

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**TARİHİ YAPILARIN BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ:  
ONAÇ KÖPRÜSÜ ÖRNEĞİ**

**Sibel ASLAN**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TEMMUZ 2022**

**ANTALYA**

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**TARİHİ YAPILARIN BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ:  
ONAÇ KÖPRÜSÜ ÖRNEĞİ**

**Sibel ASLAN**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TEMMUZ 2022**

**ANTALYA**

**T.C.**  
**AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TARİHİ YAPILARIN BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ:**  
**ONAÇ KÖPRÜSÜ ÖRNEĞİ**

**Sibel ASLAN**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Bu tez 08/07/2022 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN (Danışman)

Prof. Dr. Murat BİKÇE

Doç. Dr. Bekir AKGÖZ

## ÖZET

### TARİHİ YAPILARIN BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ: ONAÇ KÖPRÜSÜ ÖRNEĞİ

Sibel ASLAN

Yüksek Lisans, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN

Temmuz 2022; 70 sayfa

Anadolu toprakları tarih öncesinden bu zamana kadar birçok farklı uygarlığa kapılarını açmıştır. Bu uygarlıklar zamanla hüküm sürdükleri bölgelerde birçok tarihi yapı oluşturmuştur. Söz konusu yapıların bazıları da tarihi yığma köprülerdir. Yığma köprülerin kullanım amaçları bölgelere göre değişiklik göstermekte olup bu amaçların arasında ulaşım ve ticaret ön plandadır. Bunun yanı sıra sadece büyük su kütlelerini geçmeye yarayan köprüler zamanla farklı medeniyetler arasında sosyal ve kültürel paylaşımlara da olanak sağlayan faydalı yapılar olmuşlardır.

Tarihi yapıların korunması amacıyla, olası yük etkileri altında yapılacak olan analiz çalışmaları oldukça önemlidir. Bu çalışmaların hızlı, güvenilir ve yeterli hassasiyette olmasını sağlamak için YLT (Yersel Lazer Tarama) yöntemlerinin de kullanılması fayda sağlamaktadır. Taramayla elde edilen dijital nokta bulutu bu tezde anlatılan özel bir teknikle yapısal analize uygun katı bir cisim (solid eleman) haline getirilmiştir.

Bu çalışma, üç ana başlıktan oluşmaktadır. Öncelikle tarihi yığma kemerli köprülerin genel özelliklerine ve literatür özetine yer verilmiştir. Örnek inceleme alanı olarak seçilen tarihi Onaç Köprüsünün yapısal durumu ve jeolojik konumu hakkında bilgi verilmiş, yapıda doğal koşullar nedeniyle oluşan bozulmalar ve güncel durumu özetlenmiştir. Yapıdan elde edilen bilgiyle aynı döneme ait benzer özelliklere sahip köprülerle karşılaştırma yapılarak köprünün genel özellikleri hakkında çeşitli kabuller yapılmıştır. İkinci aşamada, geometrik özelliklerin detaylı olarak belirlenebilmesi için YLT yöntemiyle yapının üç boyutlu dijital nokta bulutu temin edilmiş ve CAD/CAM uygulamalarıyla analize uygun sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Son olarak elde edilen katı modelin bilgisayar destekli analizi yapılmış ve sonuçlar incelenmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Makro modelleme, Onaç Köprüsü, Tarihi yapıların analizi, Yersel Lazer Tarama (YLT).

**JÜRİ:** Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN

Prof. Dr. Murat BİKÇE

Doç. Dr. Bekir AKGÖZ

## **ABSTRACT**

### **COMPUTER AIDED ANALYSIS OF HISTORICAL STRUCTURES: EXAMPLE OF ONAÇ BRIDGE STRUCTURE**

**Sibel ASLAN**

**MSc Thesis in Civil Engineering**

**Supervisor: Asst. Prof. Dr. Engin EMSEN**

**July 2022; 70 pages**

Anatolian lands have opened their doors to many different civilizations from prehistory to this time. These civilizations created many historical structures in the regions where they ruled over time. Some of these structures are historical masonry bridges. The purpose of use of masonry bridges varies according to regions. Transportation and trade are at the forefront of usage purposes. In addition, bridges, which only serve to cross large water bodies, have become useful structures that allow social and cultural sharing between different civilizations over time.

Analysis studies to be carried out under possible load effects are very important to protect historical structures. In order to ensure that these studies are fast, reliable and with sufficient sensitivity, the use of TLS (Terrestrial Laser Scanning) methods is also beneficial. The digital point cloud obtained by scanning has been turned into a solid element suitable for structural analysis with a special technique described in this thesis.

This study consists of three main titles. First, the general characteristics of historical masonry arch bridges and a summary of the literature are given. Information about the structural condition and geological position of the historical Onaç Bridge, which was chosen as a sample study area, was given, and the damage of the structure due to natural conditions and its status were summarized. By comparing the information obtained from other bridges with similar characteristics belonging to the same period, assumptions were made about the general characteristics of the bridge. Second, a three-dimensional digital point cloud of the structure was provided by the TLS method in order to determine the geometric properties, and a finite element model suitable for analysis was created with CAD/CAM applications. Finally, computer aided analysis of the obtained solid model was made, and the results were examined.

**KEYWORDS:** Macro modeling, Onac Bridge, Analysis of historical structures, Terrestrial Laser Scanning (TLS).

**COMMITTEE:** Asst. Prof. Dr. Engin EMSEN

Prof. Dr. Murat BİKÇE

Assoc. Prof. Dr. Bekir AKGÖZ

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır. Tez hazırlama sürecimde ilk olarak yardımını, güvenini, hoşgörüsünü, bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen, mesleki anlamda gelişmeye yardımcı olan çok kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Engin EMSEN'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tezime kaynak ve destek oluşturan Karayolları Genel Müdürlüğü 13'üncü Bölge Müdürlüğü'ne teşekkür ederim. Ayrıca yersel lazer tarama uygulamalarının yapılması süreci (üç boyutlu nokta bulutunun ve ortofoto görüntünün üretimi) ve ilgili tez bölümünün yazım sürecindeki desteklerinden dolayı Karayolları 13'üncü Bölge Müdürlüğü'nden görevli Harita Mühendisi Dr. Emre TERCAN'a ve İnşaat Mühendisi Koray AYDIN'a çok teşekkür ederim.

Eğitim ve öğretim hayatım boyunca her daim arkamda olan, maddi ve manevi hiçbir destekten kaçınmayan, kendimi sonsuz güvende hissettiren çok sevgili annem Gülcemal ASLAN'a ve babam Hüsiyet ASLAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarak bu tez çalışmamı aileme ithaf ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
AKADEMİK BEYAN.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	3
3. MATERYAL VE METOT.....	6
3.1. Yığma Kemer Köprülerin Tarihçesi.....	6
3.2. Yığma Kemer Köprü Yapımı, Çeşitleri ve Yapı Elemanları.....	8
3.2.1. Düz kemerli köprüler.....	9
3.2.2. Dik kemerli köprüler.....	9
3.3. Tarihi Kemer Köprü Yapı Elemanları.....	10
3.3.1. Temel.....	10
3.3.2. Duvar.....	11
3.3.3. Döşeme.....	12
3.3.4. Kemer.....	12
3.3.5. Sütun.....	13
3.3.6. Selyaran.....	14
3.4. Tarihi Yığma Köprülerde Kullanılan Malzemeler.....	14
3.4.1. Doğal taşlar.....	14
3.4.2. CDP (Concrete Damaged Plasticity) malzeme modeli.....	15
3.4.3. Tuğla.....	16
3.4.4. Harç.....	16
3.5. Tarihi Yığma Yapılarda Oluşan Hasarlar.....	16
3.5.1. Deprem ve sel hasarları.....	17
3.5.2. İnsan kaynaklı hasarlar.....	18
3.5.3. Zeminden kaynaklı hasarlar.....	18
3.5.4. Zamana bağlı hasarlar.....	18

3.6. Yersel Lazer Tarama Yöntemiyle Tarihi Yapıların Modellenmesi.....	19
3.6.1. Yersel lazer tarama teknolojileri ve tarayıcı bileşenleri.....	19
3.6.2. Yersel lazer tarama yöntemi uygulama süreci .....	20
3.6.3. Yersel lazer taramanın avantaj ve dezavantajları .....	21
3.7. Tarihi Yığma Yapılarda Modelleme Yöntemleri .....	22
3.8. Tarihi Yapılarda Analiz Yöntemleri.....	23
3.8.1. Statik analiz .....	23
3.8.2. Serbest titreşim analizi .....	24
3.8.3. Davranış spektrum analizi .....	24
3.8.4. Zaman tanım alanında analiz.....	24
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	25
4.1. Bulgular .....	25
4.1.1. Onaç köprüsü ve tarihçesi .....	25
4.1.2. Deprem bölgeselliği .....	27
4.1.3. Hasar çeşitleri ve tipleri.....	29
4.1.4. Yersel lazer tarama (YLT) ile nokta bulutlarının oluşturulması .....	32
4.1.5. Makro modelleme ile 3D modelin oluşturulması.....	33
4.1.6. Makro modelleme için malzemeler ve yük tipleri.....	38
4.1.7. Makro modelleme ile yapısal analiz.....	42
4.1.8. Düşey yüklemeler altında statik analiz.....	43
4.1.9. Serbest titreşim analizi (modal analiz) .....	47
4.1.10. Davranış spektrum analizi .....	50
4.2. Tartışma.....	57
5. SONUÇLAR .....	59
6. KAYNAKLAR.....	60
7. EKLER .....	64
ÖZGEÇMİŞ	

## AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Tarihi Yapıların Bilgisayar Destekli Analizi: Onaç Köprüsü Örneği” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

08/07/2022

Sibel ASLAN



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

cm	: Santimetre
cm <sup>2</sup>	: Santimetrekare
cm <sup>3</sup>	: Santimetre küp
E	: Elastisite modülü
G	: Ölü yük
J	: Joule
kgf	: Kilogram kuvvet
m	: Metre
m <sup>3</sup>	: Metre küp
mJ	: Milijoule
mm	: Milimetre
mm <sup>2</sup>	: Milimetre kare
mm <sup>3</sup>	: Milimetre küp
MPa	: Mega Pascal
N	: Newton
Pa	: Pascal
R <sub>a</sub> (T)	: Deprem yükü azaltma katsayısı
s <sup>2</sup>	: Saniye kare
sn	: Saniye
$\nu$	: Poisson oranı
°C	: Derece (Celcius)

Bu tez kapsamında kullanılan ondalık işareti nokta (.) olarak seçilmiştir.

## **Kısaltmalar**

3D	: Üç Boyutlu (Three Dimensional)
AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
CDP	: Beton Hasar Plastisite Modeli (Concrete Damage Plasticity)
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
MÖ	: Milattan Önce
MS	: Milattan Sonra
SI	: Uluslararası Ölçüm Sistemi
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TS2510	: Kâgir Duvarlar Hesap ve Yapım Kuralları
YLT	: Yersel Lazer Tarama

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<b>Şekil 3.1.</b> Roma dönemine ait Aspendos (Köprüpazarı) Köprüsü (Anonim 1, 2022).....	7
<b>Şekil 3.2.</b> Roma dönemine ait Cendere Köprüsü (Anonim 2, 2022).....	7
<b>Şekil 3.3.</b> Selçuklu dönemine ait Urluca Köprüsü (Anonim 3, 2022).....	7
<b>Şekil 3.4.</b> Hitit dönemine ait Varda Köprüsü (Anonim 4, 2022).....	8
<b>Şekil 3.5.</b> Osmanlı dönemine ait Babaeski Köprüsü (Anonim 5, 2022).....	8
<b>Şekil 3.6.</b> Düz kemerli Sokullu Mehmet Paşa Köprüsü (Anonim 6, 2018).....	9
<b>Şekil 3.7.</b> Dik kemerli Şenyuva Köprüsü (Anonim 7, 2014).....	10
<b>Şekil 3.8.</b> Kemer taş köprü yapı elemanları (Tanrıverdi ve Gürel, 2019) .....	10
<b>Şekil 3.9.</b> Temelin bölümleri (Anonim 8, 2022).....	11
<b>Şekil 3.10.</b> Kemerin bölümleri (Koç 2015) .....	12
<b>Şekil 3.11.</b> Kemerde yük aktarımı (Anonim 9, 2022).....	13
<b>Şekil 3.12.</b> Yüksek sütunlu kemer köprü örneği Varda köprüsü (Anonim 10, 2022).....	13
<b>Şekil 3.13.</b> Selyaran örneği Çağlayan köprüsü (Anonim 11, 2022) .....	14
<b>Şekil 3.14.</b> Yığma yapılarda kullanılan sırasıyla dolgu, delikli, boşluklu tuğla (Gamarra Castañeda 2012).....	16
<b>Şekil 3.15.</b> Hindistan Bhurj ve Koyna depremde hasar gören köprüler (Yanık vd. 2017) .....	17
<b>Şekil 3.16.</b> Aşırı yağmur sonucu tamamen yıkılan Osmanbaba köprüsü (Yanık vd. 2017) .....	17
<b>Şekil 3.17.</b> Yanlış onarım nedeniyle deforme olmuş Büyükçekmece köprüsü (Yanık vd. 2017) .....	18
<b>Şekil 3.18.</b> Zemin kaynaklı hasara uğramış Mataracı köprüsü (Yanık vd. 2017) .....	18
<b>Şekil 3.19.</b> Zamana bağlı hasar görmüş Kınalı köprü ve tarihi Özbek köprüsü (Yanık vd. 2017) .....	19

<b>Şekil 3.20.</b> Uygulama sıralaması (Safkan vd. 2014).....	20
<b>Şekil 3.21.</b> Yapıda yersel lazer tarayıcının konumlandırılması .....	20
<b>Şekil 3.22.</b> Yersel lazer tarama yönteminin avantaj ve dezavantajları (Sabuncu ve Özener 2020).....	21
<b>Şekil 3.23. a)</b> Detaylı mikro modelleme; <b>b)</b> Basitleştirilmiş mikro modelleme; <b>c)</b> Makro modelleme (Ural and Doğangün 2007).....	22
<b>Şekil 4.1.</b> Günümüz yol ağları üzerinde Onaç köprüsünün yeri (Anonim 12, 2022).....	25
<b>Şekil 4.2.</b> Onaç köprüsünün <b>a)</b> memba; <b>b)</b> mansap yönünden görünümü.....	26
<b>Şekil 4.3.</b> Onaç köprüsünün döşeme yakın ve genel görünümü.....	26
<b>Şekil 4.4.</b> Burdur ili deprem haritası (Anonim 13, 2022).....	27
<b>Şekil 4.5.</b> Batı Anadolu'daki aktif fay sistemleri (Bozcu vd. 2007).....	28
<b>Şekil 4.6.</b> Fethiye Körfezi ile Burdur Gölü arasındaki fay hatları (Bozcu vd. 2007).....	28
<b>Şekil 4.7.</b> Memba yönü (rölöve analiz çalışması).....	29
<b>Şekil 4.8.</b> A04 numaralı köprü ayağı .....	29
<b>Şekil 4.9.</b> Mansap yönü A04 numaralı ayakta malzeme boşalması.....	31
<b>Şekil 4.10.</b> Mansap yönü K01 numaralı kemer iç yüzeyindeki atmosferik kirlenme.....	31
<b>Şekil 4.11.</b> Focus 3D scanner ile ölçüm yapılması .....	32
<b>Şekil 4.12.</b> Memba yönü 3D Pointcloud Ortofotosu .....	32
<b>Şekil 4.13.</b> Mansap yönü 3D Pointcloud Ortofotosu .....	32
<b>Şekil 4.14.</b> Yersel lazer tarama ile oluşturulan memba yönü nokta bulutu .....	33
<b>Şekil 4.15.</b> Yersel lazer tarama ile oluşturulan mansap yönü nokta bulutu.....	33
<b>Şekil 4.16.</b> Yersel lazer tarama ile oluşturulan kuşbakışı nokta bulutu .....	33
<b>Şekil 4.17.</b> Mansap yönü K03 numaralı kemerin noktalarının isimlendirilmesi .....	34
<b>Şekil 4.18.</b> Mansap yönü için seçilen koordinatlar .....	34

<b>Şekil 4.19.</b> Memba yönü için seçilen koordinatlar .....	34
<b>Şekil 4.20.</b> Koordinatlı noktalardan oluşturulan yapı iskeleti.....	35
<b>Şekil 4.21.</b> “PATCH” komutuyla memba ve mansap yönünde oluşturulan yüzeyler .....	36
<b>Şekil 4.22.</b> “LOFT” komutuyla memba ve mansap arasında ara yüzey oluşturulması .....	36
<b>Şekil 4.23.</b> Mansap yönü katı modelin görünümü .....	37
<b>Şekil 4.24.</b> Memba yönü katı modelin görünümü .....	37
<b>Şekil 4.25.</b> Katı modelin kuşbakışı görünümü.....	37
<b>Şekil 4.26.</b> ABAQUS’te katı modelin oluşturulması.....	38
<b>Şekil 4.27.</b> Ortak yüzeyler arasına yapılan kısıtlamalar .....	38
<b>Şekil 4.28.</b> a) 1 numaralı taş örneği; b) 2 numaralı taş örneği; c) 3 numaralı taş örneği.....	39
<b>Şekil 4.29.</b> ABAQUS modelinde yer çekimi yük gösterimi (G) .....	41
<b>Şekil 4.30.</b> ABAQUS modelinde etki ettirilen hareketli yük gösterimi (Q).....	41
<b>Şekil 4.31.</b> ABAQUS modelinde etki ettirilen nehir yükü gösterimi (S) .....	41
<b>Şekil 4.32.</b> Sonlu elemanlar yöntemiyle ağ oluşturma (Mansap yönü).....	43
<b>Şekil 4.33.</b> Sonlu elemanlar yöntemiyle ağ oluşturma (Membra yönü).....	43
<b>Şekil 4.34.</b> Statik analiz sonucu Von Mises gerilme dağılımı (G yüklemesi) .....	44
<b>Şekil 4.35.</b> Statik analiz sonucu maksimum asal gerilme dağılımı (G yüklemesi).....	44
<b>Şekil 4.36.</b> Statik analiz sonucu düşey yerdeğiştirme (G yüklemesi).....	44
<b>Şekil 4.37.</b> Statik analiz sonucu Von Mises gerilme dağılımı (G+Q yüklemesi).....	45
<b>Şekil 4.38.</b> Statik analiz sonucu maksimum asal gerilme dağılımı (G+Q yüklemesi).....	45
<b>Şekil 4.39.</b> Statik analiz sonucu düşey yerdeğiştirme (G+Q yüklemesi).....	45
<b>Şekil 4.40.</b> Statik analiz sonucu Von Mises gerilme dağılımı (G+S yüklemesi).....	46

<b>Şekil 4.41.</b> Statik analiz sonucu maksimum asal gerilme dağılımı (G+S yüklemesi) .....	46
<b>Şekil 4.42.</b> Statik analiz sonucu düşey yerdeğiştirme (G+S yüklemesi) .....	46
<b>Şekil 4.43.</b> Serbest titreşim analizi (1'inci mod).....	48
<b>Şekil 4.44.</b> Serbest titreşim analizi (2'nci mod).....	48
<b>Şekil 4.45.</b> Serbest titreşim analizi (3'üncü mod).....	48
<b>Şekil 4.46.</b> Serbest titreşim analizi (4'üncü mod).....	49
<b>Şekil 4.47.</b> Serbest titreşim analizi (5'inci mod).....	49
<b>Şekil 4.48.</b> Serbest titreşim analizi (50'nci mod).....	49
<b>Şekil 4.49.</b> Spektrum analizi sonucu Von Mises gerilme dağılımı (G+SPCX).....	52
<b>Şekil 4.50.</b> Spektrum analizi sonucu maksimum asal gerilme dağılımı (G+SPCX).....	52
<b>Şekil 4.51.</b> Spektrum analizi sonucu düşey yerdeğiştirme (G+SPCX).....	52
<b>Şekil 4.52.</b> Spektrum analizi sonucu Von Mises gerilme dağılımı (G+SPCY).....	53
<b>Şekil 4.53.</b> Spektrum analizi sonucu maksimum asal gerilme dağılımı (G+SPCY).....	53
<b>Şekil 4.54.</b> Spektrum analizi sonucu düşey yerdeğiştirme (G+SPCY).....	53
<b>Şekil 4.55.</b> Spektrum analizi sonucu Von Mises gerilme dağılımı (G+SPCZ) .....	54
<b>Şekil 4.56.</b> Spektrum analizi sonucu maksimum asal gerilme dağılımı (G+SPCZ) .....	54
<b>Şekil 4.57.</b> Spektrum analizi sonucu düşey yerdeğiştirme (G+SPCZ) .....	54
<b>Şekil 4.58.</b> Spektrum analizi sonucu Von Mises gerilme dağılımı (G+SPCX+SPCY+SPCZ).....	55
<b>Şekil 4.59.</b> Spektrum analizi sonucu maksimum asal gerilme dağılımı (G+SPCX+SPCY+SPCZ).....	55
<b>Şekil 4.60.</b> Spektrum analizi sonucu düşey yerdeğiştirme (G+SPCX+SPCY+SPCZ).....	55

<b>Şekil 4.61.</b> Spektrum analizi sonucu Von Mises gerilme dağılımı (G+0.3SPCX+SPCY+0.3SPCZ).....	56
<b>Şekil 4.62.</b> Spektrum analizi sonucu maksimum asal gerilme dağılımı (G+0.3SPCX+SPCY+0.3SPCZ).....	56
<b>Şekil 4.63.</b> Spektrum analizi sonucu düşey yer değiştirme (G+0.3SPCX+SPCY+0.3SPCZ).....	56



## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 3.1.</b> Doğal duvar taşlarının en düşük basınç ve çekme dayanımları (TS 2513, 1977) .....	15
<b>Çizelge 3.2.</b> Taş yapılar için yaygın olarak kullanılan CDP parametreleri .....	15
<b>Çizelge 4.1.</b> ABAQUS birim cetveli.....	39
<b>Çizelge 4.2.</b> Eurocode-6'ya göre bağlayıcı malzeme çekme dayanımı .....	40
<b>Çizelge 4.3.</b> Makro model kısımları için malzeme özellikleri.....	40
<b>Çizelge 4.4.</b> Analiz için kullanılan yük miktarları.....	40
<b>Çizelge 4.5.</b> Katı model için yük kombinasyonları.....	42
<b>Çizelge 4.6.</b> Modal analiz sonucu oluşan frekans ve periyotlar .....	47

## 1. GİRİŞ

Yeryüzünde birçok farklı alanda tarihi ve kültürel miras olarak inşa edilen yüzlerce yapı mevcuttur. Bu yapılar birçok farklı özelliklerle inşa edilmişlerdir. En önemli özelliklerinden biri geçmiş, bugün ve geleceği içinde barındırmalarıdır.

Tarihi yapılar birçok farklı medeniyete ev sahipliği yaptıkları için farklı kültürlerin özelliklerini taşımaktadırlar. Bu sayede buldukları bölgelere zenginlik katmaktadırlar. Bu yapıların başında tarihi köprüler gelmektedir. Tarihte köprülerin ilk yapılış nedeni doğaya engel olup, büyük suları aşmak olsa da sosyal ve kültürel miras olarak önemli bir yer tutarlar. Şahit oldukları farklı kültürler ve konumlarıyla birlikte farklı tip ve malzemelerin kullanılmasıyla çeşitlilik göstermektedirler. Bu sebeplerden ötürü günümüze kadar varlığını sürdürebilen yapıların en önemli örnekleri tarihi yığma kemer köprülerdir. Yığma kemer köprüler isimlerini taş kemerlerden oluşan şekillerinden almışlardır. Hitit, Roma, Selçuklu ve Osmanlı dönemi eserlerinin yoğun olarak bulunduğu Anadolu toprakları üzerindeki birçok Anadolu köprüsü günümüzde işlevini devam ettirebilecek şekilde varlığını korumaktadır.

Kemer formu, geniş açıklıkların aşılmasına uygunluk sağlayan ve kullanım alanı en çok olan formdur. Yığma kemer köprülerde kemer formunun kullanılmasının başlıca sebepleri düz formdaki köprülerde malzemenin kendi ağırlığının ve düşey kuvvetlerin etkisiyle eğilmesini engellemektir. Birçok farklı malzemeyle köprüler oluşturulmuştur. Önceleri bulunan jeolojik konuma göre ahşap, tuğla ve taş malzemeleri ile birçok yığma kemer köprü yapılmıştır. Ancak kemer formu için ise basınca dayanıklı, en uygun malzeme olan taş kullanılmıştır.

Tarihi yığma kemer köprüler ilk yapıldıkları dönemden bu zamana kadar, zamana bağlı malzeme bozulmaları, doğal afet hasarları, ulaşımdaki ihtiyaçlar sebebiyle değişikliklere uğramışlardır. Bunun yanı sıra zamanla malzemelerin dayanımlarını kaybetmeleri veya bilinçsizce yapılan onarım ve bakım çalışmaları da tarihi yapılara hasara yol açmaktadır. Bu tarihi yapıların korunması için malzeme özellikleri doğru bir biçimde saptanmalı ve buna uygun olacak şekilde modellenmelidir. Daha sonra gelişen teknoloji ile birlikte bilgisayar destekli analizleri yapılmalıdır.

Büyük ölçekli tarihi yapılarda genellikle makro modelleme kullanılmaktadır. Makro modelleme ile yapı modeli daha kısa sürede oluşturulabilmekte ve analiz süreleri de diğer modelleme tiplerine göre daha kısa sürmektedir. Mikro modelleme bu tip büyük ölçekli yapılar için çok uygun değildir. Analiz süreleri oldukça uzundur. Mikro modelleme de her bir yapı elemanının malzemelerinin mekanik ve geometrik özelliklerinin ve üzerinde meydana gelen tüm hasarların bilinmesi gerekir. Bu yüzden küçük ölçekli yapılarda uygulanması daha kolay bir modelleme türüdür.

Tarihi yapılarda malzeme özelliklerinin belirlenebilmesi için hasarlı ve hasarsız yöntemlere başvurulsa da daha çok hasarsız yöntemlere başvurulmaktadır. Bunun en önemli sebebi kültürel mirası korumaktır. Hasarsız yöntemlerde kullanılan başlıca örnekleri Schmidt çekici ve Ultrases test aletleridir.

Yapının malzeme özellikleri belirlendikten sonra bulunduğu konuma uygun olacak şekilde yük tipleri tayin edilmelidir. Yük tipleri belirlendikten sonra gerekli

şartnamelere uygun biçimde yük kombinasyonları oluşturulmalıdır. Yapının zemin koşulları, bulunduğu deprem bölgesi ve hasarların nedenleri gibi konuların tespitinde dikkatli olunmalıdır.

Onaç çayı üzerinde konumlanan üç kemerli köprü için kapsamlı bir kaynak taraması yapılarak, daha önceki benzer çalışmalar incelenmiş, bölgenin tarihsel gelişimiyle beraber, literatüre geçmiş köprü yapılarının konumları ve mimarileri konusunda ön çalışmalar yapılmıştır. Yapısal davranışı anlamak için hesaplamalar sonucunda yapılan analizler farklı şekillerdeki yöntemlerle elde edilebilir. Bu analizler yapılan kabuller ve yaklaşımlar nedeniyle avantajlı ve dezavantajlı sonuçlar doğurabilir. Bu tez çalışmasının amacı; köprünün yerinde yapılan tespitlere dayalı güncel verilerini harmanlayarak, Onaç köprüsünün olabilecek herhangi bir deprem yüklemesi altında göstereceği davranışı incelemektir (Banerji ve Chikermane 2012).

Tarihi yapıların korunması amacıyla, olası yük etkileri altında yapılacak olan analiz çalışmaları oldukça önemlidir. Bu çalışmaların hızlı, güvenilir ve yeterli hassasiyette olmasını sağlamak için YLT (Yersel Lazer Tarama) yöntemlerinin de kullanılması fayda sağlamaktadır. Taramayla elde edilen dijital nokta bulutu bu tezde anlatılan özel bir teknikle yapısal analize uygun katı bir cisim (solid eleman) haline getirilmiştir.

Bu çalışma, üç ana başlıktan oluşmaktadır. Öncelikle tarihi yığma kemerli köprülerin genel özelliklerine ve literatür özetine yer verilmiştir. Örnek inceleme alanı olarak seçilen tarihi Onaç Köprüsünün yapısal durumu ve jeolojik konumu hakkında bilgi verilmiş, yapıda doğal koşullar nedeniyle oluşan bozulmalar ve güncel durumu özetlenmiştir. Yapıdan elde edilen bilgiyle aynı döneme ait benzer özelliklere sahip köprülerle karşılaştırma yapılarak köprünün genel özellikleri hakkında çeşitli kabuller yapılmıştır. İkinci aşamada, geometrik özelliklerin detaylı olarak belirlenebilmesi için YLT yöntemiyle yapının üç boyutlu dijital nokta bulutu temin edilmiş ve CAD/CAM uygulamalarıyla analize uygun sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Son olarak elde edilen katı modelin bilgisayar destekli analizi yapılmış ve sonuçlar incelenmiştir.

## 2. KAYNAK TARAMASI

Tarihi yığma kemer köprülerle ilgili ülkemizde ve dünyada birçok farklı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda yapılan yaklaşım ve kabuller nedeniyle farklı özelliklerde lineer ve lineer olmayan dinamik analizler yapılarak bu köprülerin olası bir deprem karşısındaki davranışları öngörülebilmektedir.

Ural (2005), Araştırmacı yaptığı çalışmada tarihi taş köprü örneklerinin önemli eserlerinden olan Kınalı köprüsünün analitik çalışmasını yapmıştır. Köprü modelini SAP 2000 programı yardımıyla oluşturup statik analizlerini yaparak lineer deprem davranışını incelemeyi amaçlamıştır.

Tóth, Orbán, ve Bagi (2009), Araştırmacılar yaptığı çalışmada çok açıklıklı tarihi yığma köprülerde dolgu malzemesinin etkisini incelemiştir. Buna göre tek açıklıklı kemer köprü üzerinde yapılan deneysel sonuçlardan elde edilen veriler incelendiğinde dolgunun yük taşıma kapasitesini büyük ölçüde etkilediğini ileri sürmüşlerdir.

Banerji ve Chikermane (2012), Yazarlar tarihi taş köprülerin malzeme özelliklerini ve mevcut olan malzeme deformasyonlarını belirlemek için sonlu elemanlar yöntemiyle analizler yapmışlardır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler ile mevcut yığma taş köprülerin restorasyon maliyetlerini optimize etmeyi ve yeni yapılacak kemerli köprülerde davranış özelliklerini ortaya koymayı amaçlamışlardır.

Korkmaz vd. (2013), Kültürel tarihimizde önemli yer tutan tarihi yığma köprülerin davranışını incelemek için pek çok çalışma yapılmıştır. Yazarlar bu çalışmada yığma köprülerin deprem kuvveti altındaki davranışını belirlemek için Timisvat köprüsünü incelemiştir. Mevcut yapı üzerinden ivme kayıtları oluşturularak, katı modeli sonlu elemanlar yöntemiyle üç boyutlu modeli oluşturulup dinamik analizler yapmışlardır. Dinamik analizlerde kullanılan her bir deprem kaydı için yer değiştirme ve gerilme değerleri elde edilmiş ve mevcut sonuçlar ile karşılaştırılmıştır

Türker vd. (2015), Araştırmacılar tarihi taş köprülerin geçmiş dönemde fonksiyonelliklerine dikkat çekerek, taş köprülerin restorasyon edilerek kullanım ömrünün artacağını ileri sürmüşlerdir. Buna bağlı olarak laboratuvar ortamında ölçekli bir taş köprü modelini oluşturarak, yapının dinamik davranışını deneysel olarak incelemiştir. Deneysel sonuçlardan elde edilen dinamik davranışlar, yapının katı modelini oluşturup sonlu elemanlar yöntemiyle analizleri yapılarak elde edilen analitik sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

Güllü (2018), Yazar bu çalışmada kemer formunda bulunan tarihi taş köprü örneklerinden Cendere köprüsünün üç boyutlu katı modelini oluşturup deprem etkisi altında davranışını incelemiştir. Katı modeli oluşturulurken tek tip malzeme kabulü yapmıştır. Deprem etkisi, lineer elastik davranış modeline göre zaman tanım analizi uygulanarak araştırılmıştır. Analizlerde farklı deprem kayıtlarını kullanarak el elverişsiz deprem kuvvetini yapıya etki ettirerek sonuca ulaşmaya çalışmıştır. Yazar yaptığı çalışma sonucunda yığma yapının çekme dayanımının kemer bölgesinde aşıldığı ve tınlaşım durumlarında köprünün hasar açısından risk oluşturduğunu gözlemlemiştir.

Gönül ve Sakcalı (2019), Yazarlar yaptığı çalışmada Irgandı köprüsü için sonlu elemanlar yöntemini kullanarak ANSYS programı yardımıyla köprünün modelini oluşturarak, yapının modal ve lineer analizlerini yapmışlardır. Analiz sonucunda köprüde meydana gelen gerilme ve yer değiştirme durumlarını incelemişlerdir.

Kocaman, Kazaz ve Özkan (2020), Tarihi yığma köprülerin mevcut durumlarını değerlendirmek için araştırmacılar pek çok analitik çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar bu çalışmada, köprünün malzeme özelliklerini belirlemek için kullanılan tahribatsız yöntemlerin yanı sıra taşın cinsini belirledikten sonra taş ocaklarından örnekler alınıp tahribatsız yöntemlerle elde edilen değerlerin yakınsadığını ileri sürmüşlerdir.

Batar, Tercan, ve Emsen (2021), Yazarlar yaptığı bu çalışmada tarihi taş köprülerin analizi için etkili bir yaklaşım oluşturmayı hedeflemişlerdir. Çalışmalarını tarihi Ayvalıkemer (Sillyon) kemer köprüsünü ele alarak yük altındaki davranışını incelemeyi hedeflemişlerdir. Yapının sonlu eleman yöntemiyle analizini yapmak için katı modelini nokta bulutu yöntemi kullanılarak oluşturmuşlardır. Yapısal davranışını incelemek için makro modelleme tekniği uygulanmıştır. Çalışmalar sonucunda yapısal davranışın sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen değerlerin oldukça yakınsadığını ileri sürmüşlerdir.

Karasaka ve Beg (2021), Yazarlar bu çalışmada yersel lazer tarama yöntemleriyle farklı uygulamalardaki farklı geometrik özelliklere sahip yapıları modellemişlerdir. Bunun yanı sıra kullanılan yersel lazer tarayıcının özelliklerini ve çalışma mekanizmasını anlatmışlardır. Lazer tarama yöntemi optik ve mekanik bir ölçme tekniğidir. Farklı yersel lazer tarama yöntemlerinden bahsederek, uygulama alanları hakkında örnekler vermişlerdir. Yersel lazer taramanın oldukça hızlı bir modelleme yöntemi olmasının üzerinde durmuşlardır. Modellemeler sonucunda elde edilen verilerini SCENE, 3D Reshaper, JRC 3D Reconstructor gibi yazılımları kullanarak değerlendirmişlerdir.

Kanun, Metin ve Yakar (2021), Yersel lazer tarama yönteminin tarihi yapıların korunması ve tahribatsız şekilde modellenmesinin üzerinde duran yazarlar Selçuklu döneminde inşa edilen tarihi bir kervansaray örneği olan Ağzıkara Han'ın 3 boyutlu nokta bulutunun oluşturulabilmesi için yersel lazer tarama yöntemini kullanmışlardır. Faro X 330 aletiyle yersel lazer tarama yaparak nokta bulutunu elde etmişlerdir. Elde edilen verilerin birleştirme hatalarını da hesaplayarak sonuçların kabul edilebilir düzeyde olduğunu göstermişlerdir.

Kaya vd. (2021), bu çalışmada yazarlar Şuayip Şehri olarak bilinen arkeolojik alanının yersel fotogrametri ve İnsansız Hava Aracı (İHA) fotogrametrisi yöntemlerini kullanmışlardır. Farklı olan bu iki yöntemin verilerinin de birbirinden farklı dezavantajlarının olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu nedenle birleşik veri setini kullanarak yoğun nokta bulutunu elde ettikten sonra üç boyutlu modeli oluşturmuşlardır. Hem havadan hem de yerden yapının fotoğrafları çekilerek üst kısım ve yapı cepheleri birlikte kullanılarak birleşik model, önceki kaynaklara göre daha iyi şekilde oluşturulduğunu gözlemlemişlerdir.

Ulvi ve Yakar (2014), çalışmasında Kızkalesi'nin yersel yersel lazer tarama tekniklerini kullanarak nokta bulutunu elde etmişlerdir. Bu nokta bulutunu 3 boyutlu nokta verilerini elde etmek için elektronik uzaklıkölçer ile kontrol noktaları belirleyip, ölçümler yapmışlardır. Ölçümlerde Trimble GX 3D aletini kullanmışlardır. Ölçümler sonucunda elde edilen nokta bulutu üzerinde belirlenen noktalara konum hassasiyet çalışması yapılmış, seçilen bütün noktaların testteki değerlerin altında kaldığını gözlemlemişlerdir.

Tezle ilgili gerekli literatür taraması ve araştırmalar yapılmıştır. Yığma kemer köprülerin gerçeğe yakın şekilde daha kısa sürede ve kolay modellenebilmesi için “makro modelleme” yönteminin daha çok uygulandığı görülmüştür.

Bunun dışında kullanılan diğer yöntemler mikro modelleme ve basitleştirilmiş mikro modelledir. Bu modelleme tiplerindeki yapı taşları kompozit malzeme kabulü yapılmadan ayrı mekanik özellikleri girilerek oluşturulur. Dolayısıyla bu durum analiz sürelerinin uzamasına neden olur. Küçük çalışmalar için daha uygun modelleme tipleridir.

Bu tez çalışmasında yapının büyük ve yığma yapı olması nedeniyle oluşturulacak bilgisayar modeline uygun olan “makro modelleme” tekniği uygulanacaktır. Daha önce tarihi yığma yapı olarak incelenecek olan Onaç köprüsüyle ilgili herhangi bir çalışma bulunamamıştır.

### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1. Yığma Kemer Köprülerin Tarihçesi

Yığma kemer köprüler günümüze gelene kadar birçok farklı malzeme kullanılarak insanlar tarafından inşa edilmiştir. Yığma köprülerin çoğu günümüze ulaşmış olsa da birçok da kullanılan malzeme tipi, doğal afetler ve savaşlar yüzünden maalesef günümüze ulaşamamıştır. Bu yapılar birçok medeniyete ev sahipliği yaptıkları için kültürel miras olarak tarihte önemli bir yere sahiptirler. Tarihi yapıların korunması açısından insanoğluna çeşitli görevler düşmektedir.

Ülkemiz tarihi köprüler bakımından oldukça zengindir. Bunun en büyük sebeplerinden biri birçok kültüre ev sahipliği yapmış olmasıdır. Ülkemizde Osmanlı, Selçuklu, Hititler ve Romalılar dönemine ait birçok tarihi köprü bulunmaktadır. Köprülerin bazıları hasar görmüş olsa da hala varlıklarını devam ettirmektedirler.

Günümüz köprüler de teknolojinin gelişmesiyle birlikte dayanımı oldukça yüksek malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemelerin başında beton, öngermeli beton ve çelik gelmektedir. Ancak teknoloji bu kadar gelişmeden önce köprülerde kullanılan ilk malzeme ahşaplardır. Kısa açıklıkları geçmek için ağaç gövdeleri tercih edilmiştir. Ahşap malzemenin yanında daha sonra taşlar kullanılmaya başlanmıştır. Taşlar ilk olarak köprü ayaklarında, sonrasında ise köprüünün her bölgesinde kullanılmıştır. Taş malzemesinin temini ve şekillendirmesinin kolay olması tercih edilmesini sağlamıştır.

Taş malzemesinin dayanımı ahşaba göre oldukça yüksektir. Ahşap malzeme yağmur ve güneş gibi dış etkenlere karşı oldukça dayanıksızdır. Tarihi yığma taş köprülerin günümüze kadar ulaşabilmesinin en büyük nedeni malzeme olarak taşların kullanılmasıdır. Taşlar önce bloklar şeklinde konulup daha sonra birleştirilerek köprüleri oluşturmuştur. Ardından taşın kolay işlenmesi köprülere kemer formu verilmesini kolaylaştırmıştır. Böylelikle geniş ve derin açıklıkların geçilmesi sağlanmıştır.

Kemerlerin büyüklükleri ve geometrik şekilleri yapıldıkları döneme ve medeniyetlere göre değişkenlik gösterir. Önceleri tek açıklıklı yapılan köprüler daha sonra birden fazla açıklıklı inşa edilmişlerdir. İlk kemer köprü örneklerine MÖ 4000 yıllarında Mezopotamya'da ve MÖ 3000 yıllarında ise Mısır'da rastlanmaktadır. Mısırlar ve Eski Yunanlar kemer formunu bilmelerine rağmen bunu yapılarında kullanmamışlardır. Bunun en büyük nedeni ticarete deniz yolunu kullanmak yerine kara yolunu tercih etmeleridir. Kemer formunu en çok kullananlar ise Romalılardır. Genellikle yarım daire şeklinde kemerler kullanmışlardır. Taşların arasında harç kullanmamışlardır ve çok büyük taşlar kullandıkları için ayak kısımları çok rijit davranış sergilemektedir.



**Şekil 3.1.** Roma dönemine ait Aspendos (Köprüpazarı) Köprüsü (Anonim 1, 2022)



**Şekil 3.2.** Roma dönemine ait Cendere Köprüsü (Anonim 2, 2022)



**Şekil 3.3.** Selçuklu dönemine ait Urluca Köprüsü (Anonim 3, 2022)



Şekil 3.4. Hitit dönemine ait Varda Köprüsü (Anonim 4, 2022)



Şekil 3.5. Osmanlı dönemine ait Babaeski Köprüsü (Anonim 5, 2022)

### 3.2. Yığma Kemer Köprü Yapımı, Çeşitleri ve Yapı Elemanları

Yığma kemer köprüler yapılmadan önce zemin durumu kontrol edilir. Eğer zemin yapı için uygun değilse zemin iyileştirilmesi gerekir. Zeminin köprü yapımı için elverişli olması işleri kolaylaştırır. Önce köprü ayakları inşa edilir. Ardından kemer formunun yapılacağı bölgeye kemer formunda iskele kurulur. Daha sonra belli büyüklükte işlenen ve şekil verilen taşların aralarına bağlayıcı bir malzeme konulabilir ya da konulmadan kemer formunda yerleştirilir. Kurulan iskele ve köprü ayaklarının dayanımı yüksek olmalıdır. Çünkü zamanla kemerlerin ve döşemenin yükünü zamanla üzerlerine alacaklardır. Kemer inşasından sonra yan duvarlar örülür. Bu yan duvarlar iç dolgu

malzemesini koruyacakları için daha büyük taşlardan oluşur. İç dolgu malzeme ise daha düşük dayanımlı moloz taş ve topraktan oluşur. Yığma kemer köprüler bu şekilde inşa edilir. Yığma kemer köprüler şekillerine göre ikiye ayrılır.

- Düz kemerli köprüler
- Dik kemerli köprüler

### 3.2.1. Düz kemerli köprüler

Düz kemerli köprüler birden fazla açıklık olup döşemenin düz devam ettiği köprü tipidir. Büyük nehirleri aşmak için kullanılan bu köprülerde kemerler boyut olarak birbirine benzer şekilde inşa edilir.



Şekil 3.6. Düz kemerli Sokullu Mehmet Paşa Köprüsü (Anonim 6, 2018)

### 3.2.2. Dik kemerli köprüler

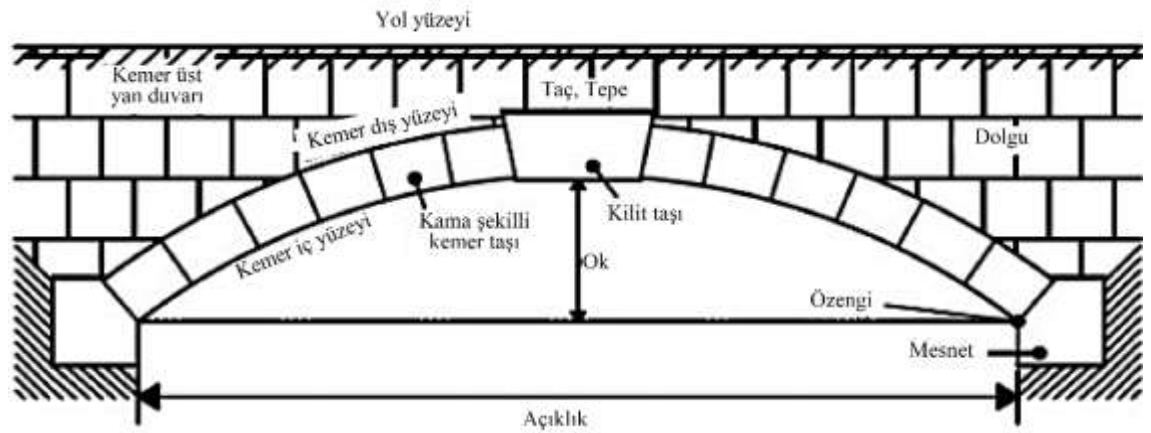
Su seviyesinin yüksek olduğu akarsuları geçebilmek için yapılan köprülerdir. Su, ayak inşasına elverişli olmadığı için birbirine bağlanacak iki yaka üzerinde taş kenarlar oluşturulduktan sonra karşılıklı birer ayak üzerinde yükselerek devam eden yuvarlak ya da hafif sivri kemerli bir yay formuna sahip köprülerdir.



Şekil 3.7. Dik kemerli Şenyuva Köprüsü (Anonim 7, 2014)

### 3.3. Tarihi Kemer Köprü Yapı Elemanları

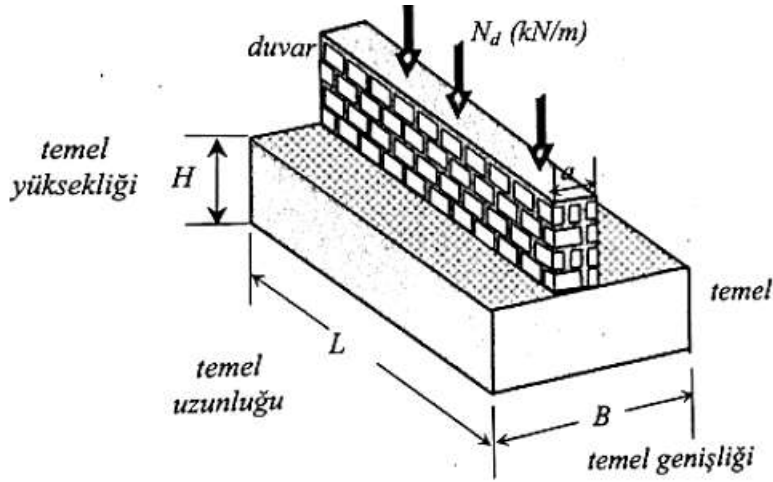
Tarihi kemer köprüler birçok yapı elemanından oluşmaktadır. Ait oldukları dönem ve buldukları bölgelerin özelliklerini taşıyan bu köprülerin yapı elemanları çeşitlilik göstermektedir.



Şekil 3.8. Kemer taş köprü yapı elemanları (Tanrıverdi ve Gürel, 2019)

#### 3.3.1. Temel

Temeller yapının en alt katında bulunan ve diğer yapı elemanlarından üzerine aktarılan normal kuvvet, moment gibi yükleri zemine aktaran yapı elemanlarıdır. Köprü ayakları doğrudan zemine oturtulamazlar. Temeller dayanımları çok küçük olan zemine doğrudan oturtulursa zemin kısmında, zeminin normal dayanımının çok üzerinde gerilmeler oluşur. Bunun sonucunda zımbalama etkisi oluşur ve ayaklar zemini zımbalayarak saplanır.



Şekil 3.9. Temelin bölümleri (Anonim 8, 2022)

### 3.3.2. Duvar

Taş, tuğla, kerpiç gibi malzemelerin üst üste konularak birleştirilmesiyle oluşan yapı elemanlarıdır. Aralarında bağlayıcı bir malzeme ya da üst üste yığılarak oluşturulurlar. Duvarlar üzerlerine gelen yükleri direk zemine aktarırlarken, yapının iç kısımlarını ve yanlarını dış etmenlere karşı korurlar.

Tarihi kemer köprüler geometrik şekilsiz ve geometrik şekilli doğal taş duvarlar olmak üzere ikiye ayrılırlar.

- Geometrik şekilsiz doğal taş duvarlar, ocaklardan ilk çıkarıldıkları şekilde olan ya da çok az işlem görmüş faklı boyutlarda ve geometrik şekilleri olmayan taşlardan elde edilen duvarlardır. Moloz taşlar irili ufaklı boyutlarda olabilir ve yüzeyleri düzgün şekilli değildir. Duvarlar örülürken bu tipteki taşlar yerlerine yerleştirildiğinde çıkıntılı olan yerleri çekiçle kırılıp, inşası gerçekleştirilir.
- Geometrik şekilli doğal taş duvarlar, yüzeyleri düzlemsel ve prizmatik olan taşlardan elde edilen duvarlardır. Kullanım amacı ve yerine uygun olarak ya da bazı el aletleriyle işlenerek dekoratif şekilde de kullanılabilirler. Doğal taşların işlenmesi oldukça güçtür. Fakat güzel görünüşleri ve çevresel faktörlere karşı dayanım gösterdikleri için yoğunlukla tercih edilmektedirler. Moloz taşlar, el aletleri kullanılarak kaba şekilde düzeltildiklerinde elde edilen taşlara kaba yonu taş, daha çok uğraş ve özenle düzeltilerek elde edilen taşlara ise ince yonu taş adı verilmektedir. Taşların bütün yüzeylerinin işlenmesiyle oluşan muntazam şekilli taşlar ise kesme taş olarak adlandırılmaktadır. Bu tür taşlar kare veya dikdörtgen şeklinde yontulurlar. Kaba ve ince yonu taşlar kullanım amaçlarına göre 1-4 yüzeyi düzgün olabilirken kesme taşların bütün yüzleri düzdür. Kesme taşlar blok taşı olarak kullanılabilirken kaplama taşı olarak da kullanılabilirler.

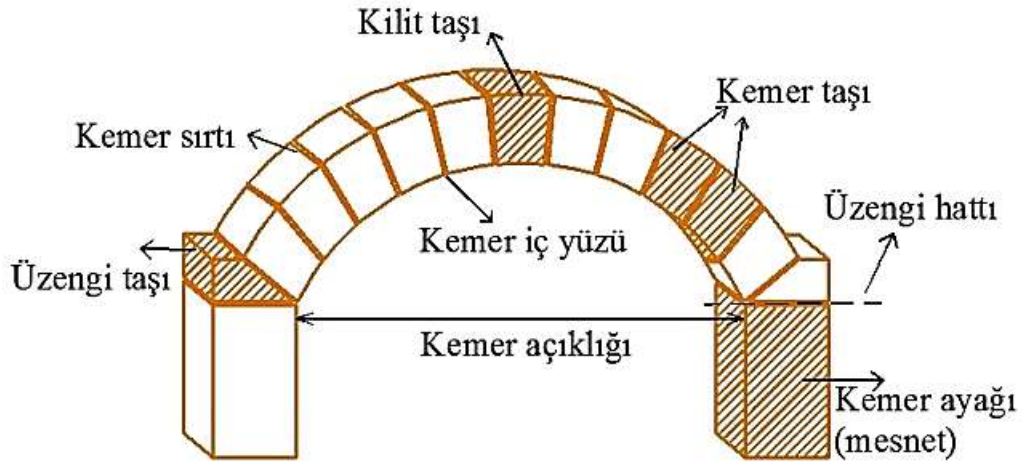
### 3.3.3. Döşeme

Köprülerde insanların ve taşıtların üzerinden geçtiği kısımlardır. Köprüler yapılırken sırasıyla ayaklar, kemerler, tempan duvarları oluşturulduktan sonra iç dolgu malzemesi yerleştirilip en son döşeme bölümüyle köprünün inşası tamamlanmış olur. Döşemeler malzeme tiplerine göre değişiklik gösterir. Döşemelerde kullanılan malzemeler ahşap, kesme taş ya da doğal taş, çelik ve betonarme olabilir. Kendi ağırlıklarını taşıyabilen bu yapı elemanları üstüne gelen yükleri kemerlere ve tempan duvarlarına iletirler.

### 3.3.4. Kemer

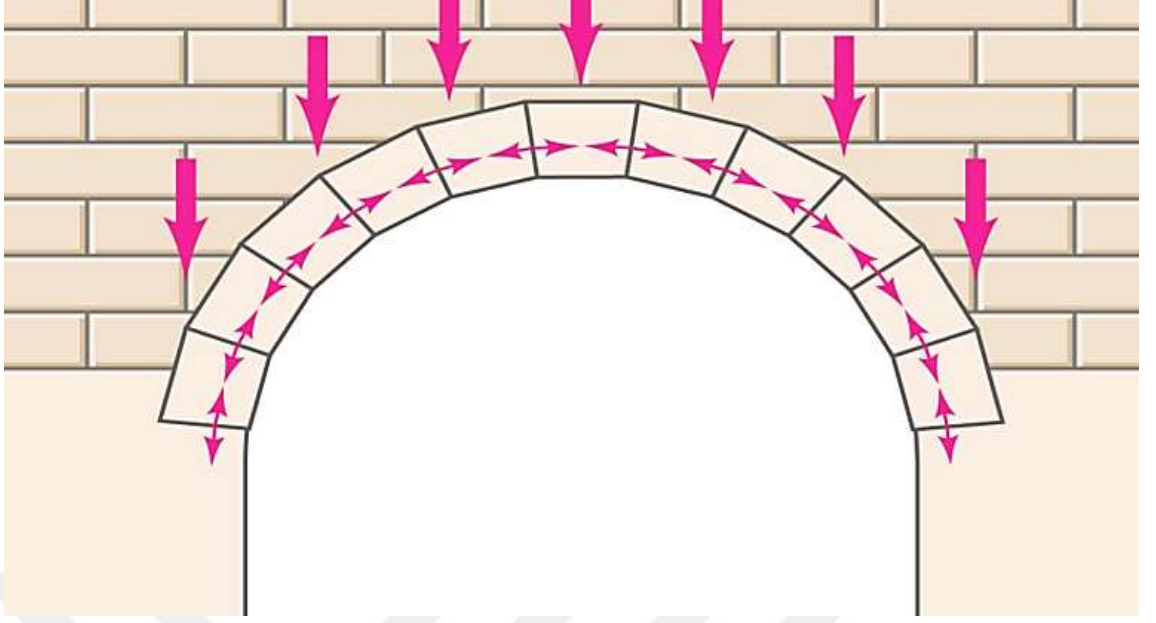
Uzunlukları kesit ölçülerine oranla büyük olan, aralarında boşluk bulunan iki düşey elemanı birbirine bağlayan eğri eksene sahip taşıyıcı elemanlardır. Yığma kemer köprülerde kemer bölümünde kullanılan malzemeler zamanla farklılaştığı için köprü en kesitleri de buna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Yığma kemerlerde genellikle taş kullanıldığı için en kesitlerde bu bağlı olarak büyüktür.

Kemerin yapı elemanları kilit taşı, kemer taşı, kemer ayağı ve üzengi taşıdır. Yığma köprülerde kemer inşa edilirken önce kemer ayağının üzerine üzengi taşı konur. Ardından kemer taşları iki kemer ayağından devam edecek şekilde dizilip en son kilit taşı yerleştirilir. Kemerler inşa edilirken en önemli kısım kilit taşının yerleştirilip kemerin kilitlenmesinin sağlanmasıdır. Kilit taşı kemerin en yüksek noktasına konur.



**Şekil 3.10.** Kemerin bölümleri (Koç 2015)

Kemerler basınç etkisinde çalışan elemanlardır. Kemerler yapılırken seçilen malzemeler basınca çalışan malzemeler olmalıdır. Kemerler taşıdıkları yatay ve düşey kuvvetleri mesnetlerine aktarırlar (Şekil 3.11). Kemer mesnetleri tüm kuvvetleri taşıyacak şekilde modellenir.



Şekil 3.11. Kemerde yük aktarımı (Anonim 9, 2022)

### 3.3.5. Sütun

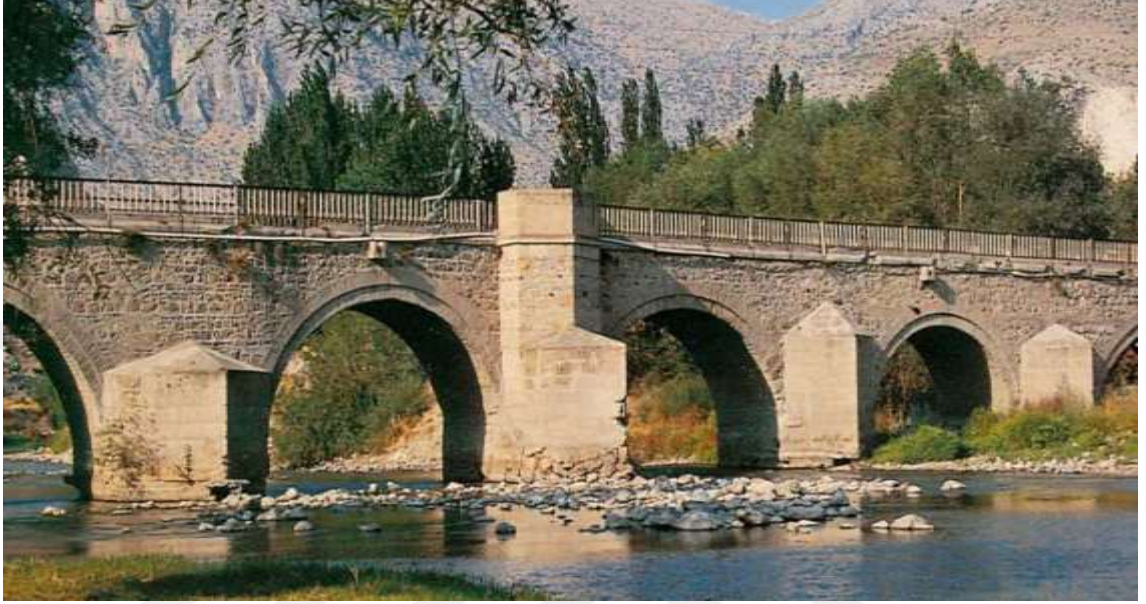
Genellikle silindir şeklinde taş veya betondan yapılmış yapı elemanlarıdır. Tek parça veya birden çok bloktan oluşabilir. Derin vadileri geçmek için yüksek yığma köprüler inşa edildiğinden buna bağlı olarak sütunların da yükseklikleri artmaktadır. Kemer kirişlerinden gelen yükler sütunlara, sütunlardan ise zemine aktarılır.



Şekil 3.12. Yüksek sütunlu kemer köprü örneği Varda köprüsü (Anonim 10, 2022)

### 3.3.6. Selyaran

Köprü ayaklarında meydana gelecek aşınmayı önlemek amacıyla suyun akış yönüne zıt olacak şekilde köprünün ayak bölümlerinin önüne yerleştirilen taştan yapılmış yığma yapı elemanıdır. Yuvarlak ve üçgen kesitli şekildedirler. Bunun sebebi akan suyun getirdiği alüvyonların ayakların önünde birikmesini engellemektir.



Şekil 3.13. Selyaran örneği Çağlayan köprüsü (Anonim 11, 2022)

## 3.4. Tarihi Yığma Köprülerde Kullanılan Malzemeler

### 3.4.1. Doğal taşlar

Doğadan hazır şekilde alınan ve sert, uzun ömürlü, dayanımı yüksek bir yapı malzemesidir. Taşlar, oluşum biçimine göre magmatik, tortul ya da başkalaşmış taşlar şeklinde sınıflandırılmaktadırlar. Kumtaşı, kireçtaşı, traverten taşı gibi taşlar doğal taşların en bilinen örnekleridir. Taşlar basınç dayanımı oldukça yüksek, çekme dayanımları düşük yapı malzemelerdir.

Tarihi yığma yapılarda kullanılan doğal taşların Türk Standartları Enstitüsü'ne (TSE) göre minimum basınç ve çekme dayanımları aşağıda belirtilmiştir (TS 2513, 1977) (Çizelge 3.1).

**Çizelge 3.1.** Doğal duvar taşlarının en düşük basınç ve çekme dayanımları (TS 2513, 1977)

Taşın cinsi	Basınç direnci (kgf/cm <sup>2</sup> )	Eğilmede çekme direnci (kgf/cm <sup>3</sup> )
Kalker, traverten, kireç bağlayıcılı kumtaşı	350	30
Yoğun kalker, dolomit bazalt	500	40
Sıhş bağlayıcı kumtaşı, grovak	800	60
Granit, siyenit, diyorit, melafir, diyabaz, andezit	1200	75
Diğer tortul ve metamorfik taşlar	500	50
Diğer magmatik taşlar	1400	80

### 3.4.2. CDP (Concrete Damaged Plasticity) malzeme modeli

Beton ve benzeri gevrek malzemelerin plastik davranışının tanımlamak için özel bir malzeme modeli olan CDP (Concrete Damaged Plasticity) kullanılmaktadır (Hibbitt vd. 2014). CDP modeli betonun karmaşık davranışını temsil edecek şekilde plastik ve elastik özelliklerinin tanımlanmasını sağlamaktadır. Ayrıca CDP modeli bu şekilde ABAQUS/Explicit analizlerinde büyük kolaylık sağlayarak, deneysel çalışmalara en çok yakınsama sağlayan analiz çeşididir. Bu tez çalışmasında, gevrek özellikte olan taş köprünün çekme ve basınç gerilmeleri altındaki malzeme davranışını dikkate almak amacıyla sıkça kullanılan CDP (Concrete Damaged Plasticity) modeli kullanılmıştır.

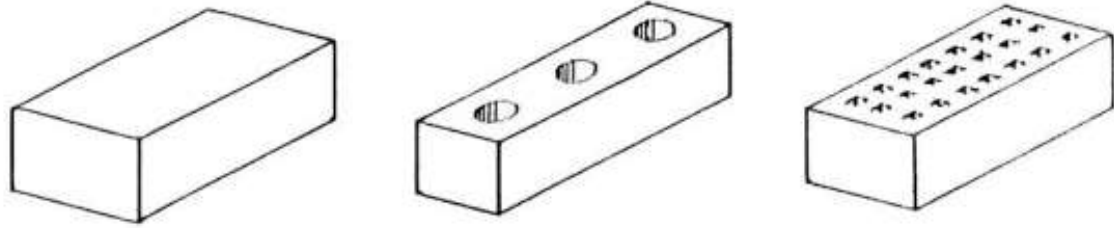
Dayanım hipotezlerinden bir tanesi Drucker-Prager hipotezidir. CDP modeli de Drucker-Prager hipotezini kullanır. Gevrek malzemenin kırılması ve kırılma esnasındaki çatlaklar CDP modeliyle elde edilir. CDP modelinde, basınç bölgesindeki ezilme ve çekme bölgesinde oluşan çatlakları modellemek amacıyla hasar parametresi olarak Çizelge 3.2’de verilen sayısal değerler taş yapılar için yaygın olarak kullanılmaktadır (Hökelekli ve Yılmaz 2019). Makro model kısımları olan kemer, yan duvarlar ve dolgu malzemesi için CDP tanımlı mekanik özellikler EK-2, EK-3 ve EK-4’te verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Taş yapılar için yaygın olarak kullanılan CDP parametreleri

Dilatasyon açısı	Eksantrisite	$F_{b0}/f_{c0}$	K	Viskozite
10	0.1	1.16	0.667	0.01

### 3.4.3. Tuğla

Yapıda ve duvar örerken kullanılan tuğla belli büyüklüklerdeki kalıplara döküldükten sonra kurutulup, ardından fırınlarda pişirilen yapı malzemeleridir. Teknoloji henüz gelişmemişken güneşte kurutularak elde edilirdi. Kil, toprak ve balçığın harmanlanmasıyla elde edilir. Tuğla, briket, kiremit, beton blok ve plak, büz genel teknik şartnamesinin ilgili standardına göre, tuğla don gibi olaylara ve basınca karşı dayanıklı olmalı ve hasar görmemelidir (TS EN 771-1, 2005)



**Şekil 3.14.** Yığma yapılarda kullanılan sırasıyla dolgu, delikli, boşluklu tuğla (Gamarra Castañeda 2012)

Tuğlalar içeriğindeki kilin farklı ısı derecelerinde pişirilmesiyle kilde oluşan değişikliklerden ötürü farklı özelliklere sahiptirler. Kilin maruz kaldığı ısı derecelerinin kil üzerindeki etkilerine dikkat edilmelidir. Pişme derecelerine bağlı olarak tuğlalar sert ve geçirimsiz olurlar. Pişmiş bir malzeme olduğu için ısı geçirimi oldukça yüksektir.

Tuğlaların basınç dayanımlarının aritmetik ortalaması, düşey delikli tuğlalarda (TS 4377) 30-80 kg/cm<sup>2</sup>, yatay delikli tuğlalarda (TS 4563) ise 25-75 kg/cm<sup>2</sup> arasında bir değerdir.

### 3.4.4. Harç

Yığma yapılarda tuğla ve taşların birbirine kenetlenmesini ve sağlamlaşmasını sağlayan; saman, kum, kireç vb. malzemelerin su ile karıştırılmasıyla elde edilen bağlayıcı malzemelerdir.

Yapılarda kireç harcı, çimento harcı ve horasan harcı olmak üzere üç adet harç çeşidi kullanılır. Kireç harcı kum, kireç ve suyun belli ölçülerde karıştırılmasıyla elde edilir. Kirecin eklendiği bu harç tipinin işlenebilirliği yüksektir. Çimento harcı çimento, kum ve suyun belli ölçülerde karıştırılmasıyla elde edilir. Çimento harç dayanımını arttırırken plastik yapıda olan bir malzemedir. Horasan harcında ise öğütülmüş ve kırılmış tuğlalar yani pişmiş malzemeler kullanılmıştır. Yığma yapılarda kullanılan en yaygın harç tipidir.

## 3.5. Tarihi Yığma Yapılarda Oluşan Hasarlar

Tarihi yapılar maruz kaldıkları çeşitli etkilere rağmen günümüze kadar ayakta kalabilmişlerdir. Tarihi yapıların önemli bir kısmını oluşturan yığma kemer köprüler doğal afetler veya insan kaynaklı etkiler altında kalarak çeşitli hasarlar görmektedir. Yığma kemer köprüler benzer etkilere maruz kalmalarına rağmen tasarımları nedeniyle

farklı hasarlara maruz kalırlar. Hasarların iyi tayin edilmesi için yapının tarihinin, malzeme özelliklerinin ve zemin yapısının bilinmesi gerekir. Tarihi yığma yapılarda birçok hasar tipi mevcuttur.

### 3.5.1. Deprem ve sel hasarları

Yığma yapılar buldukları bölgelerdeki fay hatları nedeniyle yıkıcı depremlerin etkisi altına kalabilmektedirler. Yığma kemer köprüler taş malzemeden yapıldıkları için basınç etkisi altındadırlar. Düşey yüklere karşı dayanımları yüksektir. Ancak deprem gibi yatay kuvvetler karşısında hasar görebilirler (Yanık vd. 2017).



**Şekil 3.15.** Hindistan Bhurj ve Koyna depreminde hasar gören köprüler (Yanık vd. 2017)

Düzensiz rejimli akarsular yağışlı mevsimlerde sel felaketlerine neden olurlar. Yığma köprüler sellerden en çok etkilenen yapılardır (Alaboz 2008). Su seviyesi yükselirken bunun yanında çeşitli malzemeleri de bünyesine kattığı için köprüler açısından tehlike oluşturmaktadır. Böyle durumlarda selyaranlar olmasına rağmen köprüler büyük hasar görmektedirler.



**Şekil 3.16.** Aşırı yağmur sonucu tamamen yıkılan Osmanbaba köprüsü (Yanık vd. 2017)

### 3.5.2. İnsan kaynaklı hasarlar

Savaşlar, tasarım hataları, yanlış onarımların yapılması, bilgi eksikliği, köprü eğiminin değiştirilmesi, aşırı yüklemeler ve akarsu yatağının değiştirilmesi gibi sebepler insan kaynaklı hasarlara neden olmaktadır.



**Şekil 3.17.** Yanlış onarım nedeniyle deforme olmuş Büyükçekmece köprüsü (Yanık vd. 2017)

### 3.5.3. Zeminden kaynaklı hasarlar

Akarsu yataklarının yönleri değiştirilmesi temellerde oyulmalara ve oluşan oyukların zamanla büyümesi temellerde oturmalara neden olur. Bu nedenle çatlaklar ve kırılmalar meydana gelir (Ural ve Doğangün 2007). Beklenmeyen aşırı yüklemelerde ise zemin iyi analiz edilmediyse ve temel boyutlandırması yanlış yapıldıysa zeminde sıvılaşma meydana gelir.



**Şekil 3.18.** Zemin kaynaklı hasara uğramış Mataracı köprüsü (Yanık vd. 2017)

### 3.5.4. Zamana bağlı hasarlar

Tarihi yığma köprülerde gece ve gündüz arasındaki sıcaklık farkından ve tekrar eden şiddetli rüzgâr ve yağmur nedeniyle zaman bağlı hasarlar oluşur (Ural ve Doğangün 2007).



**Şekil 3.19.** Zamana bağlı hasar görmüş Kınalı köprü ve tarihi Özbek köprüsü (Yanık vd. 2017)

### 3.6. Yersel Lazer Tarama Yöntemiyle Tarihi Yapıların Modellenmesi

Yersel lazer tarama yöntemi küçük objelerin yanında daha büyük ve karmaşık yapıların da modellenmesinin mümkün olduğu hızlı ve ekonomik bir yöntemdir. Yersel lazer yöntemiyle yapıların konumları, doğruluğu yüksek bir şekilde elde edilir. Yöntem kültürel mirasın korunmasında önemli bir rol oynamaktadır. Tarihi yapıların 3 boyutlu modellenmesinde oldukça etkili bir yöntemdir. Yersel lazer tarama yönteminden önce bu tip yapılarda tek tek noktaların koordinatları belirlenmeye çalışılırdı. Ancak bu oldukça zaman kaybına neden olurdu. Yersel lazer tarama yöntemiyle yapılardan hızlı ve güvenilir bir şekilde milyonlarca noktanın koordinatları elde edilebilmektedir (Öksüz ve Topan 2012).

#### 3.6.1. Yersel lazer tarama teknolojileri ve tarayıcı bileşenleri

Yersel lazer tarayıcı sistemleri tarama ünitesi (tarayıcı), kontrol ünitesi, güç kaynağı, tripod ve sehpadan oluşmaktadır (Aşkın 2009). Bir yersel lazer tarayıcının en önemli birimi tarama ünitesidir. Taranan nesne veya yapının 3 boyutlu verilerini oluşturan kısımdır. Tarama ünitesi lazer telemetresi (lazer uzaklıkölçer) ve lazer ışın saptırma ünitesi (optik mekanik tarayıcı) olmak üzere iki kısımdan oluşur (Gürcan 2012).

Tarihi Onaç köprüsünün ölçümlerinde Faro Focus 3D Scanner Model tarayıcıyla 14 istasyon kurulumu ile 360°'lik taramalar yapılarak, 20 ölçüm dâhilinde, 88.896.970 nokta nokta atılmış, gerçek renklerde ölçümler gerçekleştirilmiştir. 3D Lazer Tarama, 10 m'de 1-3 mm hassasiyette ve yoğunlukta yapılmıştır. Bu istasyonlar, ölçüm sırasında yerleri sabit olan topların taranması yardımıyla birbirlerine "Registration" yapılarak (bağlanarak) yapının birleştirilmiş tarama verisi elde edilmiştir. Total station ile 3D tarayıcının okuyamadığı arazi kotlarının ve çevre sınırlarının tespiti yapılmıştır.

Belgelemede yardımcı olarak, Nikon D3200 Fotoğraf Makinesi (24 Megapixel), AF-S Nikkor 12-24 mm 1:4 ED ve AF-S Nikkor 55-300 mm 1:4.5 ED lensler ile yapının her açıdan fotoğrafları çekilmiş, el eskizleri ve geleneksel ölçü aleti metre kullanılarak ölçüm çalışmaları desteklenmiştir. Bu çalışmanın dışında çevre kotlarının tespitinde ise, Topcon Hiper SR Model total station aleti ile ölçümler yapılmıştır.

### 3.6.2. Yersel lazer tarama yöntemi uygulama süreci

Yersel lazer tarama yönteminin uygulama aşamaları aşağıdaki gibidir (Şekil 3.20)



Şekil 3.20. Uygulama sıralaması (Safkan vd. 2014)

Lazer tarama yapılmadan önce iş planı yapılır. İş planında tarama işleminin gerçekleştirileceği istasyon konumları ve istasyon sayıları belirlenmeli, taramanın görüntü çözünürlüğüne ise dikkat edilmelidir. Lazer tarama istasyon yerleri ve sayısı, taranacak yapının tüm cephelerini kapsayacak şekilde seçilir. Taramanın görüntü çözünürlüğü, tarayıcının mesafe ölçüm hassasiyeti ile hangi sıklıkta nokta ölçmesini belirten açısal çözünürlüğe bağlıdır.



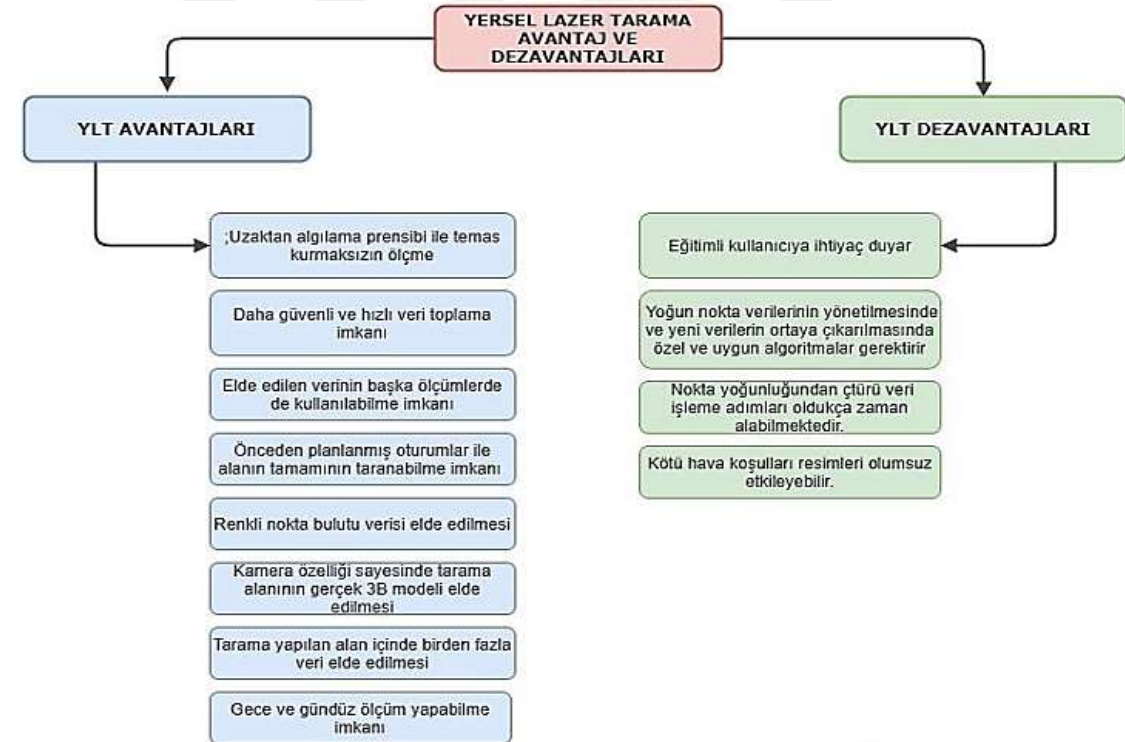
Şekil 3.21. Yapıda yersel lazer tarayıcının konumlandırılması

Taramalar sonucunda elde edilen birleştirilmiş üç boyutlu ve renkli tarama verileri kullanılarak istenilen plan, kesit ve cephe düzlemlerinde yüksek çözünürlüklü ortofotolar elde edilmiştir. Hazırlanan plan ve kesit ortofotolarında önce kesit ve plan düzlemleri alınmış, sonrasında ise kesitte görünüşe giren yüzeyler ve planlarda zeminleri gösteren ortofotolar hazırlanmıştır.

Ayrıca üç boyutlu ve renkli tarama verisinin AutoCAD ve üst sürümlerinde kullanılabilmesi için PCG formatında nokta bulutu dosyası hazırlanmıştır. AutoCAD ve üst sürümleri içerisinde yerleşik olarak bulunan “Pointcloud” komutları ile PCG formatındaki nokta bulutu dosyası kullanılarak istenilen düzlemlerde plan kesit ve görünüşler çizilebilmekte, perspektif ve izometrik görünüşler alınabilmektedir. Yapılan ölçüm sonucunda elde edilen nokta bulutu ve fotoğraflar dijital ortamda eşleştirilerek çizim altlığı oluşturulabilmektedir.

### 3.6.3. Yersel lazer taramanın avantaj ve dezavantajları

Yersel lazer tarama tekniğinin birçok alanda kolaylık sağlamaktadır. Yöntemin avantajları çok olsa da dezavantajları mevcuttur (Sabuncu ve Özener 2020) (Şekil 3.22). Teknolojinin gelişmesi ile birlikte dezavantajları daha aza indirilebilir ve daha iyi çalışma koşullarında veri elde edimi sağlanabilir.

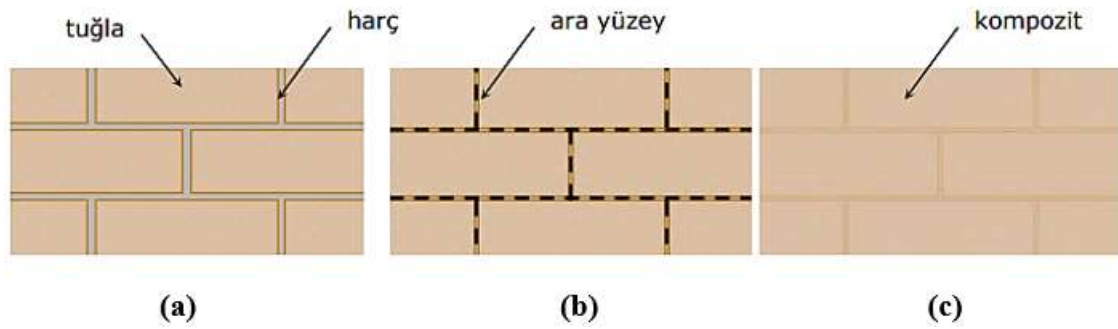


Şekil 3.22. Yersel lazer tarama yönteminin avantaj ve dezavantajları (Sabuncu ve Özener 2020)

### 3.7. Tarihi Yığma Yapılarda Modelleme Yöntemleri

Tarihi yığma yapıların sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapısal çözümlenmeleri gerçekleştirilirken, taşıyıcı özelliği bulunan duvar elemanlarının modellenmesi oldukça önemlidir. Lineer olmayan çözümlenme tiplerinde bilinmeyen sayısı fazladır ve sistem rijitlik matrisinin boyutları oldukça büyüktür. Bu sebeplerden ötürü analizlerin çözüm süreleri artmaktadır. Büyük yığma sistemlerde bu sorunlar için (Lourenço 1997) homojenleştirme tekniğini önermiştir. Homojenleştirme tekniğiyle tuğla ve harcın birlikte kullanılmasıyla oluşturulan duvar elemanı için tek bir malzeme özelliği tanımlanabilmektedir. Tarihi yığma yapıların sayısal analizlerinde kullanılan malzeme modelleri ve modelleme şekilleri, betonarme yapılara göre oldukça farklılık gösterebilmektedir. Yığma yapıların büyüklüğüne bağlı olarak 3 farklı modelleme çeşidi aşağıda verilmiştir. Bu modelleme çeşitlerine (Lourenço 1997) çalışmasında oldukça yer vermektedir. Bu modelleme çeşitleri;

- Detaylı mikro modelleme
- Basitleştirilmiş mikro modelleme
- Makro modelleme



**Şekil 3.23. a)** Detaylı mikro modelleme; **b)** Basitleştirilmiş mikro modelleme; **c)** Makro modelleme (Ural and Doğangün 2007)

Detaylı mikro modelleme, yığma duvarı meydana getiren tuğla ve harcın her birinin ayrı bir biçimde elastisite modülleri ( $E$ ), poisson oranları ( $\nu$ ) ve elastik olmayan özelliklerinin dikkate alındığı modelleme çeşididir. Bu modellemede çatlakların, yığma birim elemanı olan tuğla ve harcın arasında bulunan ara yüzeylerde meydana geleceği varsayılmaktadır.

Basitleştirilmiş mikro modelleme, bir harç ve iki yığma birim-harç ara yüzeyinden oluşan ve her bir bağlantı noktasında kütle yoğunlaştırması yapılan ve bunun ortalama ara yüzey olarak kabul edildiği modelleme çeşididir. Yığma yapıda oluşabilecek çatlakların ortalama ara yüzey çizgisinde devam edeceği varsayılmaktadır. Burada harcın poisson oranı ( $\nu$ ) dikkate alınmadığı için, elde edilen veriler detaylı mikro modellemeye oranla biraz farklıdır (Lourenço 1997). Fakat oluşan bu fark ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

Makro modelleme, yığma birim ve harcın özellikleri homojenleştirme yapılarak yığma duvar kompozit malzeme olarak ele alınmaktadır. Makro modellemedeki mekaniksel özellikler de homojenleştirme işlemine tabi tutularak elde edilen değerlerdir.

Homojenleştirme teknikleri bu çalışmanın kapsamında yer almamaktadır. Bu modelleme şekliyle ilgili detaylara (Lourenço vd. 2001) yayınında yer verilmektedir.

Detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme tekniklerinin her biri farklı durumlarda tercih edilmektedir. Büyük boyutlu ve karmaşık yapı sistemleri için genellikle makro modelleme tekniği kullanılmaktadır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen kritik bölgeler için makro modelin yanında mikro modelleme tekniği de kullanılabilir.

Bu tez çalışmasında hazırlanacak bilgisayar modeli, yığma taş yapıların davranışını iyi temsil edebilen ve yapının göçme durumları hakkında da bilgi verebilen özel bir “makro modelleme” tekniğiyle oluşturulacaktır. Yapının üç boyutlu hali ise yersel lazer tarama tekniğiyle elde edilecektir.

Makro modelleme tekniğinde kullanılan düğüm ve eleman sayısı, mikro modellemeye göre oldukça az sayıda sonlu eleman gerektirdiği için bu yapı sisteminde makro modelleme tercih edilecektir. Bu modelleme, genellikle büyük ve karmaşık sistemli yığma yapıların duvar, ayak, kemer ve tonozlarının modellenmesinde büyük rol oynamaktadır. Ancak bu yaklaşımın dezavantajlarından bazıları çatlak geometrisi, yayılımı ve göçme davranışı hakkında detaylı bir bilgi verememesidir. Makro modelleme tekniği, modelleme aşamasında yorumlanacak kabuller ile analizi yapılacak elemanın tasarımını kolaylaştırmasının yanı sıra, verimli sonuçlar da doğurduğundan yöntem olarak kullanılacaktır.

Yersel Lazer Tarama son zamanların en çok tercih edilen teknolojilerinden birisidir. Tarihi yapılarda üstlenmiş olduğu görev, bu yöntemin en büyük başarısıdır. Lazer tarayıcılar sayesinde çok kısa sürelerde ölçülen bu yapıların üç boyutlu anlık halleri bilgisayar ortamında arşivlenebilmektedir. Yersel lazer tarama ekipmanları, nesnenin ya da yapının etrafında bulunan birçok noktadan veri sağlaması nedeniyle çok az bir hata payı ile şeklin orijinaline yakın dijital bir görüntüsünü oluşturmaktadır. Yersel lazer tarama tekniği dijital veriyi oluşturmasının ardından, oluşturulan bu noktalar kümesi bir nevi bulut oluşturur. Bu noktalar kümesine “nokta bulutu” adı verilmektedir. Bu şekilde yapının üç boyutlu hali hızlı bir şekilde oluşturulacaktır.

### **3.8. Tarihi Yapılarda Analiz Yöntemleri**

Tarihi yapıları mühendislik yöntemleriyle analiz etmesi güç karmaşık ve büyük yapılardır. Bu nedenle 3 boyutlu modelleme yöntemleri ile modeller oluşturularak sonlu elemanlar yöntemiyle analizleri gerçekleştirilir (Akan ve Özen 2005). Analiz yöntemleri statik analiz, serbest titreşim analizi (modal analiz), davranış spektrum analizi ve zaman tanım alanında analiz olmak üzere dörde ayrılır.

#### **3.8.1. Statik analiz**

Statik analiz, bir yapının kendi yükü veya dışarıdan gelen herhangi bir hareketli yükün yapının üzerindeki etkisini incelememizi sağlayan, yapıda meydana gelebilecek deformasyon, yer değiştirme ve yapının bu yüklemeleri taşıyıp taşıyamayacağı gibi konularda bilgi veren analiz yöntemidir.

### 3.8.2. Serbest titreşim analizi

Modal analiz yapıların dinamiklerini, nasıl titreştiğini ve uygulanan kuvvetlere ne kadar dirençli olduklarını gösteren analiz yöntemidir. Bütün yapılar sürekli titreşim halindedir. Modal analiz yöntemiyle yapılar test edilebilir ve optimizasyonları yapılabilir. Yapıların doğal rezonansları ve sönümleme parametrelerine ulaşılabilir. Yapıların animasyonlu geometrisi üzerinde mod şekilleri daha iyi anlaşılabilir. Matematiksel yöntemler kullanılarak yapının doğal frekans, sönüm oranı ve mod şekilleri gibi modal özellikleri elde edilir.

### 3.8.3. Davranış spektrum analizi

Zamana bağlı olarak yer değiştirme ve kesit etkisi gibi parametrelerin değişiminin elde edilmesini sağlar. Yapının güvenli alanda kalabilmesi için en büyük parametre göz önünde bulundurulur. Bu şekilde uzun sayısal yöntemler kullanılmadan en elverişsiz değerler kolay ve hızlı bir şekilde elde edilebilir. Spektrum değerlerinden en büyüğü göz önüne alındığı için belirli bir anda çeşitli modların katkılarının bulunmasında yeterli olmaz ve bu durum matematiksel bir çözümleme gerektirir. Matematiksel yaklaşımlardan biri olan Mutlak Değerlerin Toplamı (ABS) yönteminde, bütün modların en büyük etkilerinin aynı zamanda gerçekleştiği kabulü yapılarak, ele alınan parametrenin oluşturacağı en büyük değerlerinin üst sınırı elde edilir. Ancak elde edilen bu değer çok büyük çıktığı için genellikle kullanılmamaktadır. Bu yöntemin yerine Karelerinin Toplamının Karekökü (SRSS) yöntemi ile elde edilen değer, serbest titreşim frekansları ayrı olan sistemlerde kullanılan zaman tanım alanında analizlerle elde edilen sonuçlara bakıldığında oldukça yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Karelerinin Toplamının Karekökü yönteminin sınırlamalarını kaldıran, çok daha kapsamlı bir yöntem olan Tam Karesel Birleştirme (CQC) yöntemi, serbest titreşim frekansları birbirine yakın olan sistemler için de kullanılabilir. Modların birbirleriyle etkileşimi göz ardı edilirse Tam Karesel Birleştirme ile Karelerin Toplamının Karekökü yöntemi üst üste çakışır. Bu şekilde matematiksel birleştirme yöntemleri kullanılarak, sistemin zaman tanım alanında dinamik bir çözümünün yapılmasına gerek kalmaz. Ancak Modal Spektral Çözümleme Yönteminde de sistemin dinamik özellikleri (periyot, sönüm ve mod şekilleri) yanında, depremin de dinamik özelliklerini içeren spektrum eğrileri yer aldığı için, bu yöntem dinamik bir yöntem olur. Daha önceki deprem kayıtları incelenerek spektrum eğrilerinin hazırlanmasıyla Modal Spektral Çözümleme Yönteminin başlangıcını ortaya çıkarmak ve böylelikle zaman tanım alanında adım adım sayısal çözüme göre büyük bir kolaylık sağladığı görülmektedir (Celep ve Kumbasar 2004).

### 3.8.4. Zaman tanım alanında analiz

Gerçek deprem kaydının esas alındığı ve gerçek durumla en iyi şekilde uyuşturulması bakımından tercih edilen analiz yöntemidir (Yılmaz 2006). Eğer deprem kaydı mevcut değilse herhangi bir titreşimi deprem kabul edilip, analiz oluşturulabilir. Zaman tanım analiz yönteminde yapıların dinamik yükler altında her saniyesindeki tepkisi analiz edilir.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Bulgular

#### 4.1.1. Onaç köprüsü ve tarihçesi

Tarihi köprü Burdur ilinin 46 km güneydoğusundaki Bucak ilçesinde Onaç çayının üzerinde bulunmaktadır (Şekil 4.1). İncelenen çalışmalarda Selçuklu Dönemi'ne ait olduğu (Müze Uzman Raporu, 2008) düşünülmektedir. Bucak ilçesi Türklerden önce Psidyalılar, Persler, Makedonyalılar, Selefkoslar, Romalılar ve Bizanslılara ev sahipliği yapmıştır.



Şekil 4.1. Günümüz yol ağları üzerinde Onaç köprüsünün yeri (Anonim 12, 2022)

Tarihi Onaç köprüsü 26.61 m uzunluğunda, 2.66 m döşeme genişliğindedir. Dört ayak üzerine oturan, üç kemerden oluşan bir yapıdır. Kemerlerin üst kotları dikkate alındığında, güneydoğudan kuzeybatıya doğru %3 eğime sahiptir. Memba cephesi 24.73 m, mansap cephesi 24.61 m uzunluğundadır. Köprü ayaklarında zamanla toprak birikintileri oluşmuştur. Kemerlerde kullanılan taşlar kesme taşlardır. Bunun yanında bazı bölümlerinde moloz taşlarda bulunmaktadır. Kesme taşlar farklı en ve boy ölçülerindedir. Tempan duvarı ve ayak bölümlerinde ise muntazam olmayan kesme taşların yanında daha çok moloz taş mevcuttur. Çalışmalar yapılırken dere suyunun çekilmiş olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra etrafında yapılan çalışmalardan kalan malzemeler yığılmış, bilinçsiz çalışmalar nedeniyle köprü oldukça bakımsız haldedir (Şekil 4.2-3).



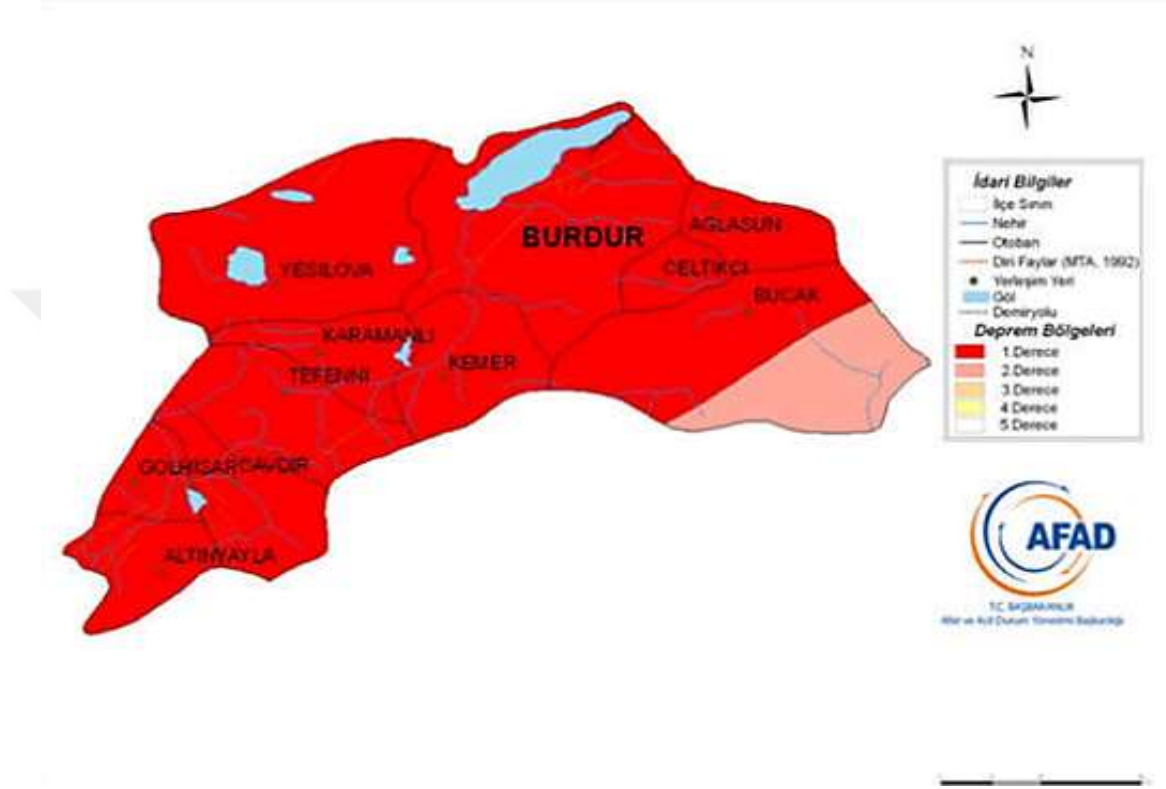
Şekil 4.2. Onaç köprüsünün a) memba; b) mansap yönünden görünümü



Şekil 4.3. Onaç köprüsünün döşeme yakın ve genel görünümü

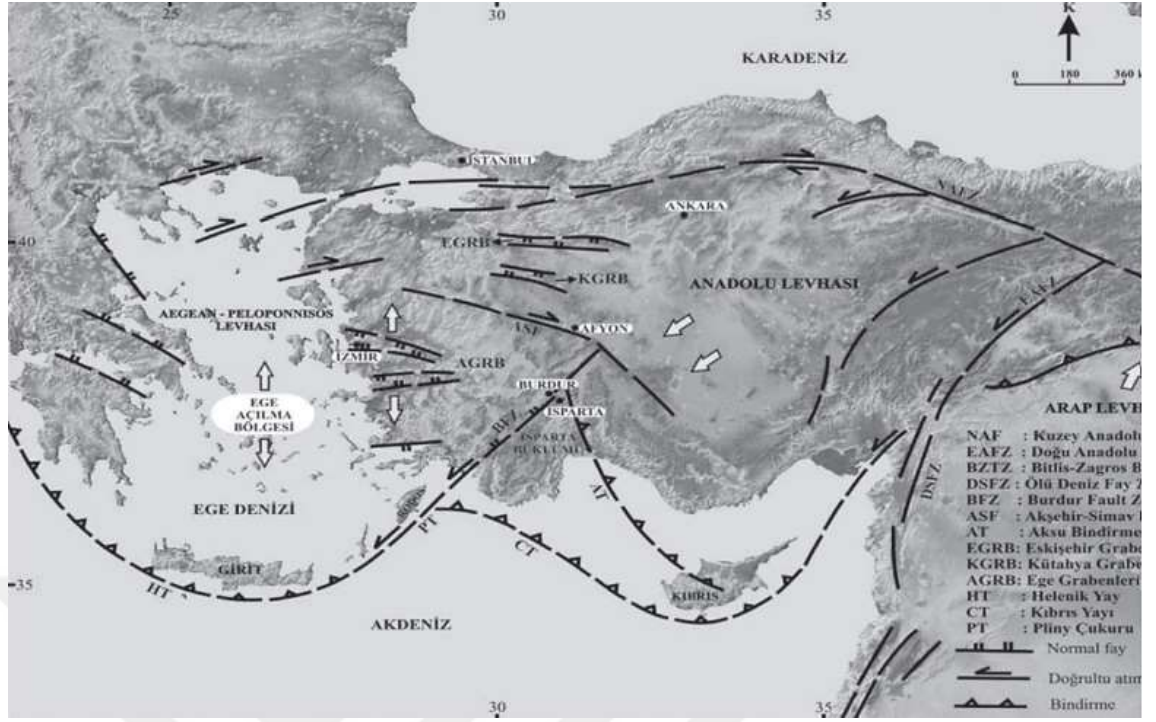
#### 4.1.2. Deprem bölgeselliği

Burdur ili eski dönemlerden bu zamana kadar birçok depreme şahitlik etmiştir. Bu sebeple Onaç köprüsünün de çeşitli depremlere maruz kaldığı bilinmektedir. Burdur da meydana gelen, bilinen yakın yıkıcı depremler 1914 ve 1971 depremleridir. Bu depremlerde Burdur ilinin birçok bölgesinde büyük hasarlar meydana gelmiştir büyük ölçülü oyuklar oluşmuştur.

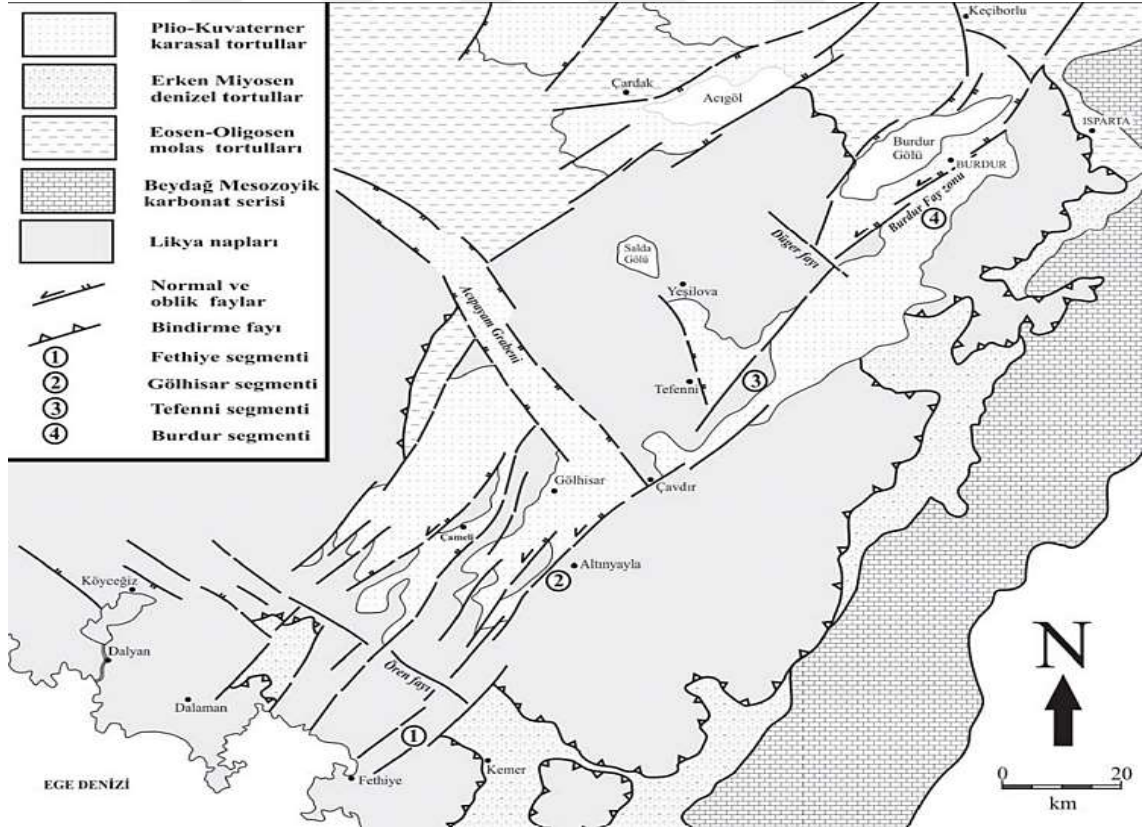


**Şekil 4.4.** Burdur ili deprem haritası (Anonim 13, 2022)

(Bozcu vd. 2007) Fethiye-Burdur fay hattının özelliklerini ortaya koymak amacıyla Burdur-Fethiye arasındaki bölgenin uydu görüntülerini göz önünde bulundurarak, fay hattı boyunca ayrıntılı jeolojik ve jeomorfolojik gözlemler yapmışlardır (Şekil 4.5-6).



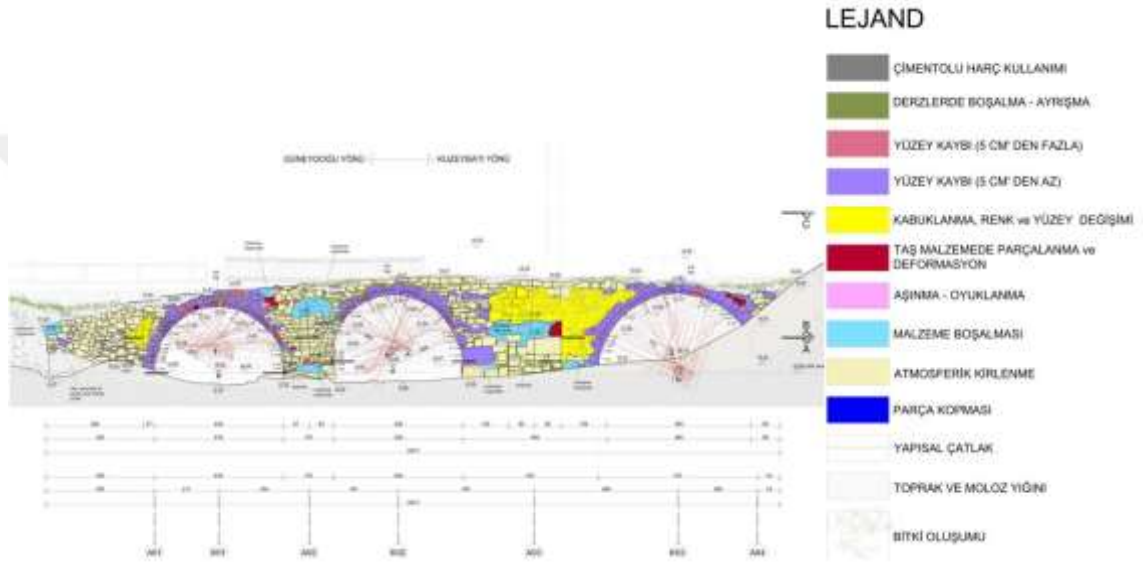
Şekil 4.5. Batı Anadolu'daki aktif fay sistemleri (Bozcu vd. 2007)



Şekil 4.6. Fethiye Körfezi ile Burdur Gölü arasındaki fay hatları (Bozcu vd. 2007)

### 4.1.3. Hasar çeşitleri ve tipleri

Korkuluk bulunmayan köprünün döşemesi, malzeme kayıplarıyla birlikte kısmi olarak özgün özelliklerini göstermektedir. A04 numaralı köprü ayağı büyük ölçüde toprak altında kalarak, kapanmıştır. Köprünün memba cephesinde yer alan selyaranların üst kısımları yok olmuş, mevcut bölümlerinde ise malzeme boşalmaları oluşmuştur. Köprünün mimari elamanlarını oluşturan özgün taş malzemesinde, doku deformasyonları, yer yer parçalanma, kirlenme, renk ve yüzey değişimi ve çimentolu harç müdahaleleri görülmektedir. Harap bir durum gösteren köprüde, bitkilenme, derzlerde boşalma ve ayrışmalar da tespit edilmiştir. Köprü yapı elamanlarında diğer tespiti yapılan bozulmalar, bozulmanın niteliğine göre lejantlarla sınıflandırılmıştır (Şekil 4.7-8).



Şekil 4.7. Memba yönü (rölöve analiz çalışması)



Şekil 4.8. A04 numaralı köprü ayağı

Köprü yapı mimari elemanlarında izlenen malzemeye dayalı bozulmalar aşağıdaki şekildedir (Şekil 4.9-10).

### 1. Ayak

- a. Çimentolu harç kullanımı
- b. Derzlerde boşalma ayrışma
- c. Yüzey kaybı (5 cm'den fazla)
- d. Yüzey kaybı (5 cm'den az)
- e. Kabuklanma, renk ve yüzey değişimi
- f. Taş malzemede parçalanma, deformasyon
- g. Aşınma, oyuklanma
- h. Malzeme boşalması
- i. Atmosferik kirlenme
- j. Toprak ve moloz yığılı

### 2. Tempan duvarı

- a. Çimentolu harç kullanımı
- b. Derzlerde boşalma ayrışma
- c. Yüzey kaybı (5 cm'den fazla)
- d. Yüzey kaybı (5 cm'den az)
- e. Kabuklanma, renk ve yüzey değişimi
- f. Taş malzemede parçalanma, deformasyon
- g. Aşınma, oyuklanma
- h. Malzeme boşalması
- i. Atmosferik kirlenme
- j. Parça kopması
- k. Yapısal çatlak
- l. Toprak ve moloz yığılı
- m. Bitki oluşumu

### 3. Döşeme

- a. Derzlerde boşalma ayrışma
- b. Malzeme boşalması
- c. Yüzey kaybı (5 cm'den az)
- d. Bitki oluşumu

#### 4. Kemer örgüsü

- a. Çimentolu harç kullanımı
- b. Derzlerde boşalma ayrışma
- c. Yüzey kaybı (5 cm'den fazla)
- d. Yüzey kaybı (5 cm'den az)
- e. Kabuklanma, renk ve yüzey değişimi
- f. Taş malzemedede parçalanma, deformasyon
- g. Aşınma, oyuklanma
- h. Malzeme boşalması
- i. Atmosferik kirlenme
- j. Parça kopması



Şekil 4.9. Mansap yönü A04 numaralı ayakta malzeme boşalması



Şekil 4.10. Mansap yönü K01 numaralı kemer iç yüzeyindeki atmosferik kirlenme

#### 4.1.4. Yersel lazer tarama (YLT) ile nokta bulutlarının oluşturulması

Köprünün arşiv araştırması 2017 yılı Nisan ayı içerisinde başlatılmış, 2017 yılı Temmuz ve Ağustos ayı içerisinde dört gün süren bir çalışmayla ölçüm çalışmaları tamamlanmıştır (Şekil 4.11).



**Şekil 4.11.** Focus 3D scanner ile ölçüm yapılması

Yapılan yersel lazer taramasından sonra yapı ve yakın çevresinin koordinatları belirlenmiş renkli nokta bulutu elde edilmiştir (Şekil 4.12-13).



**Şekil 4.12.** Mamba yönü 3D Pointcloud Ortofotosu



**Şekil 4.13.** Mansap yönü 3D Pointcloud Ortofotosu

Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen nokta bulutları Autodesk RECAP programına atılmıştır. Oluşturulan 3D nokta bulutları, 3D katı modelinin oluşması için böylelikle ilk basamağı oluşturmuştur.

#### 4.1.5. Makro modelleme ile 3D modelin oluşturulması

Yersel lazer tarama yöntemiyle oluşturulan nokta bulutu yardımıyla ABAQUS programında katı modelin oluşabilmesi için sırasıyla Autodesk RECAP, AutoCAD 3D ve ABAQUS programları kullanılmıştır. Malzeme ve rijitlik farkından dolayı makro model; kemer, yan duvar ve dolgu olmak üzere üç kısımdan oluşturulacaktır.

İlk olarak yapının üç boyutlu modelini oluşturabilmek için memba ve mansap yönlerinden köprü elemanlarının her biri ayrı ayrı kemer, tempan duvarları, ayaklar ve döşeme üzerinde yeterli noktalar seçilerek her bir noktanın üç boyutlu koordinatları belirlenmiştir (Şekil 4.14-16).



Şekil 4.14. Yersel lazer tarama ile oluşturulan memba yönü nokta bulutu



Şekil 4.15. Yersel lazer tarama ile oluşturulan mansap yönü nokta bulutu

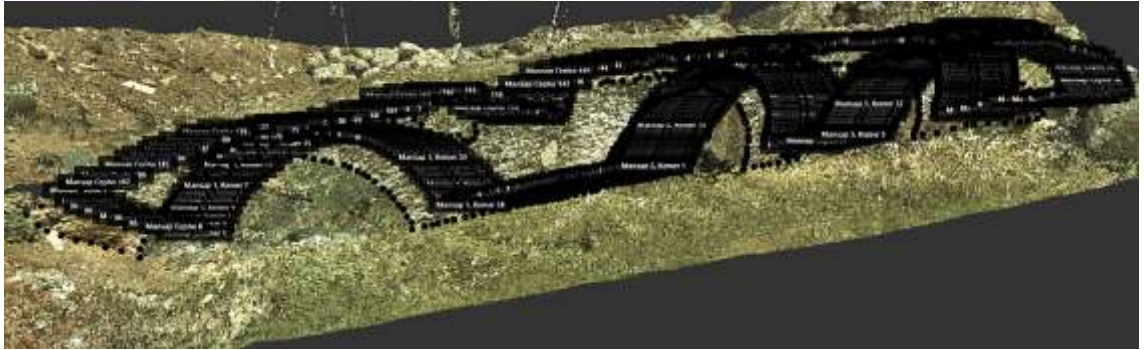


Şekil 4.16. Yersel lazer tarama ile oluşturulan kuşbakışı nokta bulutu

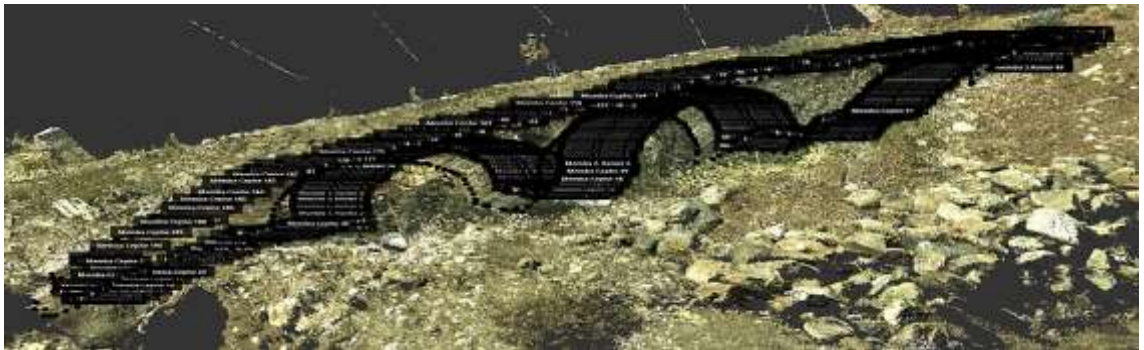
Noktalar ayrı ayrı buldukları bölgelere göre isimlendirilmiştir (Şekil 4.17-19). Nokta bulutunda çok fazla sayıda nokta kümesi bulunduğu için daha sade çalışmak adına köprü dışındaki noktalar gizlenmiştir. Bu şekilde daha yalın ve kolay bir çalışma oluşturulmuştur. Seçilen noktaların düzlemlerinin benzer olmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 4.17. Mansap yönü K03 numaralı kemerin noktalarının isimlendirilmesi



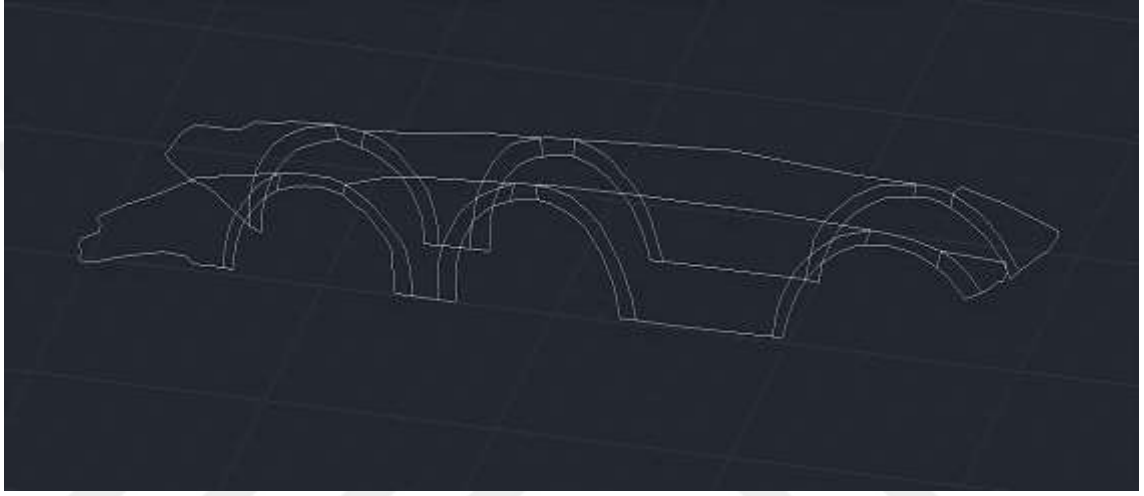
Şekil 4.18. Mansap yönü için seçilen koordinatlar



Şekil 4.19. Memba yönü için seçilen koordinatlar

Daha sonra seçilen noktalarla oluşturulan üç boyutlu koordinatlar RECAP programından Excel'e aktarılmıştır. Ardından Excel dosyasındaki tüm koordinatlar seçilerek metin belgesi oluşturulup, kopyalanan koordinatlar bu belgenin içine yapıştırılmıştır. Metin belgesinin üst bölümüne "MULTIPLE\_POINT" yazısı eklenmiştir. Dosya ".scr" uzantılı olacak şekilde isimlendirilerek kaydedilmiştir. Tüm yapılanlardan sonra AutoCAD ara yüzünde ".scr" komutu girilip seçilen noktalar AutoCAD'e aktarılmıştır.

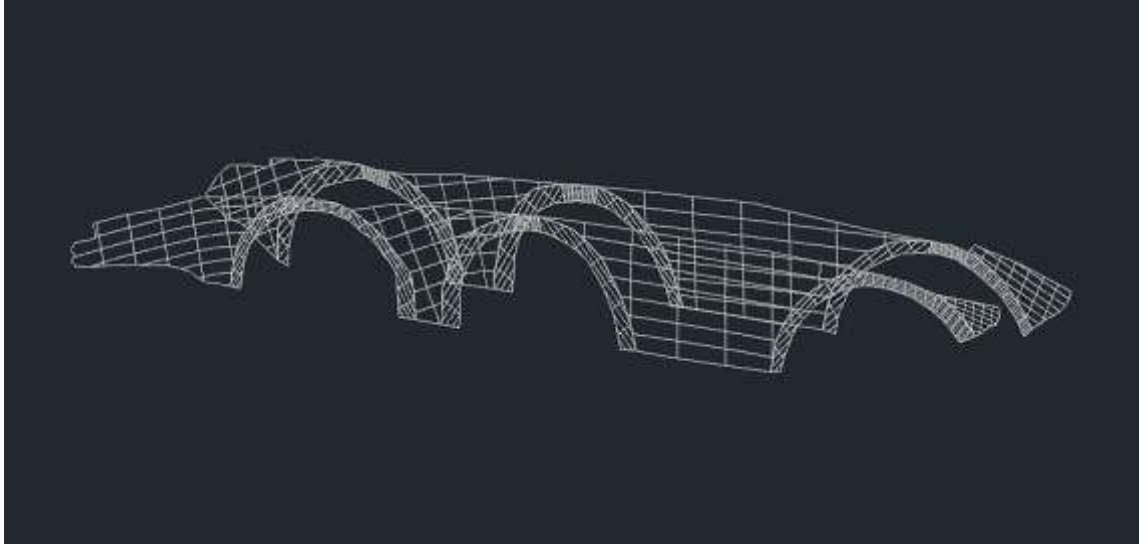
AutoCAD 3D içerisinde oluşturulan noktalar memba ve mansap yönleri ayrı olacak şekilde "3DPOLY" komutuyla birbirini takip edecek şekilde birleştirilmiştir. Böylelikle her iki yön içinde modelin iskeleti elde edilmiştir (Şekil 4.20).



**Şekil 4.20.** Koordinatlı noktalardan oluşturulan yapı iskeleti

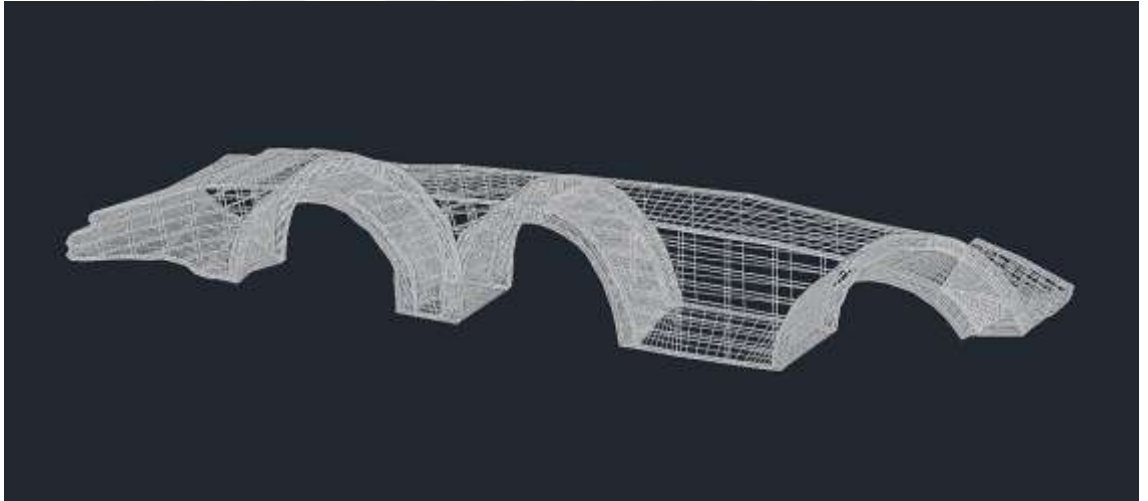
Tempan duvarları ve kemerleri oluşturabilmek için ortalama taş genişliği 250 mm seçilmiştir. Ardından memba ve mansap olmak üzere her iki yönden 250 mm içeri girilmiştir. Bu şekilde kemerlerin, tempan duvarlarının ve dolgunun sınırları belirlenmiştir.

Yüzey modellemesinden önce dikkat edilmesi gereken en önemli husus yüzey tanımlanacak çizgilerin tek parça olmasıdır. Sınırları belirlenen her bir katı için iki yönde de yüzey modellemesi AutoCAD 3D'de "SURFACE" komutunun içinde bulunan "PATCH" alt komutuyla oluşturulmuştur (Şekil 4.21).



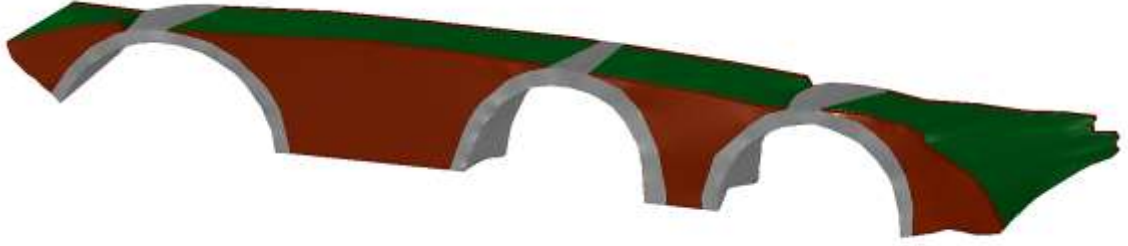
**Şekil 4.21.** “PATCH” komutuyla memba ve mansap yönünde oluşturulan yüzeyler

Oluşturulan bu karşılıklı yüzeyleri birleştirecek şekilde “SURFACE” komutunun içinde yer alan “LOFT” alt komutuyla ayrı bir yüzey tanımlanmıştır (Şekil 4.22).

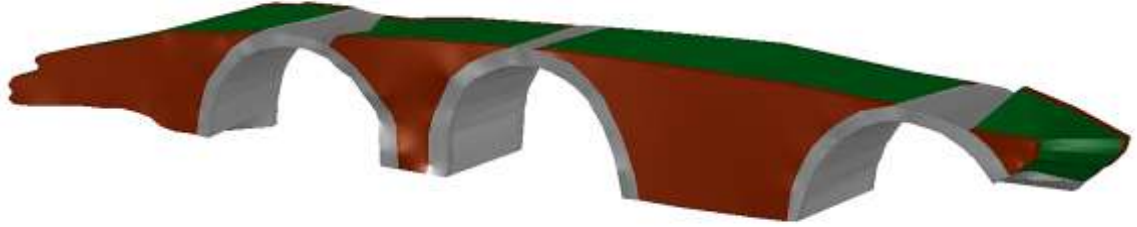


**Şekil 4.22.** “LOFT” komutuyla memba ve mansap arasında ara yüzey oluşturulması

Son olarak bu yüzeylere “SURFACE” komutunun içinde bulunan “SCULPT” komutu uygulanmıştır ve bu şekilde katı model oluşturulmaya başlanmıştır (Batar 2019) (Şekil 4.23-25). Yapı tek tip malzemeden oluşmadığı için her bir kemer 9 adet katı olmak üzere toplam 27 katı, tempan duvarları 4 adet memba ve 4 adet mansap yönünde olmak üzere toplam 8 katı ve son olarak dolgu bölümü 4 adet katı olacak şekilde toplamda 39 katı şeklinde modellenmiştir. Böylelikle model makro modellemeye uygun hale getirilmiştir. Oluşturulan 39 katı model sırasıyla ABAQUS’e aktarılmıştır.



Şekil 4.23. Mansap yönü katı modelin görünümü



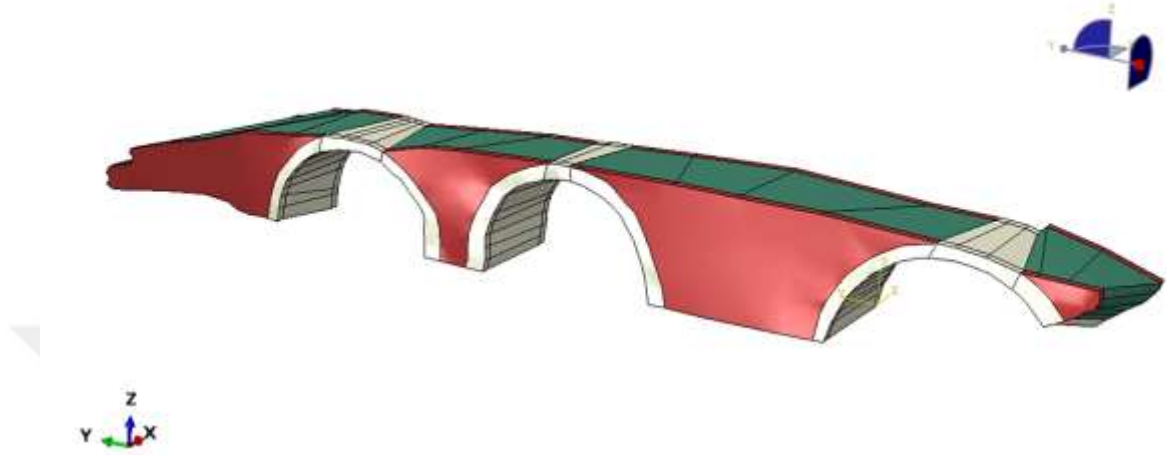
Şekil 4.24. Memba yönü katı modelin görünümü



Şekil 4.25. Katı modelin kuşbakışı görünümü

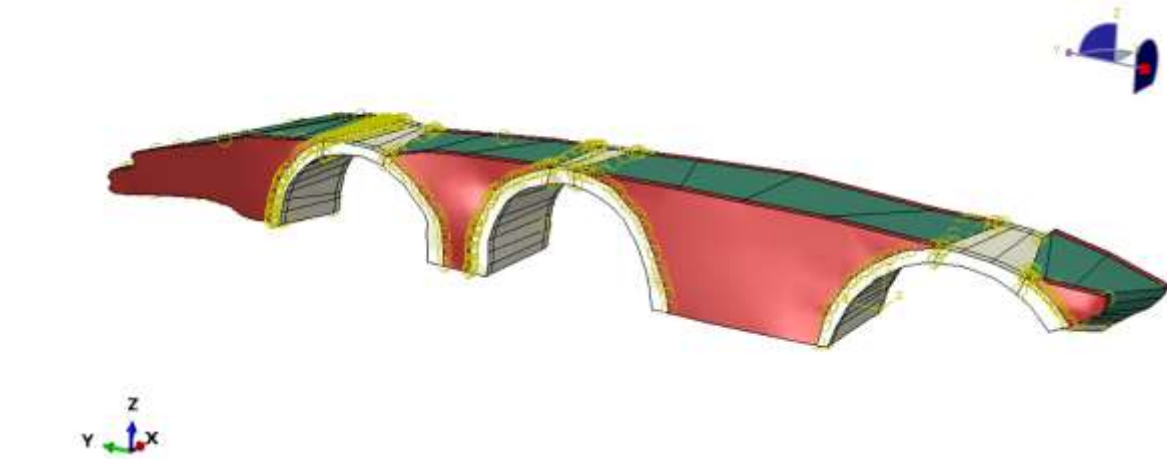
#### 4.1.6. Makro modelleme için malzemeler ve yük tipleri

AutoCAD içindeki işlemlerden sonra ABAQUS modeli kısmına geçilmiştir. ABAQUS'e aktarılan katı elemanlar ABAQUS içinde birleştirilmiştir (Şekil 4.26). Böylece makro model oluşturulmuştur.



Şekil 4.26. ABAQUS'te katı modelin oluşturulması

Birleştirilen parçaların birlikte çalışabilmesi için her bir katı arasındaki ortak yüzeylere "CONSTRAINTS" bölümünden her ortak yüzey için ayrı ayrı "TIE CONSTRAINT" tanımlanmıştır (Şekil 4.27). Bu şekilde model bir bütün şeklinde çalışmıştır.



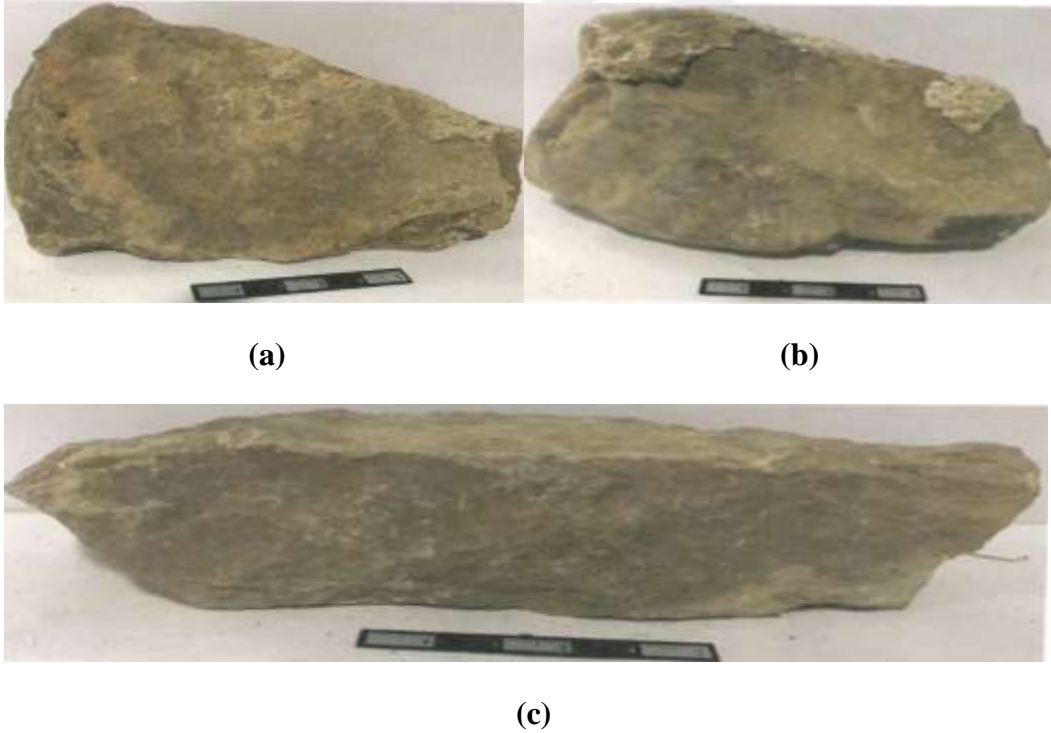
Şekil 4.27. Ortak yüzeyler arasına yapılan kısıtlamalar

Malzemelerin mekanik özelliklerinin ve yüklemelerin birimleri ABAQUS birim cetveline bakılarak işlenmiştir (Çizelge 4.1). 3D katı modelleme yapılırken mm cinsinden çalışıldığı için SI (mm) birim sistemi kullanılmıştır.

**Çizelge 4.1.** ABAQUS birim cetveli

Büyüklik	SI	SI (mm)
Uzunluk	m	mm
Kuvvet	N	N
Kütle	kg	ton ( $10^3$ kg)
Zaman	s	s
Gerilme	Pa ( $N/m^2$ )	MPa ( $N/mm^2$ )
Enerji	J ( $N \times m$ )	mJ ( $10^{-3}$ J)
Yoğunluk	$kg/m^3$	$ton/mm^3$

Farklı malzeme tanımı için yapılan işlemlerden sonra analizleri yapmadan önce malzemelerin mekanik özelliklerinin ve yüklemelerin tanımlanması gerekir. Köprüde yapılan malzeme analiz raporu için üç adet taş örneği alınmıştır. Analiz raporuna göre alınan ilk taş örneği “kumtaşı”, ikinci ve üçüncü taş örneklerinin ise “kireçtaşı” olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.28).

**Şekil 4.28.** a) 1 numaralı taş örneği; b) 2 numaralı taş örneği; c) 3 numaralı taş örneği

Makro modeli oluşturan kemer, yan duvar ve dolgu kısımlarının elastik ve elastik ötesi malzeme özellikleri analiz programına tanımlanmıştır. Makro model kısımları, taş ve bağlayıcı malzeme bileşimlerinden oluşmaktadır. Modelde çekme dayanımı olarak, taşa göre bağlayıcı malzeme dayanımının daha düşük olması nedeniyle bu dayanım dikkate alınmıştır. Dayanım değerleri ise Eurocode-6’da önerilen referans değerler dikkate alınarak seçilmiştir (Çizelge 4.2).

Tarihi köprü inşasında kullanılan taş boyutları, harç ve derz kalınlıkları ve taş örgüsü tekniği oldukça değişken özellik göstermektedir. Bununla birlikte çokça taş dökülmesi, derz boşalması gibi bozulmalar da mevcuttur. Dolayısıyla mevcut yapının makro modelini oluşturabilmek için gerekli olan ortalama malzeme özelliklerini (taş ve harç birleşimi için ortak) literatürde yaygın olarak kullanılan homojenleştirme tekniğiyle (Batar vd. 2021) belirlemek mümkün olmamıştır. Bunun yerine, malzeme analiz raporuna da bakılarak, benzer özelliklere sahip tarihi taş köprüler için literatürde verilen basınç dayanım ve elastisite modülü değerleri dikkate alınarak seçilen malzeme özellikleri Çizelge 4.3'te verilmiştir (Ural 2005, Akın vd. 2022, Ünay 2002).

**Çizelge 4.2.** Eurocode-6'ya göre bağlayıcı malzeme çekme dayanımı

Yığma birim eleman tipi	$f_{xkl}$ (N/mm <sup>2</sup> )			
	Genel amaçlı harç		İnce tabaka harç	Hafif harç
	$f_m < 5$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_m \geq 5$ (N/mm <sup>2</sup> )		
Kil	0.10	0.10	0.15	0.10
Kalsiyum silikat	0.05	0.10	0.20	-
Agregalı betonu	0.05	0.10	0.20	-
Gazbeton (AAC)	0.05	0.10	0.20	0.10
Üretilen taş	0.05	0.10	-	-
Kırma doğal taş	0.05	0.10	0.15	-

**Çizelge 4.3.** Makro model kısımları için malzeme özellikleri

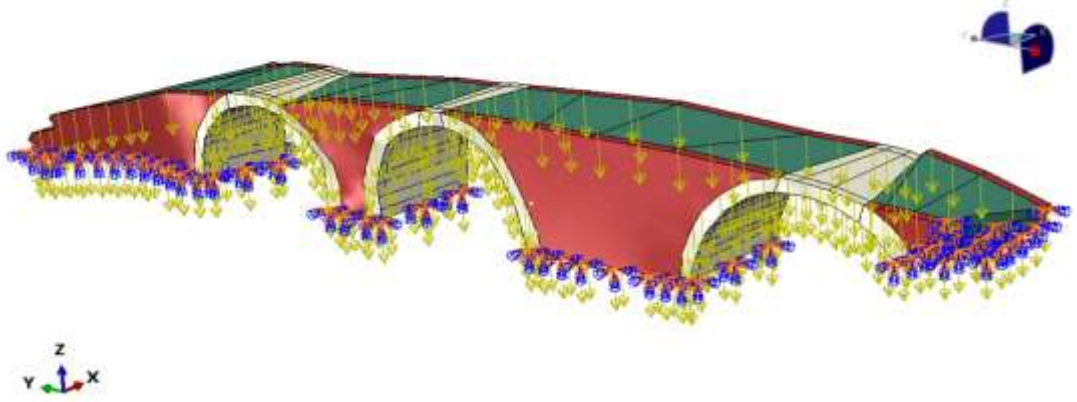
Malzeme	Elastisite modülü (N/mm <sup>2</sup> )	Yoğunluk (t/mm <sup>3</sup> )	Poisson oranı	Basınç dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Çekme dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )
Kemer	3000	$2.3 \times 10^{-9}$	0.20	10	0.1
Tempan duvarları (yan duvarlar)	2500	$2.1 \times 10^{-9}$	0.20	8	0.08
İç dolgu malzemesi	1500	$1.5 \times 10^{-9}$	0.05	5	0.05

Analizlerde yerçekimi ivmesine bağlı yapının kendi ağırlığı, hareketli yük ve nehir yükü aşağıdaki çizelgedeki değerler esas alınmıştır (Çizelge 4.4).

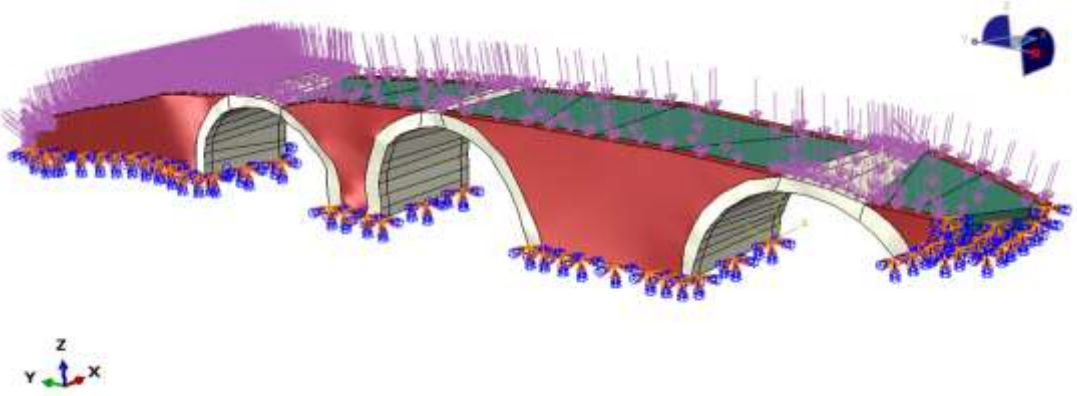
**Çizelge 4.4.** Analiz için kullanılan yük miktarları

Yer çekimi ivmesi (G) (mm/s <sup>2</sup> )	Hareketli yük (Q) (kg/m <sup>2</sup> )	Nehir yükü (S) (kg/m <sup>2</sup> )
9810	150	500

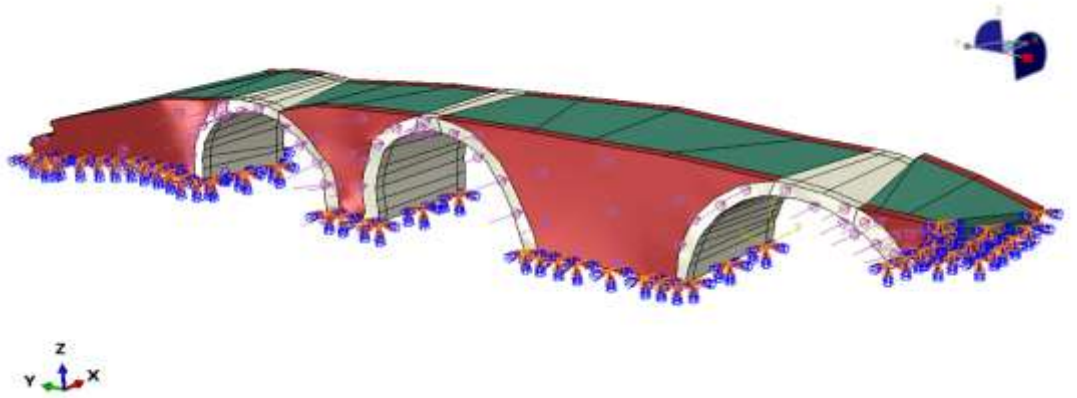
ABAQUS modelinde sırasıyla yerçekimi ivmesi, hareketli yük ve nehir yükü etki ettirilmiştir (Şekil 4.29-31).



Şekil 4.29. ABAQUS modelinde yer çekimi yük gösterimi (G)



Şekil 4.30. ABAQUS modelinde etki ettirilen hareketli yük gösterimi (Q)



Şekil 4.31. ABAQUS modelinde etki ettirilen nehir yükü gösterimi (S)

Katı model bu şekilde bilgisayar destekli oluşturulduktan sonra ABAQUS programında analiz tipi ve kombinasyonları girilmiştir (Çizelge 4.5).

**Çizelge 4.5.** Katı model için yük kombinasyonları

Kombinasyon numarası	Kombinasyon	Analiz tipi
1	G	Statik
2	G+S	Statik
3	İlk 50 mod	Serbest titreşim
4	G+SPCX	Davranış spektrum
5	G+SPCY	Davranış spektrum
6	G+SPCZ	Davranış spektrum
7	G+SPCXYZ	Davranış spektrum
8	G+0.3SPCX+SPCY+0.3SPCZ	Davranış spektrum

#### 4.1.7. Makro modelleme ile yapısal analiz

Büyük ölçekli yapılarda analizlerin doğru sonuçlar verebilmesi için makro modelleme kullanılmaktadır. Makro modelleme zaman gibi birçok açıdan fayda sağlamaktadır. Bu şekilde tarihi yapılarda oluşabilecek hasarların, göçme durumlarının daha önceden tespit edilebilmesi açısından makro modellemenin önemi büyüktür. Yapılan analizlerin doğru veya yakın sonuç verebilmesi kullanılan programların yeteneklerine ve bilgisayarların özelliklerine göre de değişkenlik gösterebilmektedir. Bu koşullar göz önünde bulundurularak makro modelin güvenilir sonuç vermesi için sonlu elemanlar yöntemine başvurulur. Yapıda kullanılan sonlu elemanlar yöntemiyle model oluşturulmuştur (Şekil 4.32-33).



Şekil 4.32. Sonlu elemanlar yöntemiyle ağ oluşturma (Mansap yönü)

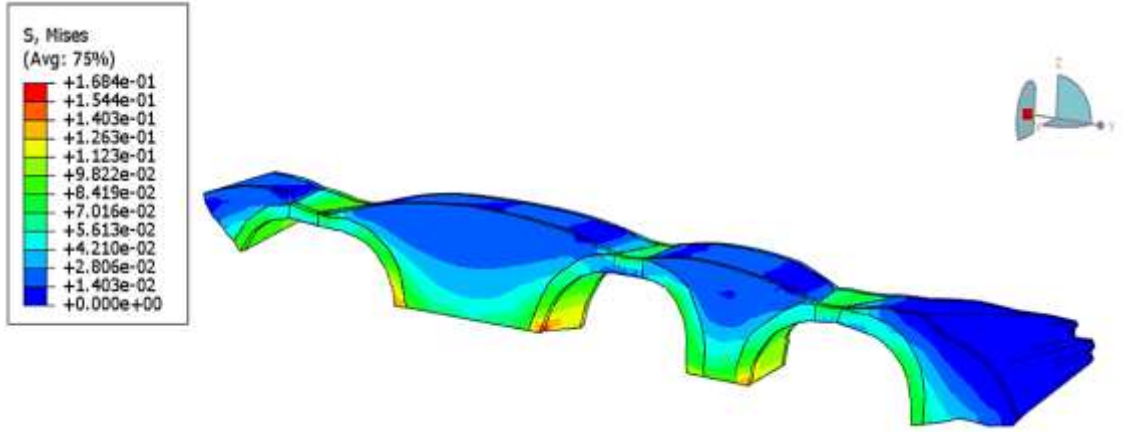


Şekil 4.33. Sonlu elemanlar yöntemiyle ağ oluşturma (Memba yönü)

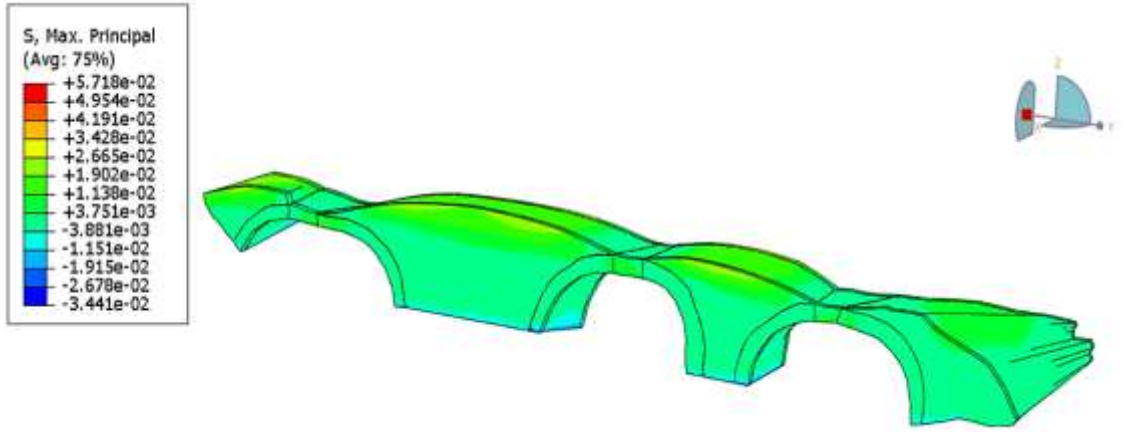
#### 4.1.8. Düşey yüklemeler altında statik analiz

Tarihi Onaç köprüsünde kendi ağırlığından kaynaklanan zati yükleme koşullarında oluşmuş veya oluşabilecek gerilmelerin ve hasarların tespit edilmesi amaçlanmıştır. Yapıya  $9810 \text{ mm/s}^2$  sabit yer çekimi ivmesi ve birim dönüşümünden sonra  $0.0015 \text{ N/mm}^2$ 'lik hareketli yük ve  $0.05 \text{ N/mm}^2$ 'lik nehir yükü etki ettirilmiştir. Bu yükleme durumları için statik analiz, modal analiz ve davranış spektrum analizleri yapılmıştır. Analizlerde zati, hareketli ve nehir yüklerinden kaynaklı deformasyon ve yer değiştirmelere bakılmıştır.

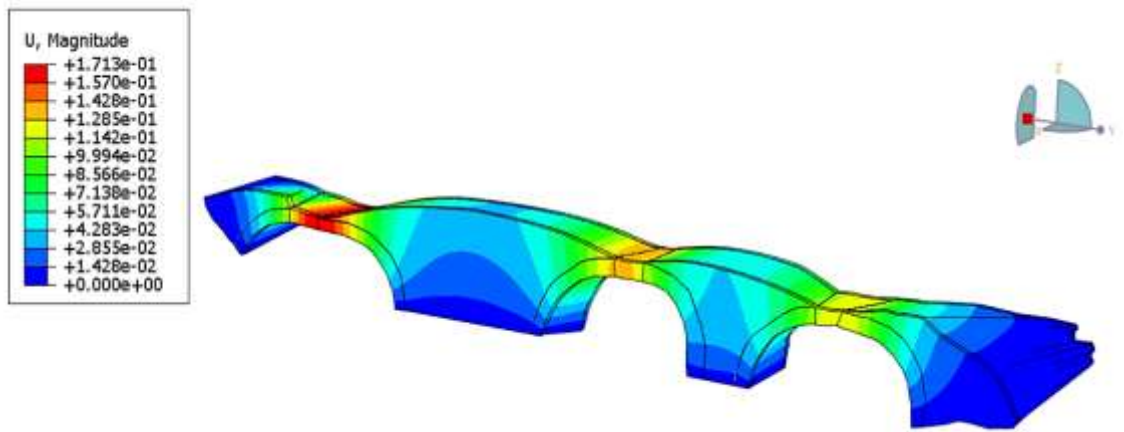
Yüklemeler sonucunda oluşan deformasyon ve yer değiştirmeler aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir (4.34-42).



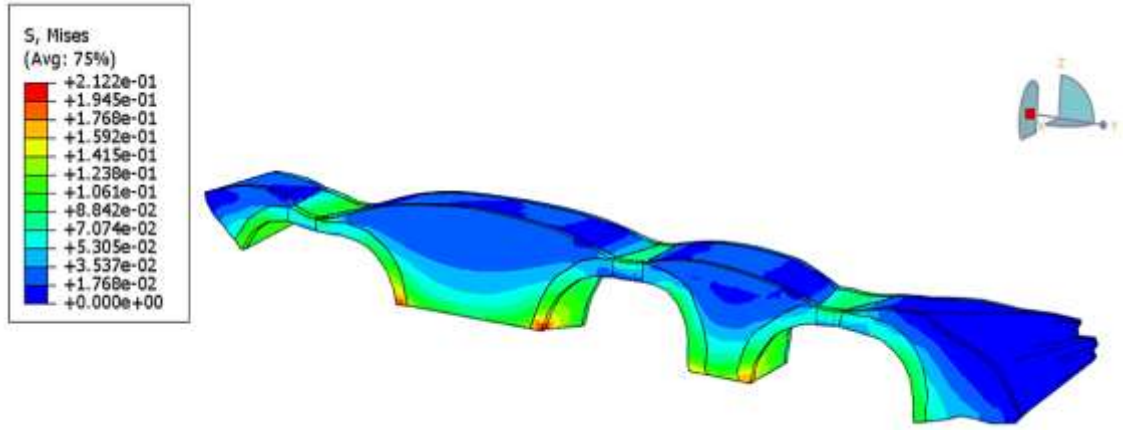
Şekil 4.34. Statik analiz sonucu Von Mises gerilme dağılımı (G yüklemesi)



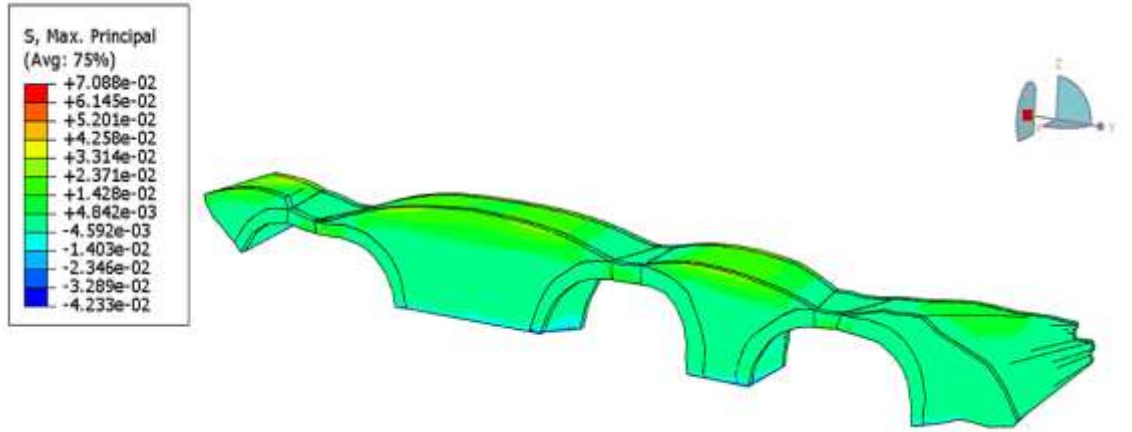
Şekil 4.35. Statik analiz sonucu maksimum asal gerilme dağılımı (G yüklemesi)



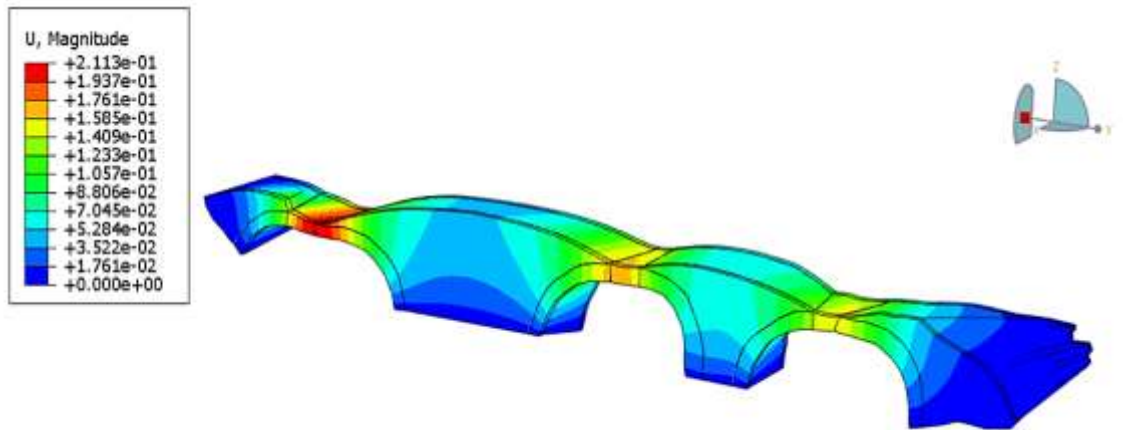
Şekil 4.36. Statik analiz sonucu düşey yerdeğiştirme (G yüklemesi)



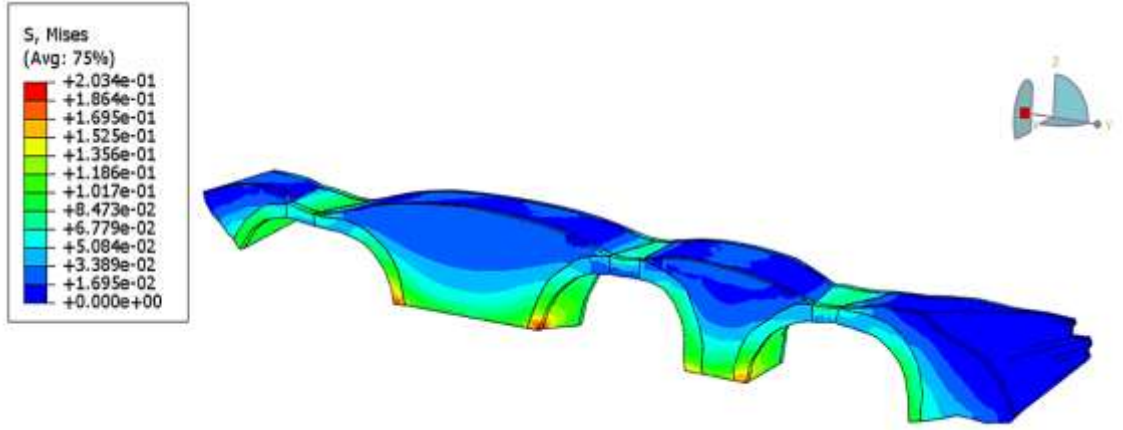
Şekil 4.37. Statik analiz sonucu Von Mises gerilme dağılımı (G+Q yüklemesi)



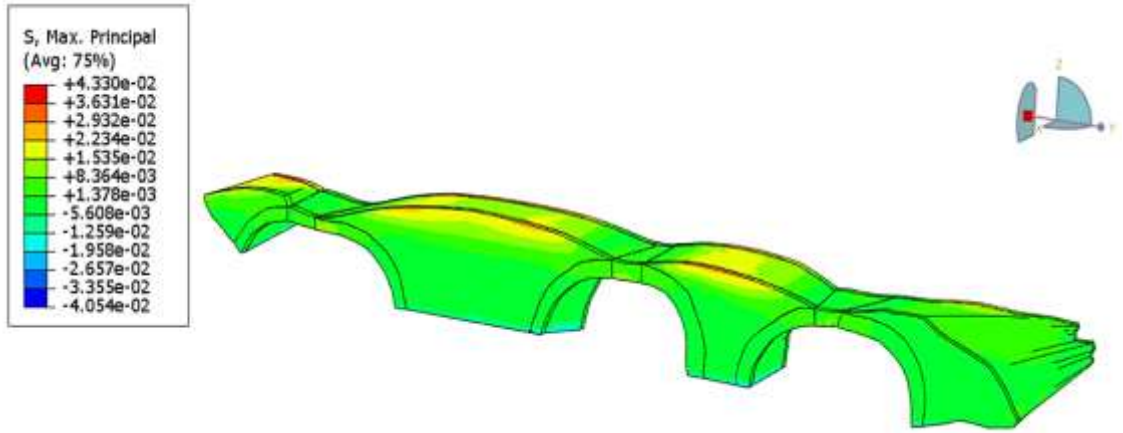
Şekil 4.38. Statik analiz sonucu maksimum asal gerilme dağılımı (G+Q yüklemesi)



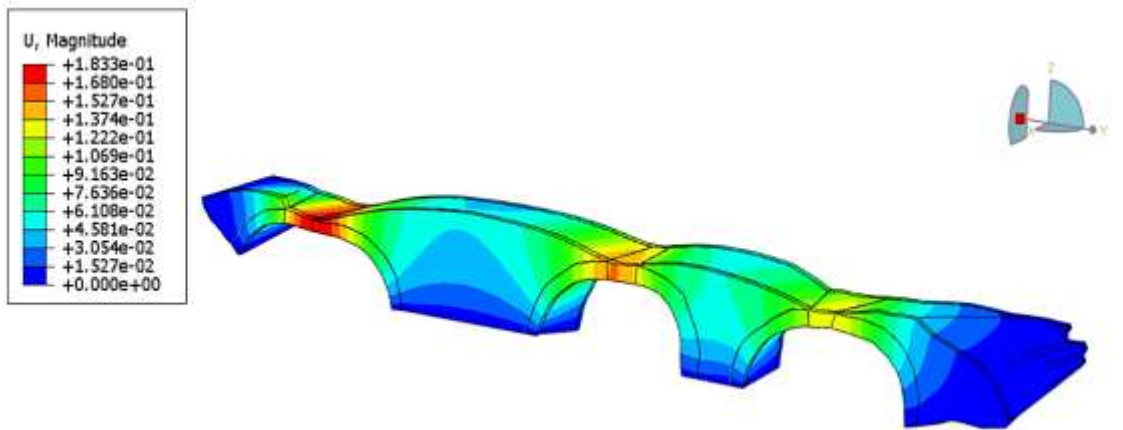
Şekil 4.39. Statik analiz sonucu düşey yerdeğiştirme (G+Q yüklemesi)



Şekil 4.40. Statik analiz sonucu Von Mises gerilme dağılımı (G+S yüklemesi)



Şekil 4.41. Statik analiz sonucu maksimum asal gerilme dağılımı (G+S yüklemesi)



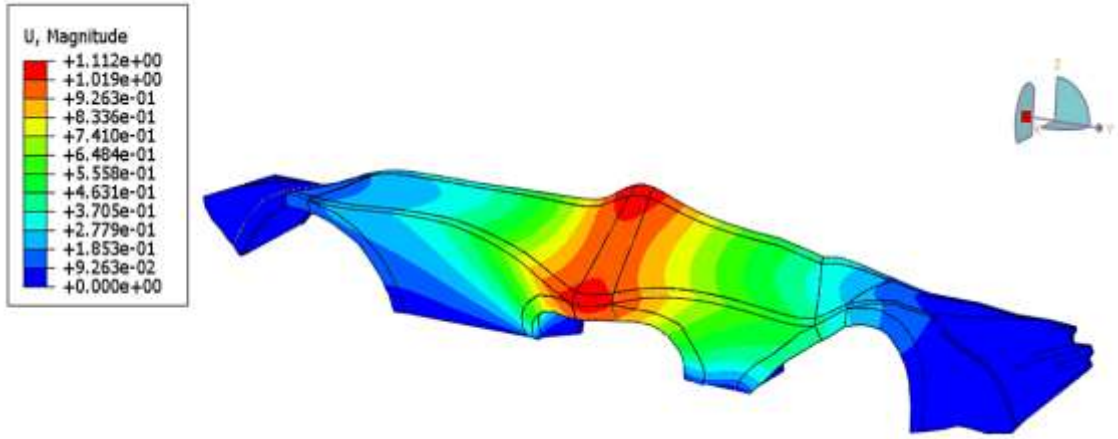
Şekil 4.42. Statik analiz sonucu düşey yerdeğiştirme (G+S yüklemesi)

#### 4.1.9. Serbest titreşim analizi (modal analiz)

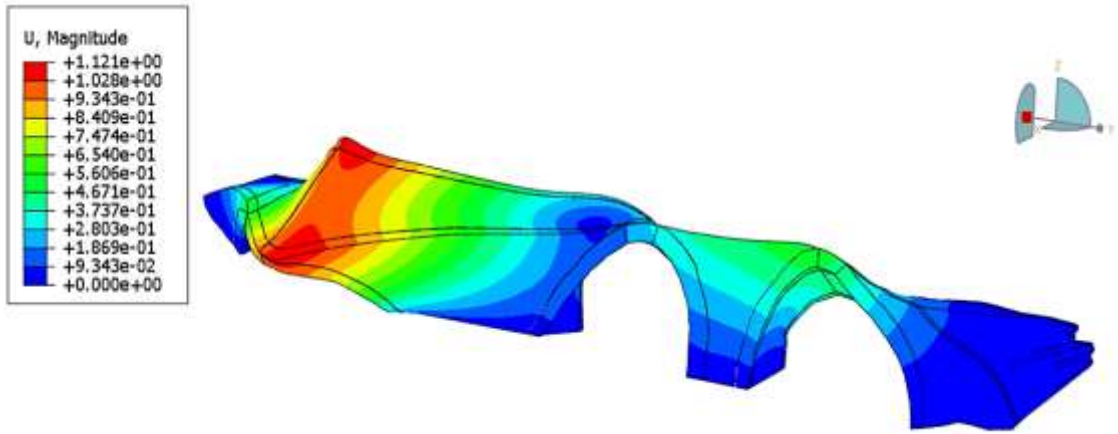
Bir yapının doğal frekansı, sönüm değerleri ve yapısal deformasyonuna bağlı bir değer olan mod biçimini içeren dinamik karakterini belirlemek için uygulanan yöntemdir. Modal analiz sayesinde incelenen modelin rezonans değerlerinde nasıl davrandığı, sönümleme miktarının ne kadar olduğunun anlaşılması tasarım açısından çok önemlidir. Bu yüzden Onaç köprüsünde meydana gelebilecek yapısal deformasyonları tespit edebilmek için modelde modal analiz yapılmıştır (Şekil 4.43-48).

**Çizelge 4.6.** Modal analiz sonucu oluşan frekans ve periyotlar

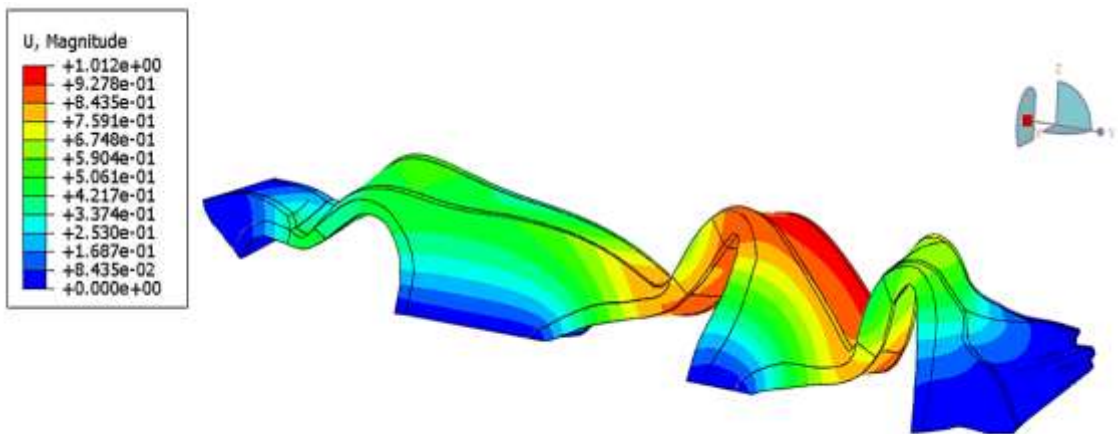
Mod	Frekans (1/sn)	Periyot (sn)
1	29.836	0.033516
2	33.837	0.029553
3	34.560	0.028935
4	38.020	0.026302
5	44.901	0.022271
6	46.428	0.021539
7	47.786	0.020927
8	51.340	0.019478
9	53.277	0.018770
10	57.625	0.017354
11	59.674	0.016756
12	63.032	0.015865
13	66.848	0.014959
14	68.409	0.014618
15	71.752	0.013937
16	72.683	0.013758
17	73.464	0.013612
18	77.862	0.012843
19	80.711	0.012390
20	82.231	0.012161
21	85.961	0.011633
22	87.194	0.011469
23	87.432	0.011437
24	88.653	0.011280
25	91.919	0.010880
26	93.301	0.010702
27	98.438	0.010159
28	102.14	0.009790
29	103.30	0.009681
30	106.23	0.009414
31	108.90	0.009183
32	112.48	0.008890
33	113.45	0.008814
34	114.62	0.008724
35	115.26	0.008676
36	117.51	0.008510
37	120.34	0.008310
38	122.94	0.008134
39	124.14	0.008055
40	126.66	0.007895
41	129.12	0.007745
42	129.98	0.007693
43	130.88	0.007641
44	135.30	0.007391
45	135.53	0.007378
46	138.89	0.007200
47	140.62	0.007111
48	141.62	0.007061
49	143.45	0.006971
50	145.05	0.006894



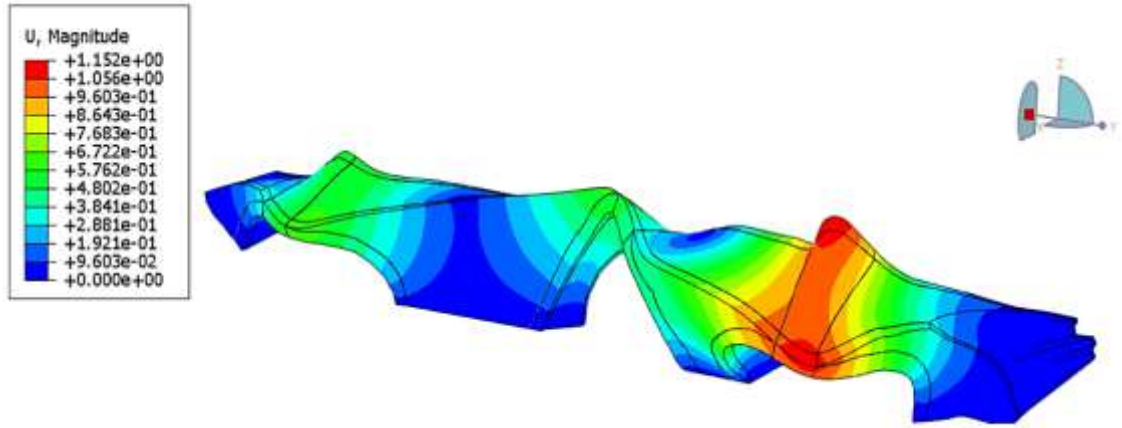
Şekil 4.43. Serbest titreşim analizi (1'inci mod)



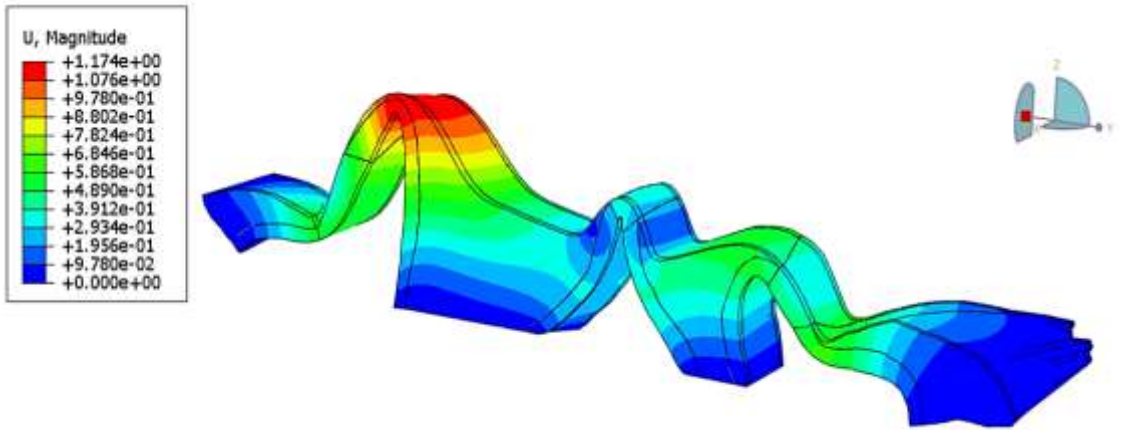
Şekil 4.44. Serbest titreşim analizi (2'nci mod)



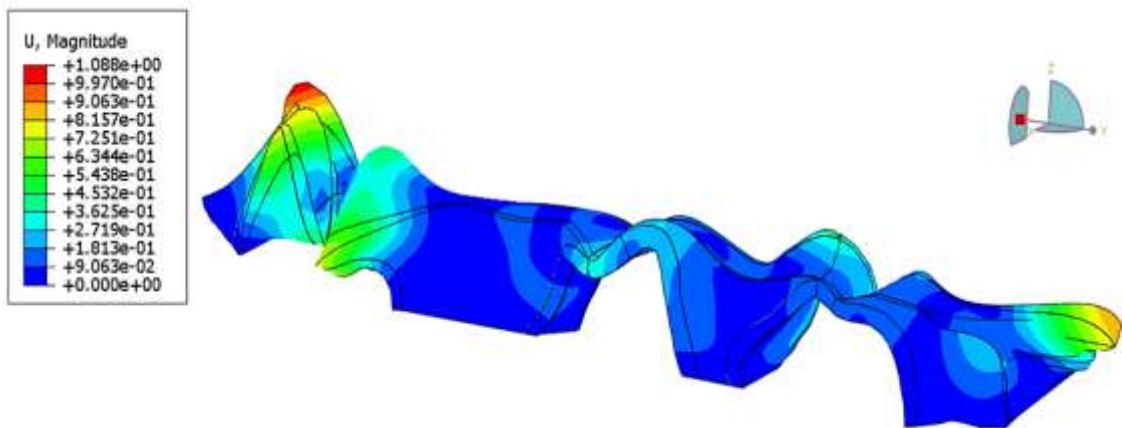
Şekil 4.45. Serbest titreşim analizi (3'üncü mod)



Şekil 4.46. Serbest titreşim analizi (4'üncü mod)



Şekil 4.47. Serbest titreşim analizi (5'inci mod)



Şekil 4.48. Serbest titreşim analizi (50'nci mod)

#### 4.1.10. Davranış spektrum analizi

Tarihi Onaç köprüsünün analizi yapılmadan önce deprem yer hareketi düzeyi “DD-2”, yerel zemin sınıfı “ZD” ve bilinen koordinatları AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritaları Web sitesine işlenerek köprünün düşey TBDY-2018’deki formüller kullanılarak periyot ve ivme spektrum değerleriyle birlikte yatay ve düşey elastik tasarım spektrum verileri elde edilmiştir. Elde edilen bu verilerin içinde bulunduğu tablolar aşağıda yer almaktadır (Çizelge 4.6-7).

$$SS = 0.569 \text{ için } FS = 1.345, SDS = SS \times FS = 0.569 \times 1.345 = 0.765 \quad (4.1)$$

$$S1 = 0.153 \text{ için } F1 = 2.294, SD1 = SS \times F1 = 0.153 \times 2.294 = 0.351 \quad (4.2)$$

**Çizelge 4.6.** Onaç köprüsü yatay elastik tasarım spektrum tablosu

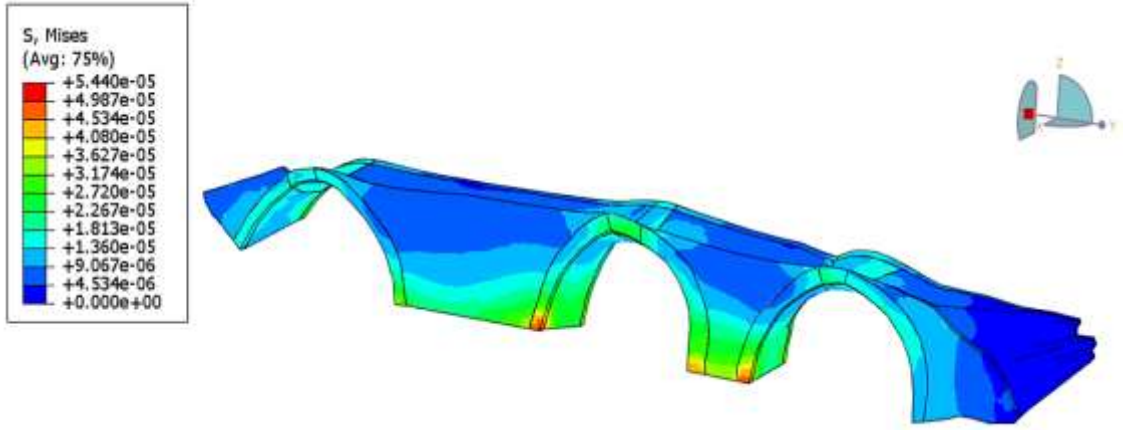
Nokta numarası	Periyot (sn)	İvme spektrum değeri	Sönüm oranı	S <sub>s</sub>	S <sub>1</sub>	Zemin tipi	SDS	SD1
1	0	0.001	0.05	0.569	0.153	ZD	0.76519	0.35098
2	0.001	0.021059						
3	0.091737	0.023334						
4	0.458685	0.025999						
5	0.6	0.029147						
6	0.8	0.032905						
7	1	0.037438						
8	1.2	0.042977						
9	1.4	0.049844						
10	1.6	0.058497						
11	1.8	0.063815						
12	2	0.070196						
13	2.5	0.077996						
14	3	0.087746						
15	3.5	0.100281						
16	4	0.116994						
17	4.5	0.140393						
18	5	0.175491						
19	5.5	0.19499						
20	6	0.219364						
21	6.5	0.250701						
22	7	0.292485						
23	7.5	0.350982						
24	8	0.438728						
25	8.5	0.58497						
26	9	0.765191						
27	9.5	0.765191						
28	10	0.306076						

**Çizelge 4.7.** Onaç köprüsü düşey elastik tasarım spektrum tablosu

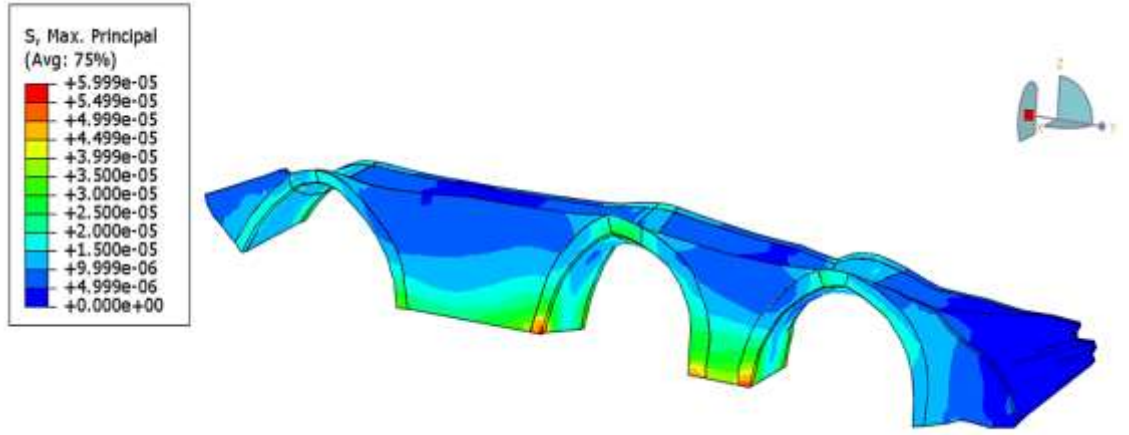
Nokta numarası	Periyot (sn)	İvme spektrum değeri	Sönüm oranı	S <sub>s</sub>	S <sub>1</sub>	Zemin tipi	SDS	SD1
1	3	0.001	0.05	0.569	0.153	ZD	0.76519	0.35098
2	2.5	0.031198						
3	2	0.037438						
4	1.8	0.046798						
5	1.6	0.051997						
6	1.4	0.058497						
7	1.2	0.066854						
8	1	0.077996						
9	0.8	0.093595						
10	0.6	0.116994						
11	0.4	0.155992						
12	0.2	0.233988						
13	0.152895	0.467976						
14	0.030579	0.612153						
15	0.001	0.612153						
16	0	0.244861						

Zati yükleme altında yapılan analizlerde, her bir yükleme durumu için ayrı olmak üzere elde edilen yer değiştirme ve şekil değiştirme değerlerine göre; G+SPCX (Sabit yük ve global X eksenini doğrultusundaki deprem yüklemesi), G+SPCY (Sabit yük ve global Y eksenini doğrultusundaki deprem yüklemesi), G+SPCZ (Sabit yük ve global Z eksenini doğrultusundaki deprem yüklemesi), G+SPCXYZ (sabit yük ve aynı anda etki ettirilen global X,Y ve Z eksenini doğrultusundaki deprem yüklemesi) ve G+0.3SPCX+SPCY+0.3SPCZ (TBDY-2018) olmak üzere beş farklı yük kombinasyonu tanımlanmıştır.

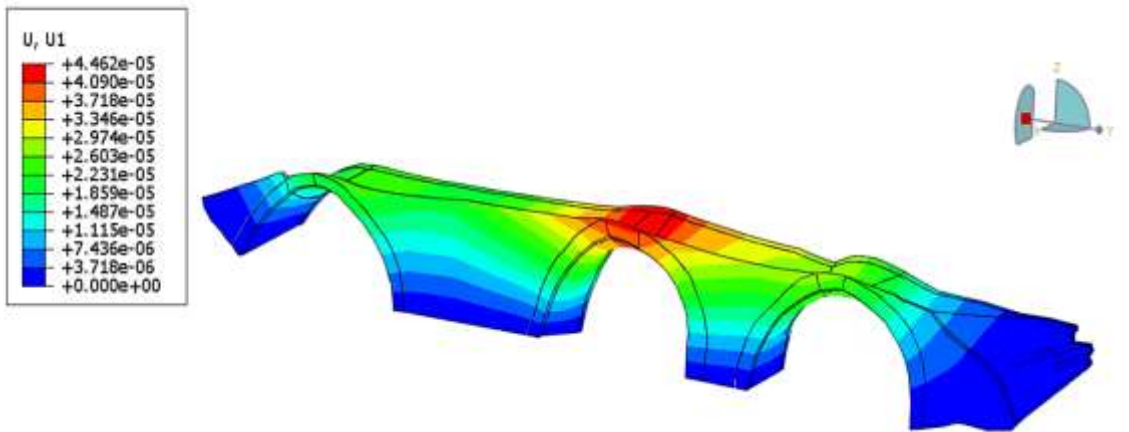
Bu kombinasyonlarla yapılan analizlerin sonucunda X,Y ve Z olmak üzere her global eksen için, tüm doğrultularda aynı anda ve farklı katsayılarıdaki ayrı doğrultularda etki ettirilen yüklemeler sonucunda ayrı ayrı yer değiştirme ve maksimum gerilme değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.49-63).



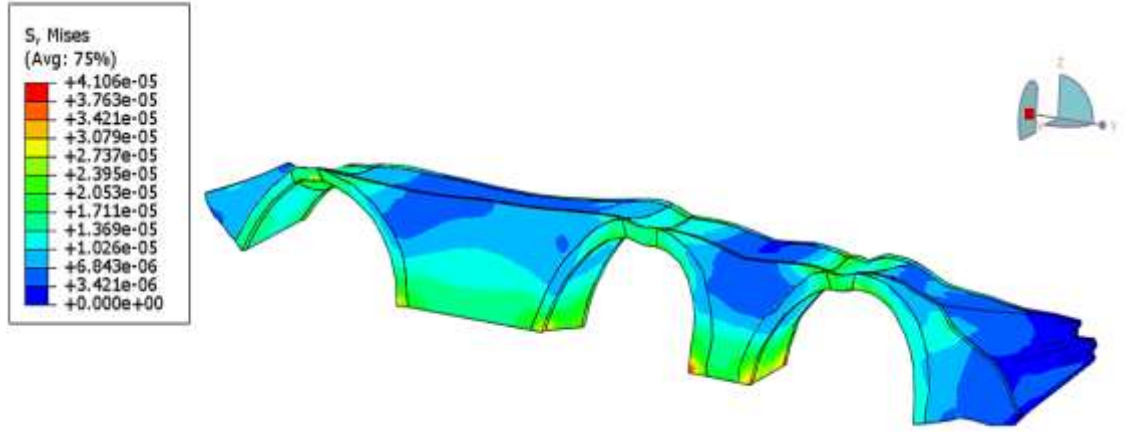
Şekil 4.49. Spektrum analizi sonucu Von Mises gerilme dağılımı (G+SPCX)



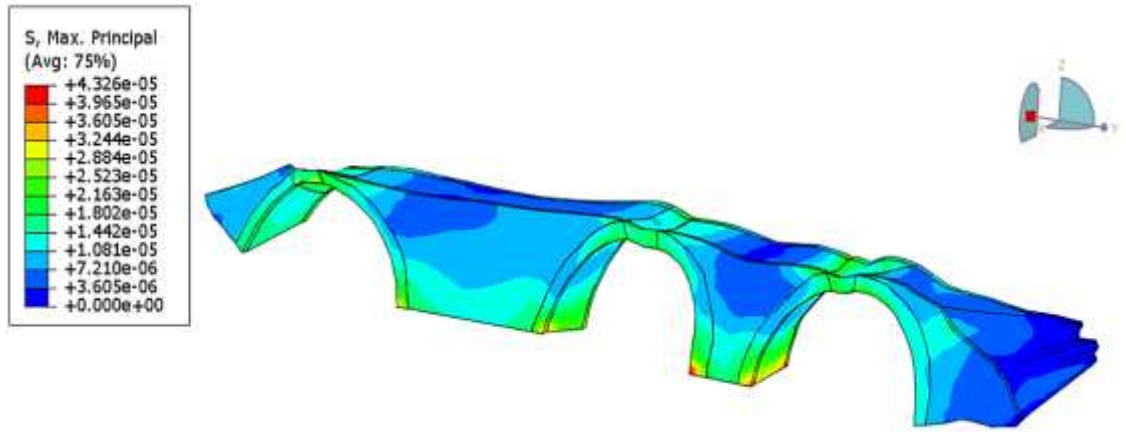
Şekil 4.50. Spektrum analizi sonucu maksimum asal gerilme dağılımı (G+SPCX)



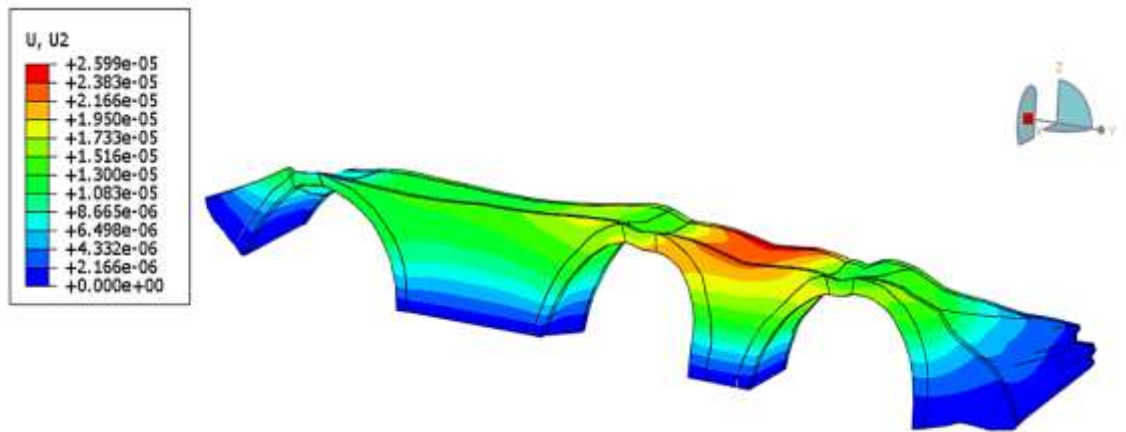
Şekil 4.51. Spektrum analizi sonucu düşey yerdeğiştirme (G+SPCX)



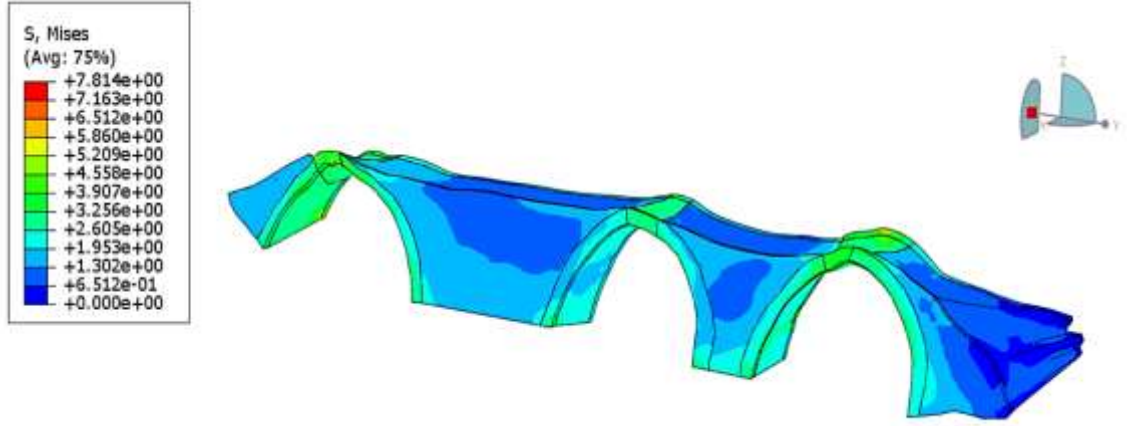
Şekil 4.52. Spektrum analizi sonucu Von Mises gerilme dağılımı (G+SPCY)



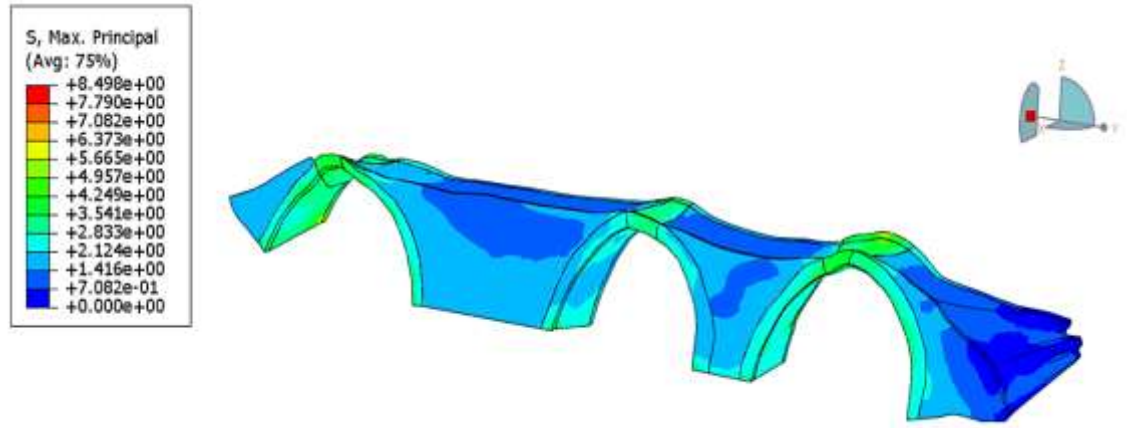
Şekil 4.53. Spektrum analizi sonucu maksimum asal gerilme dağılımı (G+SPCY)



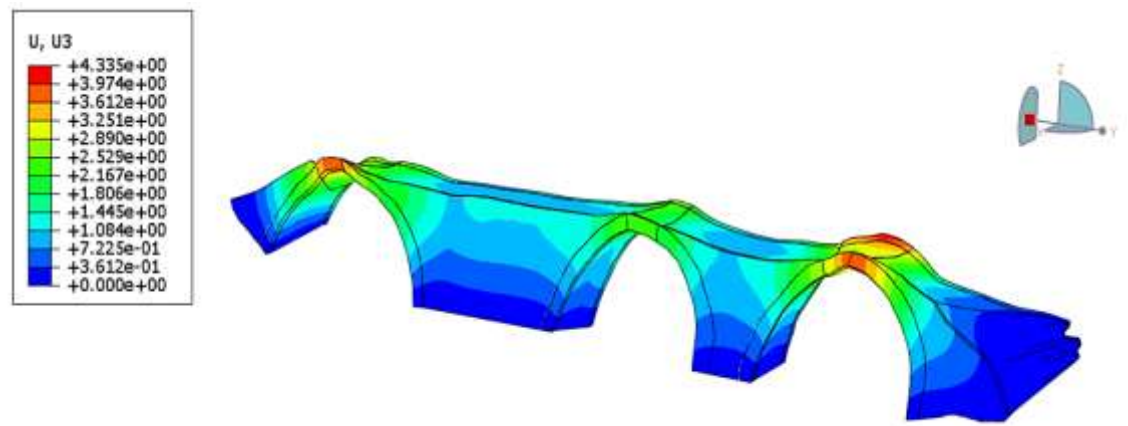
Şekil 4.54. Spektrum analizi sonucu düşey yerdeğiştirme (G+SPCY)



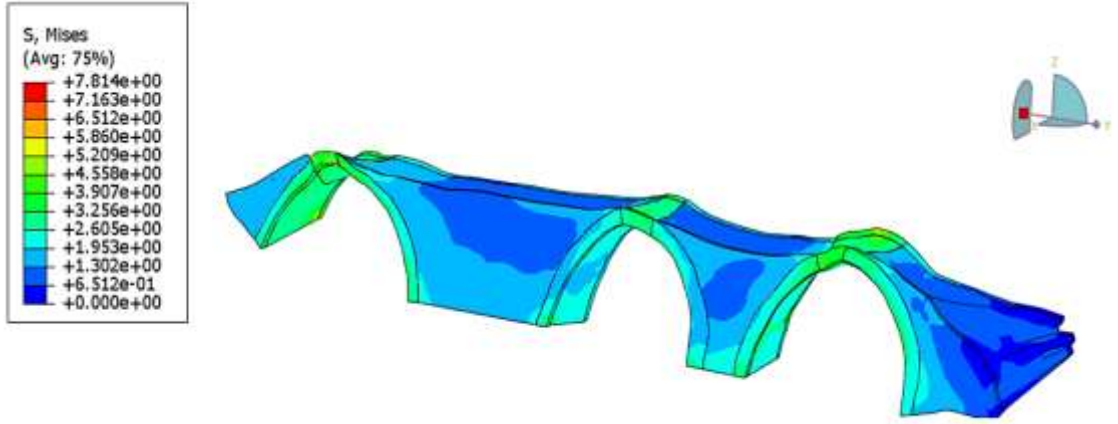
Şekil 4.55. Spektrum analizi sonucu Von Mises gerilme dağılımı (G+SPCZ)



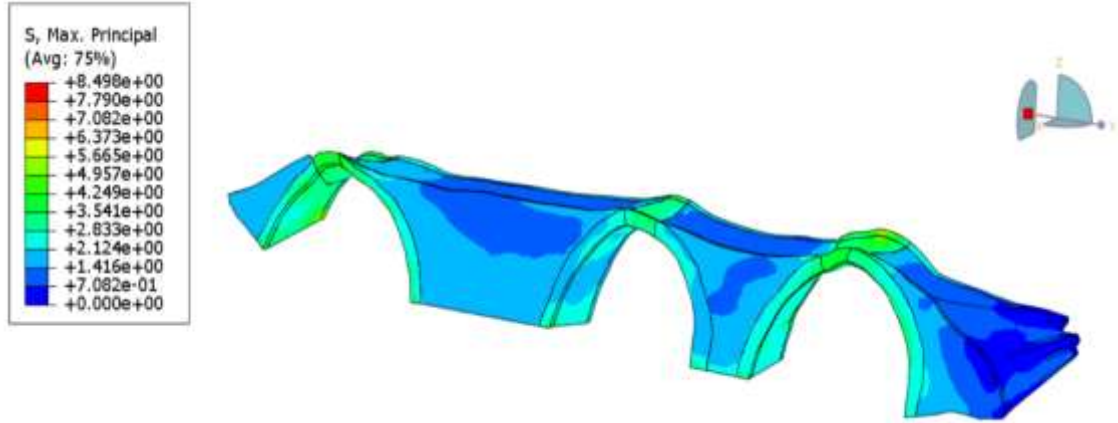
Şekil 4.56. Spektrum analizi sonucu maksimum asal gerilme dağılımı (G+SPCZ)



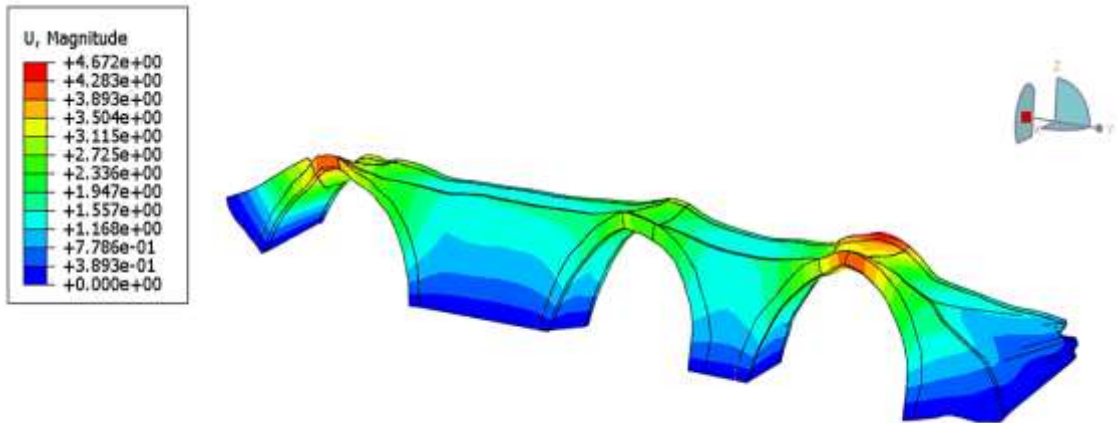
Şekil 4.57. Spektrum analizi sonucu düşey yerdeğiştirme (G+SPCZ)



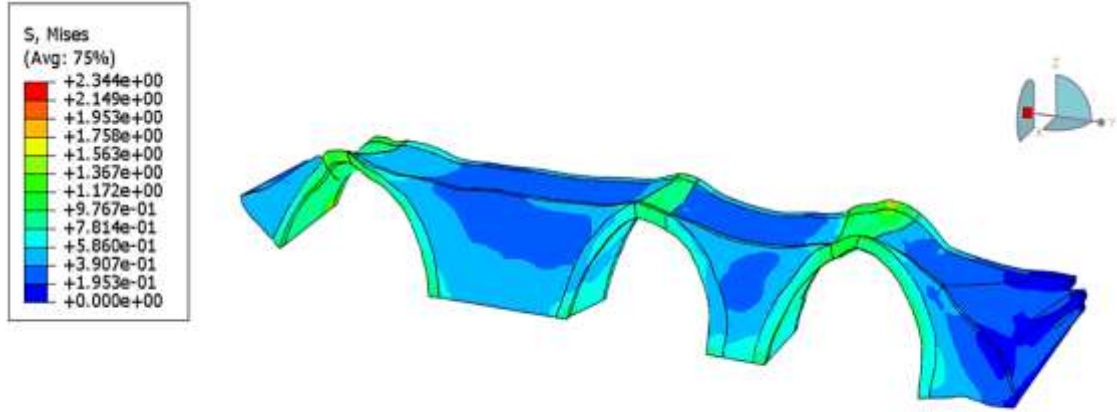
Şekil 4.58. Spektrum analizi sonucu Von Mises gerilme dağılımı (G+SPCX+SPCY+SPCZ)



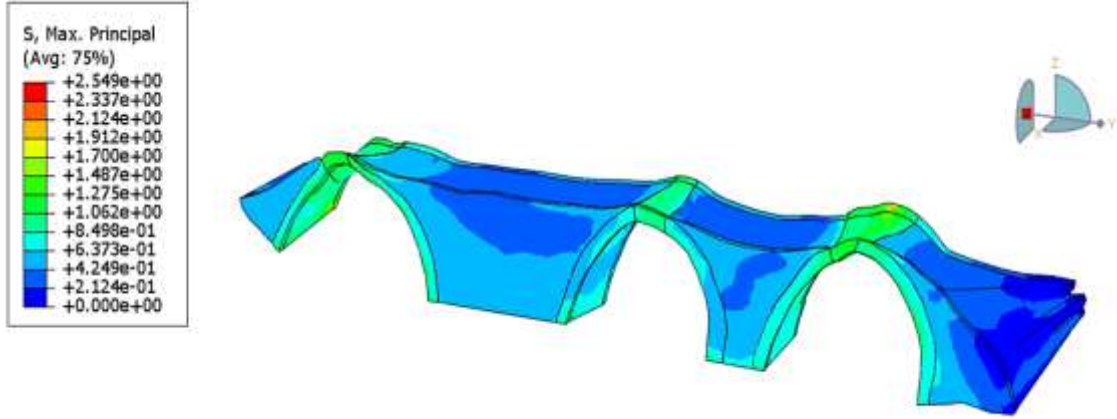
Şekil 4.59. Spektrum analizi sonucu maksimum asal gerilme dağılımı (G+SPCX+SPCY+SPCZ)



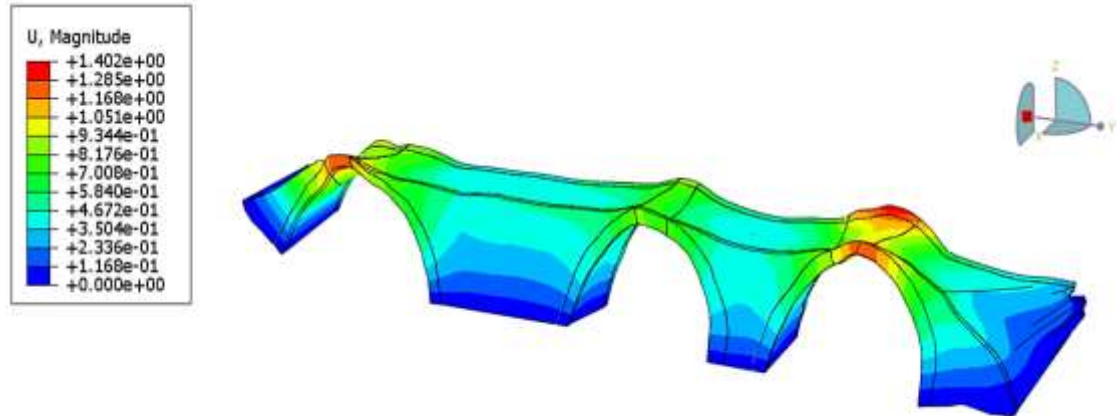
Şekil 4.60. Spektrum analizi sonucu düşey yerdeğiştirme (G+SPCX+SPCY+SPCZ)



Şekil 4.61. Spektrum analizi sonucu Von Mises gerilme dağılımı  
(G+0.3SPCX+SPCY+0.3SPCZ)



Şekil 4.62. Spektrum analizi sonucu maksimum asal gerilme dağılımı  
(G+0.3SPCX+SPCY+0.3SPCZ)



Şekil 4.63. Spektrum analizi sonucu düşey yer değiştirme  
(G+0.3SPCX+SPCY+0.3SPCZ)

## 4.2. Tartışma

Bu tez çalışmasında, tarihi Onaç Köprüsünün makro modelleme tekniğiyle bilgisayar destekli üç boyutlu analizi yapılmıştır. Modellemenin hızlı, güvenilir ve yeterli hassasiyette olmasını sağlamak için YLT (Yersel Lazer Tarama) yöntemlerinin de kullanılması fayda sağlamaktadır. Taramayla elde edilen dijital nokta bulutu, özel bir teknikle yapısal analize uygun katı bir cisim (solid eleman) haline getirilmiştir. Bu tip tarihi yapıların mikro modelleme ile modellenmesi oldukça güçtür. Her bir yapı elemanın mekanik ve geometrik özelliklerini belirlemek, daha sonra modellemek bu büyüklükteki yapılar için uygun değildir. Her tarihi yapıdan karot yani numuneler alınamamaktadır. Sadece belli standartlara uygun şekilde malzeme tayini yapılmaktadır. Amaç tarihi yapıların oluşabilecek hasarlara karşı korunmasıdır.

Literatürde çalışmaları incelendiğinde modelleme yapılırken homojen modellemelere de yer verildiği görülmüştür. Çalışmalarda tüm köprü tek bir malzeme tipiyle modellenmektedir. Ancak bu tür çalışmalarda modelin gerçekten daha rijit davrandığı gözlemlenmiştir. Normal koşullarda genellikle yapı elemanlarının malzeme özellikleri farklılık göstermektedir. Bu çalışmada model yapı elemanlarının malzeme özelliklerinin sınıflandırılarak heterojen bir yaklaşım gösterilmiştir. Model kemerler, yan duvarlar (tempan duvarlar) ve dolgu olarak üç farklı yapı elemanından oluşmaktadır. Elemanların mekanik ve geometrik özellikleri birbirinden farklıdır. Kemer ve yan duvarlarının rijitliği dolgu malzemesine göre daha yüksektir. Modelleme yapılırken bu esasa dayanan kaynaklardan literatür taraması yapıldıktan sonra, benzer taş cinsine sahip köprülerin malzeme özellikleri esas alınarak malzeme kabulü yapılmıştır.

Sonlu elemanlara dayanan analizler, taşıyıcı sistem davranışının daha iyi anlaşılmasını sağlayan birer araç olarak kullanılmaktadır. Elde edilen analiz sonuçları, tespit edilen yapı geometrisi için yapılacak kabullerden önemli miktarda etkileneceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu tip tarihi yığma köprüler beşeri faktörler ve doğal afetlerden etkilenmişlerdir. Dolayısıyla oldukça değişken geometriye sahip yapının gerekli hassasiyette modellenmesi ancak dijital yöntemlerle yapılan detaylı tarama işlemlerinden yararlanmakla mümkün olmaktadır. Söz konusu yöntemler neticesinde milyon mertebesinde noktadan oluşan dijital bulutun katı cisim oluşturmaya yönelik olarak sadeleştirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada modellenen köprüye statik olarak zati ağırlık, hareketli yük ve taşkın yükü etki ettirilmiştir. Daha sonra statik analiz, modal analiz ve davranış spektrum analizi gerçekleştirilmiştir. Modal analiz, nesnelere yapısal dinamiklerini ve doğal titreşim frekanslarını belirlemeye yöneliktir. Analiz sonuçları, yapı geometrisinden olduğu gibi dikkate alınan malzeme özelliklerinden de etkilenmektedir. Tarihi köprü inşasında kullanılan taş boyutları, harç ve derz kalınlıkları ve taş örgüsü tekniği oldukça değişken özellik göstermektedir. Bununla birlikte çokça taş dökülmesi, derz boşalması gibi bozulmalar da mevcuttur. Dolayısıyla mevcut yapının makro modelini oluşturabilmek için gerekli olan ortalama malzeme özelliklerini (taş ve harç birleşimi için ortak) literatürde yaygın olarak kullanılan homojenleştirme tekniğiyle (Batar, vd. 2021) belirlemek mümkün olmamıştır. Bunun yerine, malzeme analiz raporuna da bakılarak, benzere özelliklere sahip tarihi taş köprüler için literatürde verilen basınç dayanım ve elastisite modülü değerleri dikkate alınarak seçilen malzeme özellikleri Çizelge 4.3'te verilmiştir (Ural 2005, Akın vd. 2022, Ünay 2002). Söz konusu değerler mevcut

malzemeler için dikkate alınabilecek olası en düşük dayanım değerleridir. Daha doğru sonuçlar alınabilmesi için yerinde yapılan doğal frekans ölçümleri dikkate alınarak doğrulama işleminin sağlanması yerinde olacaktır. Sonuçlar incelenirken bu durum göz önünde bulundurulmalıdır.

Köprünün üç kemeri de yuvarlak kemer şeklinde olup, kemer açıklıklarının memba cephesi ile mansap cephesinde birkaç cm farklılık dışında hemen hemen eşit olduğu tespit edilmiştir. Kemer taşlarının standart bir ölçüye sahip olmaması nedeniyle her iki yandan yükselerek kilit taşı seviyesinde birleşen kemer taşı sıralarında farklılıklar oluşmuştur. Kemerlerin iç tonozları moloz taş ve nadiren de düzensiz bir şekilde, ince uzun kesitli muntazam olmayan kesme taşlarla inşa edilmiştir. Kemerlerin oturduğu moloz taş örgülü ayaklardan köprünün güneydoğu ucunda yer alan A01 numaralı ayağın bir kısmı, kuzeybatı ucunda yer alan A04 numaralı ayağın ise büyük bir bölümü toprak altında kalmıştır. Toprak altında kalan köprü bölümlerine modelleme aşamasında ankastre mesnet tanımlanmıştır.

Dört ayakla desteklenen, daha çok kireç taşı ve nadiren de serpiştirilmiş kumtaşından ebatlandırılmış kesme ve moloz taş malzemeyle inşa edilmiş köprü kemerlerinin, ara ve yan tempan duvarları, yoğun olarak moloz taş malzeme kullanılarak yığma teknikte tamamlanmıştır. Tempan duvarları, memba ve mansap cephesinde düz bir hat takip ederken, güneydoğu yönünde her iki yandan dışa doğru pah yaparak tamamlanmaktadır.

Farklı geometrik formlu taşlarla kaplı köprü döşemesi, günümüze ulaşabilmiş dokusu itibariyle her iki yandan pah yaparak dışa açılan tempan duvarları doğrultusunda devam ederek tamamlanmaktadır. Köprünün korkulukları ise günümüze ulaşmamış ve bu sebeple korkuluk modellemesi yapılmamıştır. Proje çalışmaları kapsamında köprünün tespit edildiği 2017 yılı yaz döneminde kuraklık nedeniyle köprünün suyunun çekildiği bilinmektedir ancak analizlerde nehir taşkın yükü de göz önüne alınmıştır. Modelleme yapılırken selyaranlar çok hasar gördükleri, modelin taşıyıcılığına etkileri azaldığı ve modelleme de yapıyla bir bütün olarak çalışmadığı için modellemeye dâhil edilememiştir. Bunun yanı sıra modelleme yapılırken taşların boyutları köprünün her bölgesinde oldukça farklılık göstermektedir. Yapı makro modelleme ile oluşturulduğu için taş boyutu ortalama 250 mm olacak şekilde kemerler ve yan duvarları oluşturulmuştur. Analizlerde kemer ve tempan duvarları gibi elemanlar taş ve harcın bir arada monolitik olarak çalıştığı varsayılarak modellenmiştir. Mikro modelleme yapılmadığı için bu kabul uygun görülmüştür. Çalışmadaki analizlerde serbestlikler, kullanılan elemanın her bir noktası için 3 farklı eksenlerdeki yer değiştirmelerdir. Tüm modelde tabandaki düğüm noktalarında x, y ve z eksenlerinde yer değiştirmeler engellenerek yapının zemine rijit olarak bağlanması sağlanmıştır. Sabit yer çekimi ivmesi yapıya noktasal değil, yayılı yük olarak, hareketli yük ise döşeme üzerine etki ettirilmiştir.

## 5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında Burdur ili, Bucak ilçesi Onaç çayı üzerinde bulunan Tarihi Onaç Köprüsünün düşey ve yatay yüklemeler altında çeşitli yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Öncelikle yapıyla ilgili tarihi süreç araştırılmış, ardından yetkili kurullar tarafından elde edilen veriler ve raporlar kullanılarak bilgisayar ortamında yapının 3 boyutlu modeli oluşturulmuştur. Köprünün mevcut ve mevcut olmayan yapı elemanları hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra Onaç köprüsünün bilgisayar destekli statik, modal ve davranış spektrum analizi yapılmıştır.

Köprünün yerinde yapılan tespitlere dayalı güncel verileri harmanlanarak, rölövesi, bozulma analizleri, sanat tarihi raporu, teknik raporları, fotoğraf albümü kullanılarak, günümüzdeki durumu hakkında bilgi verilmiştir. İnceleme konusu yapı yığma kemerli bir köprüdür. Önceki raporlara bakıldığında yetkili birimler tarafından köprünün ana taşıyıcı kemerleri ve duvarlarından daha önce taş örnekleri alınmış, üzerlerinde yapılan deneyler sonucunda taş cinsinin kireçtaşı olduğunu tespit etmişlerdir. Kemer, tempan duvarları ve dolgu malzemelerinin mekanik özellikleri gerekli literatür taramasından sonra benzer çalışmalara bakılarak seçilmiştir.

Yersel Lazer Tarama yöntemiyle köprü ve yakın çevresinin mevcut renkli nokta bulutu kümesi kullanılarak 3 boyutlu modeli oluşturabilmek için çeşitli noktalar seçilmiştir. Seçilen noktalar modelleme aşamasında büyük kolaylık sağladığı için oldukça etkili olmuştur. Daha önce yapılan benzer çalışmalara bakıldığında yeni yeni kullanılmaya başlanan bir yöntem olduğu için çok fazla örneği mevcut değildir.

Modellemenin yapılabilmesi için önce Autodesk RECAP ve AutoCAD 3D programlarından faydalanılmıştır ve makro modellemeye geçilmiştir. ABAQUS programında makro model oluşturulduktan sonra malzeme tanımlanmıştır. Taş ve harç malzemesi kompozit bir malzeme olarak kabul edilmiştir. Malzemelerin elastik ve plastik özellikleri programa işlenmiştir. Malzemelerin birimleri ABAQUS birim cetvelindeki SI (mm) birim sistemine göre işlenmiştir.

Yapıya zati ağırlığı için sabit  $9810 \text{ mm/s}^2$ 'lik yer çekimi ivmesi,  $150 \text{ kg/m}^2$ 'lik hareketli yük ve  $500 \text{ kg/m}^2$ 'lik nehir yükü etki ettirilmiştir. Daha sonra zati ağırlığa bağlı statik, modal ve davranış spektrum analizi yapılmıştır. Analiz süresi 30 saniye seçilerek yapıya kısa süreli ani yükleme yapılıp çok rijit davranmasının önüne geçilmiştir. Yapılan analizler sonucunda oluşabilecek maksimum gerilmelerin ve yer değiştirmelerin yapıya hasar vermeyeceği, olası bir deprem durumunda göçme tehlikesi olmadığı görülmüştür.

Tüm bu çalışmaların sonucunda nokta bulutu yöntemiyle modellemenin kolaylaştırılması, kısa sürede 3D programlarla yapının üç boyutlu katı halinin oluşturulması, malzemelerin hem elastik hem de plastik özelliklerinin işlenmesi ve sonlu elemanlar yöntemini esas alan programların kullanılması yapılacak benzer çalışmalara zemin hazırlayacaktır.

## 6. KAYNAKLAR

- ABAQUS Tutorials, 2019. Online Documentation Dassault Systemes Simulia User Assistance, Dassault Systemes.
- Akan, Aslı E., ve Özen, Ö. 2005. Bursa Yeşil Türbe'nin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Deprem Analizi, Deprem Sempozyumu: 758-62.
- Akın, K., Sayın, E. ve Özmen, A. 2022. Farklı Sönüm Tipleri Altında Tarihi Yığma Köprülerin Sismik Tepkilerinin Değerlendirilmesi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 34(1), 45-59.
- Alaboz, M. 2008. Mimar Sinan Köprülerinin Güncel Durum Değerlendirmesi ve Kapuağası Köprüsü Restorasyon Projesi, yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Ali, U. ve Yakar, M. 2014. Yersel Lazer Tarama Tekniği Kullanarak Kızkalesi'nin Nokta Bulutunun Elde Edilmesi ve Lazer Tarama Noktalarının Hassasiyet Araştırması, *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(1), 25-36.
- Anonim 1: [https://tr.wikipedia.org/wiki/K%C3%B6pr%C3%BCpazar\\_K%C3%B6pr%C3%BCs%C3%BC](https://tr.wikipedia.org/wiki/K%C3%B6pr%C3%BCpazar_K%C3%B6pr%C3%BCs%C3%BC) [Son erişim tarihi: 25.05.2022].
- Anonim 2: [https://www.sozcu.com.tr/hayatim/seyahat/romalilar-doneminden-beri-ayakta-duran-cendere-koprusu/?\\_szc\\_galeri=1](https://www.sozcu.com.tr/hayatim/seyahat/romalilar-doneminden-beri-ayakta-duran-cendere-koprusu/?_szc_galeri=1) [Son erişim tarihi: 25.05.2022].
- Anonim 3: <http://www.fethiyedenhaber.com/haber/2279/tarihi-urluca-koprusu-restore-ediliyor.html> [Son erişim tarihi: 25.05.2022].
- Anonim 4: [https://en.wikipedia.org/wiki/Varda\\_Viaduct](https://en.wikipedia.org/wiki/Varda_Viaduct) [Son erişim tarihi: 25.05.2022].
- Anonim 5: [https://tr.wikipedia.org/wiki/Babaeski\\_K%C3%B6pr%C3%BCs%C3%BC](https://tr.wikipedia.org/wiki/Babaeski_K%C3%B6pr%C3%BCs%C3%BC) [Son erişim tarihi: 25.05.2022].
- Anonim 6: <https://www.islamveihsan.com/sokullu-mehmet-pasa-koprusu-restore-edildi.html> [Son erişim tarihi: 25.05.2022].
- Anonim 7: <https://www.gezginrehberler.com/tarihi-kemer-ve-kopruler/senyuva-koprusu/> [Son erişim tarihi: 25.05.2022].
- Anonim 8: <https://www.munzur.edu.tr/birimler/akademik/fakulteler/muhendislik/bolumler/insaat/Pages/file/Temeller-Hafta-10.pdf> [Son erişim tarihi: 25.05.2022].
- Anonim 9: <https://docplayer.biz.tr/21217640-Kemer-kopru-tasiyici-sistemi.html> [Son erişim tarihi: 25.05.2022].

- Anonim 10: <https://www.mynet.com/var-da-koprusu-nerede-nasil-gidilir-var-da-koprusu-tarihi-hikayesi-yol-tarifi-var-da-koprusu-adana-190101253042> [Son erişim tarihi: 25.05.2022].
- Anonim 11: <https://www.tatilcity.net/things-to-do/caglayan-koprusu/> [Son erişim tarihi: 25.05.2022].
- Anonim 12: <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Bölgeler/13Bolge/Harita.asp> [Son erişim tarihi: 25.05.2022].
- Anonim 13: <https://www.burdurweb.com/web/burdurun-deprem-gercegi.html> [Son erişim tarihi: 25.05.2022].
- Arman, F. 2019. Perbandingan frekuensi alami dan mode shape balok euler-bernoulli dengan balok timoshenko menggunakan metode elemen hingga (TS-2513), Doctoral dissertation, Universitas Tarumanagara.
- Aşkın, F. 2009. Lazer Tarama Verileriyle 3B Obje Modellenmesinde Karşılaşılan Sorunlar ve Çözüm Önerileri, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- AutoDesk AutoCAD Tutorials, 2021. 2D and 3D CAD software, AUTODESK.
- AutoDesk ReCap Tutorials, 2021. Reality capture and 3D scanning software, AUTODESK.
- Banerji, Pradipta, and Sanjay Chikermane 2012. Condition Assessment of a Heritage Arch Bridge Using a Novel Model Updation Technique, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2: 1-16.
- Batar, O. Ş. 2019. Tarihi Yığma Taş Yapıların Bilgisayar Destekli Analizi: Ayvalıkemer (Sillyon) Köprüsü Yapısı Örneği, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Antalya.
- Batar, Oguzhan S., Tercan, E. ve Emsen, E. 2021. Ayvalıkemer (Sillyon) Historical Masonry Arch Bridge: a Multidisciplinary Approach for Structural Assessment Using Point Cloud Data Obtained by Terrestrial Laser Scanning (TLS), *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11: 1239-52.
- Bozcu, M., Yağmurlu, F. ve Şentürk, M. 2007. Fethiye-Burdur Fay Zonunun Bazı Neotektonik ve Paleosismolojik Özellikleri, GB-Türkiye, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 31: 25-48.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N. 2004. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Beta Dağıtım, İstanbul.
- Gamarra Castañeda, Rocío. 2012. Ayudas Para el Diseño Estructural de Albañilería Con Fuerzas Normales al Muro.

- Gönül, A. ve Sakcalı, GB. 2019. Tarihi Irgandı Köprüsünün Deprem Performansı, In International Conference on Earthquake Engineering and Seismology (5ICEES), 11.
- Güllü, H. 2018. Tarihi Yığma Yapılı Cendere Köprüsünün Deprem Etkisinin İncelenmesi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7: 245-59.
- Gürcan, Y. 2012. Yersel Lazer Tarama Yöntemi ve Klasik Ölçme Yönteminin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hafezolghorani, M., Hejazi, F., Vaghei, R., Jaafar, MSB. ve Karimzade, K. 2017. Beton için basitleştirilmiş hasar plastisite modeli, Uluslararası Yapı Mühendisliği, 27 (1), 68-78.
- Hibbitt, H., Karlsson, B., Sorensen P. ve Baglin, N.K. 2014. ABAQUS analysis users manual version 6.14, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.
- Hokelekli, E. ve Yılmaz, BN. 2019. Tarihi bir yığma kemer köprüsünün kemer ve köşelik duvarları ile dolgunun kohezyonlu temasının sismik tepkiye etkisi, *Periodica Polytechnica İnşaat Mühendisliği*, 63 (3), 926-937.
- Kanun, E., Metin, A. ve Yakar, M. 2021. Yersel Lazer Tarama Tekniği Kullanarak Ağzıkara Han'ın 3 Boyutlu Nokta Bulutunun Elde Edilmesi, *Türkiye Lidar Dergisi*, 3(2), 58-64.
- Karasaka, L., ve Beg, A. A. R. 2021. Yersel Lazer Tarama Yöntemi ile Farklı Geometrik Yapıdaki Özelliklerin Modellenmesi, *Geomatik*, 6(1), 54-60.
- Kocaman, İ., Kazaz, İ. ve Özkaya, Gökhan S. 2020. Yığma Kemer Köprülerde Kullanılan Malzeme Özelliklerinin Tahribatsız Yöntemlerle Belirlenmesi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 22: 671-80.
- Koç, D. 2015. Tarihi Yapı Taş Kemerlerinin FRP ile Güçlendirilmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Korkmaz, Kasım A., Zabin, P., Çarhoğlu, Asuman İ. ve Nuhoglu, A. 2013. Taş Kemer Köprülerin Deprem Davranışlarının Değerlendirilmesi: Timisvat Köprüsü Örneği, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2: 66-75.
- Lourenço, Paulo José Brandão Barbosa. 1997. Computational Strategies for Masonry Structures, delft., Doktora tezi, Delft Teknoloji Üniversitesi, Hollanda.
- Lourenço, PB, G Vasconcelos, and L Ramos. 2001. Assessment of The Stability Conditions of a Cistercian Cloister, In Second International Congress of Studies in Ancient Structures, Minho Üniversitesi, Portekiz.

- Öksüz, M. ve Topan, H. 2012. Yersel Lazer Tarama Teknolojisi ve Kültürel Mirasın Korunması Uygulamasında Tarihi Gölyazı Kilisesi Örneği, Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak.
- Sabuncu, A. ve Özener, H. 2020. Mimari Dökümantasyonda Yersel Lazer Tarama Teknolojisi Kullanımı: Tarihi Sismoloji Binası Örneği, *Turkish Journal of Remote Sensing and GIS*, 1: 45-52.
- Safkan, S., Hamarat, H., Duran, Z., Aydar, U. ve Çelik, Mehmet F. 2014. Yersel Lazer Tarama Yönteminin Mimari Belgelemede Kullanılması, V. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu (UZAL-CBS 2014): 14-17.
- Standard, B. (2005). Eurocode 6-Design of Masonry Structures. British Standard Institution. London, (2005).
- Tanriverdi, M. ve Gürel, M. Arif. 2019. Geçmişten Günümüze Kemer Köprüler, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 4: 156-67.
- TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Tóth, Axel Roland, Zoltán Orbán, and Katalin Bagi. 2009. Discrete Element Analysis of a Stone Masonry Arch, *Mechanics Research Communications*, 36: 469-80.
- Türker, T., Bayraktar, A., Kocaman, İ. ve Çoruhlu, B. 2015. Ölçekli Yığma Taş Kemer Köprü Modelinin Dinamik Davranışının Deneysel ve Analitik Olarak İncelenmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, 1: 113-26.
- Ural, A. ve Doğangün, A. 2007. Mikro Modelleme Tekniği Kullanılarak Yığma Yapıların Deprem Performanslarının İncelenmesi, Uluslararası deprem sempozyumu.
- Ural, A. 2005. Tarihi Kemer Köprülerin Sonlu Eleman Metoduyla Analizi, Deprem Sempozyumu: 408-13.
- Unay, A. G. 2002. Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi Yayınları, Ders Kitabı, Ankara, 172 s.
- Yanık, Y., Türker, T. ve Çoruhlu, B. 2017. Tarihi Taş Kemer Köprülerde Hasar Nedenleri ve Onarım Teknikleri.
- Yunus, K., Polat, N., Şenol, Halil İ., Memduhoğlu, A. ve Ulukavak, M. 2021. Arkeolojik Kalıntıların Belgelenmesinde Yersel Ve İHA Fotogrametrisinin Birlikte Kullanımı, *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 3(1), 9-14.
- Yılmaz, P. 2006. Tarihi Yapıların Modellenmesi ve Deprem Güvenliklerinin Belirlenmesi, Sakarya Üniversitesi.

**7. EKLER**

**EK-1.** Onaç köprüsüne ait koordinatların AFAD verileri

**EK-2.** Dolgu malzemesi için CDP basınç değerleri

**EK-3.** Kemer malzemesi için CDP basınç değerleri

**EK-4.** Yan duvar malzemesi için CDP basınç değerleri

**EK-5.** Dolgu malzemesi için CDP çekme değerleri

**EK-6.** Kemer malzemesi için CDP çekme değerleri

**EK-7.** Yan duvar malzemesi için CDP çekme değerleri



**EK-1.** Onaç köprüsüne ait koordinatların AFAD sonuçları

26.06.2022 22:29

Sismik Tehlike Haritası Detay Raporu

**AFAD****Türkiye Deprem Tehlike Haritaları  
İnteraktif Web Uygulaması****Kullanıcı Girdileri**

Rapor Başlığı:	Onaç DD-2 ZD	
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	DD-2	50 yılda açılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
Yerel Zemin Sınıfı	ZD	Orta sıkı - sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları
Enlem:	37.2822°	
Boylam	30.3416°	

**Çıktılar**

$S_g = 0.569$        $S_1 = 0.153$        $PGA = 0.256$        $PGV = 12.372$

$S_g$  : Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

$S_1$  : 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

PGA : En büyük yer ivmesi [g]

PGV : En büyük yer hızı [cm/sn]

26.06.2022 22:29

Sismik Tehlike Haritası Detay Raporu

Yerel Zemin Sınıfı ZD ve  $S_1 = 0.153$  için  $F_1 = 2.294$

### Tasarım Spektral İvme Katsayıları

---

$$S_{DS} = S_S F_S = 0.569 \times 1.345 = 0.765$$

$$S_{D1} = S_1 F_1 = 0.153 \times 2.294 = 0.351$$

$S_{DS}$  : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

$S_{D1}$  : 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

## EK-2. Dolgu malzemesi için CDP basınç değerleri

No	Concrete Compression Curve		Concrete Compression Damage	
	Stress	Strain	Damage parameter	Inelastic strain
1	1.5	0	0	0
2	1.92240390936524	3.38973937565037E-005	0.00976661634285048	0.00731788872114283
3	2.44397859217976	0.000124680938546829	0.0191427725162127	0.00822347590838737
4	2.89989601655454	0.000259235988963641	0.0303168462827215	0.00913505615427574
5	3.29303794334067	0.000435641371106222	0.0426854809577717	0.0100506182698592
6	3.62817970183054	0.000650713532112971	0.0558088922186621	0.0109686963073955
7	3.9109968210237	0.000900668785984201	0.069366380289499	0.0118882212676317
8	4.1474123752548	0.0011815584164968	0.0831243185969452	0.0128084143953231
9	4.34319228057319	0.00148953847961788	0.0969130275547065	0.013728710091849
10	4.50371462631394	0.00182102358245738	0.110609985386959	0.0146486999512899
11	4.63385608248755	0.00217276261167497	0.124127574548832	0.0155680919151628
12	4.73795348878039	0.00254186434081308	0.137404089734793	0.016486680299116
13	4.8198111262852	0.00292579258247653	0.150397104001105	0.0174043236800037
14	4.88273370532178	0.00332234419645215	0.163078549584874	0.0183209284986162
15	4.92957205762249	0.00372961862825167	0.17543105285238	0.0192364368428413
16	4.96277338964853	0.00414598440690098	0.187445191835022	0.0201508173061167
17	4.98443124640105	0.00457004583573264	0.199117436282807	0.0210640581209427
18	4.99633249383298	0.00500061167077801	0.210448595360744	0.0219761619845358
19	5	0.00543666666666667	0.221442644847633	0.0228871421494921
20	4.99982236765163	0.00553678508823225	0.232105839395844	0.0237970194646528
21	4.98491359011859	0.00642105760658761	0.242446039855806	0.0247058201328527
22	4.95116691828575	0.00731788872114283	0.252472203506513	0.0256135740116884
23	4.90428613741894	0.00822347590838737	0.262193998125302	0.0265203133270843
24	4.84841576858639	0.00913505615427574	0.271621510493549	0.0274260717016452
25	4.78657259521114	0.0100506182698592	0.280765027106696	0.028330883423689
26	4.72095553890669	0.0109686963073955	0.289634870207763	0.0292347829006925
27	4.6531680985525	0.0118882212676317	0.298241276275695	0.0301378042542523
28	4.58437840701527	0.0128084143953231	0.306594307122911	0.031039981023743
29	4.51543486222647	0.013728710091849	0.314703786044499	0.0319413459534817
30	4.4469500730652	0.0146486999512899		
31	4.37936212725584	0.0155680919151628		
32	4.31297955132603	0.016486680299116		
33	4.24801447999447	0.0174043236800037		
34	4.18460725207563	0.0183209284986162		
35	4.1228447357381	0.0192364368428413		
36	4.06277404082489	0.0201508173061167		
37	4.00441281858596	0.0210640581209427		
38	3.94775702319628	0.0219761619845358		
39	3.89278677576184	0.0228871421494921		
40	3.83947080302078	0.0237970194646528		
41	3.78776980072097	0.0247058201328527		
42	3.73763898246743	0.0256135740116884		
43	3.68903000937349	0.0265203133270843		
44	3.64189244753226	0.0274260717016452		
45	3.59617486446652	0.028330883423689		
46	3.55182564896118	0.0292347829006925		
47	3.50879361862152	0.0301378042542523		
48	3.46702846438545	0.031039981023743		

**EK- 3. Kemer malzemesi için CDP basınç değerleri**

No	Concrete Compression Curve		Concrete Compression Damage	
	Stress	Strain	Damage parameter	Inelastic strain
1	3	0	0	0
2	3.76423049103831	2.77565029872314E-005	0.010857152941791	0.00711619050980597
3	4.79977923709101	0.00011007358763633	0.0212267648172443	0.00803242254939081
4	5.7111101123717	0.000233796629209435	0.0335325649406075	0.00895510854980202
5	6.50193682800647	0.000397687723997845	0.0470978494213966	0.00988199283140466
6	7.17999498958865	0.000599168336803785	0.0614339914394808	0.0108114466381316
7	7.75516980254705	0.000834943399150983	0.0761883628552906	0.011742294542851
8	8.23820269725795	0.00110143243424735	0.091107037513028	0.0126736901250434
9	8.63984288418964	0.00139505237193679	0.106007999063487	0.013605026663545
10	8.9703275728201	0.00171239080905997	0.120761812925129	0.0145358727097504
11	9.23909445480268	0.00205030184839911	0.135277615072737	0.0154659253835758
12	9.45465109342075	0.00240594963552642	0.149492903319985	0.0163949763443999
13	9.62454528258956	0.00277681823913681	0.163366061476552	0.0173228868715885
14	9.75539664170335	0.00316070111943222	0.176870858265964	0.0182495695275532
15	9.8529623044985	0.00355567923183383	0.18999238119879	0.019174974603996
16	9.92221885012684	0.00396009371662439	0.202724019005243	0.0200990800633508
17	9.96744920769832	0.00437251693076723	0.215065214477406	0.021021884048258
18	9.99232777627119	0.00479172407457627	0.227019786329379	0.0219433992877646
19	10	0.0052166666666667	0.238594673411614	0.022863648911372
20	9.9996089426916	0.0053167970191028	0.249798993860748	0.0237826633128692
21	9.96638701575916	0.00620953766141361	0.260643340073571	0.0247004778002452
22	9.89142847058209	0.00711619050980597	0.27113925093134	0.0256171308364378
23	9.78773235182756	0.00803242254939081	0.281298817687067	0.0265326627256236
24	9.66467435059393	0.00895510854980202	0.291134390925706	0.027447114636419
25	9.52902150578603	0.00988199283140466	0.300658364121052	0.0283605278804035
26	9.38566008560519	0.0108114466381316	0.309883015331107	0.029272943384437
27	9.23811637144709	0.011742294542851	0.318820393059297	0.0301844013101977
28	9.08892962486972	0.0126736901250434	0.327482235668394	0.0310949407855613
29	8.93992000936513	0.013605026663545		
30	8.79238187074871	0.0145358727097504		
31	8.64722384927263	0.0154659253835758		
32	8.50507096680015	0.0163949763443999		
33	8.36633938523448	0.0173228868715885		
34	8.23129141734035	0.0182495695275532		
35	8.1000761880121	0.019174974603996		
36	7.97275980994757	0.0200990800633508		
37	7.84934785522594	0.021021884048258		
38	7.72980213670621	0.0219433992877646		
39	7.61405326588386	0.022863648911372		
40	7.50201006139252	0.0237826633128692		
41	7.39356659926429	0.0247004778002452		
42	7.2886074906866	0.0256171308364378		
43	7.18701182312933	0.0265326627256236		
44	7.08865609074294	0.027447114636419		
45	6.99341635878948	0.0283605278804035		
46	6.90116984668893	0.029272943384437		
47	6.81179606940703	0.0301844013101977		
48	6.72517764331606	0.0310949407855613		
49	6.6412008373866	0.0320045997208711		

**EK- 4. Yan duvar malzemesi için CDP basınç değerleri**

No	Concrete Compression Curve		Concrete Compression Damage	
	Stress	Strain	Damage parameter	Inelastic strain
1	2.4	0	0	0
2	3.04681098040713	3.00256078371495E-005	0.0112510253324343	0.00703933661439712
3	3.87866435085568	0.000113534259657729	0.0219279556520838	0.00796266945808667
4	4.60801878563699	0.000238042485745204	0.0345401845381585	0.00889219525718878
5	5.23873415847859	0.000402006336608565	0.0483862032731006	0.00982566918380726
6	5.77779249457329	0.000602633002170685	0.0629656964873959	0.0107614902287597
7	6.23374719766407	0.000836501120934373	0.0779219633845999	0.0116985169494974
8	6.6156807057347	0.00109997771770612	0.0930012873214356	0.0126359374527619
9	6.93254114043062	0.00138948354382775	0.108024138952729	0.0135731772446487
10	7.19275107795282	0.00170164956881887	0.122864656495431	0.014509833567452
11	7.40400348066711	0.00203339860773316	0.137435938914478	0.0154456283378597
12	7.57318062914271	0.00238197774834292	0.151679443260467	0.0163803742184335
13	7.70634981779117	0.00274496007288353	0.165557297201628	0.0173139500177119
14	7.80880383781539	0.00312022846487385	0.17904669537349	0.0182462827585285
15	7.88512496066448	0.00350595001573421	0.192135794797523	0.0191773345433521
16	7.93925879119521	0.00390054648352192	0.204820695474252	0.0201070928921843
17	7.97458964556174	0.00430266414177531	0.21710321126952	0.0210355636093958
18	7.99401264378767	0.00471114494248493	0.228989219623391	0.0219627655027949
19	8	0.005125	0.240487437448263	0.0228887264665011
20	7.99967831994966	0.00522512867202014	0.251608512359347	0.0238134805728832
21	7.97204880837377	0.00612534714331716	0.26236434823911	0.0247370659143652
22	7.90999179734053	0.00703933661439712	0.272767605615686	0.0256595230046369
23	7.82457635478333	0.00796266945808667	0.282831332883044	0.0265808935985591
24	7.72367852369473	0.00889219525718878	0.292568695713854	0.0275012198262843
25	7.6129103738152	0.00982566918380726	0.301992780310676	0.0284205435636608
26	7.49627442810083	0.0107614902287597	0.311116452250976	0.0293389059805365
27	7.3766242929232	0.0116985169494974	0.319952257205955	0.0302563472230591
28	7.25598970142851	0.0126359374527619	0.328512353180252	0.0311729061968435
29	7.13580688837817	0.0135731772446487		
30	7.01708274803655	0.014509833567452		
31	6.90051248868418	0.0154456283378597		
32	6.78656445391627	0.0163803742184335		
33	6.67554162238697	0.0173139500177119		
34	6.56762643701208	0.0182462827585285		
35	6.46291364161982	0.0191773345433521		
36	6.36143443620598	0.0201070928921843		
37	6.26317430984384	0.0210355636093958		
38	6.16808624301287	0.0219627655027949		
39	6.07610050041389	0.0228887264665011		
40	5.98713190112522	0.0238134805728832		
41	5.90108521408712	0.0247370659143652		
42	5.81785915507451	0.0256595230046369		
43	5.73734933693565	0.0265808935985591		
44	5.65945043428917	0.0275012198262843		
45	5.58405775751459	0.0284205435636608		
46	5.51106838199219	0.0293389059805365		
47	5.44038194235236	0.0302563472230591		
48	5.37190117455799	0.0311729061968435		

**EK-5. Dolgu malzemesi için CDP çekme değerleri**

No	Concrete Tension Curve		Concrete Tension Damage	
	Stress	Strain	Damage parameter	Inelastic strain
1	0.05	0	0	0
2	0.0354088139543306	0.012079	0.291823720913388	0.012079
3	0.0255418590174023	0.024158	0.489162819651954	0.024158
4	0.019087425802044	0.036237	0.61825148395912	0.036237
5	0.0149306347044646	0.048316	0.701387305910708	0.048316
6	0.0122300430376697	0.060395	0.755399139246606	0.060395
7	0.0104002620985949	0.072474	0.791994758028103	0.072474
8	0.00906113828229791	0.084553	0.818777234354042	0.084553
9	0.00798233984843907	0.096632	0.840353203031219	0.096632
10	0.00703534616287038	0.108711	0.859293076742592	0.108711
11	0.00615636932913336	0.12079	0.876872613417333	0.12079
12			0.893602970092661	0.132869
13			0.909586103804384	0.144948
14			0.924738517162525	0.157027

**EK- 6. Kemer malzemesi için CDP çekme değerleri**

No	Concrete Tension Curve		Concrete Tension Damage	
	Stress	Strain	Damage parameter	Inelastic strain
1	0.1	0	0	0
2	0.0708176279086612	0.0186582	0.291823720913388	0.0186582
3	0.0510837180348046	0.0373164	0.489162819651954	0.0373164
4	0.038174851604088	0.0559746	0.61825148395912	0.0559746
5	0.0298612694089292	0.0746328	0.701387305910708	0.0746328
6	0.0244600860753394	0.093291	0.755399139246606	0.093291
7	0.0208005241971897	0.1119492	0.791994758028103	0.1119492
8	0.0181222765645958	0.1306074	0.818777234354042	0.1306074
9	0.0159646796968781	0.1492656	0.840353203031219	0.1492656
10	0.0140706923257407	0.1679238	0.859293076742592	0.1679238
11	0.0123127386582667	0.186582	0.876872613417333	0.186582
12	0.0106397029907339	0.2052402	0.893602970092661	0.2052402
13			0.909586103804384	0.2238984
14			0.924738517162525	0.2425566
15			0.93892212181987	0.2612148

**EK- 7. Yan duvar malzemesi için CDP çekme değerleri**

No	Concrete Tension Curve		Concrete Tension Damage	
	Stress	Strain	Damage parameter	Inelastic strain
1	0.08	0	0	0
2	0.056654102326929	0.007549375	0.291823720913388	0.007549375
3	0.0408669744278437	0.01509875	0.489162819651954	0.01509875
4	0.0305398812832704	0.022648125	0.618251483959120	0.022648125
5	0.0238890155271434	0.0301975	0.701387305910708	0.0301975
6	0.0195680688602715	0.037746875	0.755399139246606	0.037746875
7	0.0166404193577518	0.04529625	0.791994758028103	0.04529625
8	0.0144978212516767	0.052845625	0.818777234354042	0.052845625
9	0.0127717437575025	0.060395	0.840353203031219	0.060395
10	0.0112565538605926	0.067944375	0.859293076742592	0.067944375
11	0.00985019092661338	0.07549375	0.876872613417333	0.07549375
12	0.00851176239258713	0.083043125	0.893602970092661	0.083043125
13			0.909586103804384	0.0905925
14			0.924738517162525	0.098141875

# ÖZGEÇMİŞ

Sibel ASLAN

## ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2018-2022	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2014-2018	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya

## MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

İnşaat Mühendisi 2018-Devam Ediyor	Antalya
---------------------------------------	---------