

**TARİHİ BURSA GEÇİT KÖPRÜSÜNÜN FARKLI  
KEMER TİPLERİNDEKİ STATİK VE DİNAMİK  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Öner ÇİNKÖ**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TARİHİ BURSA GEÇİT KÖPRÜSÜNÜN FARKLI KEMER TİPLERİNDEKİ  
STATİK VE DİNAMİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Öner ÇİNKÖ  
0000-0002-1776-4571

Prof. Dr. M. Bilal BAĞBANCI  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
YAPI BİLGİSİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022  
Her Hakkı Saklıdır

## TEZ ONAYI

Öner ÇINKO tarafından hazırlanan “TARİHİ BURSA GEÇİT KÖPRÜSÜNÜN FARKLI KEMER TİPLERİNDEKİ STATİK VE DİNAMİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Bilgisi Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. M. Bilal BAĞBANCI

- Başkan** : Prof. Dr. M. Bilal BAĞBANCI İmza  
0000-0001-9050-4488  
Bursa Uludağ Üniversitesi,  
Mimarlık Fakültesi,  
Mimarlık Anabilim Dalı
- Üye** : Prof. Dr. Serdar KORKMAZ İmza  
0000-0002-3393-1632  
Bursa Uludağ Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Didem Güneş YILMAZ İmza  
0000-0001-8792-051X  
Bursa Teknik Üniversitesi,  
Mimarlık ve Tasarım Fakültesi,  
Mimarlık Anabilim Dalı

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN**  
**Enstitü Müdürü**

.././.....

**B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

.../.../2022

**Öner ÇINKO**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### TARİHİ BURSA GEÇİT KÖPRÜSÜNÜN FARKLI KEMER TİPLERİNDEKİ STATİK VE DİNAMİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Öner ÇİNKO

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yapı Bilgisi Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. M. Bilal BAĞBANCI

Bu çalışmada, basık, dairesel ve sivri kemer formlarından oluşan tarihi taş köprülerin statik ve dinamik yükler altındaki davranışları incelenmiştir. Yöntem olarak Bursa'da bulunan Tarihi Geçit Köprüsü'nün geometrisi ve malzeme özellikleri incelenmiş ve SAP2000 modeli oluşturulmuştur. Daha sonra köprü yükseklik ve genişlikleri aynı kalacak şekilde bu köprünün dairesel ve sivri kemer formlarındaki davranışları da incelenerek her üç form için yer değiştirme, gerilme ve performans düzeyleri araştırılmıştır.

Birinci bölümde çalışma kapsamında incelenmek üzere seçilmiş olan Bursa İli Nilüfer Çayı üzerinde inşa edilmiş olan Tarihi Geçit Köprüsü hakkında genel bilgiler derlenmiştir. Köprü kullanım amaçları tarihsel kronolojiye göre köprüyle ilgili hazırlanmış olan raporlar, yapılmış olan rölöve çalışması incelenmiştir. Yapılmış çizimleri, tarihi görselleriyle detaylandırılmıştır. Konunun amacı, yöntemi ve kapsamı belirlenmiştir.

İkinci bölümde seçilmiş olan konuyla ilgili yapılan araştırmalarla birlikte faydalanılan ana kaynaklara yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde Anadolu dan geçen tarihi dönemlerdeki yol güzergahları ve bu yol güzergahlarının üzerindeki köprülerin hangi dönemlerde inşa edildiği envanter kayıtlarıyla kemer köprü yapım sistemleriyle ilgili bilgiler verilmiştir. Çalışmanın konusu olarak belirlenen Tarihi Geçit Köprüsünün mevcut kemer formuyla beraber, kemer geometrisi formu hariç sabit tutularak, kemer formu sivri, dairesel ve basık olmak üzere üç farklı geometride SAP2000 programında modellenerek statik olarak analiz edilmiştir. Buna ilave olarak Kobe, Kocaeli ve Chichi depremlerine ait veriler üç farklı kemer formunda tanımlanarak dinamik davranışlarının incelenmesi sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Taş Köprüler, Yapım Sistemleri, Köprü Kemer Çeşitleri, Kemer Geometrisi, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Dinamik Analiz.

**2022, xii + 109 sayfa.**

## ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE STATIC AND DYNAMIC BEHAVIOR OF  
THE HISTORIC BURSA GEÇİT BRIDGE WITH DIFFERENT ARC TYPES

**Öner ÇİNKO**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Architecture

**Supervisor:** Prof. Dr. M. Bilal BAĞBANCI

In this study, the structural behavior of historical stone bridges consisting of flat, circular and pointed arch forms under static and dynamic loads was investigated. As a method, the geometry and material properties of the Historical Geçit Bridge in Bursa which has a flat arch were examined and the SAP2000 model was created. Then, the circular and pointed arch types were creating using the Geçit Bridge features, with the height and width remaining the same. The displacement, stress and performance levels were investigated for all three forms.

In the first part, general information about the Historical Geçit Bridge, which was built on the Nilüfer Stream of Bursa Province, which was selected to be examined within the scope of the study, was compiled. The reports of the bridge and the survey work that has been done have been examined. His drawings are detailed with historical visuals. The purpose, scope and method of the subject have been determined.

In the second part, the main sources used together with the researches on the selected subject are given.

In the third chapter, information about the arch bridge construction systems with the inventory records of the road routes in the historical periods passing through Anatolia and the periods in which the bridges on these road routes were built are given. With the existing arch form of the Historical Geçit Bridge, which was determined as the subject of the study, excluding the arch geometry form, the arch form was modeled in the SAP2000 program in three different geometries as pointed, circular and flattened and analyzed statically. In addition, the data of Kobe, Kocaeli and Chichi earthquakes were defined in three different belt forms and their dynamic behavior was examined.

**Key words:** Stone Bridges, Construction Systems, Bridge Arch Types, Arch Geometry, Finite Element Analysis, Dynamic Analysis.

**2022, xii + 109 pages.**

## TEŞEKKÜR

Tez alıőması aşamasında ve yüksek lisans eğitimi süresince bana desteklerini esirgemeyen ve öncülük eden tez danıőmanım Prof. Dr. M. Bilal BAğBANCI' ya teőekkürlerimi sunarım.

Tez çalıőmam da yararlandığım statik analiz programında bana destek olan, birçok yardımı dokunan İnaőat Yüksek Mühendisi Ali Rıza KARACA' ya teőekkürlerimi sunarım.

Çalıőmam sırasında gerek çizim programlarında gerekse de tez yazım süresince birçok desteğini aldığım ve yardımına baővurduęum sevgili eőim İç Mimar Nisa SESLİ ÇINKO' ya sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Tez yazım süresince yardımlarını benden esirgemeyen abim Tekstil Yüksek Mühendisi Uğur Onur ÇINKO' ya, sevgileriyle ve inançla beni koőulsuz desteklemiő olan anneme ve babama sonsuz teşekkür ederim.

Öner ÇINKO  
20/07/2022

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç.....	3
1.2. Kapsam.....	3
1.3. Araştırmanın Yöntemi.....	4
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	8
3.1. Tarihi Köprüler ve Yol Ağlarıyla Geçiş Güzergahları.....	8
3.2. Taş Köprülerin Malzeme Özellikleri ve Yapım Teknikleri.....	10
3.2.1. Tarihi taş köprülerde tercih edilen yapı elemanları.....	10
3.2.2. Temel yapım sistemleri.....	10
3.2.3. Tempan (kılıf) duvar sistemleri.....	14
3.2.4. Döşeme yapım sistemleri.....	15
3.2.5. Korkuluk ve kornişlerin yapımı.....	16
3.2.6. Köprü malzemelerinin incelemesi.....	17
3.3. Taş Kemerli İnşa Edilen Köprülerin Tarihsel Süreçteki Gelişimi.....	21
3.3.1. Kemer formunun oluşturulması ve taş köprülerin gelişim süreci.....	21
3.3.2. Kemer yapım sistemleri.....	23
3.3.3. Kemer biçiminin incelenmesi.....	25
3.3.4. Kemer geometrisi çeşitleri.....	27
3.3.5. Kemer davranışının incelenmesi.....	31
3.4. Tarihi Geçit Köprüsünün İncelenmesi.....	37
3.4.1. Tarihi geçit köprüsünün genel özellikleri ve mevcut durumu.....	37
3.4.2. Köprünün mimari özellikleri.....	39
3.4.3. Köprüde gözlenen problemler.....	42
3.4.4. Yapı malzeme analizi.....	42
3.5. Yapının Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi.....	44
3.6. Tarihi Köprünün Statik Analizlerinin Yapılması.....	45
3.6.1. Köprünün üç farklı kemer formunda statik analizinin yapılması.....	47
3.6.2. Köprü formlarının sabit ve hareketli yükler altındaki davranışları.....	52
3.6.3. Kemer formlarına ait modal analizler ve kütle katılım oranları.....	60
3.6.3. Depremlerin etkisinde yer değiştirmelerin incelenmesi.....	64
3.6.4. Depremlerin etkisinde gerilmelerin incelenmesi.....	69
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	97
4.1. Statik Yük Altında Yer Değiştirme ve Gerilmeler.....	97
4.2. Frekans Değerlerinin İncelenmesi.....	98
4.3. Depremlerin Etkisinde Davranışların İncelenmesi.....	98
4.4. Köprünün Performans Düzeyinin Değerlendirilmesi.....	100
4.4.1. Taş duvar sistemi basınç dayanımı güvenliği.....	102



4.4.2. Taş duvar sistemi kayma dayanımı güvenliği.....	102
5. SONUÇ.....	105
KAYNAKLAR .....	107
ÖZGEÇMİŞ .....	109

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
E	Elastisite modülü
$\sigma$	Gerilme
A	Kemer taşının yük doğrultusuna dik kesit alanını
P	Kemer kesitindeki eksenel kuvveti
$P_e$	Eksenel kuvvetin eksantrisitesini
Z	Kesit modülü
$f_m$	Yığıma duvar malzemesinin basınç dayanımı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
SAP2000	Structural Analysis Program
AutoCAD	Auto Computer Aided Design
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TYİDRYK	Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu
KN	Kilo Newton
Kg	Kilogram
m.	Metre
cm.	Santimetre
g.	Gram
mm.	Milimetre
MPa	Mega Pascal
yy.	Yüzyıl
ark.	Arkadaşları
M.Ö.	Milattan Önce
vb.	Ve benzeri
TS	Türk Standartları
EN	European Norm
sn.	Saniye
Hz.	Hertz

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.1.	Tarihi köprülerin bulunduğu yol ağ ve güzergahlarının dönemlere göre dağılımı (Sert ve ark. 2013)..... 9
Şekil 3.2.	Envantere kayıtlı olan 2184 adet tarihi köprünün dönemlerine ve Yapım tekniğine göre dağılımı (Sert ve ark. 2013)..... 9
Şekil 3.3.	Tarihi köprü üzerinde gösterilen taş köprülere ait tanımlar..... 10
Şekil 3.4.	Batardo tekniği yardımıyla temel çukurunun açılmasına ait görsel (Alaboz 2008) ..... 12
Şekil 3.5.	Köprü ayaklarının oturduğu temel görseli..... 13
Şekil 3.6.	Konjik Köprüsü inşa edilirken temel kısmında kullanılan ahşap ızgara görseli (Sert ve ark. 2009)..... 13
Şekil 3.7.	Tarihi taş köprülerdeki tempan duvar kesiti..... 14
Şekil 3.8.	Tarihi taş köprülerdeki örnek bir döşeme sistemi..... 15
Şekil 3.9.	Taş köprülerde döşeme ve dolgu detayı..... 16
Şekil 3.10.	Taş köprülerdeki tanımlara ait detaylar..... 17
Şekil 3.11.	Yığma yapının ve yapı malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Ünay 1997).... 18
Şekil 3.12.	Taşlara ait dayanımlar ile elastisite modülü değerleri (Erguvanlı ve Ahunbay 1989)..... 19
Şekil 3.13.	MÖ. 2700 - 2250 Keops Piramidi inşa edilirken kullanılan ters V biçiminde inşa edilmiş ilk kemer formu (Özkaraman 1994)..... 22
Şekil 3.14.	Cloaca Maxima görseli (Troyano 2003)..... 23
Şekil 3.15.	Kuvvet altında kemerdeki a) normal kuvvette, b) yük değişimiyle değişen yük dağılımı tesir çizgisi görseli (Meistermann 2007)..... 24
Şekil 3.16.	Taş kemerlerde yük aktarma diyagramı görseli..... 24
Şekil 3.17.	Köprülerde tercih edilen bazı kemer geometrisi türleri..... 25
Şekil 3.18.	Kemer formu üzerinde elemanların ve kuvvetlerin gösterimi..... 26
Şekil 3.19.	Taş kemer kalıp sistemi görseli..... 26
Şekil 3.20.	Dairesel kemer formunun örnek gösterimi..... 28
Şekil 3.21.	Sivri kemer formunun örnek gösterimi..... 28
Şekil 3.22.	Basık kemer formunun örnek gösterimi..... 29
Şekil 3.23.	Diğer kemer geometrisi türleri (Proske ve Gelder, 2009)..... 29
Şekil 3.24.	Kemer yapısının tarihsel süreçler içerisindeki değişimi..... 30
Şekil 3.25.	Taş kemerlerdeki a) kemer formu b) kemerde oluşan basınç etki çizgisi yük dağılımıyla ara yüzdeki gerilmeler (Huerta 2006)..... 31
Şekil 3.26.	Kendi ağırlığı altında kemer davranışı a) Minimum; b) Maksimum (Nobile ve ark. 2014)..... 32
Şekil 3.27.	Kemerlerin mekanizması a) yük altında b) göçme davranışı (Arun 2006)..... 33
Şekil 3.28.	Rijit bloklardan oluşmuş olan kemerin noktasal bir yük altında dağılarak yıkılması (O'dwyer 1998)..... 33
Şekil 3.29.	Kemer taşlarının üzerinde ki itki çizgisi ve kemer taşının üzerinde Oluşmuş olan gerilmeler (O'dwyer 1998)..... 34
Şekil 3.30.	Asılı ağırlık yöntemiyle itki çizgisinin şeklinin belirlenebilmesi (Vermeltfoort 2001)..... 35

Şekil 3.31.	Kemerler üzerinde kuvvetlerin şematik olarak gösterimi (Boothby ve ark. 1995).....	36
Şekil 3.32.	İtke çizgisinin farklı kemer taşı içerisindeki konumu ve yüzeyde Oluşan gerilmelerin dağılımının gösterimi (Alaboz 2008).....	36
Şekil 3.33.	Sultan Abdülhâmid zamanı yapılan inşaata ilişkin Hüdavendigâr Vilâyeti Mektubî Kaleminin dokümanı (Anonim 2014).....	38
Şekil 3.34.	Geçit Köprüsü geçmiş tarihli görseline ait fotoğraf (Anonim 2014)	38
Şekil 3.35.	Tarihi Geçit Köprüsü mevcut halinin görüntüsü (Anonim 2014)...	39
Şekil 3.36.	Köprü'nün a) Kemerin alttan görünüşü, b) Tempan duvar görünüşü (Anonim 2014).....	39
Şekil 3.37.	Tarihi Geçit Köprüsünde kullanılan taşların a) yakından görüntüsü b) uzaktan görüntüsü (Anonim 2014).....	40
Şekil 3.38.	Tarihi Geçit Köprüsü planı (Demirtaş 2014).....	41
Şekil 3.39.	Köprü'nün A-A Kesiti (Demirtaş 2014).....	41
Şekil 3.40.	Geçit Köprüsü'nün a) betonarme tabliye eklenmesi sırasında kaldı rılmış olan bölüm görseli b) özgün korniş hattı (Anonim 2014).....	42
Şekil 3.41.	Köprü ön cephe-memba cephesi çizgisi (Demirtaş 2014).....	43
Şekil 3.42.	SAP2000 programı kabuk elemanlarda oluşan gerilmeler .....	48
Şekil 3.43.	Köprü'nün a) kemer b) tempan ve basık kemer formu birlikte görüntüsü.....	48
Şekil 3.44.	Köprü'nün basık kemer formunda tempan duvar ve dolgu tamamlanmış hali.....	49
Şekil 3.45.	Köprü üzerindeki sabit ve hareketli yüklerin tanımlanmış hali.....	50
Şekil 3.46.	Köprü'nün basık kemer formunda, seçilmiş olan farklı malzemeler altındaki görüntüsü.....	51
Şekil 3.47.	Köprü'nün dairesel kemer formunda, seçilmiş olan farklı malzeme ler altındaki görüntüsü.....	51
Şekil 3.48.	Köprü'nün sivri kemer formunda, seçilmiş olan farklı malzemeler altındaki görüntüsü.....	52
Şekil 3.49.	Basık kemer formunda oluşan üç yöndeki yer değiştirmeler (cm).	53
Şekil 3.50.	Dairesel kemer formunda oluşan üç yöndeki yer değiştirmeler.....	53
Şekil 3.51.	Sivri kemer formunda oluşan üç yöndeki yer değiştirmeler.....	54
Şekil 3.52.	Basık kemer formundaki asal gerilmeler.....	54
Şekil 3.53.	Basık kemerdeki maksimum asal gerilmeler.....	55
Şekil 3.54.	Basık kemer formundaki minimum asal gerilmeler.....	55
Şekil 3.55.	Basık kemerdeki minimum asal gerilmeler.....	56
Şekil 3.56.	Dairesel kemer formundaki maksimum asal gerilmeler.....	56
Şekil 3.57.	Dairesel kemerdeki maksimum asal gerilmeler.....	57
Şekil 3.58.	Dairesel kemer formundaki minimum asal gerilmeler.....	57
Şekil 3.59.	Dairesel kemerdeki minimum asal gerilmeler.....	58
Şekil 3.60.	Sivri kemer formundaki maksimum asal gerilmeler.....	58
Şekil 3.61.	Sivri kemerdeki maksimum asal gerilmeler.....	58
Şekil 3.62.	Sivri kemer formundaki minimum asal gerilmeler.....	59
Şekil 3.63.	Sivri kemerdeki minimum asal gerilmeler.....	59
Şekil 3.64.	Tüm kemer formundaki ilk üç mod ve frekans değerleri.....	60
Şekil 3.65.	Basık kemerde Chichi depremi etkisinde oluşan üç yöndeki şekil değiştirmeler.....	65

Şekil 3.66.	Dairesel kemerde Chichi depremi etkisinde oluşan üç yöndeki şekil değiştirmeler.....	66
Şekil 3.67.	Sivri kemerde Chichi depremi etkisinde oluşan üç yöndeki şekil değiştirmeler.....	66
Şekil 3.68.	Basık kemerde Kobe depremi etkisinde oluşan üç yöndeki şekil değiştirmeler.....	67
Şekil 3.69.	Dairesel kemerde Kobe depremi etkisinde oluşan üç yöndeki şekil değiştirmeler.....	67
Şekil 3.70.	Sivri kemerde Kobe depremi etkisinde oluşan üç yöndeki şekil değiştirmeler.....	68
Şekil 3.71.	Basık kemerde Kocaeli depremi etkisinde oluşan üç yöndeki şekil değiştirmeler.....	68
Şekil 3.72.	Dairesel kemerde Kocaeli depremi etkisinde oluşan üç yöndeki şekil değiştirmeler.....	69
Şekil 3.73.	Sivri kemerde Kocaeli depremi etkisinde oluşan üç yöndeki şekil değiştirmeler.....	69
Şekil 3.74.	Basık kemer x yönü Chichi depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	70
Şekil 3.75.	Basık kemer x yönü Chichi depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	70
Şekil 3.76.	Basık kemer y yönü Chichi depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	71
Şekil 3.77.	Basık kemer y yönü Chichi depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	71
Şekil 3.78.	Basık kemer z yönü Chichi depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	72
Şekil 3.79.	Basık kemer z yönü Chichi depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	72
Şekil 3.80.	Dairesel kemer x yönü Chichi depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	73
Şekil 3.81.	Dairesel kemer x yönü Chichi depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	73
Şekil 3.82.	Dairesel kemer y yönü Chichi depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	74
Şekil 3.83.	Dairesel kemer y yönü Chichi depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	74
Şekil 3.84.	Dairesel kemer z yönü Chichi depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	75
Şekil 3.85.	Dairesel kemer z yönü Chichi depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	75
Şekil 3.86.	Sivri kemer x yönü Chichi depreminin çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	76
Şekil 3.87.	Sivri kemer x yönü Chichi depreminin basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	76
Şekil 3.88.	Sivri kemer y yönü Chichi depreminin çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	77
Şekil 3.89.	Sivri kemer y yönü Chichi depreminin basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	77

Şekil 3.90.	Sivri kemer y yönü Chichi depreminin çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	78
Şekil 3.91.	Sivri kemer y yönü Chichi depreminin basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	78
Şekil 3.92.	Basık kemer x yönü Kobe depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	79
Şekil 3.93.	Basık kemer x yönü Kobe depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	79
Şekil 3.94.	Basık kemer y yönü Kobe depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	80
Şekil 3.95.	Basık kemer y yönü Kobe depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	80
Şekil 3.96.	Basık kemer z yönü Kobe depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	81
Şekil 3.97.	Basık kemer z yönü Kobe depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	81
Şekil 3.98.	Dairesel kemer x yönü Kobe depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	82
Şekil 3.99.	Dairesel kemer x yönü Kobe depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	82
Şekil 3.100.	Dairesel kemer y yönü Kobe depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	83
Şekil 3.101.	Dairesel kemer y yönü Kobe depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	83
Şekil 3.102.	Dairesel kemer z yönü Kobe depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	84
Şekil 3.103.	Dairesel kemer z yönü Kobe depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	84
Şekil 3.104.	Sivri kemer x yönü Kobe depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	85
Şekil 3.105.	Sivri kemer x yönü Kobe depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	85
Şekil 3.106.	Sivri kemer y yönü Kobe depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	86
Şekil 3.107.	Sivri kemer y yönü Kobe depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	86
Şekil 3.108.	Sivri kemer z yönü Kobe depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	87
Şekil 3.109.	Sivri kemer z yönü Kobe depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	87
Şekil 3.110.	Basık kemer x yönü Kocaeli depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	88
Şekil 3.111.	Basık kemer x yönü Kocaeli depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	88
Şekil 3.112.	Basık kemer y yönü Kocaeli depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	89
Şekil 3.113.	Basık kemer y yönü Kocaeli depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	89

Şekil 3.114.	Basık kemer z yönü Kocaeli depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	90
Şekil 3.115.	Basık kemer z yönü Kocaeli depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	90
Şekil 3.116.	Dairesel kemer x yönü Kocaeli depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	91
Şekil 3.117.	Dairesel kemer x yönü Kocaeli depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	91
Şekil 3.118.	Dairesel kemer x yönü Kocaeli depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	92
Şekil 3.119.	Dairesel kemer x yönü Kocaeli depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	92
Şekil 3.120.	Dairesel kemer z yönü Kocaeli depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	93
Şekil 3.121.	Dairesel kemer x yönü Kocaeli depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	93
Şekil 3.122.	Sivri kemer x yönü Kocaeli depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	94
Şekil 3.123.	Sivri kemer x yönü Kocaeli depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	94
Şekil 3.124.	Sivri kemer y yönü Kocaeli depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	95
Şekil 3.125.	Sivri kemer y yönü Kocaeli depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	95
Şekil 3.126.	Sivri kemer z yönü Kocaeli depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	96
Şekil 3.127.	Sivri kemer z yönü Kocaeli depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m <sup>2</sup> ).....	96
Şekil 4.1.	Statik itme kuvveti ve sınır durumları eğrisi (TYİDRYK. 2017)...	101

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Köprünün ebatlarına dair bilgiler.....	47
Çizelge 3.2. Malzeme özellikleri tablosu .....	49
Çizelge 3.3. Basık kemer formuna ait frekans, periyod ve kütle katılım oranları	61
Çizelge 3.4. Dairesel kemer formuna ait frekans, periyod ve kütle katılım oranları.....	62
Çizelge 3.5. Sivri kemer formuna ait frekans, periyod ve kütle katılım oranları...	63
Çizelge 3.6. 1995 yılında Japonya'daki Kobe Depremi ivme-zaman grafiği.....	64
Çizelge 3.7. 1999 yılında Tayvan'daki Chichi Depremi ivme-zaman grafiği.....	64
Çizelge 3.8. 1999 yılında Türkiye'deki Kocaeli Depremi ivme-zaman grafiği....	65
Çizelge 4.1. Farklı kemer formlarına ait üç yöndeki yer değiştirme değerleri.....	97
Çizelge 4.2. Üç moda ait farklı kemer formlarındaki frekans değerleri.....	98
Çizelge 4.3. Depremlerin üç yönde ayrı ayrı etkitildiğinde, farklı kemer formlarında meydana gelen yer değiştirme değerleri (cm).....	99
Çizelge 4.4. Depremlerin üç yöndeki etkisinde meydana gelen maksimum çekme ve basınç gerilmesi değerleri(kN/m <sup>2</sup> ).....	100
Çizelge 4.5. Performans düzeyleri ile ilgili hesap yöntemleri, gerilme ve şekil değiştirme sınırları (TYİDRYK. 2017).....	101
Çizelge 4.6. Duvarların başlangıç kesme dayanımları fvko (MPa) (TBDY 2018)	103
Çizelge 4.7. Chichi Depremi etkisinde üç kemer formunda taş duvar sistemi kayma güvenliği.....	103
Çizelge 4.8. Kobe Depremi etkisinde üç kemer formunda taş duvar sistemi kayma güvenliği.....	104
Çizelge 4.9. Kocaeli Depremi etkisinde üç kemer formunda taş duvar sistemi kayma güvenliği.....	104



## 1. GİRİŞ

Köprüler insanlık tarihi boyunca hep önemini korumuş yapılardandır. Köprüler bakımından önemli bir yere sahip olan Anadolu coğrafyası da birçok medeniyete ve imparatorluğa ev sahipliği yapmıştır. Bu yüzden de hem önemli ticaret yollarını hem de geçiş güzergahlarını içinde barındırmıştır. Bu yol güzergahları üzerinde geçilmesi zor olan bölgeler veya vadiler gibi birçok yerde köprüler inşa edilmiştir.

Farklı dönemlerde inşa edilmiş olan köprülerin kullanım ve yapım amaçların da farklılıklar olduğu bilinmektedir. Bunlardan bazıları nehirleri, dereleri vb. sulak arazileri geçmek amacıyla inşa edilmişlerdir. Yerleşik hayata geçilen bazı dönemlerde ise yayaların ulaşımı için bazen de tarım arazilerine ulaşmada hayatı kolaylaştırmışlardır. Ticari amaçla yol geçiş güzergahlarında yapılmış olanlar ise kervansaray görevi üstlendiği görülmektedir. Roma, Bizans, Selçuklu, Osmanlı ve Erken Cumhuriyet Döneminde yapılmış olan köprüler kendi dönemlerine ve yapıldıkları yerin özelliklerine göre farklı malzemelerle inşa edilmişlerdir. Bazı dönemler de kesme taş, bazı dönemlerde ise moloz taş gibi farklı tip taşlarla inşa edilmişlerdir.

Bu köprüler farklı dönem veya imparatorluklara göre farklı malzemeler ve yapım teknikleriyle inşa edilmişlerdir. Köprülerin inşa edildiği ilk örneklerde, kullanılan malzemeler yaygın olarak kerpiç, tuğla, ahşap ve taş malzemesidir. Ahşap olarak inşa edilen köprüler diğerlerine göre az olmasının nedeni ise, her yerde yapı malzemesi olarak bulunamamasından veya ahşabın, dış ortamda bulunduğu bölgeye göre kullanılmasında yeterince dayanıklı olmamasından kaynaklanmaktadır. Kerpiç olarak inşa edilenlerde ise, kerpiç malzemesinin dayanımının düşük olması, köprü yapımında yeterince kullanılmaması sonucunu doğurmuştur. Bu yüzden tuğla veya taş malzemesi ile inşa edilmiş olan köprüler yaygın durumda olmuşlardır. Taş malzemesinin ve tuğla malzemesinin özellikleri gereği yapıları gevrek, basınç dayanımları ise yüksektir. Yine bu malzemelere ait çekme dayanımları ise düşüktür.

Köprüler, yapıldıkları yerin jeolojik özelliklerine ve geçilecek açıklığa göre taş veya tuğla malzemesi tercih edilmiştir. Tercih edilen taş veya tuğlanın özelliklerinden çekme

dayanımları düşük olduğundan çekme gerilmelerini tek başına karşılaması beklenememektedir. Bu da insanoğlunun yeni köprü modeli, formu olan kemer formunun geliştirmesine ve köprüler de kullanmasını sağlamıştır. Bu durum, daha sonra farklı kemer geometrisinde köprülerin inşa edilmesini sağlamıştır. Kemer geometrisi değişikçe köprülerin dış etkilere karşı dayanım ve davranışlarında değişiklikler meydana gelmiştir. Kemerler, günümüzde de yaygın olarak yapılarda, kemer barajlarda, ticari yapılarda ve endüstriyel binalarda kullanılmakta olan, estetik özelliğe sahip taşıyıcı yapı elemanlarındandır.

Bu tez çalışmasında, geçmiş dönemlerde inşa edilmiş olan tarihi taş köprülerden Anadolu' da ki yol güzergahları, yapıldığı dönemler, yapı elemanları, yapım sistemleri, köprülerdeki kemer yapılarının davranışlarıyla ilgili bilgiler derlenmiştir. Kemer geometrisi konusunda araştırma yapabilmek için Bursa İli Nilüfer İlçesi Mudanya yolu üzerinde 1881/82-1885/86 senelerinde Bursa Valisi olan Mehmed Nazif Paşa tarafından yılında inşa ettirilmiş olan geçmişte yaya ve taşıma araçlarının geçişi için kullanılan, günümüzde ise motorlu taşıt yolu olarak kullanılan Tarihi Geçit Köprüsü hakkında bilgiler verilmiştir. Köprü gerçeğe en uygun şekilde SAP2000 programında sonlu elemanlar metodu yöntemi ile önce mevcut kemer formu olan tek açıklıkta basık kemer formunda modellenmiş, daha sonra dairesel ve sivri kemer formunda ayrı ayrı tekrar modellenmiştir. Köprü modellerine dünyanın farklı bölgelerinde 2000 yılı öncesinde meydana gelmiş olan, 1995 Kobe, 1999 Kocaeli ve 1999 Chichi depremlerine ait veriler modele etki ettirilerek, köprünün üç farklı kemer formunda statik olarak analiz edilmiş ve dinamik davranışları incelenmiştir. Bu modellerle, köprüye ait davranışlar incelenmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmasına dair bilgiler sunulmuştur.

## **1.1. Amaç**

Bu çalışmada, Anadolu coğrafyasında bulunan tarihi taş köprülerin yapımında hangi medeniyetlerin öncülük ettiği, bu köprülerin yapımında hangi metot ve yöntemlerin kullanıldığı, yapım aşamalarında kullanılan malzeme özellikleriyle, nereye ait oldukları anlatılmıştır. Bu köprülerin güzergahları, hangi dönemde ne amaçla yapıldıkları incelenmiştir. Köprülerdeki farklı kemer geometrisi formlarına konu indirgenerek detaylandırılmıştır.

Geçmiş dönemler de inşa edilmiş olan köprülerden Bursa İli Mudanya yolu üzerinde 19. yy. sonlarında yapılmış Geçit Köprüsüne ait dokümanlar derlenmiş, KGM' den elde edilen köprü ile ilgili bilgiler incelenmiştir. Bununla beraber köprü yapıldığı kemer formunda analiz edilerek, kemer yüksekliği, köprü genişlikleri ve yükseklikleri aynı tutularak sonlu elemanlar metoduyla modellenmiştir. Bu modellemede, köprü kemer formlarında diğer parametreler sabit tutularak, kemer geometrisinde sivri kemer, basık kemer, dairesel kemer olmak üzere üç farklı formda modellenerek bu köprülere ait statik analizi yapılmış daha sonra üç kemer formuna Kocaeli, Kobe ve Chichi depremlerine ait veriler tanımlanarak köprülerde oluşan gerilme, yer değiştirmelerin karşılaştırılması ve kayma güvenliklerinin kontrolleri amaçlanmıştır.

## **1.2. Kapsam**

Bu araştırma kapsamında, ülkemizdeki tarihsel süreçte farklı dönemlere ait yapılmış olan tarihi taş köprüler hakkında genel bilgileri ve bu köprülere ait farklı imparatorluk dönemlerinde, yapım tekniklerinin yer ve zamana göre nasıl değişiklikler gösterdiğinin araştırılmasını kapsamaktadır.

Bursa İli özelinde yığma taş kâgir olarak yapılmış olan Tarihi Geçit Köprüsünün mevcut basık kemer formunda gerçeğe en yakın şekilde modellenmesi, buna ilave olarak köprüünün sivri ve dairesel kemer formundaki davranışları, bu kemer formlarındaki modellere daha önce dünyanın farklı yerlerinde meydana gelmiş olan 1995 yılı Kobe, 1999 yılındaki Chichi ve 1999 yılı Kocaeli depremlerinin verileri tanımlanarak köprü

modellerindeki yer değiştirmeler ve gerilmelerin incelenmesini ve elde edilen verilerin birbirleriyle karşılaştırılmasını kapsamaktadır.

### **1.3.Araştırmanın Yöntemi**

Bu araştırma konusuyla ilgili olarak, ulusal ve uluslararası birçok makale ve çalışma incelenmiştir. Araştırması yapılan Tarihi Geçit Köprüsü hakkında KGM Bursa Bölge Müdürlüğü Sanat Yapıları Dairesi Tarihi Köprüler şubesi Müdürlüğü arşivi ile Bursa Büyükşehir Belediyesi Tarihi Yapılar arşivleri incelenmiş, bahse konu köprü hakkında araştırmalar yapılarak köprüye ait tüm bilgiler derlenmiştir.

Tarihi köprüler konusunda yapılmış olan tez, makale ve çalışmalar incelenerek kaynak araştırmaları yapılmıştır. Bu köprülerin kemer geometrileri konusunda çalışma daraltılarak incelenmiş, araştırması yapılan Geçit Köprüsünün raporları, tarihi geçmişiyle ortaya konmuştur. Buna ilave olarak farklı kemer formlarında hem sabit ve hareketli yükler altında statik olarak, hem de köprüye üç farklı depreme ait deprem yükleri tanımlanarak dinamik olarak analiz edilmiştir. Bu yükler altında köprü modellerinde oluşan gerilme ve şekil değiştirmeler ile kayma güvenlikleri kontrol edilmiş, frekansları incelenmiştir. Bunun sonucunda elde edilen köprüde meydana gelen davranışlar incelenerek tüm veriler birbiriyle karşılaştırılmıştır. Yapılan incelemeler kemer tiplerinin karşılaştırılması şeklinde olup malzeme parametreleri deneysel yollarla elde edilemediği için verilen deplasman ve gerilme değerleri kesin sonuçlar değildir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Ahunbay (1988) Mimar Sinan Yapılarında Kullanılan Yapım Teknikleri ve Malzeme adlı çalışmasında, Osmanlı döneminin mimari birikimiyle Mimar Sinan'ın da yaşamış olduğu ve etkilenecek geliştirdiği dönem hakkında bilgilerin yanında, Mimar Sinan yapılarında kullanılan taş, tuğla veya ahşap malzemeler, bağlantılarda tercih edilen kireç ile horasan harcı, kenetlemedeki çivi, zıvanalar hakkında bilgiler içermektedir. Günümüze gelmiş olan yapılarının özelliklerini genel itibariyle anlatmaktadır.

Çulpan (2002) Türk Taş Köprüleri Ortaçağdan Osmanlı Devri Sonuna Kadar isimli çalışmasında, eski dönemlerde inşa edilmiş olan taş köprülerin genel özellikleri, yapı elemanları ve bununla birlikte tanımlarını içermektedir. Bu verilerle alakalı arşiv bilgisine ulaşılabilen köprü mimarları hakkında giriş bölümünde yer vermiştir. Hitit döneminde inşa edilen köprülerden Osmanlı'nın son dönemine kadar birçok köprü hakkında ölçüleri, genel özellikleri, şu anki mevcut durumları, geçirdiği onarım ve restorasyonlar hakkında detaylıca inceleme yaptığı çalışmasını kronolojik olarak düzenlemiştir.

Troyano (2003) Bridge Engineering A Global Perspective adlı çalışmasında, köprülerle ilgili genel bilgilerin yanında, köprülerin sağladığı yararlar, köprü türlerinin tarihsel olarak değişimi, tarihi köprülerde restorasyon çalışmalarının nasıl yapılması gerektiğini konularını tarihsel süreç içerisinde farklı medeniyetlere ve dönemlere ait köprü örnekleri hakkında derlemiş olduğu köprüler hakkında yapılmış olan bilgi kaynaklarından bir tanesidir.

Macaulay (2003) Mosque isimli çalışmasında, 16. yüzyılın sonlarında Türkiye'de cami inşa etmek için kullanılmış olan yöntem ve malzemeleri ortaya koymaktadır. Sadece anıtsal yapıların nasıl inşa edildiğini değil, aynı zamanda hizmet ettikleri topluma göre nasıl işlev gördüklerini de anlatmaktadır.

Block (2005) Equilibrium Systems: Studies In Masonry Structure isimli çalışmasında, yığma yapılar için limit durum analizine dayalı yeni etkileşimli hesaplamalı analiz araçları sunmaktadır. İtme çizgilerinin ne amaçla kullanıldığını, çökme mekanizması

analizleri yapılırken, kinematik ve statik analizlerin birleştirilerek yapıldığı, karmaşık üç boyutlu problemlerin hangi yöntemler kullanılarak analiz edileceğine dair birçok bilginin derlendiği çalışmadır.

Arun (2006) *Behaviour of Masonry Vaults and Domes: Geometrical Considerations* isimli çalışmasında, taş ve tuğla malzemeleriyle inşa edilen tarihi yapılarda kullanılan formlar, dikey destekler ve çevreleyen duvarlar arasındaki açıklık, çeşitli profil ve yüzeylerin kemerleri, tonozları ve kubbelerin özellikleriyle, bu formların geometrisi ve kuvvet dağılımlarının ne gibi özelliklere sahip olduğu hakkında bilgilerin derlendiği çalışmalardandır.

Alaboz (2008) *Mimar Sinan Köprülerinin Güncel Durum Değerlendirmesi ve Kapuağası Köprüsü Restorasyon Projesi* adlı çalışmada, yapım amacı ve yapıları gereği iki ayrı yakayı birbirine bağlayan köprüleri araştırdığı yayınında, Osmanlı dönemi Mimar Sinan'ın eserlerinden, Marmara bölgesinde inşa edilmiş olan tarihi köprüler hakkında çalışma yürütülmüştür. Yapılarda oluşan dış etkenlere bağlı olarak gelişen hasarlar sebep ve sonuçlarıyla araştırılmıştır. Bu yapılara ait inşa teknikleri ve mevcut durumları hakkında bilgilerin derlendiği çalışmalardandır.

Sert ve arkadaşlarının (2012) *Tarihi Köprüler* isimli çalışması, 2009 yılında yayınlanan Karayolları Genel Müdürlüğü'nün koordinesinde gerçekleştirilen eğitimler sonucunda ortaya çıkan kitabın özetidir. Bu yayınlar arasındaki süre de yapılan araştırma ve çalışmalarda bu yayına ilave edilmiş olan tarihi köprülere ait bilgilerin verildiği kaynaklardandır.

Halifeoğlu ve arkadaşlarının (2013) *Tarihi Kurt Köprüsü (Mihraplı köprü, Vezirköprü) restorasyonu proje ve uygulama çalışmaları* isimli araştırma çalışmalarında, geçmiş dönemlerden günümüze kadar yapılmış olan tarihi yol güzergahları, Selçuklu döneminde inşa edilen Tarihi Kurt Köprüsü'nün yeri, tarihçesi, köprüye ait malzeme özellikleri, mimari yapısı, taşıyıcı sitemiyle birlikte köprü'nün restorasyon çalışmaları hakkında bilgileri içermektedir. Kemer formu oluşturulurken ahşap malzemesinin kullanıldığı, taş ve tuğlanın da bir arada tercih edildiği bir köprüdür. Yapılmış olan restorasyon

uygulamalarında köprülerde kullanılan malzeme özelliklerinin özgün olarak, en az müdahale ve yapım sistemlerinin korunarak yaşatılması gerektiği çalışma kapsamında ele alınmıştır.

Barow (2013) *Roads and Bridges of the Roman Empire* isimli eseri, geçmiş dönemlerden Roma dönemindeki inşa edilen yol ve köprülerle ilgili olarak yapım süreçleri, yapımda tercih edilen malzemeleri çizimler yardımıyla anlatıldığı eserlerdendir. Taşların tedariki ve inşaat sahasında hazırlanmasıyla birlikte işlenmesi, kullanılan ölçü aletleri, kemer inşası, temel kazık sistemine ait detayları kapsayacak şekilde, geniş çaplı tarihi köprüler hakkında bilgi kaynağıdır.

Tanyeli (2017) *Hiçbir Üstad Böyle Kar Etmemiştir; Osmanlı İnşaat Teknolojisi Tarihi* isimli çalışmada, Osmanlı dönemine ait inşa edilen yığma taş yapıların yapım teknikleri ve bu inşa tekniklerinin zamana göre değişimlerine değinilmiştir. Daha öncede araştırmış ve yayınlamış olduğu eserlerin de birikimiyle bu çalışmasında yapmış olduğu diğer çalışma ve kaynaklardan da bahsetmektedir. Osmanlı döneminde inşa edilecek yapıların öncesinde yapılacak olan planlama ve ölçümlerde izlenen yolun neler olduğu, kullanılacak olan malzemenin temininin nasıl sağlandığı, hangi malzemelerin kullanıldığı, temelin inşası dahil ve köprüye ait yapıların nasıl yapıldığıyla ilgili bilgileri içermektedir.

Cevahir (2019) *Tarihi Taş Köprülerin Yapım Teknikleri ve Malzeme Kullanımı Açısından İncelenmesi* isimli çalışma, geçmiş dönemlerde Roma döneminden Osmanlı'nın son yıllarına kadar inşa edilen tarihi taş köprülerin tarihsel süreçleriyle beraber yapım teknikleri, malzeme ve yapısal özellikleri daha önce yapılmış olan köprülerden örneklerle kronolojik olarak incelendiği çalışmadır.

### **3. MATERYAL ve YÖNTEM**

Bu tez çalışmasında, Anadolu coğrafyasında inşa edilmiş olan tarihi taş köprüler materyal olarak ele alınmıştır. İnşa edilen köprüler hakkında genel bilgiler daha önce yapılmış olan çalışmalar incelenerek derlenmiştir. Köprülerin yapım teknolojileri, malzeme tercihleri ve yapıldıkları dönemin koşullarında hangi metotlarla inşa edildikleri ile yapıldığı dönemin yöntemleri incelenerek detaylandırılmıştır. Anadolu coğrafyasındaki medeniyetlerin köprüleri hangi amaçla inşa ettikleri, ne gibi yöntemlere yoğunlaştığı tablolarla anlatılmaya çalışılmıştır.

Yapı olarak, Bursa İli Nilüfer Çayı üzerindeki 19 yy. da inşası tamamlanan Geçit Köprüsünün tarihi geçmişi ve özellikleri anlatılmaya çalışılmıştır. Köprülerin kemer geometrisine konu indirgenerek detaylandırılmıştır. Bu yaklaşımla köprü sonlu elemanlar metodu yöntemi ile SAP2000 programında üç farklı kemer geometrisinde modellenerek statik olarak analiz edilmiştir. Buna ilave olarak, 1995 yılı Kobe bölgelerde meydana gelmiş olan üç ayrı depreme ait veriler alınarak köprünün farklı kemer formlarında dinamik davranışları incelenerek birbirleriyle karşılaştırılması yöntem olarak belirlenmiştir. Yapılan incelemeler kemer tiplerinin karşılaştırılması şeklinde olup malzeme parametreleri deneysel yollarla elde edilemediği için verilen deplasman ve gerilme değerleri kesin sonuçlar değildir.

#### **3.1. Tarihi Köprüler ve Yol Ağlarıyla Geçiş Güzergahları**

Anadolu, geçmişten günümüze çeşitli nitelik ve yönlerde bir yol ağına sahiptir. Coğrafi koşullar tarafından belirlenen bu güzergâhlar üzerinde topografya değişmediği sürece cadde ve geçitlerin yönünün farklılaşmadığı görülmektedir (Sert ve ark. 2009).

Romalılara kadar yol ağı mevsimsel koşullar izin verdiği sürece kullanılabilmesi mümkün olmuştur. İlk defa bu dönemde yollara düzenli blok taşların döşendiği ve Romalıların uygun yerlere köprüler kurdukları görülmektedir. Bu sayede yollar her dönem kullanılabilmiştir. Romalılar yol güzergâhları boyunca sosyal ve askeri yapılar inşa ederek iskân politikaları uygulamışlardır. Bizans döneminde de aynı yapılaşma

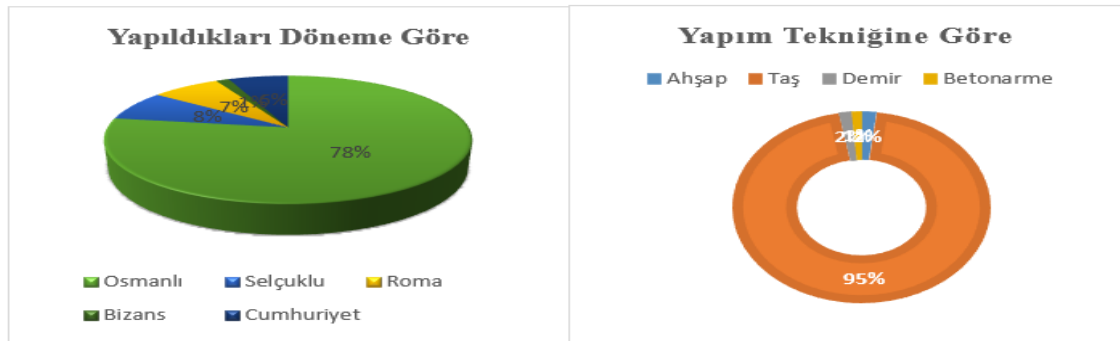


modeli devam edilmiş, Selçuklu ve Osmanlı İmparatorlukları dönemlerinde aynı yapı kullanılmış hatta daha da geliştirildiği görülmektedir (İlter 1995, Ortaylı 2007, Halifeoğlu ve ark. 2013). Aşağıdaki Şekil 3.1’de, Hitit medeniyeti dönemi başlangıcından Cumhuriyet dönemine kadar köprülerin ve yol ağlarının tarihsel olarak dağılımı gösterilmektedir.



**Şekil 3.1.** Tarihi köprülerin bulunduğu yol ağ ve güzergahlarının dönemlere göre dağılımı (Sert ve ark. 2013)

Şekil 3.2' de görüldüğü gibi, Türkiye'de yer alan köprülerin %74,45'i (1626 adet) Osmanlı İmparatorluğu, %7,33'ü (160 adet) Selçuklu İmparatorluğu, %6,96'sı (152 adet) Roma İmparatorluğu, %1,32'si (29 adet) Doğu Roma İmparatorluğu (Bizans) ve %5,34'ü (133 adet) Cumhuriyet dönemi, %3,07'si (67 adet) diğer dönemler (Hitit, Urartu, Ceneviz, Rum-Pontus, Rus, İtalya, Fransız), %0,78'i (67 adet) çeşitli dönemler (Roma + Selçuklu + Osmanlı) olan köprüler olup; %94,46'sı (2063 adet) taş kemer, %1,88'i (41 adet) ahşap, %1,56'sı (34 adet) demir ve %2.10'u (46 adet) betonarme bowstring' tir.

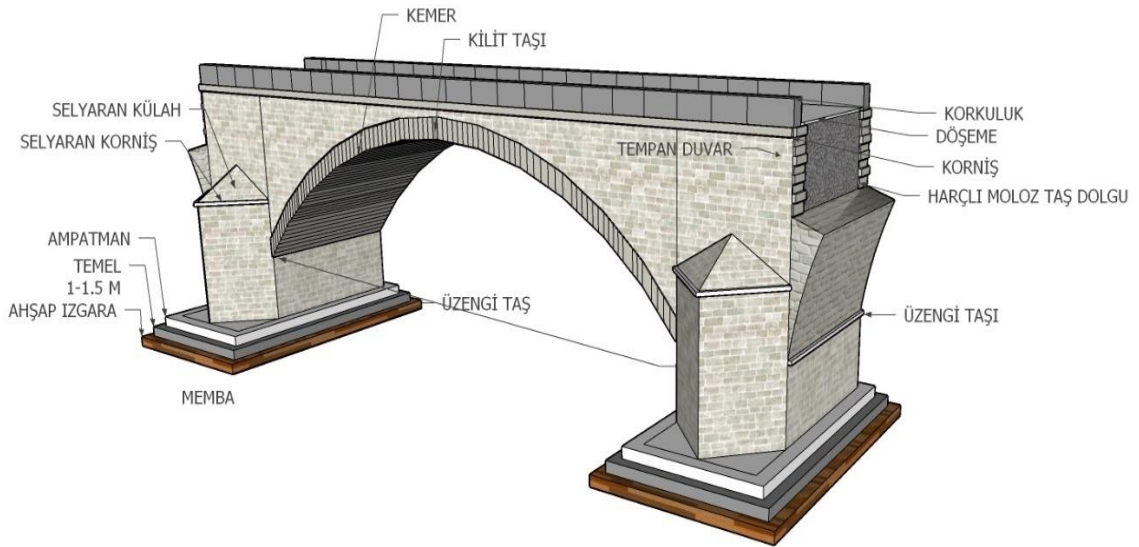


**Şekil 3.2.** Envanterde kayıtlı olan 2184 adet tarihi köprünün dönemlerine ve yapım tekniğine göre dağılımı (Sert ve ark. 2013)

## 3.2. Taş Köprülerin Malzeme Özellikleri ve Yapım Teknikleri

### 3.2.1. Tarihi taş köprülerde tercih edilen yapı elemanları

Bugün var olup günümüze kadar gelmiş olan tarihi köprülerin birçoğu taş malzemesi ile inşa edilmiştir. Taş yapı malzemesi olarak ele alındığında dayanıklı bir malzemedir. Taş köprüleri oluşturan ana taşıyıcı elemanlar; temel, kılıf duvarlar, kemer ve döşemelerdir. Bir köprüde bulunan taşıyıcı elemanlar haricinde, korniş, korkuluk, selyaran ile diğer elemanlardan üzenği taşı, kilit taşı gibi yapı elemanları Şekil 3.3' de görülmektedir (Sert ve ark. 2009).



Şekil 3.3. Tarihi köprü üzerinde gösterilen taş köprülere ait tanımlar

### 3.2.2. Temel yapım sistemleri

Üst yapı ile doğal zemin arasındaki ilişkiyi oluşturan temel, yapının sağlamlığı için çok önem arz etmektedir. Fakat zemin özelliklerinin belirsizliği nedeniyle çözülmesi en zor yapı elemanıdır. Çoğu durumda zemin özellikleri kontrol edilemediği için antik çağlardan modern zamanlara kadar yapay toprak katmanları üzerine inşa edilmiştir. (Troyano 2003).

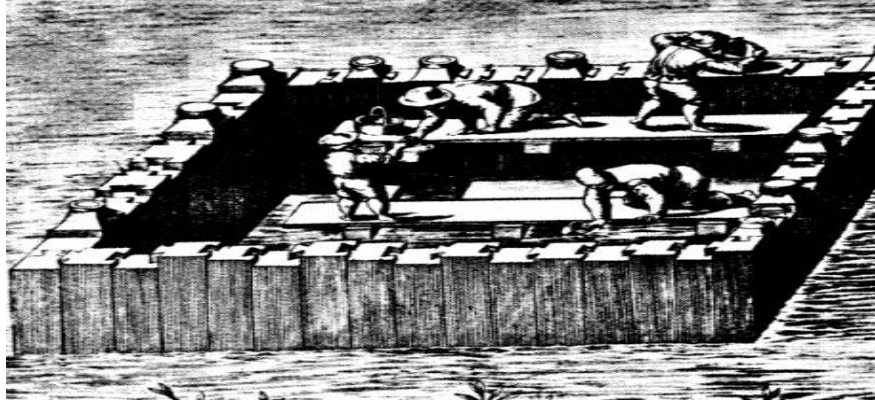
Uygun bir oturma sağlamak için doğal durum değiştirilmeye çalışılmış, bazen vadiler doldurulmuş ve bazen ise tepeler kaldırılmıştır. Flavian döneminde önemli yapılar

yükseltilmiş bir şekilde inşa etmek sıkça tercih edilmiştir. Liman, su kemeri, yol, köprü, vb. gibi yapıların temellerinin yapımı esnasında tercih edilen batırma yöntemiyle inşa edilen temellerin tercih edildiği bilinmektedir. Esquiline Wing of the Domus Aurea yapısı, Roma betonunun kalın olan bir tabakasının üzerinde konumlanmıştır. Trajan Market'i tonoz biçimindeki terasların üst kısmına yapılmıştır. Pantheon, dairesel şekilde beton kütlelerin üzerine konumlanmaktadır. Bu yapılar inşa edilirken alınan önlemlerden dolayı olarak yapılarda oturmalar meydana gelmemiştir. Temeller dışarıdan gelebilecek etkilere karşı, deprem gibi her türlü yatay yönlü kuvvetlere dayanıklı şekilde inşa edilmişlerdir (Macdonald 1986).

Temel yapımının önemine vurgu yapan Vitruvius, duvarların ve kulelerin temelleri için öncelikle sağlam bir zemin elde edilene kadar derin bir kuyu kazılması gerektiğini, daha sonra ise yapıdaki yükleri sağlam şekilde taşıyabilmesi için yapıdan daha geniş kesitli temellerin yapılması gerektiğini vurgulamıştır. Bu temellerin inşası sırasında düzgün yüzeyli taşlar veya moloz taşlarla kireç harcının kullanılması tavsiye edilmektedir. Sert zeminin ulaşılamadığı, gevşek toprak ya da sulak alanların olduğu yerlerde yanık kızılağaç, meşe ya da zeytin ağacından kazıkların kullanılması gerektiğini belirtilmiştir. Köprülerin ayaklarında daha sık bu tür kazıklardan tercih edilmesi ve mümkün olduğu kadar derinlere inilerek kazıkların çakılması, aralarının ise kömür malzemesiyle doldurulması gerektiği önerilmektedir (Vitruvius 1998).

Geleneksel olan yapı malzemeleri kullanılarak tek seferde geçilebilen açıklıklar, günümüzde modern şekilde üretilen malzeme ve tekniklerle geçilen açıklıklardan daha az olduğu düşünülürse geniş akarsuların bulunduğu yerlerin geçilebilmesi için, akarsu içinde temellere ayakların oturtulması gerekmektedir. Köprünün temelini su altında inşa etmek için çeşitli teknikler kullanılır. Köprü inşaatı ile uğraşanlara ek olarak, sadece temel inşaatında uzman kişilere ihtiyaç duyulmaktadır. En yaygın olarak kullanılan akarsu içinde ayak oluşturma teknikleri; kazık çakma, batardo ile suyun o alanda kesilerek boşaltılması veya istenilen derinliğe ulaşılması için keson tekniği kullanılmasıdır. Bu alanlarda ahşap kazıkların kullanılmasının amacı, yapısal yükleri elastik mesnetler gibi davranarak zemine aktarmasıdır. Ahşap levhaların birbirine paralel bir şekilde iki sıra halinde zemine monte edilerek çakıldığı Batardo sisteminde, suyun geçişi olarak

kesilecek şekilde iki levha arası kil malzemesiyle doldurulmaktadır. Bundan sonra sistemin içinde kalan su o dönem kullanılan tulumba gibi malzemelerle ortamdan uzaklaştırılmaktadır (Şekil 3.4) (Troyano 2003).



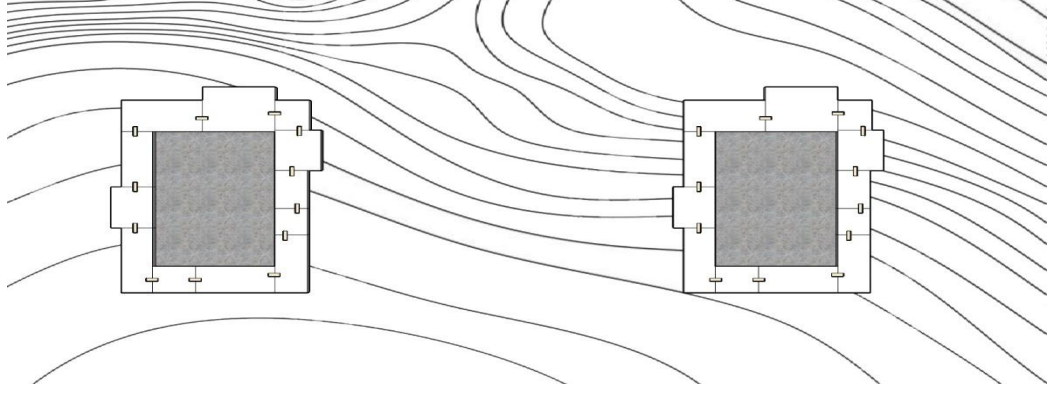
**Şekil 3.4.** Batardo tekniği yardımıyla temel çukurunun açılmasına ait görsel (Alaboz 2008)

Mimar Sinan'ın temel yapımına özen gösterdiği bilinmektedir. Bu konuda Tuhfet-ül Mimarın adlı eserde; Osmanlı yapılarında, tekil veya sürekli temeller kullanıldığı görülmektedir. Bazı inşa edilmiş olan yapıların temellerinde kademeli şekilde ampattan olduğu gözlemlenmektedir. Temelin genişliği ve derinliği, yapıdan gelen yüke bağlı olarak değişmektedir. Temeller, ızgara şeklinde yerleştirilmiş olan ahşap kirişler yardımıyla güçlendirilmiş 0,2 m kalınlığındaki horasan harcı tabakası üzerine oturmaktadır. Temeller dört basamaklı şekilde yükselmekte olup, horasan harcıyla bağlanmış taş ile örülü şekilde yapılmıştır (Ahunbay 1988).

Su kemerleri ve köprü ayaklarının zeminine kazıklar çakılmakta, bu çakılan kazıkların üzerine ayaklar inşa edilmektedir. Tezkiret-ül Bünyan'da, Mimar Sinan'ın Büyükçekmece Köprüsü'nü denizin sığ olan tarafında yapıldığı belirtilmektedir. Köprü ayaklarının oturduğu yer batardo ile çevrilmiş, oradaki su tahliye edilmiş ve kazıklar çakılarak taş bloklar örülmüştür. Taş bloklar metal kenetler yardımıyla kurşun akıtılarak birbiriyle bağlantısı sağlanmıştır. Zemine çakılan kazıkların boyları oldukça fazla olduğu bilinmektedir (Ahunbay 1988).

Saraybosna' da Neretva Nehrinde inşa edilen Konjic Köprüsü temelinde, genellikle ahşap kazıkların zemine çakıldığı durumların aksine, farklı teknikte ahşabın tercih edildiğine

rastlanılmıştır. Köprüde bulunan orta ayak temeli, ızgara şeklinde iki-üç sıra halinde olan ahşap ızgaralar üzerine inşa edilmiştir. Her sırada, 20x20 cm veya 30x30 cm kesit alanına sahip ahşaplar kullanıldığı görülmektedir. Kazık ahşapların boyları 5-11 m arasında değiştiği görülmektedir (Sert ve ark. 2009) (şekil 3.5).



**şekil 3.5.** Köprü ayaklarının oturduğu temel görseli

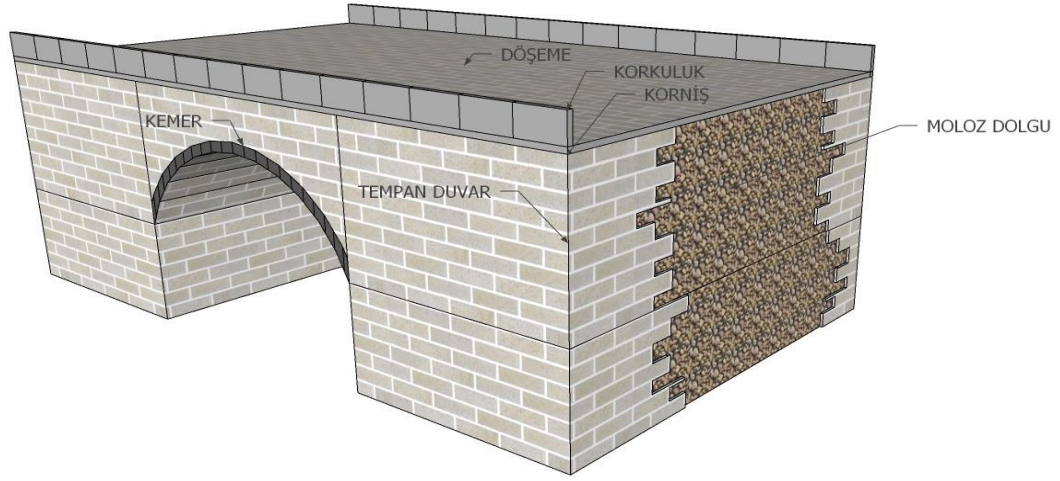
Ahşap ızgaralar birbirine metal kenetler yardımıyla sabitlenmiş 30-35 cm yüksekliğinde taşların üzerine konulmaktadır. Bu sayede, zeminden gelebilecek deprem yükünü sönümleyerek, sismik izolatör görevi görecek şekilde elastik temeller oluşturulmuştur (Sert ve ark. 2009) (şekil 3.6).



**şekil 3.6.** Konjic Köprüsü inşa edilirken temel kısmında kullanılan ahşap ızgara görseli (Sert ve ark. 2009)

### 3.2.3. Tempan (kılıf) duvar sistemleri

Tempan (kılıf) duvar, köprü gövdesini memba ve mansaptan sınırlayan taşıyıcı bir duvardır. Köprünün inşa edildiği bölgenin özelliğine bağlı olarak kesme taş, kaba ya da moloz taştan yapılabilmektedir. Roma dönemindeki köprülerde tempan duvarlar inşa edilirken büyük ebatlarda blok taşlardan yararlanılmıştır. Taşların kesilerek form oluşturulabilmesi zor olduğu için, çok sert yapıdaki taşların yerine mermer cinsinden veya traverten yapıdaki mermerler yapılarda tercih edilmiştir. Taşlar arasında çok az miktarda derz olduğu, kullanılan iç dolgu harçlarıyla görülmektedir. Tempan duvar görseli Şekil 3.7’ de görülmektedir (Cevahir 2019).



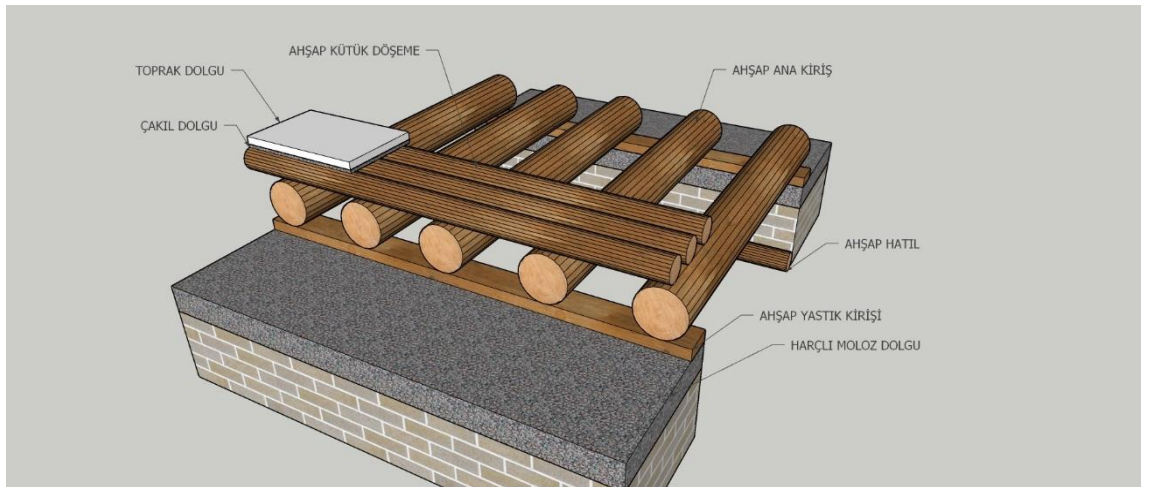
Şekil 3.7. Tarihi taş köprülerdeki tempan duvar kesiti

Osmanlı döneminde yapılmış olan köprüler, Selçuklular döneminde yapılan köprülere göre daha sade şekilde inşa edilmiş olan köprülerdir. Fakat Osmanlı döneminde yapılmış olan bazı köprülerin ise diğerlerinden farklı olduğu görülmektedir. Bu köprülerde balkon, odacık gibi bölmeler yapılmıştır. Bu bölümler seyir amacıyla, dinlenme amacıyla hem de seferlerde geçecek olan askeri birlikleri denetlemek ve sayılarını belirlemek amacıyla kullanılmışlardır. Köprü ayaklarının içine yapılmış olan odacıklar ise, hem ayaklara etki edecek olan yükü hafifletmek için hem de köprü muhafızları ve görevlilerle beraber geçecek yolcuların barınabilmesi için yapılmıştır (Çulpan 2002).

Anadolu coğrafyasında inşa edilen köprülerde genellikle taş kullanılırken, bazı köprülerde ise geleneksel olarak veya yapıldığı yöreye ait malzeme alışkanlıkları nedeniyle taş malzemesinin yanında tuğla da tercih edilmiştir. Roma, Selçuklu ve Osmanlı Dönemlerinde yapılmış olan köprülerde de bu kullanıma rastlanılmaktadır. Bu şekilde yapılmış olan köprülerde tuğla malzemesi birçok farklı bölümde kullanılmıştır. Bu malzeme bazı köprülerde kemer oluşumunda, bazı köprüler de ise köprüye ait farklı yapı elemanı olarak tercih edilmiştir. Taşıyıcı nitelikteki kemerlerin yapımında, tempan duvar örgüsü, kemer içi ve köprü gövdesinde bulunan odacıkların tonoz örgüsü oluşturulurken kullanıldığı görülmektedir.

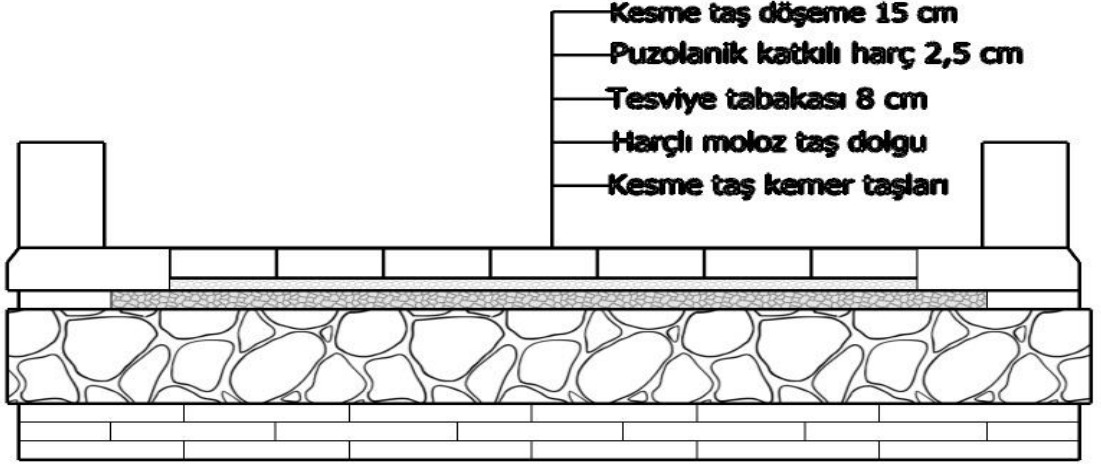
### 3.2.4. Döşeme yapım sistemleri

Döşeme sistemleri, üzerinden hayvanların, araçların ve insanların geçtiği köprünün bir diğer ana taşıyıcı elemanlarından biridir. Döşemelerde, kaba, kesme taş, moloz taş (dere taşı) vb. malzeme kullanımları gözlenmektedir. Köprülerde, dış etkilerin en fazla zarar verdiği ve en çok aşındırdığı bölüm döşeme kısımlarıdır. Bu yüzden en az aşınma yüzdesine sahip olan taşlar tercih edilmelidir. Dayanımı yüksek taşların döşeme oluşturulurken tercih edilmesi, döşeme yüzeyin de oluşacak aşınmayı engellemekte olup, bu durum da köprü yüzeyinin uzun süre kullanımına imkân tanımaktadır. Planlanan uygulamalarda minimum 15cm. kalınlığında, yüzeyi mümkün olduğu kadar düzgün taşlar tercih edilmelidir. Döşeme kalıp sistemleri Şekil 3.8’ de görülmektedir.



Şekil 3.8. Tarihi taş köprülerdeki örnek bir döşeme sistemi

Tarihi taş köprülerde döşeme yapımında, dolgu ve harç ile etkileşime girebilmeleri için döşeme plakalarının alt tarafı girintili olmalıdır. Su tahliyesini sağlamak içinde döşemeye gerekli eğim verilmelidir (Sert ve ark. 2009). Döşeme sistemlerindeki dolgu detayı Şekil 3.9' de mevcuttur.

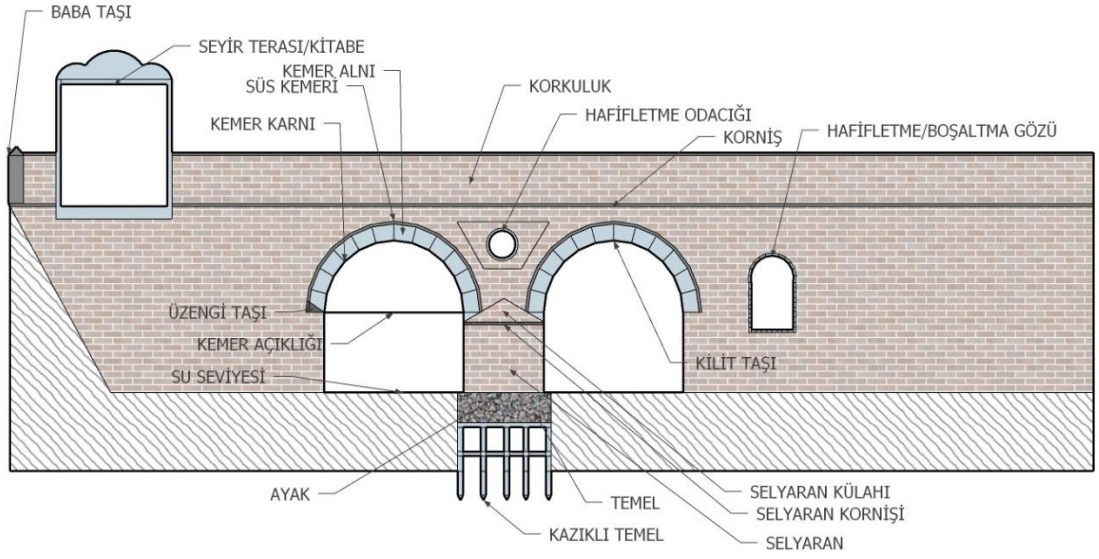


Şekil 3.9. Taş köprülerde döşeme ve dolgu detayı

### 3.2.5. Korkuluk ve kornişlerin yapımı

Köprünün her iki kısmında bulunan, tempan duvarının üzerinde yükselmiş olan ve güvenliği sağlama amacı taşıyan köprü elemanlarına korkuluk denilmektedir. Korkuluklar, köprünün malzemesine göre kesme taş, kaba yonu ya da moloz taştan yapılmaktadırlar. Köprünün her iki cephesinde bulunan, tempan duvarı ile korkuluğu birbirinden ayıran, profilli veya düz çıkıntıya korniş denilmektedir. Genel olarak kesme taş ya da kaba yonudan yapılmaktadırlar. Köprülerin orijinalindeki korkuluk biçimlerini bilmek oldukça güçtür, dış etkilerden dolayı zamanla birçoğu kaybolmaktadır. Günümüze gelebilen örnekler incelendiğinde, genel olarak sade, gösterişsiz ve dikdörtgen kesitlidir; bazı örneklerde ise üst kısımları hafif yuvarlak veya beşikörtüsü şeklinde oldukları görülmektedir (Sert ve ark. 2009). Taş köprülere ait korniş ve korkuluk görseli Şekil 3.10' de mevcuttur.





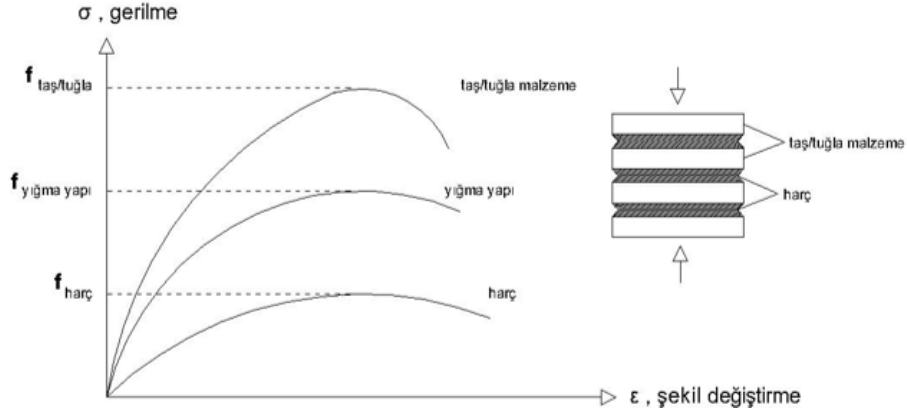
**Şekil 3.10.** Taş köprülerdeki tanımlara ait detaylar

### 3.2.6. Köprü malzemelerinin incelemesi

Yığma yapılar, birbirinden farklı yapı malzemelerinin farklı tekniklerle bir araya getirilerek bir bütün olduğu, davranış özellikleri farklı yapılardır. Bu yapılar basınç dayanımları yüksek taşlar ile bağlayıcılık işlevi gören harçlarla, yatayda ve düşeyde kullanılan metal aparatların birleşiminden oluşmaktadır. Yapıyı meydana getiren malzemelerin, dış etkiler karşısında malzemenin yapısı, boyutu ve kuvvetin yönüne göre farklı davranışları meydana gelmektedir. Taş, yüksek basınç dayanımına sahip bir malzeme olduğu için düşey doğrultudaki kuvvetleri karşılayabilmekte, bağlayıcı harçlar taş malzemeleri bir arada tutmakta, yatay ya da düşey doğrultudaki metal aparatlar ise, meydana gelebilecek çekme kuvvetlerine karşı koyabilmektedir.

Metal kenetlerin haricinde, yığma yapıların kesitinde bulunan veya mesnetleri birbirine bağlamaya yarayan gergi elemanları, yığma yapıların karşılayamadığı yatay yöndeki kuvvetleri karşılamaktadır. Yapı malzemeleri, yapının ağırlığına ve ona uygulanan yüklere dayanacak sağlamlığa ve sertliğe sahip olmalıdır. Yapı malzemesinin yoğunluğu, mukavemetini etkilerken, malzemenin yıllar içerisinde değişen özellikleri de binanın mukavemetine etki etmektedir. Yük altında meydana gelen değişimleri geri dönüşümlü olduğunu gösteren elastisite değeri, yapı malzemelerinin önemli diğer özelliklerindedir.

Yeterli elastisitenin mevcut olmadığı malzemelerde, yük etkisi altında göçmeler veya kırılmalar gözlemlenebilmektedir (Şekil 3.11) (Ünay 1997).



**Şekil 3.11.** Yığma yapının ve yapı malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Ünay 1997).

Genel olarak, yığma yapılarda basınç altındaki malzemelerin basınç yükleri altındaki davranışlarını incelemek, uygun malzeme ve bağlayıcıları belirleyebilmek için çalışmalar yapılmaktadır. Derzlemede kullanılan harç malzemesi, yığma yapıya elastikiyetini vermektedir. Yapının elastik özellikleri, taşların nem oranı, taş yüzeyinin yapısı, harcın yapısı ve sıkıştırılma değerlerinden direkt olarak etkilenmektedir (Ünay 1997).

Yığma yapılarda, yapı elemanlarına ait rijitlik ve dayanım değerlerinin belirlenmesi oldukça zahmetlidir. Yapıdaki elemanların bu özellikleri, yapılan laboratuvar testlerinde yapının genel özelliklerini belirleyebilmek için yeterli olmamaktadır. Çünkü bu değerler kuvvetin türüne bağlı olarak değişmektedir. Mukavemet ve rijitlik değerleri, malzemenin dayanabileceği maksimum gerilmeye karşılık gelen şekil değiştirme miktarının belirlenmesiyle ortaya çıkmaktadır. Malzemenin basınç ve çekme gerilmelerinin etkisi altında gösterdiği şekil değiştirmeler farklı olmaktadır. Malzemelerin gösterdiği davranışları anlayabilmek için, doğrusal olmayan şekil değiştirme-gerilme grafiklerinden faydalanılmaktadır. Malzemelere ait elastisite modülü, grafikteki eğriler sayesinde ortaya çıkmaktadır. Yığma yapılara ait elastisite modülü ise, içerdiği malzemelerin elastisite modülü değerlerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Marta 1991).

## Tarih yapılarında tercih edilen taşların incelenmesi

Yapı malzemesi olarak tercih edilen taş, kolay tedarik edilmesi, işlenebilirliği ve dayanıklılığı nedeniyle tarihi yapılarda tercih edilen birincil malzemelerdendir. Bununla beraber basınç dayanımı yüksek ancak çekme dayanımı düşük olan bir yapı malzemesidir (Erguvanlı ve Ahunbay 1989).

Taş malzemesi, oluşumlarına göre üçe ayrılmaktadır. Birincil kayalar yani igneous, magmanın soğuması sonucunda ortaya çıkmış taşlardır. Soğuma hızıyla birlikte içerisinde bulunan eriyikler, taş malzemesinin yapısını ortaya çıkarmaktadır. Soğuma şekli hızlı gerçekleştiğinde, boşluksuz ve pürüzsüz bir yapıda olmakta, soğuma hızı yavaş şekilde gerçekleştiğinde ise boşluklu ve taneli biçimde olmaktadır. Bu kayalar, kristal yapıya sahiptir. Bilinen en iyi örnekleri obsidyen, bazalt, granit ve felsit olarak gösterilir. İkincil kayalar ise sedimanter kayalardır. Birincil kayaların, kimyasal tepkimeler veya ısı değişimleri yoluyla ayrışması, yığılması ve parçalanması sonucunda ikincil kayalar oluşmaktadır. Su ve rüzgâr gibi dış etkiler taşın katmanlaşmasını sağlar. Bu şekilde oluşan kayalara kireçtaşı ve kumtaşı gösterilmektedir (Erguvanlı ve ark. 1989).

Üçüncü tip olan metamorfik kayalar, sıcaklık ve basıncın etkisi altında volkanik ve sedimanter kayalar arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlarla meydana gelmektedir. Fiziksel ve kimyasal özellikleri, bünyesinde bulunan sedimanter ve volkanik kayaların oranına ve cinsine bağlı olarak değişmektedir (Erguvanlı ve Ahunbay 1989). Farklı taşlara ait kesme, çekme, basınç dayanımları ile Elastisite modülleri Şekil 3.12’de görülmektedir.

TAŞLAR	BASINÇ DAYANIMI (MPa)	KESME DAYANIMI (MPa)	ÇEKME DAYANIMI (MPa)	ELASTİSİTE MODÜLÜ (MPa) x 10 <sup>3</sup>
GRANİT	30 ~ 70	14 ~ 33	4 ~ 7	30 ~ 55
MERMER	25 ~ 65	9 ~ 45	1 ~ 15	25 ~ 70
KİREÇ TAŞI	18 ~ 35	6 ~ 20	2 ~ 6	10 ~ 55
KUMTAŞI	5 ~ 30	2 ~ 10	2 ~ 4	13 ~ 50
KUARSİT	10 ~ 30	3 ~ 10	3 ~ 4	15 ~ 55
SERPANTİN	7 ~ 30	2 ~ 10	6 ~ 11	23 ~ 45

**Şekil 3.12.** Taşlara ait dayanımlar ile elastisite modülü değerleri (Erguvanlı ve Ahunbay 1989)

## Geleneksel harçların incelenmesi

Yapılarda bağlayıcılık amacıyla kullanılan harç malzemesi, agrega, kil gibi farklı granüler malzemelerden ve bu malzemeleri birbirine bağlayan kimyasal özellikli bileşimlerden meydana gelmektedir. Harç malzemesinin kullanılmaya başlama zamanı, toprağın işlenmesiyle olduğu düşünülmektedir. Daha yüksek dayanımlı harçlar elde edilebilmek için, toprak içerisine taş ve farklı kireç malzemeleri ilave edilmiştir. Vitruvius'un "Mimarlık Üzerine On Kitap" adlı eserinde, kum ve kireç malzemesinden yapılmış olan harca, pişmiş, elenmiş ve öğütülmüş toprak oranı 1/3 olan veya buna tuğla malzemesi ilave edildiğinde daha iyi harç elde edilebilmekte olduğu belirtilmiştir (Ahunbay 1988).

Osmanlı yapılarında, Vitruvius'un tarif ettiği gibi, Horasan harcı denilen kireç ve tuğla karışımından oluşan karışımın tercih edildiği görülmektedir. Horasan kelimesi, pişmiş kille beraber, kiremit ve tuğla malzemelerinin öğütülmesi sonucunda meydana gelen malzemeyi ifade etmektedir. Hava kireciyle öğütülmüş malzemenin karışımından ise horasan harcı ortaya çıkmaktadır (Akman ve ark. 1986).

Horasan harcı, bağlayıcı malzemeler arasında geleneksel yapıların yapımında en fazla tercih edilen malzemedir. Harçların onarım için üretilebilmesi açısından bakıldığında, onarımdan önce malzeme özellikleri incelenmelidir. Eski Yunan, Roma ve sonrası dönemlerde inşa edilen yapılarda, harçlar ve sıvalar kireç malzemesi kullanılarak yapılmışlardır. Kireç harcı oluşturulurken içerisine, farklı inorganik ve organik malzemeler agreganın yanında ilave edilmektedir (Böke ve ark. 2004).

Kirecin ana bileşeni kalsiyum karbonattır ( $\text{CaCO}_3$ ). Kalsiyum karbonat ısıtılma tabii tutulup, karbon dioksitten ( $\text{CO}_2$ ) ayrılarak, kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ) meydana gelmektedir. Isıl işlem adı verilen kalsinasyon işlemi sonucu meydana gelen kalsiyum oksit "sönmemiş kireç" olarak adlandırılmaktadır. Sönmüş kireç, havadaki nem veya suyla tepkimeye girerek  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'a dönüşen malzemeye de denilmektedir. Karışım suyunun türü, kireç tanelerinin ebatları, bu malzemelerin karıştırılması, karbonatlaşma sürecinin kalitesi ve süresini etkilemektedir. Harcın özelliklerini ve işlem hızını artırmak için katkı malzemelerinin de kullanıldığı görülmektedir (İpekoğlu ve ark. 2002).

Harç, yığma yapılara ait kesme, basınç ve eğilme dayanımlarını direkt etkilemektedir. Taş veya tuğlalar yapı elemanı olarak harçla bir araya geldiğinde tek bir bütün kütle meydana getirmektedir. Harç tabakasının üstünde iki yönde de gerilme kuvvetleri oluşmaktadır. Bu gerilmeler derz aralıklarına paralel yönde olarak kayma gerilmesi, dik yönde ise çekme ve basınç gerilmeleri olmaktadır. Yapının mukavemetine doğrudan etki eden harç özelliklerine baktığımızda ise, harcın işlenebilirliğine etki eden su/bağlayıcılık oranı, taş yüzeyinin dokusu gibi özellikler ile harcın kompozisyonudur (Ünay 1997).

### **3.3. Taş Kemerli İnşa Edilen Köprülerin Tarihsel Süreçteki Gelişimi**

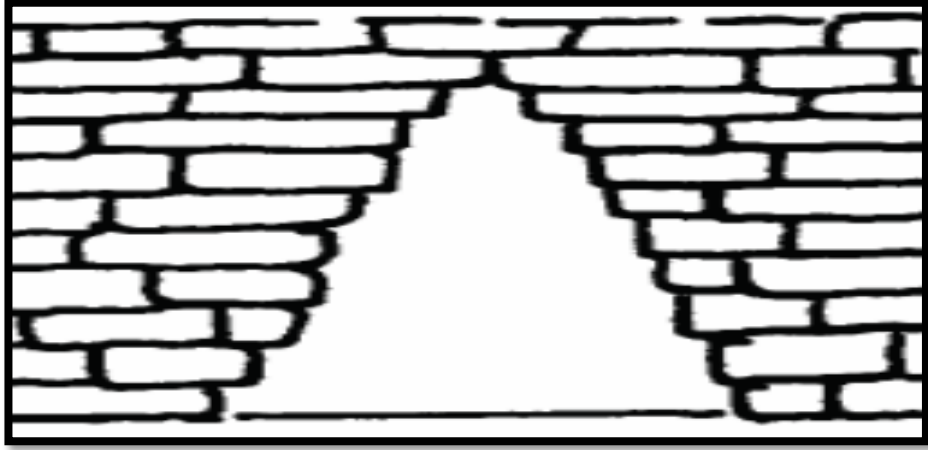
#### **3.3.1. Kemer formunun oluşturulması ve taş köprülerin gelişim süreci**

Köprülerde insan yapısında meydana gelen değişimler gibi zamanla evrilme süreci geçirmişlerdir. Bu durum hala yeni olan teknolojiler ile yeni teknikler sayesinde gelişimine devam etmektedir. Köprülerin inşasında çeşitli teknolojiler ve malzemeler kullanılmaktadır. Gelişimi devam eden her teknik veya teknoloji, malzemede oluşan yenilikler köprüleri de değiştirmişlerdir. Tarihsel süreçte inşa edilen ilk köprüler ahşap olarak yapılan köprülerdir. Bunları dayanımları daha yüksek ve uzun ömürlü olan taş köprülerin inşası takip etmiştir.

Günümüzde hala kullanılan ahşap köprüler var olsa da malzeme özelliklerinden ötürü günümüze kadar gelip dayanabilen, gözlemleyebileceğimiz eski dönemlerdeki yapım teknikleri ile antik şekilde inşa edilmiş olan köprüler görülmemektedir. Taş köprüler ise bu durumun tam tersidir. Günümüzde taş olarak inşa edilmiş, kendi dokusunu ve özelliklerini korumuş, işlevini sürdüren halen daha kullanılabilen bu tipte köprüler bulunmaktadır. Taş köprülerde, kemer formu ortaya çıkarılıncaya kadar yalancı kemer diye de tabir edilen farklı tekniklerle kemerli köprüler inşa edilmiştir. Kemer formundaki taş köprülere, levha biçimindeki taşların birbirleri üzerine bindirilerek kemer formu oluşturulana dek kaydırılıp yerleştirilmesiyle meydana getirilmiş olanlar, ilk örnekler olarak verilebilir (Troyano 2003).

Bu kemer formu, lento oluşumuna benzer şekilde meydana getirilmiştir. Taşların her biri, konsol gibi kaydırılarak bir diğerinin üzerine yerleştirilmektedir. Anadolu coğrafyasında, Yunanistan ve Mısır'da, kısa açıklıkların geçilebildiği bu tip köprülere rastlanmaktadır. Yaygın olarak kullanılan dairesel kemer formuna ait ilk örnekler, ters V formunda kemer oluşturacak şekilde taşları birbirlerine yaslayarak oluşturulmuştur. Dairesel kemerlerde meydana gelen taş mesnet yerlerindeki yatay kuvvetler, bu tip kemerli köprülerde de oluşmaktadır (Adam 1999).

Ters V kemer formları MÖ. 3000'de Mezopotamya'da o dönemde inşa edilmiş olan mezarlarda görülmektedir (Şekil 3.13). Bu teknik Mısır ve Mezopotamya bölgesinde kullanılmaya başlanılmış basit bir teknik olarak geçmektedir. Antik Yunan ve Helenistik öncesi dönemde pek fazla kullanılmamıştır (Troyano 2003).



**Şekil 3.13.** MÖ. 2700-2250 Keops Piramidi inşa edilirken kullanılan ters V biçiminde inşa edilmiş ilk kemer formu (Özkaraman 1994)

Bu kemer formu günümüzde hala birçok yeni yapıda da tercih edilen form olup, ilk olarak M.Ö.700'ler döneminde Etrüskler tarafından ortaya çıkarılmıştır. Erken dönem Roma kemer örneklerine, şehrin kanalizasyon sisteminin tahliye edildiği drenaj sistemi olarak altınlar da görülmektedir. Bu yapılara verilebilecek iyi örnek, Satürn Tapınağı yakınlarındaki Etrüsk etkilerinin görüldüğü, üç katmanlı olan 'Cloaca Maxima' yapısıdır (Şekil 3.14) (Troyano 2003).



**Şekil 3.14.** Cloaca Maxima görseli (Troyano 2003)

Kamusal alandaki yapıların inşasında dairesel formunun ortaya çıkarılmasıyla büyük gelişmeler meydana gelmiştir. Bu kemer formuyla inşa edilen portikolu giriş yerleri ve kent kapıları gibi kısımların inşası yapılmıştır. Bu gelişmelere bir örnek de şehir yakınlarındaki sulak bölgelerden şehir merkezine su naklini sağlayan su kemerlerini yapılmasıdır. Bununla beraber Roma’ da yönetimi güçlü kılabilecek iletişim bağlantısını sağlayacak yeni köprüler inşa edilmiştir. Yapım teknikleri için büyük gelişmeler bu dönemde olmuştur. Günümüzde halen, birçok Roma köprüsü ve su kemeri kullanılabilir durumdadır. Anadolu topraklarında da önemli Roma köprüleri bulunmaktadır.

### **3.3.2. Kemer yapım sistemleri**

Kemer, belirli bir açıklığın geçilebilmesi için ayaklara oturtularak yapılan yay şeklindeki kagir bir yapı parçasıdır. Kemerlerin açıklık ve yükseklikleri belirli bir orantıya sahiptir. Teknik hesaba göre bu orantıda, açıklık arttıkça kemerin yüksekliğinin de artması gerekmektedir (Çulpan 2002).

Çelik halatlı sistemlere benzeyen kemerler, her iki mesnet noktasına yatay ve düşey kuvvetleri iletmektedir. Yatay kuvvetlerin sahip olduğu büyüklük ile kemerin yüksekliği orantılıdır. Kemerin yüksekliği azaldığında, kemerin itki kuvvetleri artar. Genel olarak yığma kemerlerde ölü yük çok büyük olmaktadır. Ölü yüke kıyasla etkiyen yük küçük olduğunda, tesir çizgisi değişse bile bu etki çok az olmakta ve kemer sabit kalmaktadır. Bu duruma ait görseller Şekil 3.15 ve Şekil 3.16’te görülmektedir (Meistermann 2007).

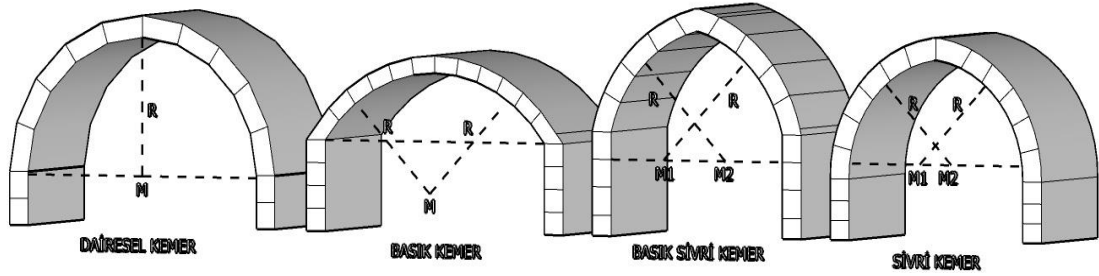




Taş plakalar ve tuğlalar kemer yapımında işi basitleştirmek için kullanılmıştır. Ancak asıl kemer yapısında merkezleme içe doğru kaydırılmış ve tonoz birkaç adımda oluşturulmuştur (Barow 2013).

17. ve 18. Yüzyılda köprülerin yapımına ait görsellerde, Roma metotlarına benzerlikler görülmektedir. Romalılarda tekrarlayan kemerli köprülerde kemer ölçüleri birbirine yakındır. Kemerin yapımında da benzer büyüklükte bir kalıbın kullanıldığı görülmektedir. İskele kurulumunun başlangıcında, çok sayıda bağlantı ve ağır yükler nedeniyle taşıyıcı iskelenin doğru açılarda kavis alması gerekmektedir. Bu yüzden merkezlemenin oluşturulması çok hassas bir işlem olmaktadır. Tonoz yayılımı boyunca dengesizliklerin oluşmaması için merkezden aşağıya kamaların tekdüze olarak gevşetilmelidir (Macaulay 2003).

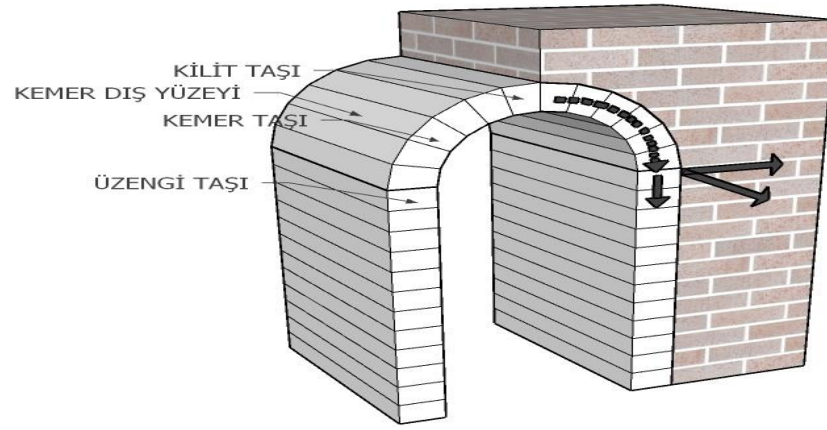
Kemer formu kullanılan malzemeye, uygulanan teknolojiye, konumuna ve dönemine göre değişiklik göstermektedir. Köprüler, düz köprüler ve dik (kemer) köprüler olmak üzere ikiye ayrılır. Buna ilave olarak yine birçok kemer tipi vardır (Şekil 3.17) (İlter 1978).



Şekil 3.17. Köprülerde tercih edilen bazı kemer geometrisi türleri

### 3.3.3. Kemer biçiminin incelenmesi

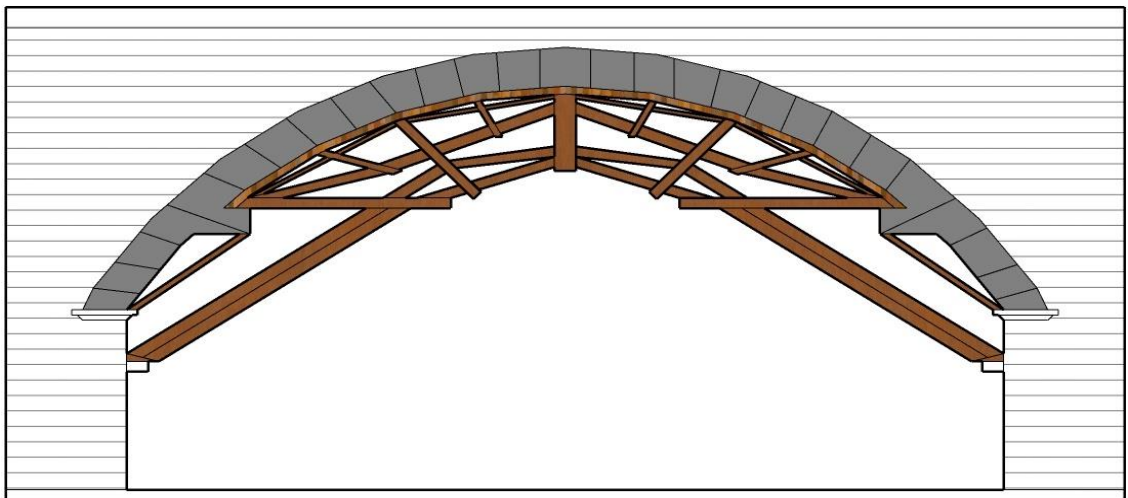
Kemer; geçilmesi gereken açıklık boyutunun malzeme boyutundan büyük olduğu durumlarda; yani büyük açıklık olan yerleri küçük boyutlu parçalarla geçebilmek için geliştirilen bir sistemdir (Batur 1974). Kemerlere etki eden kuvvetler ve bu kuvvetlerin ayaklara aktarılması Şekil 3.18'deki görselde görülmektedir.



**Şekil 3.18.** Kemer formu üzerinde elemanların ve kuvvetlerin gösterimi

Kemer de kullanılan taşlar, dış yüzeyleri düzgün şekilde biçimlendirilerek ve eğrisel olarak kemer formuna uygun olarak şekil verilmektedir. Kemerler oluşturulurken taşlar birbirleri üzerine bindirilerek aralarında bağlayıcı harç kullanılarak yapılırlar. Kemerlerde bulunan üzenği hizası, kemer eğrisinin bittiği ve oturduğu bölüme denilmektedir. Bu bölümler yanal itki kuvvetlerinin en yüksek değer olduğu kısımlardır.

Bu kısımlar metal veya ahşap gergiler yardımıyla yapılarda tercih edilen kemerler de birbirlerine bağlanmaktadır. Köprülerde oluşan yanal itki kuvvetleri direkt olarak köprü ayakları tarafından karşılanmaktadır. Tarihi bir taş kemerinin yapımı esnasında uygulanan kalıp sistemi görseli Şekil 3.19’da görülmektedir.



**Şekil 3.19.** Taş kemer kalıp sistemi görseli

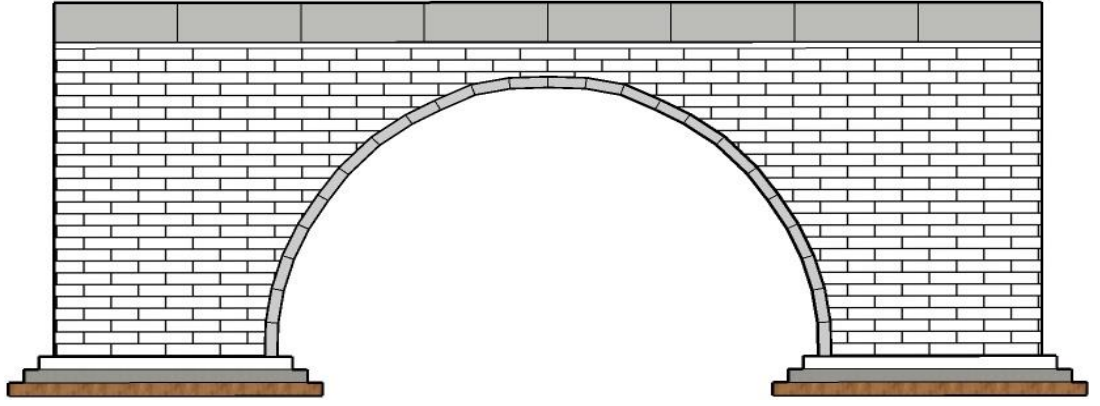
Kemerin orta noktası olan en üst kısmında bulunan kemer kilit taşı, kemer oluşturulurken diğer taşlardan farklı olarak son olarak yerleştirilmekte ve bu şekilde kemer formunda olan taşları sıkıştırarak köprü kemerinde stabiliteyi sağlayan taşa denilmektedir. Kemer formu oluşturulurken ahşap kalıplarla form oluşturulmadan önce iskele kurulması gerekmektedir. Bu kurulan iskele yükseklik veya zeminin uygunluğuna göre direkt zemine oturabilmektedir. Akarsu veya köprünün kurulacağı sulak yerlerde iskelelerin kurulumunun mümkün olmadığı durumlar olduğundan yapıdan ahşap direklerle çıkıntılar oluşturularak iskele kurulabilmektedir. Yüksek ayaklı inşa edilen su kemerleri bu duruma örnek olarak verilebilmektedir. Bu durumu Roma döneminde aşabilmek için de yine kemer taşında oyuklar oyulmuş ve kazık kirişler üzerine iskele oturtulmuştur. Bazı durumlar da ise duvar yüzeyinde çıkıntılar oluşturularak mimari öğeye dönüştürülmüştür (Adam 1999).

#### **3.3.4. Kemer geometrisi çeşitleri**

Geçmişten günümüze kadar farklı dönemlerde birçok kemer formu geometrisinde köprüler inşa edilmişlerdir. Köprü geometrisi, köprünün yapılacağı yerin özellikleri ile geçilecek olan açıklık gibi birçok parametreye göre değişebilmektedir. Çalışma kapsamında da ele alınacak kemer geometrisi formlarından bazılarına ait genel bilgiler aşağıda kısaca belirtilmiştir.

#### **Dairesel Kemer**

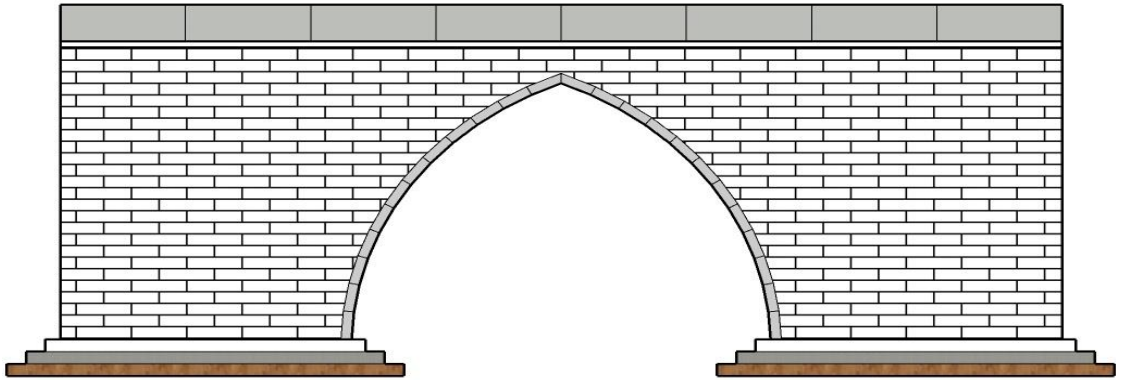
Kemerin başlangıcından bitişine kadar tek bir dairesel eğimi olan kemer formlarına dairesel kemer denilmektedir. Ağırlıklı olarak köprü, su kemerleri gibi yapılarda açıklıkları yapısal olarak kapatmaktan ziyade yük taşımak için kullanılır. Yük taşıma kapasiteleri fazla olan dairesel kemer birçok medeniyette ve dönemde tercih edilmiştir. Bu, Roma köprülerinde kullanılan en yaygın kemer formudur. Dairesel kemer formuna ait görsel Şekil 3.20’de görülmektedir.



**Şekil 3.20.** Dairesel kemer formunun örnek gösterimi

### **Sivri Kemer**

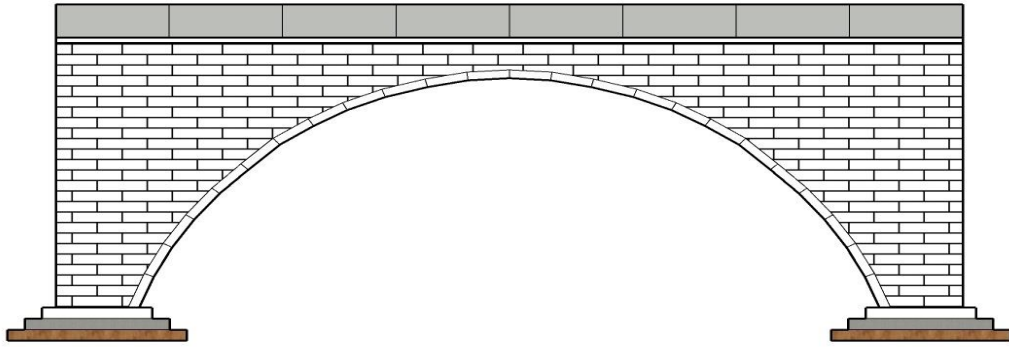
Sivri kemer, yarı çapı genişliğinin, kemer açıklığının yarısından büyük olan simetrik iki yayın birleşmesiyle meydana gelen kemer formuna denilmektedir. Yaygın olarak Orta Çağ ve Gotik dönem mimarisinde kullanılmıştır. Bu kemerler de yay merkezleri üzengi altında veya hizasında ortaya çıkabilmektedir. Birbirinden uzaklaşan yay merkezlerinin, tepe noktası yükselerek sivrilik daha da artabilmektedir. Dairesel kemerde ayaklara aktarılan yükler sivri kemere göre düşeye daha uzak olduğu görülmektedir. Bu kemer tipi Selçuklu Döneminde inşa edilen köprülerdeki ana ve tahliye kemerlerinde tercih edildiği sıkça görülmektedir. Osmanlı dönemi köprülerinde ise Selçuklu köprülerine nazaran C tipi kemerin kullanımı sivri kemer kullanımından fazla olduğu bilinmektedir. Sivri kemerlere ait görsel Şekil 3.21’de görülmektedir.



**Şekil 3.21.** Sivri kemer formunun örnek gösterimi

## Basık Kemer

Bu kemer tipi, yüksekliği açıklığının yarısından daha küçük olan, açıklık ortasında üzengi taşı alt kısmında yay merkezinin olduğu kemer formuna basık kemer denilmektedir. Dairesel kemere göre basık kemerlerin düşey yöndeki kuvvetleri karşılama kapasitesi daha düşüktür. Bu yüzden basık kemer formu, yatay kuvvetlerin oluştuğu pencere ve kapı gibi yük taşıma kapasitesi düşük olan boşluklardaki yapılar da kullanılmaktadır. Basık kemer formuna ait görsel Şekil 3.22’de görölmektedir.



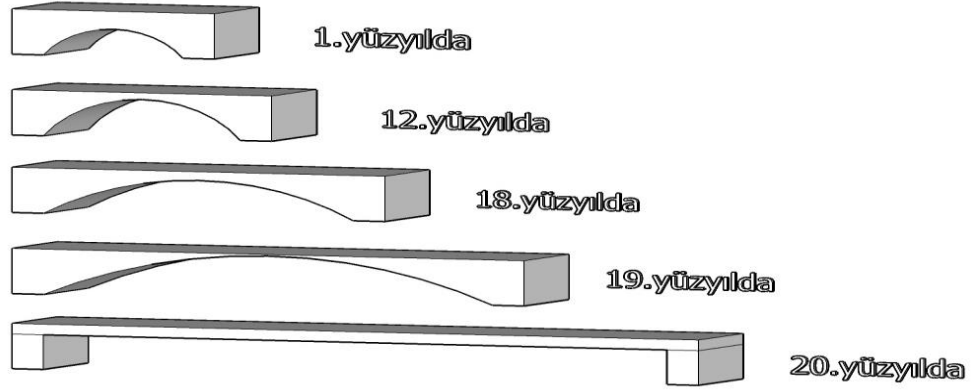
Şekil 3.22. Basık kemer formunun örnek gösterimi

Bu kemer tiplerine ilave olarak birçok kemer geometrisi tipleri de mevcuttur. Köprülerin kemer formları ile açıklıkları değiştikçe dayanım ve kimerde oluşan gerilmelerle birlikte birçok parametrede değişmektedir. Formlara örnek olarak farklı eğim ve açıklığa göre verilen örnekler Şekil 3.23’da görölmektedir.

Kemer Türleri	Devamlı Kemer		Haçvari Kemer
	Dik Kemer	Alçak Tavanlı Kemer	
Yarım Daire Kemer			
Parabolik Kemer			
Eliptik			

Şekil 3.23. Diğer kemer geometrisi türleri (Proske ve Gelder. 2009)

Kemer boyutları, köprülerde nehir yatağının genişliğine bağlı olarak azalmakta ve artmaktadır. Ana kemerli dik çıkış ve inişli köprü çözümleri, Anadolu’da en çok görülen köprü çözümleridir. Kemerler yapıldıkları döneme ve yapıldıkları bölgeye göre farklılık göstermektedirler. Buldukları bölgenin yapısal özelliklerinden dolayı birçok kemer çeşidi oluşmaktadır (Sert ve ark. 2009) (Şekil 3.24).



**Şekil 3.24.** Kemer yapısının tarihsel süreçler içerisinde değişimi

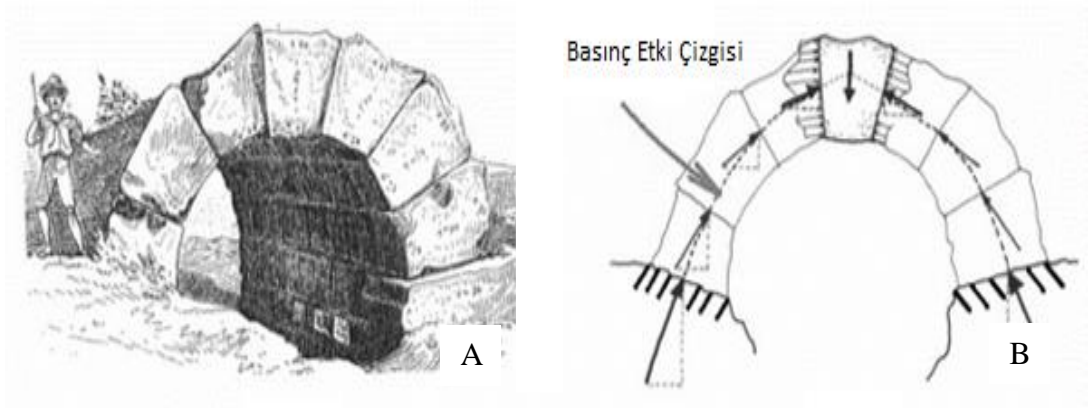
Roma ve Doğu Roma dönemine ait köprülerde genellikle dairesel (tek merkezli) kemer kullanımı görülmektedir (Sert ve ark. 2009).

Sivri kemer, Selçuklu ve Osmanlı dönemindeki köprülerde sıklıkla kullanılmıştır. Fakat sivri kemer formunun kullanılmadığı birçok örnek de bulunmaktadır. Beylikler döneminde, çevredeki antik yapılardan esinlenerek dairesel kemerli köprüler de inşa edilmiştir (Halifeoğlu ve ark. 2013).

Selçuklu ve Osmanlı dönemindeki köprülerde basık sivri kemerinde kullanıldığı gözlemlenmektedir. Fakat her dönemde her kemer çözümüne rastlanılması mümkündür. Roma ve Bizans dönemine ait bazı köprülerde sivri kemer formu uygulanmışken, Selçuklu ve Osmanlı dönemine ait bazı köprülerde de dairesel kemer kullanılmıştır. Bu durum, kitabesi bulunan Selçuklularda bazı köprülerde, Osmanlı döneminde inşa edilmiş olan köprülerde ise ana göz sivri formdayken, boşaltma gözlerinin dairesel yapıldığı örneklerde görülmektedir (İlter 1978).

### 3.3.5. Kemer davranışının incelenmesi

Kemer; üzerine etkiyen yükleri mesnet noktalarına formu biçiminde eğik şekilde aktaran, basınç kuvvetlerini karşılayan, sivri, basık gibi birçok form şekli mevcut olan ve bu şekillerde inşası yapılabilen eğrisel bir yapı elemanıdır (Arun 2006). Taş kemerlerdeki yük dağılımıyla ara yüzde oluşan gerilmeler Şekil 3.25’de görülmektedir.

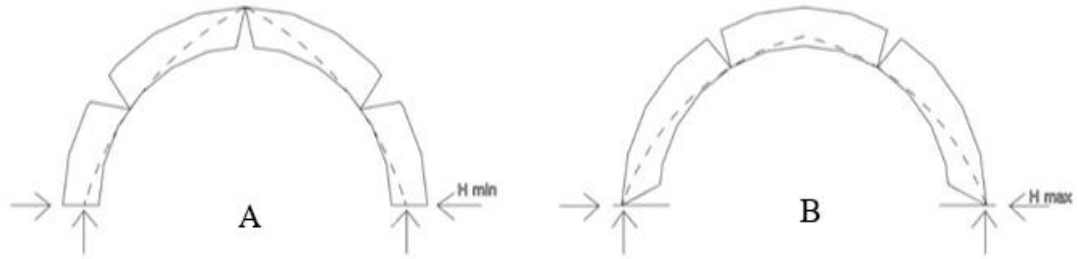


**Şekil 3.25.** Taş kemerlerdeki a) kemer formu b) kemerde oluşan basınç etki çizgisi yük dağılımıyla ara yüzdeki gerilmeler (Huerta 2006)

Kemerler, yapı içindeki konumlarına, üzerlerine etki eden yüklere ve ayaklarına aktardığı kuvvetlere göre değerlendirilmektedir. Bundan farklı olarak parabolik ve sivri formdaki kemerler de bu durum değişmektedir. Kemerde bulunan taş kalınlıklarının kemer açıklığına oranının düşük olması durumunda mafsallaşma olabilmektedir. Kemer taşlarının kalınlığının fazla olduğu durumlarda ise kayma oluşabilmektedir. Köprü kemerini tutan ayaklarda bu durumların kemer stabilitesine etkisi büyük olabilmektedir. Ayaklarda oluşacak herhangi bir dönme veya oturma durumu, kemerin stabilitesinde azalma meydana getirerek tehlike oluşturacaktır. Bu yüzden köprü stabilitesini artıracak şekilde kemer formu düzenlenmesi ve taş seçimi yapılması önemli olmaktadır.

Yapının kendi ağırlığından ve mevcut diğer ölü yüklerden dolayı kemer üstünde gerilmeler oluşabilmektedir. Kemer stabilitesine, kemer kilit taşının üstünde bulunan dolgu tabakasının büyük önemi vardır. Ayaklara binen kuvvetlerin hem düşeye

yakınlaşmasını hem de kendi üzerine gelen tekil kuvvetlerin dağıtılmasını yapıda bulunan kemer bölümü sağlamaktadır. Kemer açıklığının büyük olduğu durumlarda kilit taşıda meydana gelebilecek bir hasar, mevcut olan ölü yüklerin etkisiyle kemerde göçme oluşturabilecektir. Bu yüzden geniş açıklıklarda kemer kilit taşına ve kemerin tamamında malzeme seçimiyle beraber kemer formuna dikkat edilmesi büyük önem arz etmektedir. Köprü ayaklarında oluşabilecek herhangi bir oturma durumunda ise, gerilmelerde tüm kemer taşı boyunca artışlar meydana gelebilmektedir. Kemer yapısı gereği mesnetleri itmektedir. Mesnetler kaçınılmaz olarak bu etkiye bir süre izin vermekte, daha sonra ise kemer bu hareketle beraber hafifçe yayılmakta ve açılmaktadır. Köprü kemerlerinin kendi ağırlıkları altındaki davranışları Şekil 3.26'da görülmektedir.



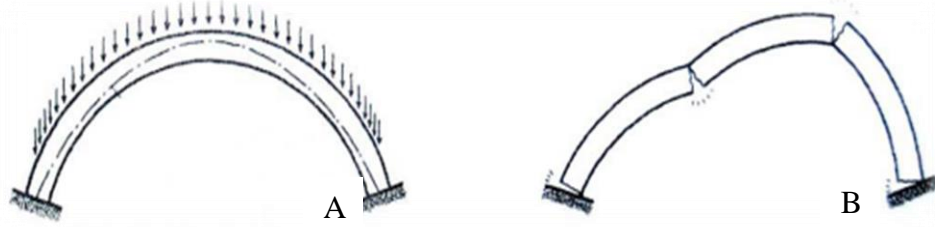
**Şekil 3.26.** Kendi ağırlığı altında kemer davranışı a) Minimum; b) Maksimum (Nobile ve ark. 2015)

Kemer formunda görülen deformasyon, bir kemerin dayanımının belirlenmesinde en önemli faktördür. Uzun süreli deformasyon kayıtları ile deformasyonların mevsimsel olup olmadığı incelenmelidir. Basık kemerlere oranla daha güçlü dayanıma sahip olan parabolik ve sivri kemerler, köprü ayaklarında basık kemere nazaran daha az yanal itki kuvvetleri meydana gelmektedir. Bazı kemerler bu yüzden zayıf kemer formu olarak adlandırılmaktadır. Zayıf kemerler, yüksekliği kemer açıklığının dörtte birinden daha az olan kemerlerdir. Bunlara örnek olarak basık kemerler verilebilmektedir. Kemer taşlarının kalınlığının da kemer dayanımına etkisi vardır. Kemer kalınlığı arttıkça dayanımı da artmaktadır.

Kemer taşı kalınlığı, farklı yükleme anında kemer taşları içerisindeki itki çizgisinin güvenli kısmın içinde kalma ihtimalini arttırmaktadır. Kemer yüksekliği azaldıkça, ayaklarda oluşan yanal itki artmaktadır. Taşlar arasındaki sürtünme kuvvetine ve

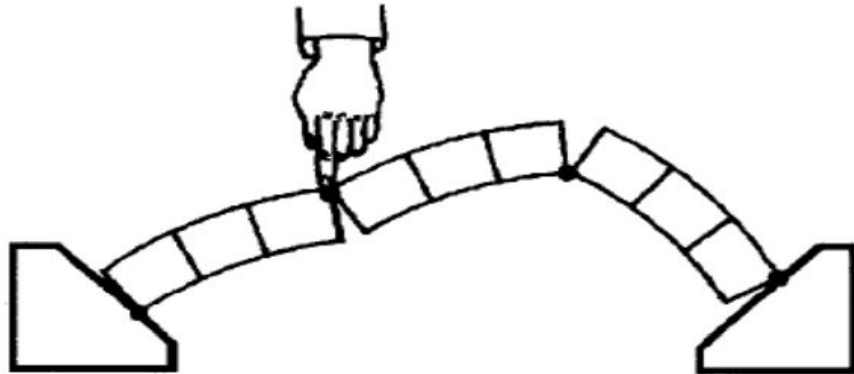


kemer taşının derinliğine bağlı olarak, kemer üzerinde deformasyonlar oluşabilmektedir. Bu deformasyonlar çatlakları meydana getirmektedir. Oluşan çatlaklar zaman içinde büyüme gösterebilmekte ve geri dönüşleri olmamaktadır (Arun 2006) (Şekil 3.27).



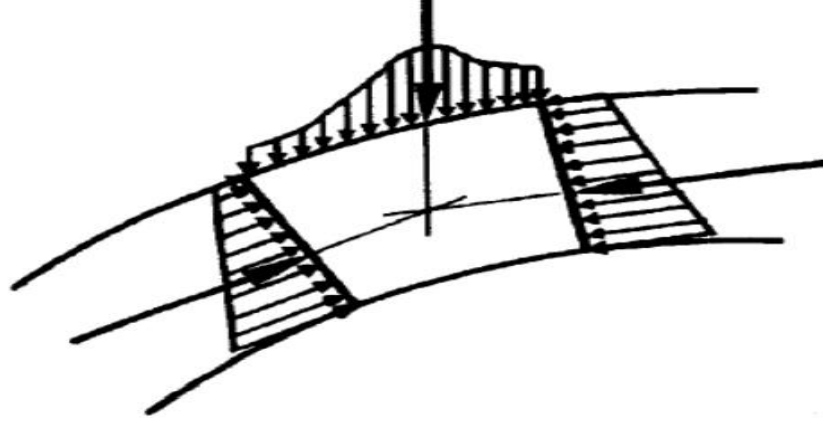
**Şekil 3.27.** Kemerlerin mekanizması a) yük altında b) göçme davranışı (Arun 2006)

Yığma kemerler için, gerilme hesaplarına dayanan analizler yeterli olmamaktadır. Yıkılma esnasında kemer üzerindeki kuvvet genel olarak malzemelerde izin verilen sınır değerlerden düşük olmaktadır. Kemer formunun göçmesine sebep olan yükün etkisi, kemerin kalınlığına, kendi ağırlığına, formuna ve kemerde yükün uygulandığı yere göre değişiklik göstermektedir. Antik dönemlerde ortaya çıkan tasarımlara da bakıldığında bu durumun öneminin büyüklüğü görülmektedir. Bir köprüde kemer modeli oluşturulduğunda göçme oluşmayıp ayakta durabiliyorsa, kemer modelinin büyütülmesi durumundaki halinde de göçme durumu olmayacağı bilinmektedir (O'dwyer 1998). Aşağıdaki şekilde noktasal bir kuvvetin altında kemerde oluşan göçme durumu görülmektedir (Şekil 3.28).



**Şekil 3.28.** Rijit bloklardan oluşmuş olan kemerin noktasal bir yük altında dağılarak yıkılması (O'dwyer 1998)

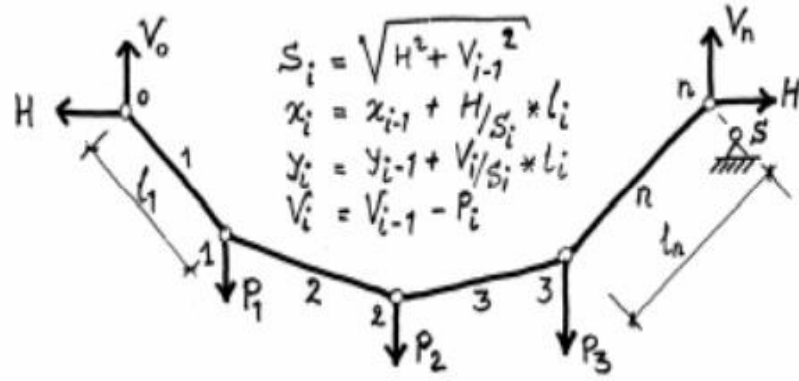
Kemer taşlarındaki tepki kuvvetleri, taşların dış yüzeylerinde ortaya çıkan gerilmelerdir. Köprü kemer taşına etki eden kuvvetler yapıda itki çizgisini oluşturmaktadır. İtki çizgisi, gerilmelerin kemer taşları boyunca izlediği yola denilmektedir. Bu çizgi, funiküler bir poligonu meydana getirmektedir (Şekil 3.29).



**Şekil 3.29.** Kemer taşlarının üzerinde ki itki çizgisi ve kemer taşının üzerinde oluşmuş olan gerilmeler (O'dwyer 1998)

Hooke, funiküler bir poligonun kemer formunun ideal hali olduğunu düşünmüştür. Bu durumu ortaya çıkarırken yer çekimi altında iki ucu sabit bir ipe ağırlık bağlayarak ipte meydana gelen değişimi incelemiştir. Bu ağırlıklar arasındaki çekme kuvvetlerinin ipte meydana gelen değişimin tersi olduğunda, basınç kuvvetlerine dönüşerek dengeyi sağlayacağını ortaya atmıştır (O'dwyer 1998).

Bu yöntemde, kemere etkiyen kuvvetler noktasal yüklere dönüştürülerek ideal kemer formunu ortaya çıkarılabilmektedir. Düzensiz şekilde olan yüklerin mevcut olduğu durumlarda, doğru kemer formunu bulmak zorlaşmaktadır. Zincir eğrisinin elde edilmesi durumu, en ideal kemer formunu bize vermektedir. Bu yönteme ait veriler aşağıdaki Şekil 3.30'da görülmektedir. Görseldeki "o" ve "n" noktaları sabit noktalar varsayıp, H ve V noktalarına tahmini olarak değerler verilerek asılı olan ağırlıkların (P), yerlerine ait veriler elde edilerek koordinatları ortaya çıkarılmaktadır. Başlangıç ile bitiş noktalarının koordinatları birbirlerine yaklaşıncaya kadar H ve V değişkenlerine değerler tekrar verilerek bu işleme devam edilmektedir (Vermeltfoort 2001).



**Şekil 3.30.** Asılı ağırlık yöntemiyle itki çizgisinin şeklinin belirlenebilmesi (Vermeltfoort 2001)

Erken dönemdeki tasarımcılar, kemer taşının 3'te 1'i içinde olacak biçimde kemer inşa ederek bu durumu güvenli bir hale getirmişlerdir. Kemerler için bulunan güvenlik yöntemi, itki çizgisinin içinde olabileceği ince kemer ile inşası yapılan kemerin arasında bulunan oran olarak bilinmektedir. (O'dwyer 1998).

Yukarıda bahsi geçen zincir eğrisi kuramına uygun geometrili olan kemerde, basınç kuvvetinin yalnız kemerin taşları üstünde olması öngörülmektedir. Kemerin üzerinde yük dağıtım hattı çizildiğinde, kemer taşının orta noktasından geçen itki çizgisi basıncı tüm kemer taşlarına eşit olacak şekilde dağıtmaktadır. Fakat kemer taşlarının merkez ekseninden sapma olması durumunda, kemer taşları ara yüzeyinde meydana gelen gerilme aşağıda Denklem (3.1) deki gibi olmaktadır.

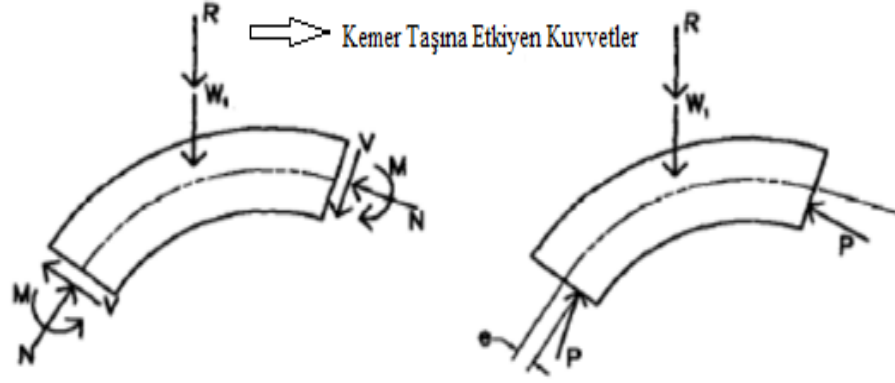
$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{P_e}{Z} \quad (3.1)$$

$P$  : Kemer kesitindeki eksenel kuvveti ( $N$ )

$A$  : Kemer taşının yük doğrultusuna dik kesit alanını ( $mm^2$ )

$P_e$  : Eksenel kuvvetin eksantrisitesini ( $e_x$ )

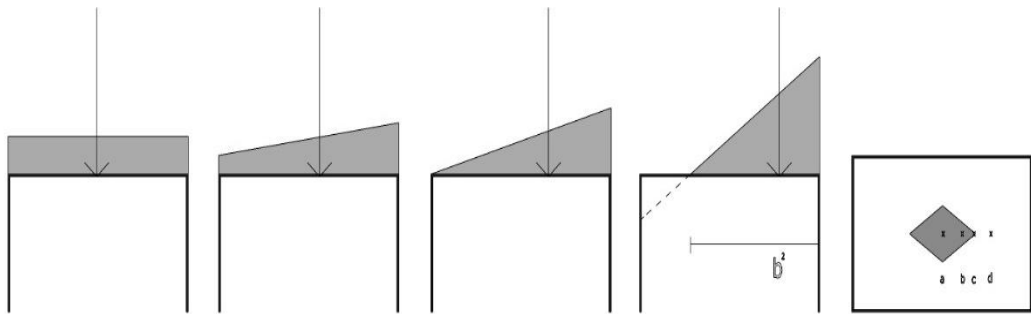
$Z$  : Kesit modülünü ifade etmektedir (Şekil 3.31).



**Şekil 3.31.** Kemerler üzerindeki kuvvetlerin şematik olarak gösterimi (Boothby ve ark. 1995)

Kesitin ortasında kemer taşının üstündeki aksenal kuvvetin sapması, kemer taşlarının üstünde asimetrik olarak yükün dağılmasına neden olmaktadır. Kemer taşlarının üstünde kuvvetin kayma değeri, kesitin merkezinden 1/3'lük bölümüne gelene kadar basınç meydana gelecektir. Fakat, 1/3'lük bölümün dışında kalacak olan kuvvet, kemer taşlarının üstündeki çekme kuvvetlerine neden olacaktır.

Yığma yapılarda meydana gelen çekme kuvvetleri, kemer taşlarının arasında ya da yapı elemanlarının arasında iletilememektedir. Ara yüzü oluşturan harç, çekme kuvvetlerini iletmede önemli bir role sahiptir. Ancak çekme dayanımı düşük harç tabakalarının bu yükleri iletmesi olası değildir. Yukarıda bahse edilen kemer taşına etkiyen kuvvetlerin kemer yüzeyinde oluşturduğu gerilmeler Şekil 3.32'de görülmektedir.



**Şekil 3.32.** İtki çizgisinin farklı kemer taşı içerisindeki konumu ve yüzeyde oluşan gerilmelerin dağılımının gösterimi (Alaboz 2008)

Malzemenin dayanamayacağı bu çekme kuvvetleri kemerin üstünde olası ayrılmalara ya da çatlaklara neden olacaktır. Ama bu olası durumlar kemerin yıkılması için yeterli bir sebep olmamaktadır. Bu teoriden yola çıkarak, itki çizgisinin kemer taşının kesitinin merkezde 1/3'lük kısmının içinde kalması, kemerin stabilitesi açısından en önemli faktördür. İtki çizgisinin, 1/3'lük kısmının içinde olabilmesi açısından bu çizginin formuyla birlikte kemer taşının kalınlığı oldukça önemlidir.

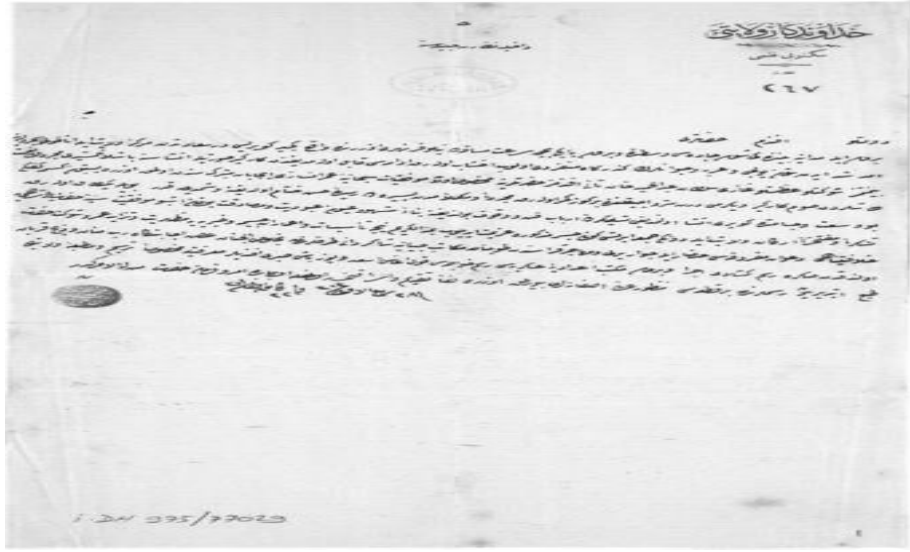
Viktorya dönemi mühendislikle ilgili çalışmalar esnasında, farklı kemer formları için, kemer yüksekliğiyle birlikte kemer açıklığı verilerine göre, kemer taşlarının kalınlığını veren ampirik formüller geliştirilmiştir. Çeşitli kemer şekilleri için Viktorya döneminde mühendislik çalışmaları yapılmıştır. Kemerin açıklığı ve kemerin yüksekliğine göre kemer taşlarının kalınlığını öğrenebileceğimiz ampirik formüller elde edilmiştir.

### **3.4. Tarihi Geçit Köprüsünün İncelenmesi**

#### **3.4.1. Tarihi geçit köprüsünün genel özellikleri ve mevcut durumu**

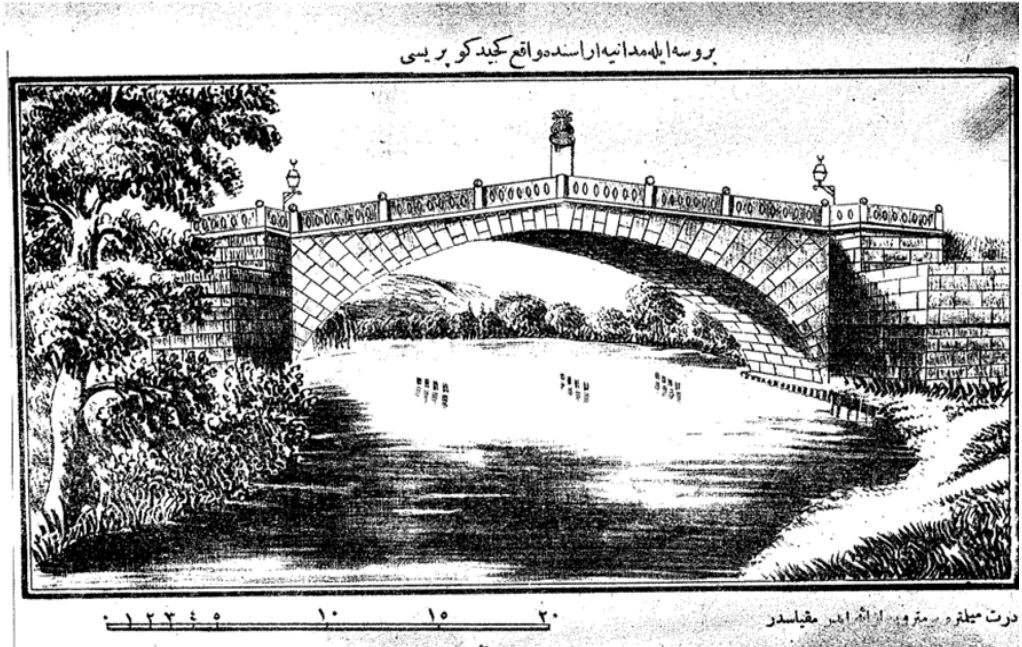
Tarihi köprü, Bursa-Mudanya yolu Nilüfer çayının üzerinde, Bursa Valisi olan Mehmed Nazif Paşa tarafından H.1303/M.1885/86 yılında inşa ettirilmiştir. İnşasına ait bu durum günümüzde Başbakanlık Osmanlı Arşivleri'nde bulunan ve Sultan Abdülhâmid zamanında yapılan inşaata ilişkin Hüdavendigâr Vilâyeti Mektubî Kalemî tarafından kaleme alınmış 22 Kânûn-i sâni 301/ 3 Şubat 1886 tarihli ve Dâhiliye Nezâret-i Celilesine hitaplı dokümanda görülmektedir (Şekil 3.33), (Çulpan 2002).

Eski köprünün zamanında ahşap olduğu, İstanbul'dan başlayıp Bursa üzerinden Anadolu ya gidip gelen araba, yolcu ve hayvanlar için artık ihtiyaçları karşılamadığı, bundan dolayı eski köprünün yerine kesme küfeki taşlardan kâgir ve yirmi dört metre açıklığında tek gözlü yeni bir köprünün inşa edildiği görülmektedir. (Anonim 2014).



**Şekil 3.33.** Sultan Abdülhâmid zamanı inşaata ilişkin Hüdavendigâr Vilâyeti Mektubî Kaleminin dokümanı (Anonim 2014)

Köprü'nün eski dönem resmedilmiş basık kemer formunda, korkuluklu ve kornişli haline ait fotoğraf Şekil 3.35'de görülmektedir.



**Şekil 3.34.** Geçit Köprüsü geçmiş tarihli görseli ait fotoğraf (Anonim 2014)

### 3.4.2. Köprünün mimari özellikleri

Osmanlı İmparatorluğu'nun son dönemlerinde Marmara Denizi kıyısı boyunca Bursa'dan Mudanya'ya giden ana yol üzerinde güney-doğu kuzey-batı istikametinde Nilüfer Çayı üzerinde inşa edilmiş kâgir köprü, tamamı kesme taştan ve tek gözlü bir su yapısı olup görünüşü Şekil 3.35'deki gibidir. Köprünün kemer formunun alttan görünüşü ve tempan duvarına ait görseli 3.36'da görülmektedir.



Şekil 3.35. Tarihi Geçit Köprüsü mevcut halinin görüntüsü (Anonim 2014)



Şekil 3.36. Köprü'nün a) Kemerin alttan görünüşü, b) Tempan duvarı görünüşü (Anonim 2014)

Köprü şu anda 23,97m. açıklığında ve basık bir kemer gözüne sahip olup, orijinal formunda yol genişliği 7,050m dir. Yol genişliği daha sonra betonarme tabliye ilavesi ile 10,53m'ye yükseltilmiştir. Günümüzde çok yoğun bir trafiğe hizmet eden yapı, zamanla birçok fiziksel müdahaleye maruz kalmış olup, üzerine sonradan atılan betonarme tabliye nedeniyle orijinal zemini tamamen kaplanmış, eski fotoğraflarda görüldüğü gibi taş korkuluklar ve zarif aydınlatma elemanları kaldırılmış, bu süreçte köprünün ortasında karşılıklı konumlandığı anlaşılan inşa kitabeleri de yerlerinden kaldırılarak Bursa Müzesi'ne getirilmiştir (Anonim 2014).

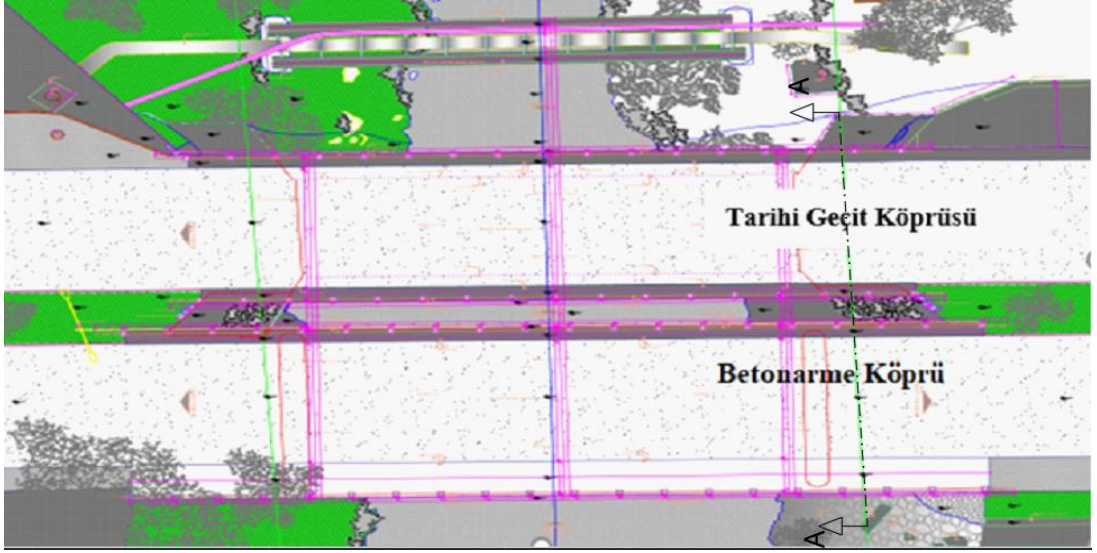
Köprünün Bursa tarafındaki güney-doğu girişinin iki tarafında birer , Mudanya yönündeki girişinin kuzey kısmında bir olmak üzere ve bu eski köprünün parapetlerine ait olan, üç taş korkuluk elemanı büyük şans eseri olarak günümüze gelebilmiştir. Şu anki durumdan anlaşılacağı üzere, köprünün kemer ayaklarının inşası için, suyun her iki yakasında yer alan kayalıklar, doğal bir ampattan gibi kullanılmıştır. Kemer ayakları boyunca uzanan tempan duvarlarına, dış köşeleri tıraşlanmak suretiyle zemin kotundan itibaren 5 m'yi aşan yüksekliklerde kesme taş örgülü prizmatik kütleler halinde kademeli bir şekilde istinat duvarı da eklenmiştir (Şekil 3.37).



**Şekil 3.37.** Tarihi Geçit Köprüsünde kullanılan taşların a) yakından görüntüsü b) uzaktan görüntüsü (Anonim 2014)

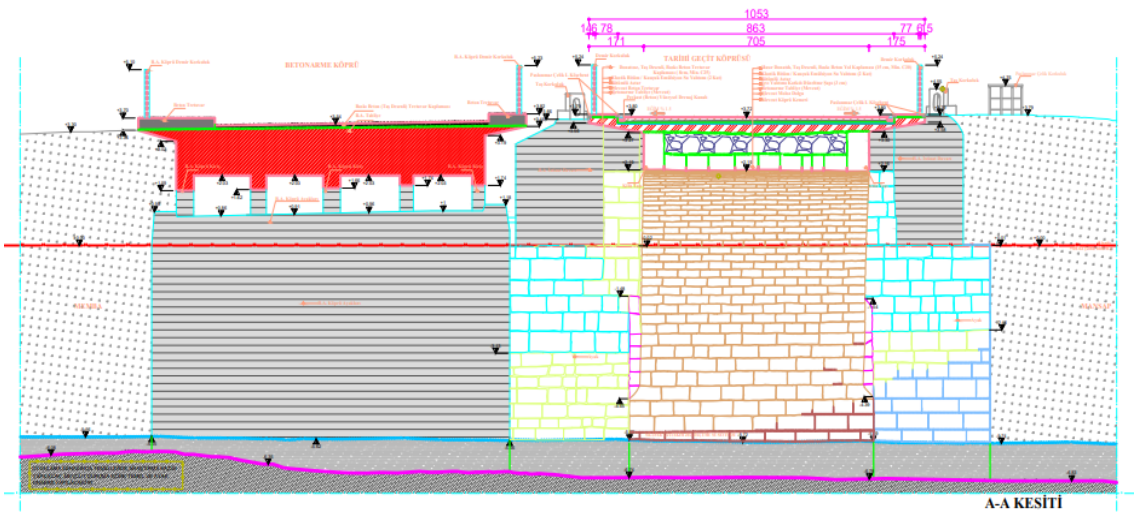


Köprünün mevcut rölövesi çıkarılmış olup, farklı cephe ve görünüşlerde ölçeklendirilerek çizimleri tamamlanmıştır. Köprüye ait çizilen plan Şekil 3.38'de görülmektedir. Köprünün planından alınan A-A kesiti Şekil 3.39'deki gibidir.



Şekil 3.38. Tarihi Geçit Köprüsü planı (Demirtaş 2014)

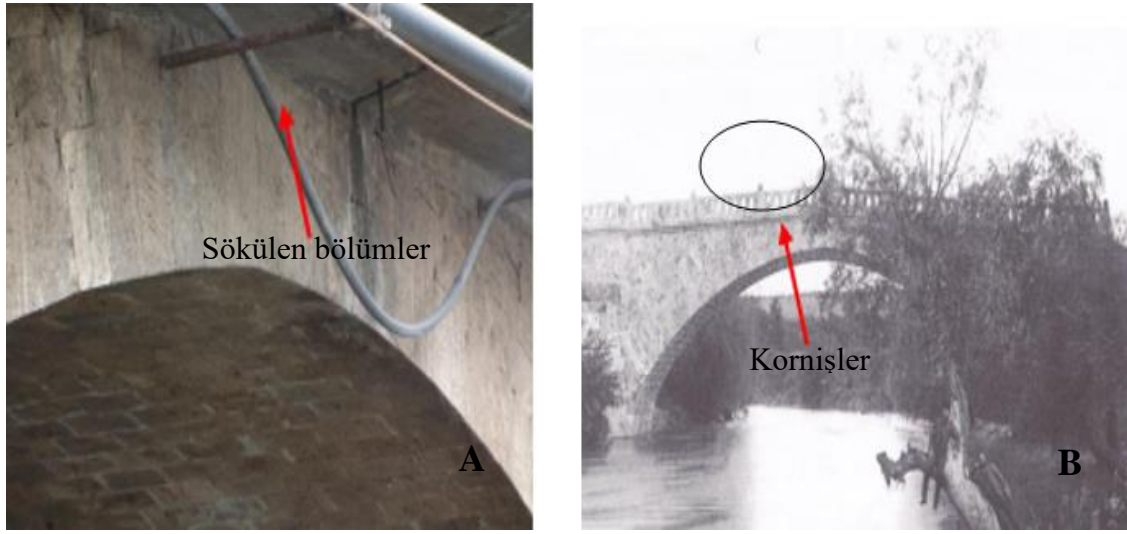
Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi köprü açıklığı yaya yolu dahil 10,53 metre, sonradan betonarme olarak eklenen kaldırım genişliğinin bir kenarında 1,71 diğer kenarında 1,75 metredir. Ana yol genişliği 7,05 metre olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 3.39. Köprünün A-A Kesiti (Demirtaş 2014)

### 3.4.3. Köprüde gözlenen problemler

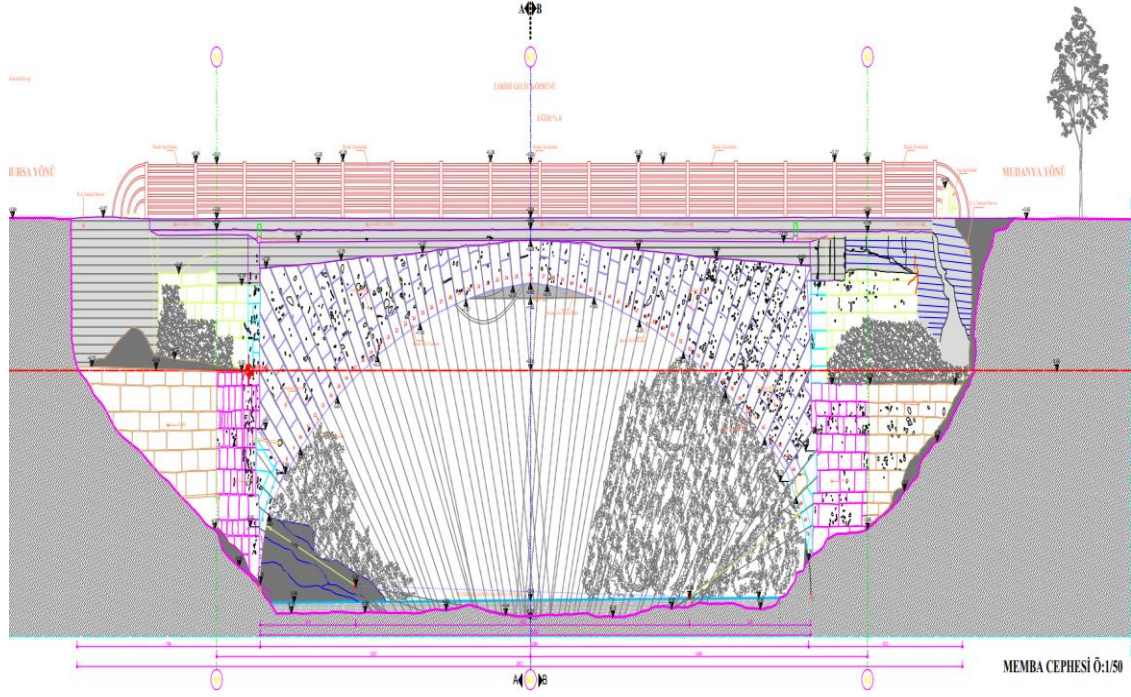
Köprü yapısını oluşturan örgü formasyonundan bir bölümün kitlesel olarak yapıdan ayrılması, kopması olarak tanımlanabilir. Geçit köprüsüne betonarme bir tabliye ilavesi yapılırken köprünün korniş seviyesindeki bir bölümünün yıkılarak yerine tabliye yapıldığı bilinirken, bu durum restitüsyon sorunu gibi değerlendiriliyor. Bu çerçevede Karayolları analitik rölöve projesindeki Geçit Köprüsü bu sorunu ifade etmemektedir (Anonim 2014) (Şekil 3.40).



**Şekil 3.40.** Geçit Köprüsü'nün a) betonarme tabliye eklenmesi sırasında kaldırılmış olan bölüm görseli b) özgün korniş hattı (Anonim 2014)

### 3.4.4. Yapı malzeme analizi

Bursa-Mudanya yolu Nilüfer Çayı üzerinde yer alan güney-doğu, kuzey-batı yönünde 19.yy'da inşa edilmiş kagir köprü, tamamı kesme taş, tek kemerli bir köprüdür. Köprünün açıklığı yaklaşık 24m ve özgün yol genişliği yaklaşık 7 metredir. Köprünün genel görüntüsü yapılmış olan aşağıdaki çizimde görülmektedir (Şekil 3.41).



**Şekil 3.41.** Köprü ön cephe-memba cephesi çizimi (Demirtaş 2014)

Yapıda temel örgü malzemesi olarak kesme küfeki taşı kullanılmıştır ve genel olarak sıfır derz olarak tanımlanabilecek bir derz yapısı mevcuttur. Karayolları Bölge Müdürlüğü'nün köprüye ait malzemelerin analizlerini yapabilmesi için köprüden numuneler alınarak laboratuvar ortamında incelemeleri yapılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- ✓ Harç Numunesi 1: %28-30 Sönmüş ve bekletilmiş kireç, %33-35 Taş tozu, %33-35 Yıkanmış ince dere kumu
- ✓ Harç Numunesi 2: %33-35 Sönmüş ve bekletilmiş kireç, %53-55 Taş tozu, %8-10 Yıkanmış ince dere kumu

Malzeme analiz raporları gerek yapıdan alınan harçtan gerekse de taştan dayanımlarına ilişkin bir bilgi içermemektedir (Anonim 2014).

### 3.5. Yapının Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Köprünün modelleme çalışmalarında köprüyü oluşturan 3 malzemenin de tanımlanması gerekmektedir. Bunlar; tempan duvarı, dolgu malzemesi ve kemeri oluşturan küfeki taşıdır. Tempan duvarı ve kemeri oluşturan malzemeler aynı özellikte olup küfeki taşı ve bağlayıcı olarak kireç harcı kullanılmıştır. Köprünün dolgu malzemesi ise taş, toprak malzemeleri kullanılarak oluşturulmuştur. Köprünün zati ve hareketli yükler altındaki yer değiştirmeleri ve gerilme değerleri ile üç farklı deprem verisi kullanılarak dinamik analizleri oluşturulmuştur. Bu bağlamda malzeme parametreleri aşağıda tespit edilmiştir.

Köprünün statik ve dinamik analizleri öncesinde oluşturulan modellerin malzeme karakteristiklerini belirlemek amacıyla kullanılan malzemelerin basınç, elastisite modülü ve Poisson oranları Bursa bölgesinde benzer dönemlerde inşa edilmiş olan yapılarda kullanılan malzemeler ile ilgili deneysel çalışmalardan yararlanılmıştır. Köprüde küfeki taşının kullanıldığı bilinmektedir. Bu bağlamda Bursa bölgesinde kullanılan küfeki taşının basınç değerlerinin 15 MPa ile 35 MPa arasında değiştiği konu ile ilgili kaynaklardan tespit edilmiştir (K.Bağbancı, Ö. ve ark.2019; Bağbancı, M.B. ve ark).

Ancak bağlayıcı olarak kullanılan harç numunesiyle birlikte kompozitin basınç dayanımı önemli ölçüde düşmektedir. Aynı kaynakçalarda elastisite modülü değerleri ise ultrases yöntemi ile belirlenmiştir. Buna göre küfeki taşının elastisite modülü ise 6400 MPa ile 32000 MPa arasında değiştiği de anlaşılmaktadır. Birim hacim ağırlıkları ise 2 g/cm<sup>3</sup> ile 2.2 g/cm<sup>3</sup> arasında değişmektedir.

Köprü malzemeleri üzerinde deneysel çalışma koşulları bulunmadığı için malzeme parametreleri yaklaşık olarak belirlenmiştir. Bu bilgiler ışığında küfeki taşı ve harç kompozit malzemesi için basınç gerilmesi 15 MPa, elastisite modülü Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) Bölüm 11- Deprem etkisi altında yığma bina taşıyıcı sistemlerin tasarımı için özel kurallar bölümünün 11.2.13 fıkrası gereğince basınç dayanımının 750 katı olarak 11250 MPa olarak hesaplanmıştır. Birim hacim ağırlığı ise 2,1 g/cm<sup>3</sup> olarak kabul edilmiştir.

Dolgu malzemesi için elastisite modülü 3000 MPa ve birim hacim ağırlığı 1,8 g/cm<sup>3</sup> olarak kabul edilmiştir. Tüm malzemeler için Poisson oranı 0,2 olarak kabul edilmiştir.

### **3.6. Tarihi Köprünün Statik Analizlerinin Yapılması**

Bu çalışmada, Bursa İli Nilüfer İlçesi Mudanya yolu üzerinde 19 yy. da inşa edilmiş olan Tarihi Geçit Köprüsü ele alınmış ve bu köprü hakkında bilgiler derlenerek köprünün yapım teknikleri, yapıldığı kemer formu, kullanılan taş ve harçların mekanik özellikleri belirlenmiştir. Araştırma kapsamında ele alınan köprü kesme küfeki taşlarından kâgir olarak inşa edilmiştir. Kâgir olarak inşa edilmiş olan tarihi köprünün hem yapı üzerinde araştırma yapılarak hem de laboratuvar ortamında malzemelere ait dayanım değerleri elde edilerek statik modelde kullanılmıştır. Daha önce yapılmış olan köprü rölöve çalışması ve mevcut yerinde ölçüleri alınarak köprünün tekrar çizimi yapılmış, mevcut kemer formu oluşturulmuştur. Köprünün mevcut kemer formu olan basık kemer formuna ilave olarak dairesel ve sivri kemer formunda da çizimleri yapılmıştır. Farklı formlarda çizimler yapılırken köprülere ait kemer formları ve buna bağlı olan kemer açıklığı hariç diğer tüm parametreler sabit tutulmuştur. Köprülerin açıklarının, kemer formlarının etkileri ve yükler altında meydana gelen deformasyon oranları araştırılmıştır.

Çalışma konusuyla ilgili olarak ele alınan Tarihi Geçit Köprüsü mevcut haliyle SAP2000 programında sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi için köprü ebatları belirlenmiştir. Köprü genişliği 7 metredir. Kemer kilit taşı alt kotu 7,90 metredir. Köprü yüksekliği 9 metredir. Köprü modellenirken kemerde kullanılan taş genişliği 30 santimdir. Tempan duvar kalınlığı 50 santimdir. Ebatlar köprü ile ilgili rapor ve çizimler incelenerek belirlenmiştir. Köprü uzunluğu orta açıklık ve kenar ayaklar dahil olmak üzere 28,60 metredir. Yapıya ait ebat ve ölçüler belirlendikten sonra elemanlara ve malzemelere ait Birim Hacim Ağırlıkları, Elastisite Modülü ve Poisson Oranları belirlenmiştir.

Köprü ebatları ve malzeme özellikleri belirlendikten sonra önce AutoCAD programında çizimleri yapılmış sonradan bu çizimler SAP2000 programına aktararak çalışmalara devam edilmiştir. Analiz programında yapı taşıyıcı malzeme olarak küfeki taşı yani dolu

malzeme olduğundan dolayı solid (katı) olarak oluşturulmuş ve buna göre analiz yapılmıştır. Yapıda kemer formu hariç diğer parametreler, yapıya etki eden yükler dahil olmak üzere aynı tutulmuştur. Bu modellere daha sonra 1990-2000 yılları arasında dünyanın farklı bölgelerinde gerçekleşmiş olan depremlerden Japonya'da Kobe, Türkiye'de Kocaeli ve Tayvan'daki Chichi depremlerine ait veriler köprü modellerine tanımlanarak, köprülerin farklı kemer formunda dinamik davranışlarının incelenmesi sağlanmıştır. Seçilen depremlere ait genel bilgiler aşağıda sunulmuştur.

Kocaeli Depremi, Türkiye'de Kocaeli şehrinde 17 Ağustos 1999 tarihinde meydana gelmiştir. Depremin büyüklüğü 7,6 Mw olarak belirlenmiştir. Deprem 10-15 km. odak derinliğinde ve sağ atımlı 120 km civarında bir fay hareketi ortaya çıkarmıştır. Deprem çevre iller dahil olmak üzere birçok ilden hissedilmiş olup etkisi büyük olan depremlerden biridir.

Chichi Depremi, Tayvan'da Nantou şehrinde 20 Eylül 1999 tarihinde meydana gelmiştir. Depremin büyüklüğü 7,3 Mw olarak belirlenmiştir. Depremde 100 km uzunluğunda kuzeye ve batıya doğru atım gerçekleşmiştir.

Kobe Depremi, Japonya' da Kobe şehrinde 17 Ocak 1995 tarihinde meydana gelmiştir. Depremin büyüklüğü 7,3 Mw olarak belirlenmiştir. Deprem kırığı Kobe şehrinin altına doğru ilerleyerek büyük derecede hasarlara neden olmuştur. Kobe depremi sağ yanal atımlı olarak gerçekleşmiştir.

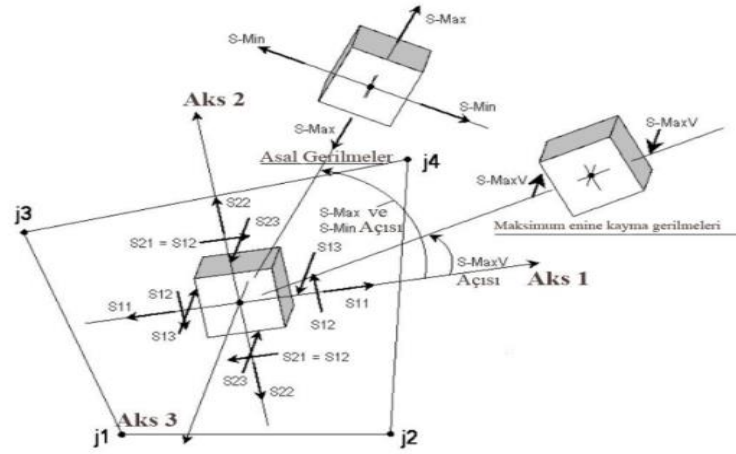
### 3.6.1. Köprünün üç farklı kemer formunda statik analizinin yapılması

Geçit köprüsü gerçeğe en yakın şekilde üç boyutlu olarak üç farklı kemer formunda modellenerek yapının düşey yükler (ölü ve hareketleri yük) altındaki davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Modellemede olası yapısal hasar durumları dikkate alınmamıştır. Köprü ölçüleri belirlenirken rölöveleri ve mevcut yapı yerinde incelenerek ölçüleri alınmıştır. Modellenen köprüye ait köprü yüksekliği, genişliği, kemer açıklığı, tempan ve kemer ölçüleri aşağıdaki Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Köprünün ebatlarına dair bilgiler

<b>KEMER GEOMETRİSİ</b>			
<b>Ebatları</b>	<b>Basık Kemer</b>	<b>Dairesel Kemer</b>	<b>Sivri Kemer</b>
Yükseklik (m)	9,0	9,0	9,0
Genişlik (m)	7,0	7,0	7,0
Uzunluk (m)	28,6	28,6	28,6
Kemer Alt Kotu (m)	7,9	7,9	7,9
Kemer Genişliği (m)	0,3	0,3	0,3
Tempan Genişliği (m)	0,5	0,5	0,5
Kemer Açıklığı (m)	23,6	15,8	12

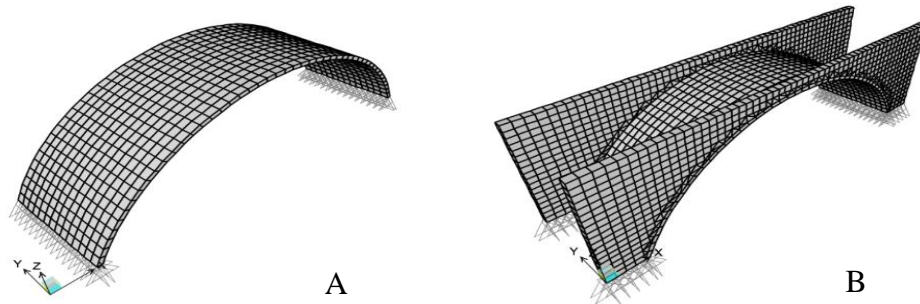
Alınan ölçüler AutoCAD programında çizilmiş ve daha sonra SAP2000 programına veriler aktarılmıştır. SAP 2000 programında kabuk elemanlar kullanılarak modeller oluşturulmuştur. Bu modellerde daha sonra statik ve dinamik analizler sonucu oluşan yer değiştirmeler ve gerilmeler incelenmiştir. Kabuk elemanlarda oluşan S11, S22, S33 basınç ve çekme gerilmeleri incelenmiştir. Ayrıca S-Max ve S-Min en büyük çekme ve basınç gerilmeleri de incelenmiştir. Bu gerilmelerin SAP2000 programındaki karşılıkları aşağıda Şekil 3.42’de görülmektedir.



**Şekil 3.42.** SAP2000 programı kabuk elemanlarda oluşan gerilmeler

Kemer formu ilk olarak köprünün mevcut formu olan basık kemer formunda oluşturulmuştur. Kemer genişliği 30 cm olarak alınmıştır. Kemerde malzeme özellikleri olarak birim hacim ağırlığı 2,1 g/cm<sup>3</sup> olarak alınmıştır. Elastisite modülü 11250 MPa olarak alınmıştır.

Tempan duvar genişliği 50 cm alınmıştır. Köprünün tempan duvar yapımında kullandığı malzeme özellikleri olarak malzeme incelemesindeki sonuçlardan dolayı daha önce tanımlanan birim hacim ağırlığı 2,1 g/cm<sup>3</sup> olarak alınmıştır. Elastisite modülü 11250 MPa olarak alınmıştır. Kemer, tempan duvar ve dolgu olmak üzere üç farklı dayanım ve özelliklere sahip malzemeler tanımlanmıştır. Köprünü kemer formu ve tanımlanan tempan duvarı Şekil 3.43'deki gibidir.



**Şekil 3.43.** Köprünün a) kemer b) tempan ve basık kemer formu birlikte görüntüsü

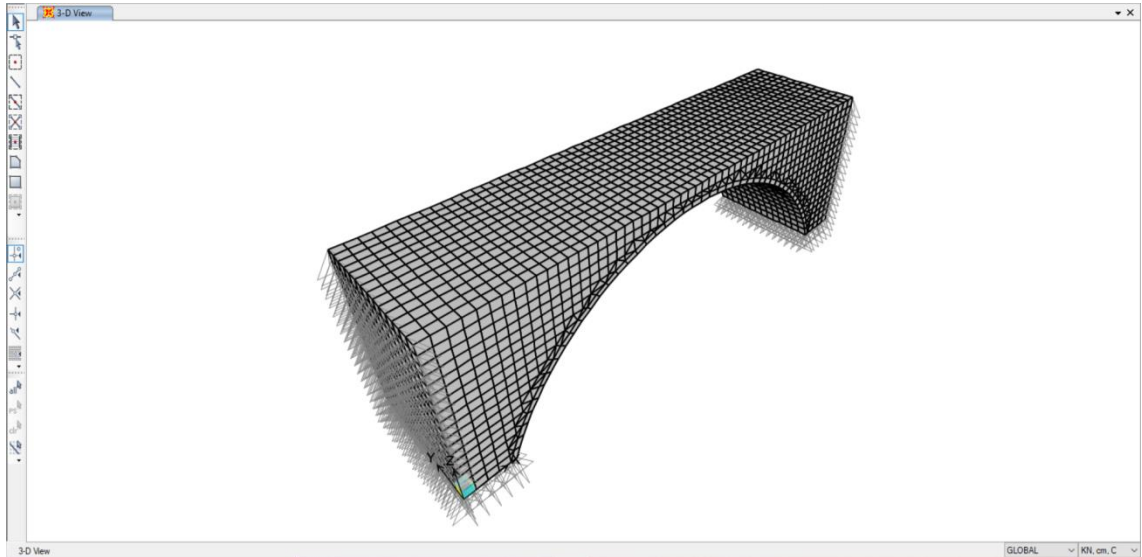


Birim hacim ağırlıkları, basınç dayanımları, Elastisite Modülleri ve Poisson Oranları olmak üzere üç farklı yapı malzemesi değerleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Malzeme özellikleri tablosu

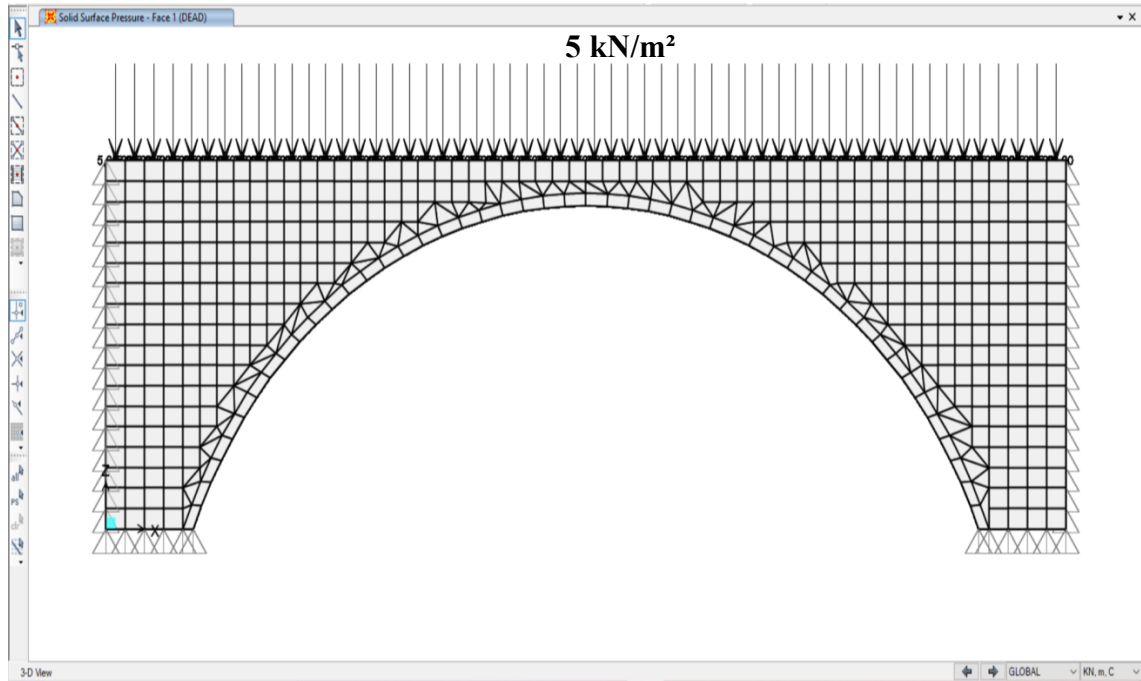
Malzeme Özellikleri	Tempan Duvar	Kemer	Dolgu
Birim Hacim Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2,1	2,1	1,8
Elastisite Modülü (MPa)	11250	11250	3000
Poisson Oranı	0,2	0,2	0,2

Malzeme tanımlamalarından sonra bölünmüş çubuk eleman parçaları, yönleri aynı olacak şekilde birbirine en yakın alanlara dönüştürülmüştür. Daha sonra çubuk elemanlar kaldırılmıştır. Birbirlerine eşit olan alanlar gerek kemer elemanda gerekse tempan duvarda derinlik verilerek solid (katı) elemana çevrilmiştir. Tempan duvar 50 cm derinlikle katı elemana dönüştürülmüştür. Kemerini, tempan duvarını, dolgusu ve mesnet tanımlaması tamamlanan köprü modeli Şekil 3.44’de görülmektedir.



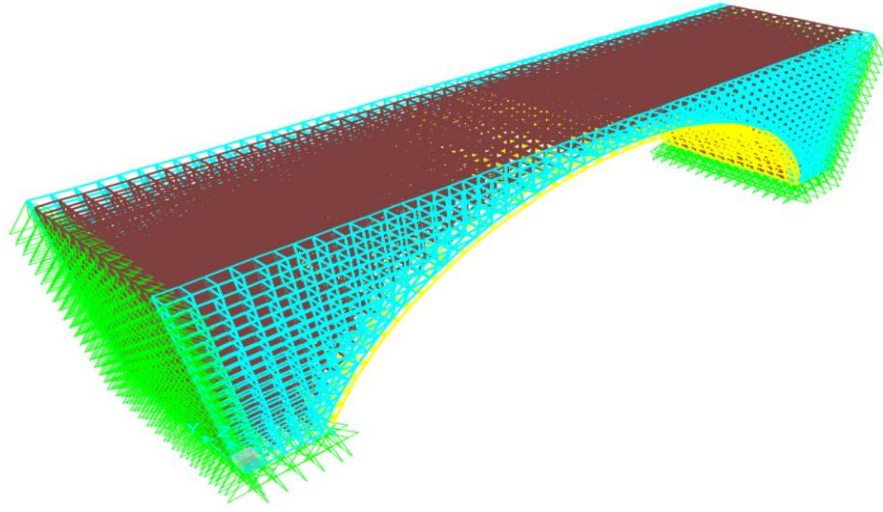
**Şekil 3.44.** Köprünün basık kemer formunda tempan duvar ve dolgu tanımlanmış hali

Kemere 50 cm derinlik verilmiş sonrasında köprü genişliğine karşılık gelen 7 metre boyunca kemer tanımlanmıştır. Tempan duvarları diğer cephede de tanımlanmıştır. Böylece hem köprü ayaklarıyla tempan duvar hem de kemer tanımlanmıştır. Daha önce malzeme özellikleri tanımlanan dolgu da tempan duvarlar arasında ve kemer formu üzerinde tanımlanarak köprü modellemesi bitirilmiştir. Köprü yüzeyi seçilerek her birim alana denk gelecek şekilde hareketli ve ölü yük olmak üzere ayrı ayrı 5 kN/m<sup>2</sup> yük tanımlanmıştır. Köprü üst yüzeyinin tamamında tanımlanan hareketli ve ölü yükler Şekil 3.45’de görülmektedir. Modelleme sonrası köprü ayakları ve toprağa temas ettiği yan yüzeyleri de sabit mesnet olarak tanımlanmıştır.



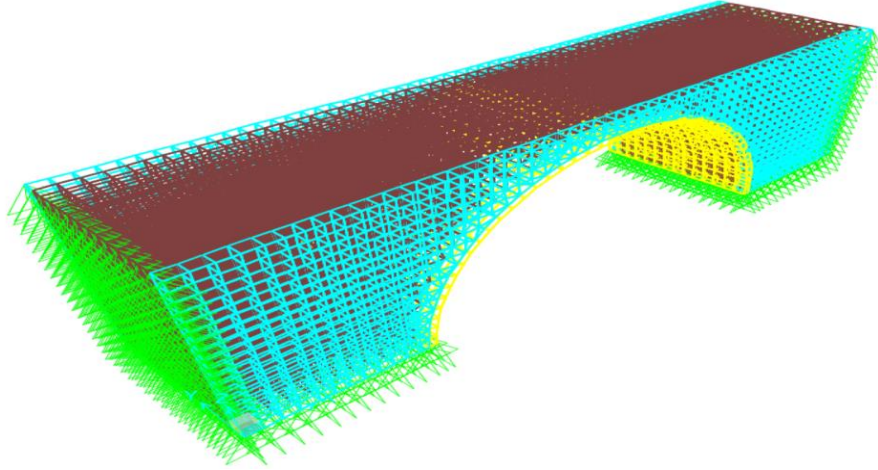
**Şekil 3.45.** Köprü üzerindeki sabit ve hareketli yüklerin tanımlanmış hali

Basık kemer formunda modellenmesi tamamlanan köprünün daha önce köprüdeki yapı elemanları kendi malzeme özelliklerine göre farklı şekilde tanımlanmış olduğu görsel Şekil 3.46’da görülmektedir. Modelleme de izlenen yol ve yöntemler aynı şekilde aynı ölçülerde sadece kemer formu değiştirilerek dairesel ve sivri kemer formunda da modellenmiştir.



**Şekil 3.46.** Köprünün basık kemer formunda, seçilmiş olan farklı malzemeler altındaki görüntüsü

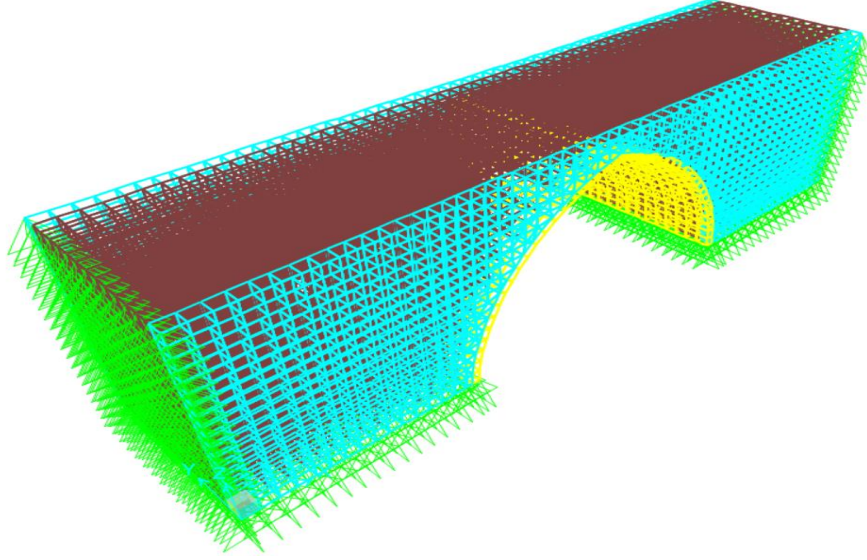
Basık kemer formuyla modellemeden sonra yine kemer formu hariç tüm parametreler aynı tutularak daha önce tanımlanmış ve malzeme özellikleri aynı alınarak Dairesel Kemer formu geometrisinde SAP2000 programında modellenmiştir. Köprünün dairesel formunda modellenmesi Şekil 3.47’de görülmektedir.



**Şekil 3.47.** Köprünün dairesel kemer formunda, seçilmiş olan farklı malzemeler altındaki görüntüsü

Son kemer formu olarak yine aynı malzeme özellikleri ve dayanımları kullanılarak köprü ebat ve parametreleri kemer formu hariç sabit şekilde aynı tutularak Sivri Kemer Formu

geometrisinde SAP2000 programında köprü modellenerek analiz edilmiştir. Köprü'nün sivri kemer formunda modellenmesi Şekil 3.48'de görülmektedir.



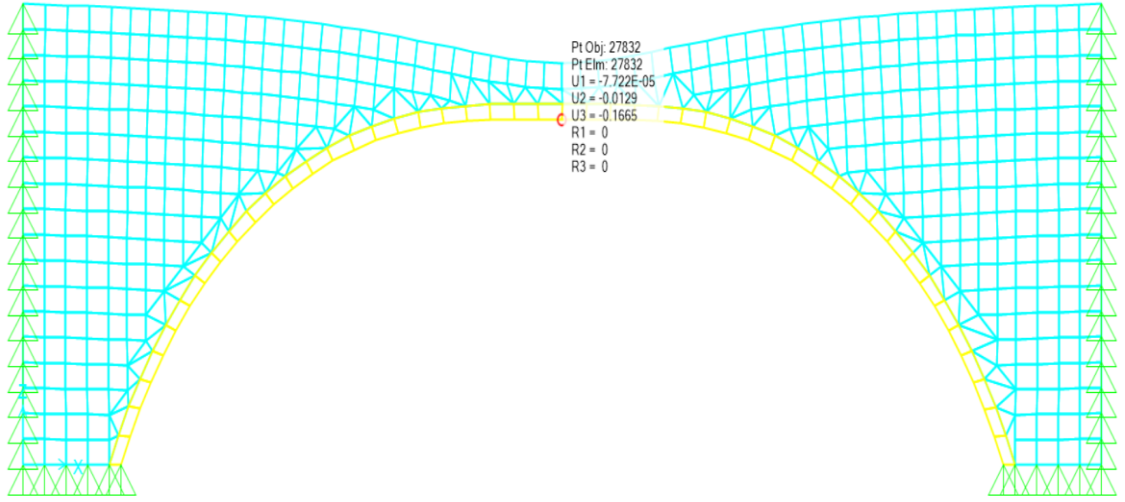
**Şekil 3.48.** Köprü'nün sivri kemer formunda, seçilmiş olan farklı malzemeler altındaki görüntüsü

### 3.6.2. Köprü formlarının sabit ve hareketli yükler altındaki davranışları

Basık, dairesel ve sivri kemer formları SAP2000 programı ile sabit ve hareketli yükler altında analiz edilmiştir. Modellenen farklı kemer formlarındaki köprü'nün, sabit ve hareketli yükler altında meydana gelen yer değiştirmeler, minimum ve maksimum gerilmeler üç farklı kemer formunda ayrı ayrı incelenmiş ve bu elde edilen bilgiler görsellerden yararlanılarak aşağıda belirtilmiştir.

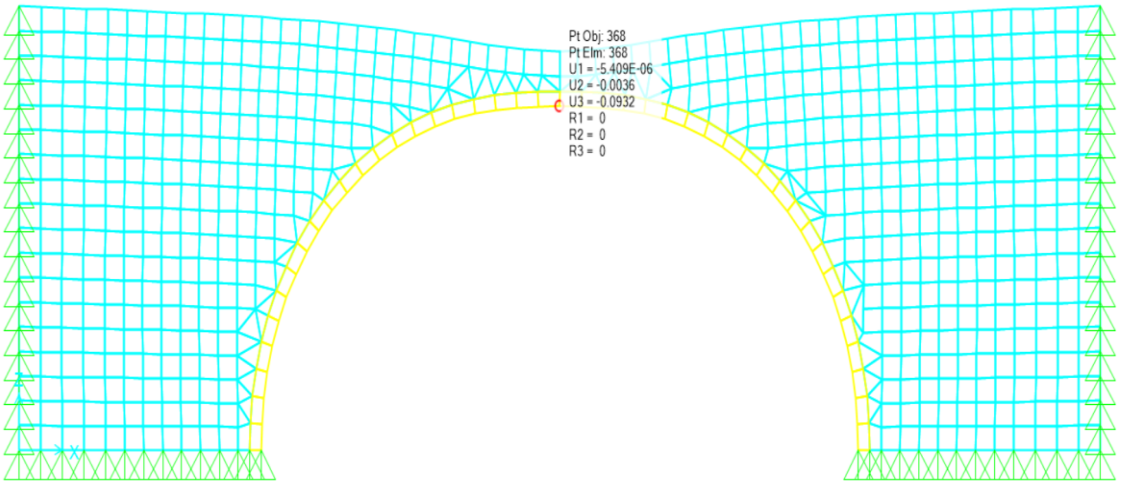
#### Yer Değiştirmelerin İncelenmesi

Modellemesi yapılan köprü formlarında gözlemlenen şekil değiştirmelerinde; U1, U2, U3 üç yöndeki yer değiştirmeleri göstermektedir. Sırasıyla x (yatay), y doğrultusundaki ve z (düşey) yöndeki yer değiştirmeleri göstermektedir. Yatay yöndeki (z yönü) yer değiştirme miktarları incelendiğinde, köprü'nün basık kemer formunda orta kilit taşı bölgesinde 0,17 cm düşey yönde yer değiştirme meydana geldiği Şekil 3.49'da görülmektedir.



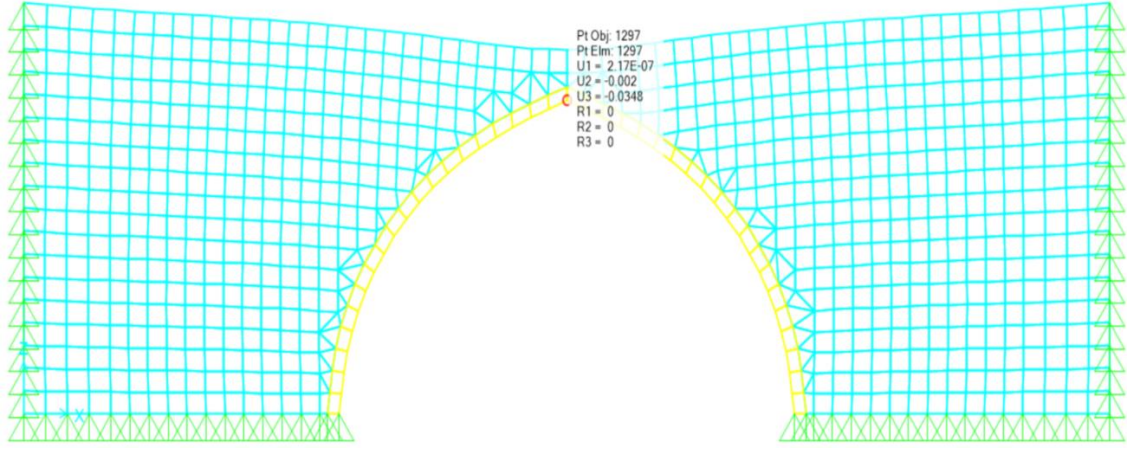
**Şekil 3.49.** Basık kemer formunda oluşan üç yöndeki yer değiştirmeler (cm)

Dairesel kemer formunda modellenen köprüün sabit ve hareketli yükler altında köprüde meydana gelen yer değiştirmeler incelendiğinde, düşey yönü (z yönü) 0,093 cm yer değiştirdiği tespit edilmiştir. Buna ait görsel Şekil 3.50’de sunulmuştur.



**Şekil 3.50.** Dairesel kemer formunda oluşan üç yöndeki yer değiştirmeler (cm)

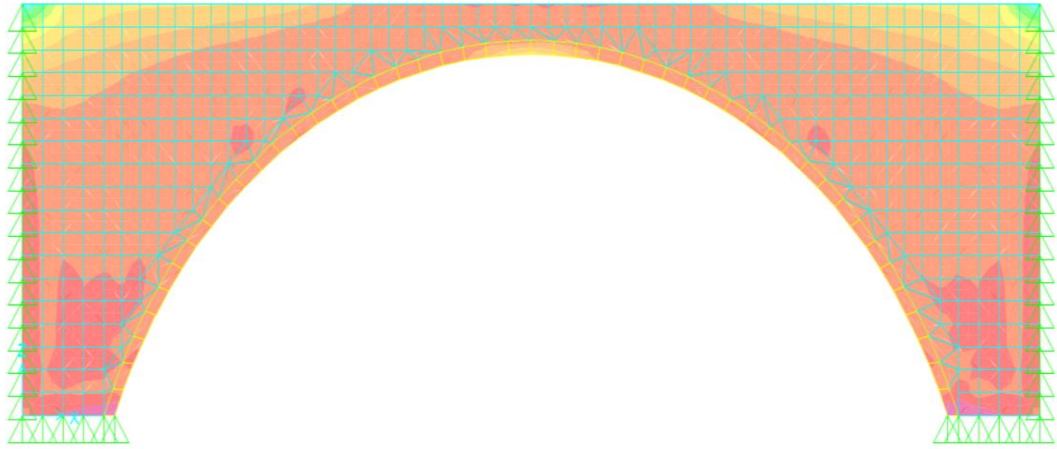
Köprü sivri kemer formunda sabit ve hareketli yükler altında düşey yönde 0,035 cm yer değiştirme meydana geldiği görülmüştür. Buna ait görsel Şekil 3.51’de sunulmaktadır.



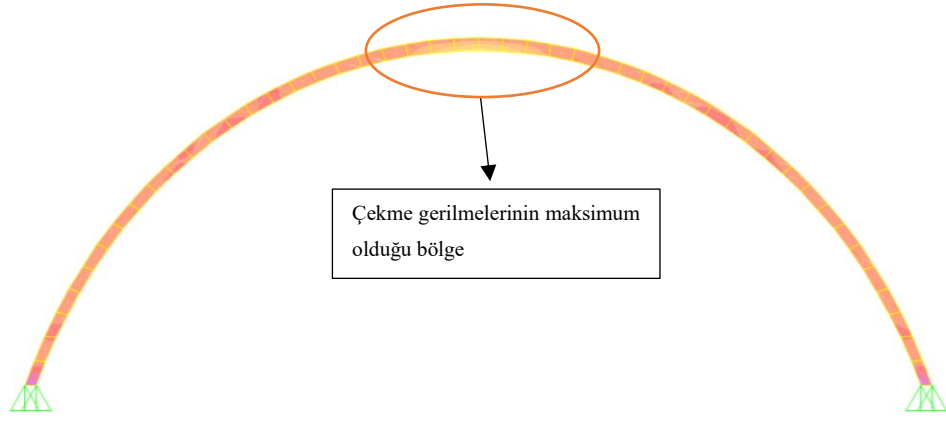
**Şekil 3.51.** Sivri kemer formunda oluşan üç yöndeki yer değiştirmeler (cm)

### **Maksimum ve minimum gerilmelerin incelenmesi**

Sabit ve hareketli yükler altında basık, dairesel ve sivri kemer formlarında oluşan maksimum ve minimum asal gerilmeler incelenmiştir. İncelemeler tüm köprü formlarında ve ayrıca kemer özelinde incelenmiştir. Basık kemerde tek açıklıkta oluşan maksimum asal gerilmeler incelendiğinde, çekme gerilmelerinin köprü kemerinin alt orta bölgesinde en yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Basık kemer formunda maksimum asal gerilmeler Şekil 3.52’de, kemer özelindeki maksimum asal gerilmeler Şekil 3.53’de görülmektedir.

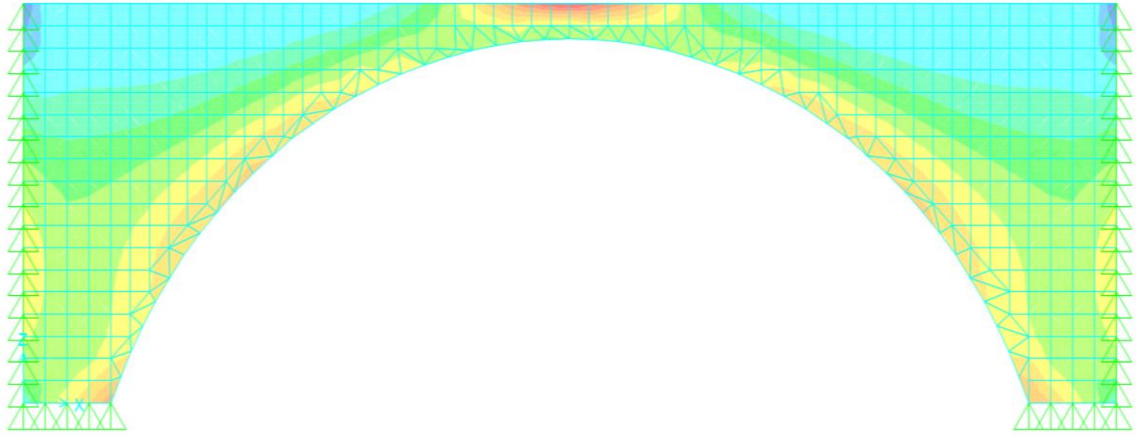


**Şekil 3.52.** Basık kemer formundaki maksimum asal gerilmeler

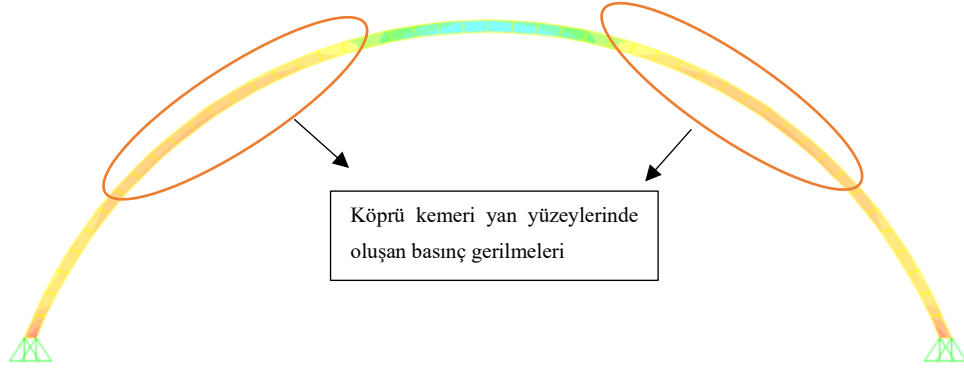


**Şekil 3.53.** Basık kemerdeki maksimum asal gerilmeler

Basık kemer formunda minimum asal gerilmeler incelendiğinde, köprü kemerinin yan alt yüzeylerinin büyük bir alanında basınç kuvvetinin hâkim olduğu görülmektedir. Basınç gerilmelerinin maksimum değerinin köprü orta bölgelerinde ve köprü mesnetlerinde olduğu görülmektedir. Basık kemer formunda minimum asal gerilmeler Şekil 3.54’de, kemer üzerinde gösterilen minimum asal gerilmeler Şekil 3.55’de gösterilmiştir.

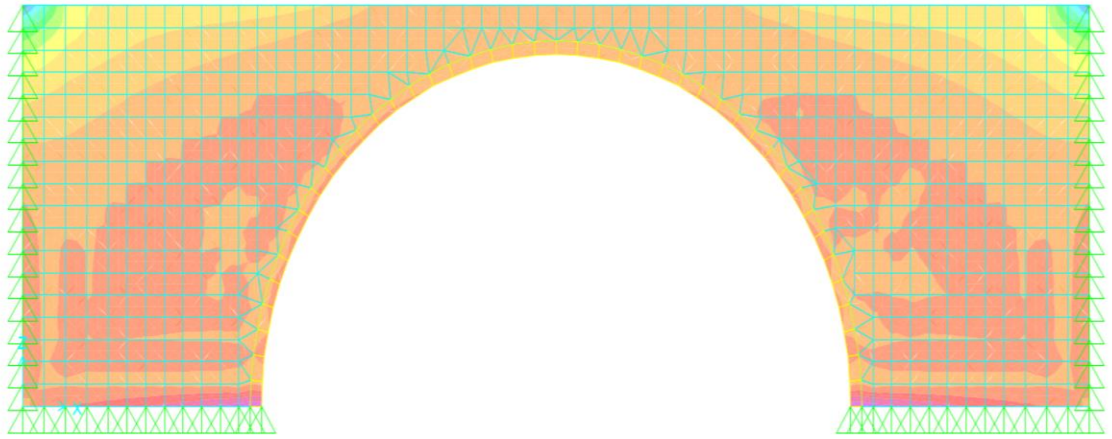


**Şekil 3.54.** Basık kemer formundaki minimum asal gerilmeler



**Şekil 3.55.** Basık kemerdeki minimum asal gerilmeler

Dairesel kemer formunda maksimum asal gerilmeleri incelediğimiz zaman tüm kemer formunda çekme gerilmelerinin basık kemere göre oldukça azaldığı görülmektedir. Gerilmelere ait köprü görselleri Şekil 3.56'da köprü formunun tamamını 3.57'de kemere ait maksimum asal gerilmeler görülmektedir.



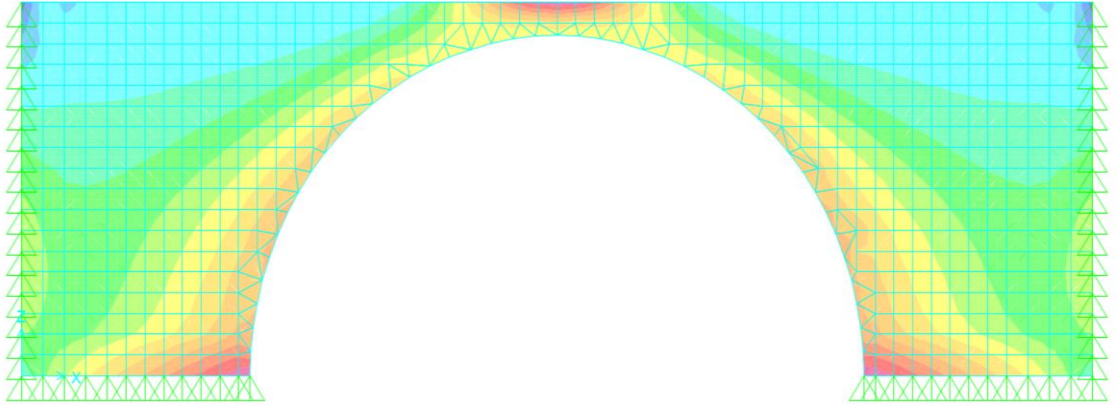
**Şekil 3.56.** Dairesel kemer formundaki maksimum asal gerilmeler



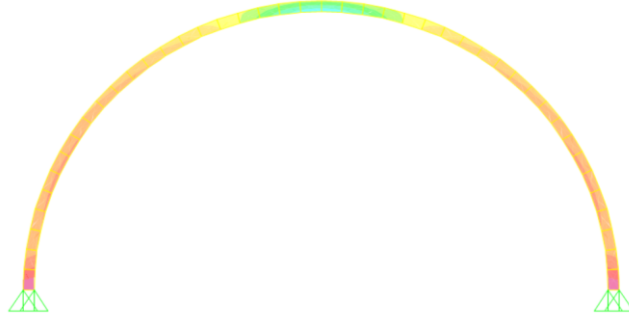


**Şekil 3.57.** Dairesel kemerdeki maksimum asal gerilmeler

Dairesel kemerin minimum asal gerilmeleri incelendiği zaman, kemerin orta alt bölgesi hariç olmak üzere diğer tüm bölgelerde basınç gerilmelerin hâkim olduğu ve bu gerilmelerin mesnetlere doğru üniform şekilde arttığı görülmüştür. Şekil 3.58’de köprü formunun tamamı 3.59’da kemere ait minimum asal gerilmeler gösterilmiştir.

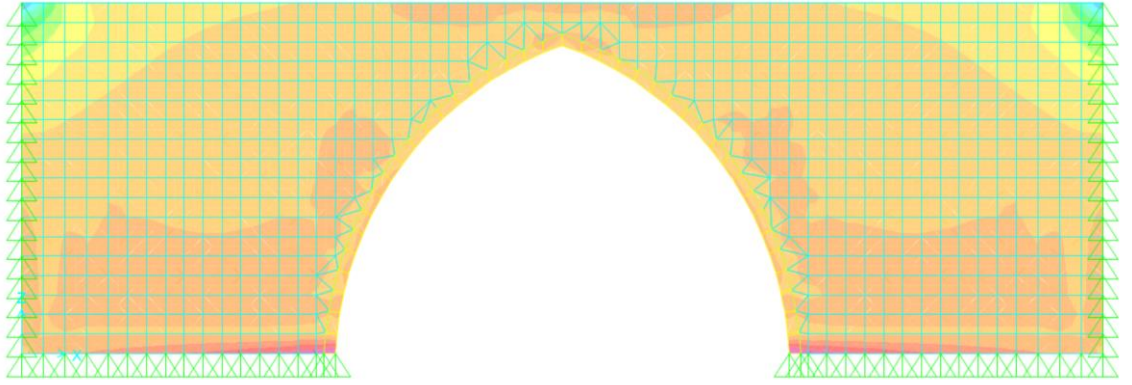


**Şekil 3.58.** Dairesel kemer formundaki minimum asal gerilmeler

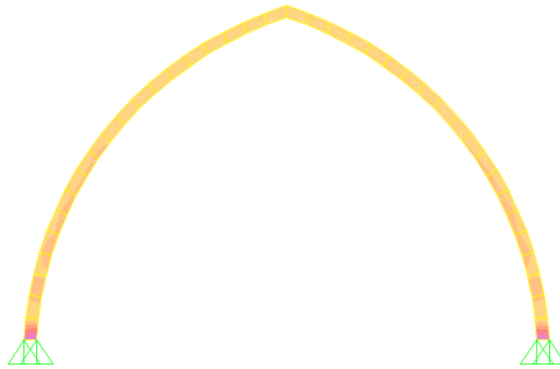


**Şekil 3.59.** Dairesel kemerdeki minimum asal gerilmeler

Sivri kemer formunda ise, asal gerilmeleri incelediğimiz zaman tüm kemer formunda çekme kuvvetinin oluşmadığı görülmektedir. Şekil 3.60 ve Şekil 3.61’de gösterilmiştir.

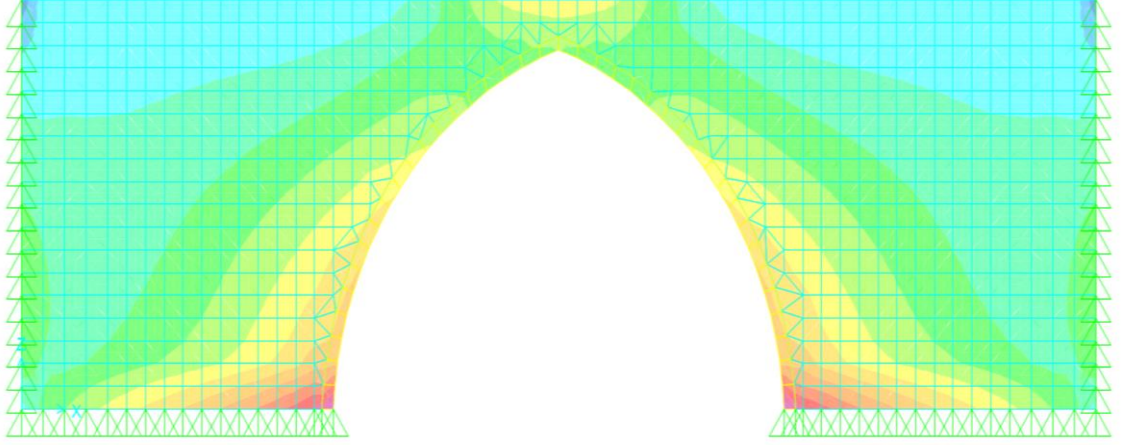


**Şekil 3.60.** Sivri kemer formundaki maksimum asal gerilmeler

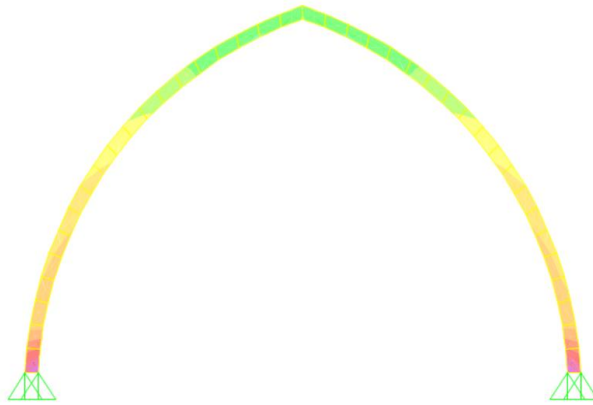


**Şekil 3.61.** Sivri kemerdeki maksimum asal gerilmeler

Sivri kemer formundaki minimum asal incelendiğinde, köprünün tamamının basınç gerilmeleri altında olduğu görülmüştür. Basınç gerilmelerinin köprü kemerinde alt kısımlara doğru üniform bir şekilde arttığı görülmektedir. Şekil 3.62’de köprü formunun tamamı 3.63’de kemere ait minimum asal gerilmeler gösterilmiştir.



**Şekil 3.62.** Sivri kemer formundaki minimum asal gerilmeler

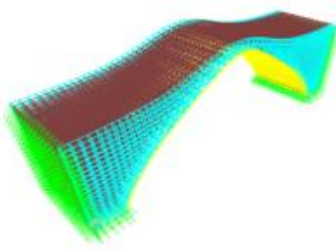


**Şekil 3.63.** Sivri kemerdeki minimum asal gerilmeler

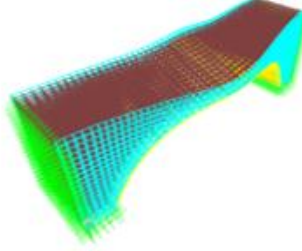
### 3.6.3. Kemer formlarına ait modal analizler ve kütle katılım oranları

Kemer formlarına ait modal analizler kütle katılım oranlarının %95 ve üzerinde olacak şekilde en az 40 mod alınarak yapılmıştır. Köprü formlarına ait ilk üç mod ve bunlara ait frekans değerleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 3.64).

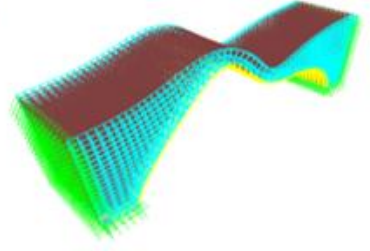
#### Basık Kemer



Mod 1 f:18,35 Hz.

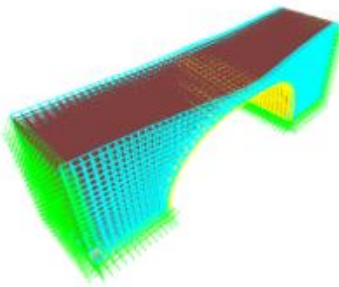


Mod 2 f:18,73 Hz.

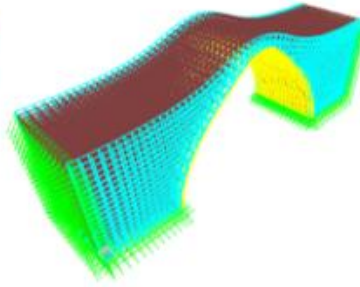


Mod 3 f:25,33 Hz.

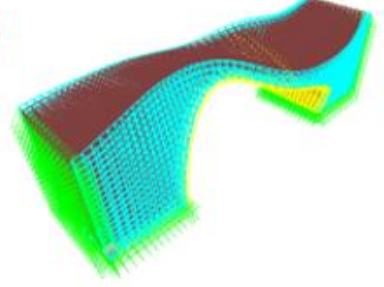
#### Dairesel Kemer



Mod 1 f:17,58 Hz.

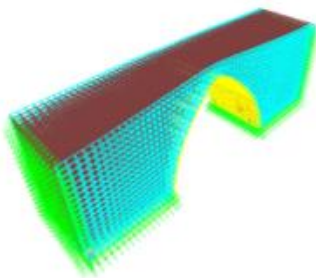


Mod 2 f:23,28 Hz.

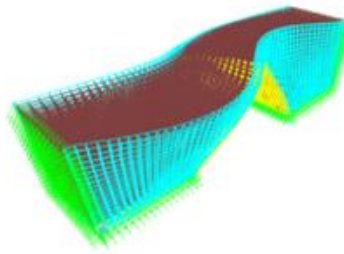


Mod 3 f:27,73 Hz.

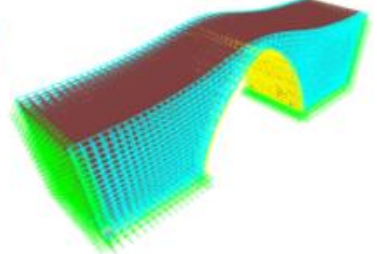
#### Sivri Kemer



Mod 1 f:20,83 Hz.



Mod 2 f:30,29 Hz.



Mod 3 f:35,99 Hz.

Şekil 3.64. Tüm kemer formlarında ilk üç mod ve frekans değerleri

İlk 40 moddaki frekans, periyod ve kütle katılım oranları aşağıdaki çizelgelerde basık, dairesel ve sivri kemer formuna ait olmak üzere aşağıdaki çizelgelerde gösterilmiştir.

**Çizelge 3.3.** Basık kemer formuna ait frekans, periyod ve kütle katılım oranları

Mod No	Periyod Saniye	Frekans Hz.	UX	UY	UZ	TOP. UX	TOP. UY	TOP. UZ
1	0,054492	18,351412	6,625E-09	1,047E-17	0,272	6,63E-09	1,05E-17	0,272
2	0,053378	18,734198	0	0,428	7,19E-18	6,63E-09	0,428	0,272
3	0,039482	25,328015	0,041	1,069E-19	1,42E-06	0,041	0,428	0,272
4	0,034191	29,247799	7,966E-20	0,033	1,81E-19	0,041	0,461	0,272
5	0,03172	31,526289	1,835E-20	6,445E-07	4,8E-20	0,041	0,461	0,272
6	0,026379	37,908281	2,38E-08	0	0,245	0,041	0,461	0,517
7	0,024825	40,282197	2,775E-20	3,867E-06	1,52E-18	0,041	0,461	0,517
8	0,020774	48,136289	1,287E-19	0,095	2,15E-19	0,041	0,556	0,517
9	0,019288	51,844736	0,427	4,346E-19	8,14E-07	0,468	0,556	0,517
10	0,019151	52,217745	0,077	3,153E-17	1,26E-05	0,545	0,556	0,517
11	0,018924	52,842867	7,195E-18	0,149	6,35E-20	0,545	0,705	0,517
12	0,01521	65,745645	3,665E-17	6,417E-07	4,41E-13	0,545	0,705	0,517
13	0,015016	66,596803	4,437E-07	4,632E-17	0,147	0,545	0,705	0,664
14	0,014885	67,181787	1,435E-08	1,335E-16	0,049	0,545	0,705	0,713
15	0,013989	71,483028	4,294E-07	7,213E-17	0,024	0,545	0,705	0,737
16	0,012696	78,763106	6,697E-13	0,0004301	1,18E-13	0,545	0,705	0,737
17	0,012058	82,931065	0,017	7,031E-12	5,28E-07	0,562	0,705	0,737
18	0,011529	86,739113	3,862E-10	0,117	8,62E-14	0,562	0,822	0,737
19	0,011449	87,340642	0,0005949	8,305E-08	2,03E-08	0,563	0,822	0,737
20	0,010013	99,871821	4,508E-08	3,082E-10	0,073	0,563	0,822	0,811
21	0,009638	103,755543	0,000263	8,764E-08	0,002021	0,563	0,822	0,813
22	0,009607	104,095932	0,134	2,612E-09	7,96E-06	0,697	0,822	0,813
23	0,0086	116,283232	0,001251	0,007314	2,7E-06	0,698	0,829	0,813
24	0,008479	117,939763	0,02	0,001049	2,2E-06	0,718	0,83	0,813
25	0,007962	125,598816	0,0002063	0,047	2,74E-05	0,718	0,878	0,813
26	0,007775	128,613350	5,301E-07	0,0001185	0,018	0,718	0,878	0,831
27	0,00721	138,687971	0,035	0,0006786	0,000639	0,753	0,878	0,832
28	0,007167	139,524669	0,0005573	6,212E-05	0,031	0,754	0,878	0,863
29	0,006537	152,984360	0,03	0,004742	2,72E-06	0,783	0,883	0,863
30	0,006092	164,144788	0,005847	0,033	6,63E-05	0,789	0,916	0,863
31	0,005823	171,719683	1,101E-05	7,745E-05	0,034	0,789	0,916	0,896
32	0,005362	186,492680	0,075	0,001389	1,17E-06	0,864	0,918	0,896
33	0,00454	220,252605	7,673E-07	0,0002138	0,038	0,864	0,918	0,934
34	0,004433	225,574887	0,00837	0,036	0,000147	0,873	0,954	0,934
35	0,004098	243,998240	0,033	0,007278	4,38E-05	0,906	0,961	0,934
36	0,003188	313,683439	8,089E-07	1,268E-05	0,037	0,906	0,961	0,971
37	0,002871	348,252057	0,046	0,002319	2,72E-07	0,951	0,964	0,971
38	0,002534	394,582325	0,002347	0,034	7,96E-06	0,954	0,998	0,971
39	0,001882	531,220711	1,736E-05	1,358E-06	0,027	0,954	0,998	0,998
40	0,001617	618,581252	0,043	6,771E-05	1,39E-06	0,997	0,998	0,998

**Çizelge 3.4.** Dairesel kemer formuna ait frekans, periyod ve kütle katılım oranları

Mod No	Periyod Saniye	Frekans Hz.	UX	UY	UZ	TOP. UX	TOP. UY	TOP. UZ
1	0,056873	17,583023	0	0,434	0	0	0,434	0
2	0,042947	23,284313	3,15E-07	0	0,233	3,15E-07	0,434	0,233
3	0,036055	27,735447	0	6,99E-07	0	3,15E-07	0,434	0,233
4	0,03557	28,113683	0,11	0	4,84E-06	0,11	0,434	0,234
5	0,029502	33,896270	0	0,049	0	0,11	0,483	0,234
6	0,024924	40,121781	2,21E-08	0	0,214	0,11	0,483	0,448
7	0,023567	42,433096	0	5,57E-06	0	0,11	0,483	0,448
8	0,023394	42,746285	0	0,155	0	0,11	0,639	0,448
9	0,022011	45,430892	0,47	0	7,4E-07	0,58	0,639	0,448
10	0,01903	52,548671	0,019	0	4,38E-07	0,599	0,639	0,448
11	0,018874	52,984257	0	0,085	0	0,599	0,724	0,448
12	0,016845	59,364355	3,68E-08	0	0,115	0,599	0,724	0,563
13	0,015933	62,764181	0	4,91E-06	0	0,599	0,724	0,563
14	0,015733	63,562478	1,61E-07	0	0,142	0,599	0,724	0,704
15	0,015293	65,389535	1,5E-07	0	0,023	0,599	0,724	0,728
16	0,013861	72,143263	0	0,043	0	0,599	0,766	0,728
17	0,013049	76,632966	0,025	1,11E-19	4,32E-06	0,624	0,766	0,728
18	0,012755	78,399379	2,33E-19	0,069	0	0,624	0,835	0,728
19	0,01212	82,510142	0,013	4,36E-18	1,55E-07	0,637	0,835	0,728
20	0,01155	86,583055	0,104	8,79E-19	2,8E-08	0,742	0,835	0,728
21	0,011013	90,804794	2,5E-07	2,47E-20	0,035	0,742	0,835	0,762
22	0,010229	97,759165	4,48E-07	3,9E-18	0,013	0,742	0,835	0,775
23	0,009499	105,274160	6,96E-07	5,79E-15	0,018	0,742	0,835	0,793
24	0,009484	105,445942	5,99E-14	0,041	2,14E-15	0,742	0,877	0,793
25	0,009333	107,144139	0,023	3E-13	1,82E-06	0,765	0,877	0,793
26	0,008807	113,540749	0,026	1,61E-13	7,48E-07	0,791	0,877	0,793
27	0,00801	124,838524	3,81E-09	1,17E-16	0,045	0,791	0,877	0,839
28	0,00785	127,389627	0,018	1,78E-12	3,7E-07	0,809	0,877	0,839
29	0,007382	135,470199	3,28E-12	0,042	1,47E-16	0,809	0,919	0,839
30	0,007012	142,616382	0,043	1,69E-12	9,86E-08	0,852	0,919	0,839
31	0,006521	153,353426	6,37E-07	1,78E-16	0,039	0,852	0,919	0,877
32	0,005669	176,386389	0,032	1,29E-12	1,57E-05	0,884	0,919	0,877
33	0,005265	189,926880	1,18E-05	6,05E-18	0,045	0,884	0,919	0,923
34	0,00517	193,412125	1,51E-12	0,043	2,73E-16	0,884	0,962	0,923
35	0,00448	223,237227	0,047	4,15E-13	2,41E-06	0,932	0,962	0,923
36	0,00361	277,046424	3,87E-06	2,52E-17	0,043	0,932	0,962	0,965
37	0,00305	327,868606	0,039	8,24E-12	3,52E-06	0,97	0,962	0,965
38	0,002965	337,299596	8,32E-12	0,036	5,28E-16	0,97	0,998	0,965
39	0,002048	488,275314	2,46E-06	1,23E-18	0,032	0,97	0,998	0,997
40	0,001778	562,461078	0,028	1,71E-14	1,13E-06	0,999	0,998	0,997

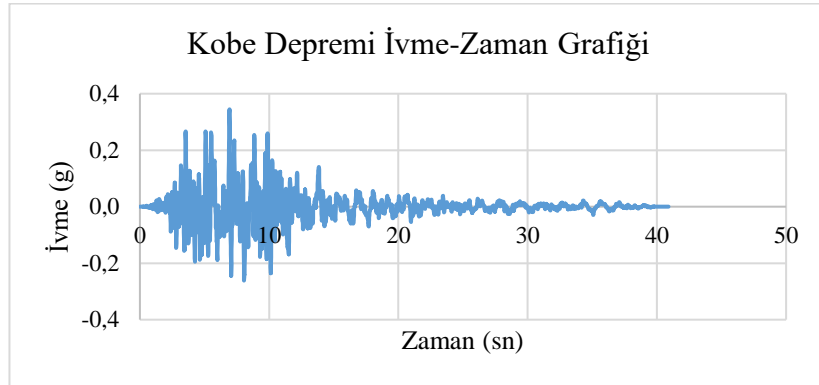
**Çizelge 3.5.** Sivri kemer formuna ait frekans, periyod ve kütle katılım oranları

Mod No	Periyod Saniye	Frekans Hz.	UX	UY	UZ	TOP. UX	TOP. UY	TOP. UZ
1	0,048005	20,831133	0	0	0,272	6,63E-09	1,05E-17	0,272
2	0,03004	33,289121	0	0,428	0	6,63E-09	0,428	0,272
3	0,027781	35,996110	0,041	0	1,421E-06	0,041	0,428	0,272
4	0,026137	38,259241	7,966E-20	0,033	1,81E-19	0,041	0,461	0,272
5	0,020687	48,339754	1,835E-20	6,445E-07	4,795E-20	0,041	0,461	0,272
6	0,019501	51,280334	2,38E-08	0	0,245	0,041	0,461	0,517
7	0,019163	52,183484	2,775E-20	3,867E-06	1,515E-18	0,041	0,461	0,517
8	0,018857	53,031618	1,287E-19	0,095	2,151E-19	0,041	0,556	0,517
9	0,018256	54,777502	0,427	4,346E-19	8,137E-07	0,468	0,556	0,517
10	0,014732	67,881087	0,077	3,153E-17	0,0000126	0,545	0,556	0,517
11	0,01416	70,621607	7,195E-18	0,149	6,351E-20	0,545	0,705	0,517
12	0,014111	70,866857	3,665E-17	6,417E-07	4,405E-13	0,545	0,705	0,517
13	0,013664	73,185780	4,437E-07	4,632E-17	0,147	0,545	0,705	0,664
14	0,011761	85,028964	1,435E-08	1,335E-16	0,049	0,545	0,705	0,713
15	0,011343	88,163465	4,294E-07	7,213E-17	0,024	0,545	0,705	0,737
16	0,010214	97,903293	6,697E-13	0,0004301	1,183E-13	0,545	0,705	0,737
17	0,010131	98,710662	0,017	7,031E-12	5,279E-07	0,562	0,705	0,737
18	0,010122	98,793363	3,862E-10	0,117	8,624E-14	0,562	0,822	0,737
19	0,009352	106,931053	0,0005949	8,305E-08	2,025E-08	0,563	0,822	0,737
20	0,008702	114,915423	4,508E-08	3,082E-10	0,073	0,563	0,822	0,811
21	0,008353	119,713227	0,000263	8,764E-08	0,002021	0,563	0,822	0,813
22	0,007985	125,233279	0,134	2,612E-09	7,955E-06	0,697	0,822	0,813
23	0,007838	127,588285	0,001251	0,007314	2,695E-06	0,698	0,829	0,813
24	0,007463	133,999231	0,02	0,001049	2,195E-06	0,718	0,83	0,813
25	0,007099	140,861660	0,0002063	0,047	0,00002737	0,718	0,878	0,813
26	0,007052	141,801357	5,301E-07	0,0001185	0,018	0,718	0,878	0,831
27	0,00639	156,501988	0,035	0,0006786	0,000639	0,753	0,878	0,832
28	0,006133	163,059219	0,0005573	0,00006212	0,031	0,754	0,878	0,863
29	0,005991	166,923904	0,03	0,004742	2,716E-06	0,783	0,883	0,863
30	0,005361	186,541031	0,005847	0,033	0,00006631	0,789	0,916	0,863
31	0,005092	196,401288	0,00001101	0,00007745	0,034	0,789	0,916	0,896
32	0,004496	222,398277	0,075	0,001389	1,167E-06	0,864	0,918	0,896
33	0,004366	229,062664	7,673E-07	0,0002138	0,038	0,864	0,918	0,934
34	0,003933	254,229784	0,00837	0,036	0,0001473	0,873	0,954	0,934
35	0,003437	290,936924	0,033	0,007278	0,00004376	0,906	0,961	0,934
36	0,002737	365,316340	8,089E-07	0,00001268	0,037	0,906	0,961	0,971
37	0,002497	400,466081	0,046	0,002319	2,72E-07	0,951	0,964	0,971
38	0,002415	414,109091	0,002347	0,034	0,00000796	0,954	0,998	0,971
39	0,001555	643,223364	0,00001736	1,358E-06	0,027	0,954	0,998	0,998
40	0,00143	699,472033	0,043	0,00006771	1,387E-06	0,997	0,998	0,998

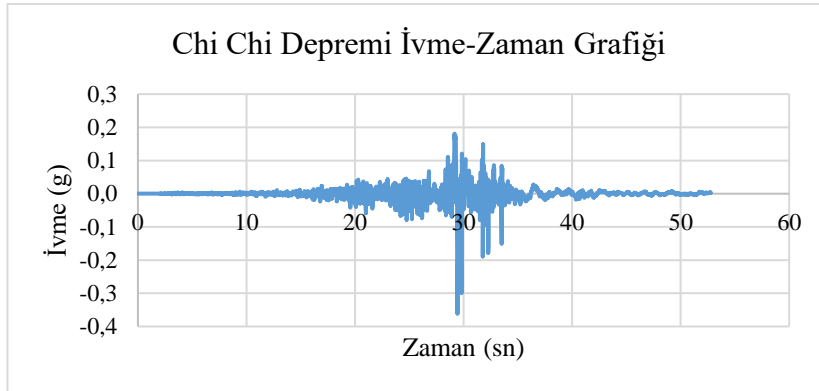
### 3.6.3. Depremlerin etkisinde yer değiştirmelerin incelenmesi

Köprü modellerine dünyanın farklı yerlerinde meydana gelmiş 2000 yılı öncesi büyüklüğü ve etkisi yüksek üç ayrı depremi tanımlanmıştır. Bunlar; 1995 yılında Japonya’ da meydana gelen 7,2 Mw büyüklüğündeki sağ yanal atımlı Kobe Depremi, 1999 yılında 7,3 Mw büyüklüğünde Tayvan’ da meydana gelen ters atımlı Chichi Depremi ve Türkiye’de 1995 yılında meydana gelen 7,6 Mw büyüklüğündeki sağ atımlı Kocaeli Depremine ait veriler modellere ayrı ayrı tanımlanmıştır. Bu üç ayrı depremde büyüklükleri, süreleri farklı olduğunda dolayı farklı kemer formunda modellenen köprünün davranışı süre ve şiddete göre daha net görülmüş olacaktır. Köprünün bu sayede statik analizinin yanında belirlenen depremler aracılığıyla dinamik davranışlarının da incelenmesi amaçlanmıştır. Kobe depremi ivme zaman grafiği Çizelge 3.6, Chichi 3.7 ve Kocaeli depremi ivme zaman grafiği 3.8’de görülmektedir.

**Çizelge 3.6.** 1995 yılında Japonya’daki Kobe Depremi ivme-zaman grafiği

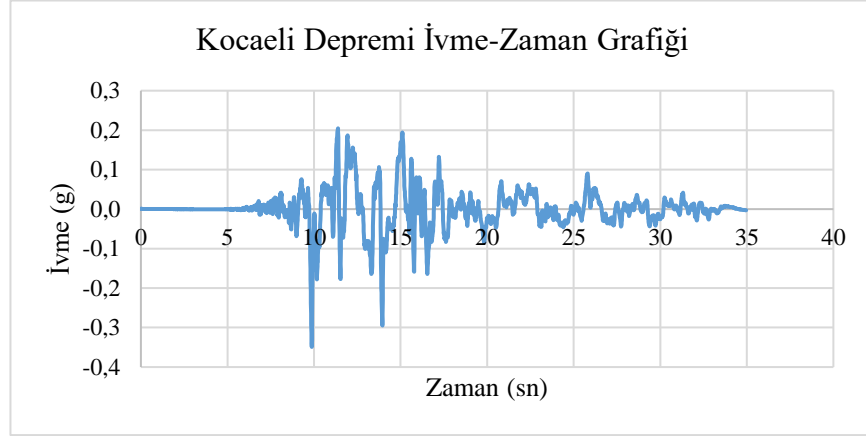


**Çizelge 3.7.** 1999 yılında Tayvan’daki Chichi Depremi ivme-zaman grafiği



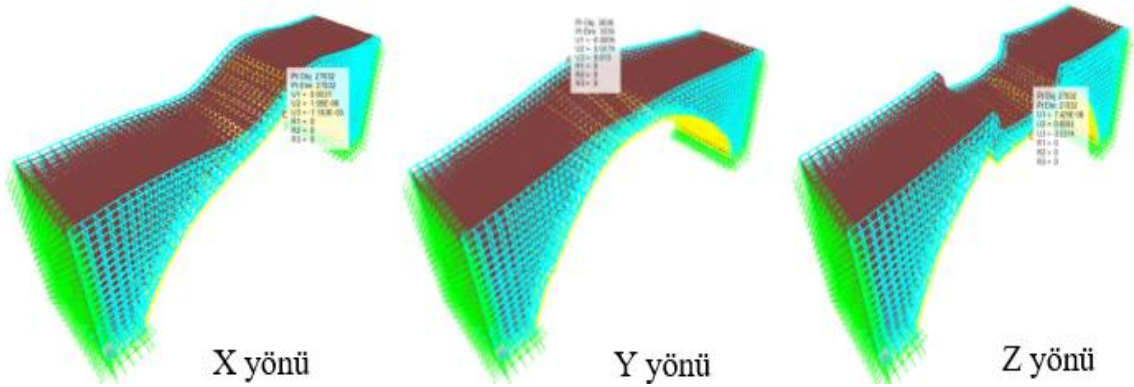


**Çizelge 3.8.** 1999 yılında Türkiye’deki Kocaeli Depremi ivme-zaman grafiği



### Chichi depremi etkisinde yer değiştirmelerin incelenmesi

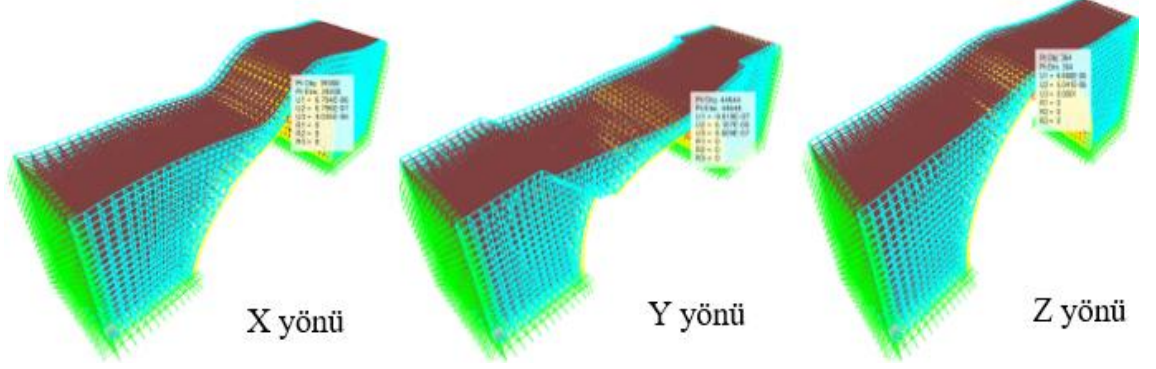
Basık kemer formundaki köprünün Chichi depremi etkisinde, x yönündeki yer değiştirme miktarının 0,0031 cm olarak gerçekleştiği görülmüştür. Aynı deprem y yönünde etkitildiğinde, y yönündeki yer değiştirme miktarının 0,0279 cm olduğu görülmüştür. Z yönünde etkitildiğinde ise yer değiştirme miktarının 0,0314 cm olduğu görülmüştür. Basık kemerde Chichi depremi etkisinde üç yönde oluşan deplasmanlara ait görsel Şekil 3.65’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.65.** Basık kemerde Chichi depremi etkisinde oluşan üç yöndeki şekil değiştirmeler

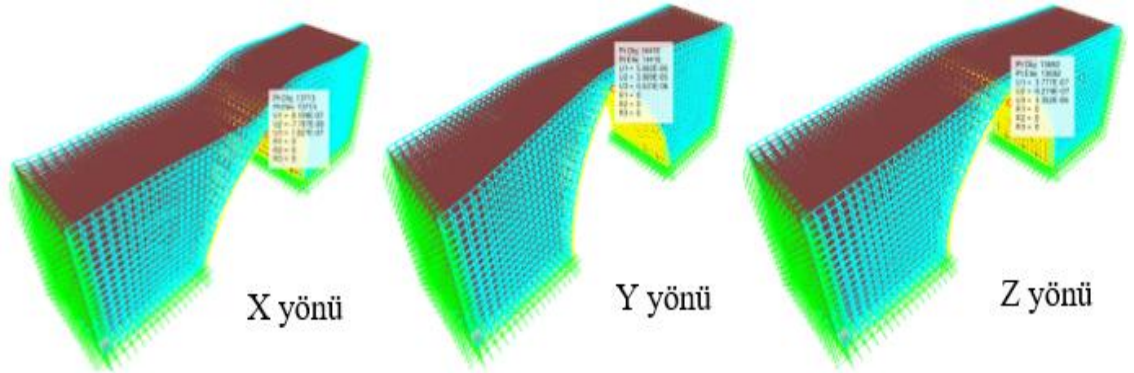
Dairesel kemer formuna Chichi depremi x yönünde etki ettirildiğinde oluşan yer değiştirme miktarı 0,000067 cm olarak gerçekleşmiştir. Y yönünde etki ettirildiğinde 0,000061 cm olarak meydana gelmiştir. Z yönünde aynı deprem etkitildiğinde ise 0,0001

cm yer değiştirme meydana gelmiştir. Kbrnn dairesel kemer formunda Chichi depremi etkisinde c ayrı yöndeki deplasmanlara ait görsel Şekil 3.66'daki gibidir.



**Şekil 3.66.** Dairesel kemerde Chichi depremi etkisinde oluşan c yöndeki Şekil değiştirmeler

Sivri kemer formuna x, y ve z yönlerinde Chichi depremi etki edildiğinde meydana gelen yer değiştirme tüm yönlerde sifira yakın olarak karşımıza kmifştır. Kbr kemerinde c yöndeki deplasmanlara ait görsel Şekil 3.67'deki gibidir.

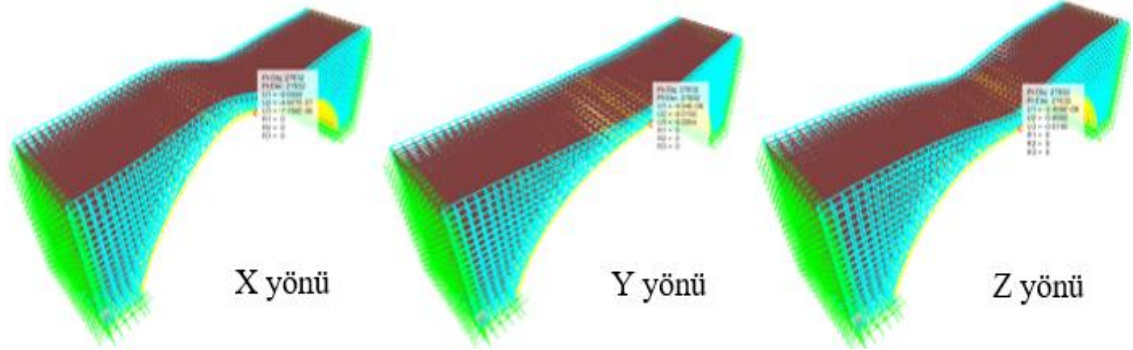


**Şekil 3.67.** Sivri kemerde Chichi depremi etkisinde oluşan c yöndeki Şekil değiştirmeler

### **Kobe Depremi Etkisinde Yer Değiştirmelerin İncelenmesi**

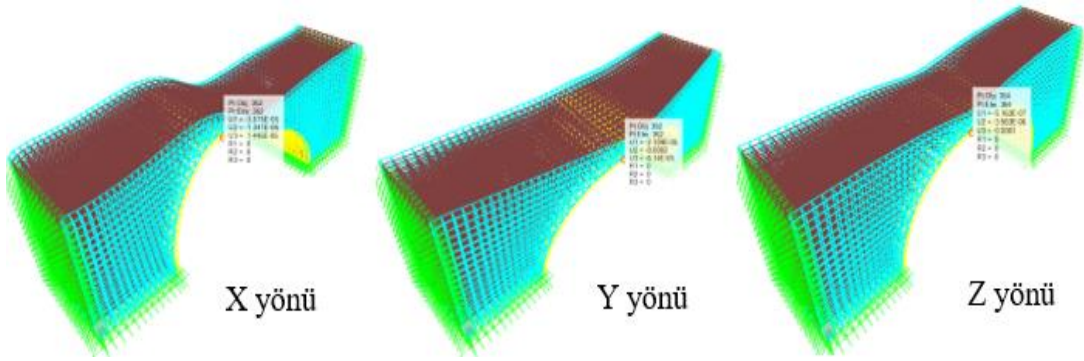
Kobe depreminin etkisinde basık kemer formunda x yönündeki yer değiştirme miktarının 0,0028 cm olduğu görülmüştür. Deprem y yönünde etkitildiğinde, y yönünde meydana gelen yer değiştirme miktarı 0,0156 cm olduğu görülmüştür. Z yönünde etkitildiğinde ise

yer değiştirme miktarının 0,0195 cm olduğu görülmüştür. Oluşan deplasmana ait görsel Şekil 3.68’de gösterilmiştir.



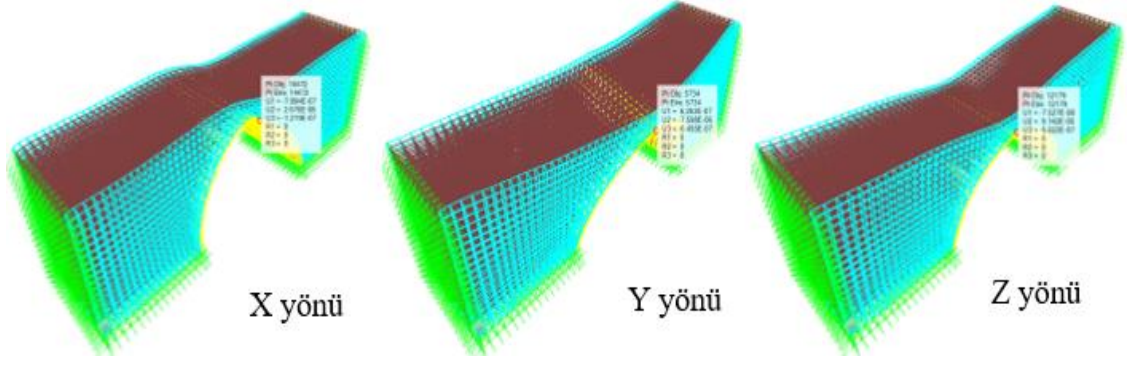
**Şekil 3.68.** Basık kemerde Kobe depremi etkisinde oluşan üç yöndeki Şekil değiştirmeler

Dairesel kemer formundaki köprüye Kobe depremi x yönünde etki ettirildiğinde 0,00036 cm, y yönünde etki ettirildiğinde 0,0002 cm, z yönünde etki ettirildiğinde ise 0,0001 cm yer değiştirme meydana gelmiştir. Köprü formunda meydana gelen üç yöndeki deplasmanlara ait görsel Şekil 3.69’daki gibidir.



**Şekil 3.69.** Dairesel kemerde Kobe depremi etkisinde oluşan üç yöndeki Şekil değiştirmeler

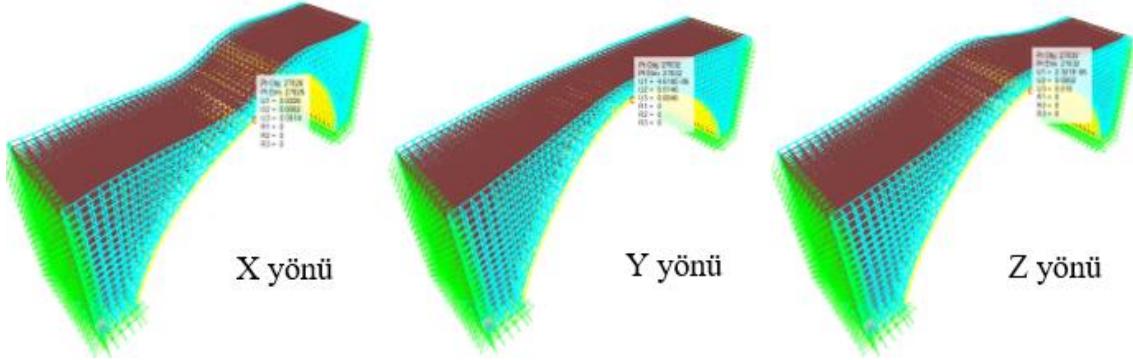
Sivri kemer formunda modellenen köprüde, Kobe depremi etkisinde kemer orta bölgesinde  yönde meydana gelen yer değiştirmelerin sifira yakın olduğu görülmektedir. Köprü kemerinde oluşan yer değiştirmeye ait görsel Şekil 3.70’de görünmektedir.



**Şekil 3.70.** Sivri kemerde Kobe depremi etkisinde oluşan üç yöndeki şekil değiştirmeler

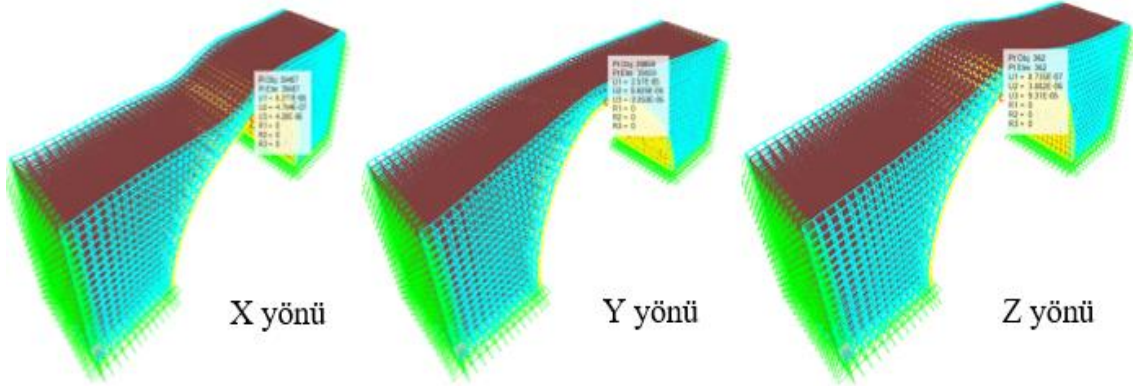
### **Kocaeli depremi etkisinde yer değiştirmelerin incelenmesi**

Üç kemer formunda da modellenen köprünün basık kemer formunda Kocaeli depremi etkilenmiştir. Bu kemer formunda oluşan x yönündeki yer değiştirme miktarı 0,0026 cm olmaktadır. Y yönünde deprem etkitildiğinde, y yönündeki yer değiştirme miktarı 0,0146 cm olduğu görülmüştür. Z yönünde etkitildiğinde ise yer değiştirme miktarının 0,018 cm olduğu görülmüştür. Kocaeli depreminin etkisiyle köprüde oluşan üç yöndeki deplasmanlara ait görsel Şekil 3.71'deki gibidir.



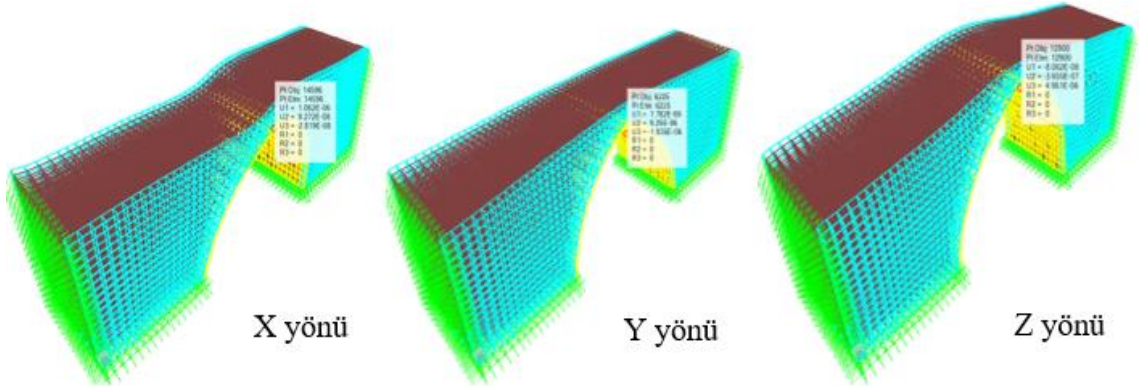
**Şekil 3.71.** Basık kemerde Kocaeli depremi etkisinde oluşan üç yöndeki şekil değiştirmeler

Dairesel kemer formuna Kocaeli depremi üç yönde ayrı ayrı etki ettirildiğinde köprü kemerinde yer değiştirmelerin üç yönde de sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Oluşan deplasmanlara ait görsel Şekil 3.72'de görülmektedir.



**Şekil 3.72.** Dairesel kemerde Kocaeli depremi etkisinde oluşan üç yöndeki şekil değiştirmeler

Sivri kemer formunda Kocaeli depremi etkisinde oluşan x yönündeki yer değiştirme miktarı 0,00001 cm olmaktadır. Y yönünde deprem etkilendiğinde, y yönündeki yer değiştirme miktarı 0,00009 cm olduğu görülmüştür. Z yönünde etkilendiğinde ise yer değiştirme miktarının 0,00005 cm olduğu görülmüştür. Kocaeli depreminin etkisiyle köprüde oluşan üç yöndeki deplasmanlara ait görsel Şekil 3.73'deki gibidir.



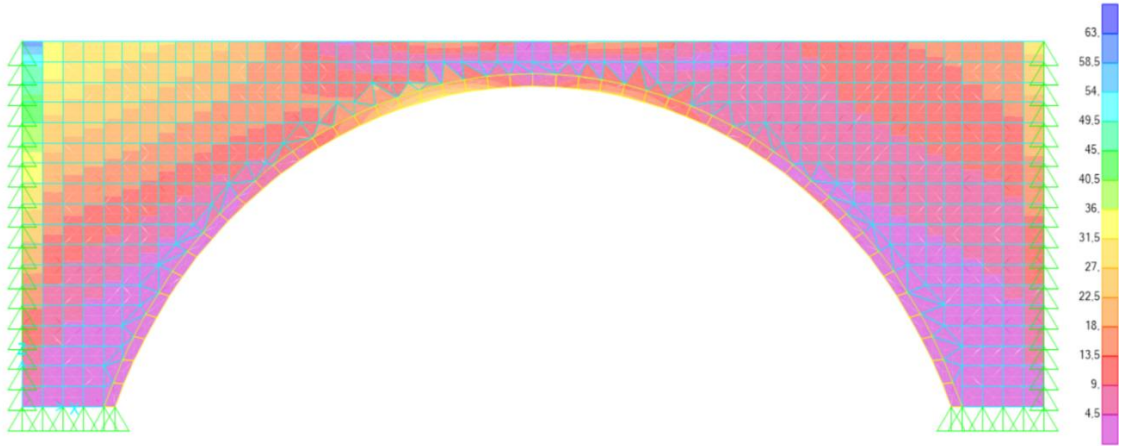
**Şekil 3.73.** Sivri kemerde Kocaeli depremi etkisinde oluşan üç yöndeki şekil değiştirmeler

### 3.6.4. Depremlerin etkisinde gerilmelerin incelenmesi

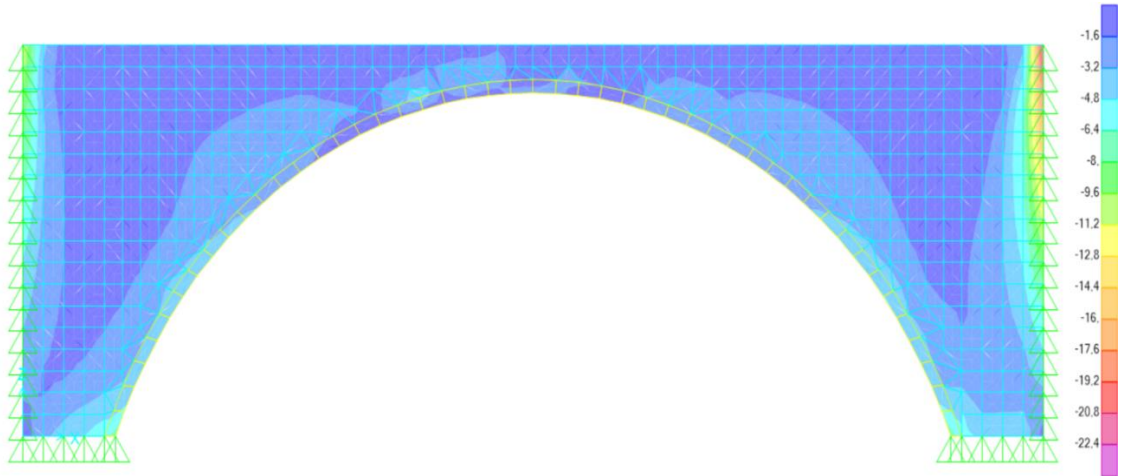
Basık, dairesel ve sivri kemer formlarında köprü modellerine, ayrı ayrı x, y ve z yönlerindeki Chichi, Kobe ve Kocaeli depremlerinin etkisinde köprülerde meydana gelen çekme ve basınç gerilmelerinin incelendiği bölüm aşağıda belirtilmiştir.

### Chichi depreminin etkisinde gerilmelerin incelenmesi

Basık kemer formunda Chichi depremi x yönünde modele uygulanmıştır. Çekme gerilmesi ve basınç gerilmeleri incelenmiştir. Buna göre kemerlerde çekme gerilmelerinin kemer orta bölgelerinde  $40 \text{ kN/m}^2$  değerlerine ulaştığı, tempan duvarların kenar bölgelerinde ise  $60 \text{ kN/m}^2$  değerlerine ulaştığı görülmüştür. Basınç gerilmeleri incelendiğinde ise kemer ve tempan duvarında yaklaşık  $5 \text{ kN/m}^2$  civarında olduğu görülmüştür. X yönünde oluşan çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.74, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.75'te gösterilmiştir.

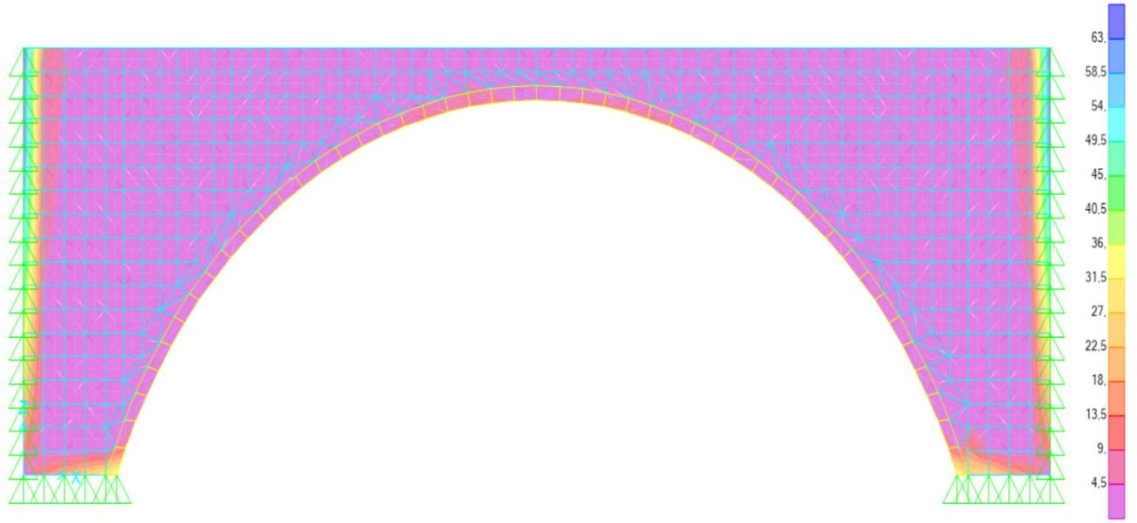


Şekil 3.74. Basık kemer x yönü Chichi depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

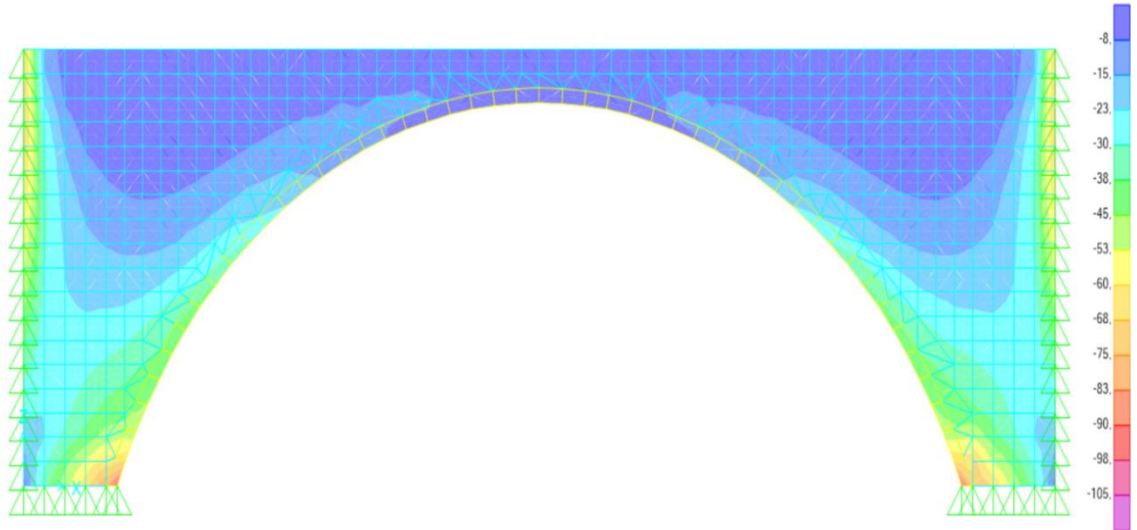


Şekil 3.75. Basık kemer x yönü Chichi depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

Basık kemer formunda Chichi depremi y yönünde modele uygulanmıştır. Çekme gerilmesi ve basınç gerilmeleri incelenmiştir. Buna göre kemerlerde çekme gerilmelerinin kemer orta bölgelerinde  $30 \text{ kN/m}^2$  değerlerine ulaştığı, tempan duvarların kenar bölgelerinde ise  $63 \text{ kN/m}^2$  değerlerine ulaştığı görülmüştür. Basınç gerilmesi ise kemer orta bölgesinde  $10 \text{ kN/m}^2$  değerlerinde olmak üzere köprü kemer mesnet noktalarında  $100 \text{ kN/m}^2$  değerlerine ulaşmaktadır. Y yönünde oluşan çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.76 ve basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.77’de gösterilmiştir.

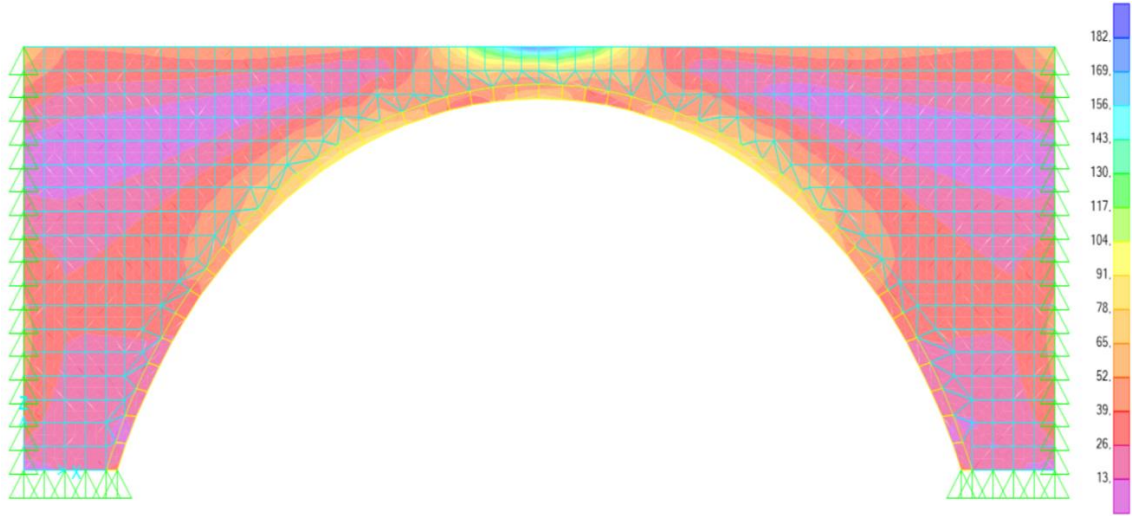


**Şekil 3.76.** Basık kemer y yönü Chichi depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

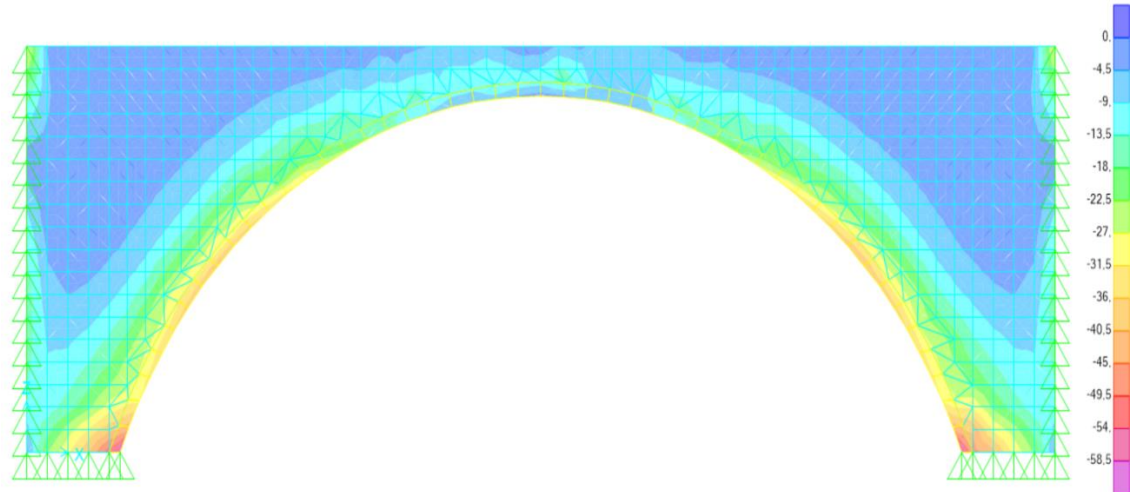


**Şekil 3.77.** Basık kemer y yönü Chichi depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

Basık kemer formunda Chichi depremi z yönünde modele uygulanmıştır. Kemer yan yüzeylerinde çekme gerilmelerinin  $100 \text{ kN/m}^2$  değerlerine ulaştığı görülmüştür. Basınç gerilmesi ise kemer orta noktası bölgesinde  $9 \text{ kN/m}^2$ , mesnetlerinde maksimum değerlerine ulaşıp  $58 \text{ kN/m}^2$  civarındadır. Maksimum çekme gerilmesi değeri  $180 \text{ kN/m}^2$  civarına ulaşmaktadır. Z yönünde meydana gelen çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.78, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.79'da görülmektedir.



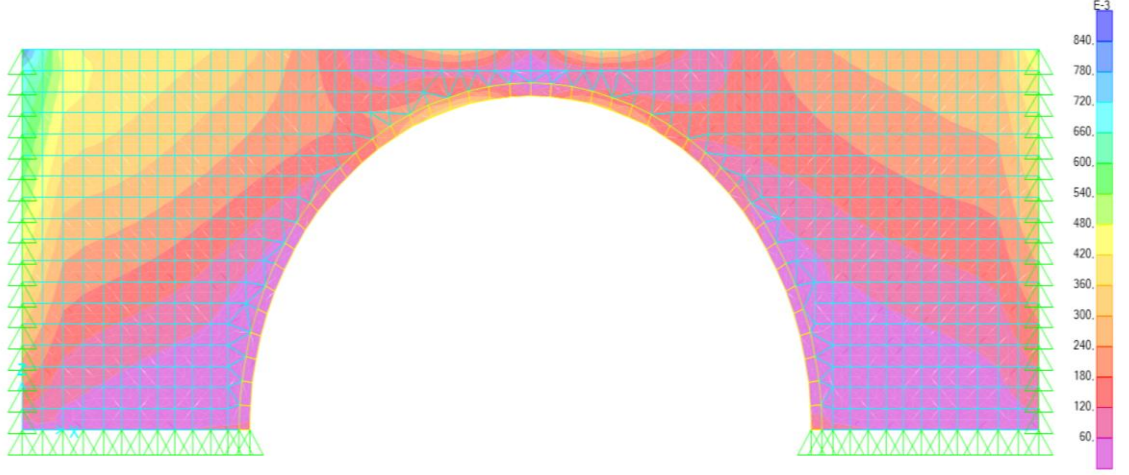
**Şekil 3.78.** Basık kemer z yönü Chichi depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )



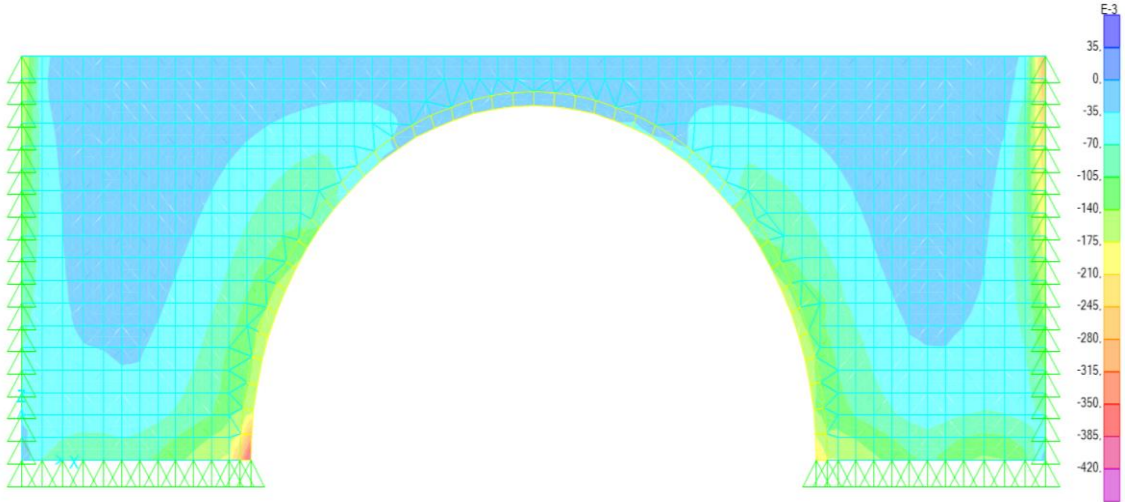
**Şekil 3.79.** Basık kemer z yönü Chichi depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )



Dairesel kemer formunda Chichi depremi x yönünde modele uygulanmıştır. Çekme gerilmesi ve basınç gerilmeleri incelendiğinde kemerde çekme gerilmelerinin kemer orta bölgelerinde  $0,42 \text{ kN/m}^2$  tempan kenar yüzeylerinde  $0,84 \text{ kN/m}^2$  değerlerine ulaşmaktadır. Basınç gerilmeleri incelendiğinde kemer orta bölgesi genelinde  $0,07 \text{ kN/m}^2$  değerine ulaşılmıştır. X yönünde oluşan çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.80 ve basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.81’de gösterilmiştir.

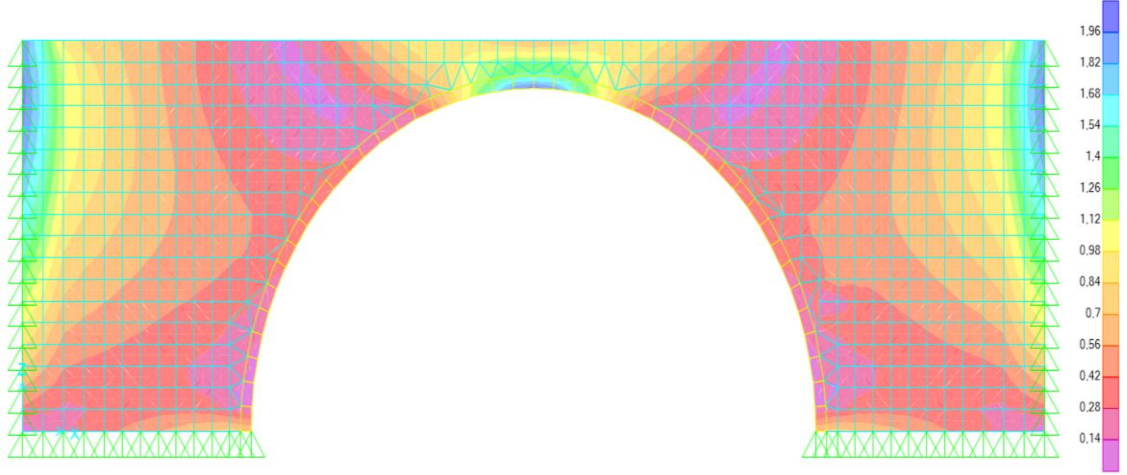


Şekil 3.79. Dairesel kemerde x yönü Chichi depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

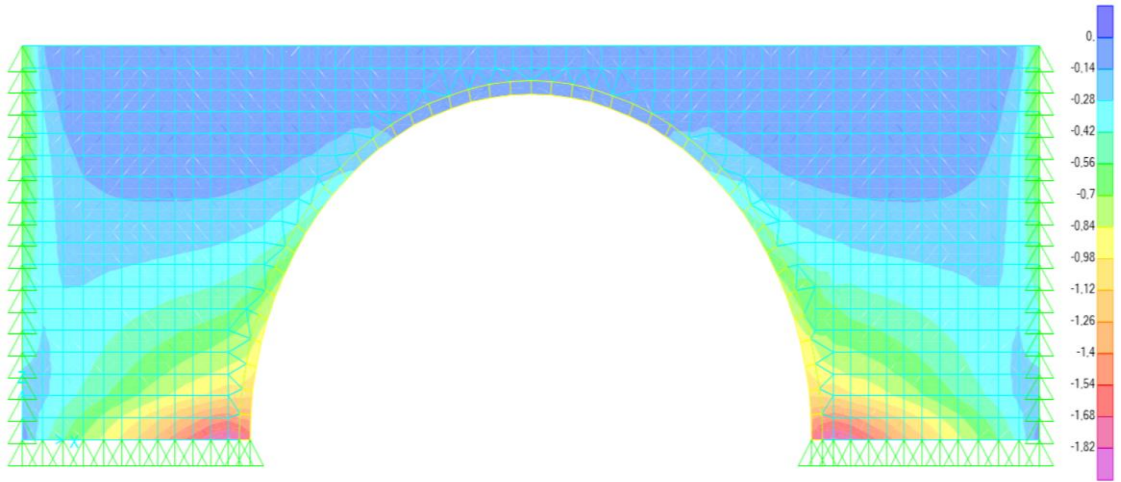


Şekil 3.80. Dairesel kemerde x yönü Chichi depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

Dairesel kemer formuna y yönünde Chichi depremi etkitildiğinde, çekme gerilmelerinin kemer orta bölgesinde  $1,90 \text{ kN/m}^2$ , basınç gerilmelerinin ise kemer ayakları bölgelerinde  $1,80 \text{ kN/m}^2$  civarına ulaşmaktadır. Y yönünde oluşan çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.82, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.83'te gösterilmiştir.

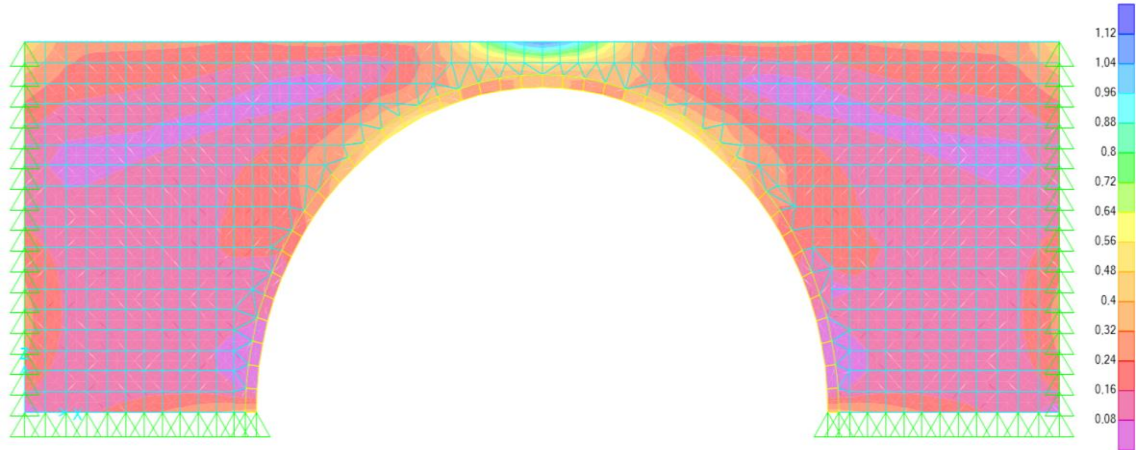


Şekil 3.81. Dairesel kemer y yönü Chichi depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

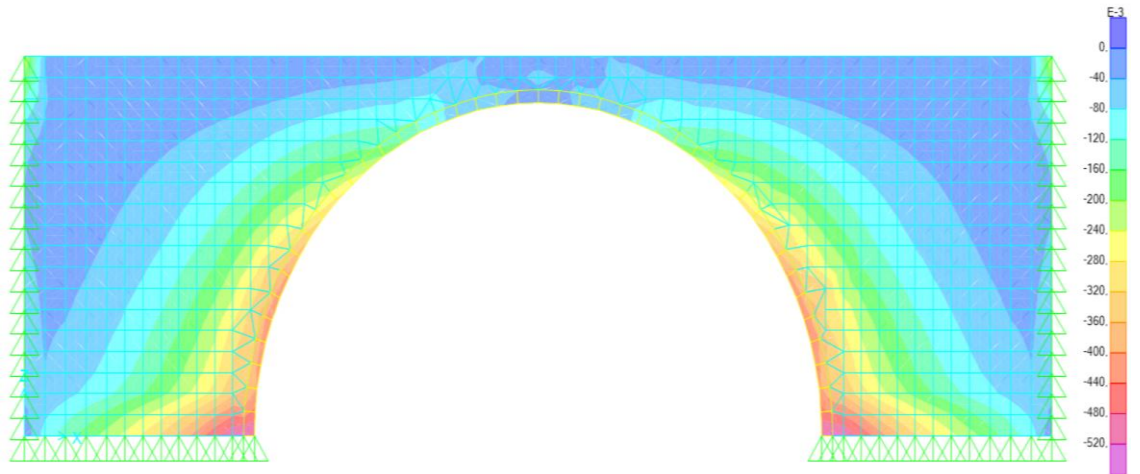


Şekil 3.82. Dairesel kemer y yönü Chichi depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

Dairesel kemer formundaki köprüye z yönünde Chichi depremi etkitildiğinde, çekme gerilmelerinin kemer orta bölgelerinde  $1 \text{ kN/m}^2$  civarında, basınç gerilmelerinin ise köprü ayaklarında  $0,6 \text{ kN/m}$  değerlerine ulaştığı görülmüştür. Z yönünde meydana gelen çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.84, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.85’de görülmektedir.

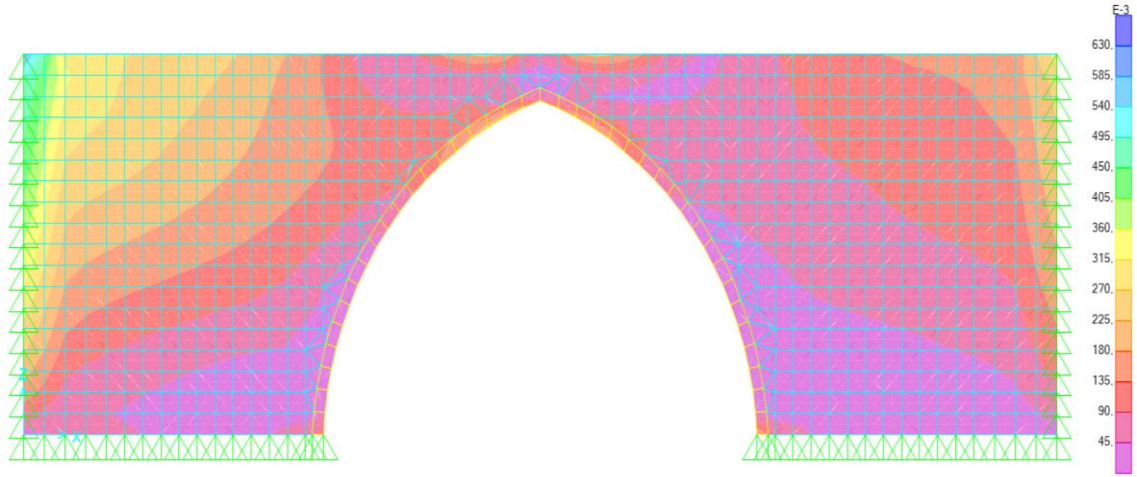


Şekil 3.83. Dairesel kemer z yönü Chichi depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

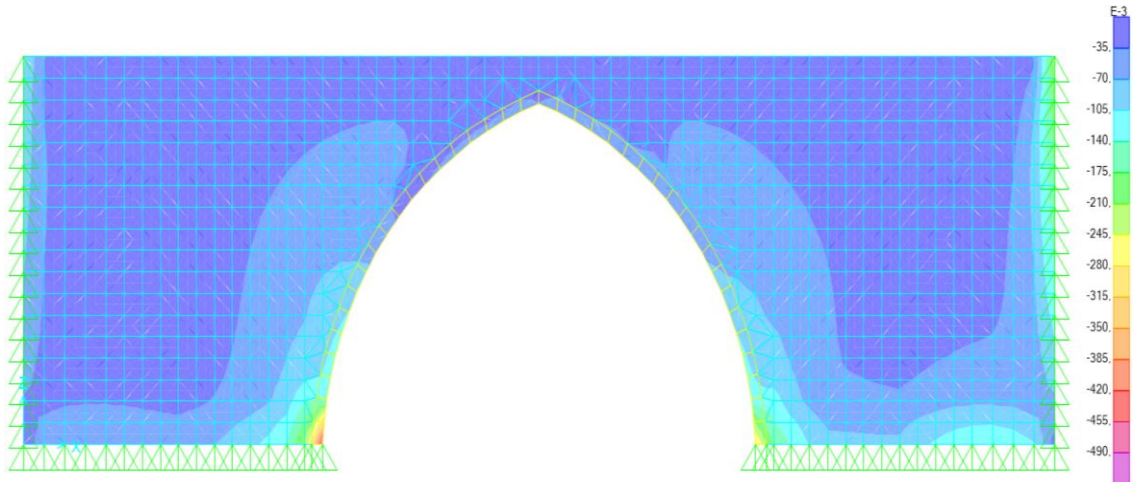


Şekil 3.84. Dairesel kemer z yönü Chichi depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

Sivri kemer formuna x yönünde Chichi depremi etkitildiğinde, çekme gerilmelerinin kemer orta bölgesinde  $0,36 \text{ kN/m}^2$ , tempan kenar yüzeyinde  $0,63 \text{ kN/m}^2$  değerlerine ulaştığı görülmüştür. Basınç gerilmeleri, kemer ayakların  $0,5 \text{ kN/m}^2$  değeri civarındadır. X yönünde oluşan çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.86, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.87'de görülmektedir.

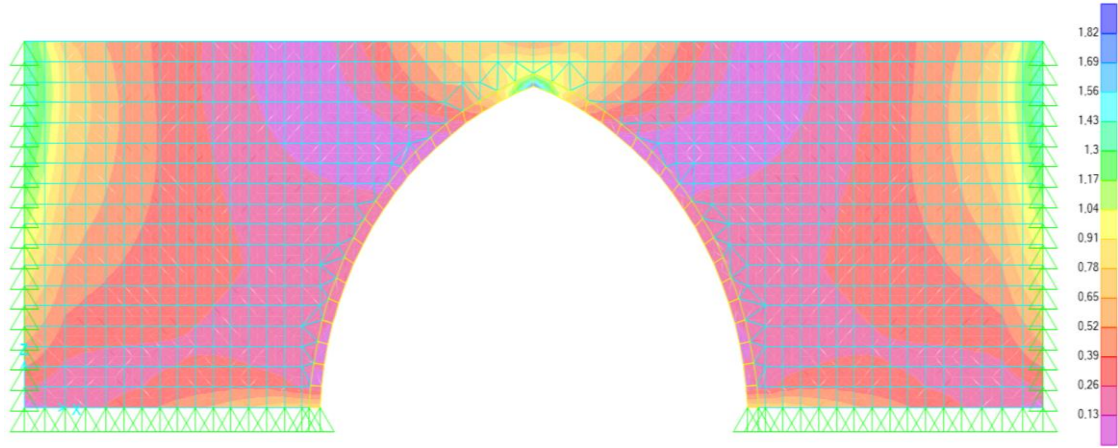


**Şekil 3.86.** Sivri kemer x yönü Chichi depreminin çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

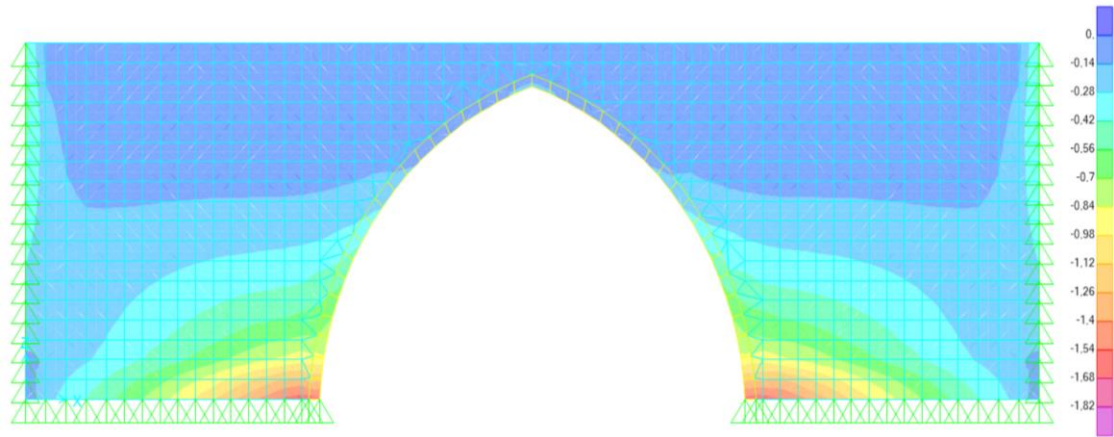


**Şekil 3.87.** Sivri kemer x yönü Chichi depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

Sivri kemer formuna y yönündeki Chichi depremi etkisinde, çekme gerilmelerinin kemer orta bölgelerinde  $1,8 \text{ kN/m}^2$ , basınç gerilmelerinin yine aynı bölgelerde  $0,28 \text{ kN/m}^2$  civarında olduğu görülmektedir. Basınç gerilmeler en büyük değerlerine köprü ayaklarında  $1,82 \text{ kN/m}^2$  değerlerinde ulaşmaktadır. Y yönünde oluşan çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.88, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.89’da görülmektedir.

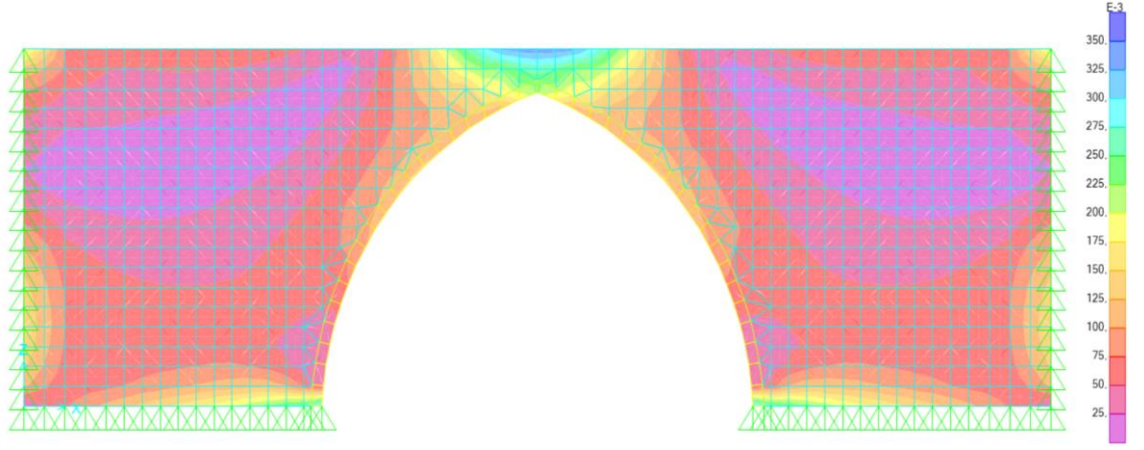


Şekil 3.88. Sivri kemer y yönü Chichi depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

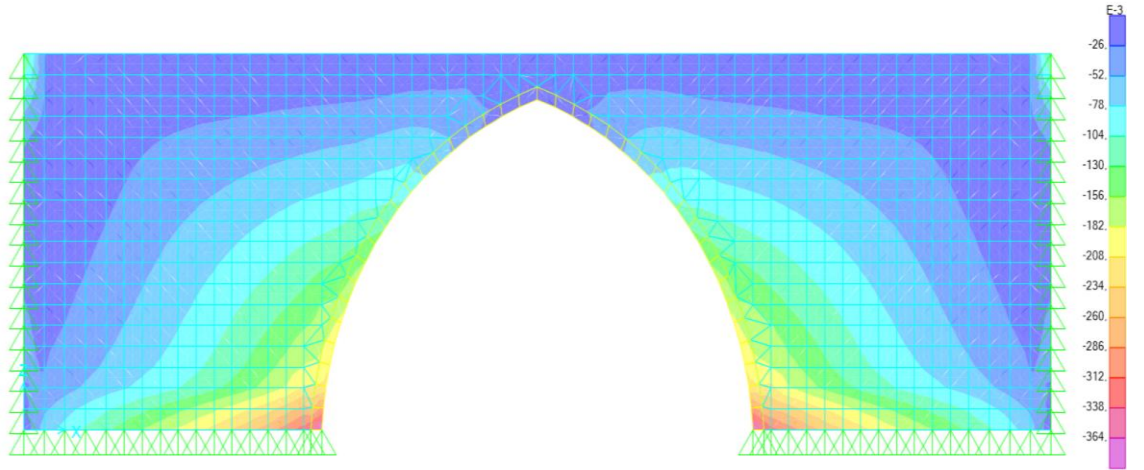


Şekil 3.89. Sivri kemer y yönü Chichi depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

Sivri kemer formundaki köprüye z yönünde Chichi depremi etki edildiğinde, çekme gerilmelerinin köprü kemberi kenar bölgesinde  $0,20 \text{ kN/m}^2$ , kemer ortası kilit taşı bölgesinde  $0,33 \text{ kN/m}^2$ , basınç gerilmelerinin ise kemer orta noktası bölgesinde  $0,52 \text{ kN/m}^2$ , kemer mesnet bölgelerinde  $0,364 \text{ kN/m}^2$  değerlerine ulaşmıştır. Z yönünde meydana gelen çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.90, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.91'de görülmektedir.



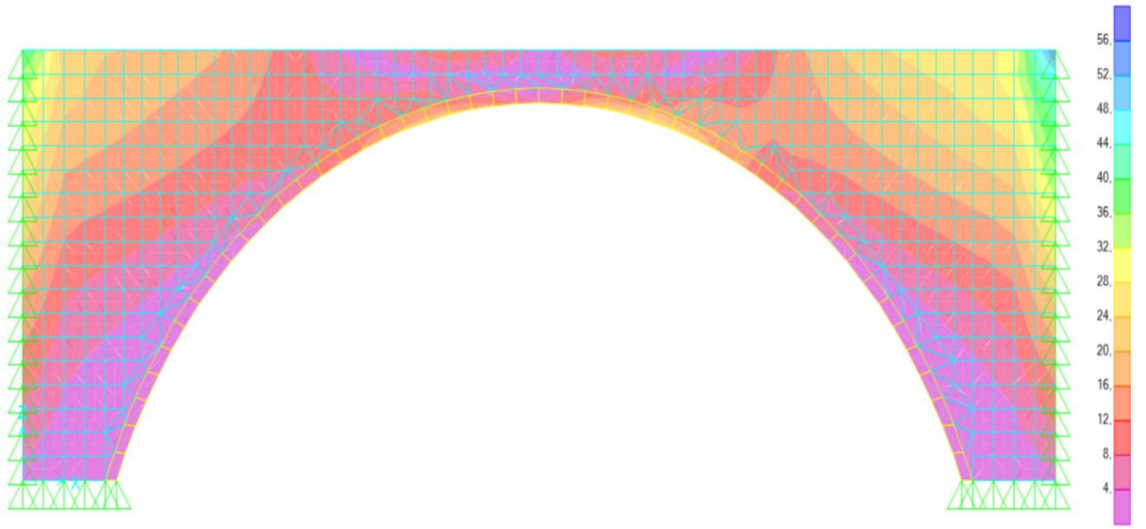
Şekil 3.85. Sivri kemer z yönü Chichi depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )



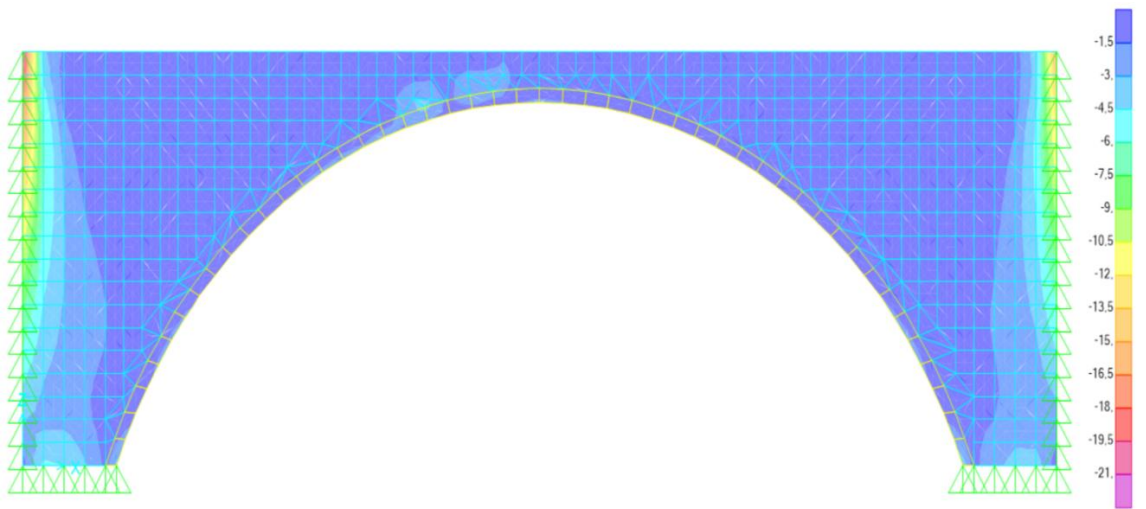
Şekil 3.86. Sivri kemer z yönü Chichi depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

## Kobe Depreminin Etkisinde Gerilmelerin İncelenmesi

Basık kemer formuna x yönünde Kobe depremi etki ettirildiğinde, çekme gerilmelerinin kemer orta bölgesinde  $32 \text{ kN/m}^2$ , tempan kenar bölgesinde  $56 \text{ kN/m}^2$  değerlerine ulaşmıştır. Basınç gerilmeleri kemerin büyük bölümünde  $3 \text{ kN/m}^2$  değerleri civarındadır. Basınç gerilmesi köprü kenarlarında en fazla  $21 \text{ kN/m}^2$  basınç değerlerine ulaşmaktadır. X yönünde oluşan çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.92, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.93'te görülmektedir.

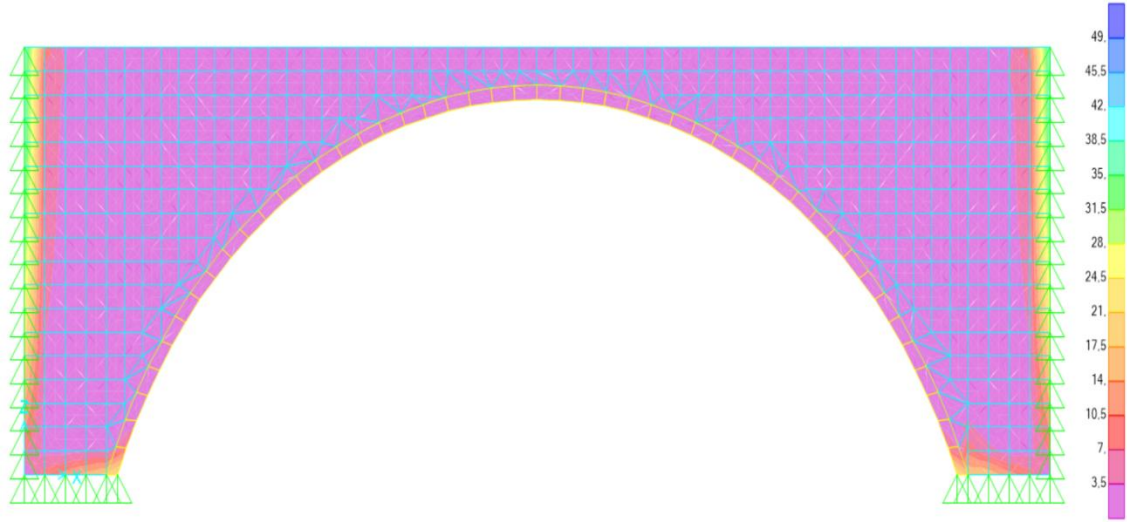


Şekil 3.87. Basık kemerde x yönü Kobe depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

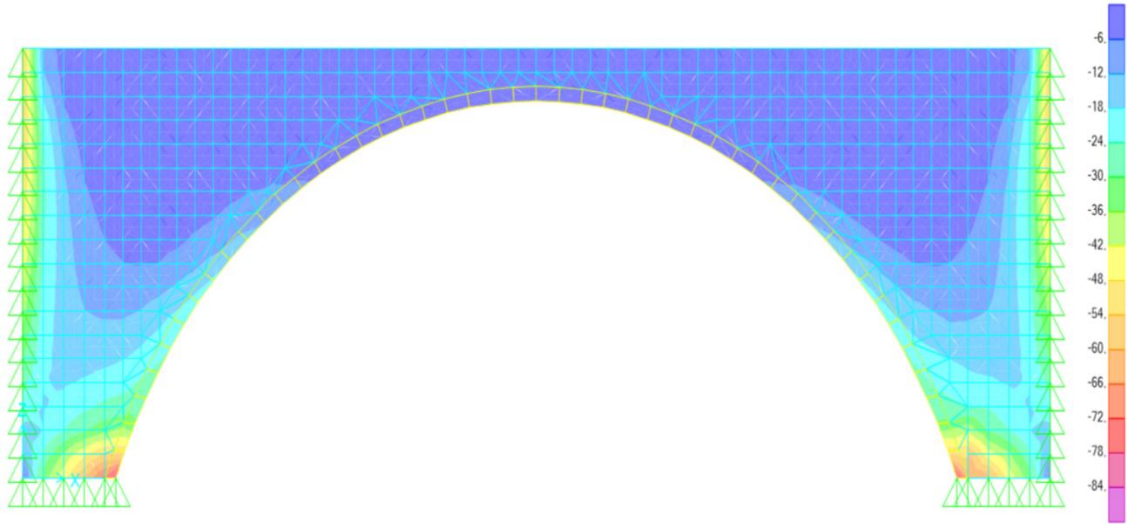


Şekil 3.88. Basık kemerde x yönü Kobe depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

Basık kemer formuna y yönünde Kobe depremi etkitildiğinde, çekme gerilmelerinin kemer orta bölgesinde  $7 \text{ kN/m}^2$ , basınç gerilmelerinin yine aynı bölgelerde  $12 \text{ kN/m}^2$ , basınç gerilmelerinin maksimum değeri kemer ayaklarında  $84 \text{ kN/m}^2$  değerine ulaşmaktadır. Y yönünde oluşan çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.94, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.95'te görülmektedir.



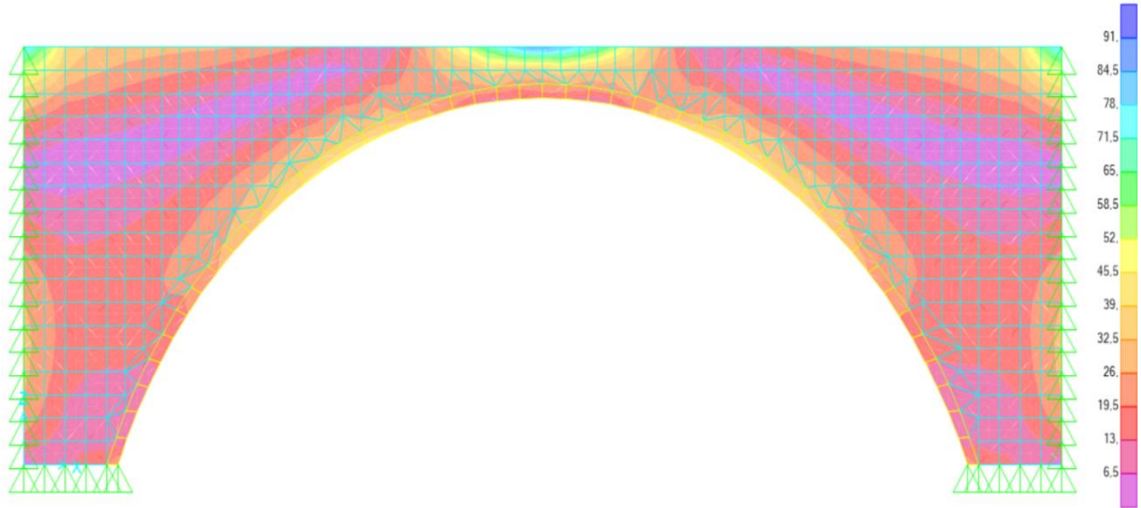
Şekil 3.89. Basık kemer y yönü Kobe depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )



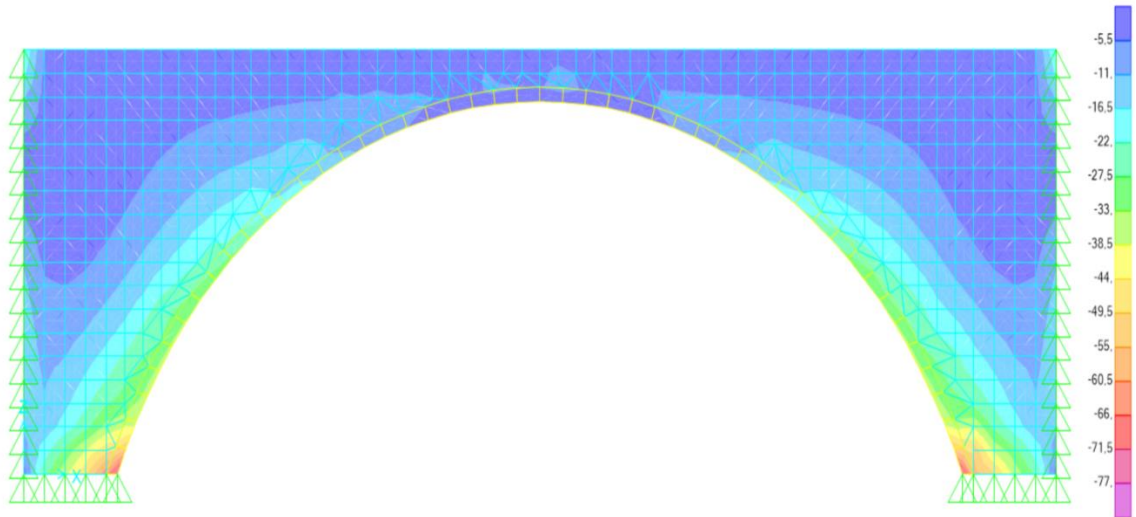
Şekil 3.95. Basık kemer y yönü Kobe depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )



Basık kemer formundaki köprüye z yönünde Kobe depremi etki ettirildiğinde, çekme gerilmelerinin kemer yan yüzeyinde  $52 \text{ kN/m}^2$ , basınç gerilmeleri incelendiğinde ise, kemer orta noktası bölgesinde  $11 \text{ kN/m}^2$ , mesnet bölgesinde  $77 \text{ kN/m}^2$  değerlerine ulaşmıştır. Z yönünde meydana gelen çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.964, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.97’de görülmektedir.

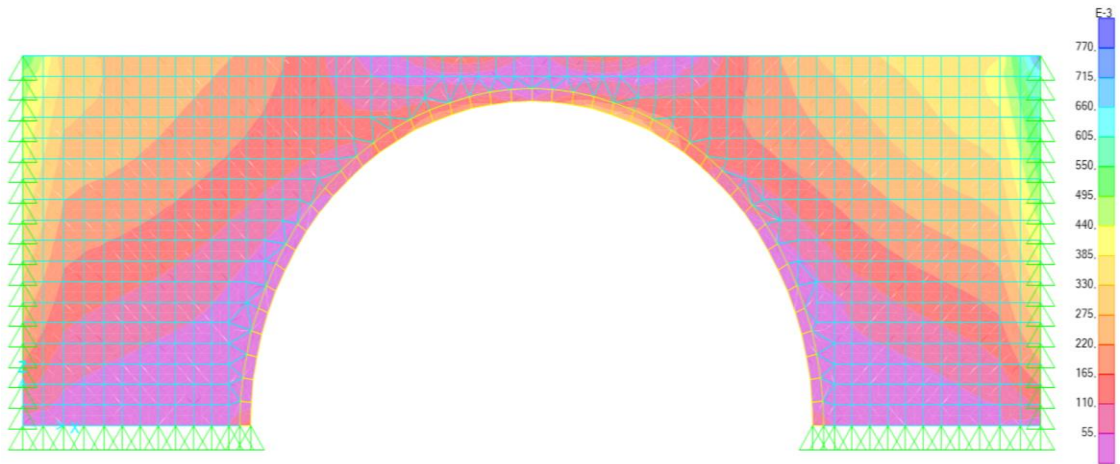


Şekil 3.90. Basık kemer z yönü Kobe depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

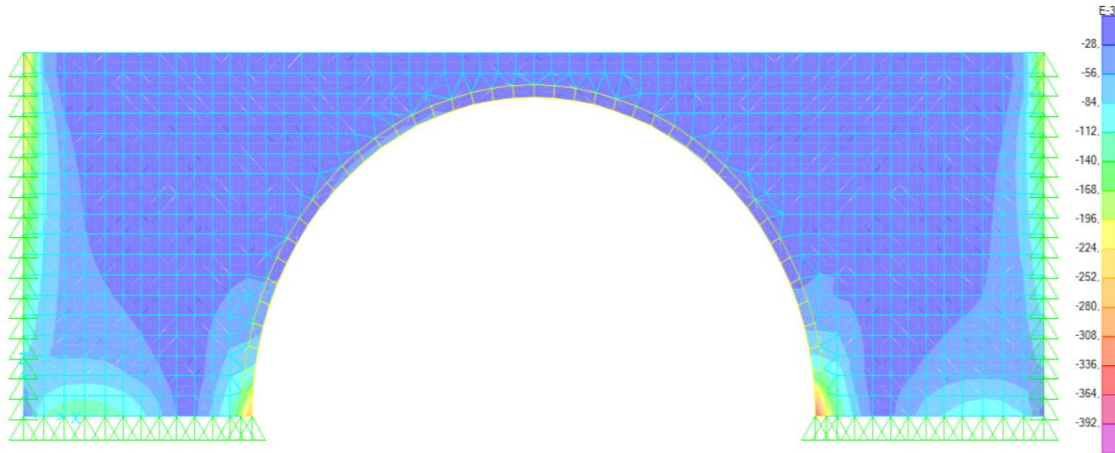


Şekil 3.97. Basık kemer z yönü Kobe depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

Dairesel kemer formuna x yönünde Kobe depremi etki ettirildiğinde, çekme gerilmelerinin kemer orta bölgesinde  $0,385 \text{ kN/m}^2$ , tempan kenar mesnet yüzeyinde  $0,77 \text{ kN/m}^2$ , basınç gerilmelerinin yaklaşık olarak kemer orta bölgelerinde  $0,1 \text{ kN/m}^2$ , basınç gerilmelerinin maksimum değeri kemer ayaklarında  $0,39 \text{ kN/m}^2$  değerine ulaşmaktadır. X yönünde oluşan çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.98, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.99'da görülmektedir.

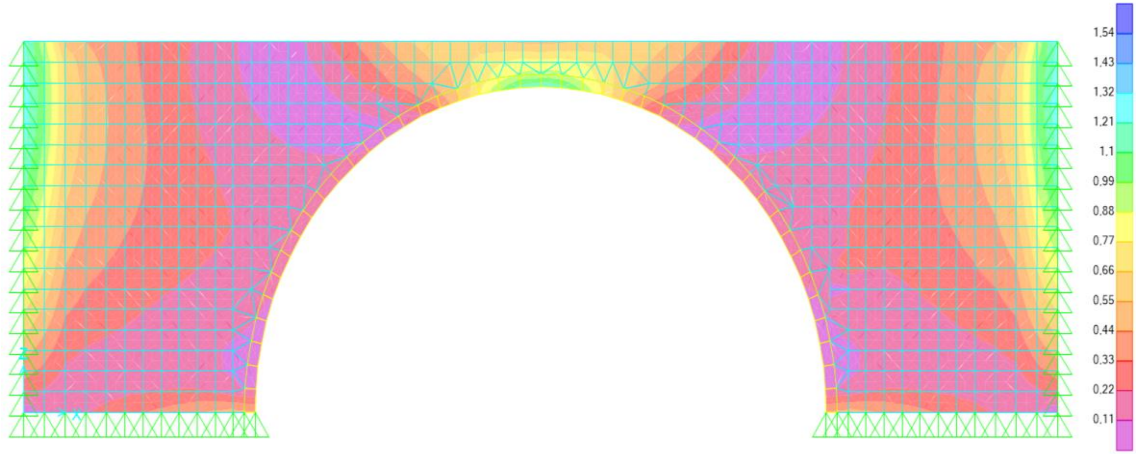


Şekil 3.98. Dairesel kemerde x yönü Kobe depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

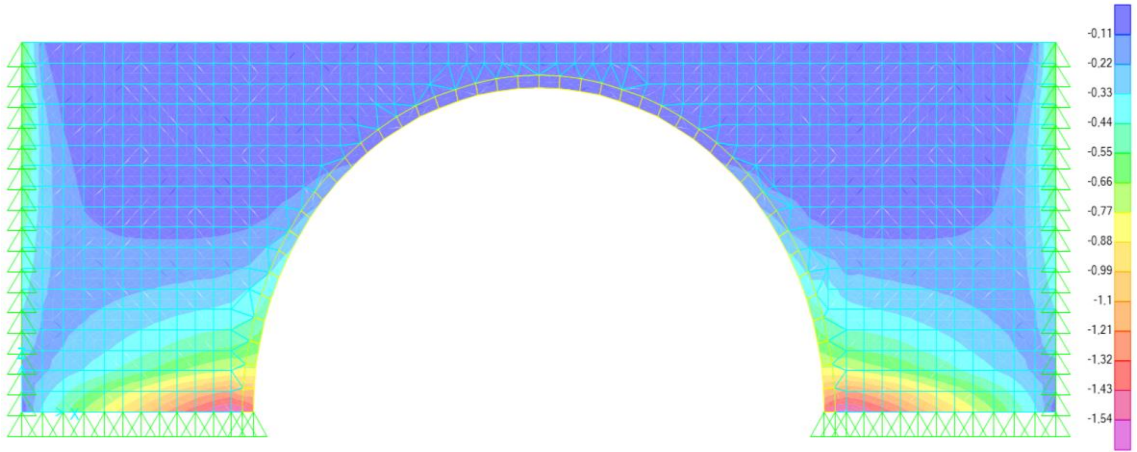


Şekil 3.99. Dairesel kemerde x yönü Kobe depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

Dairesel kemer formundaki köprü modeline y yönünde Kobe depremi etki ettirildiğinde, çekme gerilmelerinin kemer orta bölgesinde  $1 \text{ kN/m}^2$ , basınç gerilmelerinin yine kemer orta bölgesinde  $0,11 \text{ kN/m}^2$ , basınç gerilmelerinin maksimum değeri kemer ayaklarında  $1,54 \text{ kN/m}^2$  değerine ulaşmaktadır. Y yönünde oluşan çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.100, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.101’de görülmektedir.

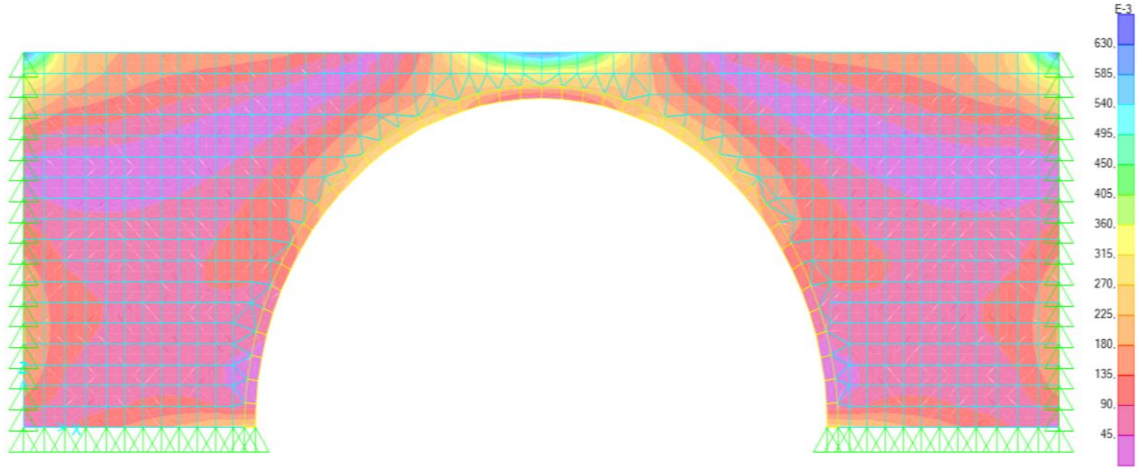


**Şekil 3.91.** Dairesel kemer y yönü Kobe depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

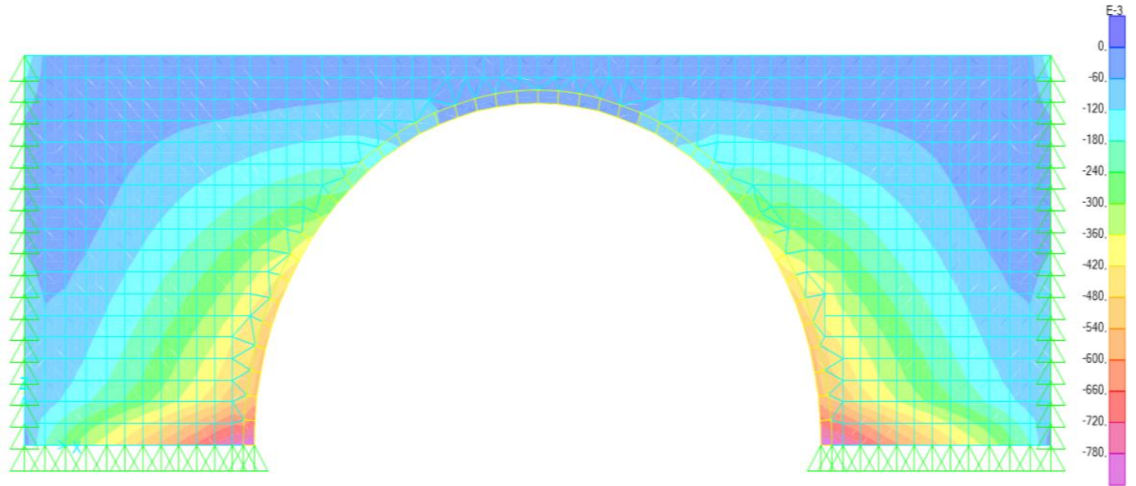


**Şekil 3.92.** Dairesel kemer y yönü Kobe depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

Dairesel kemer formuna z yönünde Kobe depremi etki ettirildiğinde, çekme gerilmelerinin kemer yan yüzeylerinde  $0,36 \text{ kN/m}^2$ , basınç gerilmelerinin kemer orta noktası bölgesinde  $0,18 \text{ kN/m}^2$ , mesnet bölgesinde  $0,78 \text{ kN/m}^2$  olduğu görülmektedir. Z yönünde meydana gelen çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.102, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.103'de görülmektedir.

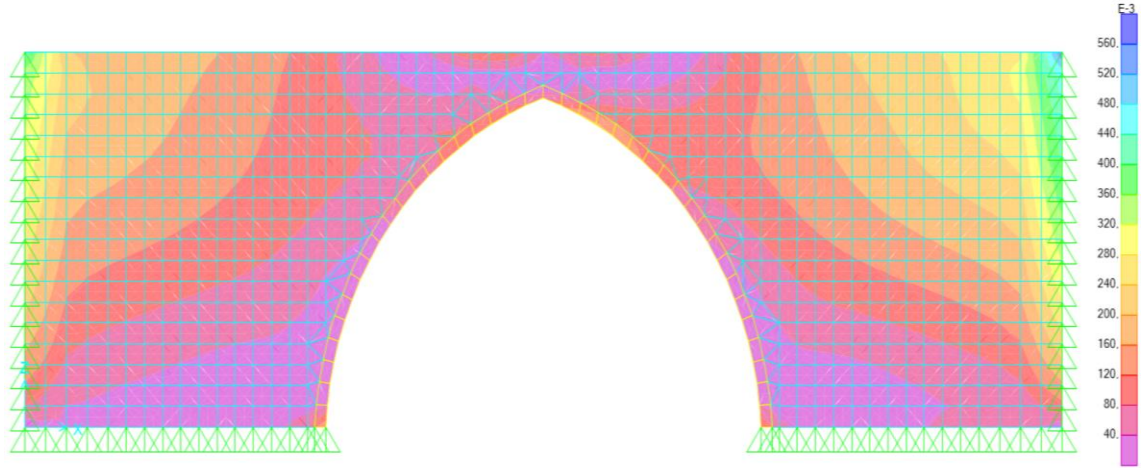


Şekil 3.93. Dairesel kemer z yönü Kobe depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

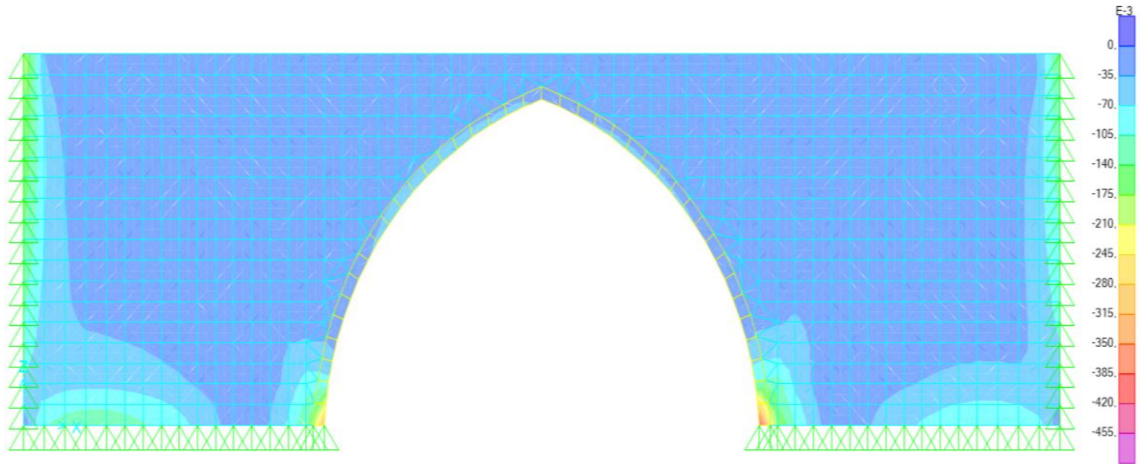


Şekil 3.94. Dairesel kemer z yönü Kobe depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

Sivri kemer formunda modellenen köprüye x yönünde Kobe depremi etki ettirildiğinde, çekme gerilmelerinin kemer orta bölgesinde  $0,32 \text{ kN/m}^2$ , köprü ayaklarında kemere yakın bölgesinde  $0,56 \text{ kN/m}^2$ , basınç gerilmeleri kemer bölgesinde  $0,20 \text{ kN/m}^2$ , mesnet bölgesinde  $0,45 \text{ kN/m}^2$  olduğu görülmektedir. X yönünde oluşan çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.104, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.105'te görülmektedir.

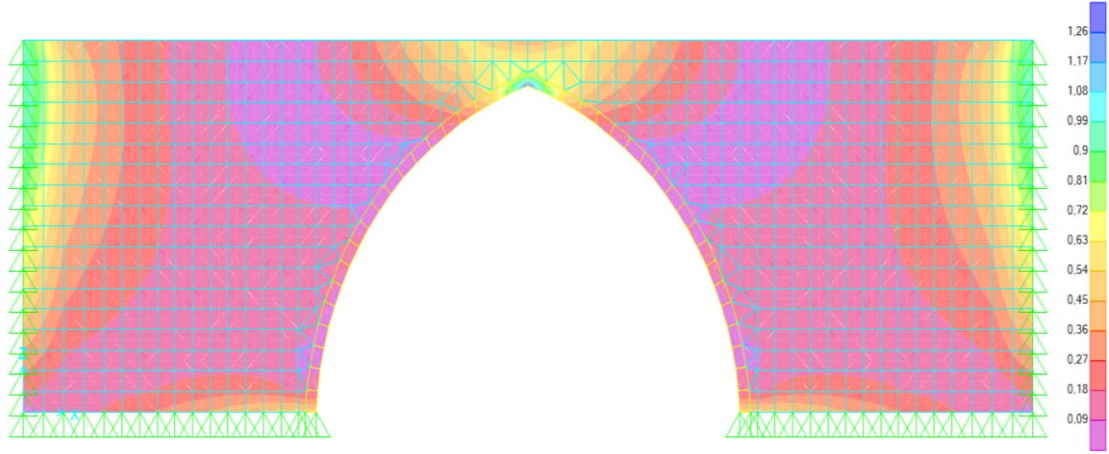


Şekil 3.95. Sivri kemerde x yönü Kobe depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

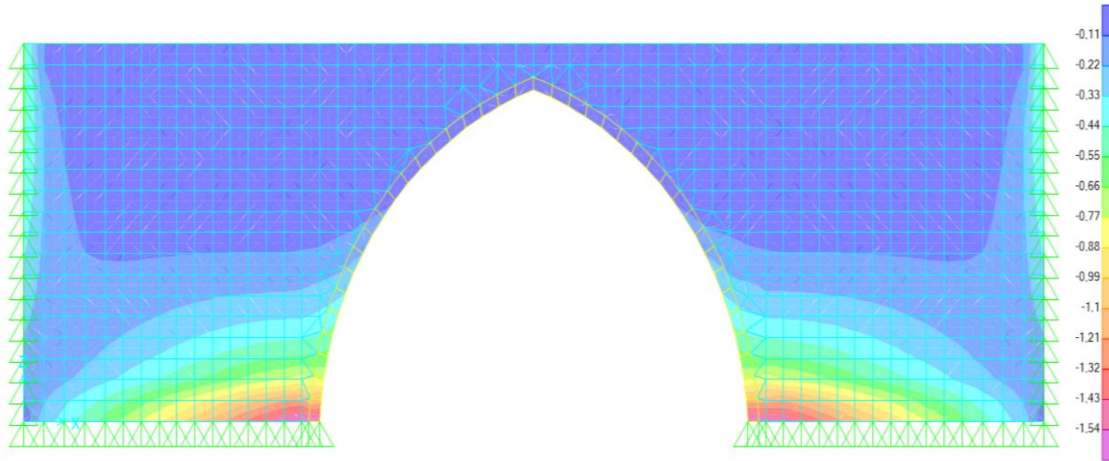


Şekil 3.96. Sivri kemerde x yönü Kobe depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

Sivri kemer formuna y yönünde Kobe depremi etki ettirildiğinde, çekme gerilmelerinin kemer orta bölgesinde  $1 \text{ kN/m}^2$  civarında, basınç gerilmelerinin yine aynı bölgelerde  $0,45 \text{ kN/m}^2$  değerini aldığı görülmüştür. Basınç gerilmelerinin maksimum değeri kemer ayaklarında  $1,54 \text{ kN/m}^2$  değerine ulaşmaktadır. Y yönünde oluşan çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.106, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.107’da görülmektedir.

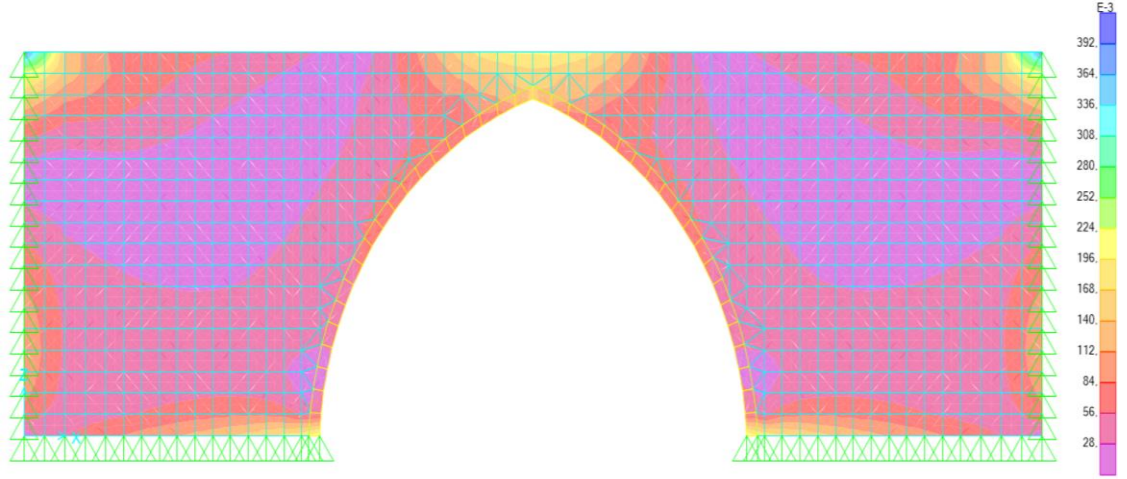


Şekil 3.97. Sivri kemer y yönü Kobe depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

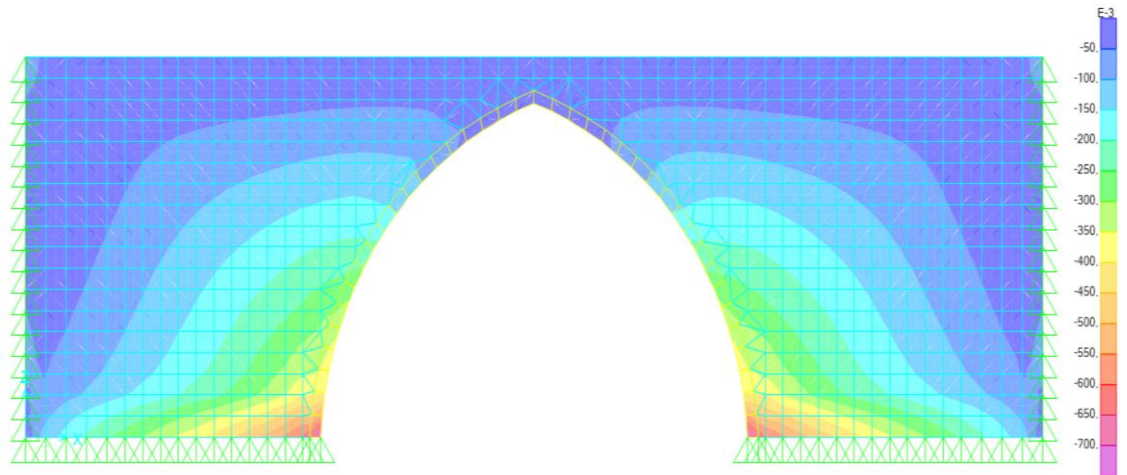


Şekil 3.98. Sivri kemer y yönü Kobe depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

Sivri kemer formuna z yönünde Kobe depremi etki ettirildiğinde, çekme gerilmelerinin kemer yan yüzeylerinde  $0,168 \text{ kN/m}^2$ , basınç gerilmelerinin ise kemer orta noktası bölgesinde  $0,15 \text{ kN/m}^2$ , kemer mesnet bölgelerine denk gelen yerlerde  $0,70 \text{ kN/m}^2$  olduğu görülmüştür. Z yönünde meydana gelen çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.108, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.109’de görülmektedir.



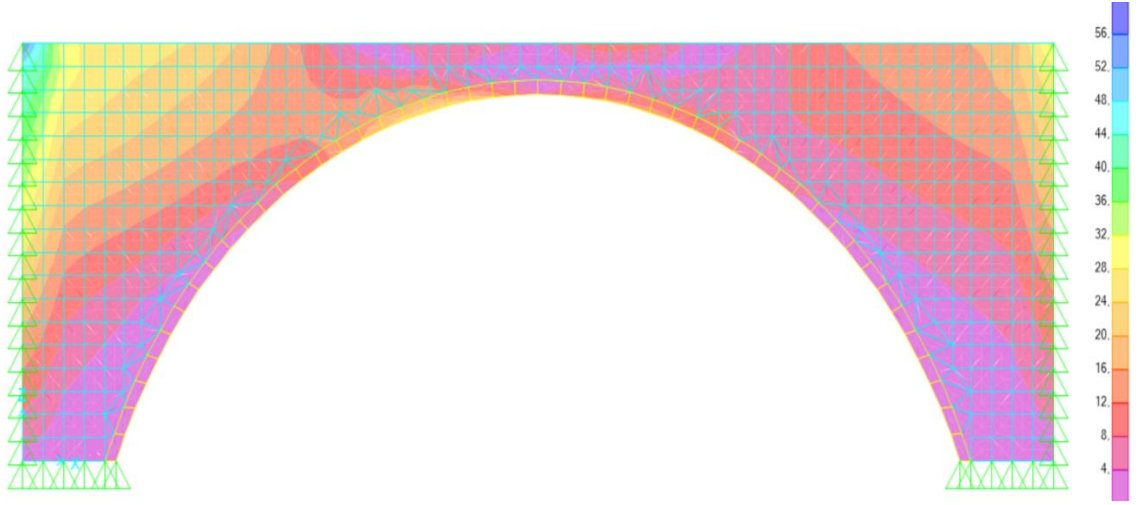
Şekil 3.99. Sivri kemer z yönü Kobe depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )



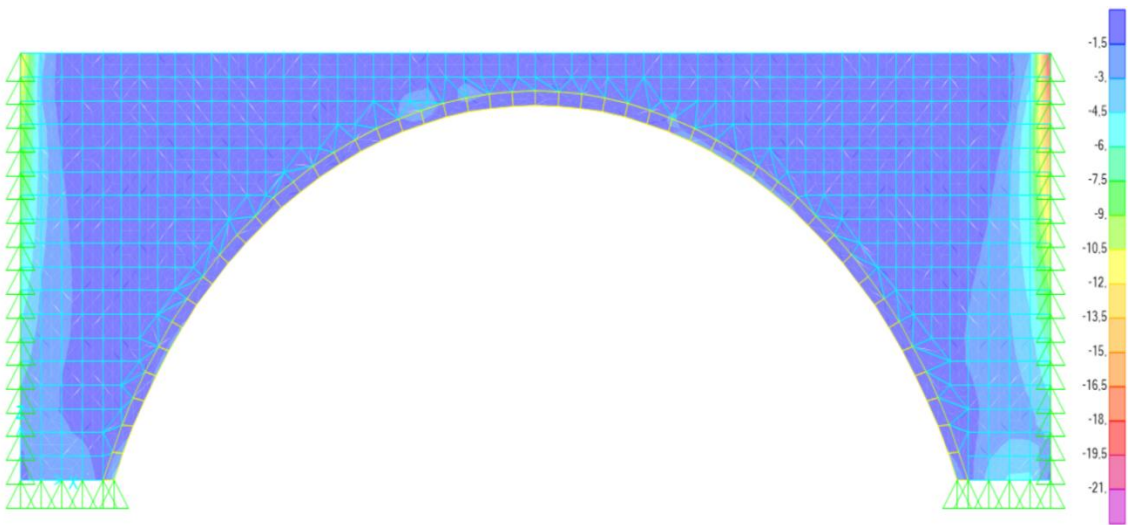
Şekil 3.100. Sivri kemer z yönü Kobe depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

## Kocaeli Depreminin Etkisinde Gerilmelerin İncelenmesi

Basık kemer formunda modellenen köprüye x yönünde Kocaeli depremi etkisinde, çekme gerilmelerinin kemer orta bölgesinde  $32 \text{ kN/m}^2$ , tempan duvarı ve köprü ayaklarında  $56 \text{ kN/m}^2$ , basınç gerilmelerinin  $1,5 \text{ kN/m}^2$ , basınç gerilmelerinin maksimum olduğu noktada  $21 \text{ kN/m}^2$  değeri olduğu görülmüştür. X yönünde oluşan çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.110, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.111’de görülmektedir.



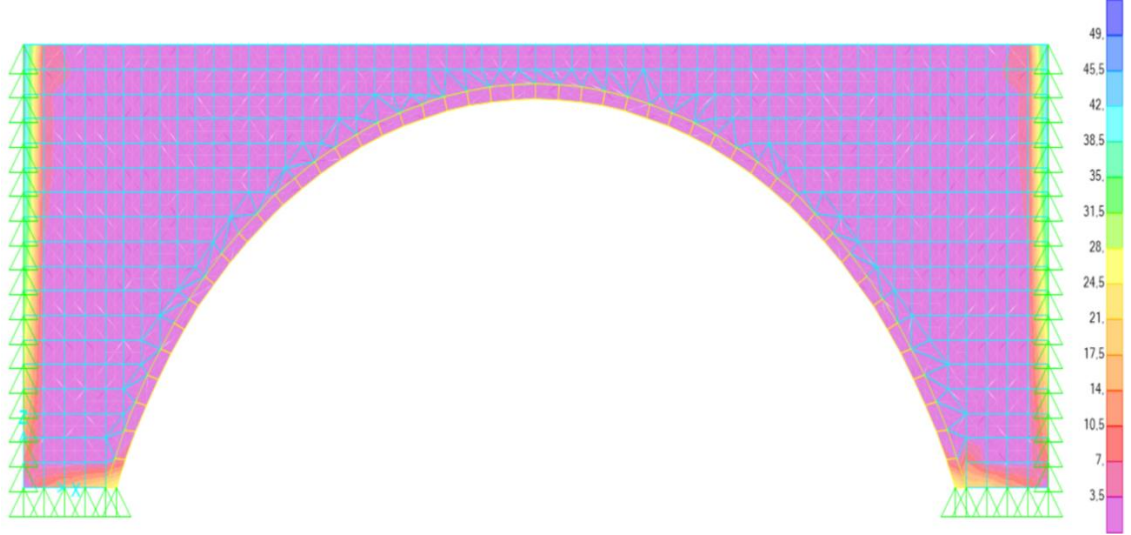
Şekil 3.101. Basık kemerde x yönü Kocaeli depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )



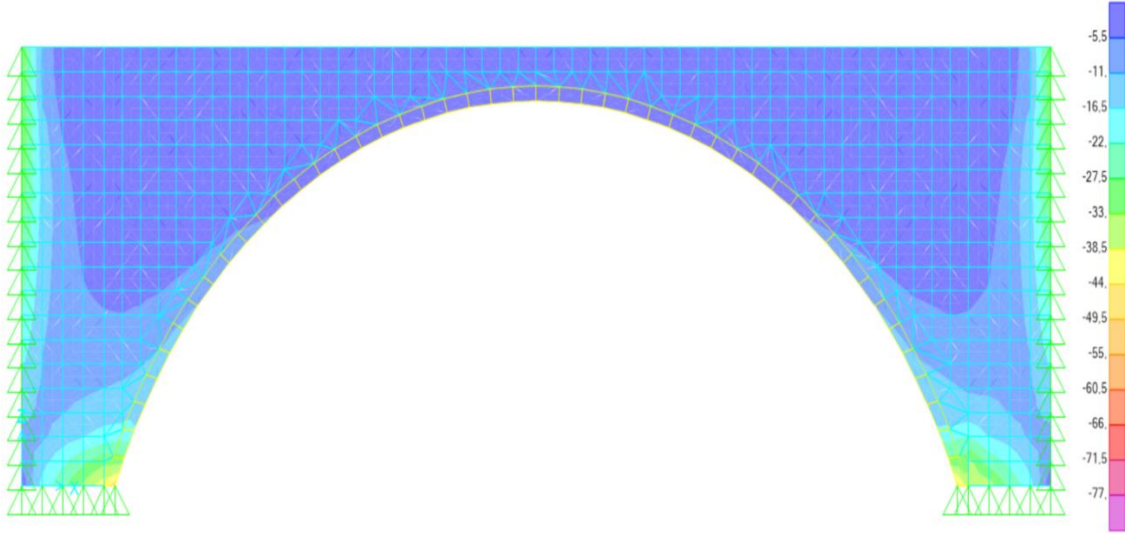
Şekil 3.102. Basık kemerde x yönü Kocaeli depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )



Basık kemer formuna y yönündeki Kocaeli depremi etkisinde, çekme gerilmelerinin kemer orta bölgesinde 3,5 kN/m<sup>2</sup>, basınç gerilmelerinin yine kemer orta bölgesinde 5,5 kN/m<sup>2</sup>, maksimum çekme gerilmesi değeri 49 kN/m<sup>2</sup>, maksimum basınç gerilmesi değeri ise 77 kN/m<sup>2</sup> olarak görülmektedir. Y yönünde oluşan çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.112, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.113'te görülmektedir.

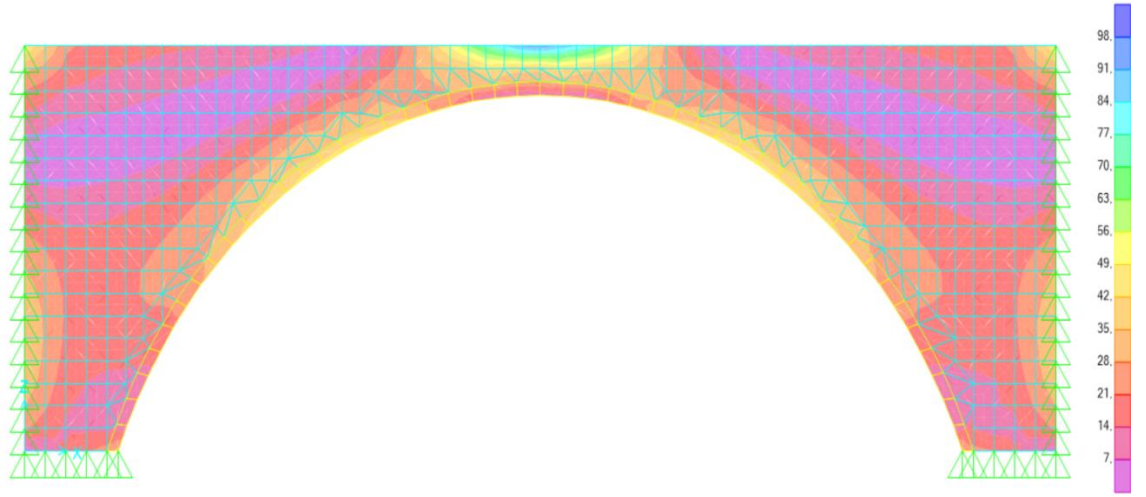


**Şekil 3.103.** Basık kemer y yönü Kocaeli depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m<sup>2</sup>)

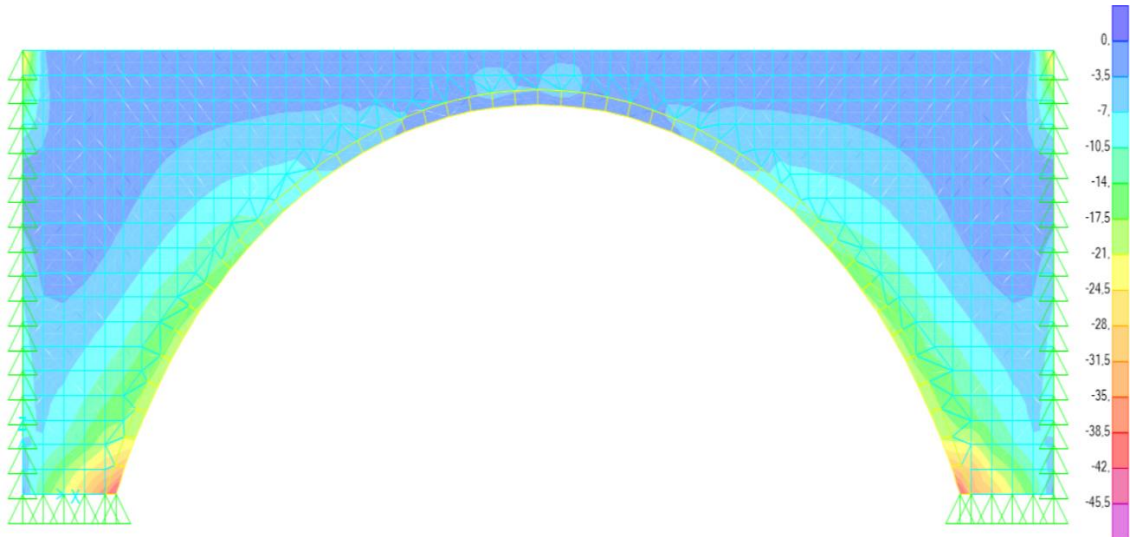


**Şekil 3.104.** Basık kemer y yönü Kocaeli depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m<sup>2</sup>)

Basık kemer formundaki köprüye z yönünde Kocaeli depremi etki ettirilmiş, oluşan çekme gerilmeleri incelendiğinde, kemer yan yüzeylerinde 28 kN/m<sup>2</sup>, maksimum çekme gerilmesi değeri 90 kN/m<sup>2</sup> civarındadır. Basınç gerilmeleri incelendiğinde ise kemer orta noktası bölgesinde 3,5 kN/m<sup>2</sup>, kemer mesnet bölgesinde 45,5 kN/m<sup>2</sup> gerilme değeri oluşmuştur. Z yönünde meydana gelen çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.114, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.115'te görülmektedir.

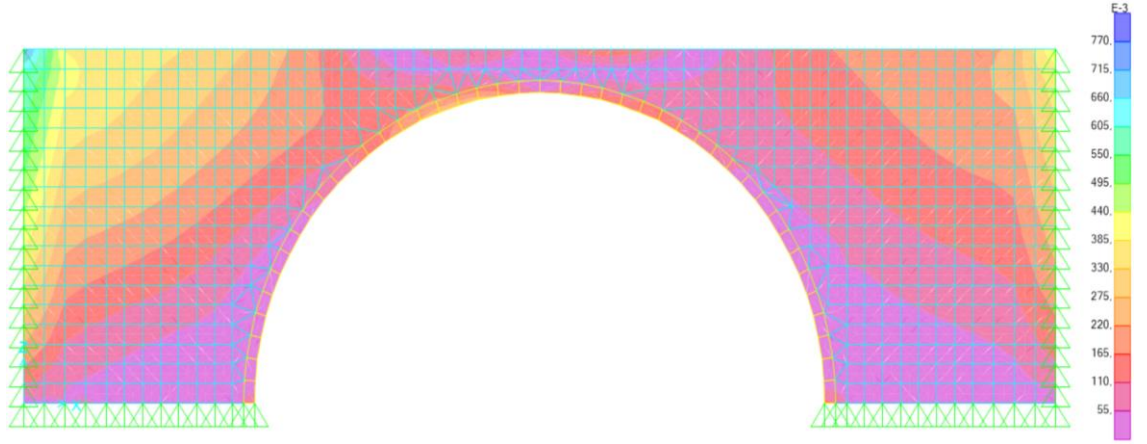


**Şekil 3.105.** Basık kemer z yönü Kocaeli depremi çekme gerilmesi değerleri (kN/m<sup>2</sup>)

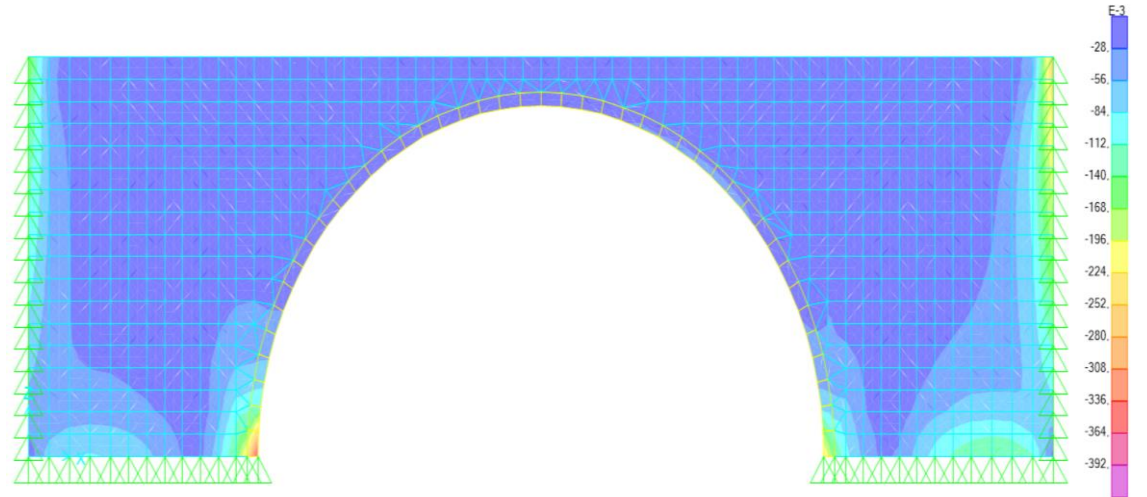


**Şekil 3.106.** Basık kemer z yönü Kocaeli depremi basınç gerilmesi değerleri (kN/m<sup>2</sup>)

Dairesel kemer formundaki köprüye x yönünde Kocaeli depremi etkisinde, oluşan çekme gerilmeleri incelendiğinde, kemer orta bölgesinde  $0,385 \text{ kN/m}^2$ , tempan duvarı yan yüzey mesnet bölgesinde  $0,77 \text{ kN/m}^2$ , basınç gerilmeleri incelendiğinde, kemer orta bölgesinde  $0,28 \text{ kN/m}^2$ , kemer ayaklarında gerilmelerinin maksimum olduğu değer ise  $0,4 \text{ kN/m}^2$  olduğu görülmüştür. X yönünde oluşan çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.116, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.117’de görülmektedir.

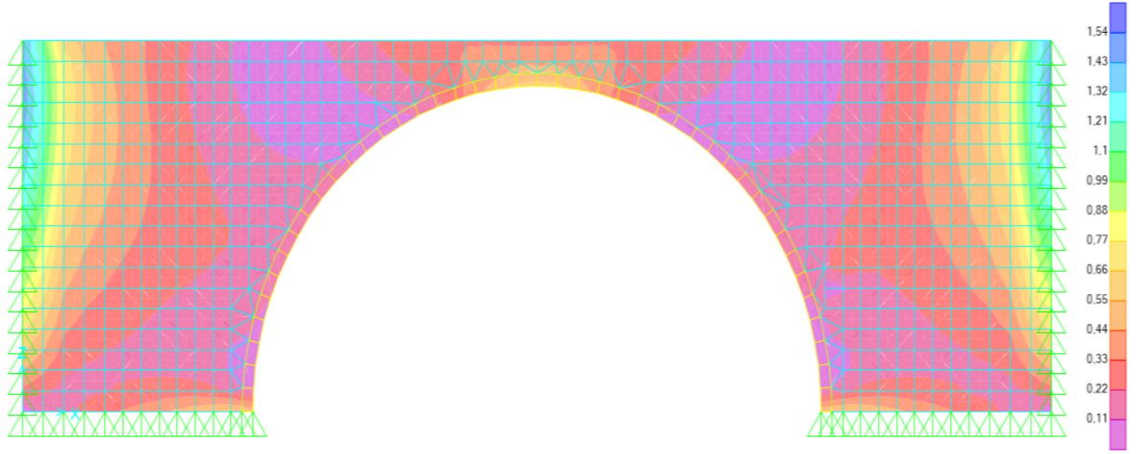


**Şekil 3.107.** Dairesel kemerde x yönü Kocaeli depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

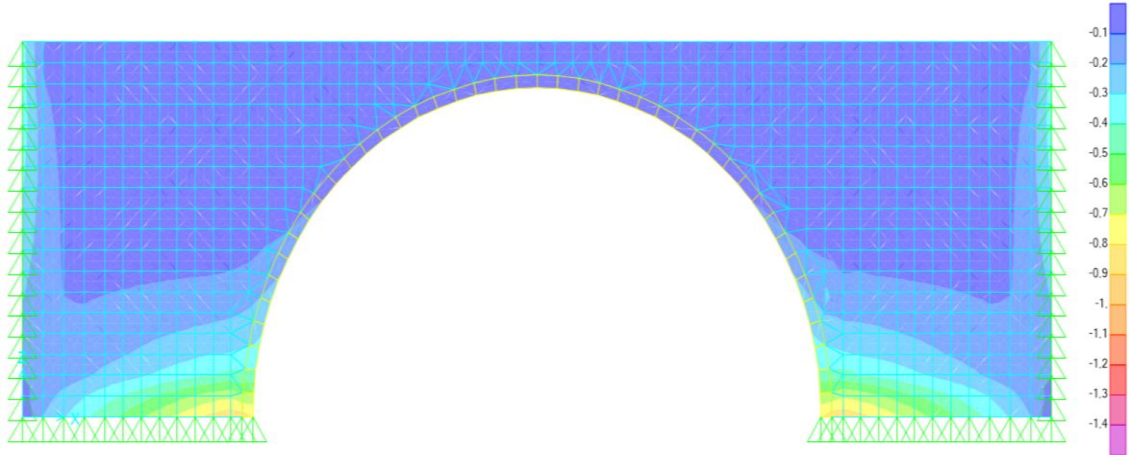


**Şekil 3.108.** Dairesel kemerde x yönü Kocaeli depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

Dairesel kemer formundaki köprüye y yönünde Kocaeli depremi etki ettirildiğinde oluşan gerilmeler incelendiğinde, çekme gerilmelerinin kemer orta bölgesinde  $0,7 \text{ kN/m}^2$ , basınç gerilmelerinin yine aynı bölgede  $0,2 \text{ kN/m}^2$ , kenar bölgelerde maksimum çekme gerilmesi değeri  $1,54 \text{ kN/m}^2$  ve köprü ayaklarında maksimum basınç gerilmesi değeri  $1,4 \text{ kN/m}^2$  değerlerine ulaşmaktadır. Y yönünde oluşan çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.118, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.119'da görülmektedir.

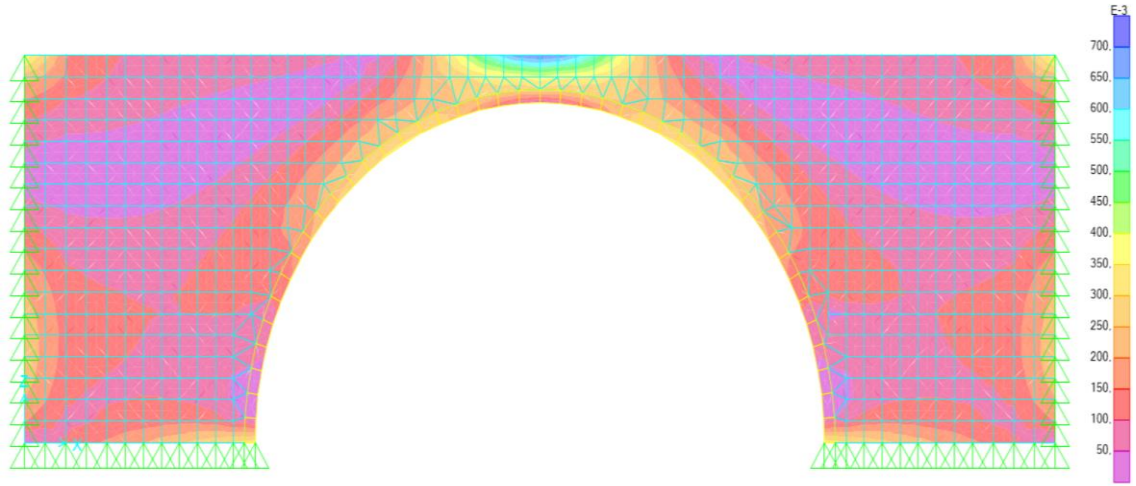


Şekil 3.109. Dairesel kemer y yönü Kocaeli depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

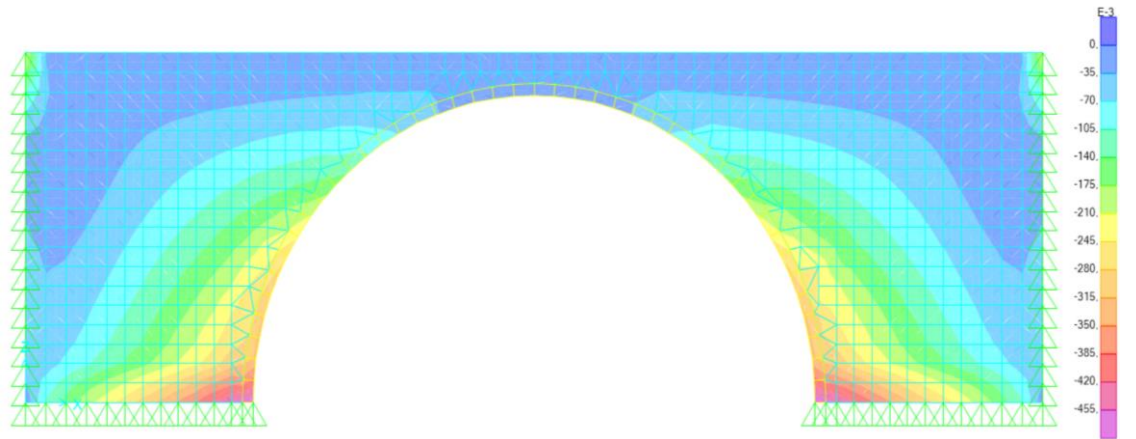


Şekil 3.110. Dairesel kemer y yönü Kocaeli depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

Dairesel kemer formundaki köprüye z yönündeki Kocaeli depremi etki ettirildiğinde oluşan gerilmeler incelendiğinde, çekme gerilmelerinin kemer yan yüzeylerinde  $0,4 \text{ kN/m}^2$ , maksimum çekme gerilmesinin  $0,7 \text{ kN/m}^2$ , basınç gerilmelerinin ise kemer orta noktası bölgesinde  $1 \text{ kN/m}^2$ , kemer mesnet bölgesinde  $0,45 \text{ kN/m}^2$  olduğu görülmektedir. Z yönünde meydana gelen çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.120, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.121'de görülmektedir.

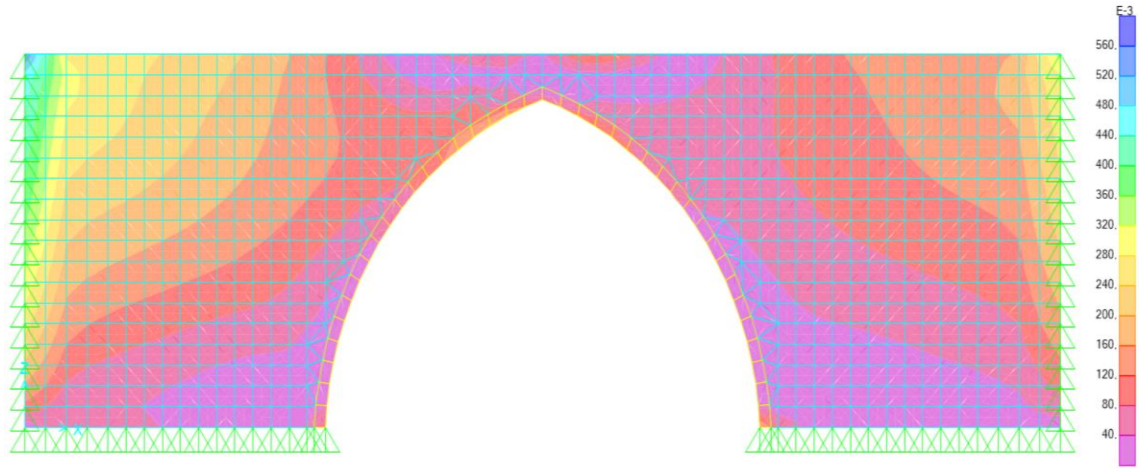


Şekil 3.111. Dairesel kemer z yönü Kocaeli depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

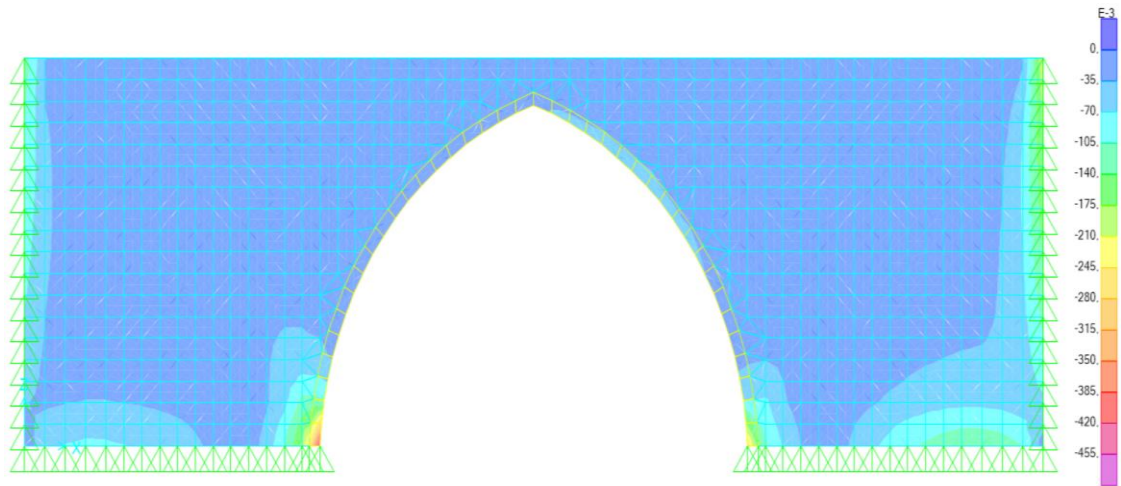


Şekil 3.112. Dairesel kemer z yönü Kocaeli depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

Sivri kemer formunda modellenen köprüye x yönünde Kocaeli depremi etki edilmiş, oluşan gerilmeler incelendiğinde, çekme gerilmelerinin kemer orta bölgesinde  $0,28 \text{ kN/m}^2$ , tempan duvarı yan mesnet bölgesinde  $0,56 \text{ kN/m}^2$ , basınç gerilmelerinin kemer orta noktası bölgesinde  $0,25 \text{ kN/m}^2$ , maksimum basınç gerilmesinin kemer mesnet bölgesinde  $0,45 \text{ kN/m}^2$  olduğu görülmektedir. X yönünde oluşan çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.122, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.123'te görülmektedir.

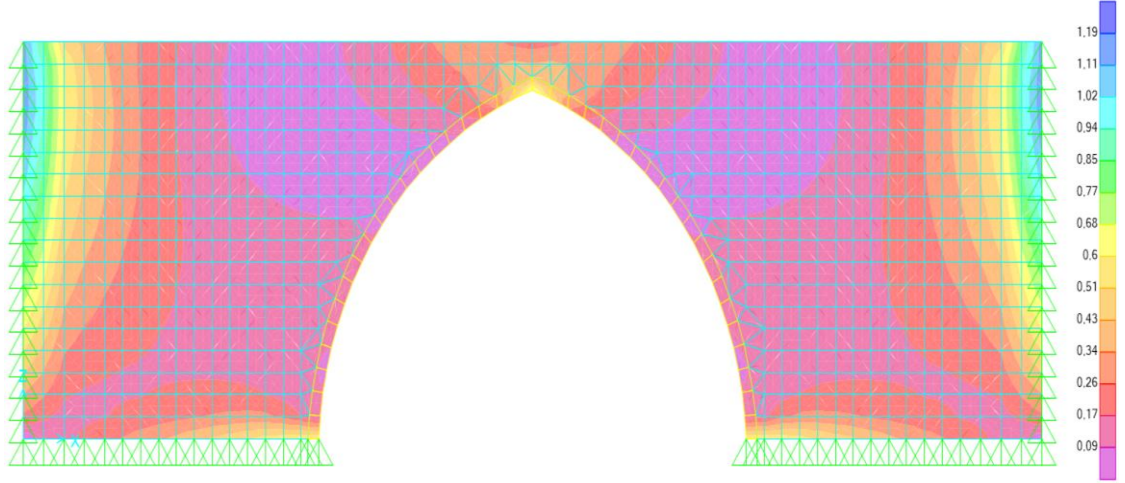


**Şekil 3.113.** Sivri kemerde x yönü Kocaeli depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

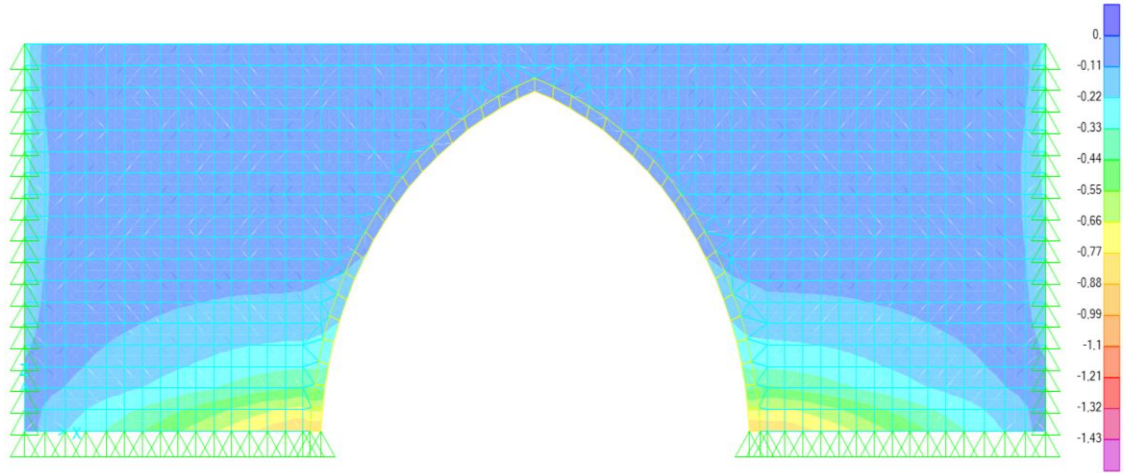


**Şekil 3.114.** Sivri kemerde x yönü Kocaeli depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

Sivri kemer formundaki köprüye y yönünde Kocaeli depremi etki ettirildiğinde, çekme gerilmelerinin kemer orta noktasında  $0,6 \text{ kN/m}^2$ , basınç gerilmelerinin yine aynı bölge de  $0,5 \text{ kN/m}^2$ , maksimum çekme gerilmesinin köprü kenarlarda  $1,19 \text{ kN/m}^2$ , maksimum basınç gerilmesinin kemer mesnet bölgesinde  $1,43 \text{ kN/m}^2$  olduğu görülmektedir. Y yönünde oluşan çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.124, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.125'te görülmektedir.

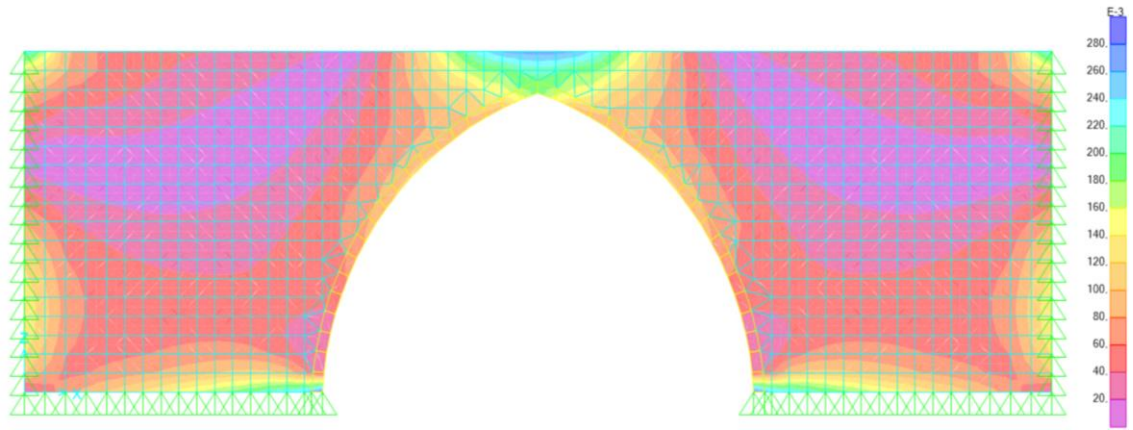


Şekil 3.115. Sivri kemer y yönü Kocaeli depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

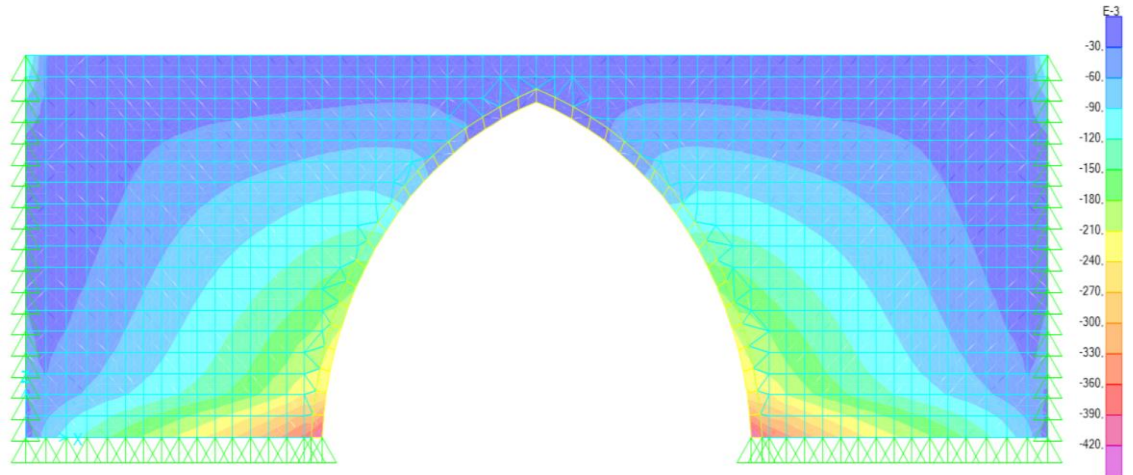


Şekil 3.116. Sivri kemer y yönü Kocaeli depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )

Sivri kemer formundaki köprüde z yönünde Kocaeli depremi etkisinde oluşan gerilmeler incelendiğinde, çekme gerilmelerinin kemer yan yüzeylerinde  $0,16 \text{ kN/m}^2$ , kemer mesnet ve kemer üstü tempın duvarı bölgesinde  $0,28 \text{ kN/m}^2$ , basınç gerilmelerinin ise kemer orta noktasında  $0,1 \text{ kN/m}^2$ , mesnet bölgelerinde  $0,42 \text{ kN/m}^2$  olduğu görülmüştür. Z yönünde meydana gelen çekme gerilmesi değerleri Şekil 3.126, basınç gerilmesi değerleri Şekil 3.127'de görülmektedir.



**Şekil 3.117.** Sivri kemer z yönü Kocaeli depremi çekme gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )



**Şekil 3.118.** Sivri kemer z yönü Kocaeli depremi basınç gerilmesi değerleri ( $\text{kN/m}^2$ )



#### 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında, Tarihi Geçit Köprüsü mevcut kemer formu olan basık kemer formu ve dairesel, sivri kemer formlarında köprü ebatları aynı tutularak üç boyutlu şekilde SAP2000 programında modellenmiştir. Bu modellemede sabit ve hareketli yükler sisteme tanımlanmıştır. Köprü modellerine ait frekanslar incelenmiştir. Dünyanın farklı bölgelerinde meydana gelmiş olan 1995 yılı Kobe, 1999 Chichi ve 1999 yılındaki Kocaeli Depremlerine ait ivme verileri, köprü modellerine deprem yükü olarak tanımlanmıştır. Bunun sonucunda köprüde oluşan hem sabit ve hareketli yükler altındaki yer değiştirmeler hem de köprü modellerinde, köprülerin tamamında ve kemer formları ölçeğinde meydana gelen gerilmeler incelenmiş, köprü performans düzeyi ve malzeme dayanım güvenlikleriyle ilgili bulgular aşağıdaki bölümde sıralanmıştır.

##### 4.1. Statik Yük Altında Yer Değiştirme ve Gerilmeler

Köprü basık, dairesel ve sivri kemer formlarında modellenmiştir. Bu farklı kemer formlarında aynı sabit ve hareketli yükler altında üç yönde meydana gelen yer değiştirmeler incelendiğinde, x yönünde yer değiştirmelerin sıfır ve sıfıra çok yakın olduğu, y yönündeki yer değiştirmelere baktığımızda en fazla yer değiştirme 0,013 cm ile basık kemer formunda görülmüştür. Yine kemer formlarında en yüksek yer değiştirme meydana gelen noktalar incelendiğinde, z yönünde en fazla yer değiştirmenin 0,166 cm ile basık kemer formunda olduğu görülmüştür. Tüm kemer formlarındaki yer değiştirmelere ait bilgiler Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Farklı kemer formlarına ait üç yöndeki yer değiştirme değerleri

	Yer Değiştirmeler (cm)		
	X yönü	Y yönü	Z yönü
Basık	0	0,013	0,166
Dairesel	0	0,004	0,093
Sivri	0	0,002	0,035

Sabit yük altında oluşan gerilmeler incelendiğinde, basık kemer formunda çekme gerilmelerinin orta bölgelerde en fazla değerlere ulaştığı ve aynı zamanda kemer yan yüzeylerinde de basınç gerilmelerinin yoğunlaştığı görülmüştür. Dairesel ve sivri kemerde ise çekme gerilmelerinin köprü kemeri orta alt bölgelerinde bir miktar arttığını ancak basık kemer formuna göre çok daha düşük seviyelerde kaldığı görülmüştür. Basınç gerilmeleri ise, köprü yan yüzeylerinden köprü alt mesnet noktalarına doğru üniform bir şekilde arttığı görülmüştür. Kemer bölgelerine büyük bir basınç yükü gelmemektedir.

#### 4.2. Frekans Değerlerinin İncelenmesi

Köprüye ait üç farklı kemer formunda ilk üç moddaki frekans değerlerini incelediğimizde, frekans değerlerine farklılık olduğu gözlemlenmiştir. Basık kemer de ilk iki mod birbirine çok yakın iken dairesele ve sivri kemer 2.mod ve 3.mod değerleri birbirine daha yakın olduğu görülmüştür. Basık, dairesele ve sivri kemer formlarında modellenen köprüye ait frekans değerleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Üç moda ait farklı kemer formlarındaki frekans değerleri

	Frekanslar (Hz.)		
	Mod 1	Mod 2	Mod 3
Basık	18,35	18,73	25,33
Dairesel	17,58	23,28	27,73
Sivri	20,83	30,29	35,99

#### 4.3. Depremlerin Etkisinde Davranışların İncelenmesi

Köprü modellerine üç farklı deprem x, y ve z yönlerinde etki ettirilerek, köprüde meydana gelen yer değiştirmeler incelenmiştir. Chichi depremi etkisinde basık kemer formunda en yüksek yer değiştirme z yönünde meydana gelmiş ve 0,031 cm’dir. Dairesel ve sivri kemer formlarında yer değiştirmeler üç yönde de sıfır veya sıfıra çok yakındır. Kobe depremi etkisinde, basık kemer formunda maksimum yer değiştirme z yönünde meydana

gelmiş ve 0,02 cm. olmuştur. Aynı şekilde sivri ve dairesel kemer formlarında tüm yönlerde Kobe depremi etki ettirildiğinde köprü formunda meydana gelen yer değiştirmeler sıfır veya sıfıra çok yakın olduğu görülmüştür.

Kocaeli depremde ise basık kemer formunda meydana gelen yer değiştirmelerin yine z yöndeki depremin etkisinde maksimum yer değiştirmelerin olduğu görülmüştür. Buradaki yer değiştirme miktarı 0,018 cm olmuştur. Kocaeli depremi üç yönde etki ettirildiğinde dairesel ve sivri kemer formlarında yine aynı şekilde yer değiştirmeler diğer deprem etkilerinde olduğu gibi sıfır veya sıfıra yakın olarak meydana geldiği görülmüştür. Köprü kemer formlarına üç farklı ve üç ayrı yönde etkitilen depremlerin köprü formlarında meydana getirdiği yer değiştirme değerleri Çizelge 4.3’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Depremlerin üç yönde ayrı ayrı etkitildiğinde, farklı kemer formlarında meydana gelen yer değiştirme değerleri (cm)

Depremlerin Etkisinde Üç Yöndeki Yer Değiştirmeler (cm)									
Deprem Etki Yöntü	Chichi Depremi			Kobe Depremi			Kocaeli Depremi		
	X yönü	Y yönü	Z yönü	X yönü	Y yönü	Z yönü	X yönü	Y yönü	Z yönü
Basık	0,0031	0,0279	0,0314	0,0028	0,0156	0,0195	0,0026	0,0146	0,018
Dairesel	6,7E-05	6,1E-05	0,0001	0,00036	0,0002	0,0001	0	0	0
Sivri	0	0	0	0	0	0	0,00001	0,00009	0,00005

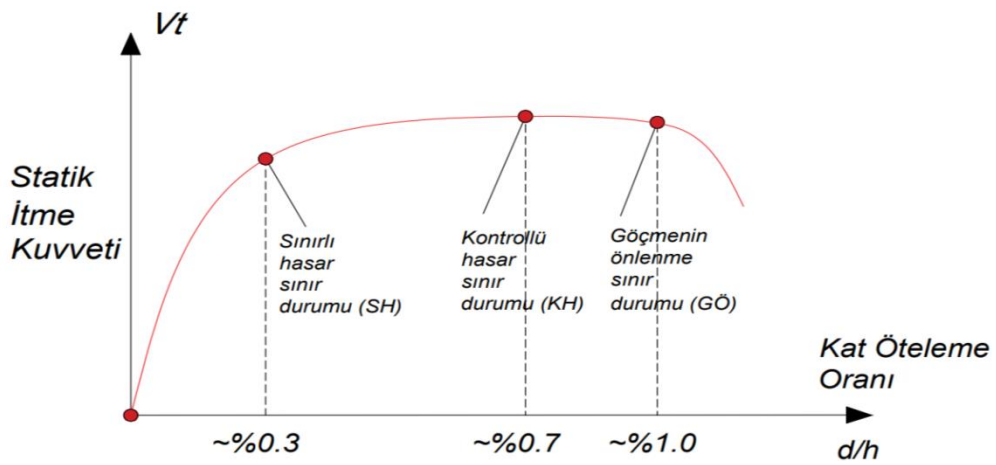
Köprü modellerine etki edilen üç depremin etkisinde, farklı kemer formlarındaki köprü modellerinde depremlerin üç farklı yönde ayrı ayrı etki edilmesiyle, köprülerin tamamında ve kemer formu ölçeğinde meydana gelen maksimum-minimum çekme ve basınç gerilmeleri incelenmiştir. Oluşturulan tabloda çekme ve basınç değerleri köprü kemerlerinde oluşan en büyük gerilme değerleri dikkate alınarak hazırlanmıştır. Bu gerilmelere ait değerler aşağıdaki Çizelge 4.4’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.4.** Depremlerin üç yöndeki etkisinde meydana gelen maksimum çekme ve basınç gerilmesi değerleri (kN/m<sup>2</sup>)

<b>Kemer Formlarında Depremlerin Etkisinde Oluşan Maksimum Gerilmeler (kN/m<sup>2</sup>)</b>										
		<b>Chichi Depremi</b>			<b>Kobe Depremi</b>			<b>Kocaeli Depremi</b>		
Deprem etki yönü		X yönü	Y yönü	Z yönü	X yönü	Y yönü	Z yönü	X yönü	Y yönü	Z yönü
Basık kemer	Çekme	60	60	180	56	49	90	56	49	90
	Basınç	20	100	58	21	81	77	21	77	46
Dairesel kemer	Çekme	0,84	1,90	1,10	0,77	1,5	0,63	0,77	1,54	0,70
	Basınç	0,42	0,60	0,60	0,39	1,5	0,78	0,39	1,40	0,45
Sivri kemer	Çekme	0,60	1,80	0,36	0,56	1,26	0,39	0,56	1,19	0,28
	Basınç	0,50	1,80	0,36	0,45	1,54	0,70	0,45	1,43	0,42

#### 4.4. Köprünün Performans Düzeyinin Değerlendirilmesi

Köprünün performans düzeyi değerlendirilirken, Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzundaki performans sınır durumlarına göre belirlenmiştir (Şekil 4.1).



**Şekil 4.1.** Statik itme kuvveti ve sınır durumları eğrisi (TYİDRYK. 2017)

**Çizelge 4.5.** Performans düzeyleri ile ilgili hesap yöntemleri, gerilme ve şekil değiştirme sınırları (TYİDRYK. 2017)

<b>Performans düzeyi</b>	<b>Hesap yöntemi ve sınırlar</b>
Sınırlı hasar sınır durumu (SH)	1. Doğrusal hesap yöntemi kullanılıyor; a) Düşey yük ve azaltılmamış öngörülen deprem etkisinde bulunan hesap dayanımları aşılmıyor. b) Azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranı %0,3 sınırını aşmıyor.
Kontrollü hasar sınır durumu (KH)	1. Doğrusal hesap yöntemi kullanılıyor; a) Düşey yük ve $3 R_a \leq$ ile azaltılmış öngörülen deprem etkisinde bulunan hesap dayanımları aşılmıyor. b) Azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranı %0,7 sınırını aşmıyor. 2. Doğrusal olmayan hesap yöntemi kullanılıyor; a) Öteleme oranı %0,7 sınırının aşmıyor. b) Malzemelerin şekil değiştirme kapasiteleri aşılmıyor.
Göçme öncesi sınır durumu (GÖ)	1. Doğrusal hesap yöntemi kullanılıyor; a) Düşey yük ve $3 R_a \leq$ ile azaltılmış öngörülen deprem etkisinde bulunan hesap dayanımları belirli bir oranla (~1,5 katı) aşılabılır. b) Azaltılmamış deprem etkisinde öteleme oranı %1 sınırını aşmıyor. 1. Doğrusal olmayan hesap yöntemi kullanılıyor; a) Öteleme oranı %1 sınırının aşmıyor. b) Malzemelerin şekil değiştirme kapasiteleri sınırlı oranda (~1,2 katı) aşılabılır.

Depremlerin etkisi altında yapılan analizler sonucunda en büyük yer değiştirmenin 0,3 mm. olduğu görülmüştür. Bu değer oldukça küçük olup, deprem etkileri altında köprünün sınırlı hasar durumuna bile ulaşmadığı tespit edilmiştir.

#### 4.4.1. Taş duvar sistemi basınç dayanımı güvenliği

Köprü, kemerlerde ve tempan duvarlarında küfeki taşı kullanılarak oluşturulmuş olup, dolgu kısmında moloz taş ve toprak kullanılmıştır. Yapıdan numune alınamamıştır ancak Bursa'da benzer dönemlerde yapılan yapılardan alınan numunelerde küfeki taşının basınç mukavemetinin 15 MPa ile 35 MPa arasında değiştiği yapının malzeme özelliklerinin belirlenmesi isimli 3.5 konu başlığında belirtilmiştir.

Basık, dairesel ve sivri kemer formlarındaki köprülerde meydana gelen maksimum basınç gerilmeleri en fazla basık kemer formunda oluşmakta olup bu değer en çok 100 kN/m<sup>2</sup> değerine ulaşmaktadır. Küfeki taşı ve harç kompozit malzemesi kullanılarak oluşturulan kemer ve tempan duvarlarında basınç gerilmesi 15 MPa civarında kabul edildiği için analizlerde oluşan basınç gerilmeleri oldukça düşük düzeyde olup köprünün basınç dayanımı güvenliğini tehdit etmemektedir.

#### 4.4.2. Taş duvar sistemi kayma dayanımı güvenliği

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinin 11. Bölümüne göre, duvar karakteristik kayma dayanım  $f_{vk}$ , duvar numuneleri üzerinde yapılacak deneylerden veya aşağıdaki denklem ile elde edilecektir (TBDY. 2018).

$$f_{vk} = f_{vko} + 0,4 \sigma_d \leq 0,10 f_b \quad (4.1)$$

$f_{vk}$  : Duvar üzerindeki ortalama düşey gerilmeleri kullanarak bulunan duvar karakteristik kesme dayanımı

$f_{vko}$  : Eksenel gerilmenin bulunmadığı durumdaki karakteristik kesme dayanımı

$\sigma_d$  : Yük katsayıları ile çarpılmış düşey yükler ve deprem yüklerinin ortak etkisi altında hesaplanan düşey basınç gerilmesi

$f_b$  : Kargir biriminin standartlaştırılmış (boyut etkisinden arındırılmış 100×100mm boyutundaki numuneye eşdeğer) ortalama basınç dayanımıdır. Eksenel gerilmenin bulunmadığı durumdaki karakteristik kayma dayanımı ( $f_{vk}$ ), Deprem Yönetmeliğinde bulunan aşağıdaki Çizelge 4.6'ya göre belirlenecektir (TBDY. 2018).

**Çizelge 4.6.** Duvarların başlangıç kesme dayanımları fvko (MPa) (TBDY. 2018)

<b>Kargir birim</b>	<b>Genel amaçlı harç (*)</b>		<b>İnce tabaka harç</b>
Tuğla	M10-M20	0.30	0.30
	M2.5-M9	0.20	
	M1-M2	0.10	
Beton	M10-M20	0.20	0.30
Gazbeton	M2.5-M9	0.15	0.30
Doğal veya Yapay Taş	M1-M2	0.10	Kullanılamaz

(\*) Harçlar M harfini takip eden rakam MPa cinsinden karakteristik basınç dayanımlarını gösterecek şekilde isimlendirilmiştir (TBDY. 2018).

Kullanılacak taşlar için kayma dayanım değerleri 0,10 MPa=100 kN/m<sup>2</sup> olarak gösterilmiştir. Düşey yük altında yapılan analiz sonuçlarına göre yapıda oluşan maksimum basınç gerilmeleri ( $\sigma_d$ ) kullanılarak duvarların etkili kayma gerilmeleri elde edilmiştir. Tüm kemer formlarına ait oluşan basınç değerleri ile etkili kayma gerilmeleri yapılan analizler sonucunda duvarlarda meydana gelen kayma gerilmeleri ve hesaplanan kayma gerilmeleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu verilere ait bilgiler Çizelge 4.7, Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9’ da sunulmuştur (Demir 2019).

**Çizelge 4.7.** Chichi Depremi etkisinde üç kemer formunda taş duvar sistemi kayma güvenliği

<b>Kemer Formu</b>	<b>Doğrultu</b>	<b>Oluşan Basınç</b>	<b>Oluşan Kayma</b>	<b>Etkili Kayma</b>	<b>Durum</b>
		<b>Gerilmesi</b> (kN/m <sup>2</sup> )	<b>Gerilmesi</b> (kN/m <sup>2</sup> )	<b>Dayanımı</b> (kN/m <sup>2</sup> )	
Basık	X-X	20	60	108	Sağlıyor
	Y-Y	100	60	140	Sağlıyor
Dairesel	X-X	0,42	0,84	100,17	Sağlıyor
	Y-Y	1,80	1,90	100,72	Sağlıyor
Sivri	X-X	0,50	0,60	100,20	Sağlıyor
	Y-Y	1,80	1,80	100,72	Sağlıyor

**Çizelge 4.8.** Kobe Depremi etkisinde üç kemer formunda taş duvar sistemi kayma güvenliği

Kemer Formu	Doğrultu	Oluşan Basınç	Oluşan Kayma	Etkili Kayma	Durum
		Gerilmesi (kN/m <sup>2</sup> )	Gerilmesi (kN/m <sup>2</sup> )	Dayanımı (kN/m <sup>2</sup> )	
Basık	X-X	21	56	108,4	Sağlıyor
	Y-Y	81	49	132,4	Sağlıyor
Dairesel	X-X	0,39	0,77	100,16	Sağlıyor
	Y-Y	1,50	1,50	100,60	Sağlıyor
Sivri	X-X	0,45	0,56	100,18	Sağlıyor
	Y-Y	1,54	1,26	100,62	Sağlıyor

**Çizelge 4.6.** Kocaeli Depremi etkisinde üç kemer formunda taş duvar sistemi kayma güvenliği

Kemer Formu	Doğrultu	Oluşan Basınç	Oluşan Kayma	Etkili Kayma	Durum
		Gerilmesi (kN/m <sup>2</sup> )	Gerilmesi (kN/m <sup>2</sup> )	Dayanımı (kN/m <sup>2</sup> )	
Basık	X-X	21	56	108,4	Sağlıyor
	Y-Y	77	49	130,8	Sağlıyor
Dairesel	X-X	0,39	0,77	100,16	Sağlıyor
	Y-Y	1,40	1,54	100,56	Sağlıyor
Sivri	X-X	0,55	0,56	100,22	Sağlıyor
	Y-Y	1,43	1,19	100,57	Sağlıyor



## 5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, tarihi taş köprülerin Anadolu coğrafyasında dönemlere göre değişimi, yapım teknikleri, yapım aşamasında kullanılan malzemelerin değişimi ve özellikleri araştırılmıştır. Taş köprüler özelinde Bursa İli Mudanya yolu Nilüfer Çayı üzerinde bulunan Tarihi Geçit Köprüsü çalışma kapsamında incelenmiştir. Köprü hakkında daha önce yapılmış olan çalışmalar ve kaynaklar araştırma kapsamında ele alınmış ve malzeme özellikleri belirlenmiştir.

Köprünün mevcut halindeki formu olan basık kemer formu gerçeğe en yakın şekilde ve daha önceki rölövesine göre ölçülendirilerek SAP2000 programında üç boyutlu şekilde modellenerek analiz edilmiştir. Köprü mevcut halinden farklı olarak köprü yüksekliği, genişliği, dayanım özellikleri, parametreleri ve yüklemeler sabit şekilde aynı tutularak dairesel ve sivri kemer formlarında tekrar modellenerek analiz edilmiştir. Farklı kemer formlarında bulunan köprü modelleri sabit ve hareketli yükler altındaki davranışları incelendikten sonra, köprü modellerine 1995 yılı Kobe depremi, 1999 Chichi ve 1999 Kocaeli depremleri üç farklı yönde etki ettirilerek, köprülerde oluşan gerilme ve yer değiştirmeler tekrar incelenmiştir. Yapılan incelemeler kemer tiplerinin karşılaştırılması şeklinde olup malzeme parametreleri deneysel yollarla elde edilemediği için verilen deplasman ve gerilme değerleri kesin sonuçlar değildir. Köprüye ait kütle katılım oranları, frekansları ve performans düzeyleri belirlenmiş olup yapılan incelemeler sonucunda elde edilen tüm sonuçlar karşılaştırmalı olarak aşağıda sıralanmıştır;

- Düşey yükler altında yapılan analizler sonucunda, en büyük yer değiştirmelerin köprü orta bölgesinde ve basık kemerde olduğu görülmüştür. Bu kısımda yine en büyük çekme gerilmelerinin olduğu tespit edilmiştir. Basık kemer formundaki köprü kemerinin iki yan yüzeyinin de diğer kemer formlarına göre basınç gerilmelerinin daha etkin olduğu görülmüştür. Dairesel ve sivri kemer formlarında ise yer değiştirme miktarları azalmakta, gerilme değerlerinde de önemli azalmalar meydana gelmiştir. Burada basınç gerilmeleri de köprü kemerlerinin yan yüzeylerinden başlamak suretiyle üniform şekilde tabana doğru artmaktadır. Bu bağlamda basık köprünün hem çekme gerilmelerinin hem de basınç gerilmeleri

yönünden olumsuz davranış gösterdiği anlaşılmaktadır. Ancak basınç gerilmeleri her ne kadar artsa da taş malzeme için gerilme değerlerini aşmamaktadır.

- Her üç köprü tipi için frekans değerleri incelenmiştir. Basık kemer de ilk iki mod birbirine çok yakın iken dairesel ve sivri kemer 2.mod ve 3.mod değerleri birbirine daha yakın olduğu görülmüştür. Köprüler için ilk üç mod yönleri de farklılaşmaktadır. Kütle katılım oranları ise, ancak 40 mod dikkate alındığı zaman %95-99 aralığına ulaşmaktadır.
- Farklı deprem yükleri altında x, y ve z yönünde oluşan basınç, çekme ve kayma gerilme değerleri incelenmiştir. Buna göre en büyük basınç ve çekme gerilmeleri düşey yönde etkilenen depremler de oluştuğu görülmektedir. Kayma gerilmelerinde ise, y yönü (köprü memba-mansap yönü) en büyük gerilmelerin oluştuğu yön olarak görülmektedir. Tüm kemerler için en büyük çekme ve basınç gerilmeleri basık kemer formunda oluşmaktadır. En büyük gerilme değerleri diğerlerinden farklı olarak ters atımlı olan Chichi depreminde meydana geldiği görülmüştür.
- Basık kemer formunda oluşan çekme ve basınç gerilmelerinin dairesel ve sivri kemer formlarına göre 50 kat civarında daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzuna göre yapılan hesaplarda köprüler için etkili kayma dayanımlarının aşılmadığı görülmüştür. Ayrıca deprem analizleri sonucu performans düzeylerinde de köprülerin yer değiştirmeler açısından çok düşük değerlerde kaldığı ve sınırlı hasar durumuna bile erişmediği tespit edilmiştir.

Tarihi yapıların gelecek kuşaklara aktarılabilmesi için yapısal analizlerin yapılarak davranışlarının bilinmesi gerekmektedir. Bu bağlamda Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu yol gösterici bir kaynak oluşturmakta, ancak deneysel çalışmalarla da köprüler hakkında daha fazla bilgi edinilmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmaların artırılarak bu yapıların onarımlarının doğru yöntemlerle yapılabilmesi için malzeme özelliklerinin belirlenmesi, statik ve dinamik analizlerinin yapılarak davranışlarının incelenmesi büyük önem arz etmektedir.

## KAYNAKLAR

- Adam, J.P. 1999. Roman Building Materials and Techniques, Routledge, London.
- Ahunbay, Z. 1988. Mimar Sinan yapılarında kullanılan yapım teknikleri ve malzeme. *Mimarbaşı Koca Sinan: Yaşadığı Çağ ve Eserleri*, s. 531-538, İstanbul.
- Alaboz, M. 2008. *Mimar Sinan köprülerinin güncel durum değerlendirmesi ve Kapuağası Köprüsü restorasyon projesi* (yüksek lisans tezi). YÖK tez merkezinden edinilmiştir (252356).
- Anonim. 2014. Tarihi Geçit köprüsü projeleri ve teknik raporu. KGM. *Arşiv Kayıt No: B.14 /İ.16 / N.02 / RUP-2014 nolu Yayınlanmamış Teknik Rapor*, Ankara.
- Arun, G. 2006. Behaviour of Masonry Vaults and Domes: Geometrical Considerations, *Structural Analysis of Historical Constructions*, New Delphi.
- Akman, M.S., Güner, A. ve Aksoy, İ.H. 1986. Horasan harcı ve betonunun tarihi ve teknik özellikleri, *II. Uluslararası Türk-İslam Bilim ve Teknoloji Tarihi Kongresi*, İ.T.Ü., 28 Nisan-2 Mayıs, İstanbul.
- Barow, H. 2013. Roads and Bridges of The Roman Empire. *Stuttgart / London: 2013 Edition Axel Menges*, 240 s.
- Batur, A. 1974. Osmanlı Camilerinde Kemer Strüktür-Biçim Üzerine Bir Deneme, *İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Baskı Atölyesi*, İstanbul.
- Bağbancı, M.B., Özcan, R. ve Bağbancı, Ö.K. 2010. Characterization of Materials used in the fourteenth century, the early Ottoman Ördekli Bath, Bursa, Turkey Studies in Conservation, 55 (4), pp. 301-312.
- Bağbancı, Ö.K., Bağbancı, M.B. ve Pekmezci, P.I. 2019. Bursa Dereköy ve Aydınpınar Kiliseleri ile Erdek Ballıpınar Kilisesi'nde kullanılan malzemelerin karakterizasyonu ve strüktürel davranışlarının belirlenmesi, TÜBİTAK-117M871 sayılı proje raporu, Ankara.
- Block P. 2005. Equilibrium systems studies in Masonry Structure, MSc Thesis, Faculty of Architecture, Massachusetts Institute of Technology.
- Boothby, T.E. ve Anderson, A.K. 1995. The Masonry Arch Considered, *Journal of Architectural Engineering*, 25-36 s.
- Böke, H., Akkurt, S., İpekoğlu, B. 2004. Tarihi yapılarda kullanılan horasan harcı ve sıvalarının özellikleri. *Yapı dergisi*. 269, 90-95.
- Cevahir, M. 2019. *Tarihi taş köprülerin yapım teknikleri ve malzeme kullanımı açısından incelenmesi*, (yüksek lisans tezi). YÖK tez merkezinden edinilmiştir (605142).
- Çulpan, C. 2002. Türk Taş Köprüleri – Orta Çağdan Osmanlı Devri sonuna kadar. *Türk Tarih Kurumu Basımevi*, Ankara.
- Demir, O. 2019. *Tarihi Diyarbakır Dicle (on gözlü) Köprüsü'nün sonlu eleman yöntemiyle analizi*, (yüksek lisans tezi), YÖK tez merkezinden edinilmiştir (558401).
- Demirtaş, N. 2014. Nuran Demirtaş Arşivi.
- Erguvanlı, K. ve Ahunbay, Z. 1989. Mimar Sinan'ın İstanbul'daki eserlerinde kullandığı taşların mühendislik jeolojisi ve mimari özellikleri. *Mühendislik Jeolojisi Bülteni*, (11), 109-114, İstanbul.
- Halifeoğlu, F. M., Sert, H. ve Yılmaz, S. 2013. Tarihi Kurt Köprüsü (Mihraplı Köprü, Vezirköprü) restorasyonu proje ve uygulama çalışmaları. *Metu JFA 2013/2*, (30:2), 81-104.

- Huerta, S. 2006. Galileo Was Wrong: The Geometrical Design of Masonry Arches. *Nexus Network Journal*, 8 (2), 25-52.
- İlter, F. 1978. Osmanlılara Kadar Anadolu Türk Köprüleri, *KGM* (Yayın No. 268), *Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası*, Ankara, 305 s.
- Macaulay, D. 2003. Mosque. Walter Lorraine Books, Houghton Mifflin Company, New York, 96 s.
- Macdonald, W.L. 1986. Architecture Of The Roman Empire Vol II, *Yale University Press*, London.
- Marta, R. 1991. Roman Building Techniques, Edizioni Kappa, Roma.
- Meistermann, A. 2007. Adım adım taşıyıcı sistemler. Çev. Tuğçe Selin Tağmat. Yapı-Endüstri Merkezi Yayınları:192. İstanbul, 85 s.
- Nobile, L. ve Bartolomeo, V. 2015. “Structural analysis of historical masonry arches: State-of-the-art and recent developments, Florence.
- Ortaylı, İ. 2007. Türkiye Teşkilat ve İdare Tarihi. *Cedit Neşriyat Yayınevi*, Ankara, 592 s.
- O'dwyer, D. 1998. Funicular analysis of masonry vaults. Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, Trinity College, Dublin.
- Özkaraman, M. 1994. Anadolu Selçuklu mimarisinde kemerlerin analitik incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, YTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, İstanbul.
- Sert, H., Partal, E.M., Demirci, H., Akbulut, T., Avşin, A., Üste, C., ... Korkmaz, İ.H. 2009. Tarihi Köprüler Teknik Şartname, Mevzuat, Envanter, Proje, Bakım ve Onarımı. *KGM Yayınları: 268*, s.410, Ankara.
- Sert, H., Yılmaz, S., Partal, E.M., Demirci, H., Avşin, A., Nas, M. ve Turan, G.S. 2013. Anadolu ve Balkanlardaki taş kemer köprülerde gerçekleştirilen restorasyon çalışmaları. *7. Uluslararası Kemer Köprüler Konferansı Arch 2013*, 2-4 Ekim 2013, Trogir-Split, Hırvatistan.
- SAP 2000, 1997. Integrated Structural Analysis Design Software, Computers & Structures, Inc., Berkeley, California.
- Tanyeli, G. 2017. Hiçbir Üstâd Böyle Kâr Etmemiştir: Osmanlı İnşaat Teknolojisi Tarihi. *Akın Nalça Yayınevi*, İstanbul, 392 s.
- Troyano, L.F. 2003. Bridge Engineering – A Global Perspective, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, Spain.
- Tunç, G. 1978. Taş Köprülerimiz. *Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası*, (Yayın No. 237), Ankara, 222 s.
- T.S.E. 2001. Kagir yapıların tasarımı. Bölüm 1-1: Binalar İçin Genel Kurallar Donatılı ve Donatısız Kagir Kuralları, TS ENV 1996-1-1, Türk Standartları Enstitüsü, (1. Baskı), Ankara.
- TBDY. 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, *T.C. Resmî Gazete*, Sayı 30364.
- TYİDRYK. 2017. Tarihi yapılar için deprem risklerinin yönetimi kılavuzu, Vakıflar Genel Müdürlüğü.
- Vermeltfoort, A.T. 2001. Analysis and Experiments Of Masonry Arches, Historical Constructions (P.B. Lourenço, P. Roca) (Eds.), Guimaraes.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Öner ÇINKO  
Doğum Yeri ve Tarihi : Yunak, 16.05.1992  
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Selimpaşa Atatürk Anadolu Lisesi, 2010  
Lisans : Balıkesir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, 2014  
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi, Mimarlık, 2022

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Bursa Kule Yapı Denetim (2014-2016)  
Bursa Metropol Yapı Denetim (2016-2018)

İletişim (e-posta) : 501812010@ogr.uludag.edu.tr  
onrcnko@gmail.com

Yayımları :