde oluşan maksimum gerilme ve deformasyon bölgelerinde farklılıkların da oluşmasına sebep olmuştur.

4. SONUÇ

Muş Tarihi Murat köprüsünün gerilme noktaları, yapılan analizler sonucu belirlenmiştir.

Kemer açıklığının çok olması bu bölgede oluşacak gerilmelerin artmasına sebep olacağı görülmüştür. Bu çalışma için en fazla açıklığa sahip olan K9 ve K10 kemerlerinin daha fazla gerilmeye maruz kaldığı görülmüştür.

Modal analiz sonucunda köprünün ilk doğal frekansının K6 kemerinde oluştuğu ve bu kemerin yapının en yüksek kemerlerinden bir tanesi olduğu görülmüştür. X ve Z doğrultusunda etki ettirilen deprem yükleri sonucunda maksimum kayma gerilmelerinin köprünün orta bölgesinde bulunan A7 ayağında oluştuğu görülmüştür. Köprüye dikey yönde (Y doğrultusunda) etki ettirilen, deprem etkisi sonucu köprüde bulunan eğri bölgede yani K10 ve A11'de gerilmeler yoğunlaşmıştır.

Hidrostatik analiz sonucunda, suyun en fazla köprünün A11 ayağında ve K10 kemerinde gerilme oluşturduğu görülmüştür. Tarihi yapı bu bölgede boyuna doğrultuda düz değildir. Deprem haricinde yapılan yüklemelerde en fazla gerilme, hidrostatik analiz sonucu oluşmuştur.

Genel olarak deformasyonlar köprünün en fazla genişliğe sahip K9 kemerinde oluşmuştur. En fazla basınç gerilmesi köprünün A11 ayağında oluşmuştur.

Farklı yönlerde etki ettirilen deprem ve yükleme etkileri sonucunda, köprüye etki eden yüklerin Z doğrultusunda olması, köprünün daha fazla gerilmeye maruz kalmasına sebep olduğu görülmüştür.

Köprüdeki en büyük gerilmeler Z doğrultusunda etki ettirilen, deprem analizi sonucunda elde edilmiştir.

Eşdeğer (Von-Mises) gerilme değerleri, genellikle tarihi köprünün A11 ayağında oluştuğu görülmüştür.

Tarihi köprüde bulunan, boyuna doğrultudaki eğriliğin (çarpıklığın), oluşan gerilmelerin bu bölgede yoğunlaşmasına sebep olmuştur.

Geniş açıklıklı kemerler arasında kalan ayakların üst kısmında, kemer üzerine gelecek yükler nedeniyle, daha fazla çekme gerilmesine sebep olduğu saptanmıştır.

KAYNAKÇA

Acar, T. (2016). Uşak'ta Türk Dönemi Taş Köprüleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 25(3), 23-45.

Adam, J.P. (1999). *Roman Building Materials and Techniques*. Routledge. London.

Ademoviç, N. (2021). Structural assessment & strengthening of the first single-arch RC bridge in Sarajevo, BIH. *Engineering Structures*, 235, 112002.

AFAD (2020). *Türkiye Deprem Tehlike Haritası*. [Erişim 12.05.2020, <https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi>]

Alaboz, M. (2008). *Mimar Sinan Köprüleri Güncel Durum Değerlendirmesi ve Kapuağası Köprüsü Restorasyon Projesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Alkan, A., Baykan, O., Atalay, A., Baykan, N., & Öziş, Ü. (2011). Su Yapıları Olarak Anadolu'daki Taş Köprüler, 2. *Su Yapıları Sempozyumu*, 16-18 Eylül, Diyarbakır

Altunisik, A. C., Kalkan, E., Okur, F. Y., Ozgan, K., & Bostanci, A. (2019). Non-destructive modal parameter identification of historical timber bridges using ambient vibration tests after restoration. *Measurement*, 146, 411–424.

ANSYS. (2019). *Swanson Analysis System*, U.S.A.

Arede, A., Almeida, C., Costa C., & Costa, A. (2019). In-situ and lab tests for mechanical characterization of stone masonry historical structures. *Construction and Building Materials*, 220, 503-515.

Artvin İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü (2021). *Arhavi Ortacalar Çifte Köprü* [Erişim: 03.07.2021] <https://artvin.ktb.gov.tr/TR-55886/arhavi-ortacalar-cifte-kopru.html>

Bayraktar, A., Türker, T., & Altunis, A. C. (2015). Experimental frequencies and damping ratios for historical masonry arch bridges. *Construction and Building Materials*, 75, 234–241.

Bergamo, O., Campione, G., Donadello, S., & Russo, G. (2015). In-situ NDT testing procedure as an integral part of failure analysis of historical masonry arch bridges. *Engineering Failure Analysis*, 57, 31–55.

Birinci, F., Bayraktar, A., & Altunis, A. C. (2011). Finite element model calibration effects on the earthquake response of masonry arch bridges. *Finite Elements in Analysis and Design*, 47, 621–634.

Camara, M., Romero, M., Pachon, P., Compan, V., & Lourenço, P. B. (2021). Integration of disciplines in the structural analysis of historical constructions. The Monastery of San Jerónimo de Buenavista (Seville-Spain). *Engineering Structures*, 230, 111663.

Castro, A.B., Sancez-Aparicio, L.J., Ramos, L.F., Sena-Cruz, C., & Gonzalez-Aguilera, D. (2018). Integrating geomatic approaches, Operational Modal Analysis, advanced numerical and updating methods to assess the current security conditions of the historic Bôco Bridge. *Construction and Building Materials*, 185, 961-984.

Ceylan, M. A. (2009) Gediz Havzasında Tarihi Köprüler ve Fonksiyonel Özellikleri. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 25, 103-131.

Ceylan, İ. (2013). *Karayolları 13. Bölge Sınırları İçinde Yer Alan Tarihi Köprülerin İncelenmesi*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.

Chen, X., Qi, X., & Xu, Z. (2019). Determination of weathered degree and mechanical properties of stone relics with ultrasonic CT: A case study of an ancient stone bridge in China. *Journal of Cultural Heritage*, 42, 131–138.

Civera, M., Calamai, G., & Fragonara, L. Z. (2021). System identification via Fast Relaxed Vector Fitting for the Structural Health Monitoring of masonry bridges. *Structures*, 30, 277-293.

Çulpan, C. (1975). *Türk Taş Köprüleri; Ortaçağdan Osmanlı Devri Sonuna Kadar*. Türk Tarih Kurumu, Ankara.

Dorji, J., Zahra, T., Thambiratnam, D., & Lee, D. (2021). Strength assessment of old masonry arch bridges through moderate destructive testing methods. *Construction and Building Materials*, 278, 122391.

Ercan, E. (2018). Assessing the impact of retrofitting on structural safety in historical buildings via ambient vibration tests. *Construction and Building Materials*, 164, 337–349.

Erözemen, T., Ündül, Ö., & Aysal, N. (2020). Evaluation for the effects of different cleaning techniques applied on Kufeki Stones Used in historical buildings in İstanbul. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26(8), 1413-1418.

Evrensel (2004). *Tarihi Köprüünün Trajik Hikayesi*. [Erişim: 15.12.2020 <https://www.evrensel.net/haber/153036/tarihi-koprunun-trajik-hik-yesi>]

Eyice, S. (1997). *Türkiye Diyanet Vakfı İslam Ansklopedisi*. c:16, s:107.

Finike Belediyesi (2020). *Finike Kırgöz Kemeri*. [Erişim: 14.12.2020, <https://www.finike.bel.tr/tr/m/finike/kirgoz-kemeri.html>]

Fuat, A., Ergün, M., Günaydin, M., & Can, A. (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.

Genç, A. F. (2015). *Tarihi Köprülerin Yapısal Davranışına Restorasyon Çalışmalarının Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon

Gönen, H., Doğan, M., Karacasu, M., Ozbasaran, H., & Gökdemir, H. (2013). Structural failures in the historical Murat Masonry Arch Bridge. *Engineering Failure Analysis*, 35, 334-342.

Gönen, S., & Soyöz, S. (2021). Seismic analysis of a masonry arch bridge using multiple methodologies. *Engineering Structures*. 226, 111354.

Güleç, A., Erdoğan, N., Dinç, A. D., & İrvendi, N. (2015). *Muş Merkez Tarihi Murat Köprüsü Yapı Malzeme Analizi Teknik Rapor*. Mardin Valiliği İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü (Karayolları Genel Müdürlüğü).

Güler, M. Ş. (2016). *Muş-Murat Köprüsü Rölöve Raporu*. Karayolları Genel Müdürlüğü. Ankara.

Günaydın, M. (2019). Seismic performance evaluation of a fire-exposed historical structure using an updated finite element model. *Engineering Failure Analysis*, 106, 104149.

Güney, D. (2011). *23 Ekim 2011 Van Depremi Teknik İnceleme Raporu*. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Hokelekli, E., & Yılmaz, B. N. (2019). Effect of Cohesive Contact of Backfill with Arch and Spandrel Walls of a Historical Masonry Arch Bridge on Seismic Response. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 63(3), 926–937.

Işık, E., Aydın, M. C., & Ülker, M. (2016). Performance Evaluation of a Historical Tomb and Seismicity of the Region. *Bitlis Eren University Journal of Science and Technol*, 6(2), 59-65.

Işık, N. S., & Gökdemir, A. (2005). Blok Birleşimleri Farklı Yapılan Üç Dairesel Kemerin Performans Kıyaslaması. *Politeknik Dergisi*, 8(2), 223-226.

İlter, F. (1978). *Osmanlılara Kadar Anadolu Türk Köprüleri*. Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.

Jiang, K., & Esaki, T., (2002). Quantitative assessment of weather stability changes on historic stone bridges in Kagoshima, Japan. *Engineering Geology*, 63(1-2), 83-91.

Karaton, M., Aksoy, H. S., Say, E., & Calay, Y. (2017) Nonlinear seismic performance of a 12th century historical masonry bridge under different earthquake levels. *Engineering Failure Analysis*, 79(1), 408–421.

Karayolları Genel Müdürlüğü, Sanat Yapıları Daire Başkanlığı, Tarihi Köprüler Şube Müdürlüğü Arşivi. Edvanter No: B.11/İ.49/N.04

Kılavuz, B. N. (1996). *Muş ve Çevresindeki Türk Mimari Eserleri*. Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Arkeoloji ve Sanat Tarihi Anabilim Dalı Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Van.

Korkmaz, K., Zabin, P., Çarhoğlu, A., & Nuhoğlu, A. (2013). Taş Kemer Köprülerinin Deprem Davranışının Belirlenmesi. *İleri Teknoloji Dergisi*, 2 (1), 66-75.

Korkmaz, M., Ozdemir, M. A., Kavali, E., & Cakir, F. (2018). Performance-based assessment of multi-story unreinforced masonry buildings : The case of historical Khatib School in. *Engineering Failure Analysis*, 94, 195–213.

Korumaz, M., Betti, M., Conti, A., Tucci, G., Bartoli, G., Bonora, V., & Fiorini, L. (2017). An integrated Terrestrial Laser Scanner (TLS), Deviation Analysis (DA) and Finite Element (FE) approach for health assessment of historical structures. A minaret case study. *Engineering Structures*, 153, 224–238.

Lin, W., & Yoda, T. (2017). *Materials for Bridge Constructions*. Bridge Engineering, chapter 3, 59-69.

Marta, R. (1991). Roman Building Techniques, Edizioni Kappa. Roma Masonry Arch Bridges, *Journal of Science of Gazi University*, 17(2), 129-139.

Muş İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü (2020). *Köprüler*. [Erişim: 20.11.2020, <https://mus.ktb.gov.tr/TR-56147/kopruler.html>]

Onat, O., & Sayın, E. (2015) Tarihi Tağar Köprüsünün Doğrusal Olmayan Sismik Analizi. *5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu*, 301-311.

Öziş, U., Özdemir, Y., Alkan, A., & Arısoy, Y. (2007). Türkiye’deki tarihi taş köprülerin genel durumu. *Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 1*, Ankara, İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, 503-514.

Özkok, M.K., Azsöz, G., & Erşan, Ş. (2015). Erken ve Klasik Dönem (14.-17. Yüzyıl) Osmanlı Köprülerinin Tarihsel Gelişimlerinin ve Yapım Tekniklerinin İncelenmesi: Edirne/UZUNKÖPRÜ Örneği, *3. Köprüler Viyadükler Sempozyumu*, 08-09-10 Mayıs 2015

Özmen, A., & Sayın, E. (2020). “Tarihi Yığma Bir Köprünün Deprem Davranışının Belirlenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 956-965.

Öztürk, S. (2005). *Muş Murat Köprüsü Rölöve-Restitüsyon ve Restorasyon Projelerine ait Çalışma Dosyası*. Van Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu Müdürlüğü, Van.

Öztürk, S. (2019). Muş-Varto Kaynarca Köprüsü Koruma Projesi ve Onarım Çalışmaları Hakkında Bir Araştırma. *Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 12(66), 534-546.

Pachón, P., Castro, R., García-macías, E., Compan, V., & Puertas, E. (2018). E. Torroja's bridge: Tailored experimental setup for SHM of a historical bridge with a reduced number of sensors. *Engineering Structures*, 162, 11–21.

Paviva, P. V. V., Cogima, C. K., Dezen-Kempton, E., & Carvalho, M. A. G. (2020). Historical building point cloud segmentation combining hierarchical watershed transform and curvature analysis. *Pattern Recognition Letters*, 135, 114-121.

Pepi, C., Cavalagli, N., Gusella, V., & Gioffre, M. (2021). An integrated approach for the numerical modeling of severely damaged historic structures: Application to a masonry bridge. *Advances in Engineering Software*, 151, 102935.

Proske, D., & Curbach, M. (2005). Risk to historical bridges due to ship impact on German inland waterways. *Reliability Engineering & System Safety*, 90, 261-270.

Saydan, M., Unal, A., Ulku, S. K., & Gursel, K. (2020). An investigation of the current situation of the Mısırlıoğlu Bridge and possible damages after freeze-thaw by using finite elements analysis, Sille – Konya (Central Anatolia, Turkey). *Engineering Failure Analysis*, 117, 104788.

Saygılı, Ö., & Lemos, J. V. (2021). Seismic vulnerability assessment of masonry arch bridges. *Structures*. 33, 3311-3323.

Sen, K. (2019). Osmanlı Arşiv Belgelerinde Muş Köprüleri. *Türkiyat Mecmuası- Journal of Turkology*, 29(2), 525-552.

Sert, H. (2002). *Tarihi Köprülerin Onarımı*. Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.

Simos, N., Manos, G.C., & Kozikopoulos, E. (2018). Near- and far-field earthquake damage study of the Konitsa stone arch bridge. *Engineering structures*, 177, 256-267.

Solla, M., Lorenzo, H., Riyal, F. I., & Novo, A. (2011). GPR evaluation of the Roman masonry arch bridge of Lugo (Spain). *NTD&E International*, 44, 8-12.

Stavroulaki, M. E., Riveiro, B., Drosopoulos, G. A., Solla, M., Koutsianitis, P., & Stavroulakis, G. E. (2016). Advances in Engineering Software Modelling and strength evaluation of masonry bridges using terrestrial photogrammetry and finite elements. *Advances in Engineering Software*, 101, 136–148.

Tanrıverdi, M. (2019). *Geçmişten Günümüze Tarihi Köprüler*. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa

Tanyeli, G. (2006). Türkiye'nin Köprüleri. *Koç Allianz Hayat Sigorta*, İstanbul.

Terminoloji (2017). *Kemer Nedir ve Çeşitleri Nelerdir*. [Erişim: 07.12.2020, <https://okuryazarim.com/kemer-nedir-cesitleri-nelerdir/>]

Terzi, V. G., & Ignatakis, C. E. (2018). Nonlinear finite element analyses for the restoration study of Xana, Greece. *Engineering Structures*, 167, 96–107.

Toker, S., & Ünay, A.İ. (2004). Kemerli Taş Köprülerin Matematiksel Çözümlemesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 17, 129-139.

Topçu, A. (2015). *Sonlu Elemanlar Yöntemi Ders Notları*. [Erişim: 02.01.2020] http://mmf2.ogu.edu.tr/atopcu/index_dosyalar/sonluelemanlarmetodu.htm

Troyano, F., & Leonardo (2003). *Köprü Mühendisliği. Küresel Bir Perspektif*. Londra, Thomas Telford Yayınları, ISBN 0-7277-3215-3

Tunç, V. (2020). *Van Gölü Havzası'nda kamu yatırımları ve harcamaları 1946-1960*. Hiperlink Yayınları.

Ural, A. (2005). Tarihi Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Metoduyla Analizi, *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, Mart 2005 Bildiriler Kitabı, 408-413.

Ural, A. (2017). *Muş Murat Köprüsü Yapısal Analiz ve Değerlendirme Raporu*. Karayolları Genel Müdürlüğü. Ankara.

Verstrynge, E., Lacidogna, G., Accornero, F., & Tomor, A. (2021). A review on acoustic emission monitoring for damage detection in masonry structures. *Construction and Building Materials*, 268, 121089.

Yağcı, B. (2009). *Kemer formları, köprüler ders notları*. [Erişim:20.11.2020, <http://web.sakarya.edu.tr/~cacur/ins/resim/kopruler.htm>]

Yeşilbaş, E. (2016). *Muş Murat Köprüsü Sanat Tarihi Raporu*. Karayolları Genel Müdürlüğü. Ankara

Yılmaz, B. (2016). *Tarihi Köprülerin Yapısal Davranışına Kemer Geometrisinin Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon

Yurdakul, M., Yılmaz, F., Artar, M., Can, Ö., Öner, E., & Daloğlu, A. T. (2021). Investigation of time-history response of a historical masonry minaret under seismic loads. *Structures*, 30, 265-276

Zampieri, P., Simoncello, N., & Pellegrino, C. (2019) “Seismic capacity of masonry arches with irregular abutments and arch thickness. *Construction and Building Materials*, 201, 786-806.

Zani, G., Martinelli, P., Gali, A., & Prisco, M. (2020). Three-dimensional modelling of a multi-span masonry arch bridge: Influence of soil compressibility on the structural response under vertical static loads. *Engineering Structures*, 221, 110998.

Zucchini, A., & Lourenco, P. B. (2004). A coupled homogenisation – damage model for masonry cracking. *Computers and Structures*, 82, 917–929.