



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



TARİHİ MERAM KÖPRÜSÜNÜN SONLU
ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
MODELLENEREK DİNAMİK
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Büşra OĞUZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ocak-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Büşra OĞUZ tarafından hazırlanan “Tarihi Meram Köprüsünün Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Modellenerek Dinamik Davranışlarının İncelenmesi” adlı tez çalışması 15/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Mehmet KAMANLI
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mohammed Gamal Omar AL HAGRI
(İstanbul Aydın Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Büşra OĞUZ

Tarih:15/01/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TARİHİ MERAM KÖPRÜSÜNÜN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENEREK DİNAMİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Büşra OĞUZ

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN

2025, 101 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN

Prof. Dr. Mehmet KAMANLI

Dr. Öğr. Üyesi Mohammed Gamal Omar AL HAGRI

İnsanlık tarihi boyunca ulaşım en önemli faaliyetlerden birisi olmuştur ve olmaya devam edecektir. Canlı ve cansız varlıkların bir yerden başka yere gitmesi ya da aktarılması olarak bilinen ulaşım; karayolu, demiryolu, denizyolu ve havayolu kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Ulaşımın sağlanmasına yarayan yapılardan biri de köprülerdir. Köprüler aracılığıyla akarsu, vadi, karayolu vb. engeller aşılabilmektedir.

Deprem, ne zaman meydana geleceği belirlenemeyen ve yer kabuğundaki ani kırılmalar sebebiyle ortaya çıkan titreşimlerin dalgalar şeklinde yayılmasıyla yeryüzünü sarsması sonucu oluşan doğal bir olgudur. Deprem diğer mühendislik yapılarını etkilediği gibi tarihi köprüleri de etkilenmekte ve zarar verebilmektedir. 6 Şubat Kahramanmaraş Depremlerinde hasar alan tarihi köprüler deprem etkisinin yadsınamaz bir kanıtı niteliğindedir.

Köprülerde diğer mühendislik yapıları gibi deprem karşısında durabilitesini korumalıdır. Ancak tarihi köprüler bugünkü betonarme ve çelikten yapılmış veya sismik izolasyonla donatılmış köprüler gibi sismik olaylara dayanacak şekilde inşa edilmemişlerdir. Bundan dolayı meydana gelmiş ve gelecek olan depremlere karşı tarihi yapıların hem yapısal bütünlüğünün korunması hem de yapısal hasarlarının en aza indirilmesi için önlemler alınmalıdır. Tarihi yapıların taşıma kapasitelerinin, hizmet ömürlerinin ve güvenilirliklerinin bilinmesi çok önemlidir. Ancak var olan yapıların yapısal parametrelerinin tam olarak belirlenmesi zordur. Mekanik özellikler elde edildikten sonra köprünün tamamı ya da bir elemanı üzerinde teorik ve deneysel çalışmalar yapılarak tarihi köprünün deprem davranışı karşısında nasıl tepki verdiği hakkında öngörülebilir.

Yapılan bu tez çalışmasında tarihi Meram Köprüsü sonlu eleman programı olan ABAQUS' de makro modelleme yöntemi kullanılarak modellenerek hem modal analiz ve hem de deprem analizi yapılmıştır. Köprünün deprem etkisi altındaki davranışı test edilmiş ve tarihi köprünün dinamik karakteristikleri olan frekans ve mod şekli belirlenmiştir. Aynı zamanda köprüler hakkında genel bilgiler anlatılmış, yığma köprülerin oluşturan elemanlara, yığma köprülerde kullanılan malzemelere ve yığma köprülerde kullanılan modelleme yöntemlerine değinilmiş, dinamik parametreler ve bu parametrelerin elde edilmesi hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca literatürde yer alan tarihi köprülerin teorik analizleri incelenmiştir. Sonuç olarak maksimum yer değiştirmelerin kemerlerde ve mesnetlerde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Abaqus, deprem, dinamik parametre, sonlu eleman, tarihi köprü, teorik analiz.

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF THE HISTORICAL MERAM BRIDGE BY MODELLING WITH FINITE ELEMENT METHOD

Büşra OĞUZ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN

2025, 101 Pages

Jury

Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN

Prof. Dr. Mehmet KAMANLI

Dr. Öğr. Üyesi Mohammed Gamal Omar AL HAGRI

Throughout human history, transportation has been one of the most important activities and will continue to be. Transportation, which is known as the movement or transfer of living and non-living beings from one place to another; It can be carried out by road, rail, sea and air. One of the structures used to provide transportation is bridges. Obstacles such as streams, valleys, highways, etc. can be overcome through bridges.

An earthquake is a natural phenomenon that occurs as a result of the vibrations that occur due to sudden breaks in the earth's crust and shake the earth in the form of waves. Earthquakes affect other engineering structures as well as historical bridges and can cause damage. The historical bridges damaged in the February 6 Kahramanmaraş Earthquakes are an undeniable proof of the earthquake effect.

Bridges, like other engineering structures, should maintain their durability against earthquakes. However, historic bridges were not built to withstand seismic events like today's bridges made of reinforced concrete and steel or equipped with seismic isolation. Therefore, measures should be taken to protect the structural integrity of historical buildings and to minimize their structural damage against earthquakes that have occurred and will occur. It is very important to know the bearing capacity, service life and reliability of historical buildings. However, it is difficult to determine the exact structural parameters of existing structures. After the mechanical properties are obtained, theoretical and experimental studies can be carried out on all or one element of the bridge to predict how the historical bridge reacts to earthquake behavior.

In this thesis, both modal analysis and earthquake analysis were performed by modeling the historical Meram Bridge using the macro modeling method in ABAQUS, which is a finite element program. The behavior of the bridge under the effect of earthquakes was tested and the frequency and mode shape, which are the dynamic characteristics of the historical bridge, were determined. At the same time, general information about bridges is explained, the elements that make up masonry bridges, the materials used in masonry bridges and the modeling methods used in masonry bridges are mentioned, dynamic parameters and information about obtaining these parameters are given. In addition, theoretical analyses of historical bridges in the literature were examined. As a result, it was observed that maximum displacements occurred in the arches and supports.

Keywords: Abaqus, earthquake, dynamic parameter, finite element, historical bridge, theoretical analysis.

ÖNSÖZ

Tez çalışmam, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında gerçekleşmiştir.

Tez çalışması süresi boyunca bilgi ve deneyimleri ile bana her konuda destek olan sayın hocam Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN'e teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Hayatım boyunca her koşulda desteklerini daima hissettiğim çekirdek aileme teşekkür eder, saygı ve sevgilerimi sunarım. Bu tez çalışmamı çekirdek aileme armağan ediyorum.

Teorik çalışmalarımda ve gerekli hesaplamalarda desteklerini esirgemeyen Dr. Mohammed Gamal Omar AL HAGRI hocama teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Konya Vakıflar Genel Müdürlüğü'ne, Meram Köprüsüne ait bilgilere erişebildiğim dokümantasyonu sağladığı için teşekkür ederim.

Büşra OĞUZ
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı.....	5
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	7
2.1. Abaqus Programı Kullanılarak Tarihi Köprüler Üzerinde Yapılan Çalışmalar.....	7
2.2. Tarihi Köprüler Üzerinde Yapılan Çalışmalar.....	20
3. KÖPRÜLERLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER.....	26
3.1. Köprülerin Kısımları.....	26
3.2. Malzemesine Göre Köprüler.....	28
3.3. Yapısal Sistemine Göre Köprüler	29
3.4. Açıklığa Göre Köprüler.....	30
3.5. Dünyadaki Önemli Köprüler	30
3.6. Köprü Tipinin Seçimi	33
3.7. Köprülerin Kullanışık Şartları	34
3.8. Köprü Yapım Metotları	34
3.9. Köprülerin Boyutlandırılmasında Kullanılan Yönetmelikler	40
4. TARİHİ YIĞMA KÖPRÜLER.....	42
4.1. Tarihi Yığma Köprüleri Oluşturan Elemanlar.....	42
4.2. Tarihi Yığma Köprülerde Kullanılan Yapı Malzemeleri	45
4.3. Tarihi Yığma Köprülerde Kullanılan Modelleme Yöntemleri.....	45
4.3.1. Detaylı mikro modelleme	46
4.3.2. Basitleştirilmiş mikro modelleme	46
4.3.3. Makro modelleme	47
4.3.4. Sonlu elemanlar yöntemi.....	48
4.4. Tarihi Yığma Köprülerde Kullanılan Analiz Yöntemleri.....	48
4.4.1. Doğrusal (lineer) analiz	48
4.4.2. Doğrusal olmayan (non-lineer) analiz.....	48
4.4.2.1. Beton hasar plastisite malzeme modeli (CDP)	49

5. DİNAMİK PARAMETRELER.....	50
5.1. Periyot	50
5.2. Frekans	51
5.3. Sönüm Oranı	52
5.3.1. Sönüm oranını belirlenmesi	53
5.3.1.1. Serbest titreşim denkleminin çözümü ile sönüm oranının belirlenmesi (STDÇ)	53
5.3.1.2. Logaritmik azalım ile sönüm oranının belirlenmesi (LA)	54
5.3.1.3. Yarım güç bant kalınlığı yöntemi ile sönüm oranının belirlenmesi (YGBK)	54
5.4. Mod şekli.....	55
6. DİNAMİK ANALİZ YÖNTEMLERİ	56
6.1. Teorik Modal Analiz (TMA).....	56
6.1.1. Tek serbestlik dereceli sistemler	56
6.1.2. Çok serbestlik dereceli sistemler	58
6.2. Deneysel Modal Analiz (DMA)	58
6.3. Operasyonel Modal Analiz (OMA)	60
6.3.1. Modal parametrelerin belirlenmesi	60
6.3.1.1. Frekans ortamında ayrışım yöntemi (EFFD).....	60
6.3.1.2. Stokastik altalan belirleme yöntemi (SSI)	61
7. MATERYAL VE YÖNTEM.....	62
7.1. Tarihi Meram Köprüsü	62
7.2. ABAQUS Sonlu Elemanlar Yazılımı.....	64
7.3. Tarihi Meram Köprüsünün Sayısal Modellemesi.....	65
7.3.1. Model oluşturma	65
7.3.2. Malzeme özellikleri	67
7.3.3. Hesaplarda kullanılan deprem kaydı.....	72
8. ARAŞIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	73
8.1. Tarihi Meram Köprüsü'nün Modal Analiz Sonuçları	73
8.1.1. Tarihi Meram Köprüsü'nün doğal frekansı	74
8.2. Tarihi Meram Köprüsü'nün Deprem Analiz Sonuçları	75
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	92
9.1. Sonuçlar	92
9.2. Öneriler	94
KAYNAKLAR	95

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$[C]$	: Sönüm Matrisi
f	: Frekans
$\{F(t)\}$	: Kuvvet Vektörü
$[K]$	: Rijitlik Matrisi
k	: Rijitlik
$[M]$	: Kütle Matrisi
m	: Kütle
t	: Zaman
T	: Doğal Titreşim Periyodu
$u_n(t)$	: Zamana Bağlı Yer Değişimi
$\dot{u}_n(0)$	: Başlangıç hızı
ω	: Açısal Frekans
ω_D	: Sönümlü Doğal Frekans
ζ	: Sönüm Oranını
$\{x(t)\}$	: Yer Değiştirme Vektörü
$\{\dot{x}(t)\}$	: Hız Vektörü
$\{\ddot{x}(t)\}$	: İvme Vektörü

Kısaltmalar

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
AVT	: OrtamTitreşim Testi
CALTRANS	: California Department of Transportation
CDP	: Beton Hasar Plastisitesi
ÇSDS	: Çok Serbestlik Dereceli Sistemler
DLH	: Demiryolları Limanlar ve Hava Meydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü
DMA	: Deneysel Modal Analiz
ECS	: Ekstradoz Askılı
EFFD	: Frekans Ortamında Ayırışma
Eurocode 8	: Design Of Structures for Earthquake Resistance
FRF	: Frekans Davranış Fonksiyonu
FRP	: Fiber Reinforced Polymer (Elyaf Takviyeli Polimer)
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
LA	: Logaritmik Azalım ile Sönüm Oranın Belirlenmesi
LE	: Logaritmik gerilmeler
LFD	: Load Factor Design
LRFD	: Load and Resistance Factor Design
M-C	: Mohr-Coulomb
OMA	: Operasyonel Modal Analiz
PEEQ	: Eşdeğer Plastik Basınç Birim Şekil Değiştirmesi
PEEQT	: Eşdeğer Plastik Çekme Birim Şekil Değiştirmesi
PGA	: Maksimum Yer İvmesi (Peak Ground Acceleration)
SE	: Sonlu Elemanlar
SSI	: Zaman Ortamında Stokastik Altalan Belirleme
STDÇ	: Serbest Titreşim Denkleminin Çözümü ile Sönüm Oranını Belirleme
TMA	: Teorik Modal Analiz
TSDS	: Tek Serbestlik Dereceli Sistemler
YGBK	: Yarım Güç Bant Kalınlığı Yöntemi ile Sönüm Oranın Belirlenmesi

1. GİRİŞ

Tarihi köprüler insanlar ve diğer varlıkların bir yerden başka bir yere gitmesi ve aktarılması amacıyla kullanılan sanat yapılarından birisidir. Ahşap ve kagir malzemeler kullanılarak inşa edilen tarihi köprüler önceleri kısa açıklıklar geçilip hafif yükler taşıyabilecek şekilde, sonrasında ise daha büyük açıklıklar geçilip daha ağır yükler taşınabilecek şekilde inşa edilmiştir. Geçmişten günümüze kadar deprem, sel, toprak kayması, taşıt yükü, rüzgar yükü, vs. birçok dış etken altında kalan tarihi köprülerde kullanılan malzemelerin zamanla dayanımının azalması, zeminin oturması, zamana bağlı deformasyonların oluşması, köprünün tasarım ve inşa aşamasında dikkat edilmeyen düzensiz yükleme durumlarından kaynaklı oluşan olumsuzluklar hizmet ömürlerini azaltmıştır ancak hala günümüzde varlıklarını devam ettiren tarihi köprüler bulunmaktadır.

Tarihi köprülerin büyük bir bölümü taş ve yığma yapım tekniği kullanılarak inşa edilmişlerdir. Bu köprüler, dolgu malzemesinde, temelden, kemerden ve tempan duvardan oluşmakta olup kemerler bu yapı sistemlerinin ana unsurlarını oluştururlar. Geometrisinden kaynaklı olarak basınç kuvvetine maruz kalan kemerler geniş açıklıkların geçilmesi için uygun bir yapı sistemleridir (Özmen ve Sayın, 2020). Kemer formunun kullanımına dair ilk örneklerine M.Ö. 3000 yıllarda Sümerlerde rastlanmıştır. Taş kemer köprüler tarihi kültürel mirasımızın önemli yapılarından. Bu köprüler, Anadolu’da oldukça yaygın olarak kullanılmışlardır. Tek açıklıktan oluşan taş kemer köprü formunun 19. yüzyılda Osmanlılar tarafından kullanıldığını görülmektedir. (Ural, 2005).

Ülkemiz çok zengin bir kültürel mirasa sahiptir ancak bununla birlikte depremlerin çok aktif rol oynadığı bir coğrafyadır. Ülkemiz yer aldığı Alp-Himalaya deprem kuşağında Avrasya Levhası, Afrika Levhası ve Arap levhası olmak üzere üç adet büyük levhanın etkisi altında bulunmaktadır. Anadolu’nun büyük bir bölümünün bulunduğu Anadolu Levhası, Avrasya Levhasının küçük bir bölümünü oluşturur. Afrika levhası Anadolu levhasının altına doğru kayar, Arap levhası da kuzey yönüne doğru hareket ederek Anadolu levhasını sıkıştırır ve sıkıştırma sonucunda Bitlis Bindirme Zonu oluşur. Anadolu Levhasının kuzey sınırında Kuzey Anadolu Fayı, güney sınırında Doğu Anadolu Fay zonu ve batısında Batı Anadolu (Ege) Fayları bulunmaktadır. Bundan dolayı ne zaman ve nerede meydana geleceği belli olmayan, yapılarımızı hangi şiddetle etkileneceğini bilmediğimiz tersinir-tekrarlanır olan deprem kültürel mirasımızı tehdit

eden unsurlardan biridir. Yakın zamanda ülkemizde yaşanan depremlerde tarihi köprülerimizde meydana gelen hasarlar bunun bir kanıtıdır.

6 Şubat Kahramanmaraş depremleri sonrasında tarihi köprüler üzerinde yapılan araştırmalarda bölgedeki köprülerin çoğunlukla taş malzemelerden yapıldığı görülmüştür. Kahramanmaraş ve Hatay’da bulunan iki tarihi taş kemer köprünün yapısal elemanlarında (tempan duvarlarında ve köprü tabliyesinde) hasarlar gözlenmiştir. Bu hasarlara ait bazı görseller Şekil 1.1 ve 1.2’ de verilmiştir (Altunışık ve ark., 2023)



Şekil 1.1. Kahramanmaraş ilinde bulunan tarihi Ceyhan Köprüsüne ait hasarlar (Altunışık ve ark., 2023)



Şekil 1.2. Hatay ilinde bulunan tarihi bir köprüye ait hasarlar (Altunışık ve ark., 2023)

Adıyaman'ın Tut Çamiçi köyü ile Gölbaşı Yaylacık köyü arasından geçen Göksu Çayı üzerine inşa edilen Vicina Köprüsü, Kahramanmaraş merkezli depremlerde yıkılmıştır (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Vicina Köprüsü / Adıyaman

Dolayısıyla günümüzdeki kadar depreme dayanıklı olmayan tarihi köprülerimizin varlığının devam etmesi için onların deprem altındaki davranışını öngörebilmemiz ve önlemler almamız gerekmektedir. Bu önlemlerin alınması için öncelikle yapının

strüktürel davranışının tam olarak bilinmesi gerekmektedir. Fakat tarihi yapıların analizinde bazı sorunlar ile karşılaşilmektedir. Bu sorunlar şu şekilde sıralanabilir:

- Geometrik boyutlarla ilgili verilerin eksik olması,
- Büyük kesitli yapı elemanlarının görülemeyen iç bölümlerinin malzeme özellikleri,
- Yapı malzemelerinin özelliklerinin belirlenmesindeki zorluklar,
- Detaylı laboratuvar analizlerinin maliyetinin yüksek olması,
- Doğal malzemelerin kullanılmasından ve yapım tekniği açısından oluşan veri çeşitliliğinin çok olması,
- Yapım süresinin uzunluğundan dolayı aynı eleman kesiti içinde değişebilen malzeme özelliklerinin olması,
- Yapım sırasının ve sürecinin tam olarak bilinmemesi,
- Yapıdaki var olan mevcut hasarın neden olduğu genel stabilitenin ve dayanımının tam olarak saptanamaması,
- Modern yapı malzemesi, yapısal analiz, tasarım ve yük şartnamelerinin uygulanamaması (Toker ve Ünay, 2004).

Taş veya tuğla taşıyıcı sisteme sahip olan tarihi yapıların yapısal analizinin yapılması karmaşıktır. Öncelikle yapı elemanlarını oluşturan malzemelerin mekanik özelliklerinin iyi şekilde tanımlanması gerekmektedir. Yığma taş ya da tuğla tekniği ile yapılmış yapıların analizi için yapıya hiçbir şekilde zarar verilmeden tahribatsız numune örnekleri alınarak laboratuvar da özelliklerini incelemek için deneyler yapılmalı ve analiz için gerekli olan değerler doğrudan elde edilmelidir. Bu doğrultuda tarihi köprülerin deprem altındaki davranışlarının teorik yöntemlerle araştırılarak daha gerçekçi sonuçların elde edilmesi hem maddi hem manevi olarak büyük önem taşımakla birlikte kültürel mirasa sahip çıkmak açısından da önemlidir.

Tez çalışmasının birinci bölümü giriş bölümüdür ve bu bölümde tezin amacı ile kapsamı hakkında bilgiler verilmiştir. Yapılan tez çalışmasının ana hatları belirtilmiştir.

Tez çalışmasının ikinci bölümü kaynak araştırması kısmıdır. Bu bölümde Abaqus programı kullanılarak analiz edilen tarihi yığma köprülerle ilgili yapılan çalışmalar incelenmiş ve bilgiler verilmiştir.

Tez çalışmasının üçüncü bölümü köprülerle ilgili genel bilgiler bölümüdür. Bu bölümde köprülerin malzemelerine, yapısal sistemlerine ve açıklıklarına göre sınıflandırılması yapılmıştır. Dünyadaki önemli köprülerden bahsedilmiştir. Köprü

tipinin seçimine, köprülerin kullanışlık şartlarına ve köprü yapım metotlarına değinilmiştir. Ayrıca köprülerle ilgili kullanılan yönetmeliklere yer verilmiştir.

Tez çalışmasının dördüncü bölümü tarihi yığma köprüler bölümüdür. Bu bölümde köprüler genelden özele indirgenerek, tezin asıl konusu olan yığma köprülere değinilmiştir. İlk olarak yığma köprüleri oluşturan elemanlar anlatılmıştır. Ardından tarihi yığma köprülerde kullanılan yapı malzemeleri hakkında bilgi verilmiştir. Son olarak da bu yapılarda kullanılan modelleme ve analiz yöntemlerine değinilerek bu bölüm tamamlanmıştır.

Tez çalışmasının beşinci bölümü dinamik parametrelerin anlatıldığı bölümdür. Bu bölümde dinamik etki altındaki yapının davranışının incelenmesi için gerekli olan dinamik parametrelerden (periyot, frekans, sönüm oranı ve mod şekli) bahsedilmiştir.

Tez çalışmasının altıncı bölümü dinamik analiz yöntemleri anlatılmıştır. Yapı davranışının anlaşılabilmesi için gerekli olan dinamik karakteristiklerin elde edilmesi teorik ve deneysel modal analizler ile sağlanabilmektedir. Bu bölümde bahsedilen analizlere değinilmiştir.

Tez çalışmasının yedinci bölümü materyal ve yöntem bölümüdür. Bu bölümde tarihi Meram Köprüsü ve Abaqus programı hakkında bilgiler verilmiştir. Modelin oluşturulma aşaması, malzeme özellikler ve çalışmada kullanılan deprem kaydı açıklanmıştır.

Tez çalışmasının sekizinci bölümü araştırma sonuçları ve tartışma bölümüdür. Bu bölümde modal analiz ve tarihi Meram Köprüsü' nün deprem etkisi altındaki davranışının sonuçları verilmiştir.

Tez çalışmasının dokuzuncu bölümü sonuçlar ve öneriler bölümüdür. Bu bölümde modal analiz sonuçları ve deprem analizi sonucunda elde edilen dinamik parametreler incelenmiş olup sonuçlar ve öneriler paylaşılmıştır.

1.1. Tezin Amacı

Deprem, ne zaman olacağı belirlenemeyen ve yer kabuğunda aniden oluşan kırılmalar nedeniyle meydana gelen titreşimlerin dalgalar halinde yayılmasıyla yeryüzünü sarsması sonucu oluşan doğal bir olgudur. Deprem diğer mühendislik yapılarını etkilediği gibi tarihi köprüleri de etkilenmekte ve zarar verebilmektedir. Yapıldıkları dönemde günümüzdeki kadar mühendislik biliminin gelişmemiş olması, kullanılan malzemelerin bugünkü kadar dayanımlı olmaması ve yapım şartlarının

günümüzdeki yapım aşamaları kadar disiplinli olmaması tarihi köprülerin deprem karşısında hasar görme riskini daha da artırmaktadır.

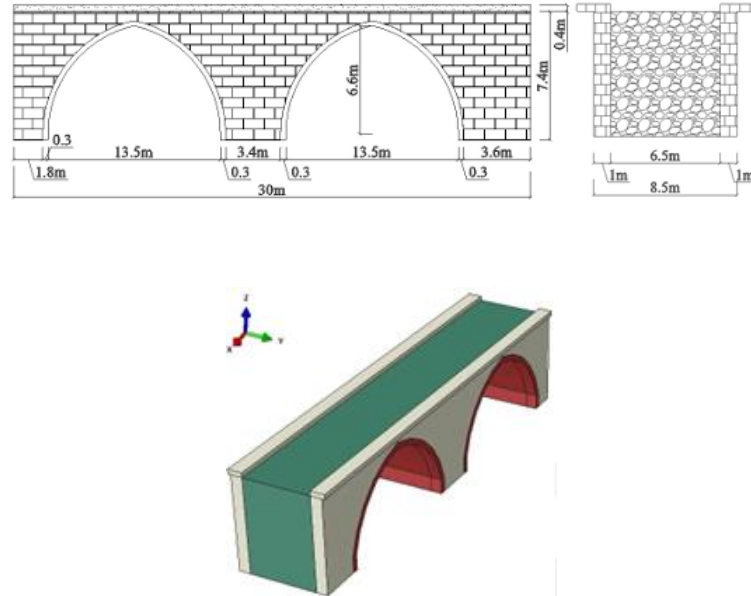
Tarihi köprüler bugünkü betonarme ve çelikten yapılmış veya sismik izolasyonla donatılmış köprüler gibi sismik olaylara dayanacak şekilde inşa edilmemişlerdir. Bundan dolayı meydana gelmiş ve gelecek olan depremlere karşı tarihi yapıların hem yapısal bütünlüğünün korunması hem de yapısal hasarlarının en aza indirilmesi için önlemler alınmalıdır. Tarihi yapıların taşıma kapasitelerinin, hizmet ömürlerinin ve güvenilirliklerinin bilinmesi çok önemlidir. Ancak var olan yapıların yapısal parametrelerinin tam olarak belirlenmesi zordur.

Tarihi köprülerle ilgili birçok teorik analiz çalışmaları bulunmaktadır. Bilgisayar ortamında modelleme yapılarak tarihi yapıların deprem kuvveti altındaki davranışı hakkında bilgi birikimi sağlanmaktadır. Bundan dolayı bu çalışma da tarihi Meram Köprüsü sonlu eleman programı olan ABAQUS programında modellenerek, modal ve deprem analizleri yapılmıştır. Köprünün deprem etkisi altındaki dinamik davranışı incelenmiş olup tarihi köprünün dinamik parametrelerinden olan frekans ve mod şekli belirlenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

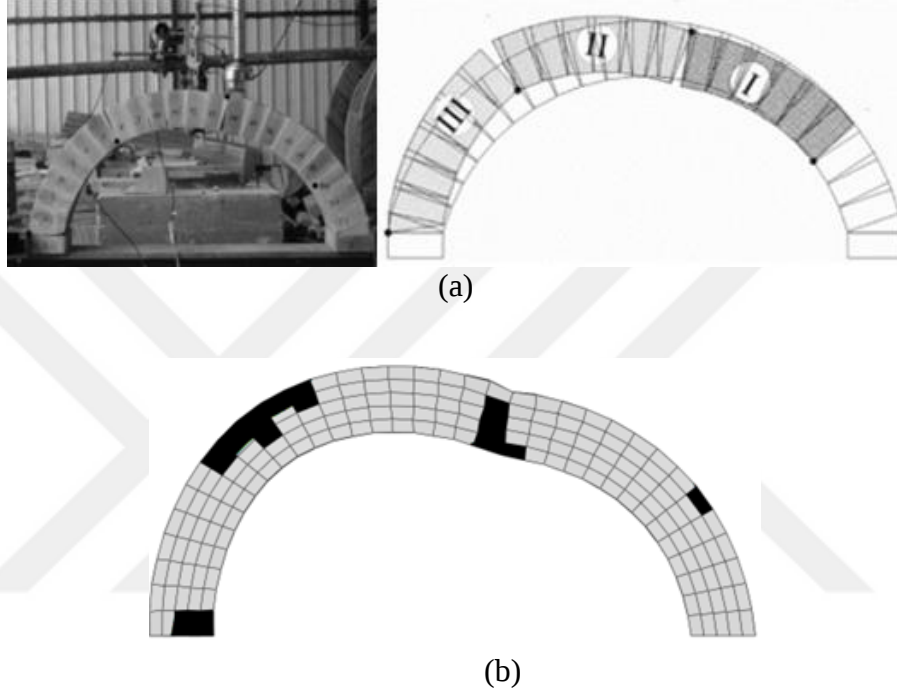
2.1. Abaqus Programı Kullanılarak Tarihi Köprüler Üzerinde Yapılan Çalışmalar

(Üstün, 2020), çalışmasında kullanılan ve Bartın'ın ilk taş köprüsü olan iki açıklıklı Kemer Köprü'nün toplam boyu 42 m'dir. Köprü'nün genişliği 8,5 m toplam yüksekliği ise 7,8 m'dir. Köprü'nün taşıyıcı sistemlerinde kesme taş ve horasan harcı kullanılmıştır. Bu çalışmada 17 Ağustos 1999 Kocaeli deprem ivme kayıtlarının Doğu-Batı bileşenleri kullanılarak dolgu-kemer ve dolgu-yan duvar ara yüzeyleri arasında etkileşimin olduğu ve olmadığı durumlar için yığma köprü'nün düzlem içi ve düzlem dışı doğrusal ve doğrusal olmayan sismik davranışı Abaqus programında modellenerek incelenmiştir (Şekil 2.1). Beton Hasar Plastisite malzeme modeli dolgu-kemer kısımlarının doğrusal olmayan malzeme davranışını simüle etmek için kullanılmış olup dolgu-yan duvar birimleri için ise Mohr-Coulumb malzeme modeli kullanılmıştır. Sonuç olarak yığma yapıların sismik davranışını belirlerken doğrusal olmayan analiz yöntemlerinin kullanılması ve yapısal davranışın değerlendirilirken yığma birimler arasındaki etkileşimin göz önünde bulundurulması gerektiği belirtilmiştir.



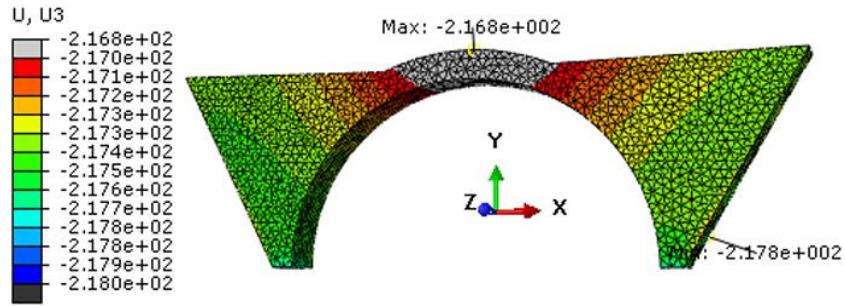
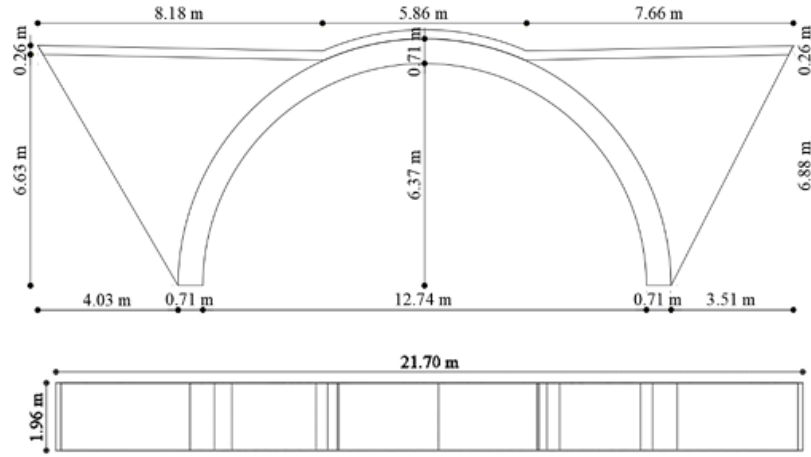
Şekil 2.1. Kemer Köprü'nün ön, yan ve 3 boyutlu görünüşü

(Tarhan, 2022), çalışmada lif takviyeli polimerle güçlendirilen yığma kemerlerin sismik kapasitesini belirleyebilmek için sayısal ve deneysel analizler yapılmıştır. Sayısal analizde Abaqus programı kullanılmıştır. Sonuç olarak sayısal modelleme yığma kemeri iyi bir şekilde temsil etmiştir. Bu sayısal modelde hasar formu ve kapasite kavisleri açısından yapısal yığma elamanların davranışlarının tekrar edilmesinde iyi bir şekilde çalıştığını göstermektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Deney yoluyla elde edilen plastik deformasyonlar (a), sayısal modelleme ile elde edilen plastik deformasyonlar (b)

(Şeker ve Şahin, 2022), çalışmada Uşak Clandras Köprüsü'nün sismik davranışı doğrusal ve doğrusal olmayan analizler ile Abaqus programı kullanılarak test edilmiştir. Dinamik analizlerde 1999 Kocaeli Depremi'nin ivme kayıtları kullanılmıştır. Köprü'nün uzunluğu 21,70 m, yüksekliği 17 m, genişliği ise 1,96 m'dir. Köprü'nün kemeri kasnak şeklindedir ve tek açıklıklı bir köprüdür (Şekil 2.3). Beton Hasar Platisitesi (CDP) modeli ile doğrusal olmayan zaman analizi yapılmıştır. Sonuç olarak basınç ve çekme gerilmelerinin kemer çıkıntılarının kayalar ile desteklendiği noktalarda yoğunlaştığı, basınç gerilmesinin çekme gerilmesinden 6 kat daha büyük olduğu ve gerilmelerin maksimum olduğu yerlerde malzeme dayanımı aşırsa öncelikle bu bölgelerde hasar meydana geleceği belirtilmiştir.

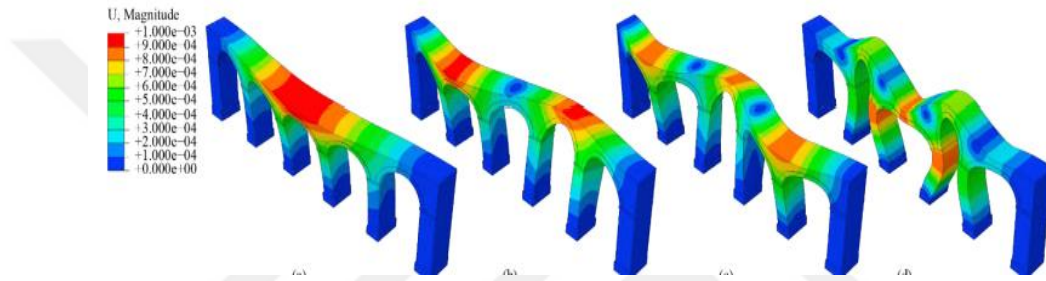


Şekil 2.3. Clandras Köprüsü'nün ön, üst ve 3 boyutlu görüntüsü

(Zizi ve ark., 2024), çalışmada İtalya'nın Caserta ilindeki beş açıklıklı tarihi San Ferdinando II köprüsünün uzunluğu 11,7 m'dir. Toplam yüksekliği yaklaşık 15 m olan dikdörtgen payeler ile desteklenmektedir (Şekil 2.4). Yığma köprü Abaqus programında modellenerek modal analizi yapılmış ve elde edilen sayısal değerler ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak modelleme yapılırken önemli basitleştirmeler yapılmasına rağmen sayısal modelden elde edilen mod şekilleri ve frekanslar deney yoluyla elde edilen değerlere oldukça yakın sonuçlar vermiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.4. San Ferdinando II köprüsü

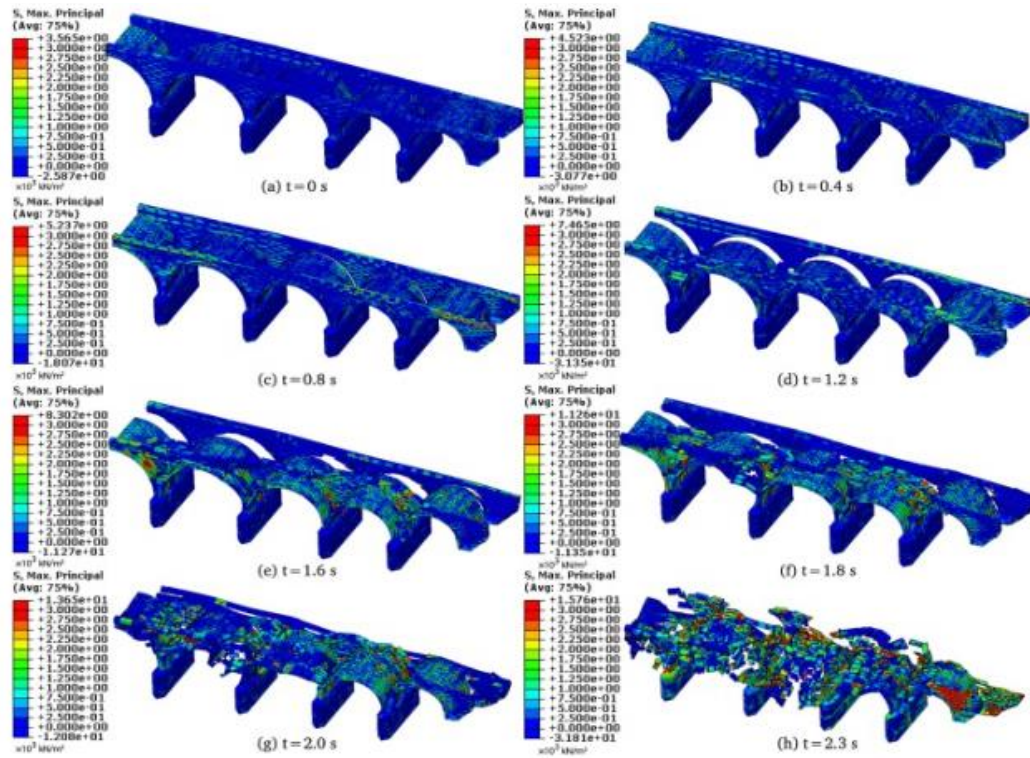


Şekil 2.5. San Ferdinando II köprüsünün sayısal analiz sonuçları

(Han ve ark., 2023), çalışmada Çin’de bulunan 9 açıklıklı Putang Köprüsü kullanılmıştır. Taş kemerlerden oluşan köprünün uzunluğu 92 m, genişliği 6 m’dir. Köprü; taş kemer köprünün yapısal bileşenleri olan kemerler, payanda duvarları, dolgu toprağı, iskeleler, su bentleri ve yol döşemesinden oluşmaktadır (Şekil 2.6). Çalışmada Putang köprüsünün Abaqus programında modellenmesi yapılarak tarihi çok açıklıklı kemer köprülerin sel yükü altında yapısal kırılganlığı, çökme mekanizması ve hangi seviyedeki sel baskını karşısında çökeceğinin değerlendirilmesi yapılmıştır (Şekil 2.7). Sonuç olarak köprünün sel kaynaklı çökmesini önlemek için özellikle tempan duvarların en alt taşları ile kemer yayları arasındaki kohezyon kilit noktadır. Bazı tarihi kemer köprülerdeki su baskını etkilerini azaltmak için su kesmelerinin üzerine sivri burunlu taşları geçici olarak yerleştirmek ve bunları tempan duvarlarına sabitlemek kurtarılabılır bir yöntemdir.

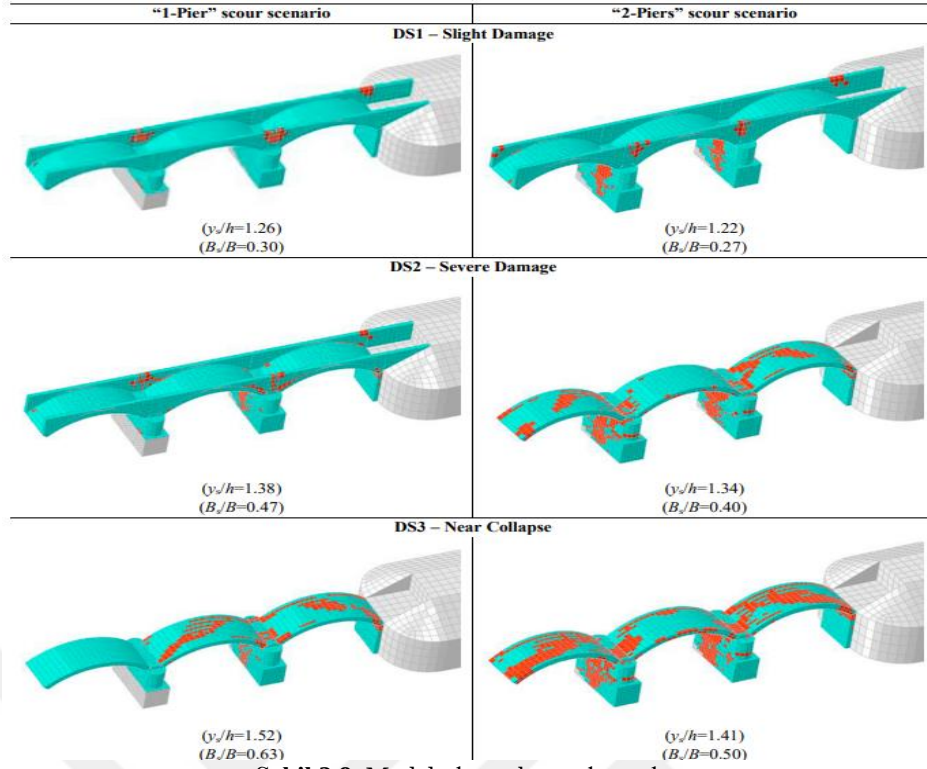


Şekil 2.6. Putang Köprüsü



Şekil 2.7. Putang Köprüsü'nün sayısal analiz sonuçları

(Scozzese ve ark., 2024), son yıllarda yüksek rijitlik ve sıkı temellere sahip olan tarihi yığma köprülerin yerel oyulmayla bağlantılı olarak sel kaynaklı çökmelerin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada 130 m uzunluğunda, 4,17 m yüksekliğinde 7 açıklıklı taş kemer köprü kullanılmıştır. Oyulmanın yığma kemerler üzerindeki etkisi araştırılmış ve çok açıklıklı taş kemer köprü Abaqus programında modellenerek analiz edilmiştir. Sonuç olarak oyulmanın temel tabanı desteğini kaybetmeye başladığında fark edilebilir hale gelmeye başladığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.8).

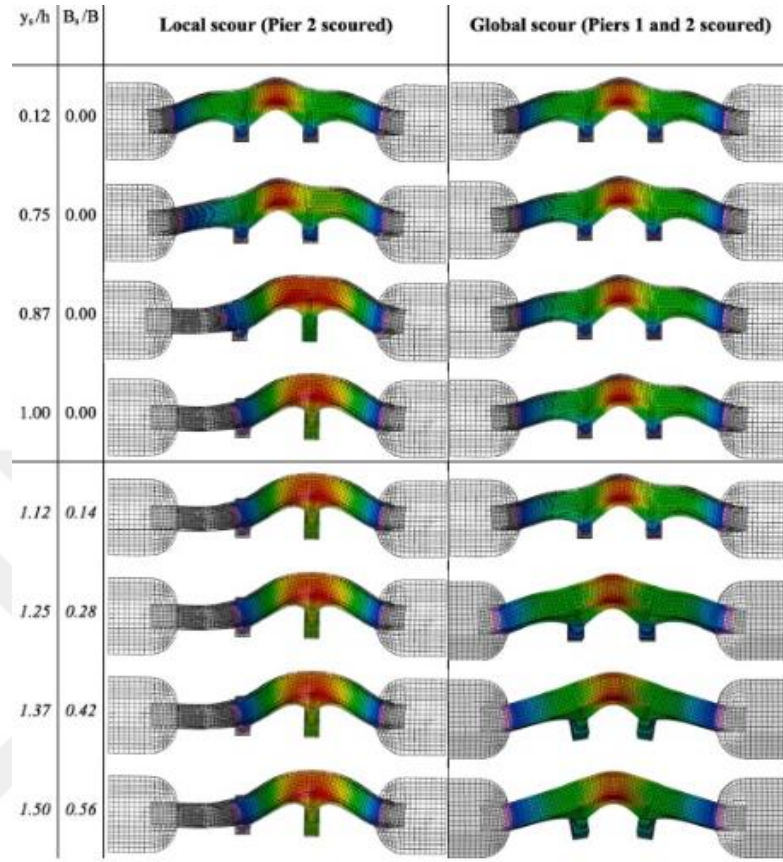


Şekil 2.8. Model oluşan hasar durumları

(Onat, 2020), titreşim frekansı yapının performansını ve yapıya etkiyen statik eşdeğer kuvvet gibi dinamik özelliklerin değerlendirilmesinde yeterli bilgiyi sağlamak için önemli bir parametredir. Özellikle bu parametre yapının sismik talebini değerlendirmeyi sağlamaktadır. Dolayısıyla bir yapının sismik davranışını belirlemede frekans önemli bir role sahiptir. Bu çalışma tarihi yığma köprülerin modal özelliklerinin hızlı bir değerlendirmesini sağlamak için ampirik formülasyon sunarak katkıda bulunmayı amaçlamıştır. Sonuç olarak iki yaklaşım dikkate alınmıştır. Bunlardan birisi yalnızca tarihi yığma köprülerin geometrik özelliklerini dikkate alınarak yapılan deneysel tabanlı yaklaşımdır. Diğeri ise köprülerin hem fiziksel hem de mekanik özelliklerini dikkate alan sayısal yaklaşımdır. Daha sonra, uygun bir formülasyon türetmek için kapsamlı parametrik analiz yürütülmüştür. Baskın malzemenin birim ağırlığı ve elastisite modülü gibi mekanik özelliklerin hesaba katılmasının daha gerçekçi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

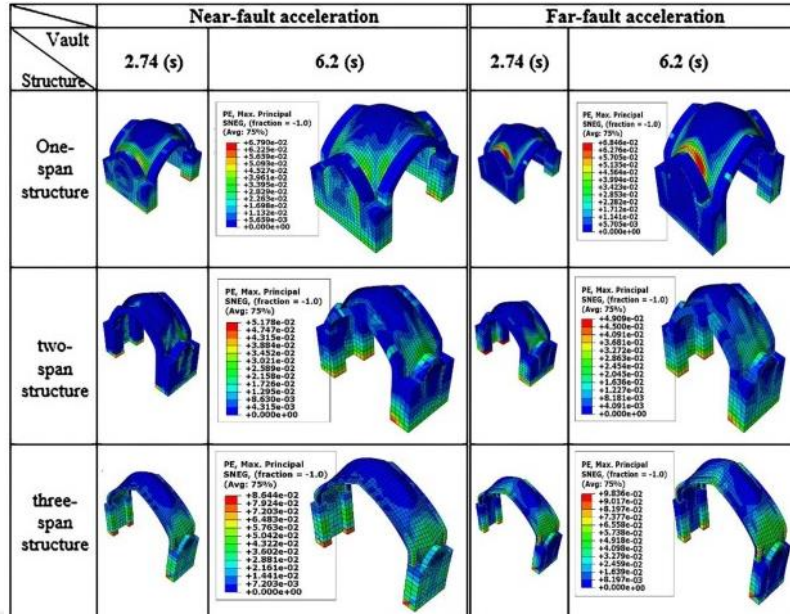
(Scozzese ve ark., 2023), aşınma doğrudan ölçülemediği ve tespit edilmesi çok zor olduğundan köprüler için tehlikelidir. Bu çalışmada Abaqus programında 3 boyutlu modelleme yapılarak kinematik parametreler ve modal parametreler (doğal frekans ve mod şekilleri) dahil olmak üzere farklı tepki parametrelerinin artan şiddete ki aşınma durumları altında nasıl geliştiğini görmek için analizler yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları

aşınmaya en duyarlı parametrelerin ve risk analizi için sınır değerlerin belirlenmesinin sağlamaktadır (Şekil 2.9).



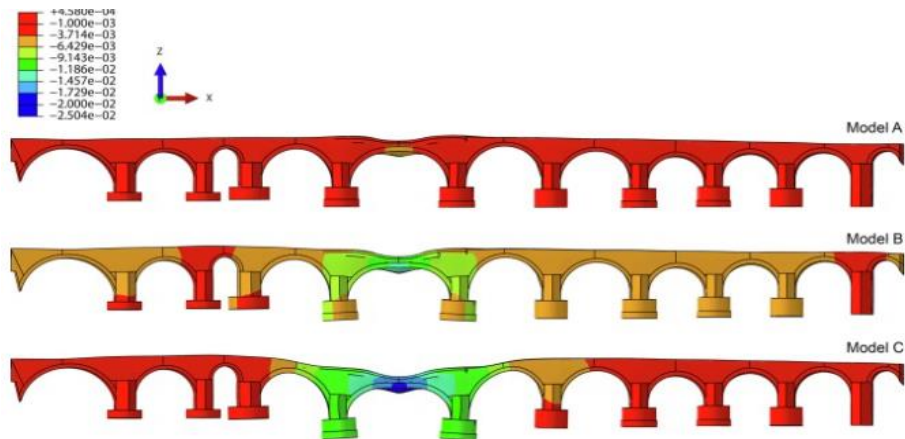
Şekil 2.9. Analiz edilen her iki senaryo için (soldaki yerel aşınma ve sağdaki genel aşınma) artan yoğunluktaki aşınma seviyelerinin enine mod şekli üzerindeki etkisi

(Panahi ve ark., 2023), çalışmada üç farklı geometri ve özelliğe sahip tarihi yığma duvar yapıları Abaqus programında modellenmiştir. Hasar plastisite davranışına sahip bu üç yapının doğrusal olmayan dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Bu üç farklı yapı için yakın ve uzak fay depremleri dikkate alınarak depremin yatay ve düşey bileşeninin yığma kemerli yapılar üzerindeki sismik davranışı incelenmiştir. Sonuç olarak maksimum yer değiştirmeler kemer ve tonozlarda gözlemlenmiştir. Dikdörtgen planlı kemerin hasarı yayların çatıya bağlandığı kısımda meydana gelirken kare planlı da ise yayların ve tonozların çatıya bağlandığı kısımda meydana gelmiştir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Üç farklı yığma yapının deprem etkisi altındaki plastik deformasyonu

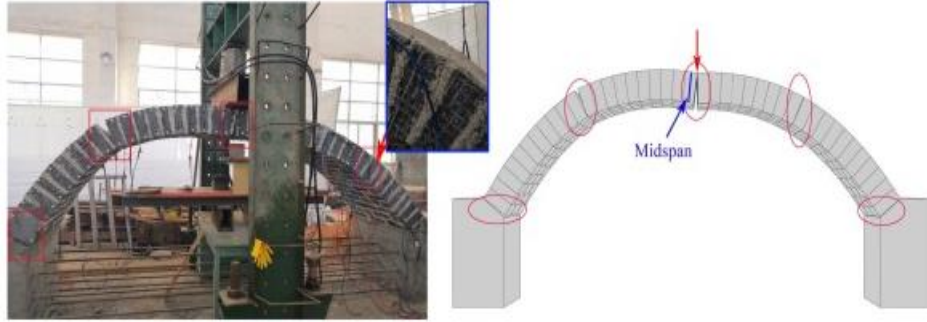
(Zani ve ark., 2020), çalışmada Azzone Visconti köprüsü referans alınarak köprünün dikey yöndeki statik yükler altındaki tepkisi deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Zemin-yapı etkileşiminin köprünün mekanik davranışına etkisini incelenmiştir. Bunun için üç farklı zemin-yapı etkileşimini içeren model oluşturulup Abaqus programı kullanılarak sayısal analizler yapılmıştır. Sonuç olarak zemin-yapı etkileşimi hesaba katıldığında yapıda meydana gelecek olan hasarın daha gerçekçi olarak belirlenebileceği öngörülmüştür (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Azzone Visconti köprüsünün deformasyon şekilleri

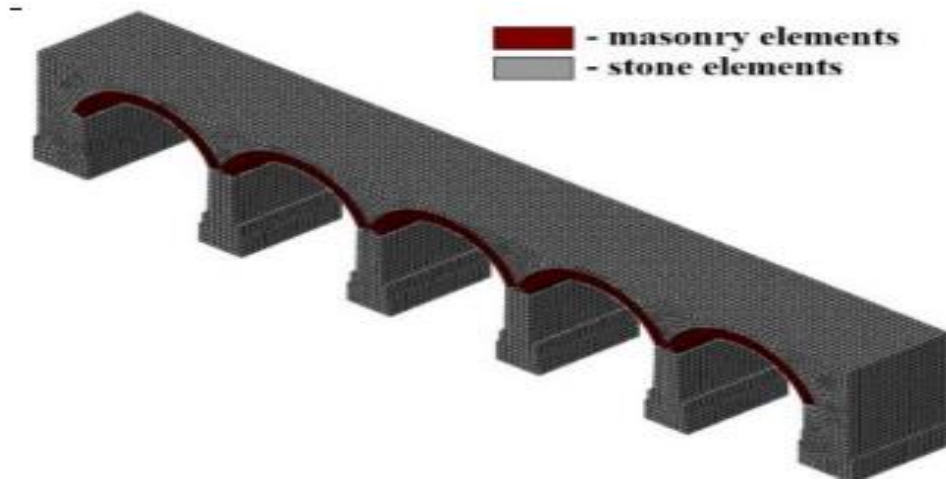
(Zhao ve ark., 2020), çalışmada Batı Hunan' daki Wugui yığma kemer köprüsü referans alınarak 1:4 ölçekli modeli oluşturulmuş ve hem deneysel hem de Abaqus programı kullanılarak sayısal analizi yapılmıştır. Bu analizde basınç, çekme ve kesme

hasar modları dikkate alınmış olup üç farklı harç kalınlığına sahip model kullanılarak yükleme testine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak harç derzlerinin çatlaması ve plastik olarak ayrılması ile duvar malzemesinin doğrusal olmayan mekanik davranışı hakkında bilgi edinilmektedir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Deneyel ve sayısal modelde meydana gelen arıza modları

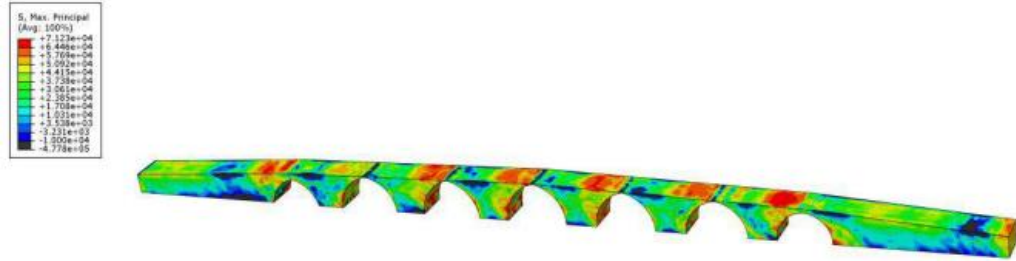
(Drygala ve ark., 2018), çalışmada 1863 yılında inşa edilen ve Güney Polonya'daki en eski köprülerden biri olan yığma köprü referans alınmıştır. Beş açıklıklı köprünün yaklaşık uzunluğu 11,4 m' dir. Bu yığma köprü Abaqus programında modellenmiş ve kemerli viyadüğün yığma elemanlarında sismik kaynaklı meydana gelen hasarlar araştırılmıştır. Çalışmada 5,3 büyüklüğündeki deprem verileri kullanılmıştır. Sonuç olarak sismik şokun taş kemer üzerindeki etkisi incelenmiş olup PGA'nın 0,65 g olduğu durumda köprünün yığma elemanlarında çatlama meydana geldiği gözlemlenmiştir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Köprünün sonlu eleman modeli

(Azar ve ark., 2024), çalışmada 7 açıklıklı Halilviran Köprüsü'nün dinamik özelliklerini araştırmak için Abaqus programında analizi yapılmıştır. Çalışmada iki yönlü

deprem kuvveti etki ettirilmiştir. Köprünün yığma birimlerin için beton hasar plastisitesi (CDP) malzeme modeli, dolgu su içinse Mohr-Coulomb (M-C) malzeme modeli kullanılmıştır. Sonuç olarak köprüde hasarın ilk olarak parapet duvarda ve kemerlerde meydana geldiği gözlemlenmiştir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. Köprüdeki maksimum basınç gerilmesi dağılımı

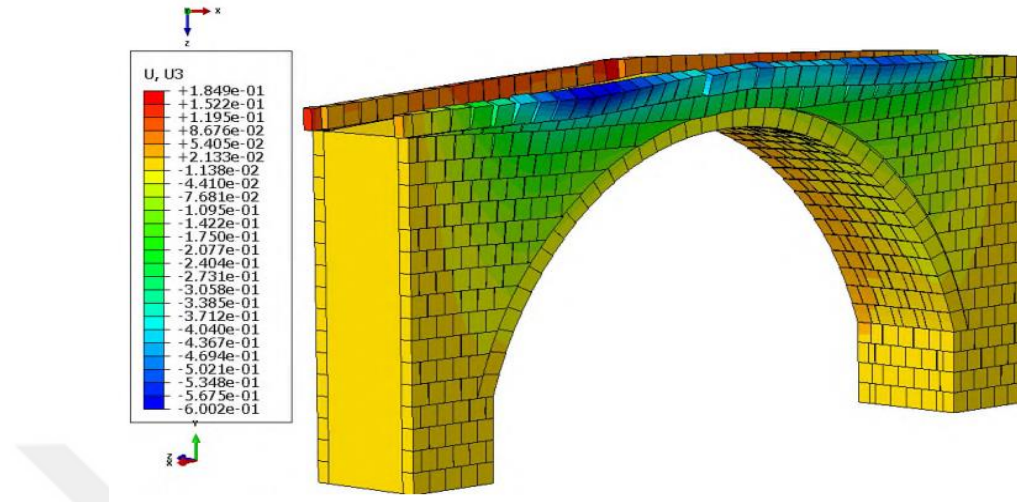
(Addessi ve ark., 2022), çalışmada toplam uzunluğu 196,79 m olan Ponte delle Torri yığma köprüsü referans alınarak dinamik yük etkisi altında oluşan hasar etkileri incelemek için Abaqus programında analiz edilmiştir. Farklı deprem kuvvetleri altında doğrusal olmayan dinamik analiz ile köprünün verdiği tepki, mod şekilleri, doğal frekanslar, yerdeğiştirme, ivme ve hasarlar incelenmiştir. Sonuç olarak analizin köprünün hasar dağılımı açısından önemli bilgi verdiğini ve özellikle kemerlerde büyük hasarlar meydana geldiği belirtilmiştir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Ponte delle Torri köprüsünün frekans ve periyotlara karşılık gelen mod şekilleri

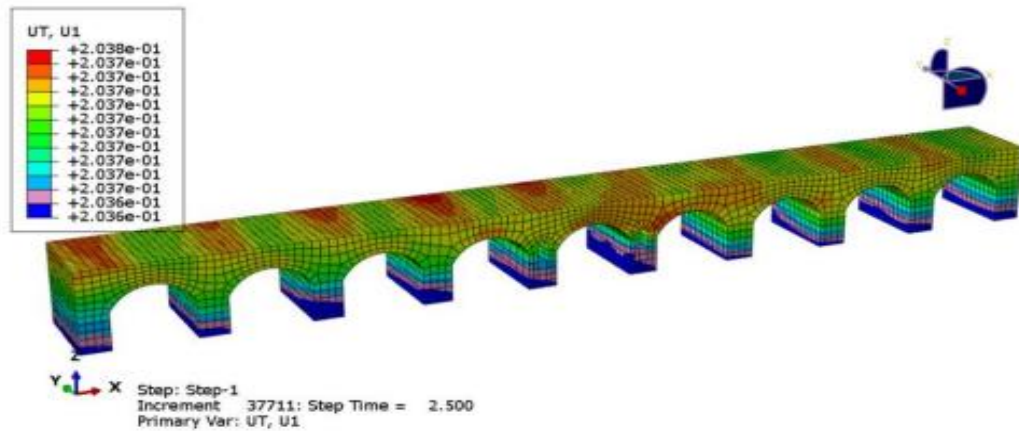
(Mahdikhani ve ark., 2016), çalışmada İtalya’ da bulunan tek açıklığa sahip 31,4 m uzunluğunda taş kemer köprü referans alınarak Abaqus programı üzerinde analiz yapılmış ve sismik davranışı incelenmiştir. Çalışmada İtalya 1976 Friuli deprem kaydı verileri kullanılmıştır. Taş köprünün FRP ile güçlendirilmesinden önce ve sonraki oluşan hasarlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak FRP ile güçlendirmede taşların yer

değiştirmelerinin azaldığı, deprem etkisine karşı kemerlerin direncinin önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.16).



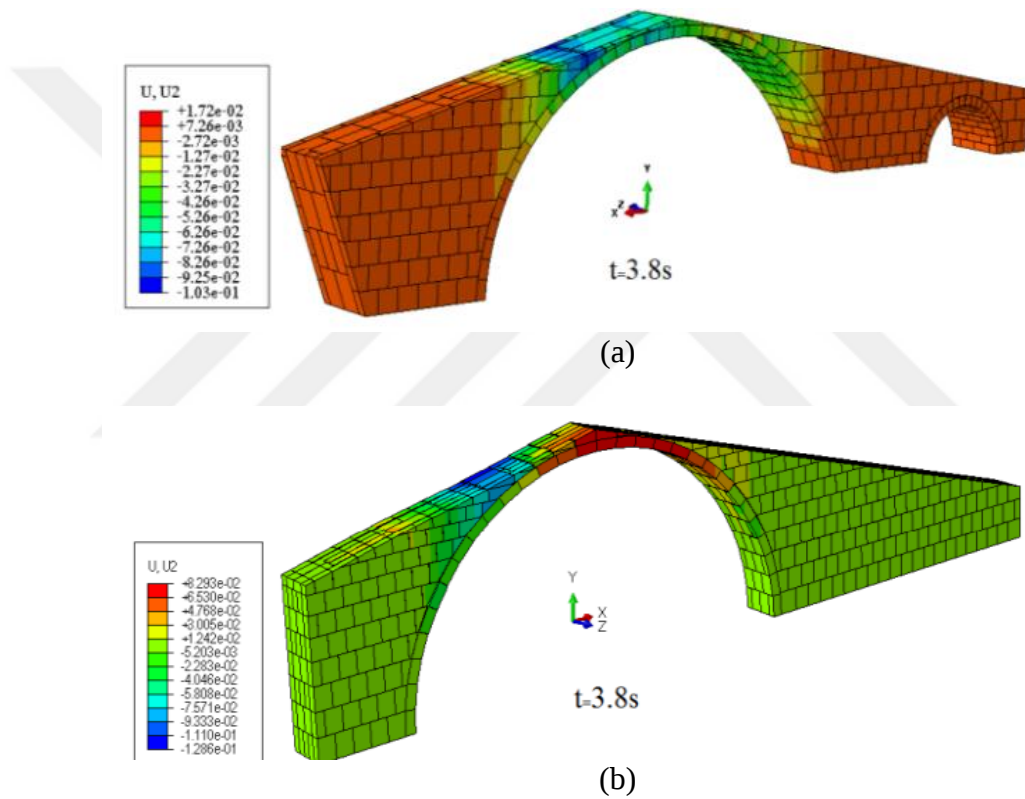
Şekil 2.16. Güçlendirilmemiş köprünün yer değiştirmesi

(MollaJafari ve ark., 2022), çalışmada Namroud Köprüsü referans alınarak hem köprünün zayıf bölgelerinin belirlenmesi hem de güçlendirme yapılarak davranışının incelenmesi için Abaqus programında deprem hareketlerine maruz bırakılarak analizi yapılmıştır. Yığma köprünün zayıf bölgeleri belirlenerek FRP ile güçlendirilmiştir. Sonuç olarak düşey yöndeki deprem hareketinin önemli bir etkisi olduğu, güçlendirmenin köprü tabliyesi için etkili olduğu ancak spandrel duvarlar için aynı etkiyi göstermediği, küçük açıklıklı köprüler için FRP ile güçlendirmenin istenilen performansı sağlamadığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.17).



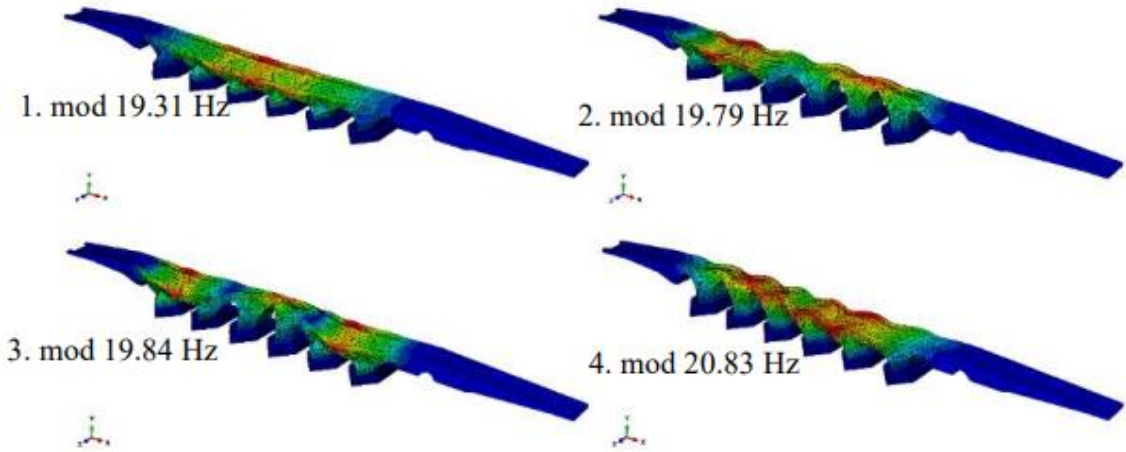
Şekil 2.17. Güçlendirilmemiş köprünün deprem etkisi altındaki maksimum yer değiştirmesi

(Naderi ve Zekavati, 2018), çalışmada 25,2 m ve 6 m uzunluğunda iki açıklığa sahip olan Osmanlı Köprüsü ile 52,4 m uzunluğunda Şenyuva Köprüsü referans alınmıştır. Bu iki taş köprünün sismik davranışı Abaqus programı kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmada 1992 Erzincan deprem kaydının doğu-batı ivme kaydı kullanılmıştır. Sonuç olarak Osmanlı köprüsünün 5,7 saniye sonra yan duvarlarında çatlaklar oluşmaya başlamıştır ve kemerlerde 1 cm'lik çatlaklar meydana gelmiştir. Şenyuva Köprüsünde ise sol yan duvar hasar görmüş ancak yıkılmamıştır ve kemerdeki maksimum çatlak 4,5 cm' dir. Bu sonuçlar doğrultusunda iki köprünün de güçlendirilmesi önerilmektedir (Şekil 2.18).



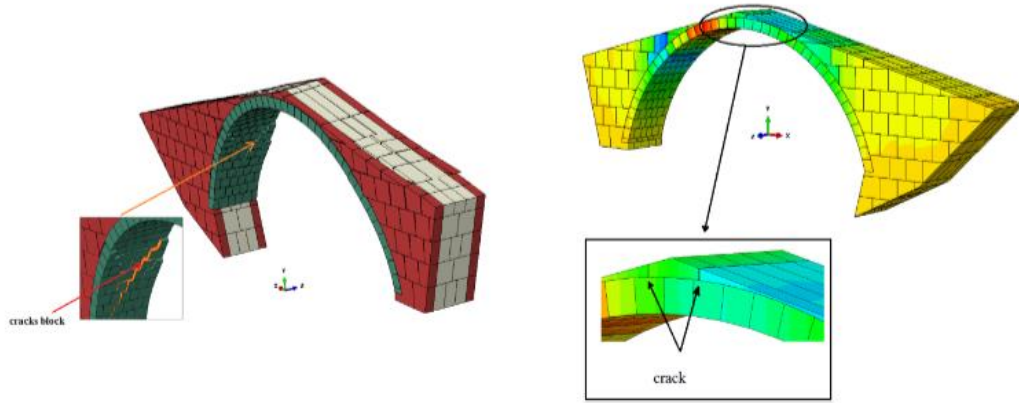
Şekil 2.18. (a) Osmanlı köprüsü hasar analizi, (b) Şenyuva köprüsü hasar analizi

(Nemutlu ve ark., 2023), çalışmada tarihi Karaz Köprüsü' nün deprem karşısındaki davranışı Abaqus programı kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmada Van, Elazığ, Bingöl, Gölçük ve Erzincan illerinin deprem kayıtları kullanılmıştır. Bu beş adet ivme kaydı ile yapılan doğrusal olmayan dinamik analizde köprülerin maksimum yer değiştirmeleri ve çatlak dağılımları incelenmiştir. Sonuç olarak oluşan en kritik çekme çatlakları hem topuk bölgesinde hem de kemerlerin orta kısımlarında meydana gelmiştir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Karaz köprüsünün titreşim modları ve frekans değerleri

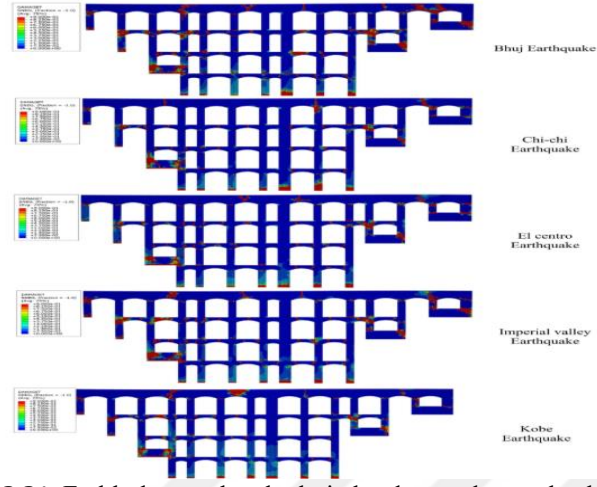
(Zekavati, 2024), çalışmada Mikron Köprüsü referans alınarak Abaqus programında analizi yapılmıştır. Mikron köprü tek açıklıklı olup uzunluğu 33,80 m' dir. Bu çalışmada deprem yükleri altında köprünün FRP ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş hali değerlendirilmiştir. 1992 Erzincan deprem kayıtları kullanılmıştır. Sonuç olarak güçlendirme sonucunda çatlaklar ve yer değiştirmelerde azalmalar gözlemlenmiştir (Şekil 2.20).



Şekil 2.20. Duvar ve kemerde oluşan çatlaklar

(Shimpi ve ark., 2021), çalışmada ortam titreşim testi (AVT) ve operasyonel modal analiz (OMA) prosedürleri ile referans alınan köprünün Abaqus programında analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada çeşitli deprem kayıtları kullanılmıştır. Ayrıca çok katlı galeri kemer köprüsünün kapasitesinin belirlenebilmesi için itme analizi yapılmıştır. Sonuç olarak ayaklar ve dayanakların birleşim yerleri hasar karşısında hassas

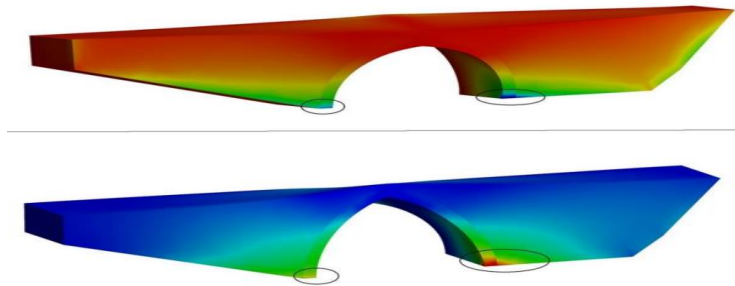
konumlarıdır ve çatlaklar bu noktadan kaynaklı olarak kemerlere doğru ilerlediği gözlemlenmiştir (Şekil 2.21).



Şekil 2.21. Farklı deprem hareketleri altında meydana gelen hasarlar

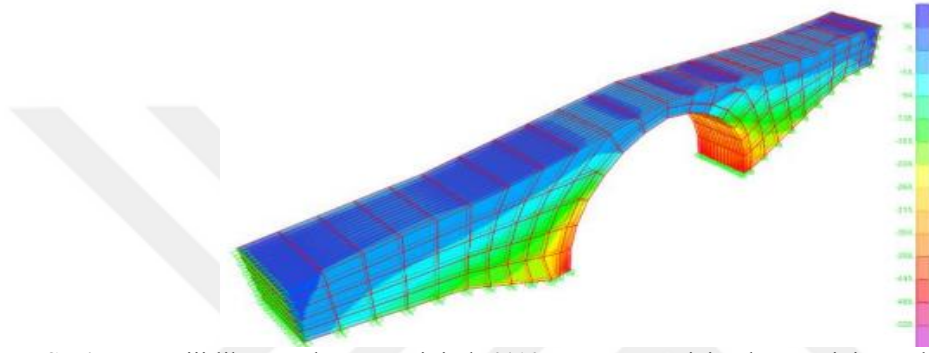
2.2. Tarihi Köprüler Üzerinde Yapılan Çalışmalar

(Özmen ve Sayın, 2020), çalışmada Kütahya’ da bulunan tek açıklıklı, 23 m uzunluğunda ve 5,5 m genişliğinde olan tarihi Debboy Köprüsü referans alınarak lineer dinamik analizleri gerçekleştirilmiş ve köprü’nün deprem etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. ANSYS sonlu eleman programı ile makro modelleme yöntemi kullanılarak kemerli köprü’nün sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. 2011 Simav ve 2022 Sultandağı ivme kayıtları kullanılmıştır. Sonuç olarak yer değiştirmeler, asal gerilmeler ve sismik davranış incelenmiştir. Simav depreminin sonuçlarına göre, basınç ve çekme gerilmeleri köprü’nün memba tarafındaki köprü ayağının zemin ile mesnetlendiği noktada maksimum değere ulaşmıştır. Sultandağı depreminin sonuçlarına göre ise basınç gerilmesi memba kısmındaki, çekme gerilmesi ise mansap kısmındaki köprü ayağının zemin ile mesnetlendiği bölgelerde maksimum değerine ulaşmıştır (Şekil 2.22).



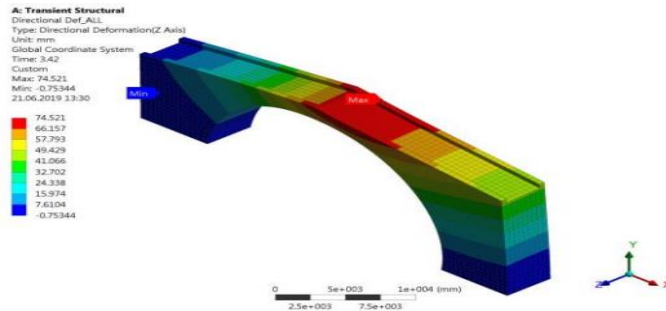
Şekil 2.22. Simav depreminden elde edilen maksimum ve minimum asal gerilme diyagramları

(Akın ve ark., 2022), çalışmada 44,80 m uzunluğunda ve 4,2 m genişliğinde tek açıklıklı Tağar köprüsü referans alınmıştır. Rayleigh sönümü, kütle orantılı sönüm ve rijitlik orantılı sönüm kullanılarak köprünün sismik tepkisi incelenmiştir. 1992 Tunceli depreminin ivme kayıtları kullanılarak Sap2000 sonlu programında dinamik analizler yapılmıştır. Sonuç olarak, farklı sönüm tipleri için köprünün sismik tepkisi incelenmiştir. Farklı tiplerdeki sönümlerden elde edilen gerilme değerlerinin birbirlerine yakın olmasıyla birlikte en büyük gerilme değerleri rijitlik orantılı sönüm kullanılarak yapılan analizden elde edilmiştir (Şekil 2.23).



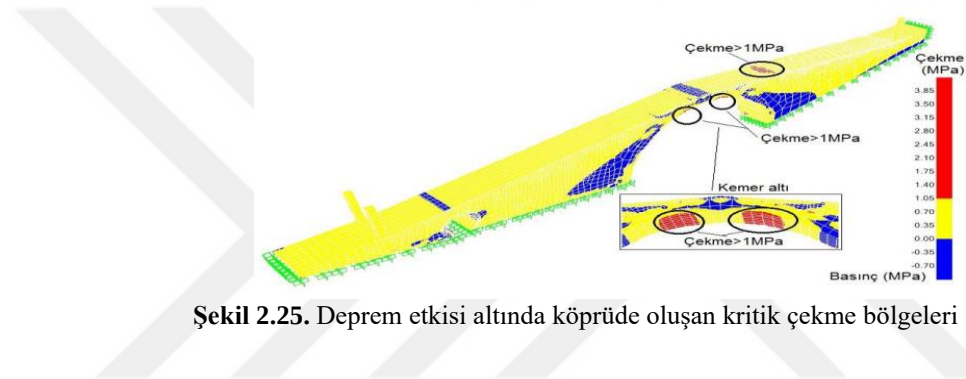
Şekil 2.23. Rijitlik orantılı sönüm tipinde %10 sönüm oranı için oluşan minimum basınç gerilmesi diyagramı

(Sözen ve Çavuş, 2020), çalışmada 37 m uzunluğunda ve 4,5 m genişliğinde olan tek açıklıklı tarihi Yılanlı (Leylekli) Köprü referans alınmıştır. ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak hem statik hem dinamik analiz yapılmıştır. Zaman tanım alanında yapılan dinamik analizde 1992 Erzincan depreminin ivme kayıtları kullanılmıştır. Sonuç olarak çalışma kapsamında yapılan statik analiz, modal analiz ve zaman tanım alanında analiz sonuçları incelendiğinde; en fazla yer değiştirmenin kemerin üst noktasında olduğu, deprem etkisi altında hasarın kemerin orta bölgesinde meydana gelebileceği ve köprü formunun değiştirilmesinin deprem performansı açısından olumlu olduğu belirtilmiştir (Şekil 2.24).



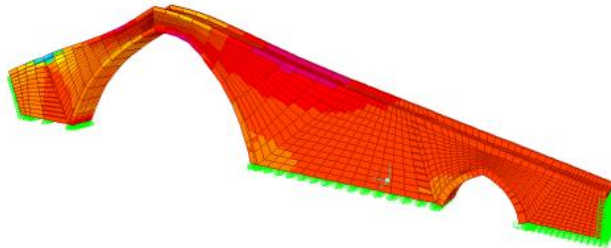
Şekil 2.24. Doğrusal olmayan asimetrik yapının non-lineer analiz sonucu oluşan yer değiştirme diyagramı

(Güllü, 2018), çalışmada 120 m uzunluğunda ve 7 m genişliğinde olan 2 açıklığa sahip Cendere Köprüsü referans alınmıştır. 1998 Adana-Ceyhan, 2003 Tunceli-Pülümür ve 2003 Bingöl depremlerinin ivme kayıtları kullanılmıştır. Sonuç olarak yığma kemer formulu köprünün zaman-tanım alanında lineer elastik analiz yöntemi kullanılarak deprem etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Deprem etkisi altında oluşan çekme gerilmeleri büyük kemerin üst yan kısımlarında meydana gelmiştir. Çekme gerilmeleri hasar açısından risk oluştururken basınç gerilmelerinin hasar açısından risk oluşturmadığı gözlemlenmiştir. Sütunlarda yer değiştirmeden dolayı hasar oluşma olasılığı kritik seviyede bulunmuştur. Doğal titreşim periyodu ile deprem spektrumu karşılaştırıldığında köprüde rezonansın meydana gelebileceği belirtilmiştir (Şekil 2.25).



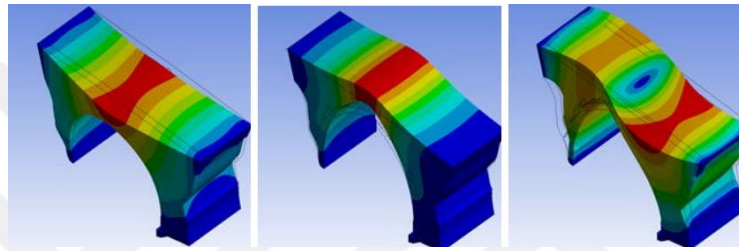
Şekil 2.25. Deprem etkisi altında köprüde oluşan kritik çekme bölgeleri

(Korkmaz ve ark., 2013), çalışmada iki kemere sahip Timisvat Köprüsü referans alınmıştır. Sap2000 sonlu eleman programı kullanılarak modelleme ve analiz gerçekleştirilmiştir. İçerisinde Kobe depreminin de bulunduğu on farklı depremin ivme kayıtları kullanılarak dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak kullanılan on adet deprem kaydı yer hızı, odak uzaklığı ve yer ivmesi bakımından karşılaştırıldığında en büyük depremin Kobe depremi olduğu gözlemlenmiştir. Y yönündeki yer değiştirmelerin x yönündekinden büyük olduğu ve x yönündeki gerilmelerin y yönündeki gerilmelerden büyük olduğu belirtilmiştir (Şekil 2.26).



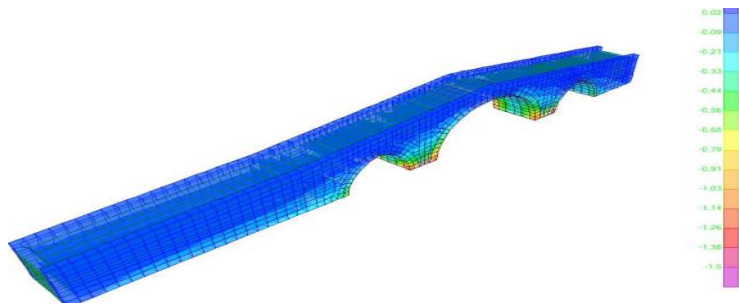
Şekil 2.26. Kobe depremi etkisi altında köprüde x yönünde oluşan gerilme diyagramı

(Alpaslan ve ark., 2017), çalışmada tek açıklığa olan 15,5 m uzunluğuna ve 4,75 m genişliğine sahip tarihi Sarp Dere Köprüsü referans alınmıştır. Köprünün modal parametreleri olan mod şekillerini, sönüm oranlarını ve modal frekanslarını bulmak için hem deneysel hem de sayısal analiz yapılmıştır. Deneysel analizde operasyonel modal analiz yöntemi kullanılmıştır. Teorik analizde ise ANSYS sonlu eleman programı kullanılmıştır. Sonrasında deneysel ve teorik olarak elde edilen modal parametreler karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak teorik analiz sonuçları ile deneysel analiz sonuçları arasında önemli farklar çıkmıştır. Teorik modelde sınır koşulları değiştirilerek iyileştirme yapıldığında köprünün gerçek davranışını daha iyi yansıttığı belirtilmiştir (Şekil 2.27).



Şekil 2.27. Köprünün teorik analiz sonucu elde edilen mod şekilleri

(Adsız ve ark., 2024), çalışmada üç açıklığa sahip 46 m uzunluğunda ve 3,67 m genişliğinde Uzunok Köprüsü referans alınmıştır. Köprü makro modelleme yöntemi kullanılarak Sap2000 sonlu elemanlar programında modellenmiştir. 11 farklı yapay deprem kaydı kullanılarak köprüde meydana gelen maksimum gerilme ve yer değiştirmeler elde edilerek köprünün deprem etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Sonuç olarak maksimum çekme ve basınç gerilmeleri köprünün yan duvarlarının zemin ile birleştiği bölgelerde, kayma gerilmelerinin ise büyük kemerin karın kısmında oluştuğu belirtilmiştir (Şekil 2.28).



Şekil 2.28. Köprüde meydana gelen maksimum basınç gerilmesi

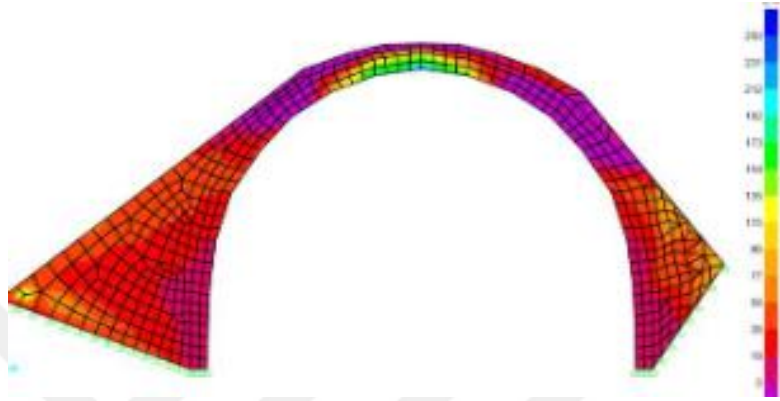
(Sever, 2023), çalışmada üç açıklığa sahip yığma bir köprü Sap2000 sonlu elemanlar programı kullanılarak modellenmiştir. Köprüyü FRP ile güçlendirmenin sismik davranış üzerindeki etkisi araştırılmak için güçlendirme yapılmış ve yapılmamış iki modelde modal analiz ve üç farklı deprem kaydı kullanılarak zaman-tanım alanında analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak modal analiz sonucunda güçlendirme ile periyot değerinde önemli bir azalma olduğu, zaman-tanım alanında analiz sonucunda ise güçlendirme ile yer değiştirmelerde, asal gerilme ve kayma gerilmelerinde azalma olduğu belirtilmiştir (Şekil 2.29).



Şekil 2.29. Modal analiz sonucunda periyot değerlerinde meydana gelen azalmalar

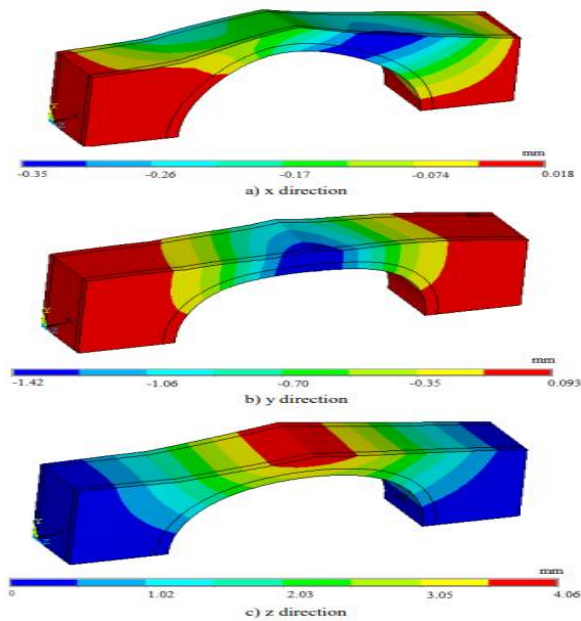
(Evcı ve ark., 2024), çalışmada tek açıklıklı Yeşiltepe Köprüsü referans alınmıştır. Sap2000 sonlu eleman programı kullanılarak hem modal analiz hem de zaman-tanım alanında analiz yapılmıştır. Kahramanmaraş' ta 2023 yılında meydana gelen Pazarcık ve Elbistan depremlerinin ivme kayıtları kullanılmıştır. Sonuç olarak en büyük yer değiştirme köprüünün üst kısmında meydana gelmiştir. Elbistan depreminde, Pazarcık

depremine oranla daha fazla taban kesme kuvveti oluşmuştur. Her iki deprem kaydı içinde basınç gerilmeleri taşın basınç dayanımının altında kalmıştır ancak çekme gerilmeleri taşın çekme gerilmesi değerini aşmıştır. Olası bir depremde köprüde çekme gerilmelerinin yoğun olarak bulunduğu bölgelerde hasar meydana gelebileceği belirtilmiştir (Şekil 2.30).



Şekil 2.30. Pazarcık depreminin çekme gerilmesi diyagramı

(Özmen ve Sayın, 2018), çalışmada tek açıklıklı 19,38 m uzunluğunda ve 3,7 m genişliğinde Dutpınar Köprüsü referans alınmıştır. 2003 Bingöl depreminin ivme kayıtları kullanılarak ANSYS sonlu eleman programı ile köprünün dinamik davranışı incelenmiştir. Sonuç olarak maksimum yer değiştirmenin köprünün tempan duvarlarından ve kemerin ortasında meydana geldiği, maksimum gerilmelerin ise tempan duvarın üst kısmında meydana geldiği belirtilmiştir (Şekil 2.31).

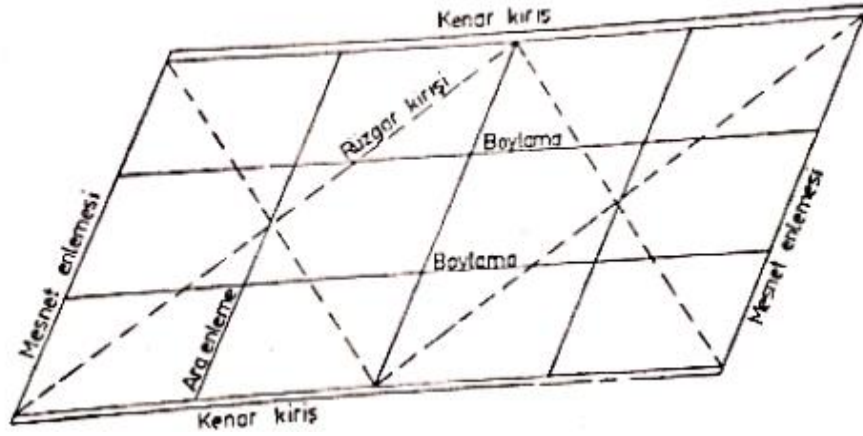


Şekil 2.31. Köprüde meydana gelen yer değiştirmeler

3. KÖPRÜLERLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER

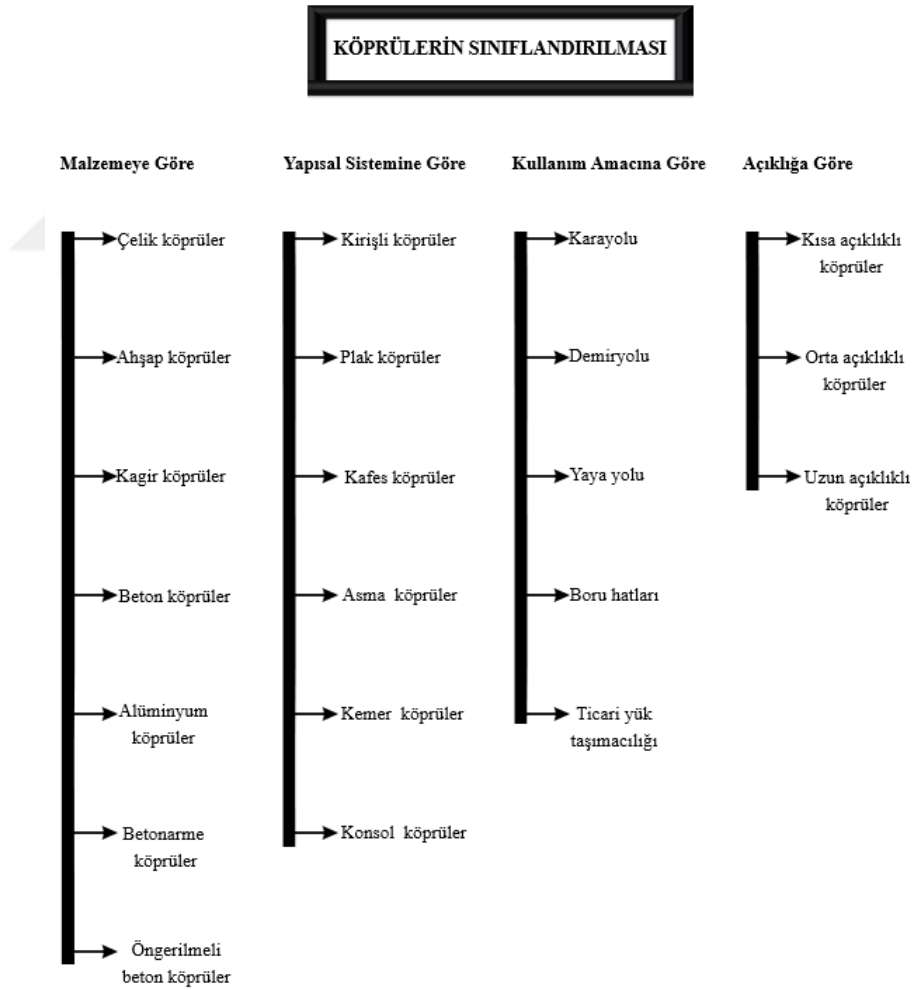
3.1. Köprülerin Kısımları

- **Döşeme plağı:** Örtü görevini yaparak ve rulman (tekerleğin dönmesinin sağlayan bileşen) yüzeylerini ve taşıt yüklerini taşımaktadır. Sabit ve hareketli olan yükleri boylamlara, enlemlere ve ana kirişlere iletirler.
- **Enlemler:** Enlemler hem rijit hem de sayı ve ağırlıkları fazla olmaması gerekmektedir. Dolu gövdeli ya da kafes kiriş şeklinde yapılabilmektedirler. Bir köprüde 2 tanesi mesnette 1 tanesi de orta kısımda olmak üzere en az 3 veya 5 enleme olmalıdır. Normal aralıkları 6-10 m dir.
- **Boylamalar:** Genellikle çelik köprülerde kullanılmaktadırlar.
- **Ana kirişler:** Döşemede sabit yükler, hareketli yükler öncelikle ana kirişlere oradan da mesnetlere iletilirler.
- **Rüzgar kirişleri (Kontrvantman):** Rüzgara karşı döşemenin stabilitesini (dayanıklılık) sağlamak amacıyla kenar kirişler arasında yatay çapraz bir şekilde konumlandırılmaktadırlar. Daha çok çelik köprülerde konumlandırılır.
- **Üstyapı (Süperstrüktür):** Köprünün taşıma gücüne etki etmeyen sadece fonksiyonunu sağlayan kısımlarıdır. Üstyapı şu elemanlardan meydana gelmektedir: Şose, tretuvarlar, kornişler, dilatasyon derzleri, aydınlatma direkleri, garguylar vb.
- **Mesnetler:** Yükleri kirişlerden alıp temel aracılığıyla zemine aktarılmasını sağlarlar. Kenar ve orta ayaklar ile mesnet aletleridir. Kenar ve orta ayaklar zemin ve tabliyenin karakterine bağlıdır. Isı değişimi, rötre, sünme, hareketli yüklerin etkisi, fren kuvvetleri gibi sebeplerle tabliye, kenar ve orta ayaklara nispetle hareket etmesi gerekmektedir. Mesnet aletleri bu hareketlere imkan verir. Bu aletler sabit ve hareketli olup başlıca çeşitleri şunlardır: Kauçuk, pandül, rulolu, rotüllü, balansye vb.' dir. Şekil 3.1' de köprü kısımları gösterilmektedir (Celasun, 1974).



Şekil 3.1. Köprülerin kısımları (Celasun, 1974)

Şekil 3.2’ de köprülerin malzemesine, yapısal sistemine, kullanım amacına ve açıklığına göre sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 3.2. Köprülerin sınıflandırılması

3.2. Malzemesine Göre Köprüler

- **Ahşap köprüler:** Köprü geçişini sağlayan kısımları ahşap olarak inşa edilen köprülerdir. Uzun süre dayanıklı olmadıklarından daha çok geçici yerlerde kullanılırlar.
- **Kagir köprüler:** Basınç dayanımı iyidir fakat çekme dayanımı azdır. Bundan dolayı kemer şeklinde inşa edilirler.
- **Beton köprüler:** Basınç mukavemeti iyi fakat çekme mukavemeti düşüktür. Bu sebeple kemer şeklinde inşa edilirler. Beton kemer köprülerde kullanılan modern metotlarla çok büyük açıklıklar geçilebilmiştir.
- **Betonarme köprüler:** Betonarmenin hem çekmeye hem de basınca çalışıyor olması ve moment karşılayabilmesi bu köprüleri sadece basınca çalışan kemerler şeklinde inşa etme zorunluluğundan kurtarmıştır ve kiriş, çerçeve gibi her türlü yapı şeklinde inşası sağlanmıştır. Buna rağmen kalıp masraf ve güçlüklerini azaltmak için düz ve basit şekilleri tercih etmek gerekmektedir. Mümkün olduğu takdirde prefabrike kirişlerin kullanışı maliyeti düşürür ve hız sağlar.
- **Öngerilmeli beton köprüler:** Öngerilme sayesinde iskele ve kalıbın kaldırılmasını sağlayan, betonu daha ekonomik şekilde kullanarak montaj ve prefabrikasyon imkanını arttırarak derin vadi, akarsu, iskan sahaları üzerindeki inşaatlarda kullanılan köprü türüdür.
- **Çelik köprüler:** Yüksek dayanımı, ağırlığının az olması, bulon, kaynak ve perçin gibi yüksek dayanımlı birleşim araçları kullanılarak, küçük boyutlu profil elemanlarından daha büyük yapı kısımlarının kolaylıkla oluşumu, atölye çalışmalarına, prefabrikasyon ve kolay montaja imkan vermesi sebebi ile modern köprü inşaatlarında büyük açıklıkların geçilmesinde sıkça kullanılmaktadır. Fakat çelik köprüler, korozyona maruz kalmalarından dolayı sürekli bakım gerekmektedir.
- **Alüminyum köprüler:** Ağırlığının az olmasının önemli bir etken olduğu yerlerde alüminyum alaşımından köprüler yapılmaktadır (Celasun, 1974).

3.3. Yapısal Sistemine Göre Köprüler

- **Kirişli köprüler:** Bu tip köprüler en çok karşılaşılan, en az maliyetli ve en basit türde, kuleler tarafından desteklenen köprülerdir. Bu köprüler kemerli köprülerle karşılaştırıldığında nispeten daha çok iç kuvvetler oluşturmaktadır. Kiriş kendi ağırlığına ve dışarıdan gelen yüklere karşı direnç göstermektedir. Bu köprüler pozitif eğilme momentine maruz kaldıklarında kirişin alt bölgesinde çekme gerilmesi ve üst bölgesinde ise basınç gerilmesi oluşur. Dolayısıyla bu tür köprüleri inşa edebilmek için hem basınç hem de çekme kuvvetlerine çalışan malzemeler tercih edilmektedir. Günümüzde kirişli köprüler betonarme, çelik ya da öngerilme beton kullanılarak inşa edilmektedirler. Bu köprüler genel olarak karayolu ile demiryolu taşımacılığında kullanılmaktadırlar (Ghafoori, 2022).
- **Plak köprüler:** Serbest uçlarından elastomer mesnetlere oturan ve sürekli olmayan (moment aktarmayan) beton plak döşemeyle yapılan köprü türüdür (Atabey, 2020).
- **Kafes köprüler:** Taşıyıcı sistemi kafes yapılarından meydana gelen köprülerdir. Bu tür köprüler modern köprülerin içerisinde eski köprü türlerinden birisidir. Hesaplama işlemlerini kolaylaştırmak amacıyla kafesler çoğunlukla bitişik kafes elemanları arasında sabitlenmiş bağlantı olarak kabul edilir. Bundan dolayı kafes kiriş elemanlarından olan diyagonaller, düşeyler, kirişler ve dikmeler sadece basınç ya da çekme gerilmesine uğrarlar, dinamik yükler altında bazen her iki kuvvette aynı anda oluşabilir (Ghafoori, 2022).
- **Asma köprüler:** Asma köprüler geniş açıklıkların aşılmasını sağlayabilmektedirler. Asma köprüler kablolarla tutulmaktadır (Atabey, 2020).
- **Kemer köprüler:** Bu köprüler düşey yükleri desteklemek amacı ile yarım daire şeklinde inşa edilmektedir. Bu köprülerin yapısal elemanları genel olarak basınç kuvveti altında çalışırlar. Kemerin yarıçapı dolayısıyla yükler her iki tarafa eşit olarak dağıtılmaktadır. Kemerin, gerçek hizmet

koşullarında aksenal kuvveti, eğilme momentini ve kesme kuvvetini taşıması gerekmektedir (Ghafoori, 2022).

- **Konsol köprüler:** Bu köprüler konsollar kullanarak inşa edilirler. Yatay girişlerden oluşan ve sadece bir uçtan desteklenen köprülerdir. Konsol köprülerinin birçoğunda köprülerin geçtiği engelleri merkezinde birleştirmek amacıyla destek ayaklarının karşıt taraflarından uzanan bir çift sürekli açıklık kullanır (Atabey, 2020)

3.4. Açıklığa Göre Köprüler

- **Kısa açıklıklı köprüler:** Açıklığı 15 m' ye kadar olan köprülerdir.
- **Orta açıklıklı köprüler:** Açıklığı 15 m ile 50 m arasında olan köprülerdir
- **Uzun açıklıklı köprüler:** Açıklığı 50 m ile 150 m arasında olan köprülerdir.

3.5. Dünyadaki Önemli Köprüler

Yavuz Sultan Selim Köprüsü (Üçüncü Boğaz Köprüsü) İstanbul Boğazı'nın Karadeniz'e bakan kuzey yönünde inşa edilmiştir (Şekil 3.3). 59 m genişliğinde olup dünyanın en geniş, 322 m kule yüksekliği ile de eğik askılı köprü sınıfı arasından dünyanın en yüksek ve tüm köprü sınıflarında da ikinci en yüksek kulesine sahip olan asma köprüdür. 1408 m ana açıklığı ile üzerinde raylı sistem bulunan en uzun köprüdür.



Şekil 3.3. Yavuz Sultan Selim Köprüsü, Türkiye

Tarn nehrinin bulunduğu vadiden geçen ve Millau ve Güney Fransa'yı birbirine bağlayan Millau Viyadüğü kablo destekli asma köprüdür (Şekil 3.4). Dünyada üzerinden

taşıt geçen en büyük köprüdür. 343 m yüksekliği ile dünyanın en yüksek köprülerinden birisidir. Eyfel Kulesinden biraz yüksek, Empire State Bina'sından 37 m daha kısa bir köprüdür.



Şekil 3.4. Millau Viyadüğü, Fransa

Sidney Liman Köprüsü sudan yüksekliği 134 m olan dünyanın en büyük çelik kemerli köprülerinden biridir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Sydney Harbour Köprüsü, Avustralya

Brooklyn ve Manhattan'ı birbirine bağlayan Brooklyn Köprüsü açıklığı 486,3 m olan dünyanın ilk çelik asma köprüsüdür (Şekil 3.6). Gotik tarzda yapılmış olan bu köprü 19. yüzyılın mühendisliğinin en tepe noktası ve dünyanın sekizinci harikası olarak kabul görmüştür.



Şekil 3.6. Brooklyn Köprüsü, New York

Dünyanın ilk ve tek eğimli köprüsü olan Gateshead Milenyum Köprüsü 126 m uzunluğuna sahiptir ve ‘‘göz kırpan köprü’’ olarak da adlandırılmaktadır (Şekil 3.7). Sadece yayalar ve bisikletliler tarafından kullanılan bu köprü açılıp kapanma özelliğine sahiptir. 2005 yılında Olağanüstü Yapı Ödülü’nün sahibi olmuştur.



Şekil 3.7. Gateshead Milenyum Köprüsü, İngiltere

Pekin-Şangay yüksek hızlı demiryolunun bir parçası olan Danyang-Kunshan Köprüsü 164,8 km uzunlu ile dünyanın en uzun köprüsüdür (Şekil 3.8).



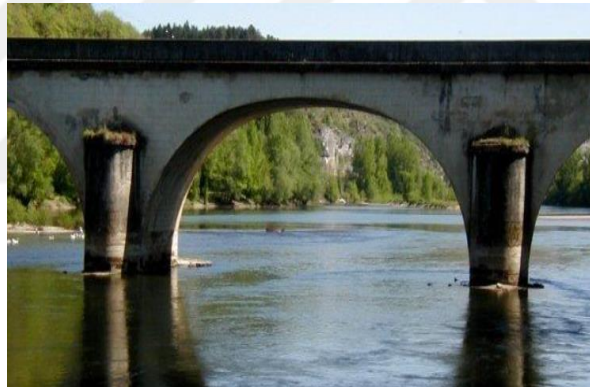
Şekil 3.8. Danyang-Kunshan Köprüsü, Çin

40,86 m sivri kemeri ile dünyanın en uzun taş kemer köprüsü olan Malabadi Köprüsü Diyarbakır il sınırları içerisinde bulunmaktadır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Malabadi Köprüsü, Türkiye

7 açıklıktan oluşan dünyanın ilk donatısız beton köprüsü olan Souillac Köprüsü Dordogne Nehri üzerinde kurulmuştur (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Souillac Köprüsü, Fransa

3.6. Köprü Tipinin Seçimi

Köprü tipinin seçiminde rol oynayan faktörler şunlardır:

- **Arazinin geometrik konumu:** Köprü tipinin seçimi karayolunun yatay ve düşey konumuyla beraber platformun altındaki ve üstündeki açıklığa bağlıdır. Ayrıca su üzerinde uzun açıklıklı ve yüksek özel köprü inşası gerekebilir. Bu durumda sahanın geometrisi, köprünün yapım sürecinde trafiğin nasıl yönlendirileceğini belirleyecektir.
- **Arazinin altyapı durumu:** Köprü ayağı temelini türünü sahanın zemin durumu belirler. Eğer zeminde oturma problemi varsa bu durum göz önüne alınarak köprü tipi seçimi yapılmalıdır. Sahadaki sismik hareketlerin

araştırılması gerekmektedir. Altyapı özelliklerinin belirlenmesinde sismik aktivite rol oynar.

- **Fonksiyonel gereksinimler:** Köprü mevcutta ve gelecekte trafik hacmini taşıyabilmelidir. Şerit sayısı belirlenirken bisiklet şeritleri, kaldırımlar varsa drenaj yapıları ve refüjün dikkate alınması gerekmektedir.
- **Estetik:** Yapı tasarım aşamasındayken tercih edilecek olan köprü tipinin estetik görünmesine de dikkat edilmelidir.
- **Ekonomi ve bakım:** Genellikle derzi az olan, minimum sayıda açıklıklı ve kiriş aralığı fazla olan köprüler ekonomik köprülerdir. Çelik yapılar betonarme yapılara göre daha çok bakım gerektirmektedir.
- **Yapım kısıtları:** Köprülerin inşa süresi önemlidir ve köprü tiplerine göre bu süreler değişmektedir. Öngerilmeli elemanlar kullanılarak inşa süresi azaltılabilmektedir. Fakat büyük boyutlu elemanların taşınması zor olduğundan dolayı kullanılan malzemeler ve iş gücü köprü seçimini etkilemektedir. (Rahmani, 2020).

3.7. Köprülerin Kullanışlık Şartları

Herhangi bir köprü projesinde sağlamak gereken başlıca kullanışlık şartları şunlardır:

- Beton ve donatıdaki gerilmeler kabul edilebilir sınırlar içinde bulunmalıdır.
- Ölü ve hareketli yüklerden dolayı oluşan sehim miktarı fazla olmamalıdır.
- İnşa edilecek köprü dinamik bakımdan sağlam olmalıdır.
- Kullanılan yapı malzemeleri uygun şekilde korunmalıdır (Celasun, 1974).

3.8. Köprü Yapım Metotları

- **İtme-Sürme köprü metodu:** Öngerilmeli beton kiriş köprüler inşa etmek için bu metod kullanılmaktadır. Bu yöntem kullanılarak 40 ila 60 m uzunluğundaki açıklıklar geçilerek sürekli tabliyeli köprüler inşa edilmektedir. Ayrıca geçici ayaklar kullanılarak daha büyük açıklıklar geçilebilmektedir. Köprü ayaklarının inşası tamamlanınca kenar ayaklardan birinin ya da ikisinin arkasında döküm sahası kurulmaktadır. Tek bir kalıp ile parçalar halinde dayanaklar üzerine kurulmuş inşaat

sahasında tabliye birbiri ardınca dökülmektedir. Her segment kendinden bir önceki segmente öngerilme kablolarıyla bağlıdır. Beton prizini tamamladıktan sonra kabloları öngerilme işlemi uygulanmaktadır. Köprü ayaklarında ve geçici ayaklarda sürme sırasında oluşacak sürtünme kuvvetlerini azaltmak amacı ile kayıcı mesnetler kullanılır. Döküm sahasındaki segment, geçici ve köprü ayakları üzerine yerleştirilen kayıcı mesnetlerin üzerinden, köprü eksenine boyunca segment uzunluğu kadar itilir. Ardından gelen segment için tekrardan aynı işlemler yapılır ve halihazırda itilmiş segmentlerle bağlantılı olan tamamlanmış segment, döküm sahası bir sonraki segmentin dökülmesi için serbest kalana kadar ayaklar üzerinde itilir. İnşaat döngüsü, tüm segmentler döküldüğünde ve ilk segment karşı kenar ayak üzerine yerleştirilen kayıcı mesnete ulaştığında sona ermektedir. İtme işlemi boyunca, köprünün ilk segmenti bir sonraki ayağa ulaşana kadar bir konsol oluşur. Bu durum ilk segmentlerde, diğer segmentlere göre negatif eğilme momentlerinin çok yüksek değerlere ulaşmasına sebep olur. Negatif eğilme momentindeki yüksek değerden dolayı oluşacak çekme gerilmelerini sınırlamak için ilk segmentin önüne betonarme tabliyeden daha hafif “gaga” adı verilen ve tabliyeye rijit olarak bağlanan çelik yapı elemanı kullanılmaktadır. Çelik kılavuz olan gaga, konsol segment uzunluğunu ve dolayısıyla itme işlemiyle bir sonraki ayağa ulaşacak olan kısmın ağırlığının azaltılmasında büyük rol oynamaktadır (Yalın, 2019). Şekil 3.11’de dünyada itme-sürme yöntemiyle yapılan viyadüklere örnekler verilmiştir.



Şekil 3.11. Dünyada itme-sürme yöntemiyle yapılan viyadüklere örnekler

- **Dengeli Konsol köprü metodu:** Bu yöntem enkesit yüksekliği sabit ya da değişken olan her türlü üstyapı için kullanılabilir. Ancak gerek yapım sırasında gerekse de yapım sonrasında statik zorlanmalara karşı en uygun form olarak değişken yükseklikli enkesit uygulaması tercih edilir. Bu yöntem ile inşa edilen köprülerde genellikle kutu kesitli üstyapı formu kullanılır. Köprü genişliğine bağlı olarak tek veya çok gözlü kutu kesit kombinezonları yapılabilir. Köprü üstyapısı orta ayaklar ile monolitik olarak birleşebildiği gibi orta ayak başlığına yerleştirilen mesnetler vasıtasıyla da üst yapı çözümleri gerçekleştirilebilir. Ayrıca aynı anda birçok ayakta üretim yapılabilmesi sayesinde hızlı bir iş programı hazırlanabilmekte ve segment boyunca aynı hareketli kalıp defalarca kullanılabilir. Açıklık ortaları sürekli olarak geçilebildiği gibi çeşitli çalışma prensiplerine göre hazırlanmış mafsallı sistemleri de kullanılabilir. Bir köprünün maliyeti; temeller, orta ayaklar ve kenar ayakların oluşturduğu altyapı ile köprü üstyapısının toplamından oluşur. Seçilen her bir üstyapı tipi için köprü açıklığı büyüdükçe, üstyapı maliyeti artmaktadır. Köprünün toplam boyu sabit olduğundan açıklıkların büyütülmesi, toplam açıklık sayısını dolayısıyla da orta ayak sayısını azaltmaktadır. Köprü açıklığının artması ile köprü ayaklarına üst yapıdan gelen yükler de artmaktadır. Dolayısıyla her bir orta ayağın maliyeti, küçük açıklıklı duruma ait orta ayaklarının maliyetinden büyük olmaktadır. Ancak yapılan çalışmalar ve deneyim göstermiştir ki beher maliyet arttığı halde, ayak sayısındaki azalış nedeniyle, toplam altyapı maliyeti önemli ölçüde azalmaktadır. Buna göre, eğer küçük açıklık yapmak için çok özel bir neden yoksa özellikle köprülerde, yapı malzemesinin en son olanaklarını kullanan büyük açıklıkların seçilmesi yoluna gidilmelidir. Buna karşın altyapı, özellikle temeller, tamamen zemin koşullarının etkisi altındadır. Özellikle taşıma gücü, deformasyon ve stabilite sorunları olan zeminlerde bir tek ayağı bile elimine etmek büyük tasarruflar sağlayabilmektedir (Çift, 2018). Şekil 3.12’de Türkiye’de dengeli konsol yöntemiyle inşa edilmiş viyadüklere örnekler verilmiştir.



Şekil 3.12. Türkiye'de dengeli konsol yöntemiyle inşa edilmiş viyadüklere örnekler

- **Ekstradoz köprü metodu:** Ekstra dozlu askılı (ECS) köprü, destek kabloları, bir kule ve bir kirişten oluşan nispeten yeni bir kompozit yapıdır. İlk olarak 1988'de Fransız mühendis Jacques Mathivat tarafından önerilen konsept, askı halatlarının kiriş için ön gerilim sağlaması ve aynı anda düşey yükü paylaşması gerçeğine dayanmaktadır. Kore , Hindistan, Macaristan, Slovenya, Amerika ve Tayland'da daha düşük kuleli estetik konfigürasyonların dikkate alınması ve maliyetin düşürülmesi nedeniyle giderek daha fazla ECS köprüsü inşa edilmiştir. ECS köprülerinin kulesi, normal askılı köprülere kıyasla nispeten alçaktır ve kirişin sertliği büyüktür. Sonuç olarak, ECS köprülerinin yapısal davranışı kısmen askılı ve kısmen de kirişli köprülere benzemektedir (Lou ve ark., 2022). ECS köprü, standart ardgermeli köprü tipleri ile gergin eğik askılı köprü tipleri arasında tanımlanan köprü türüdür. Dışarıdan kısa pilonlu (kule) ve eğik askılı bir köprü gibi görünürken, yapısal anlamda bakıldığında dıştan halatları olan ardgermeli köprü davranışı gösteren sistem sunmaktadır. Özellikle şehir içerisinde yapılan uygulamalarda, tabliye kiriş yüksekliğinin kısıtlanması gereken orta-uzun açıklıklar geçilmek istendiği

durumlarda tercih edilir. Tabliye genellikle ardgermeli betonarmeden oluşmaktadır. Şekil 3.13’de dünyada ekstradoz köprü metoduyla yapılan köprülere örnekler verilmiştir.



Şekil 3.13. Dünyada ekstradoz köprü metoduyla yapılan köprülere örnekler

- **Yerinde Dökme köprü metodu:** Yerinde dökme betonarme köprüler, karayolu, demiryolu veya yaya yolu taşımak üzere tasarlanmış ve kenarlarda kenar ayaklara, ortada ise orta ayaklara oturan sanat yapılarıdır. Kısa açıklıkların geçilmesinde, bu köprüler genellikle kirişli köprülerin yerine tercih edilmektedir. Basit köprü üst yapılarında döşeme plağı, yük taşıyan temel eleman olarak görev yapar. Yüksek dayanım ve açıklık kabiliyetinden dolayı noktasal yük dağılımı açısından daha uygundur. Yerinde dökme köprüler, betonarme ya da öngerilmeli beton yöntemleri kullanılarak inşa edilebilir. Bu köprülerin açıklık mesafesi, taşıyacağı yükün büyüklüğüne, yapım maliyetine, kullanılan malzemeye ve işçilik gibi özelliklere bağlıdır. Yerinde döküm beton plak döşemeler, mesnet elemanları ile birlikte yekpare olarak dökülürler. Betonarme köprü döşemeleri, geleneksel analiz yöntemleri ya da deneysel analiz sonuçlarından üretilmiş yöntemlerle tasarlanırlar. Yerinde dökme köprüler, estetik görünüm, etkili yük dağılımı, az bakım aralığı, esneklik ve burulmaya karşı yüksek rijitlik gibi birçok avantaj sunar.

Bununla birlikte, ağır sabit yükler, orta derinlikte malzeme kullanımındaki sınırlamalar, formların bakımında yaşanan zorluklar ve öngerilmeli köprülerin bazılarının onarılamaz olması gibi dezavantajları da mevcuttur. Bu köprüler genellikle 6 ila 30 m arasındaki mesafeler için uygundur. 10 m kadar olan açıklıklarda sabit derinlikli dolu gövdeli betonarme plak köprüler tercih edilirken, 8 m büyük açıklıklarda bu plakların kalınlığı genellikle 0,60 m olarak belirlenir. Sabit yüklerin azaltılması amacıyla plak köprüler tercih edilirler. 10 ila 20 m açıklığa sahip betonarme plaklar için 1,2 m kalınlık, 15 ila 30 m açıklıklarda ise öngerilmeli plaklar için 1,5 m kalınlık uygundur. Yerinde dökme kirişlerin kenarlarının kalınlığı, plak kalınlığının %60 ila %80'i arasında olmalıdır; bu durumda plak, yekpare bir levha gibi davranır. Ancak bu sınırın aşılması durumunda, hücresel döşeme gibi davranmaya başlar. Boşluklar, açıklığın tamamında ya da sadece açıklığın ortasında yapılabilir. Mesnetlere yakın kısımlarda, kesme kuvvetinin karşılanması amacıyla dolu gövde tercih edilir. Hücresel sistemlerde, burulmanın ihmal edilmesi, hareketli yüklerin, momentlerin ve gerilmelerin kopmasının bozulmasına yol açabilir (Rahmani, 2020). Şekil 3.14’de dünyada yerinde dökme köprü metoduyla inşa edilen köprülere örnekler verilmiştir.



Şekil 3.14. Dünyada yerinde dökme köprü metoduyla yapılan köprülere örnekler

- Eğik Askı köprü metodu:** Kablolu köprülerin ilk olarak taşıyıcı olan bir kirişin zincirler ya da eğik elemanlar yardımıyla destek noktalarına asılmasıyla oluşmuştur. Dere ve vadi geçişlerinde bu metod ile yapılan köprüler inşa görülmektedir. Modern anlamda kablolu köprüler ilk olarak 19.yüzyıl başlarında tasarlanmıştır. İsveç’ teki Strömsund Köprüsü ilk modern gergin eğik askılı köprüdür. Yüksek dayanımlı kabloların ve yapı elemanlarının imal edilebilmesi ile bu tür köprülerin yapımı gelişmiştir. Kablolu köprüler, büyük açıklıklardaki davranışlarına göre farklılık göstermektedirler. Kablolu köprüler 200 m ile 2000 m arasında değişen açıklıklar için uygulanmaktadır. Çin’ de bulunan Sutong Köprüsü günümüz de bulunan en büyük açıklıklı kablolu köprüdür. Ana köprü uzunluğu 2088 m, ana açıklığı da 1088 m’ dir. (Laçın, 2017). Şekil 3.15’de dünyada eğik askı köprü metoduyla inşa edilen köprülere örnekler verilmiştir.



Şekil 3.15. Dünyada eğik askı köprü metoduyla yapılan köprülere örnekler

3.9. Köprülerin Boyutlandırılmasında Kullanılan Yönetmelikler

Karayolu yapılarını boyutlandırmak için çeşitli yönetmelikler kullanılmaktadır. 1998 yılında yayınlanan EUROCODE-8 Design Provisions for Earthquake Resistance of Structure Part 2- Bridge ve Japan Road Association Specifications for Highway Bridges, 2001 yılında güncellenen CALTRANS Seismic Design Criteria 2001, 2002 yılında yayınlanan AASHTO Standart Specifications for Highway Bridges, 2007 yılında yürürlüğe giren AASHTO-LRFD en yaygın kullanılan yönetmeliklerdir. En son KGM

tarafından çıkarılan Yol Boyu Mühendislik Yapıları için Deprem Yönetmeliği ve DLH tarafından yayınlanan Kıyı ve Liman Yapıları, Demiryolları, Hava meydanları İnşaatları Deprem Teknik Yönetmeliği yukarıda yazılan yönetmeliklerin adeta bir çevirisi gibidir (Aktaş, 2010).

Köprülerin tasarımı konusunda Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından bazı teknik kılavuzlar ve yönetmelikler yayınlamıştır. Bu teknik kılavuzlar ve yönetmelikler aşağıda listelenmiştir (Bulut, 2020).

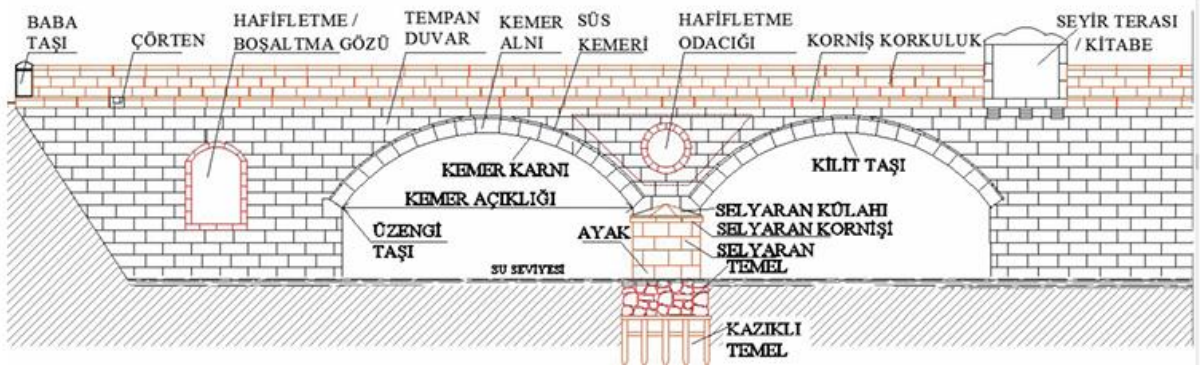
- Karayolları Teknik Şartnamesi, 2013
- Demiryolları, Limanlar ve Hava meydanları İnşaatları Deprem Teknik Yönetmeliği, 2007
- Türkiye Köprü Mühendisliğinde Tasarım ve Yapıma İlişkin Teknolojilerin Geliştirilmesi Teknik Kılavuzu, 2015
- Sanat Yapıları Tasarım Kriter Raporu
- Karayolu ve Demiryolu Köprü ve Viyadükleri Taslak Raporu, 2019

4. TARİHİ YIĞMA KÖPRÜLER

Romalılar zamanında çoğunlukla taşlar, harçlar ve pişmiş malzemeler köprülerin ve yolların yapımında kullanılan malzemelerdir. Bu dönemde köprü yapımı için kullanılan taş bloklar 7 ile 8 ton arası ağırlığa sahiptirler. Ancak kornişler, sütun aksları ve lentolar gibi daha büyük taş blokların kullanılması gerektiği durumlarda ocaklardan taş bloklar bütün halde çıkarılarak işlenmişlerdir. Selçuklu zamanında inşa edilen köprüler incelendiğinde kullanılan büyük taş blokların antik dönemde kullanılanlara göre daha da küçüldüğü, kritik noktalarda harca ilave olarak demirin kullanıldığı gözlemlenmiştir. Selçuklu döneminde sivri ve yuvarlak kemerler kullanılarak köprüler inşa edilmiştir. Ancak tempan duvar ile korkuluğu ayıran kornişler bu dönemde Osmanlı dönemine kıyasla belirgin değildir. Osmanlılar zamanına gelindiğinde basit strüktürlü demiryolu köprüleri ve ahşap köprüler inşa edilmeye başlanırken kagir köprülerde kemer kullanımı görülmeye başlanmıştır (Cevahir ve Bağbancı, 2019).

4.1. Tarihi Yığma Köprüleri Oluşturan Elemanlar

Yığma köprülerin taşıyıcı sistem elemanları şekil 4.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Yığma köprülerin taşıyıcı sistem elemanları

Baba Taşı: Köprülerin başlangıç kısımlarında bulunan düşey taşlardır.

Çörten: Yağmur ve kar sularının köprünün döşemesinde birikmesi sonucunda bu suların uzaklaştırılması için tempan duvardan dışarıya doğru uzanan oluklardır.

Hafifletme/Boşaltma Gözü: Suyun köprünün ayağında oluşturduğu yükü azaltıp, taşkın meydana gelmesi durumunda köprünün zarar görmesini önlemek amacıyla açılan boşluktur.

Tempan Duvar (Kılıf Duvarı): Köprünün dolgusunu koruyan taşıyıcı duvardır.

Kilit Taşı: Kemerin ortasında bulunarak dengeyi sağlayıp, basıncın iletilmesine yardımcı olan taşır.

Korniş: Köprünün tempan duvarı ile korkuluğunu birbirinde ayırarak yatay hat boyunca devam eden taşır.

Korkuluk: Tempan duvarın her iki tarafında bulunarak köprü geçişlerinin güvenli olmasını sağlayan yapıdır.

Kitabe: Köprü hakkında bilgileri içeren elemanlardır.

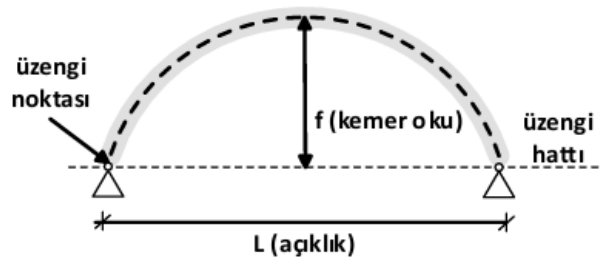
Üzengi Taşı: Köprünün ayağına oturan köprü yayının başladığı ilk taşır.

Selyaran (Dalga Kıran/Mahmuz): Köprünün memba tarafında yer alan ve gelen suyun basıncını kırarak köprü ayağına zarar vermesini engelleyip, suyu açıklığa ileten, farklı geometrilerle inşa edilebilen elemanlardır.

Temel: Yapı yükünün zemine aktarılmasını sağlayan elemandır. Yüzey sağlamlığına göre yüzeysel ve derin temeller kullanılarak köprüler inşa edilirler.

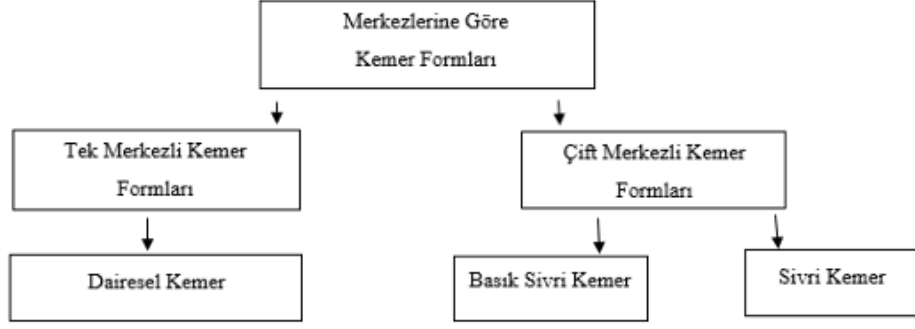
Dolgu: Tempan duvarların arasında kalan sıkıştırılmış malzemedir.

Kemer: Açıklıkların geçilmesi ilk olarak düşey doğrultudaki duvar ya da sütunların birbirine bağlayan ve eğik bir eksene sahip yatay taşıyıcı eleman olan kemerler ile sağlanmıştır. Kemer üzerine etkiyen kuvvetler, kemer yapısından kaynaklı olarak basınç kuvveti şeklinde etkirler ve kemerler bu basınç kuvvetlerini doğrudan mesnet noktalarına iletirler (Şekil 4.2). Dolayısıyla kemerler sadece basınç kuvvetine karşı dirençlidirler (Batar, 2019).



Şekil 4.2. Kemer yük aktarımı

Kemerler eğik eksene sahip olduklarından dolayı bu eğriliğin seçimi ile kemerin geometrisi, yükün sadece eksenel kuvvet olarak aktarıldığı itme çizgisi ile kemer geometrisi arasındaki optimum uyuma dayanmaktadır. Aktarılan eksenel kuvvetler yalnızca basınç kuvvetleridir. İtme çizgisi büyük oranda yükleme tipine bağlı olmaktadır (Özkaya, 2019).



Şekil 4.3. Köprü kemer formları

Şekil 4.3’ te köprü kemer formları tabloda gösterilmiştir. Dairesel kemerler; çoğunlukla yük taşıma amacı ile yapılmakta olup, başlangıç noktasından bitiş noktasına tek bir eğimle çizilen ve yerden yüksekliği kemer açıklığının yarısına eşit olan kemerdir. Basık sivri kemerler; eksenel yük taşıma kapasitesi daireseel kemerlere göre daha azdır. Yerden yüksekliği açıklığın yarısı kadardır. Bu köprülere etki eden yatay yükün fazla olmasından kaynaklı olarak daha sağlam ayaklar ve gergi çubukları kullanılması gerekmektedir. Sivri kemerler; yarıçapı kemer açıklığının yarısından büyük olan kemerlerdir (Yılmaz, 2022).

Kemer köprülerin avantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Trafik yükleri altında sınırlı deformasyon gösterirler.
- Kullanım ömürleri fazladır.
- Yapım malzemelerinin bulunabilmesinin kolay olması.
- Yüksek hasar toleransına sahiptir.

Kemer köprülerin dezavantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Meydana gelen büyük yer değiştirmeler ile yükleme kapasitesinin azalması.
- Yapının eski haline dönüştürülmesinin zor olması.
- Köprünün altındaki boşluk diyagramının sabit olmaması (Proske ve Gelder., 2009).

Kemer Alnı: Kemerin dışarıdan bakıldığında görünen yüzeyi.

Kemer Karnı: Kemerin iç tarafında meydana gelen alan.

Kemer Açıklığı (Kemer Gözü): İki kemer arasındaki boşluk.

4.2. Tarihi Yığma Köprülerde Kullanılan Yapı Malzemeleri

Doğal Taş: Basınç kuvvetine karşı dayanımları yüksek, çekme kuvvetine karşı dayanımları düşüktür. Yığma yapıların temel malzemelerinden biri olan doğal taşlar kolaylıkla işlenebilmekte ve bulunabilmektedir (Özmen, 2019).

Tuğla: Hammaddesi kildir. Kilden yapılan bu malzemeler pişirilmiş ve pişirilmemiş olarak sınıflandırılır. Pişirilmiş olanlara tuğla ya da kiremit, pişirilmemiş olanlara kireç örnek verilebilmektedir. Tuğlalar üretim şekillerine göre ikiye ayrılmaktadırlar. Bunlar el (harman) tuğlası ve fabrika tuğlasıdır. Tuğlanın fiziksel ve mekanik özellikleri tuğla toprağının karışımının oranına, pişirilme tekniğine, üretim yöntemine ve pişirilme sıcaklığına bağlı olarak değişiklik gösterir. Harman tuğlası; kil oranı yüksek olan toprağın, balçığının, atık tuğla parçalarının harmanlanarak önce şekil verilip ardından da kurutulduktan sonra yeterli ısıyla pişirilmesiyle oluşur (Cıplak, 2020).

Harç: Malzemelerin birbirlerini ile bağlantısını sağlayan malzemedir. Genellikle bağlayıcı olan bir faz, ince agrega (kum) ve sudan oluşan harçlar içerisinde bulunan bağlayıcının türüne göre adlandırılmaktadır. Bağlayıcı olarak kullanılan malzemelerin geçmişine bakıldığında çamur harcı ile başlayıp bunu takiben alçı, bitüm ve kireç kullanılmıştır. Kireç harçları ve horasan harçları olarak iki sınıfa ayrılırlar. Kireç harçları; bağlayıcı madde olarak kireç, dolgu malzemesi olarak da agrega katılarak elde edilen harçlardır. Horasan harçları; pişmiş kil ürünlerinden elde edilen horasana ilave olarak sönmüş kireç ve kum ile üretilen harçlardır (Ulukaya, 2016).

Katkı Malzemesi: Hem priz süresini hızlandırarak harca basınç ve çekme kuvveti kazandıran hem de su izolasyonu için kullanılan malzemedir.

Agrega: Çakıl (kırmı taş) ve kum karışımıdır. Kireçle tepkime verdiğinde puzolanik, vermediğinde agrega olarak tanımlanan malzemedir.

Sıva: Yapıyı dış etkenlerden koruyup ısı ve su geçirimsizliğini azaltmak için kullanılan yapışkan özellikli malzemedir.

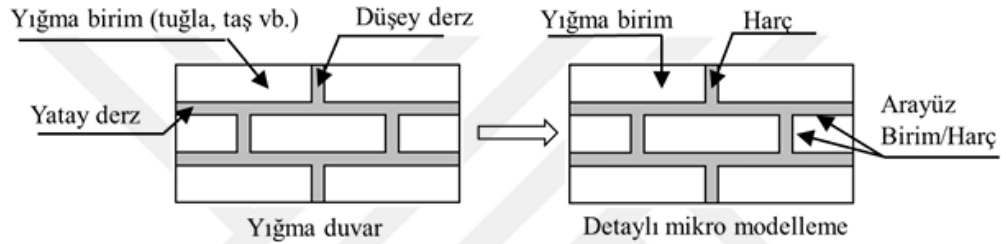
4.3. Tarihi Yığma Köprülerde Kullanılan Modelleme Yöntemleri

Yığma yapılarda kullanılan malzemelerin kompozit olmasından dolayı malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin tam olarak belirlenememesine sebep olmaktadır. Bu durum yığma yapıların analizini zorlaştırmaktadır. Yığma yapıların sonlu eleman modellemelerindeki kabullü betonarme elemanların modelleme kabulünden

farklıdır. Betonarme yapıların malzemeleri heterojen olmasına rağmen yapısal eleman aynı tip elemanmış gibi değerlendirilebilirken, yığma yapılarda her eleman ayrı ayrı değerlendirilerek doğru bir modelleme oluşturulabilmektedir. Yığma yapıların analiz çalışmaları yapılırken yapı sisteminin büyüklüğü dikkate alınarak detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme olma üzere 3 farklı modelleme tekniği bulunmaktadır (Akdeniz, 2011).

4.3.1. Detaylı mikro modelleme

Yığma yapılarda taş ya da tuğlalar arasında bulunan yatay ve düşey derzler rijitliğin azaldığı yerlerdir. Detaylı bir model oluşturulmak istendiğinde taş ya da tuğla birimleriyle birlikte derzleri oluşturan harcında ayrı ayrı modellenmesinden dolayı oluşan davranıştaki farklılıklar dikkate alınmaktadır. Harç, yığma birimlere oranla daha düşük mukavemetli olduğundan derzlere yoğunlaşan bir yaklaşıma sahip olan bu mikro modelleme büyük boyutlara sahip olmayan yapılarda, tüm yapının bir kısmında veya detaylı bir çözümlemede tercih edilen modelleme türüdür. Ancak bu modelleme yöntemi tercih edileceği durumda harcın özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir aksi halde ayrıntılı bir şekilde malzemenin mekanik özelliklerinin araştırılması yapılmadan bu modelleme yöntemini kullanmak doğru değildir (Akın, 2020). Şekil 4.4' te detaylı mikro modelleme gösterilmiştir.

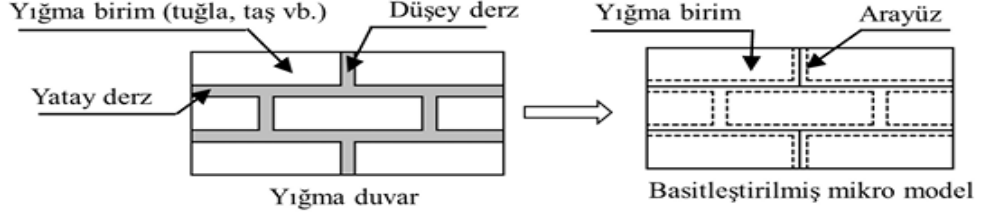


Şekil 4.4. Detaylı mikro modelleme

4.3.2. Basitleştirilmiş mikro modelleme

Bu modelleme yapılırken taşıyıcı olan malzemenin boyutu, harç tabakasının kalınlığının iki katı olacak şekilde artırılarak arada bulunan bağlayıcı tabakanın olmadığı kabul edilir. Bu taşıyıcı birimler birbirlerinden ara yüzey çizgileriyle ayrılırlar. Harç varlığı yok sayılsa bile ara yüzeylerin temsili bir rijitliğe sahip olması gerekmektedir. Basitleştirilmiş mikro modellemede tüm göçme mekanizmaları dikkate alınmadığından

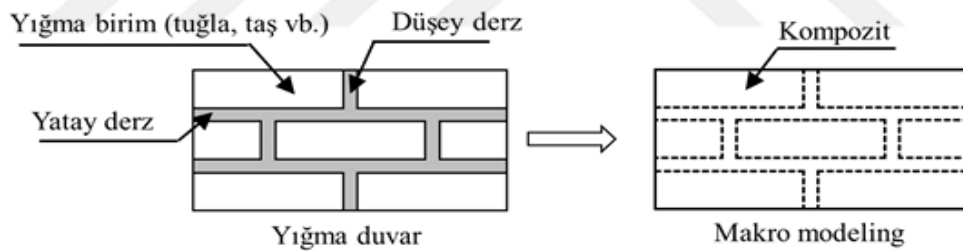
yapıda oluşan çekme ve kayma gerilmelerinin bu ara yüzeylerde meydana geleceği, yapıda meydana gelecek olan deformasyonun ise taşıyıcı malzemenin ağırlık merkezine dik bir şekilde etkiyeceği kabul edilmektedir (Üstün, 2020). Şekil 4.5’ te basitleştirilmiş mikro modelleme gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Basitleştirilmiş mikro modelleme

4.3.3. Makro modelleme

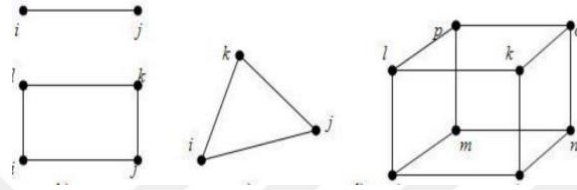
Bu modelleme yönteminde harcın ve yığma birimlerin özellikleri homojenleştirilerek yığma yapının kompozit bir malzeme olduğu kabul edilmektedir. Makro modellemede mekanik özellikler homojenleştirme işlemlerinin sonucunda elde edilmektedir. Büyük boyutlu yapıların analizlerinin yapılması istendiğinde tüm yapı sistemi modellenirken, yığma birimler ile harç arasındaki ilişkinin olmadığı varsayılmaktadır. Bunun nedeni büyük boyutlu yapıların mikro modelleme ile oluşturulmasından kaynaklı oluşan güçlüklerdir. Dolayısıyla büyük boyutlu sistemler için makro modelleme yönteminin kullanılması uygundur (Kayırga, 2017). Şekil 4.6’ da makro modelleme gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Makro modelleme

4.3.4. Sonlu elemanlar yöntemi

Bu yöntem yapısal sistemlerin doğrusal olan ve olmayan hem statik hem dinamik problemlerinde yaygın olarak kullanılır. Karmaşık problemlerin analizi öncelikle matematiksel modelin oluşturulması, analizinin yapılması ve son olarak da sonuçlarının yorumlanması olmak üzere 3 aşamadan oluşur. Sonlu elemanlar yönteminin temeli, yapıyı çok sayıda sonlu elemana bölerek matematiksel model oluşturmaktır. Oluşturulan bu elemanlar bir, iki ya da üç boyutlu (Şekil 4.7) olabilirler (Nurkovic, 2022).



Şekil 4.7. Sonlu eleman tipleri

4.4. Tarihi Yığma Köprülerde Kullanılan Analiz Yöntemleri

4.4.1. Doğrusal (linear) analiz

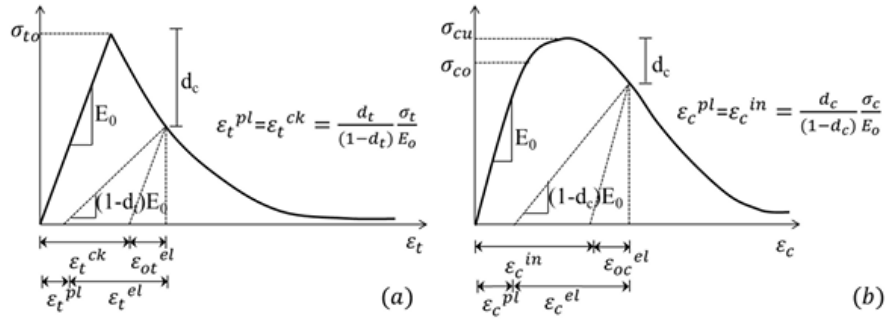
Bu analiz yönteminde, yapı malzemesinin lineer-elastik davranışını esas alan temele dayanarak yapıdaki sınır durum lineer davranışının analizi yapılır. Bu analiz ile hasar bölgeleri tespit edilebilmektedir (Akın, 2020).

4.4.2. Doğrusal olmayan (non-linear) analiz

Doğrusal olmayan (non-linear) analiz; gerilme-şekil değiştirme eğrisinde akmadan sonra meydana gelen pekleşme bölgesi dikkate alınmaktadır. Yapıda meydana gelen, üniform olmayan gerilmeler daha gerçekçi hesaplanabilmektedir. Yığma birimlerde, beton gibi basınca karşı daha dirençli oldukları için beton için kullanılan analiz yöntemleri yığma yapılar içinde kullanılır. Literatür incelendiğinde malzemelerin doğrusal olmayan davranışını tanımlamak amacı ile Drucker Prager, Mohr-Coulomb Plasticity ve Concrete Damage Plasticity (CDP) malzeme modelleme yaklaşımları kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında beton hasar plastisite malzeme modeli (CDP) kullanılmıştır (Üstün, 2020).

4.4.2.1. Beton hasar plastisite malzeme modeli (CDP)

CDP malzeme modeli, beton ve yığma birimler gibi gevrek malzemelerin basınç ve çekme kuvveti altında elastik olmayan davranışını modellemede kullanılan bir malzeme modelleme yöntemidir. Esas olarak iki göçme mekanizması bulunmaktadır. Bunlar göçme mekanizmaları; basınç kuvveti altında ezilme, çekme kuvveti altın ise çatlamadır. Dolayısıyla beton hasar plastisite malzeme modeli, basınç ve çekme kuvvetleri altında malzemede oluşan birim şekil değiştirmelerin doğrusal davranış sınırını aşp, plastik şekil değiştirmelerin başladığını kabul eder. Bu modelleme, tek eksenli basınç ve çekme kuvvetleri altında oluşan gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden yararlanarak malzemenin doğrusal olmayan davranışını tanımlamaktadır. Şekil 4.8’ de çekme (a) ve basınç (b) davranışının eğrileri verilmiştir (Üstün, 2020).



Şekil 4.8. Beton hasar plastisite malzeme modeli gerilme-şekil değiştirme eğrileri

Bu modelde, basınç ve çekme kuvveti etkisi altında maksimum gerilmeye ulaşana kadar doğrusal davrandığı, maksimum gerilmenin aşılması durumunda ise malzeme de çatlamaların ve ezilmelerin meydana geleceği kabul edilir.

5. DİNAMİK PARAMETRELER

Zamana bağlı olarak büyüklüğü değişen yüklere, dinamik yükler denilmektedir. Yapıların dinamik yükler etkisi altındaki davranışı, yapı dinamik karakteristikleri kullanılarak belirlenir. Bu parametreler teorik ve deneysel yöntemler kullanılarak elde edilebilirler.

Yapıların dinamik parametrelerinin belirlenmesi, yapının sismik bir etki altında davranışını anlamak açısından çok önemlidir. Yapıların dinamik davranışına kesit, malzeme ve sistem özelliklerine bağlı olarak pek çok parametre etki eder. Dolayısıyla yapıların dinamik karakteristikleri bu parametreler ile doğrudan ilişkilidir. Literatürde bu karakteristikler; doğal titreşim periyodu, doğal titreşim frekansı, sönüm oranı, mod şekli olarak sıralanmaktadır (Karaahmetli ve Tanrikulu, 2016). Aşağıda bu parametreler açıklanmıştır:

5.1. Periyot

Dinamik yükün etkisi altın olan bir yapının davranışı, o yapının dinamik karakteristik özellikleriyle ilişkilidir. Titreşim sırasında bir tam çevrimi yaparak başlangıç seviyesine dönme süresi olarak tanımlanan ve saniye birimi cinsinden ifade edilen periyot yapıların önemli dinamik karakteristiklerindendir. Yapıların serbestlik derecelerine bağlı olarak birçok periyot ve bunlara karşı gelen mod şekilleri vardır. Yapının dinamik etkilerini hesaplamada birinci hâkim periyot en baskın ve önemli olandır. Bu sebeple, yapıların dinamik analizi için özellikle hâkim periyotların kabul edilebilir yaklaşıklıkla hesap edilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır.

Çerçevesi sistemlerin periyot hesabına ilişkin önerilen yöntem tek katlı bir çerçevenin sönümsüz serbest titreşim durumunda sistemin doğal titreşim periyodu (T), kat kütlesi (m) ve rijitliğine (k) bağlı olarak denklem 5.1 ile verilmiştir.

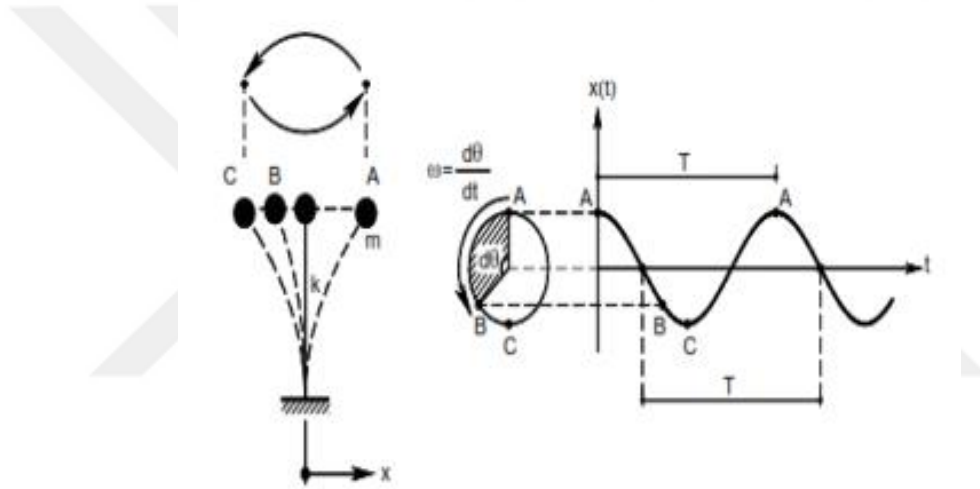
$$T = 2\pi\sqrt{m/k} \quad (5.1)$$

Çok serbestlik dereceli sistemlerde ise kütle ve rijitlikler matrislerle ifade edildiğinden işlem yükü artar. Kat sayısı arttıkça çözüm daha zor ve karmaşık hale

gelmektedir. Sistemin zemine mesnetlenme durumuna göre birinci katın rijitliği normal katlara göre farklılık göstermektedir (Çolak ve ark., 2019).

5.2. Frekans

Doğal periyodun tersi frekanstır ve birimi bir saniyede yapılan çevrimi belirten Hz veya 1/s'dir. Açısal frekans titreşim hareketi dairesel hareket olarak gösterildiğinde birim zamanda taranan açı olarak tariflenir ve rad/s birimindedir. Bir periyotluk süre geçtiğinde Şekil .1'de A noktasından tekrar A noktasına geldiğinde taranan açı 2π radyan olacaktır.



Şekil 5.1. Doğal titreşim periyodu ve açısal frekans

Bu üç büyüklük arasında aşağıdaki bağlantılar bulunmaktadır:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (5.2)$$

Açısal frekans ve rijitlik arasındaki bağlantı ise

$$\omega = \sqrt{k/m} \quad (5.3)$$

Yapının ağırlığı yani kütlesi arttığında doğal periyot büyümektedir. Yapının öteleme rijitliği arttığında (perde, kolon gibi düşey taşıyıcıların boyutları büyütüldüğünde) periyot değeri küçülmektedir. (Sert ve Beyen, 2019).

5.3. Sönüm Oranı

Deprem sırasında ana kayadan kaynaklanan hareket, zemin tabakalarından geçerek yapıları titreştirir. Bu titreşim zeminin serbest yüzeyinden geriye yansiyarak aynı zamanda da yapı içerisinde yukarı doğru ilerleyip en üst kattan tekrar yansiyıp geri döner ve zeminin içine geri dönmek üzere gider. Bu enerji yayılımıyla oluşan sönüm, zemin ortamının elastik özellikleri, kütle yoğunluğuna ve kişinin fiziksel özelliklerine bağlıdır. Yapı rijit hale geldikçe, mesnet ortamı daha yumuşak hale geldikçe ve zeminde ana kaya üzeri dolgu kalınlaştıkça, zemin ortamında enerji yayılımı nedeniyle sönüm oranı artar. Bununla birlikte, vizkoz sönümün aksine, enerji yayılma sönümü düşük modlara göre daha azdır (Sert ve Beyen, 2019).

Sönümsüz modellerle yapılan hesaplar, yapıların titreşimine ilişkin önemli niteliksel bilgiler sağlasa da elde edilen sayısal sonuçlar genellikle ciddi hatalar içerir. Bu nedenle, yapı modelinin bir sönüm mekanizmasının olması, sayısal sonuçların daha gerçekçi hale getirilmesi için gereklidir. Yapılan gözlemler, titreşen yapıların hareketlerinin kısa süre içinde sönümlenerek durma aşamasına geldiğini ortaya koymaktadır. Ancak bu mekanizmayı gerçeğe daha yakın ve güvenilir şekilde modellemek zordur. Çatlama, kırılma, doğrusal olmayan malzeme davranışı ve sürtünme gibi enerji tüketen mekanizmalar ile bunların titreşim modlarına etkileri, yapının davranışında belirsizliklere yol açar. Literatürde pek çok farklı sönüm modeli önerilmiştir. Bu modeller yapısal olarak,

- Viskoz Sönüm
- Rijitlikle Orantılı Viskoz Sönüm
- Kütleyle Orantılı Viskoz Sönüm
- Kütle ve Rijitlikle Orantılı (Rayleigh) Viskoz Sönüm
- Coulomb Sönümü
- Çevrimsel Sönüm
- Enerji Yayılma Sönümü tanımlanmaktadır.

Viskoz sönüm, dış ve iç sönüm olmak üzere iki ana gruba ayrılmıştır. Dış viskoz sönüm, yapının içinde bulunduğu ortamdan kaynaklanan ve genellikle ihmal edilen bir sönüm türüdür. İç viskoz sönümse, yapı malzemesinin sönümüdür. Bu tür sönüm, doğrusal davranış sergilerken düşük değerlerde kalır, doğrusal olmayan davranış sergilerken ise bu değer artış gösterir. Taşıyıcı sistem mesnet ve birleşim bölgelerinde

Coulomb sönümü ortaya çıkar. Örneğin, deprem sırasında dolgu duvarlardan kaynaklanan enerji kaybı bu sönüm türü örneği olarak gösterilebilir. Çevrimsel sönüm ise yapı malzemesinin doğrusal olmayan davranışından ve yükün yönünün değişmesinden dolayı ortaya çıkar. Enerjinin sönmesi ise depremden gelen enerjinin yapı içerisinde yayılarak kaybolmasıyla oluşur (Karaahmetli ve Dündar, 2017).

Matematiksel çözümleme açısından değerlendirilmesi en kolay olan sönüm türü viskoz sönümdür. Bu nedenle, diğer sönüm türlerinin eşdeğer vizkoz sönme dönüştürülerek hesaplanır. Yüksek modlarda sönüm frekansla doğru orantılı bir şekilde artmaktadır. Ayrıca sönüm genlikle de doğru orantılı olarak artar. Deneyler sonucunda tipik bir yapıda düşük genlikler için sönüm oranı %1-2 arasında değiştiği görülmüştür. Ancak, güçlü yer hareketleri sırasında bu oran %5-10 seviyelerde erişilebilirken, hatta bazılarının %15'i aşılabilmektedir (Sert ve Beyen, 2019).

5.3.1. Sönüm oranını belirlenmesi

5.3.1.1. Serbest titreşim denkleminin çözümü ile sönüm oranının belirlenmesi (STDC)

Çok serbestlik dereceli (ÇSD) sistemlerde sönümlü sistemin serbest titreşim hareketi denklem 5.4'de ifade edilmektedir.

$$u(t) = \sum \phi_n \left[e^{-\zeta_n \omega_n t} \left[u_n(0) \cos \omega_D t + \frac{\dot{u}_n(0) + \zeta_n \omega_n u_n(0)}{\omega_D} \sin \omega_D t \right] \right] \quad (5.4)$$

Denklemden $u_n(t)$ zamana bağlı yer değişimini, ϕ_n , ζ_n ve ω_n sırasıyla n. mod şekil vektörünü, sönüm oranını ve doğal frekansını, t zamanı, $u_n(0)$ başlangıçtaki yer değişimini, ω_D sönümlü doğal frekansı ve $\dot{u}_n(0)$ başlangıçtaki hızı göstermektedir. Denklemden sönüm oranı dışındaki tüm parametreler deneysel olarak elde edilebilir. Dolayısıyla çok serbestlik dereceli sistemlerin sönüm oranların, serbest titreşim deneyleriyle belirlenebilir. Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken konu yapıyı sadece tek bir modda titreşecek biçimde çekip bırakmayı ayarlayabilmektir (Karaahmetli ve Dündar, 2017).

5.3.1.2. Logaritmik azalım ile sönüm oranının belirlenmesi (LA)

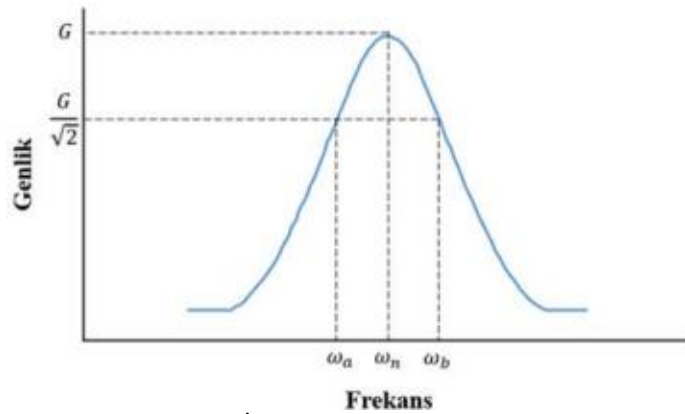
Yapı modeline ait filtrelenmiş serbest titreşim kayıtlarından faydalanılarak logaritmik azalım yöntemi kullanılarak yapı sönüm oranı hesaplanır.

$$\xi = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{\ddot{u}_i}{\ddot{u}_{i+j}} \quad (5.5)$$

Denklem 5.5’de $\ddot{u}_i$ ve $\ddot{u}_{i+j}$ sırasıyla i. ve i+j. genlik değerlerini, j, dikkate alınan devir sayısını, ξ ise sönüm oranını ifade etmektedir (Karaahmetli ve Dünder, 2017).

5.3.1.3. Yarım güç bant kalınlığı yöntemi ile sönüm oranının belirlenmesi (YGBK)

Sönüm oranı denklem 5.6 yardımı ile hesaplanmaktadır. Denklemde ω_n sistemin doğal titreşim frekansını, ω_a ve ω_b Şekil 5.2’de belirtildiği üzere $G/\sqrt{2}$ noktasından çizilen doğrunun eğriyi kestiği noktalara karşılık gelen frekans değerlerini, ξ ise sönüm oranını ifade eder (Karaahmetli ve Dünder, 2017).



Şekil 5.2. İvme transfer fonksiyonu

$$2\xi = \frac{\omega_b - \omega_a}{\omega_n} \quad (5.6)$$

5.4. Mod şekli

Modlar, yapının doğal özellikleridir. Rezonanslar, malzeme özellikleri (rijitlik, kütle ve sönümlleme) ile yapının sınır koşulları tarafından belirlenmektedir. Her mod, doğal (modal veya rezonans) bir frekans, modal sönümlleme ve mod şekli ile tanımlanmaktadır. Yapının malzeme özellikleri ya da sınır koşulları değişirse buna bağlı olarak modları da değişecektir (Żółtowski ve Napieraj, 2017).

Mod şekli, bir yapı sisteminin belirlenen frekanslarda titreşim yaptığı geometrik konumunu gösterir. Var olan yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde ve hasar almış yapıların hasar durumları hakkında bilgi edinilebilmek için mod şekilleri kullanılır. Yapı sistemlerinin mod şekilleri de doğal titreşim frekanslarının analitik olarak belirlenebildiği gibi belirlenir. Belirlenmiş olan mod şekilleri ile sistemin dinamik davranışı hakkında bilgi edinilir. Gerçekçi olarak tasarlanmış 3 boyutlu yapı sistemlerinde çoğunlukla 1.ve 2. mod şekilleri x ve y yönlerinde ötelenme, 3. mod şekli ise z ekseni etrafında da burulma şeklinde meydana gelmektedir (Birdal, 2015).

6. DİNAMİK ANALİZ YÖNTEMLERİ

Yapıya etkiyen dinamik yüklerin net bir şekilde bilinmiyor olması ve yapının dinamik özelliklerini etkileyen faktörlerin belirsizliklerinden dolayı yapıların dinamik parametrelerinin saptanması zorlaşır. Yapının dinamik parametrelerinin belirlenebilmesi yapısal analizlerin daha gerçekçi olmasını sağlar. Çünkü bu parametreler yapı hakkında önemli bilgiler vermekle beraber bilgiler de davranışın ortaya çıkarılmasında önemli bir yere sahiptir. Doğal frekans, doğal periyot, sönüm oranları ve mod şekilleri olarak adlandırılan yapı dinamik parametrelerin belirlenmesinde teorik ve deneysel modal yöntemler kullanılır (Gani, 2017).

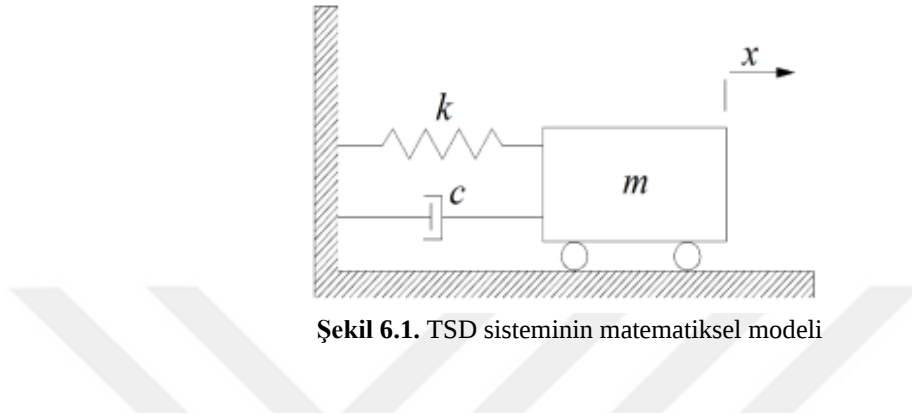
6.1. Teorik Modal Analiz (TMA)

Teorik modal analiz (TMA) yöntemlerinde gerçek bir yapıya, eşdeğer ve matematiksel olarak daha kolay çözümlenebilecek basitleştirilmiş bir analitik model oluşturularak bu modele karşılık gelen matematik model tespit edilmektedir. Matematiksel modelden analiz için diferansiyel denklemler çözümleyerek istenilen dinamik parametreler elde edilebilmektedir. Mevcuttaki sistemler karmaşık bir yapıya sahip olduklarından dolayı teorik yöntemler ile modal analiz zorlaştığından birtakım kabuller yapılarak numerik yöntemler geliştirilmiş ve bilgisayar programlarıyla bu sistemlerin çözümlenebilmesi daha kolay hale gelmiştir. Sonlu Elemanlar (SE) yöntemi, yapıların dinamik parametrelerinin teorik modal analiz yöntemiyle belirlenmesinde en çok kullanılan yöntemdir. TMA tek serbestlik dereceli ya da çok serbestlik dereceli sistemler üzerinden kurulan teorik model ile yazılan denge denklemleri çözülerek yapılmaktadır. (Kaya, 2022).

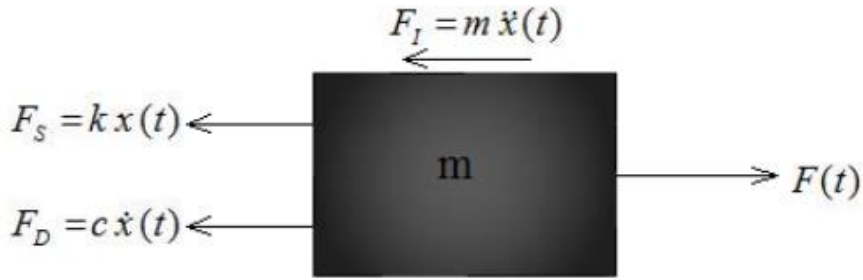
6.1.1. Tek serbestlik dereceli sistemler

TSD sistemlerin hareket halinde bulunduğu konum tek bir parametrenin verilmesi ile belirlenir. Tek serbestlik dereceli sistemlerin davranışını, mesnet şartları ve hareket denkleminin başlangıç şartları dikkate alınarak elde edilen çözümü belirler. Şekil 6.1’de TSD sistemin titreşiminin matematiksel modeli, Şekil 6.2 ise serbest cisim diyagramı verilmiştir. Şekilde, x yapının zamana bağlı yatay ötelenmesini ifade etmektedir. TSD sistemlerin titreşiminde temel bileşenler rijitlik (k), kütle (m), sönüm katsayısı (c) ve dış

kuvvettir. Tek serbestlik dereceli sistemin dinamik davranışının belirlenebilmesi için bu sistemin hareket denklemi gerekmektedir. Yer hareketi etkisindeki tek serbestlik dereceli sistemin dinamik davranışı denklem 6.1 ile verilmiştir. Denklemden $m\ddot{x}_g(t)$ terimi, yapının kütlesine etkiyerek titreşime sebep olan dış kuvveti ifade eder (Kayhan ve Demir, 2016).



Şekil 6.1. TSD sisteminin matematiksel modeli



Şekil 6.2. TSD sisteminin serbest cisim diyagramı

TSD sistemleri için genel hareket denklemi:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (6.1)$$

Denklemden sönüm katsayısı $c=0$ ve titreşime başlangıç şartlarının neden olduğu düşünülüp dış kuvvet $F(t)=0$ kabul edilirse TSD sistemler için sönümsüz serbest titreşim hareket denklemi:

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (6.2)$$

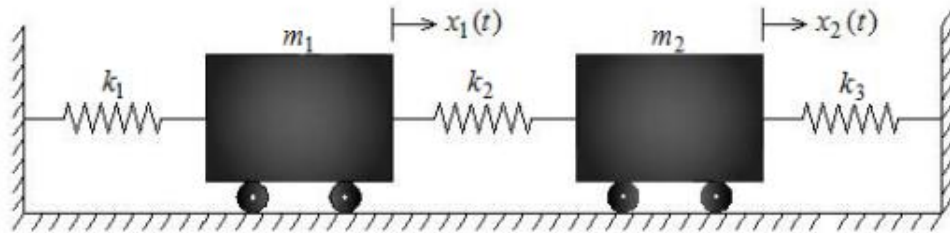
6.1.2. Çok serbestlik dereceli sistemler

Gerçekte var olan sistemlerin birçoğu çok serbestlik dereceli sistemlerdir. Her serbestlik derecesi bir hareket denklemine ve doğal frekansa karşılık gelmektedir. Tek serbestlik dereceli sistemlerin titreşimindeki skaler değerlerin yerlerini çok serbestlik dereceli sistemlerde vektörel ve matris büyüklükleri almaktadır. Çok serbestlik dereceli sistemlerde genel hareket denklemi denklem 6.3' de verilmiştir.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (6.3)$$

Burada, $[M]$ kütle matrisini, $[C]$ sönüm matrisini, $[K]$ rijitlik matrisini, $\{x(t)\}$ yer değiştirme vektörünü, $\{\dot{x}(t)\}$ hız vektörünü, $\{\ddot{x}(t)\}$ ivme vektörünü, $\{F(t)\}$ kuvvet vektörünü ifade etmektedir. Eğer sönüm matrisi ve kuvvet vektörü sıfır kabul edilirse çok serbestlik dereceli sönümsüz sistemin hareket denklemi denklem 6.4' deki olacaktır. Çok serbestlik dereceli sistemleri temsil etmek amacıyla iki serbestlik dereceli bir sistemin sönümsüz serbest kütle-yay teorik modeli Şekil 6.3'te verilmiştir (Birinci, 2010).

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (6.4)$$



Şekil 6.3. ÇSDS sönümsüz serbest teorik modeli

6.2. Deneysel Modal Analiz (DMA)

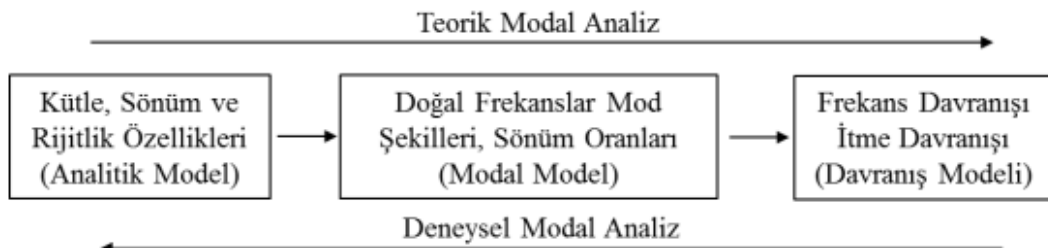
Deneysel ölçüm metotlarına bağlı olan yapılarının dinamik parametrelerin belirlenmesinde Deneysel Modal Analiz ve Operasyonel Modal Analiz yöntemleri kullanılır. Deneysel Modal Analiz yönteminde bir yapı bilinen bir etkiye maruz bırakılıp titreştirilerek (darbe çekici, sarsma tablası ve shaker), yapının bu etkiye verdiği tepki

ölçülür. Operasyonel Modal Analiz yönteminde de bir yapı bilinmeyen çevresel etkiler altında titreştirilir (rüzgâr, insan hareketi, taşıt yükü) ve yapının bu etkiye verdiği tepki ölçülür. Uygulama basit olması, ölçüm sırasında trafik akışının engellenmemesi ve maliyetinin ucuz olması gibi sebeplerden dolayı Operasyonel Modal Analiz yöntemi köprülerinin dinamik parametrelerinin belirlenmesinde daha yaygın olarak kullanılır (Bayraktar ve ark., 2009).

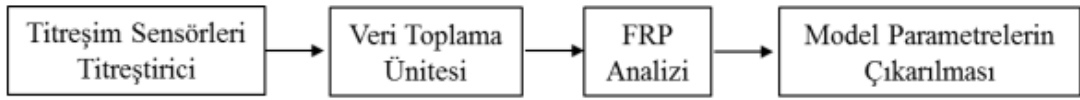
Yapılar üzerinde titreşim kaynaklı tepkilerin ölçülerek bu ölçüm verilerinden yapı dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan yöntemlere Deneysel Modal Analiz Yöntemleri denilmektedir. Bu yöntemlerde yapılar bilinen bir kuvvetle titreştirilir veya çevrel titreşim kayıtları dikkate alınarak ölçümler yapılır. Deneysel yöntemlerde modal parametrelerin hesabında sistem davranışı ve sistem tanılama teknikleri kullanılır. Mevcut olan yapıların matematik modeli her zaman oluşturulamadığından son zamanlarda Deneysel Modal Analiz Yöntemleri yapı dinamik karakteristiklerinin elde edilmesinde tercih edilmektedir. Yapı üzerinden hiçbir kabul yapılmadan ölçümler doğrudan alındığından deneysel yöntemlerle elde edilen dinamik karakteristikler, sonlu eleman modeli ile elde edilenlerden daha güvenilirdir. Deneysel yöntemlerle yapıların dinamik davranışının belirlenebilmesi yapı üzerinden alınan ölçümlerden dinamik karakteristiklerin elde edilmesi esasına dayanır. Bu süreç üç aşamada gerçekleştirilebilmektedir:

- Yapı üzerinden modal verilerin ölçülmesi
- Ölçülen modal verilerin analiz edilerek ve modal parametre tahmini yapılması
- Elde edilen modal parametreler yardımıyla dinamik davranışın belirlenmesi (Boru ve Kutanis, 2015).

Teorik ve Deneysel Modal Analizlerin işlem sırası Şekil 6.4 ve Şekil 6.5’de gösterilmektedir (Hökelekli, 2015).



Şekil 6.4. Teorik ve deneysel modal analiz işlem sırası



Şekil 6.5. Deneysel modal analiz işlem sırası

6.3. Operasyonel Modal Analiz (OMA)

Operasyonel Modal Analiz Yöntemi hizmet durumunda olan yapılardan gerçek zamanlı veriler alınarak yapılan analiz yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi gerçek zamanlı bir yapısal izleme sistemidir. Bu yöntemde gerekli uyarıcılar makine titreşimi, araç yükü ve rüzgar gibi çevresel olan faktörlerdir. Bu yöntemde yapıların çevresel etki ile (yaya hareketi, araç yükü, darbe çekici ve rüzgar) titreştirildiği kabul edilip, yapıların bu titreşime karşı göstermiş oldukları tepki ölçülür. Ölçülen tepkilerin değerlendirilmesinde Zaman Ortamında Stokastik Altalan Belirleme (SSI) Yöntemleri ve Frekans Ortamında Ayırışma (EFFD) örnek olarak verilebilmektedir (Aydın, 2021).

6.3.1. Modal parametrelerin belirlenmesi

Bu yöntemde yapının çevresel bir etkiyle titreştirildiği kabul edilerek yapının titreşime karşı gösterdiği tepki ölçülür. Bu tepkilerin ölçülerek değerlendirilmesinde başlıca iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlar stokastik altalan belirleme (SSI) yöntemi ve stokastik altalan belirleme (SSI) yöntemidir (Bayraktar ve ark., 2010).

6.3.1.1. Frekans ortamında ayırışım yöntemi (EFFD)

Bu yöntem, her modun birbirinden bağımsız olarak tek serbestlik dereceli sistem varsayılarak bir ayırışım yapılmasıdır. Bu işlem spektral yoğunluk matrislerinin ayırıştırılmasıyla ile gerçekleştirilir. Spektral yoğunluk fonksiyonları ise tek serbestlik dereceli sistemlerin oto-spektral yoğunluk fonksiyonlarından elde edilen vektörleri ve tekil değerleri içerir. Bu tekil değerler yapı frekanslarını temsil ederken tekil vektörler ise mod şekillerini temsil ederler. Frekans ortamında ayırışım yönteminde kullanılan işlem adımları aşağıdaki verilmiştir:

- Ölçüm sonucunda elde edilen verilerinden spektral yoğunluk fonksiyonlarının bulunması,
- Spektral yoğunluk fonksiyonlarında tekil değer ayrıştırma işleminin yapılması,
- Çoklu ölçüm yapıldığı zaman ise tekil değerlerin ortalamasının alınması,
- Spektral yoğunluk fonksiyonundan tekil değerlerin seçilmesi,
- Mod şekillerinin, doğal titreşim frekanslarının ve sönüm oranının elde edilmesi (Bayraktar ve ark., 2010).

6.3.1.2. Stokastik altalan belirleme yöntemi (SSI)

Bu yöntem ile zaman ortamında kayıt altına alınmış verilerden modal parametreler belirlenir. Bu yüzden elde edilen verilerin spektrumlara dönüştürülmesine gerek yoktur. Stokastik altalan belirleme yöntemi ile bir takım sayısal teknikler kullanılarak ölçüm sonucunda elde edilen verilerden konum alan matrisleri belirlenebilmektedir. Yapının matematiksel modelini oluşturarak modal parametreler elde edilir (Bayraktar ve ark., 2010).

7. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada tarihi Meram Köprüsü'nün (Şekil 7.1) 1/1 ölçekli modeli oluşturulmuş olup sonlu eleman programı olan ABAQUS' de analiz edilerek dinamik parametreleri belirlenmiş (frekans ve mod şekli) ve deprem etkisi altındaki davranışı incelenmiştir.

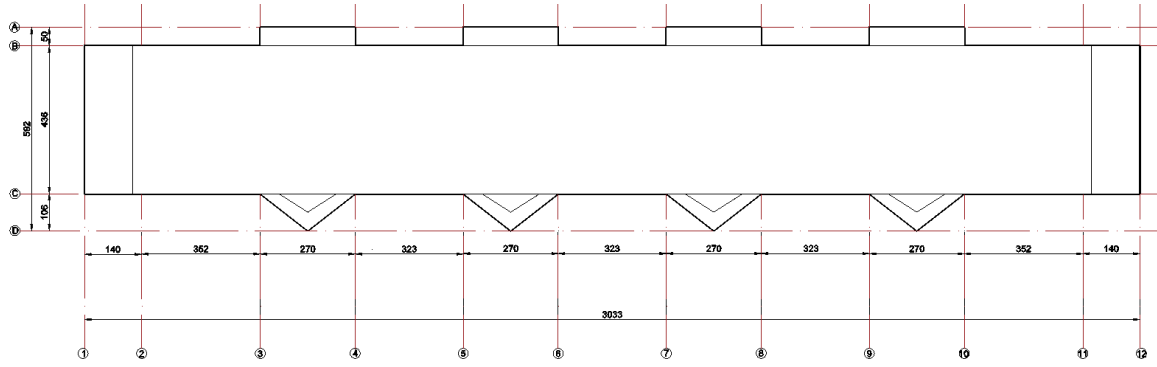


Şekil 7.1. Tarihi Meram Köprüsü

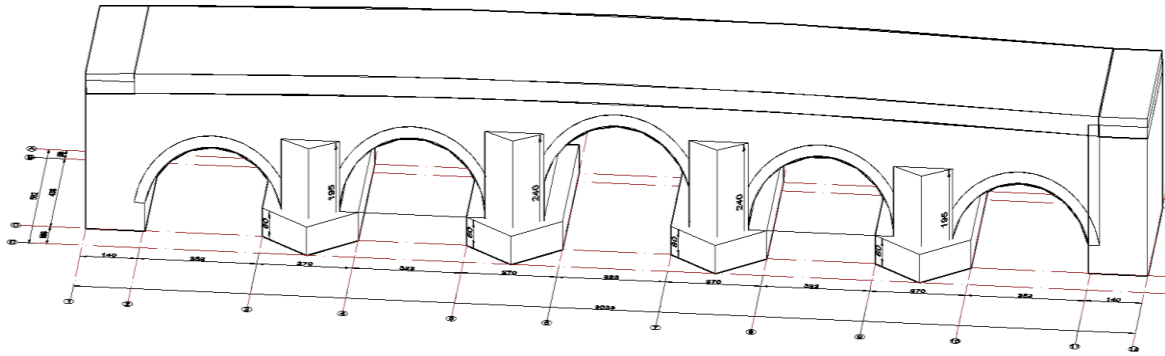
7.1. Tarihi Meram Köprüsü

Meram Köprüsü Selçuklu-Karamanoğlu dönemine ait olup toplam 30,33 m uzunluğunda 4,36 m genişliğinde ve 4,6 m yüksekliğinde beş açıklıklı, araç trafiğine kapalı yığma bir köprüdür. Ortadaki kemer gözü diğer kemer gözlerinden daha yüksektir. En dıştaki iki kemer açıklığı 4,02 m'dir. Diğer üç kemerin açıklığı ise 4,23 m'dir.

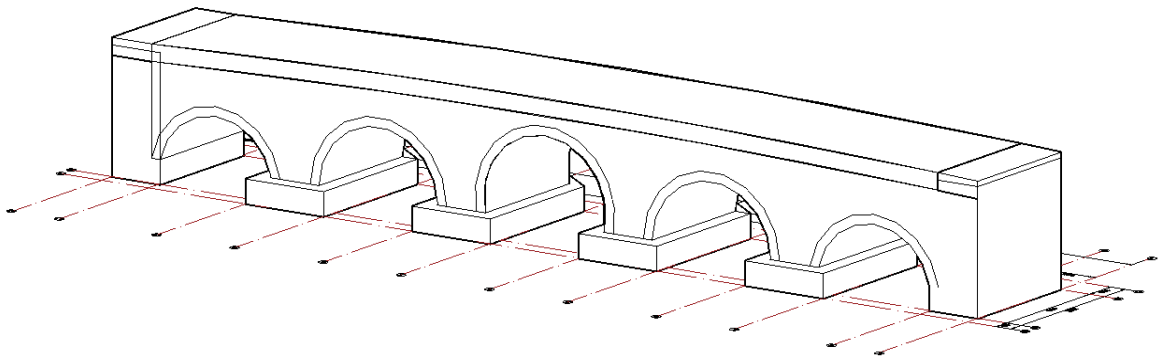
Köprünün memba kısmındaki ayaklarında, köprü gözlerinin kemer kilit taşı seviyesine kadar yükselen üçgen şekilli dört adet selyaranlar bulunmaktadır. En dış kemerin kilit taşı hizasındaki selyaranların yüksekliği 1,95 m, yanındaki kemerin kilit taşı seviyesindeki selyaranların yüksekliği ise 2,40 m'dir. Dört adet 0,8 m yüksekliğinde beton ayağı bulunmaktadır. Köprüde kullanılan malzeme kesme taştır (Şekil 7.2).



(a)



(b)



(c)

Şekil 7.2. Tarihi Meram Köprüsünün 3D görüntüsü (a) plan görünüşü (b) ön görünüşü (c) arka görünüşü

7.2. ABAQUS Sonlu Elemanlar Yazılımı

Tüm mühendislik yapılarının şiddetli bir depremde veya hizmet ömürleri boyunca maruz kalacakları artçı depremler sırasında işlevselliklerinin ve güvenilirliklerinin doğru bir şekilde tahmin edilerek sismik göçmelerin önlenmesi çok önemlidir. Bu çalışmada sonlu eleman çözümlemeleri için daha yüksek performanslı ve daha gerçekçi modeller oluşturmayı ve çözümlemeyi sağlayan Abaqus/Implicit programı kullanılmıştır.

ABAQUS programı yapısal ve ısı transferlerinin analizi için tasarlanmış genel amaçlı sonlu eleman (SE) programıdır. Bu program ile küçük ve büyük boyuttaki yapıların hem doğrusal hem de doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilebilmektedir.

Bu program tasarımların ve malzemelerin gerçekte nasıl bir performans göstereceğini anlamak için yapısal, mekanik, termal ve çoklu fizik sorunlarının modellenmesini, simüle edilmesini ve analiz edilmesini sağlamaktadır. ABAQUS çeşitli geometrilerin etkili bir şekilde modellenmesini sağlayan eleman türleri koleksiyonuna sahiptir. Ayrıca çeşitli malzemelerdeki gerilim ve deformasyonu simüle edebilen çeşitli malzeme modellerini içermektedir. Kauçuk, polimer, betonarme, cam, seramik, kırılabilir veya esnek köpüğün yanı sıra toprak ve kaya gibi jeoteknik malzemeleri de etkili bir şekilde modelleyebilmektedir.

Abaqus programını güç açısından farklı kılan modülerliğidir. Bu program sayesinde fiziksel olarak mümkün olan herhangi bir eleman, malzeme, süreç ve yükleme dizisi kombinasyonunu modellenenir.

Abaqus için başlıca yükleme türleri:

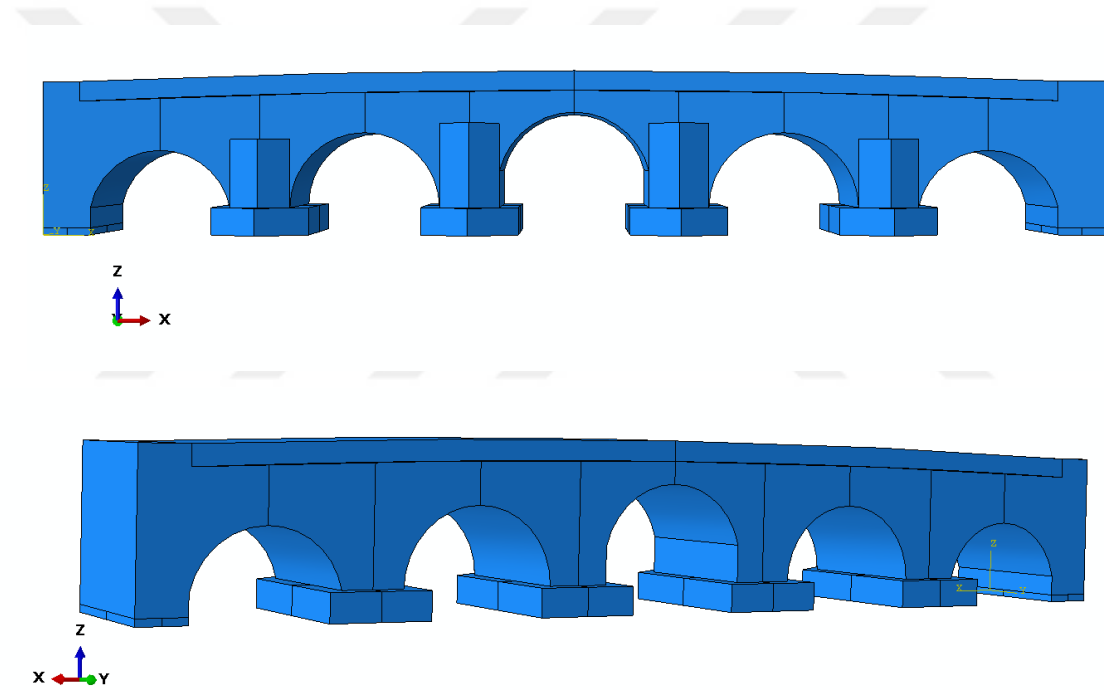
- ABAQUS/Standard; çeşitli yapısal ve yapısal olmayan analizleri gerçekleştirmek için tasarlanmış versiyonudur. Özellikle statik ve düşük hızlı dinamik olayları içeren durumlar için uygundur. Bu çözücü, mukavemet ve geometrik olarak doğrusal olmayan problemler gibi doğrusal ve doğrusal olmayan analizler gerektiren simülasyonlar içinde kullanılmaktadır. Abaqus/Standard, yarı statik yükleri taşıma ve kademeli veya yavaş uygulanan kuvvetlere maruz kalan yapıları analiz etmesi sebebi ile sıklıkla kullanılmaktadır. İnşaat mühendisliği, otomotiv, havacılık ve imalat gibi endüstrilerde, çeşitli yapıların ve bileşenlerin farklı yükleme koşulları altındaki davranışlarını simüle etmek için yaygın olarak kullanılır.
- ABAQUS/Explicit; yüksek hızlı darbeler, çarpışmalar ve son derece doğrusal olmayan dinamik olaylar için tasarlanmış bir dinamik çözücüdür. Geçici, şiddetli

yüklem koşullarını içeren simülasyonlar için kullanılması uygundur.(Fakrouji H, 2024)

7.3. Tarihi Meram Köprüsünün Sayısal Modellemesi

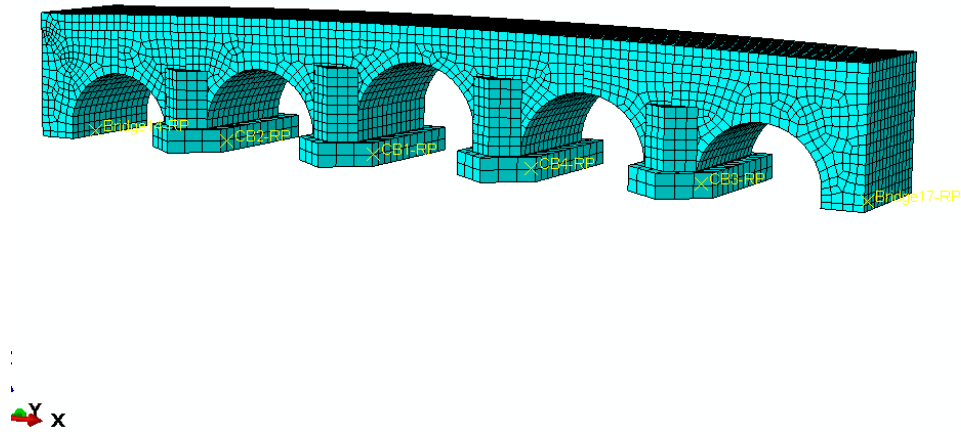
7.3.1. Model oluşturma

Tez kapsamında ABAQUS/Implicit yazılım programı kullanılmıştır. Tüm köprü parçaları 3D Solid parçalardan oluşturularak (Şekil 7.3) birbirlerine bağ özelliği kullanılarak bağlanmıştır.



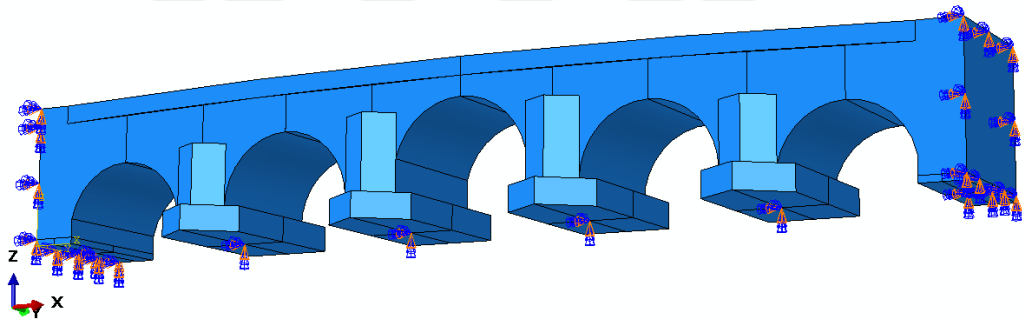
Şekil 7.3. Tarihi Meram Köprüsü' nün 3d Solid görüntüsü

Bu katı elemanlar kum saati kontrollü C3D8R elemanları kullanılarak meshlenmiştir. C3D8R elemanı bir integrasyon noktası ve sekiz düğüm noktasından oluşan lineer üç boyutlu hegzahedral sonlu eleman ağ modeli olarak tanımlanmaktadır (Selman, 2021). 300 mm uzunluğundaki köprü meshlenmiştir ve meshlemeden sonra toplam 24727 adet düğüm sayısı ve toplam 17832 adet eleman sayısı oluşmuştur (Şekil 7.4).



Şekil 7.4. Tarihi Meram Köprüsü' nün meshlenmiş görüntüsü

Köprünün beton ayakları rijit kabul edilerek modellenmiştir. Beton ayaklar, köprünün alt yüzeyleri ve köprünün sol ve sağ yüzeyleri ankastre olarak mesnetlenmiştir. (Şekil 7.5).



Şekil 7.5. Tarihi Meram Köprüsü' nün mesnetlenmiş görüntüsü

Bu çalışmada dört analiz adımı oluşturulmuştur.

- 1.adım: Varsayılan ilk adımdır.
- 2.adım: Bu adımda tüm modele 9810 mm/s^2 lik bir yerçekimi ivmesi uygulanmıştır.
- 3.adım: Köprünün dinamik özelliklerini bulmak amacıyla modal analiz yapılmıştır. Bu adımda, ilk 10 mod için frekanslar, doğal periyotları ve modal şekilleri elde edilmiştir.
- 4.adım: Son adımda ise implicit çözücü kullanılarak deprem analizi gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında kullanılan Kahramanmaraş/Pazarcık depreminin ivme kayıtları tarihi köprüye y- ekseni yönünde etki ettirilerek köprünün deprem etkisi altındaki davranışı incelenmiştir.

7.3.2. Malzeme özellikleri

Büyük boyutlu yapı sistemlerinin mikro modellemeleri gerek bilgisayar analizlerinin uzun sürmesinden gerekse verilerin çok olmasından dolayı oldukça zordur. Bundan dolayı büyük yapı sistemlerinin analizlerinde, yığma birimi ve harcı homojenleştirerek temsil edildiği makro modellemenin kullanılması uygundur. Dolayısıyla bu tez kapsamında Tarihi Meram Köprüsü makro model kullanılarak modellenmiştir. Makro model de hem taşın hem de harcın davranışını temsil eden homojenleştirilmiş bir duvarın özellikleri kullanılmıştır. Bu homojenize duvar, harç ve taşın özelliklerine bağlı olarak üretilmiştir.

Köprünün beton ayakları, beton özellikler kullanılarak modellenmiştir. Beton hasarlı plastisite (CDP) modeli, beton gibi gevrek davranışa sahip olup basınç gerilmesine, çekme gerilmesine oranla daha fazla çalışan malzemeleri modellemek için kullanılmaktadır. Dolayısıyla yığma birimlerden olan tuğla ve taşlarda basınca çalıştıklarından bu malzemeler içinde CDP modeli kullanılabilir. Bu çalışmada, homojenize duvarın modellenmesi için beton hasarlı plastisite modeli kullanılmıştır. CDP modeli kullanılarak yoğunluk, elastisite modülü, poisson oranı, basınç ve çekme kuvveti altındaki davranışına ek olarak bazı plastisite faktörleri belirlenmektedir. Homojenize duvarın kullanılan özellikleri Tablo 7.8’ de gösterilmiştir.

Makro modelleme kullanılarak homojenize edilen duvarın özelliklerini belirlemek için aşağıda verilen adımlar izlenmiştir (Naciri ve ark., 2021).

- 1.adım; taş ve harcın özellikleri belirlenmiştir.
- 2. adım; 750*300*300 mm boyutunda olan tek bir taş kullanılarak oluşturulan ve etrafı 10 mm kalınlığında harç ile çevrilmiş maket oluşturularak basınç ve çekme gerilmeleri altında Abaqus/explicit kullanılmıştır. Yığma birimler arasındaki derzler rijitliğin azaldığı, basınç ve çekme gerilmeleri altında kaymaların ve ayrılmaların meydana geldiği yüzeylerdir. Dolayısıyla yığma birim ve harcın birbirleri ile olan teması, etki altındaki davranışını önemli derecede etkilemektedir. Her ne kadar makro modellemede harcın varlığı yok sayılsa da uygun bir etkileşim özelliği tanımlanmalıdır.
- 3.adım; Oluşturulan maketten elde edilen sıkıştırma sonuçları daha sonra homojenize taşın özelliklerinin tanımlanmasında kullanılır.

Birinci Adım:

Plastisite parametreleri; Orta-düşük seviyeli düşey basınca maruz kalan yığma yapılar için makul olan genişleme açısı için 10° 'lik bir değer kullanılmıştır (Valente ve Milani, 2018). Bu değer, diğer araştırmacılar tarafından da yığma yapılar için uyarlanmıştır (Naciri ve ark., 2021). Diğer plastisite parametreleri için ise yaygın olarak kullanılan değerler kullanılmıştır (Tablo 7.1).

Tablo 7.1. Plastisite parametreleri

Plastisite parametreleri	
Kc	0,66667
Fb0/Fc0	1,16
Genişleme açısı	10
Eksantriklik	0,1
Viskozite parametresi	0,002

Taşın özellikleri; tez kapsamında kullanılan taşın türü travertendir. Taşın basınç dayanımı, çekme dayanımı ve yoğunluğu sırasıyla 3,325 MPa, 1,78 MPa ve 2.44 t/m^3 tür. Dört adet 0,8 m yüksekliğinde beton ayağı bulunmaktadır. 'tür. Poisson oranı 0,17 olarak alınmıştır (Naciri ve ark., 2021). Köprünün taşına benzer olduğu düşünülen Denizli traverten taşının elastisite modülü yaklaşık 15600 MPa' dır (Teymen, 2020). Bu değer aynı zamanda Denizli traverten taşının elastisite modülü değerleri aralığındadır (Çelik ve Çobanoğlu, 2019; Özkul ve ark., 2024), yani 7,92 GPa – 68,05 GPa' dır. Ancak bu değer, basınç dayanımı testi kullanılarak hesaplanan kısa vadeli sertliği temsil etmektedir. (Sobczyk ve diğerleri, 2024)'e göre, uzun vadeli sertlik, aşağıdaki denklem 7.1 kullanılarak,

$$E_{\text{longterm}} = E / (1 + \phi_{\infty}) \quad (7.1)$$

nihai sürünme katsayısı (ϕ_{∞}) yardımıyla dikkate alınabilir. Sürünme katsayısının değeri $\phi_{\infty} = 1$ olarak kabul edilir. Elastisite modülü için nihai değer, köprüye uygulanan yüklerin bazı ara eylemlere sahip olduğu göz önüne alındığında, ortalama değer denklem 7.2' deki

$$E_{\text{mean}} = 0.5(E + E_{\text{longterm}}) \quad (7.2)$$

gibi alınabilir. Buna göre;

$$E_{\text{longterm}} = 15600/(1+1) = 7800 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{mean}} = 0.5(15600/7800) = 11700 \text{ MPa}$$

elastisite modülünün nihai değeri $E = 11700 \text{ MPa}$ olarak hesaplanmıştır.

CDP' de, malzeme için basınç davranışı da tanımlanmalıdır, bu gerilme-şekil değiştirme eğrisi yardımıyla yapılabilir. (Sobczyk ve diğerleri, 2024)'e göre, bir duvarın gerilme-şekil değiştirme eğrisinin elastik eğrisi, orijinden %30-%75 değerine kadar devam eder. Bu çalışmada, taşın basınç dayanımının 0,75'i (39,325 MPa) olan gerilme değerine kadar basınç gerilimi ile gerinim arasında doğrusal bir ilişki incelenmiştir. Bundan sonra, ezilme gerilimine (basınç dayanımı) kadar doğrusal bir sertleşme ve ardından basitleştirilmiş bir doğrusal yumuşama eğrisi varsayılmıştır. Kırılma gerilmesindeki şekil değişime ve maksimum şekil değişime 1,5 kat ve 3 kat elastik şekil değiştirme ($0,75 \cdot \text{basınç dayanımı} / E_{\text{mean}}$) olarak kabul edilmiştir. Bu değerler, uyarlanan gerilme-şekil değiştirme eğrisi dikkate alınarak varsayılmıştır (Zahra ve diğerleri, 2021).

Sıkıştırma hasarı parametresi (dc) kullanılarak malzeme için sıkıştırma hasarı da tanımlanmıştır. Taşın çekme davranışı için, ağ boyutundan bağımsız sonuçlar elde etmek amacıyla gerilme-şekil değişime eğrisi yerine gerilme-çatlak açılma yer değiştirme eğrisi kullanılmıştır (Othman ve Marzouk, 2018). Maksimum gerilme mukavemetine (1,78 MPa) kadar doğrusal bir elastik eğri varsayılmıştır. Bundan sonra, çatlaklar başlar ve yumuşayan bir eğri ile sonuçlanır. (Naciri ve ark, 2021)'den uyarlanan üstel bir yumuşama eğrisi varsayılmıştır.

Aşağıdaki tablolarda taşın özellikleri, taşın basınç davranışı ve çekme davranışı ait bilgiler verilmiştir.

Tablo 7.2. Kullanılan taşın mekanik özellikleri

Taş	
Yoğunluk (t/mm^3)	2,44E-09
Elastisite Modülü (MPa)	11700
Basınç dayanımı (MPa)	39,325
Çekme dayanımı (MPa)	1,78
Poisson oranı	0,17

Tablo 7.3. Taşın basınç davranışı

Taşın Basınç Davranışı			
Akma gerilmesi (MPa)	Elastik olmayan gerinim	dc (sıkıştırma altında hasar parametresi)	Elastik olmayan gerinim
29,49375	0	0,00	0
39,325	0,0004	0,00	0,0004
13,095225	0,00644325	0,67	0,00644325

Tablo 7.4. Taşın çekme davranışı

Taşın Çekme Davranışı			
Akma gerilmesi (MPa)	Elastik olmayan yerdeğiştirme (mm)	dt (gerilim altında hasar parametresi)	Elastik olmayan yerdeğiştirme (mm)
1,78	0	0,00	0
0,92	0,02	0,49	0,02
0,47	0,04	0,73	0,04
0,24	0,06	0,86	0,06
0,13	0,08	0,93	0,08

Köprünün yapımında Horasan harcı kullanılmıştır. Harcın özellikleri ile ilgili bilgi eksikliği nedeniyle, özellikleri literatürde bildirilen sonuçlar kullanılarak makul bir varsayım yapılmıştır. Horasan harcının basınç dayanımı (Koçak, 2013) 'da bildirilen sonuçlara göre 2,4 MPa olarak kabul edilmiştir. Bu da (Cinemre, 2019)'da bildirilen değere (1,91 MPa) yakındır. Literatürden alınan bilgilere göre, çekme dayanımı, elastisite modülü, Poisson oranı ve yoğunluk sırasıyla 0.4 MPa, 100 MPa, 0.17 ve $2.0 t/m^3$ olarak kabul edilmiştir (Tablo 7.5). Harcın sıkıştırma gerilmesi-gerinim eğrisi ve gerilme-çatlak açılma yer değiştirme eğrisinin maksimum gerilmeye kadar doğrusal olduğu varsayılmıştır. Basınç dayanımı için doğrusal bir yumuşama eğrisi varsayılmıştır. (Naciri ve ark., 2021) 'de bildirilen sonuçları takiben çekme davranışı için üstel bir yumuşama eğrisi varsayılmıştır. Harç için basınç ve çekme hasarı parametreleri de tanımlanmıştır (Tablo 7.6).

Tablo 7.5. Horasan harcının mekanik özellikleri

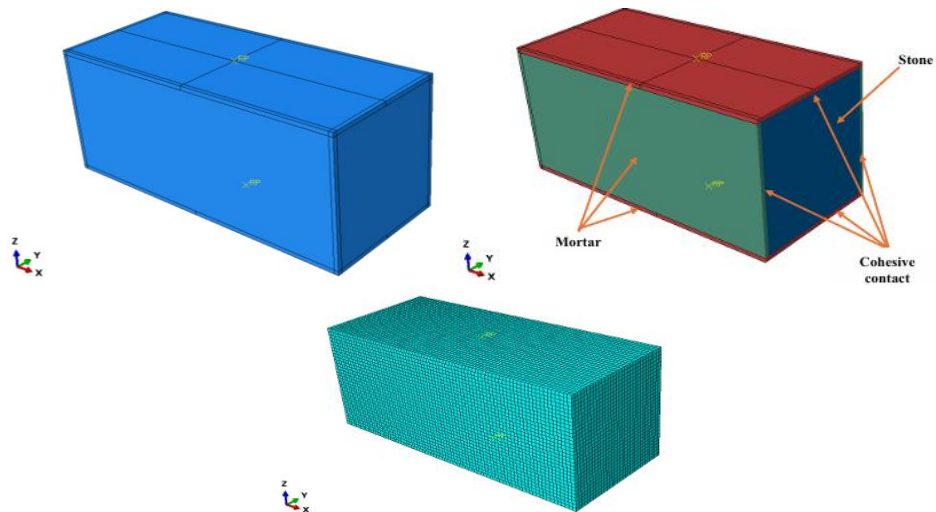
Horasan Harcı	
Yoğunluk (t/mm^3)	0,000000002
Elastisite Modülü (MPa)	2,4
Basınç dayanımı (MPa)	0,4
Çekme dayanımı (MPa)	100
Poisson oranı	0,17

Tablo 7.6. Horasan harcının basınç ve çekme davranışı

Harcın Basınç Davranışı			
Akma gerilmesi (MPa)	Elastik olmayan gerinim	dc (sıkıştırma altında hasar parametresi)	Elastik olmayan gerinim
2,40	0,000	0	0
1,52	0,015	0,37	0,0150
Harcın Çekme Davranışı			
Akma gerilmesi (MPa)	Elastik olmayan yerdeğiştirme (mm)	dt (gerilim altında hasar parametresi)	Elastik olmayan yerdeğiştirme (mm)
0,40	0	0,00	0
0,29	0,02	0,27	0,02
0,21	0,04	0,47	0,04
0,15	0,06	0,61	0,06
0,11	0,08	0,72	0,08

İkinci Adım:

Boyutu 10 mm olan ince bir yüzey kullanılarak bir model oluşturulmuş ve ağ örülmüştür. Oluşturulan model ve kullanılan temas özellikleri aşağıda gösterilmiştir (Şekil 7.6). Harç ve taş arasındaki temas özelliklerini tanımlamak için kohezif bir temas kullanılmıştır. Temas özelliği için teğetsel ve normal (sert temas) davranış da tanımlanmıştır. Maksimum nominal gerilme, hasar başlatma kriterini tanımlamak için kullanılmıştır. Ayrıca enerjide, hasar gelişimini tanımlamak için kullanılmıştır.

**Şekil 7.6.** Oluşturulan model

Tablo 7.7. Harç ile taş arasındaki etkileşimin özellikleri

Özellik	K_{nn} (N/mm ³)	$K_{ss} = K_{tt}$ (N/mm ³)	t_n (N/mm ²)	$t_{s1} = t_{s2}$ (N/mm ²)	G_1 (N/mm)	$G_2 = G_3$ (N/mm)	μ
Değer	70	30	0,2	0,40	0,02	0,04	0,75
Referans	(Mısır ve ark., 2018; Naciri ve ark., 2021)	(Naciri ve ark., 2021)	(Sobczyk ve ark., 2024)				(Mısır ve ark., 2018)

Üçüncü Adım:

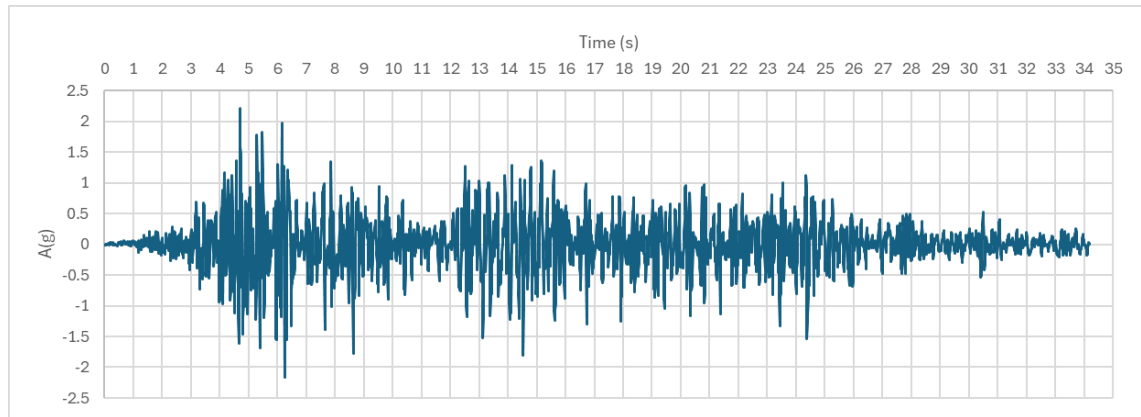
Homojenize edilmiş duvarın özellikleri aşağıda gösterilmiştir. Homojenize duvar için kullanılan plastisite parametreleri taş ve harç için kullanılanlara benzerdir.

Tablo 7.8. Homojenize edilmiş duvarın özellikleri

Basınç Dayanımı (MPa)	14,16	Çekme dayanımı (Mpa)	0,385
Nihai Elastisite Modülü (MPa)	1293,54	Poisson oranı	0,11
Yoğunluk (t/m^3)	2,38E-09		

7.3.3. Hesaplarda kullanılan deprem kaydı

Bu tez kapsamında Kahramanmaraş/Pazarcık depreminin kuzey-güney yönlü olan ivme kaydı kullanılmıştır. Bunun nedeni kuzey-güney yönlü olan ivmelerin en yüksek ivme genliğine sahip olmasıdır. Analiz için depremin ilk 34.2 saniyesi seçilmiştir çünkü bu saniye deprem ivmesinin ana kısmını içermektedir. Bu deprem köprüye y-ekseni doğrultusunda (uzun doğrultu) etki ettirilerek köprünün deprem etkisi altındaki davranışı incelenmiştir (Şekil 7.7).

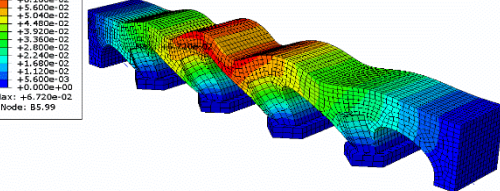
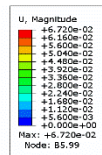
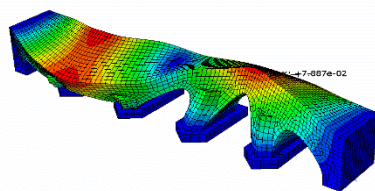
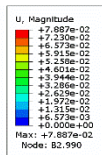
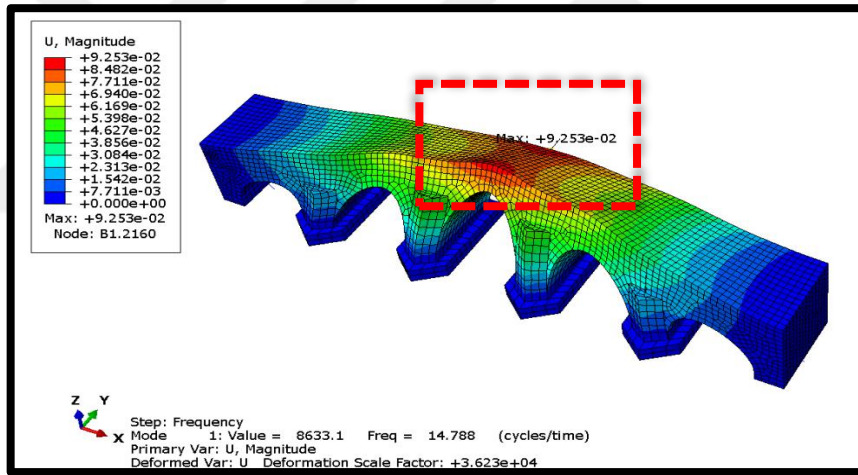
**Şekil 7.7.** Kahramanmaraş/Pazarcık depreminin ivme kaydı

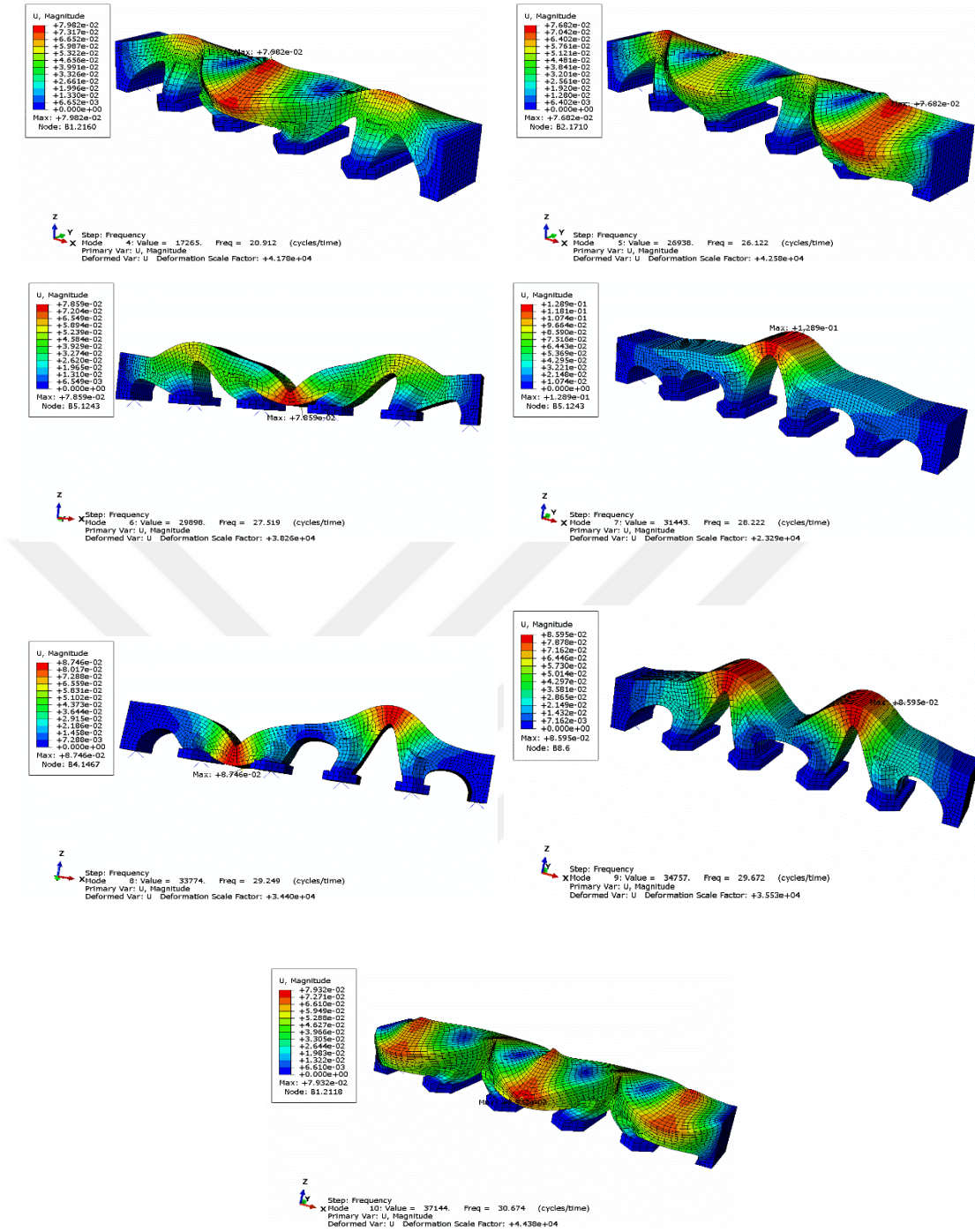
8. ARAŞIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

8.1. Tarihi MeraM Köprüsü'nün Modal Analiz Sonuçları

Tarihi MeraM Köprüsü'nün dinamik özelliklerini (frekans, mod şekli) ve titreşim davranışını anlamak için modal analiz yapılmıştır. Şekil 8.1' de köprü'nün ilk 10 modu için frekanslar, mod şekilleri ve yer değiştirmeler verilmiştir.

Modal analiz sonuçlarına göre yer değiştirmeler, köprü kemerlerinin orta bölgesinden başlayarak tempan duvarlara doğru ilerlemiştir. Yan duvarlarda ve ayaklarda, kemer bölgesindeki kadar büyük yer değiştirmeler görülmemiştir. Bu analiz sonucuna göre en büyük yer değiştirme, frekansın 14,788 Hz olduğu birinci modda 0,093 mm olarak gözlemlenmiştir. Bu yer değiştirme köprü'nün orta açıklığında bulunan kemerin orta bölgesinde meydana gelmiştir.

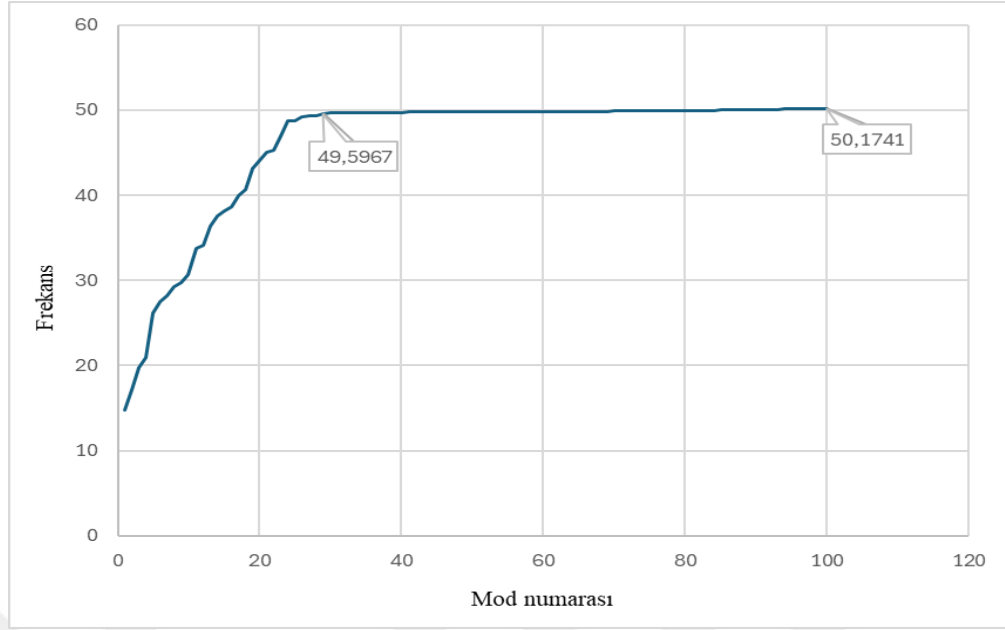




Şekil 8.1. Tarihi Meram Köprüsü' nün ilk 10 modu

8.1.1. Tarihi Meram Köprüsü'nün doğal frekansı

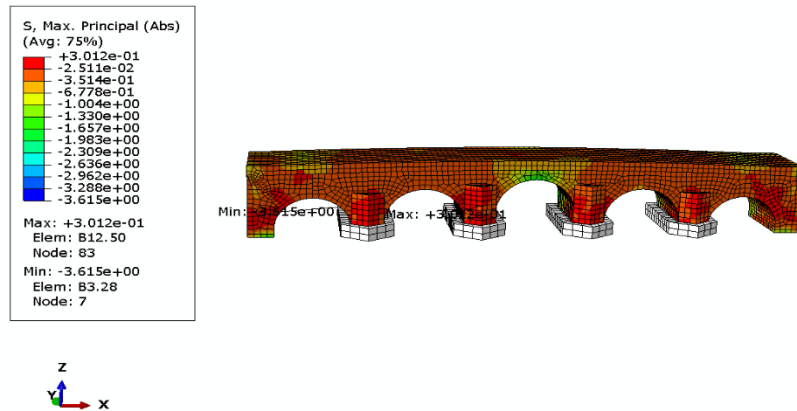
Şekil 8.2' de dışarıdan bir kuvvet uygulamadan köprünün kendi özelliklerine bağlı olarak ilk 100 modu için elde edilen doğal frekans değerlerinden oluşan frekans-mod numarası grafiği verilmiştir. Yapılan modal analiz sonuçlarına göre ilk 100 mod için elde edilen maksimum frekans değeri 50,17 Hz' dir.



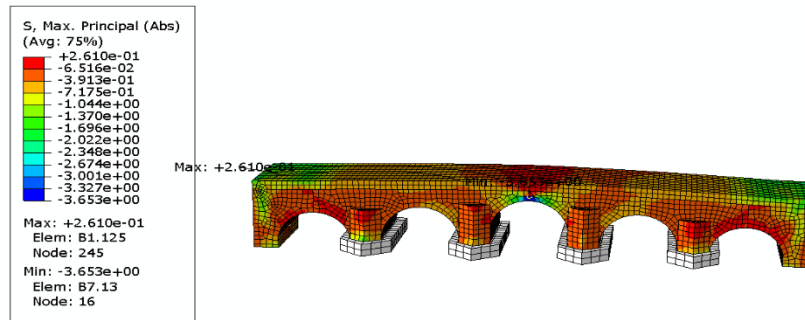
Şekil 8.2. Köprünün ilk 100 modu için doğal frekanslar

8.2. Tarihi MeraM Köprüsü'nün Deprem Analiz Sonuçları

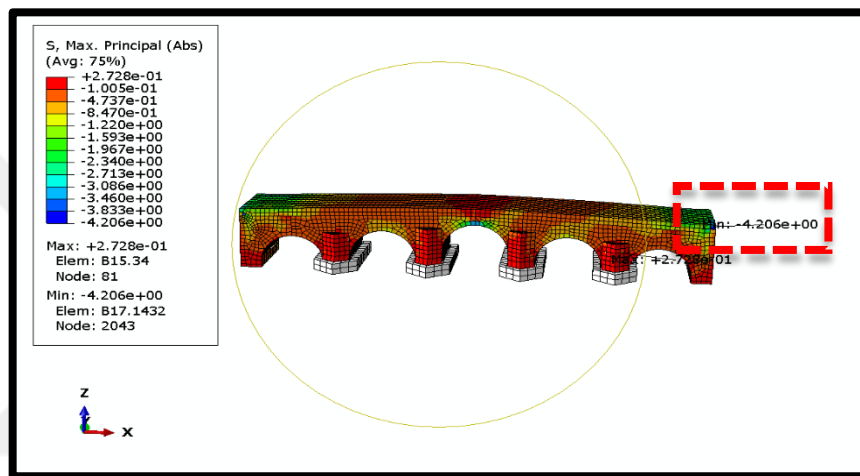
Şekil 8.3' te depremin ilk 34.2 saniyesi içinde yer alan her 5 saniyede köprüde oluşan asal gerilmeler görülmektedir. Asal gerilmeler selyaranlarda ve tempan duvarlarda meydana gelmiştir. Deprem analizi sonucuna göre 15. saniye içerisinde asal basınç gerilmesi köprünün tempan duvarının köşe noktasında meydana gelmiş olup değeri 4,21 MPa' dır. 25. saniye içerisinde ise asal çekme gerilmesi köprünün üst bölgesinde meydana gelmiş olup değeri 0,33 MPa'dır.



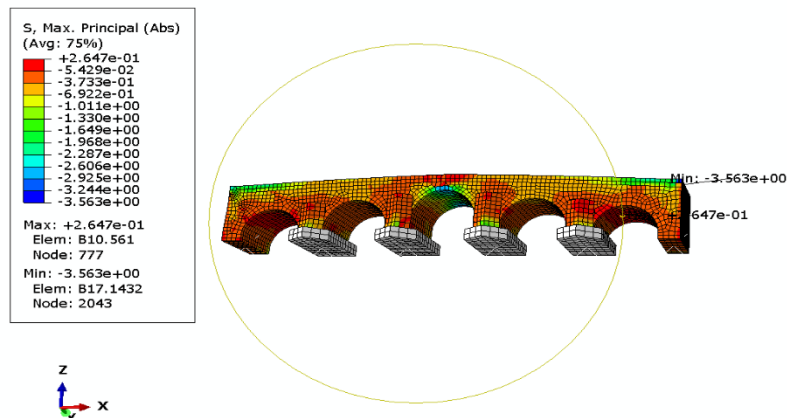
5. Saniye



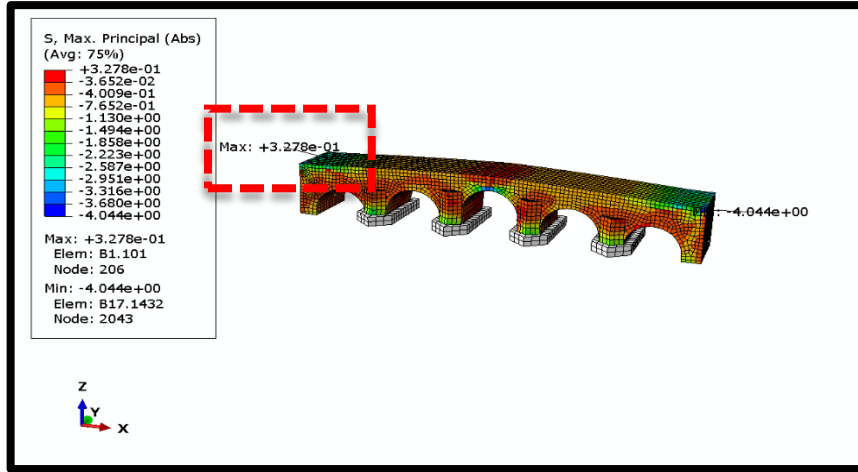
10. Saniye



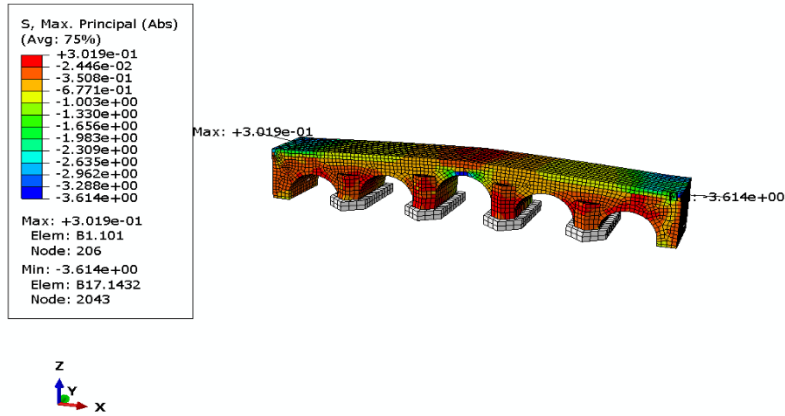
15. Saniye



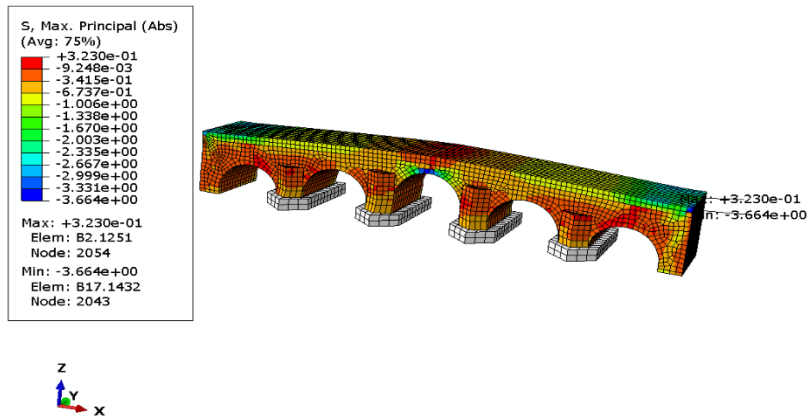
20. Saniye



25. Saniye



30. Saniye

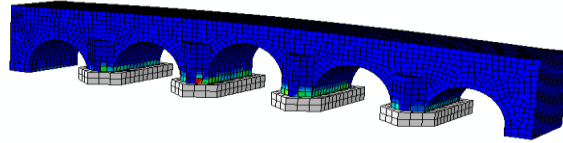
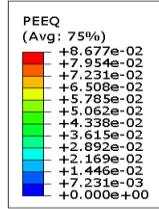


34,2. Saniye

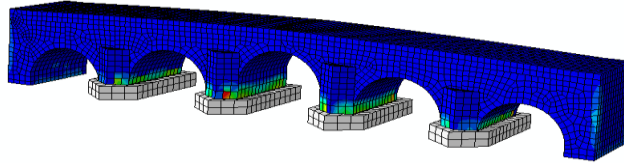
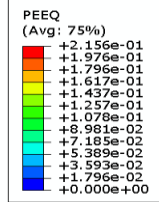
Şekil 8.3.Köprüde oluşan asal gerilmeler

Şekil 8.4' te depremin ilk 34.2 saniyesi içinde yer alan her 5 saniyede köprüde oluşan maksimum (PEEQ) eşdeğer plastik basınç birim şekil değiştirmeleri görülmektedir. PEEQ, basınç etkisi altında elastik sınırın aşıldıktan sonra ne kadar plastik deformasyonun gerçekleştiğini gösterir. Özellikle hasar analizlerinde, yorulma ömrünün

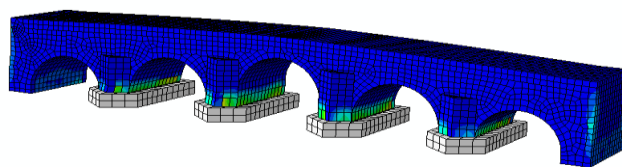
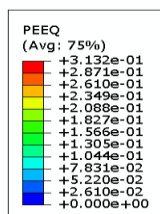
tahmininde ve plastik deformasyonun yoğunlaştığı bölgelerin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Maksimum eşdeğer plastik basınç birim şekil değiştirmeleri köprünün kemer ile ayak bağlantı bölgelerinde meydana gelmiştir. Yapılan deprem analiz sonuçlarına göre Şekil 8.5' te zamana bağlı olarak artan PEEQ-Zaman grafiğinde maksimum eşdeğer plastik basınç birim şekil değiştirme değeri 34,2. saniye içerisinde meydana gelmiş olup değeri 0,52'dir.



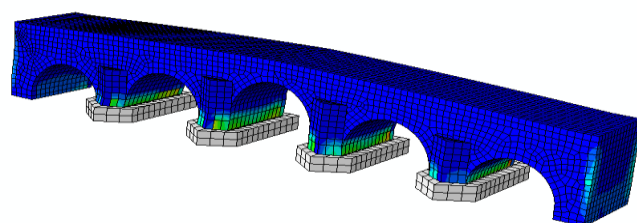
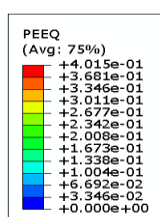
5. Saniye



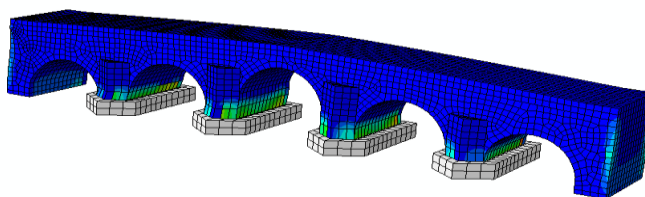
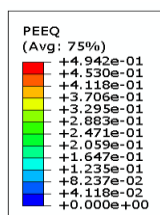
10. Saniye



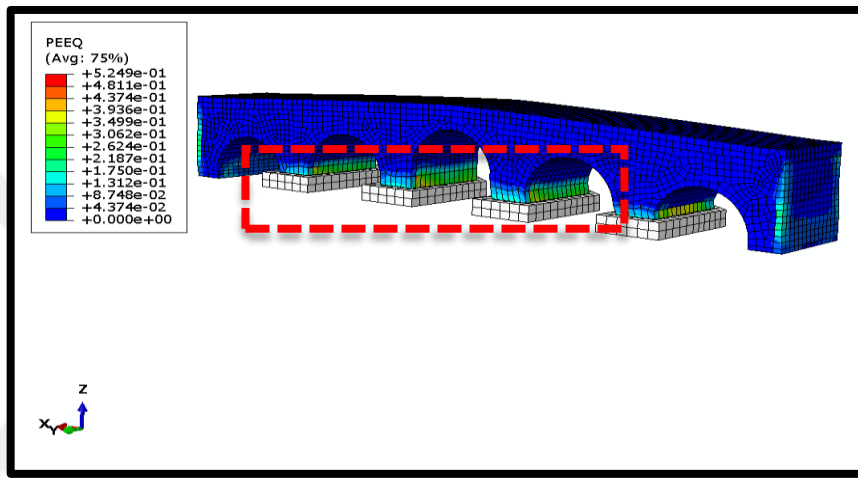
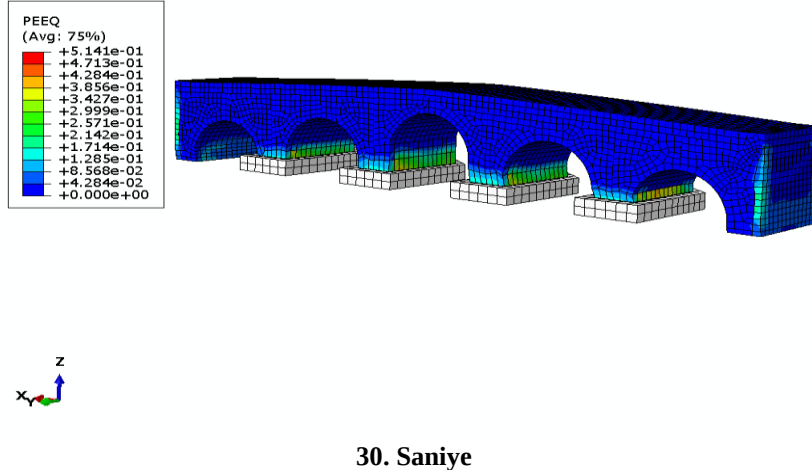
15. Saniye



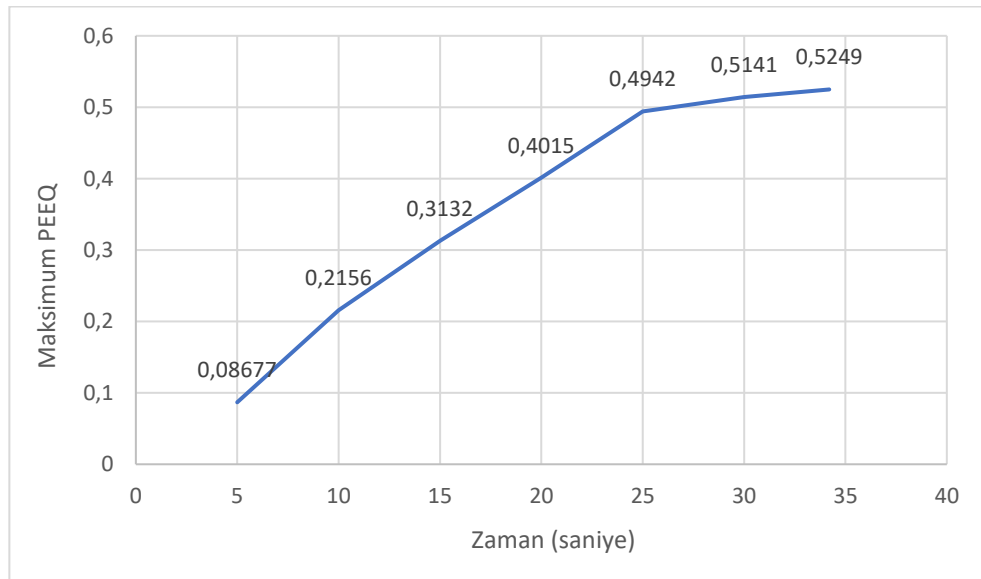
20. Saniye



25. Saniye

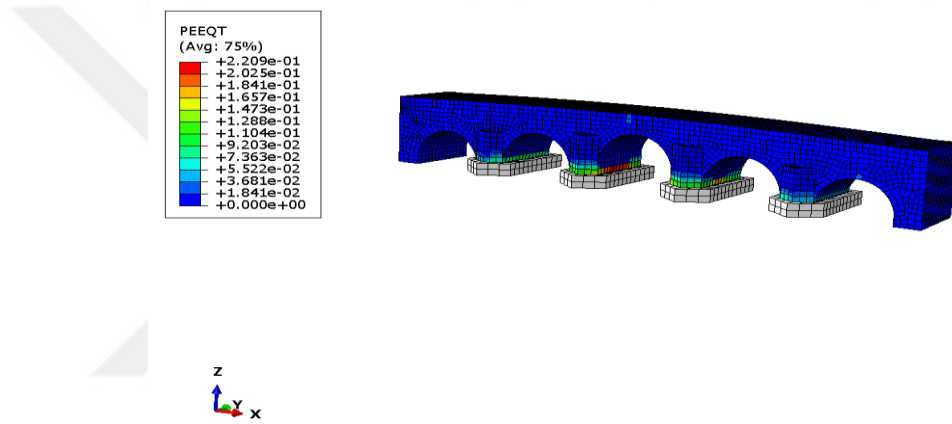


Şekil 8.4. Köprüde oluşan maksimum (PEEQ) eşdeğer plastik gerilme

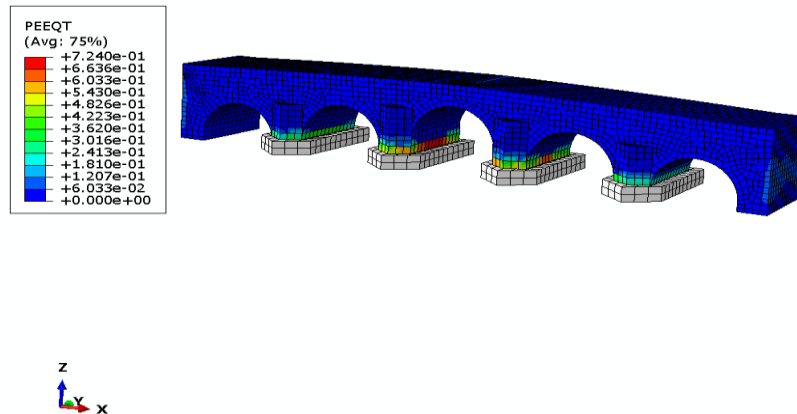


Şekil 8.5. Deprem analizi sonucuna göre ilk 34,2 saniye içerisinde oluşan maksimum PEEQ

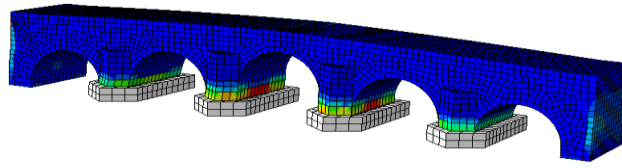
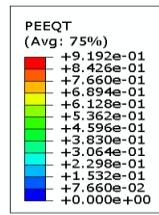
Şekil 8.6’ da depremin ilk 34.2 saniyesi içinde yer alan her 5 saniyede köprüde maksimum (PEEQT) çekme eşdeğer plastik birim şekil değiştirmeleri görülmektedir. PEEQT, çekme etkisi altındayken oluşan plastik deformasyonu ifade etmektedir. Genellikle çekme kuvveti etkisi altındaki kritik bölgelerin analizinde ve hangi bölgelerde çatlak ya da hasarın meydana gelebileceğinin tahmin edilmesinde kullanılmaktadır. Maksimum çekme eşdeğer plastik birim şekil değiştirmeleri köprünün orta açıklığındaki kemerin ayak ile birleşim noktalarında meydana gelmiştir. Şekil 8.7’ de zamana bağlı olarak artan PEEQT-Zaman grafiğinde maksimum çekme eşdeğer plastik birim şekil değiştirme değeri 34,2. saniye içerisinde meydana gelmiş olup değeri 1,41’dir.



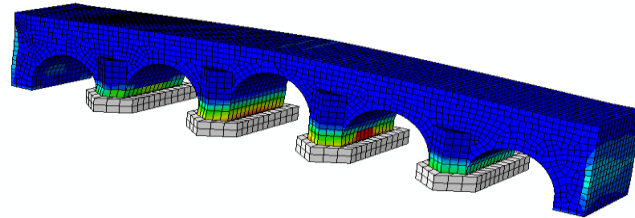
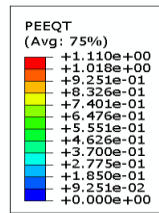
5. Saniye



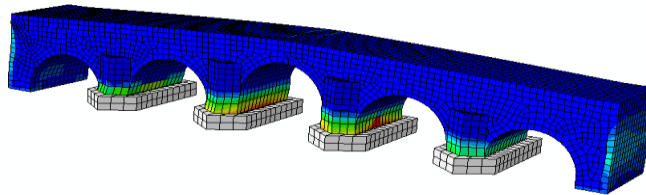
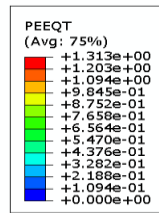
10. Saniye



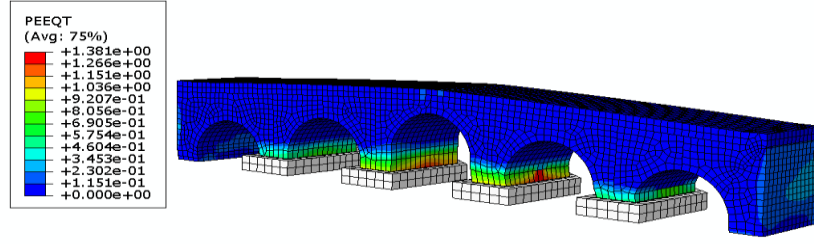
15. Saniye



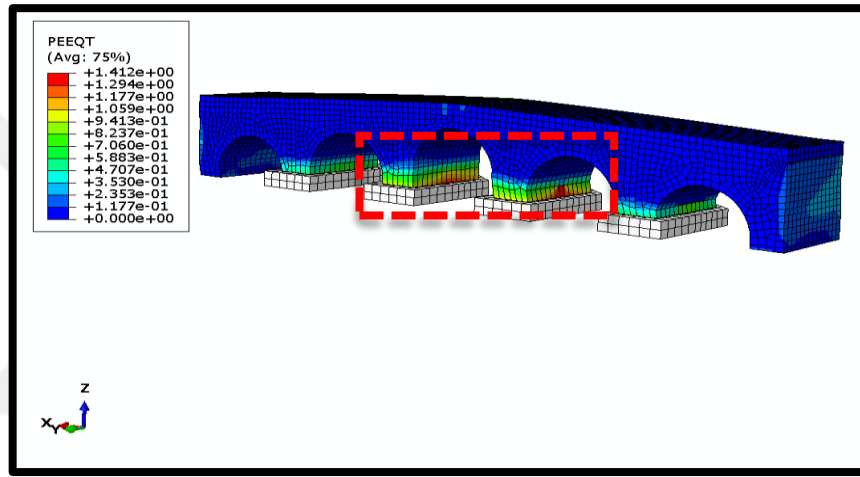
20. Saniye



25. Saniye

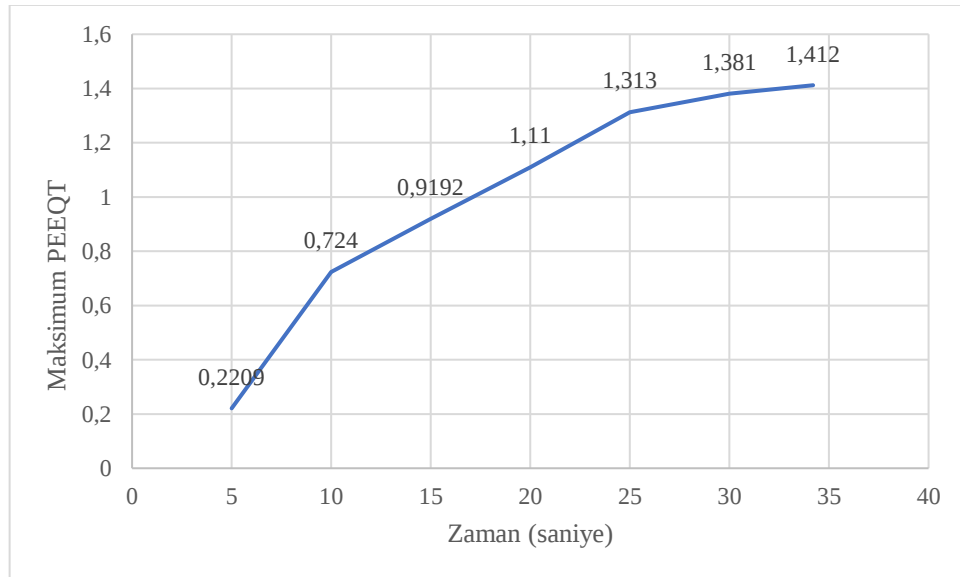


30. Saniye



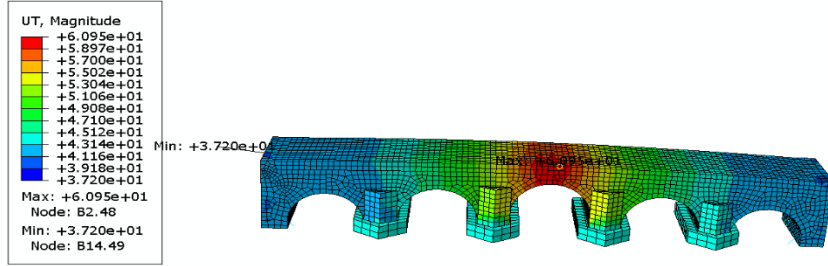
34,2. Saniye

Şekil 8.6. Köprüde oluşan maksimum (PEEQT) çekme eşdeğer plastik birim şekil değiştirme

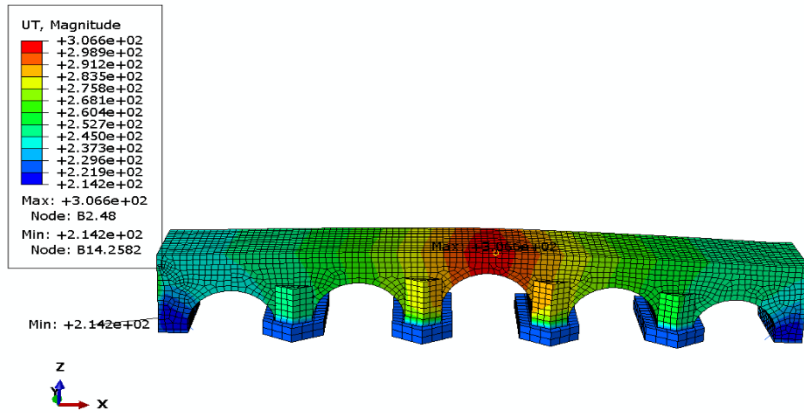


Şekil 8.7. Deprem analizi sonucuna göre ilk 34,2 saniye içerisinde oluşan maksimum PEEQT

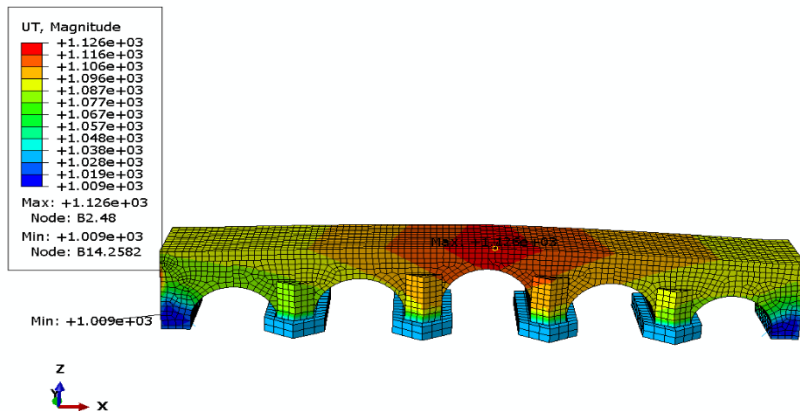
Şekil 8.8’ da depremin ilk 34.2 saniyesi içinde yer alan her 5 saniyede köprüde oluşan yer değiştirmeler görülmektedir. Yer değiştirme kemerin orta noktasından başlayarak tempan duvarlara doğru ilerlemiştir. Köprü ayağında meydana gelen yer değiştirmeler kemer hizasındaki yer değiştirme değerlerinden daha küçüktür. Analiz sonucunda 25. saniye içerisinde köprünün orta kemerinde meydana gelen yer değiştirme 855,7 mm’ dir.



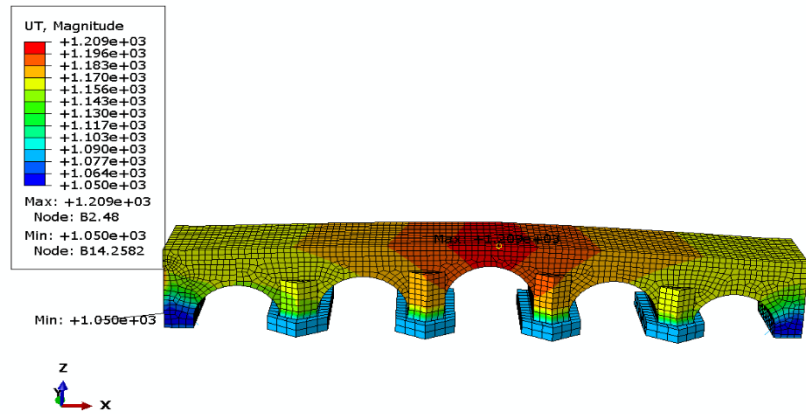
5. Saniye



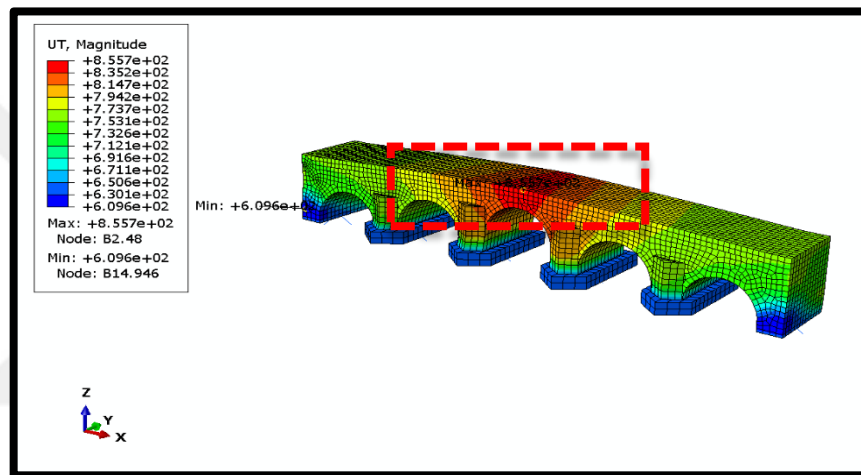
10. Saniye



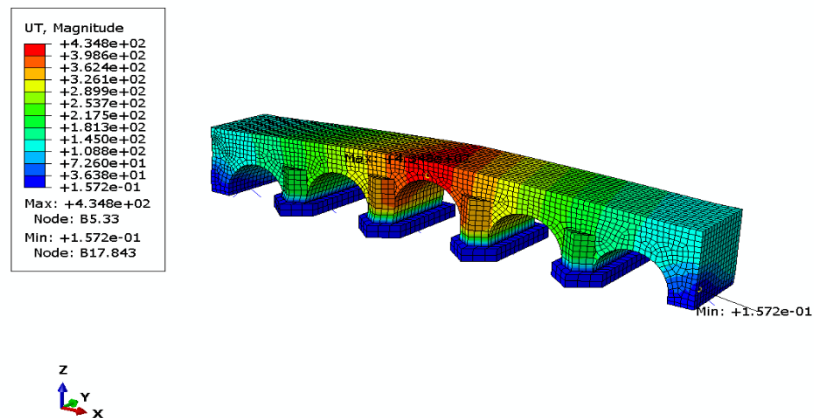
15. Saniye



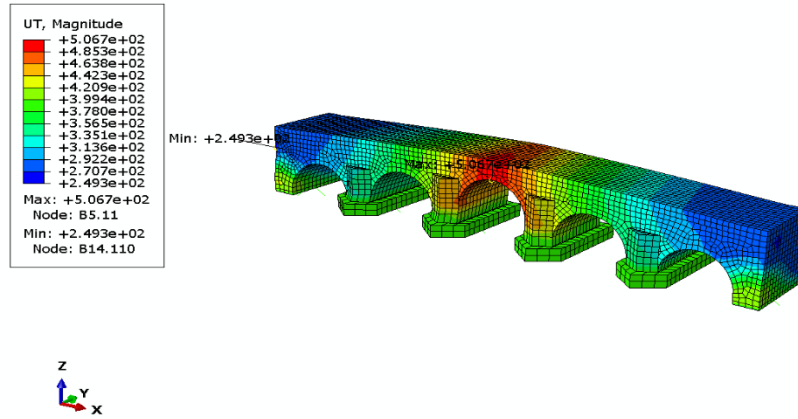
20. Saniye



25. Saniye



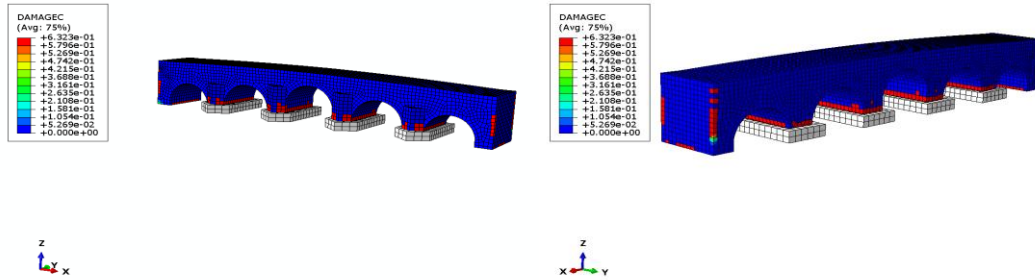
30. Saniye



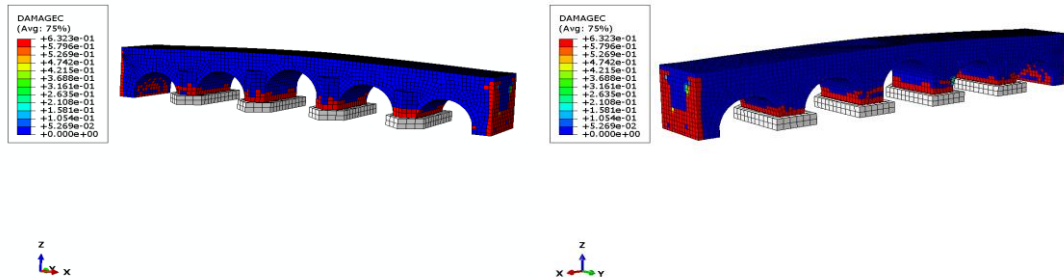
34.2. Saniye

Şekil 8.8. Köprüde oluşan yer değiştirme

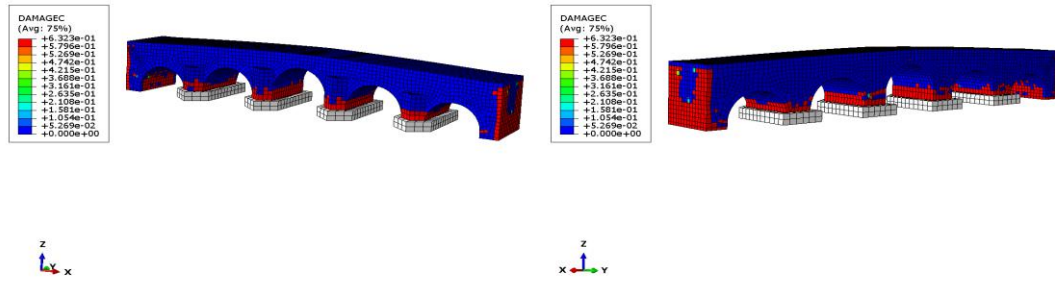
Şekil 8.9' da depremin ilk 34.2 saniyesi içinde yer alan her 5 saniyede köprüde basınç etkisi altında köprüde oluşan hasarlar görülmektedir. Köprü'nün memba ve mansap kısımları incelendiğinde basınç etkisi ile oluşan hasarların; kemerler ile ayakların bağlantı noktalarında ve köprü'nün yan duvarlarında meydana geldiği görülmektedir.



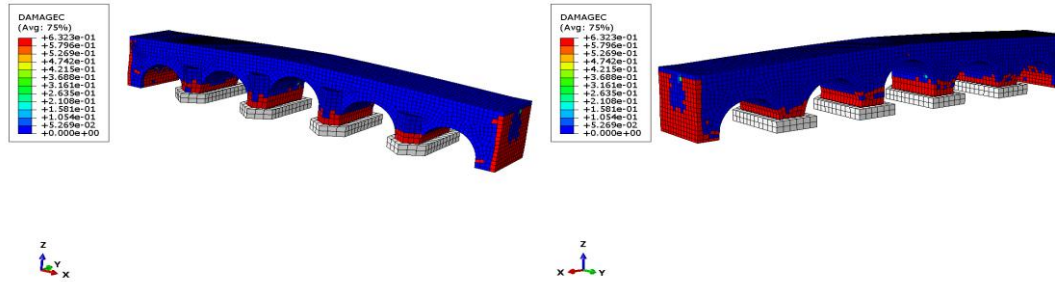
5. Saniye



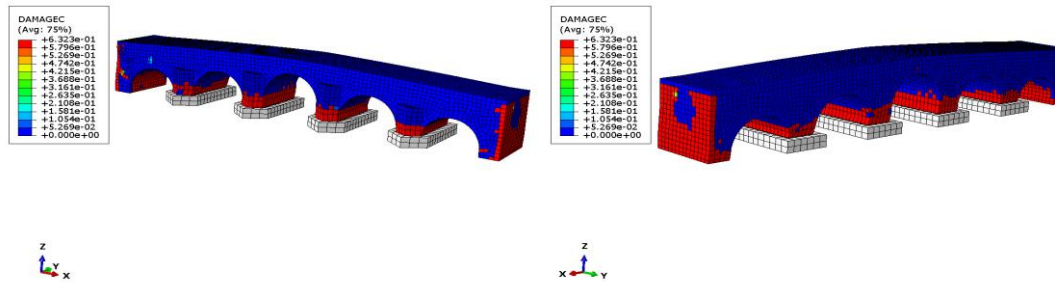
10. Saniye



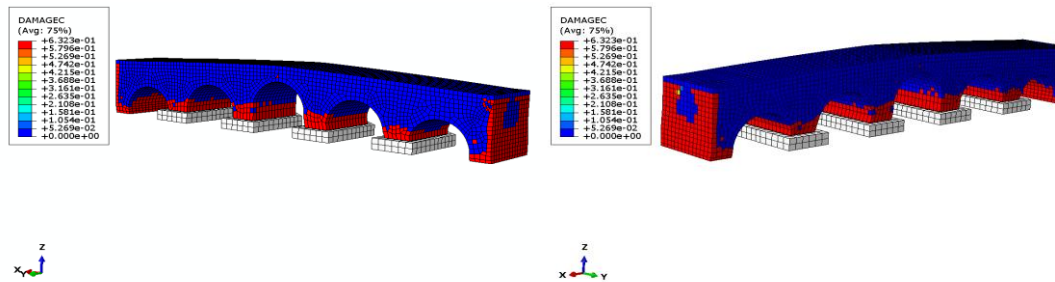
15. Saniye



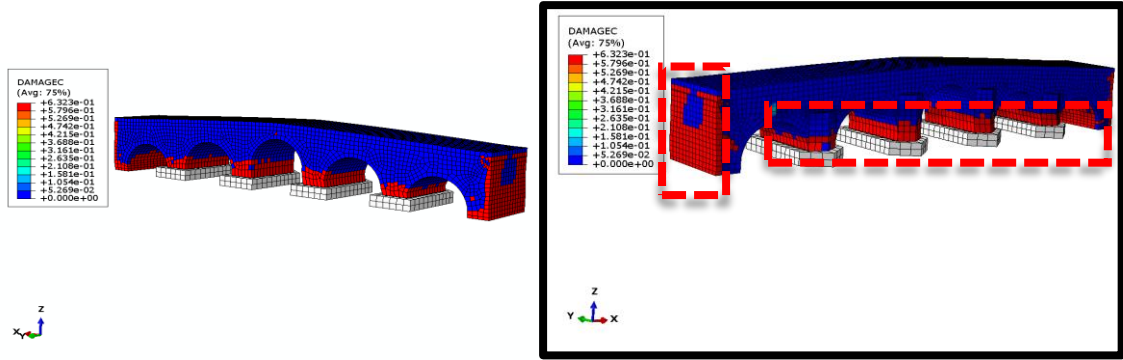
20. Saniye



25. Saniye



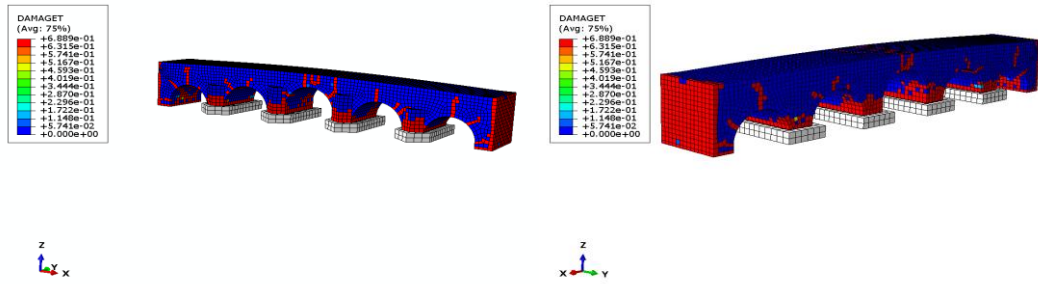
30. Saniye



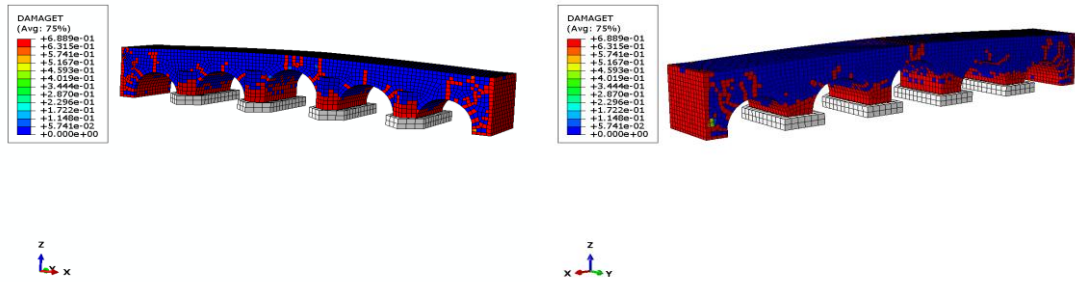
34.2. Saniye

Şekil 8.9. Köprüde basınç etkisi altında köprüde oluşan hasarlar

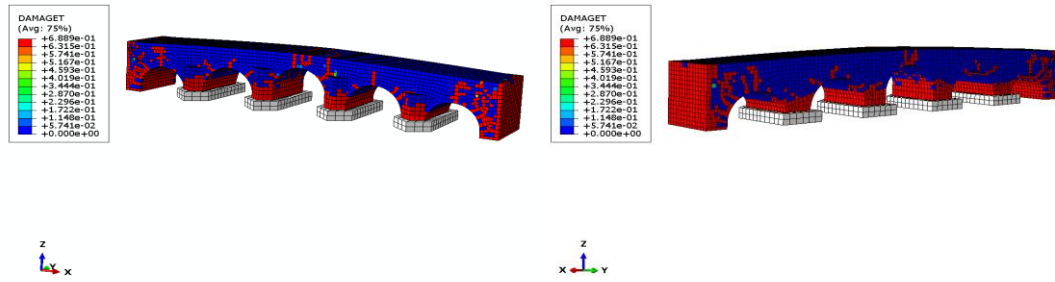
Şekil 8.10' da depremin ilk 34.2 saniyesi içinde yer alan her 5 saniyede köprüde çekme etkisi altında köprüde oluşan hasarlar görülmektedir. Köprü'nün memba ve mansap kısımları incelendiğinde çekme etkisi ile oluşan hasarların; kemerler ile ayakların bağlantı noktalarında, köprü'nün yan duvarlarında ve kemerlerde meydana geldiği görülmektedir.



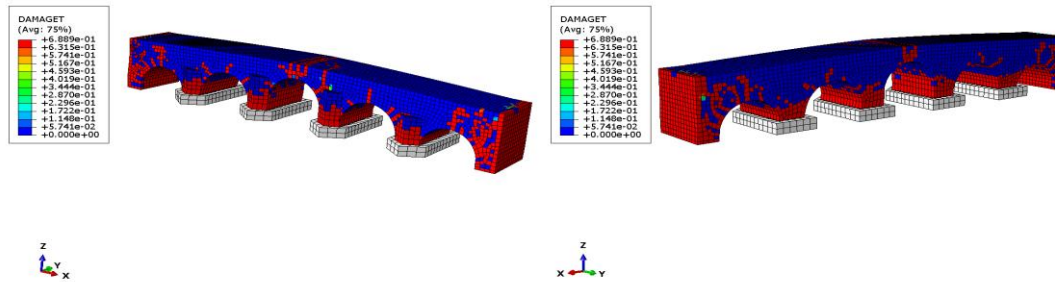
5. Saniye



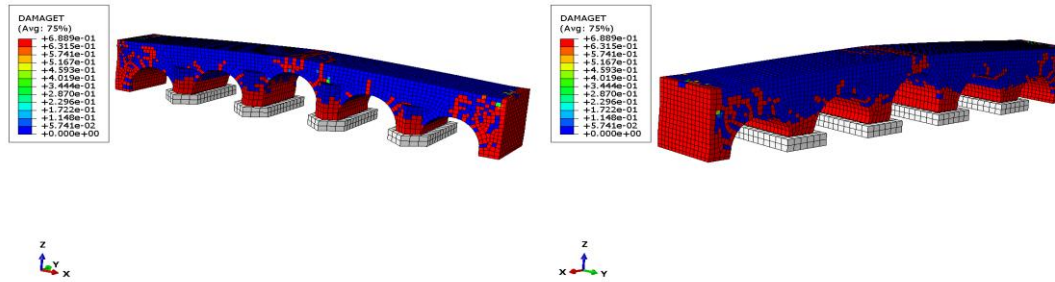
10. Saniye



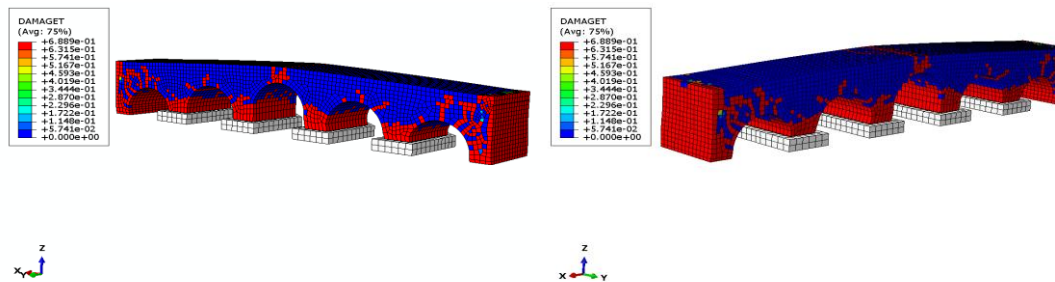
15. Saniye



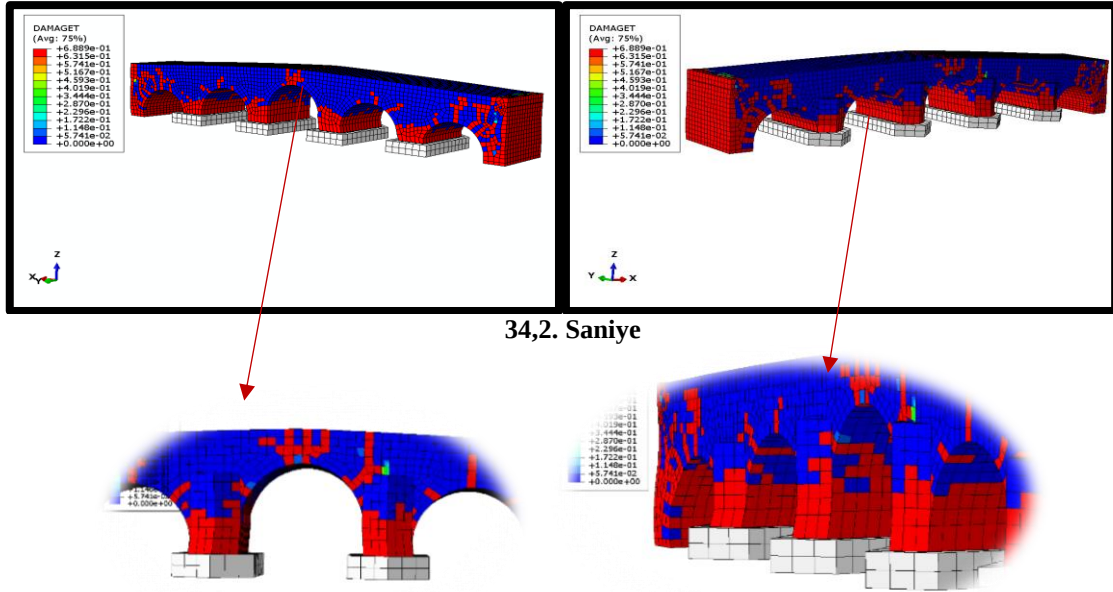
20. Saniye



25. Saniye

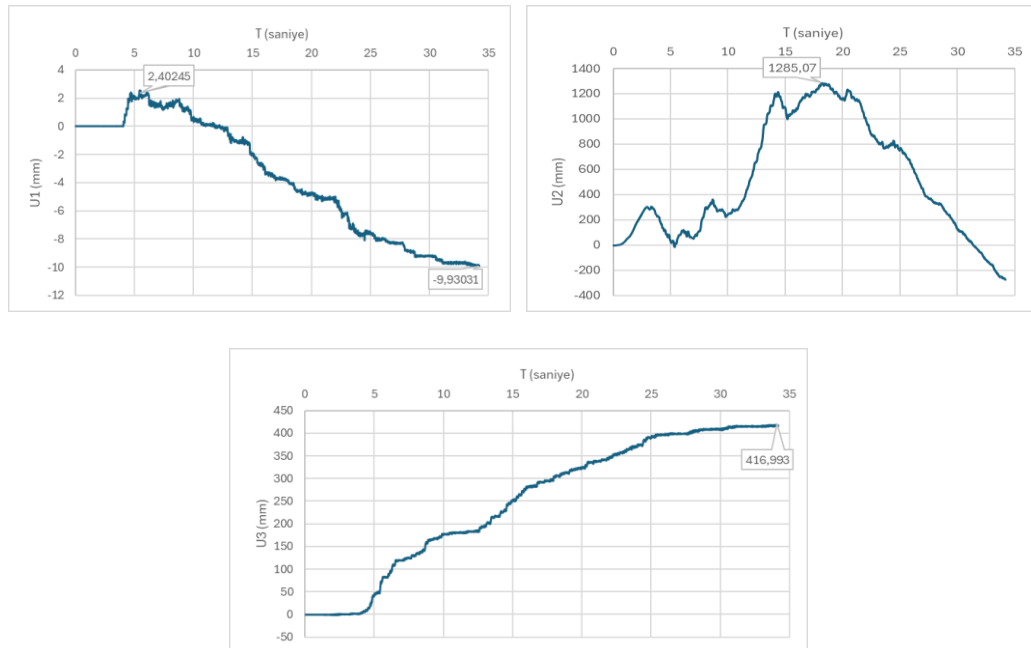


30. Saniye



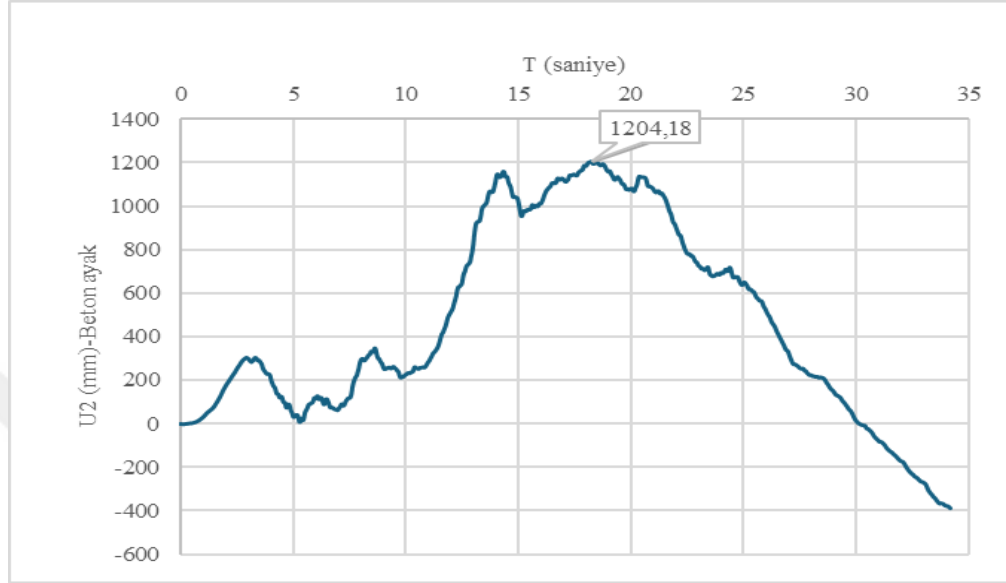
Şekil 8.10. Köprüde çekme etkisi altında köprüde oluşan hasarlar

Şekil 8.11' de köprünün en yüksek noktasında (üst plakanın merkezinde) maksimum yer değiştirme değerleri gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde x yönünde 9,93 mm'lik, y yönünde 1285,07 mm'lik ve z yönünde 416,99 mm'lik maksimum yer değiştirmeler gözlenmiştir. Dolayısıyla deprem kuvveti altında köprünün en yüksek noktasındaki maksimum yer değiştirme y eksenini doğrultusunda gerçekleşmiştir.



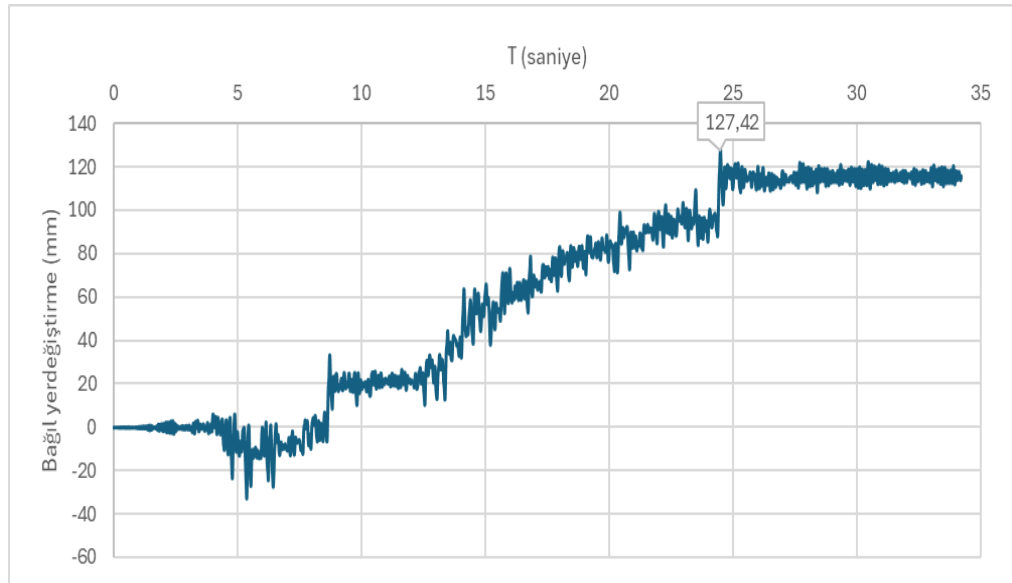
Şekil 8.11. Köprünün en yüksek noktasında (üst plakanın merkezinde) maksimum yer değiştirme değerleri

Şekil 8.12 de köprünün beton ayağında y yönü doğrultusunda meydana gelen maksimum yer değiştirme gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde beton ayakta y yönünde meydana gelen yer değiştirme 1204 mm’ dir.



Şekil 8.12. Beton ayakta y yönünde meydana gelen maksimum yer değiştirme

Şekil 8.13’ de köprünün en yüksek noktası ile köprünün tabanı arasındaki y yönündeki bağıl yer değiştirme verilmiştir. Elde edilen grafik incelendiğinde maksimum bağıl yer değiştirmenin 127, 42 mm olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 8.13. Köprünün en yüksek noktası ile köprünün tabanı arasındaki y yönündeki bağıl yer değiştirme

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

9.1. Sonuçlar

Bu tez kapsamında ülkemizde meydana gelen depremlerin tarihi yığma köprülerimiz üzerindeki etkileri araştırılarak, gerek kültürel gerekse maddi ve manevi kayıplarımızı önlemek ve bir öngöründe bulunmayı hedeflemek amacıyla tarihi bir köprü üzerinde sayısal çalışma yapılmıştır.

Çalışmada beş açıklıklı Tarihi Meram Köprüsü referans alınmış ve Abaqus sonlu eleman programı kullanılarak analizi gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında hem modal analiz hem de deprem ivme kayıtları kullanılarak deprem analizi yapılmıştır. Meram köprüsü büyük boyutlu yapısal sisteme sahip olduğu için yığma birimi ve harcı kompozit olarak homojenize edilmiştir. Ayrıca yığma birimlerin, beton gibi gevrek bir davranışa sahip olmasının yanı sıra basınç dayanımının çekme dayanımından daha fazla olması nedeniyle beton için kullanılan beton hasar plastisite (CDP) malzeme modeli, yığma köprünün doğrusal olmayan davranışını incelemek için kullanılmıştır.

Yapının sismik etki altında nasıl bir davranış sergilediğini gözlemleyebilmek için çalışmada modal analiz yapılmıştır. Bu modal analiz sonucuna göre yer değiştirmeler, köprü kemerlerinin orta bölgesinden başlayarak tempan duvarlara doğru ilerlemiştir. Yan duvarlarda ve ayaklarda, kemer bölgesindeki kadar büyük yer değiştirmeler görülmemiştir. Bu analiz sonucuna göre en büyük yer değiştirme, frekansın 14,788 Hz olduğu birinci modda 0,093 mm olarak gözlemlenmiştir. Bu yer değiştirme köprünün orta açıklığında bulunan kemerin orta bölgesinde meydana gelmiştir.

Yapılan modal analiz sonuçlarına göre ilk 100 mod için elde edilen maksimum frekans değeri 50,17 Hz' dir.

Deprem analizinde; seçilmiş olan deprem ivme kaydının ilk 34,2 saniyesi kullanılarak her 5 saniye de bir köprünün deprem etkisi altında gösterdikleri davranışlar incelenmiştir.

Asal gerilmeler selyaranlarda ve tempan duvarlarda meydana gelmiştir. Deprem analizi sonucuna göre 15. saniye içerisinde asal basınç gerilmeleri köprünün tempan duvarının köşe noktasında meydana gelmiş olup değeri 4,21 MPa' dır. 25. saniye içerisinde ise asal çekme gerilmeleri köprünün üst bölgesinde meydana gelmiş olup değeri 0,33 MPa'dır.

Yapılan deprem analiz sonuçlarına göre maksimum eşdeğer plastik basınç birim şekil değiştirmeleri köprünün kemer ile ayak bağlantı bölgelerinde meydana gelmiştir. 34,2. saniye içerisinde meydana gelmiş olan eşdeğer plastik basınç birim şekil değiştirme değeri 0,52'dir.

Yapılan deprem analiz sonuçlarına göre maksimum eşdeğer plastik çekme birim şekil değiştirmeleri köprünün orta açıklığındaki kemerin ayak ile birleşim noktalarında meydana gelmiştir. 34,2. saniye içerisinde meydana gelmiş olan eşdeğer plastik basınç birim şekil değiştirme değeri 0,41'dir.

Yer değiştirme kemerin orta noktasından başlayarak tempan duvarlara doğru ilerlemiştir. Köprü ayağında meydana gelen yer değiştirmeler kemer hizasındaki yer değiştirme değerlerinden daha küçüktür. Analiz sonucunda 25. saniye içerisinde köprünün orta kemerinde meydana gelen yer değiştirme 855,7 mm'dir.

Deprem analizi sonucunda, köprünün memba ve mansap kısımları incelendiğinde basınç etkisi ile oluşan hasarların; kemerler ile ayakların bağlantı noktalarında ve köprünün yan duvarlarında meydana geldiği görülmektedir.

Deprem analizi sonucunda, köprünün memba ve mansap kısımları incelendiğinde çekme etkisi ile oluşan hasarların; kemerler ile ayakların bağlantı noktalarında, köprünün yan duvarlarında ve kemerlerde meydana geldiği görülmektedir. Kemerler basınca çalıştığı için çekme kuvveti altında gerilmeler gözlemlenmiştir.

Deprem analizi sonucunda oluşturulan yer değiştirme grafikleri incelendiğinde x yönünde 2,4 mm'lik, y yönünde 1285,07 mm'lik ve z yönünde 416,99 mm'lik maksimum yer değiştirmeler gözlenmiştir. Dolayısıyla deprem kuvveti altında köprünün en yüksek noktasındaki maksimum yer değiştirme y eksenini doğrultusunda gerçekleşmiştir.

Beton ayaktaki yer değiştirme için oluşturulan grafik incelendiğinde, beton ayakta y yönünde meydana gelen yer değiştirme 1204 mm'dir.

Ayrıca maksimum bağıl yer değiştirmenin 127,42 mm olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak yapılan modal ve deprem analizlerinde maksimum yer değiştirmelerin kemerlerde yoğunlaştığı, gerilmelerin ise kemerler ile ayak bağlantı noktalarında (mesnetlerde) meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bağıl yer değiştirme değerinin büyük olması, basınç ve çekme gerilmeleri altında mesnet bölgelerinde yoğunlaşan gerilmeler olası deprem durumunda tarihi köprünün hasar görebileceğini desteklemektedir.

Bu sonuçlara göre ülkemizde özellikle büyük depremlerin meydana gelebileceği yerlerde var olan ve çalışmamızda referans aldığımız Meram Köprüsü'ne benzer

malzeme özellikleri olan Uzunköprü, Eğri Köprü, Palu Köprüsü ve Taş Köprü gibi birçok yığma köprülerimizin kemerleri ve mesnet bölgeleri kontrol edilerek, gerekli analizler gerçekleştirilmelidir. Gerekli durumlarda FRP, çelik takviyeler, beton takviyeleri, harç ve taş yenileme gibi güçlendirme çalışmalarının yapılması hem bu tür köprülerin yıkılmaması için hem de kültürel mirasımızı korumak için gereklidir.

9.2. Öneriler

Bu çalışmada Kahramanmaraş depreminin ivme kayıtları kullanılarak deprem analizi yapılmıştır. Diğer çalışmalarda bu çalışmada kullanılan ivme kaydı referans alınarak daha büyük ve daha küçük sismik tepkiler altında tarihi köprünün nasıl davranış sergilediği incelenip, karşılaştırılabilir.

Tez kapsamında herhangi bir güçlendirme tekniği uygulanmamıştır. Diğer çalışmalarda özellikle kemer bölgelerinde meydana gelen gerilmeler dikkate alınarak, güçlendirme ile bu gerilmelerin azaltılıp azaltılamayacağı değerlendirilebilir.

Abaqus programı çok kapsamlı bir yazılım olduğu için yapılan tez çalışmasındaki gibi modal ve deprem analizlerinin yanında suyun köprü ayağında meydana getireceği etkilerde araştırılabilir.

Diğer çalışmalarda yapı ve zemin etkileşimi incelenerek, zeminin köprü davranışına etkisi araştırılabilir.

Aynı köprü referans alınarak, sadece mekanik özelliklerinin farklı olduğu başka köprüler modellenerek mekanik özelliklerin köprü davranışına etkisi araştırılabilir.

Aynı köprü farklı bir sonlu eleman programı ile analiz edilerek sonuçlar karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Addessi, D., Liberatore, D., and Nocera, M., 2022, Damaging behavior of masonry arch bridges: analysis of ‘ponte delle torri’ in spoletto, italy. *Journal of Earthquake Engineering*, 26(1), 449–474.
- Adsız, E., Sayın, E. And Özmen, A., 2024, Yığma kemerli bir köprünün yapay deprem kayıtları altında sismik analizi, *DUJE*, 15(3), 677–688.
- Akdeniz, Ö. 2011, Tarihi yapıların lineer olmayan dinamik analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 23.
- Akın, K. 2020, Tarihi yığma köprülerin farklı sönüm oranları altında sismik tepkisinin değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 23-28.
- Akın, K., Sayın, E. and Özmen, A., 2022, Farklı sönüm tipleri altında tarihi yığma köprülerin sismik tepkilerinin değerlendirilmesi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 34(1), 45-59.
- Aktaş, E. 2010, Öngerilme kirişli bir köprü tasarımı ve performansının değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1.
- Altunışık, A. C., Arslan, M. E., Özocak, A., İpek, M., Sunca, F. and Şen, F., 2023, *Kahramanmaraş depremleri ve artçılarının, saha gözlemlerini, yapısal hasarları ve ileriye yönelik önerileri içeren değerlendirme raporu*, *KTÜ, Türkiye*, 104-105
- Alpaslan, E., Dinç, B., Karaca, Z. and Köktan, F. B. U., 2017, Tek açıklıklı tarihi bir yığma köprünün modal parametrelerinin araştırılması, *4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Eskişehir.
- Atabey, V., 2020, Köprüler hakkında genel bilgiler, <https://volkanatabey.com.tr/kopruler-hakkinda-genel-bilgiler/> [Ziyaret Tarihi: 15 Aralık 2024].
- Aydın, H. 2021, Çelik köprülerde diyagonal elemanların dinamik parametrelere etkisinin operasyonel model analiz yöntemi ile belirlenmesi, Doktora Tezi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Samsun, 60-61.
- Azar, A. B. and Sarı, A., 2024, Structural failure of masonry arch bridges subjected to seismic action, *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 57(1), 2093-2322.
- Batar, O. Ş. 2019, Tarihi yığma taş yapıların bilgisayar destekli analizi: Ayvalıkemer (Sillyon) köprüsü yapısı örneği, Yüksek Lisans Tezi, *Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antalya, 14-15.
- Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Sevim, B. and Türker, T., 2009, Kömürhan köprüsünün sonlu eleman model iyileştirilmesi, *İMO Teknik Dergi*, 307, 4675–4700.

- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A. C., Sevim, B., Şahin, A. and Özcan, D. M., 2010, Binaların dinamik parametrelerinin operasyonel modal analiz yöntemiyle belirlenmesi, *İMO Teknik Dergi*, 337, 5185–5205.
- Birdal, F. 2015, Betonarme yapıların sismik davranışlarının sarsma tablasında deneysel olarak incelenmesi ve analitik olarak modellenmesi, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 100.
- Birinci, F. 2010, Taş kemer köprülerin sonlu eleman modellerinin operasyonel modal analiz yöntemiyle iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 10.
- Boru, E. O. and Kutanis, M., 2015, Çevrel titreşim kayıtları kullanılarak yapı dinamik parametrelerinin belirlenmesi, *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 19(1), 59–66.
- Bulut, Ş. 2020, AASHTO LRFD’ ye göre betonarme bir köprünün tasarımı ve doğrusal olmayan statik itme yöntemi ile performansının belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2.
- Celasun, H., 1974, Betonarme köprüler ve hesap metodları, *Çağlayan kitapevi*, 1-97.
- Cevahir, Ç. M. and Bağbancı, M. B., 2019, The investigation of construction techniques and material usage of historical stone Bridges in Anatolia and balkans, *International Refereed Journal of Architecture and Desing*, 17, 40-41.
- Cıplak, C. B. 2020, Donatısız yığma duvarların doğrusal olmayan analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 6-7.
- Cinemre, M. 2019, Kesme taş duvarlarda kullanılan tarihi horasan harçlarının mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Sakarya, 16-20.
- Çelik, S. B. and Çobanoğlu, İ., 2019, Investigation of relations between P and S wave velocities and some physical and uniaxial compressive strength properties in denizli travertines, *Journal of Polytechnic*, 22(2), 341–349.
- Çift, Ö. F. 2018, Dengeli konsol köprü analizi ve performans değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 5-6.
- Çolak, H., Türker, H. T. and Coşkun, H., 2019, Az katlı düzenli çerçeveli yapıların periyot hesabı için bir yaklaşım önerisi, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(1), 117–125.
- Drygala, I., Dulinska, J., Bednarz, L. and Jasienko, J., 2018, Numerical evaluation of seismic-induced damages in masonry elements of historical arch viaduct. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 364(1), 012006.

- Evci, U. P., Sever, A. E. and Şakalak, E., 2024, Tarihi Yeşiltepe Köprüsü'nün sismik davranışının araştırılması, *Doğal Afetlerin Önlenmesi ve Tedavisi*, 3 (2).
- Fakrouji H. 2024, Deforme olmuş esnek kaplamalı karayollarının farklı sıcaklık ve trafik yükleri altındaki davranışının üç boyutlu modellenmesi ve analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Çankırı, 43-44.
- Gani, E. 2017, Tarihi davutpaşa kışlasının dinamik ölçüm destekli, yatay ve düşey yükler altında analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 66.
- Ghafoori, R. 2022, Gergin eğik askılı köprü davranışına farklı kablo düzenlerinin ve öngerme kuvvetinin etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 6-7.
- Güllü, H., 2018, Tarihi yığma yapı Cendere Köprüsünün deprem etkisinin incelenmesi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 245-259.
- Han, Y., Chun, Q. and Gao, X., 2023, Flood-induced forces and collapse mechanism of historical multi-span masonry arch bridges: the putang bridge case, *Engineering Failure Analysis*, 153, 107564.
- Hökelekli, E. 2015, Manisa hafsa sultan camii deprem davranışının operasyonel modal analiz yöntemiyle incelenmesi, Doktora Tezi, *Celal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 20-21.
- Karaahmetli, S. and Tanrıkulu, A. K., 2016, Yapılarda sönüm oranı değişiminin deneysel olarak incelenmesi, *1 St International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016)*, Adana.
- Karaahmetli, S. and DüNDAR, C., 2017, Yapıların dinamik analizinde kullanılan sönüm modellerinin incelenmesi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(2), 23–35.
- Karaahmetli, S. and DüNDAR, C., 2017, Yapı sönüm oranının belirlenmesinde kullanılan yöntemlerin sayısal ve deneysel olarak incelenmesi, *4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Eskişehir.
- Kaya, E. 2022, Betonarme kolonlarda etriye aralıklarının ve donatı sınıfının yapı dinamik davranışına etkisi, Doktora Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 55-56.
- Kayhan, A. H. and Demir, A., 2016, Tek serbestlik dereceli sistemlerde maksimum ötelenme talebi üzerinde çevrimsel davranış modellerinin etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(6), 442–453.

- Kayırga, O. M. 2017, Yığma yapıların deprem davranışının analitik ve deneysel olarak belirlenmesi, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 69.
- Koçak, Y. 2013, Yığma duvarlarda kayma dayanımının artırılması amacı ile farklı bağlantı elemanları uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, *Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Aksaray, 26-27.
- Korkmaz, K. A., Zabin, P., Çarhoğlu, A. İ. and Nuhoglu, A., 2013, Taş kemer köprülerin deprem davranışlarının değerlendirilmesi: Timisvat Köprüsü örneği, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2(1), 66-75.
- Laçın, E. E. 2017, Gergin eğik askılı köprülerin tasarım esasları, mevcut bir gergin eğik askılı köprünün sayısal analizi ve değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 5-6.
- Lou, D., Chen, Y., Feng, Q. and Cai, J., 2022, Analytical determination of static deflection shape of an asymmetric extradosed cable-stayed bridge using ritz method, *Materials*, 15(12), 4255.
- Mahdikhani, M., Naderi, M. and Zekavati, M., 2016, Finite element modeling of the influence of FRP techniques on the seismic behavior of historical arch stone bridge, *Computers and Concrete*, 18(1), 99-112.
- Mısır, I. S., Youssouf, İ. B. and Yucel, G., 2018, Out-of-plane damage limits for the walls in historical URM buildings under earthquake actions: a case study for ısbey mosque. *International Conference on Civil and Environmental Engineering, İzmir*.
- MollaJafari, M., Emami, F. and Hosseini, M. H., 2022, Seismic performance assessment of a masonry arch bridge using finite element method and retrofitting by FRP, *Aut Journal Of Civil Engineering*, 6(1), 63-82.
- Naderi, M. and Zekavati, M., 2018, Assessment of seismic behavior stone bridge using a finite element method and discrete element method, *Earthquakes and Structures*, 14(4), 297-303.
- Naciri, K., Aalil, I., Chaaba, A. and Al-Mukhtar, M., 2021, Numerical modeling of a masonry arch structure. *Procedia Structural Integrity*, 37, 469–476.
- Nemutlu, Ö., Güzel, İ., Balun, B., Öztürk, M. and Sarı, A., 2023, Nonlinear seismic assessment of historical masonry karaz bridge under different ground motion records, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 247-260.
- Nurkovic. E. 2022, Donatısız yığma duvarların makro modelleme yaklaşımı ile doğrusal olmayan analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 16-17.

- Onat, O., 2020, Impact of mechanical properties of historical masonry bridges on fundamental vibration frequency, *Structures*, 27, 1011–1028.
- Othman, H. and Marzouk, H., 2018, Applicability of damage plasticity constitutive model for ultra-high performance fibre-reinforced concrete under impact loads, *International Journal of Impact Engineering*, 114, 20–31.
- Özkaya, S. G. 2019, Yığma köprülerin deprem davranışlarının doğrusal olmayan statik yöntemlerle tahmini, Doktora Tezi, *Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 9-12.
- Özkul, M., Gül, A., Koralay, T., Özen, H., Semiz, B. and Duman, B., 2024, Denizli travertine: a global heritage stone resource nominee from western Türkiye. *Geoheritage*, 16(3).
- Özmen. A. 2019, Yakın ve uzak fay hareketlerine maruz tarihi yığma bir köprünün sismik performansının değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 10.
- Özmen, A. and Sayın, E., 2018, Seismic assessment of a historical masonry arch bridge, *Journal of Structural Engineering and Applied Mechanics*, 1(2), 95-104.
- Özmen, A. and Sayın, E., 2020, Tarihi yığma bir köprünün deprem davranışının değerlendirilmesi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 956–965.
- Panahi, F. T., Morshedi, A. A. A. and Talaeitaba, S. B., 2023, Effects of the structural dimensions of multi-span historical arched masonry buildings under near-fault and far-fault ground motions, *Engineering Failure Analysis*, 154, 107685.
- Proske, D. and Gelder, P., 2009., Safety of historical stone arch bridges, *Springer heidelberg dordrecht*, London, 379.
- Rahmani, S. 2020, Yerinde döküm betonarme köprü tasarımı ve bir proje örneği, Yüksek Lisans Tezi, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 4-17.
- Scozzese, F., Tubaldi, E. and Dall'Asta, A., 2023, Damage metrics for masonry bridges under scour scenarios, *Engineering Structures*, 296, 116-914.
- Scozzese, F., Tubaldi, E. and Dall'Asta, A., 2024, Understanding the response of masonry arch bridges under different scour scenarios, *Procedia Structural Integrity*, 62, 424–429.
- Selman, E., 2021, Betonarme sonlu eleman analizinde alternatif bir kohezif çatlak modeli, *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9(2), 327-342.

- Sert, A. and Beyen, K., 2019, Sistem tanılama algoritmaları kullanılarak yapı dinamik karakteristiğinin tahmini, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2), 55–63.
- Sever, A. E., 2023, FRP levha ile güçlendirmenin yığma bir kemer yapısının deprem davranışına olan etkilerinin incelenmesi, *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik Ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), 7-19.
- Shimpi, V., Sivasubramanian, M. V. R., Singh, S. B. and Periyasamy, D. K., 2021, Seismic vulnerability assessment and fragility curves for a multistorey gallery arch bridge. *SN Applied Sciences*, 3(6).
- Sobczyk, B., Pyrzowski, Ł. and Miśkiewicz, M., 2024, Computational modelling of historic masonry railroad arch Bridges, *Computers and Structures*, 291.
- Sözen, Ş. and Çavuş, M., 2020, Tek açıklıklı tarihi taş köprülerde form değişikliğinin köprünün sismik davranışına etkisinin değerlendirilmesi: Nıksar Yılanlı (Leylekli) Köprü örneği, *Duzce University Journal of Science and Technology*, 8(1), 48-59.
- Şeker, S. and Şahin, H., 2022, Evaluation of the seismic behavior of the historic claudras bridge, *Usak University Journal of Engineering Sciences*, 5(1), 1–12.
- Tarhan, İ. H. 2022, Seismic capacity of masonry arches optimally strengthened with fibre reinforced polymer: experimental and numerical investigation, Doctoral Dissertation, *Atatürk University Graduate School of Natural and Applied Sciences Departement of Civil Engineering*, Erzurum, 113-162.
- Teymen, A., 2020, Estimation of uniaxial compressive strength of very low-medium abrasive rocks from Cerchar abrasiveness index, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26(6), 1154–1163.
- Toker, S. and Ünay, A. İ., 2004, Mathematical modeling and finite element analysis of masonry arch bridges, *Fen Bilimleri Dergisi*, 17(2), 129–139.
- Ulukaya, S. 2016, Tarihi kireç harcı özelliklerine uygun yeni malzemelerin üretimi ve sayısal analiz için malzeme parametrelerinin belirlenmesi, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 9-16.
- Ural, A., 2005, Tarihi kemer köprülerin sonlu eleman metoduyla analizi, *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli.
- Üstün, B. N. 2020, Tarihi kemer köprünün düzlem içi ve düzlem dışı deprem davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Bartın, 16-57.
- Valente, M. and Milani, G., 2018, Effects of Geometrical Features on the Seismic Response of Historical Masonry Towers, *Journal of Earthquake Engineering*, 22, 2–34.

- Yalın, M. 2019, İtme sürme yöntemi ile viyadük yapımı, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 3-4.
- Yılmaz, E. G. 2022, Tarihi yığma köprülerin farklı depremler altında doğrusal analizi: Murat Bey köprüsü örneği, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 20-22.
- Zani, G., Martinelli, P., Galli, A. and Prisco, M. D., 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.
- Zahra, T., Asad, M. and Thamboo, J., 2021, Effect of geometry on the compression characteristics of bonded brickwork, *Structures*, 32(1), 1408–1419.
- Zekavati, M., 2024, Finite element modeling of the influence of FRP techniques on the seismic behavior of an arch stone bridge of historical interest, *Insight Civil Engineering*, 7(2), 619.
- Zhao, C., Xiong, Y., Zhong, X., Shi, Z. and Yang, S., 2020, A two-phase modeling strategy for analyzing the failure process of masonry arches, *Engineering Structures*, 212, 110525.
- Zizi, M., Chisari, C., Iaderosa, R., Bencivenga, P., Lavino, A. and De Matteis, G., 2024, Dynamical features and FE modelling of a multi-span historical masonry arch bridge, *Procedia Structural Integrity*, 62, 430–437.
- Żółtowski, M. and Napieraj, K., 2017, Experimental modal analysis in research, *Budownictwo i Architektura*, 16(3), 5–12.