



**T.C.**  
**BATMAN ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**TARİHİ MALABADİ KÖPRÜSÜNÜN**  
**İNCELENMESİ VE YAPISAL ANALİZİNİN**  
**DEĞERLENDİRİLMESİ**

**Abdullah ÇETİN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Ocak-2023**  
**BATMAN**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Abdullah Çetin tarafından hazırlanan “Tarihi Malabadi Köprüsünün İncelenmesi ve Yapısal Analizinin Değerlendirilmesi” adlı tez çalışması 12/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Ziraddin MAMMADOV

.....

#### Danışman

Prof. Dr. Şahnaz TİĞREK

.....

#### Üye

Prof. Dr. Fatma Meral HALİFEOĞLU

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Osman Pakma  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

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

## **DECLARATION PAGE**

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

Abdullah ÇETİN

Tarih:31.12.2022

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## TARİHİ MALABADI KÖPRÜSÜNÜN İNCELENMESİ VE YAPISAL ANALİZİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Abdullah ÇETİN

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şahnaz TİĞREK

2023, 123 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Şahnaz TİĞREK  
Prof. Dr. Ziraddin MAMMADOV  
Prof. Dr. Fatma Meral HALİFEOĞLU

Tarihten günümüze kalan eski yapıların muhteşemliğinin sırları çözümlenmeyi beklemektedir. Dünyada ve ülkemizde kesme taştan yapılan yığma yapılar vardır, örneğin Mısır piramitleri, Taç Mahal, Sarıncılar, Ayasofya ve kendi devrinde yıkılmaz kabul edilen İstanbul surları gibi. Günümüzün modern betonarme, çelik veya kompozit yapı binaları ortalama ekonomik ömürleri 50 yılı geçmemesine rağmen, tarihin ve zamanın tanıkları olan bu eserler yüzyıllardır ayakta kalabilmişlerdir. Bu yapıların yapılış teknikleri, mimari modülleri, süsleme motifleri, statik ve dinamik olarak yapısal davranışları, zemin yapılarını incelemek hem geçmiş uygarlıkların teknolojileri hakkında daha fazla bilgi edinmemize hem de koruma planlarının geliştirilmesine yardımcı olacaktır. Bu sebeple son yıllarda eski yapıların yapısal davranışlarının günümüz teknikleriyle analizi üzerine çalışmalar yapılmakla beraber, bazıları iki kanatlı kuşun tek kanadı gibi olup eksik ve yetersizdir. Eski yığma yapılar oldukça karmaşık yapılara sahiptir. Yapıda kullanılan malzemenin ve birleştirme harcının homojen bir yapıda olduğu varsayımı yapılmaktadır. Oysaki maden ocaklarından çıkarılan yontu taşların heterojen bir yapıda olup bazen taşlarda ilerde çatlaması muhtemel olan damarlar mevcut olmakta ve bunların tespiti çıplak gözle her zaman yapılamamaktadır. Bu çalışmada Tarihi Malabadi Köprüsünün yapısal analizi yapılarak olası muhtemel deprem ve çevresel etkiler sonucunda köprünün davranışının incelenmesinin amaçlanmasının yanı sıra Malabadi'nin tarihçesi ve tarihe olan tanıklığına da yer verilecektir. Malabadi Köprüsü mimari, estetik ve ana kemer açıklığının büyüklüğü dikkate alındığında pek çok yığma taş köprüden ayrılmaktadır. Malabadi Köprüsü bugüne kadar tarihçilerin, seyyahların, gezginlerin, mimarların, arkeologların, sanat tarihçilerinin ve mühendislerin her zaman ilgisini çekmiştir. Köprü hakkında yazılmış kaynaklar güncellenecek ve yapılan restore çalışmalarının sonuçları da dikkate alınacaktır. Yapısal analizler sonuçları ileride ihtiyaç duyulacak olan restore çalışmalarına ışık tutacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Kemer Köprüler, Limit Analiz, Malabadi Köprüsü, Taş köprüler, Yığma Köprülerin Doğrusal Olmayan Yapısal Analizi.

## **ABSTRACT**

**MS/Ph.D THESIS**

### **INVESTIGATION AND EVALUATION OF THE STRUCTURAL ANALYSIS OF THE HISTORICAL MALABADI BRIDGE**

**Abdullah ÇETİN**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
BATMAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE CIVIL ENGINEERING**

**Advisor: Prof. Dr. Şahnaz TİĞREK**

**2023, 123 Pages**

**Jury**

**Prof. Dr. Şahnaz TİĞREK**

**Prof. Dr. Ziraddin MAMMADOV**

**Prof. Dr. Fatma Meral HALİFEOĞLU**

The mysteries of the magnificence of the old structures that have survived from history awaits to be solved. There are many masonry structures made of cut stone around the world and in our country such as the Egyptian pyramids and Taj Mahal, the Cisterns and Hagia Sophia in Istanbul and city walls which were accepted to be indestructible walls. Although the average economic life of today's reinforced concrete, steel or composite buildings does not exceed 50 years, these works, which are the witnesses of history and time have survived for several centuries. To investigate the construction techniques, architectural modules, ornament motifs, static and dynamic structural behavior, ground structures and settlements are of those structure will help to understand the techniques developed by the past cultures and help to develop conservation plans for them. Although there are studies are studies on the structural behavior of old structures, recently, some of those studies carried out are like a single wing of a two-winged bird and are incomplete and insufficient. Old masonry structures have very complex structures. Most of the times, calculations were made with the assumptions that both the material used in the building and binding agents are homogeneous. However, the chipped stones extracted from the mines have a heterogeneous structure and sometimes there are veins in the stones that are likely to crack in the future, and these cannot be always detected by a bare eye. In this study, structural analysis of the Historical Malabadi Bridge is aimed to examine to obtain the behavior of the bridge as a result of possible earthquakes and environmental effects, as well as the history of Malabadi and its testimony to the history. The fact that the historical bridge was built in a different form architecturally and the arch form will be evaluated in terms of geometry. Malabadi Bridge differs from many masonry bridges considering its architecture, aesthetics and the size of the main arch span. The Malabadi Bridge has been the focus of attention of historians, travelers, travelers, architects, archaeologists, art historians and engineers, and several articles have been written about the bridge. The literature about the bridge will be updated and the results of the restoration works have been carried out will be included. As a result of the structural analysis, it will shed light on the restoration works that will be needed in the future.

**Keywords:** Arch Bridges, Limit Analysis, Malabadi Bridge, Non-Linear Structural Analysis of Masonry Bridges, Stone Bridges.

## ÖNSÖZ

Malabadi Köprüsü hakkında bugüne kadar yapılmış olan çalışmalar güncellenerek köprü hakkında en kapsamlı çalışma olması niyetiyle işe başladım. Bu niyeti bana aşıl原因an elbette ki danışmanım Prof. Dr. Şahnaz TİĞREK olmuştur. Benimde tarihi yığma yapılara olan ilgim ve taş ustası olarak yıllar önce bu sanata olan aşinalığımın da etkisi olmuştur. Daha lise yıllarında ilk taş ustası olduğum zamanda da Midyat ilçesinde taştan işleme motifleri tasnifi ve hatalı şablonları ayıklayıp düzeltme çalışmalarım olmuştur. İşleme motiflerinin tasnifi konusunda başarılı olamamakla birlikte elimizde bulunan hatalı şablonları ayıklayıp düzeltme çalışma konusunda o yıllarda başarılı olmuştum. O yıllarda bile Midyat ve Mardin taş ustaları hakkında kendi çapımda araştırmalar yapmakta idim. Usta olduğum zamanda zamanımın en iyi ustası olma hedefim olmuştur. Bu hedef beni Midyat'ta motif işleme konusunda en iyi usta yapmış ve Mardin'in son ustalarından olan Yusuf ustayı geçemeyen Midyatlı ustalardan onu geçen ilk usta belki de ben olmuştum.

Geleneksel yöntemlerle yapılmış olan ve bin yıldan fazla ayakta duran bu yapıları araştırmak ve bilimsel olarak ortak bir zemine aktarmak oldukça anlamlı ve değerlidir. Eski yapıların araştırması zor olmasıyla birlikte araştırma sonuçlandığında duyulan sevinç tarif edilemez bir noktaya ulaşır.

Malabadi Köprüsü hakkında eskiden beri yazılmış gezi notları ve dokümanlar mevcuttur. Bunlardan en önemli olanları kuşkusuz Fransız Mimar Albert GABRIEL'in Doğudaki seyahatlerinden oluşan notlarının kaynak olarak kitap haline dönüşmüş versiyonudur. Cevdet ÇULPAN'ın Türk Taş Köprüleri kitabı da bu alandaki önemli eserlerden bir tanesidir. Köprünün tarihçesiyle ilgili İBNU'L-EZRAK'ın Meyyâfârikîn ve Âmid Târihi adlı eseri, tarihçi Basri KONYAR'ın Diyarbekir Kitabeleri ve Evliya ÇELEBİ'nin Seyahatnamesine de atıfta bulunmak gerekir.

Yüksek lisans çalışmalarım da bana olan emek ve yardımlarından dolayı danışmanım Prof. Dr. Şahnaz TİĞREK'e teşekkür ederim.

Hayat arkadaşım olan ve her zaman maddi ve manevi olarak desteğini benden esirgemeyen sevgili eşim Fatma'ya da teşekkür ederim.

Abdullah ÇETİN  
BATMAN-2023

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>	<b>ix</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ.....</b>	<b>xiv</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ .....</b>	<b>xviii</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Yığma Yapıların Tarihsel Süreçte Gelişimi.....	1
1.2. Yığma Yapı Duvarcılığı.....	4
1.3. Yığma Taş Köprüler .....	7
<b>2. MALABADİ KÖPRÜSÜ.....</b>	<b>9</b>
2.1. Tarihçesi.....	9
2.2. Yeri ve Konumu.....	10
2.3. Seyyahların Düşünceleri .....	11
2.4. Mimari Özellikleri .....	13
2.5. Yapımı ve Onarımı .....	21
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>28</b>
3.1. Yapısal Analizin Tarihsel Sürecinde Kemer Teorisi .....	28
3.1.1. Teorik Çalışmalar .....	28
3.1.2. Deneysel Çalışmalar .....	32
3.1.3. Sonuç .....	36
3.2 Yapıların Teorisi (Plastik Teori).....	37
3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	49
3.3.1. Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Analizi.....	49
3.4. Literatür Taraması.....	54
3.4.1. Yığma Duvarcılık Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	54
3.4.2. Limit Analiz İle İlgili Çalışmalar.....	56
3.4.3. Kemerlerle İlgili Yapısal ve Sismik Analiz.....	57
3.4.4. Malabadi Köprüsü Hakkında Yapılan Yapısal Analizler .....	62
<b>4.YAPISAL ANALİZLER VE SONUÇLARI.....</b>	<b>64</b>
4.1. Limit Analiz.....	64
4.2. Doğrusal Olmayan Sonlu Eleman Analizi (Makro Analiz).....	69

<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>81</b>
5.1. Mimari Açıdan Sonuçlar .....	81
5.2 Yapısal Analiz Sonuçları .....	82
5.3 Öneriler .....	83
<b>EKLER .....</b>	<b>88</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

<b>A</b>	:Katı malzemede yüzey alanı
<b>a</b>	:Limit analizde kemer halkasının yüksekliği (Pippard)
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	:Kalsiyum karbonat
<b>CaO</b>	:Kalsiyum oksit
<b>CO<sub>2</sub></b>	:Karbondioksit
<b>d</b>	:Taş kolonun yüzey genişliği
<b>d<sub>l</sub></b>	:Limit analizde kemer halkasının yüksekliği
<b>E<sub>d</sub></b>	:Taş veya tuğla malzemesinin elastisite modülü
<b>E<sub>dh</sub></b>	:Homojenik elastisite modülü
<b>E<sub>h</sub></b>	:Harcın elastisite modülü
<b>E<sub>m</sub></b>	:Harcın elastisite modülü
<b>E<sub>u</sub></b>	:Taş veya tuğla malzemesinin elastisite modülü
<b>f<sub>b</sub></b>	:Taşın basınç dayanımı
<b>f<sub>k</sub></b>	:Homojenik elastisite modülü
<b>f<sub>m</sub></b>	:Harcın basınç dayanımı
<b>G</b>	:Sabit yük
<b>G<sub>m</sub></b>	:Harcın kesme modülü
<b>G<sub>u</sub></b>	:Taş veya tuğla malzemesinin kesme modülü
<b>H</b>	:Limit analizde itme hattı çizgisine uygulanan yatay kuvvet
<b>H<sub>max</sub></b>	:Minimum yatay itme kuvveti
<b>H<sub>min</sub></b>	:Maksimum yatay itme kuvveti
<b>h</b>	:Limit analizde dolgunun yüksekliği
<b>h<sub>0</sub></b>	:Limit analizde dolgu yüksekliği
<b>h<sub>c</sub></b>	:Limit analizde kemer yüksekliği

$h_m$	:Harç kalınlığı
$h_q$	:Limit analizde kemerin dörtte bir açıklığındaki dikey mesafe
$h_s$	:Limit analizde kemer taşının yüzey yüksekliğinin yarısı
$h_u$	:Taş veya tuğla malzemesinin kalınlığı
$K$	:Homojenik elastite modülü hesabında duvarın özelliğine göre kullanılan sabit katsayı
$k_n$	:Kafa eklemlerindeki gerilme kuvvetinin yay sabiti
$k_s$	:Kafa eklemlerindeki kesme kuvvetinin yay sabiti
$k_t$	:Kemer halkasının kalınlığı
$L$	:Kemer açıklığı
$L_0$	:Katı malzemenin orijinal boyu
$l$	:Limit analizde kemer açıklığı
$M$	:Kemerin üst kısmında oluşan menteşe noktası
$m$	:Kemerin alt kısmında oluşan menteşe noktası
$M$	:Kemerin üst kısmında oluşan menteşe noktası
$P$	:Yatay veya düşey olarak uygulanan kuvvet
$Q$	:Hareketli yük
$r$	:Yarıçap
$r_c$	:Limit analizde kemerin yüksekliği
$r_q$	:Limit analizde kemerin dörtte bir açıklığındaki dikey mesafe
$t$	:Kemerin halkasının çeyrek açıklıktaki kalınlığı
$t_d$	:Taş veya tuğla malzemesinin kalınlığı
$t_h$	:Harç kalınlığı
$V$	:Limit analizde itme hattı çizgisine uygulanan dikey kuvvet
$v$	:Limit analizde itme hattı çizgisine uygulanan yatay kuvvet oranı
$W$	:Limit analizde kemere uygulanan düşey kuvvet

$W_1$	:Limit analizde çeyrek açıklığın ucundaki duvarın ağırlık merkezi
$W_2$	:Limit analizde çeyrek açıklığın uç ile orta kısım arasındaki duvarın ağırlık merkezi yükü
$W_3$	:Limit analizde üçüncü menteşeye düşen duvarın ağırlık kuvveti
$W_4$	:Limit analizde herhangi bir taş parçasına düşen duvarın ağırlık yükü
$W_5$	:Limit analizde herhangi bir taş parçasına düşen duvarın ağırlık yükü
$w$	:Limit analizde birim yatay uzunluk başına düşen yoğunluk
$X_1$	:Limit analizde çeyrek açıklıkta uçtan duvar yükü ağırlık merkezin olan mesafe
$X_2$	:Limit analizde çeyrek açıklıkta uç ile orta kısım duvar yükü ağırlık merkezin olan mesafe
$X_A$	:Kemerin dörtte bir açıklığındaki yatay uzunluk
$Y_A$	:Kemerin dörtte bir açıklığındaki dikey uzunluk
$\alpha$	:Homojenik elastite modülü hesabında duvarın özelliğine göre kullanılan sabit katsayı
$\alpha_1$	:Kemer şeklinin ölçüsü
$\beta$	:Homojenik elastite modülü hesabında duvarın özelliğine göre kullanılan sabit katsayı
$\beta_1$	:Köprü derinliğinin ölçüsü
$\gamma$	:Dolgu ve kemer halkasının birim hacim ağırlığı
$\Delta$	:Limit analizde Orijin üzerinde dikey bir mesafeden geçen itme çizgisi
$\Delta L$	:Katı malzemenin yük altında uzama miktarı
$\varepsilon$	:Çekme kuvvetleri altında katı malzemede oluşan birim uzama
$\epsilon_A$	:Kemerin alt yüzeyi ile itme çizgisi arasındaki dikey mesafe
$\Theta$	: Limit analizde itme hattının açısal değeri

$\mu$	:Limit analizde itme hattı çizgisine uygulanan dikey kuvvetin yatay kuvvete oranı
$\rho$	:Homojenleştirme tekniğinde sabit katsayı değeri
$\sigma$	:Katı bir malzemeye birim alana uygulana kuvvet (gerilme)

### **Kısaltmalar**

<b>2B</b>	: İki Boyutlu
<b>3D</b>	: Three Dimensional
<b>ABAQUS</b>	: Sonlu elemanlar yapısal analiz yazılımı
<b>ANSYS</b>	: Sonlu elemanlar yapısal analiz yazılımı
<b>AutoCAD</b>	: Bilgisayar destekli tasarım
<b>CAD</b>	: Computer Aided Design
<b>CDP</b>	: Concrete Damage Plasticity
<b>cm</b>	:Santimetre
<b>D1</b>	: Sismik yükleme için birinci seviye sentetik ivme değeri
<b>D2</b>	: Sismik yükleme için ikinci seviye sentetik ivme değeri
<b>D3</b>	: Sismik yükleme için üçüncü seviye sentetik ivme değeri
<b>DIANA FEA BV</b>	: Displacement Analyzer Finite Element Besloten Vennootschap
<b>DtX</b>	: Yatay yer değiştirme
<b>DtY</b>	: Dikey yer değiştirme
<b>EXX</b>	: X yönünde gerçekleşen gerinim değeri
<b>EYY</b>	: Y yönünde gerçekleşen gerinim değeri
<b>EZZ</b>	: Z yönünde gerçekleşen gerinim değeri
<b>FEA</b>	: Finite Element Analysis
<b>FX+ DIANA</b>	: Displacement Analyzer Finite Element FX Plus

<b>GZX</b>	: Z yönünde yatay kayma gerinim değeri
<b>H.</b>	: Hicri Yıl
<b>HX24L</b>	: Eight nodes isoparametric brick
<b>N</b>	:Newton
<b>kN</b>	: Kilo Newton
<b>kN/m<sup>2</sup></b>	: Metrekare başına düşen kilo Newton
<b>kN/m<sup>3</sup></b>	: Metreküp başına düşen kilo Newton
<b>m</b>	: Metre
<b>M.Ö.</b>	: Milattan Önce
<b>M.S.</b>	: Milattan Sonra
<b>max</b>	: Maksimum
<b>min</b>	: Minimum
<b>mm</b>	: Milimetre
<b>MPa</b>	: Mega Paskal
<b>PY15L</b>	: Five nodes isoparametric pyramid
<b>Sap2000</b>	: Sonlu elemanlar yapısal analiz yazılımı
<b>SEM</b>	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
<b>SXX</b>	: X yönünde yatay kayma gerilmesi değeri
<b>SYZ</b>	: Y yönünde yatay kayma gerilmesi değeri
<b>SZZ</b>	: Z yönünde dikey kayma gerilmesi değeri
<b>TDtX</b>	: X yönündeki yatay yer değiştirme
<b>TDtY</b>	: Y yönündeki yatay yer değiştirme
<b>TDtZ</b>	: Z yönündeki dikey yer değiştirme
<b>TE12L</b>	: Four nodes isoparametric pyramid
<b>TP18L</b>	: Six nodes isoparametric wedge

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Duvar kaplamalarının birbirinden uzaklaşması (Heyman, 1995) .....	6
Şekil 1.2. John Fitchen'in Pont Du Gard'un varsayımsal merkezleme çalışması (Heyman, 1995) .....	7
Şekil 2.1. Malabadi Köprüsündeki kitabe (KGM, 2009) .....	10
Şekil 2.2. Malabadi Köprüsü ve Batman barajı (parselsorgu.tkgm.gov.tr) .....	11
Şekil 2.3. Malabadi Köprüsü mansap cephesi ve planı (Gabriel, 2014) .....	12
Şekil 2.4. Ana kemer formu ve ölçüleri (KGM, 2009) .....	13
Şekil 2.5. Köprü planı (KGM, 2009) .....	14
Şekil 2.6. Tam yuvarlak kemer ve sivri uçlu kemer formları (Çetin, 2021) .....	14
Şekil 2.7. Tarihi Orta Köy köprüsü kemer kalıbı çelik malzemedden .....	15
Şekil 2.8. Köprü mansap cephesi görünüşü (KGM, 2009) .....	16
Şekil 2.9. Köprü memba cephesi görünüşü (KGM, 2009) .....	16
Şekil 2.10. Kemer ve tonozlarda ahşap kalıplar (Gabriel, 2014) .....	17
Şekil 2.11. Batman tarafındaki odacığın iç kısmı .....	19
Şekil 2.12. Odacıklar ve köprü üzerindeki kapı planı (KGM, 2009) .....	20
Şekil 2.13. Odacıklara inişi sağlayan merdiven örtüsü .....	20
Şekil 2.14. Diyarbakır Ulucami cepheden görünüş (Mungan, 2020) .....	22
Şekil 2.15. Yığma yapılarda taşlar arasında kullanılan kenet çeşitleri (Anonim, 2013) .....	23
Şekil 2.16. Çift cidarlı yığma yapı binada duvar çatlaması (Mungan, 2020) .....	24
Şekil 2.17. Restore sonrası köprünün harpuşta duvarı .....	25
Şekil 2.18. Restore sonrası Malabadi Köprüsü döşeme .....	26
Şekil 3.1. Robert Hooke'un asılı zinciri (Heyman, 2006) .....	29
Şekil 3.2. Tepedeki dikey bir yük altında çökemeyen bir kemer (Heyman, 1998) .....	31
Şekil 3.3. Menteşelerin oluşumuyla kendi ağırlığı altında çöken kemer, (Heyman, 1998). .....	31
Şekil 3.4. Danyzy'nin model kemerler üzerindeki deneyleri (Heyman, 1998) .....	32
Şekil 3.5. Poleni'nin deneysel çalışması (Heyman, 1995) .....	33
Şekil 3.6. Coulomb tarafından ele alınan kemerin dengesi (Heyman, 1998) .....	34
Şekil 3.7. Barlow tarafından çizilen kemer itme hattı çizgileri (Heyman, 1998) .....	35

Şekil 3.8. İki pimli (menteşeli) kemer sistemi (Heyman, 1998) .....	36
Şekil 3.9. Pippard'ın analiz yapılacak olan köprü varsayımı (Heyman, 1998) .....	36
Şekil 3.10. Katı malzemede gerilme .....	37
Şekil 3.11. Katı malzemede gerinim.....	38
Şekil 3.12. Duvarcılık için akma yüzeyi (Heyman, 1998).....	39
Şekil 3.13. Bir yığma köprünün parçaları (Heyman, 1982).....	40
Şekil 3.14. Üç pimli kemere uygulanan düşey yükler (Heyman, 1982) .....	41
Şekil 3.15. Düşey yükler altında üç pimli kemerde oluşan itme hattı çizgisi (Heyman, 1982).....	42
Şekil 3.16. Üç pimli kemerin kesilen parçasında oluşan itme hattı çizgisi (Heyman, 1982) .....	42
Şekil 3.17. Kemer taşları yakından (Heyman, 1982).....	43
Şekil 3.18. Kemerde dört menteşe oluşma mekanizması (Heyman, 1982).....	43
Şekil 3.19. Tam yuvarlak kemerin kendi ağırlığı altında maksimum (a) ve minimum (b) itme kuvvetleri (Heyman, 1995).....	44
Şekil 3.20. Bir nokta yükü altında dairesel bir kemerin çökmesi (Heyman, 1995) .....	45
Şekil 3.21. Bir kemerin çökmeden önce dört mafsal noktası (Gordon, 2003) .....	46
Şekil 3.22. Bir kemerde limit analiz teoremi varsayımı (Heyman, 1982).....	46
Şekil 3.23. Duvarda Kemer halkasının temsili çizimi (Heyman, 1982).....	48
Şekil 3.24. Destek sisteminin akması sonucu sivri uçlu kemerde menteşe çatlağı (Heyman, 1998) .....	49
Şekil 3.25. Zaman içinde yapısal analizin doğruluğu (Lourenço, 1998).....	50
Şekil 3.26. Yığma yapılar için modelleme yöntemleri (Lourenço, 1995).....	51
Şekil 3.27. Ara yüzler için önerilen bir kapak modeli (Lourenço, 1995).....	52
Şekil 3.28. Önerilen modelleme stratejisi (Lourenço, 1995) .....	52
Şekil 3.29. Eş-kayma gerilme çizgileri ile önerilen kompozit akma yüzeyi (Lourenço, 1995) .....	53
Şekil 3.30. Heterojen iki farklı malzemenin homojenleştirilmesi tekniği .....	55
Şekil 3.31. (a) Yığma iskelede ve (b) Yığma kemerde çökme noktasındaki bindirme hattı (Gilbert, 2007) .....	56
Şekil 3.32. Taş kayaların tekli elemanlara ayrılması (Özkaya, 2019).....	57
Şekil 3.33. Örnek yığma kemerde geometri ve yükleme .....	58
Şekil 3.34. Yapısal analiz için genel yük-yer değiştirme diyagramı (Lourenço, 2002).....	58
Şekil 3.35. Taş kemer köprüsünün eleman özellikleri (Ural ve ark., 2007).....	61

Şekil 4.1. Malabadi Köprüsünün ana kemeri ve yan duvarları geometrik formu .....	65
Şekil 4.2. Malabadi Köprüsünün limit analiz için idealleştirilmiş geometrik formu .....	65
Şekil 4.3. LimitState ile analiz öncesi geometrik model.....	66
Şekil 4.4. Analiz sonrası oluşan itme hattı çizgisi .....	66
Şekil 4.5. Analiz sonrası oluşan menteşeler.....	66
Şekil 4.6. Analiz sonrası çökme senaryosu .....	67
Şekil 4.7. AutoCAD Drawing Units parametre ayarları .....	70
Şekil 4.8. Region komutu .....	70
Şekil 4.9. Iges formatında her elemanın kaydedilmesi .....	71
Şekil 4.10. Extrude komutu ile düzleme kalınlık verme .....	71
Şekil 4.11. Malabadi Köprüsü katı modeli .....	73
Şekil 4.12. Köprünün ağ elemanlarına ayrılmış durumu .....	74
Şekil 4.13. Ağ eleman şekilleri .....	75
Şekil 4.14. Sabit yük (G) altında dikey yer değiştirme (TDtY) .....	75
Şekil 4.15. Hareketli yük (Q) altında dikey yer değiştirme (TDtY).....	76
Şekil 4.16. Sabit + hareketli yük (G+Q) altında dikey yer değiştirme (TDtY).....	76
Şekil 4.17. Sabit + hareketli yük (G+Q) altında kayma gerilmesi (SZX) .....	76
Şekil 4.18. Sabit + hareketli yük (G+Q) altında dikey gerilim dağılımı (SZZ) .....	77
Şekil 4.19. Sabit + hareketli yük (G+Q) altında kayma gerinimi (GZX).....	77
Şekil 4.20. Sabit + hareketli yük (G+Q) altında x yönünde oluşan gerinim (EXX) .....	77
Şekil 4.21. Sabit + hareketli yük (G+Q) altında y yönünde oluşan gerinim (EYY) .....	78
Şekil 4.22. Sabit + hareketli yük (G+Q) altında oluşan gerinim (EZZ) .....	78
Şekil Ek 2.1. Malabadi Köprüsü memba cephesi (Gabriel, 2014) .....	91
Şekil Ek 2.2. Malabadi Köprüsü memba cephesi (Gabriel, 2014) .....	91
Şekil Ek 2.3. Harpuşa köprüye örnek Malabadi Köprüsü (Hasol, 2020).....	92
Şekil Ek 2.4. Malabadi Köprüsü ve hemen yanındaki betonarme köprü .....	92
Şekil Ek 2.5. Malabadi Köprüsü memba cephesi (Çulpan, 2002) .....	93
Şekil Ek 2.6. Malabadi Köprüsü mansap cephesi (Çulpan, 2002) .....	93
Şekil Ek 2.7. Malabadi Köprüsü memba cephesi (Çulpan, 2002) .....	94
Şekil Ek 2.8. Malabadi Köprüsü 1952 yılı öncesine ait görüntü (KGM, 2009).....	94

Şekil Ek 2.9. 1962 yılında Malabadi Köprüsü'nün mansap cephesi (KGM, 2009).....	95
Şekil Ek 2.10. Malabadi Köprüsü kemeri çevresinde taş dizileri (Çulpan, 2002) .....	95
Şekil Ek 2.11. Malabadi Köprüsündeki figürler (Çulpan, 2002) .....	96
Şekil Ek 2.12. Malabadi Köprüsündeki figürler (Konyar, 1936).....	96
Şekil Ek 2.13. Malabadi Köprüsündeki figürler (KGM, 2009) .....	97
Şekil Ek 2.14. Malabadi Köprüsündeki topuğun üstündeki figürler (KGM, 2009) .....	97
Şekil Ek 2.15. Malabadi Köprüsü mansap cephesi (Oğuz, 2001).....	98
Şekil Ek 2.16. Malabadi Köprüsü memba cephesi (Oğuz, 2001) .....	98
Şekil Ek 2.17. Malabadi Köprüsü memba cephesi 1954 yılı onarım (KGM, 2009) .....	99
Şekil Ek 2.18. Malabadi Köprüsü mansap cephesi 1954 yılı onarım (KGM, 2009).....	99
Şekil Ek 2.19. Restore öncesi döşeme üzerine atılan beton örtüsü (KGM, 2009) .....	100
Şekil Ek 2.20. Köprüde 1985 yılında yapılan onarım (KGM, 2009) .....	100
Şekil Ek 2.21. Ana kemer için yapılan iskele sistemi (Halifeoğlu ve ark., 2017).....	100
Şekil Ek 2.22. Restore sonrası köprünün mansap cephesi. ....	101
Şekil Ek 3.1. Kemer açıklıkları için Blondel'in Kuralları 1683 (Heyman, 2006).....	102
Şekil Ek 3.2. Yarım daire kemerin mekaniği La Hire'den 1712 sonra (Heyman, 1998) .....	102
Şekil Ek 3.3. Kemerin statığı La Hire 1712'den sonra (Heyman, 1998) .....	103
Şekil Ek 3.4. Dayanak tasarımı için Couplet kuvvet sistemi (Heyman, 1998) .....	103
Şekil Ek 3.5. Yığma kemerlerin mekaniğinin çizimleri Poleni'den 1748 (Heyman, 2006).....	104
Şekil Ek 3. 6. Bir kemer dikey yükleri toplar ve yanal yüklere dönüştürür (Gordon, 2003) .....	104

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Malabadi Köprüsü kemerlerinin mimari özellikleri.....	17
Çizelge 4.1. Oluşan menteşeler ve değerleri 10.5 ton yükleme için .....	67
Çizelge 4.2. Oluşan menteşeler ve değerleri, 500 kN yükleme için .....	68
Çizelge 4.3. Oluşan menteşeler ve değerleri, 1000 kN yükleme için .....	68
Çizelge 4.4. Doğal yapı taslarının fiziksel özelliklerinin ortalama değerleri (Yılmaz, 2006).....	72
Çizelge 4.5. Köprünün malzeme özellikleri.....	73
Çizelge 4.6. Analiz sonucunda elde edilen veriler .....	78

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Yığıma Yapıların Tarihsel Süreçte Gelişimi

Eski taş Çağı (Paleolitik) kültürlerinin kalıntılarına Anadolu'da çeşitli yerlerde özellikle Güney Anadolu'da rastlanmaktadır. Paleolitik kültürün tarihini arkeologlar M.Ö. 7000 civarında olduğunu belirtmektedirler. Yeni taş (Neolitik) çağı ile insanlık tarihinde yeni bir dönem başlamış ve bu dönemde tarım ve hayvancılık faaliyetleri başlamıştır (Kuban, 1978). Anadolu coğrafyasının doğal yapı taşlarının maden ocaklarının zengin olması taş sanatının da gelişmelere neden olmuştur.

İnsanlık tarihinde yerleşik hayata geçenler ilk olarak mağaraları yontmuş ve yaşamsal mekânı o günkü şartlarda oluşturan mağara evleri yapmışlardır. Yazılı kaynaklar arasında en önemli olan Kutsal Kitap Kur'an'ı Kerimde Araf suresi 74. Ayette *“Düşünün ki Allah Ad kavminden sonra yerlerine sizi getirdi ve yeryüzünde sizi yerleştirdi. Onun düzlüklerinde saraylar yapıyorsunuz, dağlarında evler kuruyorsunuz.”* Semud olarak adlandırılan bu kavim Vâdilkur'ada<sup>1</sup> kayaları oyarak evler, düz arazilerde saraylar yapan bir Arap toplumu olup ve M.Ö. 2800'lü yıllarda yaşamış bir topluluktur (Yazır, 2007).

Gerçekten de insanlık tarihi sürekli değişmiş ve insanoğlu ihtiyaçları için her dönemde daha iyisini arama gayretinde olmuştur. Antik çağda çıkarılan taşlar oldukça devasa boyutlarda olup bunları maden ocağından şantiye alanına nakledilmesi, örülmesi ve yerleştirilmesi içinde Romalılar çeşitli yöntemler geliştirmiş ve uygulamışlardır. Taşların çok büyük boyutta kullanılmasının tercih edilmesinin en önemli nedeni o günkü şartlarda taşların arasında kullanılacak bağlayıcı malzemelerin bilinmemesi veya kısıtlı miktarlarda olmasıyla açıklanabilir.

Yunan mimarisi geometri, ölçü ve oran üzerine tasarlanmıştır ve yıllarca bu üç kriteri tekrarlayarak mükemmelliği elde etmişlerdir. Yunanlılar yeni geliştirmiş oldukları yöntemlerle yapı malzemesini küçük yapı taşlarına indirgemeyi başarmışlardır. Mağaralarda ev yapmanın yerine düzlük bir alanda maden ocağından kesilerek çıkarılan taşların yapı taşı olarak örülmesinde katkıları olmuştur. Romalılar kemerli, tonozlu ve kubbeli yapım tekniğini büyük ölçüde geliştiren, yapıların iç mekânlarına önem kazandıran ve anıtsal yapı düzenini bu yapım teknikleri üzerine kurgulayan bir üslup yaratmışlardır. Geliştirdikleri mimari biçimler, modern çağa

---

<sup>1</sup> Günümüzde Suudi Arabistan sınırları içinde Medine'nin kuzeybatısında yer almaktadır. (bkz., Anonim, İslâm Ansiklopedisi, 2012, 42. Cilt, s 421-423)

gelene kadar, hem batı mimarlığının hem de İslam mimarlığının temel taşlarını oluşturmuşlardır. Hafif ahşap çatı örtüsü yerine büyük açıklıkların üzerini örten kâgir tonoz ve kubbeleri tercih etmiş olmaları, taş sütunların esas taşıyıcı olarak kullanılma olanaklarını kısıtlamış ve taşıyıcı duvarların en kesitlerinin artmasına neden olmuştur. Bundan dolayı Roma Çağı mimarisinde daha masif, dolu görünümlü olmuş, sütunlar bu mimaride daha çok dekoratif amaçlarla kullanılmıştır (Kuban, 1978).

Romalılar duvarda harcın kullanımını geliştirerek, içi ve dışı taş veya tuğla kaplama, fakat orta kısmı yığma, moloz duvar modelleri geliştirmişlerdir. Yapıların üzerini örten tonoz ve kubbeleri de günümüz betonarme kalıp tekniğine benzer teknikle, kalıplar üzerine dökülen bir çeşit harçla meydana getirmişlerdir. Yeni teknikler büyük ve süratli inşaatların yapılmasına imkân vermiş ve Roma dünyasının ekonomik olanakları, küçük Yunan şehirlerinin hatta Helenistik Çağ krallarının hayal bile edemeyecekleri büyüklükte ve karışıklıkta yapıların ortaya çıkmasını sağlamıştır (Kuban, 1978).

Hristiyan sanatları içerisinde yer alan Ermeni sanatı mimari alanda kendine özgü bir üslup yaratmıştır. Ermeniler Suriye'den gelen misyonerlerin etkisiyle erkenden Hristiyanlığı kabul etmişlerdir (M.S. 344). Daha önceki kültürlerinde Part, Sasani ve Roma etkileri görülürken; Hristiyan olduktan sonra Suriye Hristiyan kültürünün etkisi altına girmişlerdir. Ermeni mimarisi teknik açıdan ileri düzeye ulaşmış bir taş mimarisidir. Duvarların içi moloz, dışı düzgün taş kaplama ile inşa tekniği antik geleneğe dayanır. Yapılarda örtü elemanları taş malzemedeki yapı tonoz ve kubbedir. Kalın duvarlarda yükleri azaltmak ve yapının duvar kütlelerini inceltmek amacıyla çeşitli formlarda nişler, duvarları süsleyen sağır (içi dolu) kemer dizileri ve içi kubbeli, dışı konik çift cidarlı duvarlarıyla, yapıların karakteristik bir dış mimarisi vardır. Kubbeyle örtülü ve merkezi planlı yapı türü yaygındır. Ermeni mimarisi İslam sanatından esinlenerek geometrik esaslara dayanan bir yüzey dekorasyonunu zamanla oluşturmuştur (Kuban, 1978).

On ikinci ile on dördüncü yüzyılları arasında İslam sanatındaki olgu, komşu ülkelerden Anadolu'ya gelen zanaatkar ustalar tarafından getirilmiş olduğu söylenebilir. Ayrıca Anadolu'daki sanatın, Türkleşmenin ilk iki yüzyılında İran sanatından etkilendiği düşüncesi ağır basmaktadır (Kuban, 1978).

Şüphesiz büyük bir coğrafyada oluşan kültürel sentezin sadece bir iki bileşenden meydana geldiğini kabul etmek doğru değildir. Anadolu'da On ikinci yüzyıl da meydana gelen sanat eserleri incelendiğinde, Batı Asya kıtasındaki her bölgeye özgü

nitelikler tespit edilebilir. Kuzey Doğu Anadolu'nun daima Azerbaycan ve Kafkasya'nın yeni ve eski kültürleriyle akraba bir yanı vardır. Kilikya'dan Urfa'ya kadar uzanan topraklar hep Suriye ile beraber düşünülmesi gerekir. Diyarbakır, Mardin gibi üst Mezopotamya şehirlerinde Kuzey Suriye ve Irak'la ortak nitelikler bulunur. Van gölü bölgesi Güney İran ve Azerbaycan'dan kolaylıkla ayrılamaz. Bu sınır bölgelerinden batıya doğru gidildikçe Anadolu kültürünü ortaya koyan ve daha batıda, On dördüncü yüzyıldan sonra yepyeni denemelere girişen değişik bir kültürel ortam karşımıza çıkar (Kuban, 1978).

İslam sanatı içinde gelişen ve zengin dekorasyon üslupları arasında özel bir yer tutan sanat ise Selçuklu taş dekorasyonudur (Kuban, 1978). Yapılarda yer alan kapı, pencere, sütun başlıkları, tonoz-bingi (tromp), küresel-bingi (pandantif) gibi özel noktalar Selçuklu sanatına özgü olarak geliştirilmiş olan dekorasyonlarla süslenmekteydi. Öncelikle bu dekorasyonu oluşturan motiflerin kaynağı olan bölgelerde yani İran veya Orta Asya'da taş malzeme ile dekorasyonun yaygın olarak kullanılmadığı yönünde tespitler vardır. Bundan dolayı süsleme motiflerinde, Anadolu'da yeni bir malzeme ve bu malzemenin özelliğine bağlı olarak yerli taş ustalarının özel dokunuşlarıyla bazı değişiklikler olmuştur. Selçuklular gerçek bir heykel sanatı geliştirmemişlerdir ancak insan, hayvan biçimleri ihtiva eden dekoratif bir kabartma sanatının bir süre yapılarında uygulamışlardır. Motifler Anadolu dışından gelmiş olup mimaride süsleme amacıyla kullanılmıştır.

Büyük sanat eserleri toplumun ekonomik koşulların elverişli olduğu zamanlarda ve mekânlarda yoğunluk kazanmaktadır. Süleymaniye Camisi yapımında 1553-58 yılları arasında 3523 usta ve işçinin birlikte çalışmış ve Müslüman ve Hristiyan ustaların sayısı hemen hemen birbirine eşit olduğu yazılmaktadır. Orta çağ ve Osmanlı tarihi boyunca toplumun bütün etnik kesimlerinden ustalar ve mimarlar, din ve mezhep farkı gözetilmeden, inşaatlarda çalıştırılmışlardır. Anadolu Orta çağında yapılan yapıların büyük bir kısmını ülke-ülke, şehir-şehir gezen ve işveren (sultan veya emirin) emrinde çalışan veya kendini çalıştığı işte ispatlayan ustalar tarafından yapılmışlardır (Kuban, 1978).

Aynı şekilde bu kural yıllar geçmiş olmasına rağmen değişmemiş (bknz., Gabriel, 2014, s 54) Silvan Ulu Camisi'nin 1913 yılında restorasyonunu yapan ustalar Mardin'in ünlü taş ustalarıdır (Gabriel, 2014). Mardin'in Midyat ilçesinde halen hayatta olan ve Süryani ustalarından yığma taş yapı uygulama tekniğini öğrenen son Müslüman usta

olan Davut Usta'nın anlatımlarına göre, Türkiye ve Suriye'nin birçok ilinde pek çok yığma yapı tekniği ile taş bina ve mabet inşa etmiştir.

## 1.2. Yığma Yapı Duvarcılığı

M.Ö. 4000'de Mezopotamya'da, kullanılan malzeme tuğlaymış, ancak tuğlalar fırınlanmak yerine güneşte kurutulmuştur. Birkaç yüz yıl sonra Mısır'da da benzer tuğla kullanımının olduğu bulunmuştur. Bunu hem kemerler hem de tonozlar için yanmış tuğlalar izlemiş ve Mısırlılar ilk olarak M.Ö. 3000 civarında kesme taşı kullanmışlar. Çok sonraları, Etrüskler kama şeklindeki kemerleri kesme ve onları kemerler ve tonozlarda birleştirme sanatında ustalaşmışlardır. Tüm bu teknoloji, imparatorluklarının genişlemesi sırasında Romalıların kapsamına girdiğinden dolayı M.Ö. 500 civarında büyük açıklıklı duvar köprüler inşa edilmiştir. Kemer köprü tasarımıdaki en büyük sorunlardan biri, itme kuvvetine dayanacak ayakların inşası ve çok açıklıklı bir köprü için nehir yatağında iç payandaların inşa edilmesidir. Köprücülerin sırları tıpkı duvar ustalarının sırları gibi Orta Çağ'ın karanlık döneminde hayatta kalmıştır (Heyman, 2006).

Ortaçağ duvar ustaları çıraklıkları sırasında, planlar yapmak ve taş işlerinin kesileceği şablon ve modelleri hazırlamak için gerekli olan geometrik tekniklerle tanıştırılmıştı. Sanatlarının geleneksel yöntemleri ve temel kuralları duvarcı locasının gizemlerinin bir parçası olarak onlara aşılandı ve tüm lonca üyeleri gizlilik yemini etmişler. Bugün bilindiği gibi orta çağdaki temel mühendislik bilgisini gösteren çok az şey keşfedilmiştir ve o dönemin inşaatçıların herhangi bir yapısal analiz kullanmadıkları açıktır. Ortaçağ duvar ustalarının herhangi bir tasarımın gerektirdiği payanda miktarını hesaplayamazlardı ancak gözlem ve deneyim yoluyla güvenliğin sınırlarını keşfetmişler (Lourenço, 1998).

Yığma yapılarda inşaatta kullanılan ana malzemeler taş ve ahşapmış. Ahşap ile taşın fiziksel özellikleri ve etkilere karşı olan davranışları arasında farklılıklar vardır.

Bir veya iki işçi tarafından uygun şekilde taşınabilen büyüklükteki taşlar ile duvarlar örülür. Tek tek taş bloklar germe açısından gerçekten güçlüdür. Bloklar ya harçsız ya da çok az mukavemeti olan harçla uyumlu bir yapısal formda birleştirilir. Bu nedenle, duvar yapısı sıkıştırma kuvvetlerine iyi bir şekilde direnebilir. Kâgir veya yığma yapılarda duvarların bir malzeme olarak çekme dayanımının çok az olduğu veya hiç olmadığı kabul edilebilir. O kadar düşük basınç gerilmelerine maruz kalır ki pratikte sıkıştırma mukavemeti sorunu ortaya çıkmaz ve yapının şeklinin korunması için kemer

taşları arasında yeterli iç sürtünme olduğu varsayılır. Küçük taş parçaları yerçekimi kanunlarına bağlı olarak mimar<sup>2</sup> tarafından belirlenen genel bir şekilde sıkıştırılır. Taşlar bu şekilde birbiri üzerinden kaymazsa korunabilir. Böyle tasarlanmış pürüzsüz taşlar kayma kuvvetlerine karşı kilitlenerek sürtünme kuvvetlerinin gelişmesine izin veren düşük basınç gerilmesini ortaya çıkarır. Yapıda kullanılacak olan taşların seçimi yapının ana özelliklerinde önemli bir etkiye sahiptir. Örneğin, yapılarda tüf ve kireçtaşı zayıf dayanımlarına rağmen uygun şekilde kullanılabilmektedirler (Heyman, 2006).

Heyman'a göre, yığma bir yapıda, bazıları kare şeklinde (prizmatik şekilde) ve iyi oturtulmuş, bazıları işlenmemiş ve sağlam bir yapı oluşturacak şekilde birbiri üzerine yerleştirilmiş kuru taş (veya tuğla vb.) topluluğu olarak görmek ihtiyatlı ve uygundur. Aralıkları doldurmak için harç kullanılmış olabilir ancak bu harç başlangıçta zayıf olup, zamanla çürümüş olabilir ve yapıya güç kattığı varsayılmaz. Bütünün kararlılığı çeşitli öğelerin yerçekimi altında sıkıştırılmasıyla sağlanır. Genel bir sıkıştırma gerilimi durumu vardır ve yalnızca zayıf gerilimlere direnilebilir (Heyman, 1995).

Duvarcılık için beş dakikalık teoremi; bir kemerin taş işçiliği tamamlandıktan sonra ahşap merkezlemesi kaldırılırsa ve yapılan iş 5 dakika stabil (yıkılmazsa) kalırsa o zaman 500 yıl duracaktır. Duvarın sınırları itme çizgisini içerir ve güvenli teoreme karşılanır. 500 yıllık üst sınır malzemenin çürüme ömrü olduğu düşünülebilir. Bu teoremden ortaya çıkan sonuç yığma yapının stabilitesi bileşen malzemesinin gücü (harcın gücü) ile değil öncelikle yapının şekli ile sağlanacaktır (Heyman, 1995).

Aslında Heyman'ın bu iddiası 10 dakika ve 1000 yıl kuralı ile güncellenebilir. Çünkü ülkemizde ve dünyada 1000 yıldan daha yaşlı yığma yapılar vardır.

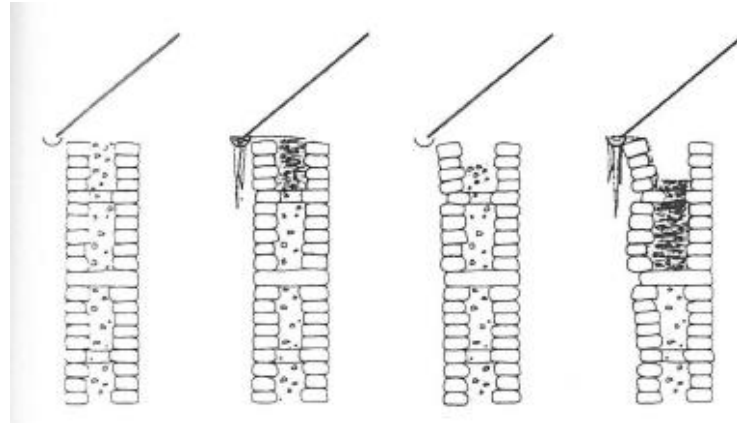
Yığma yapı duvarlarında çekme gerilmeleri çok düşüktür. Duvarın tasarımı için temel kriter güç değildir. Duvarlar ve kemerler kendi ağırlıklarından başka bir şey taşımak zorunda değildir (Heyman, 1995).

Bir duvarın düzgün kalınlıkta düz kenarlı bir levha olarak idealleştirilmesinde bile elbette bazı temel geometriler söz konusudur. Duvarın yüksekliği ve uzunluğu ile karşılaştırıldığında çok ince olmaması gerektiği açıktır. İnce bir duvar dikey olarak inşa edilebilir ve kendi ağırlığının etkisi altında dik kalabilir ancak oturmaya ve temellerinin devrilmesine karşı makul bir güvenlik payına sahip olmalıdır. Duvarın bir kesitinin ağırlık merkezi, tabanının sınırları boyunca çizilen düşeylerin dışına çıkmamalıdır ve belirli bir minimum kalınlık yükseklik oranı gerekli marjı verecektir. Yeterli kalınlığa

---

<sup>2</sup> Avrupa ve Türkiye'de yapılan yığma yapılarda ustabaşı olarak çalışan kişilere mimar denilmektedir.

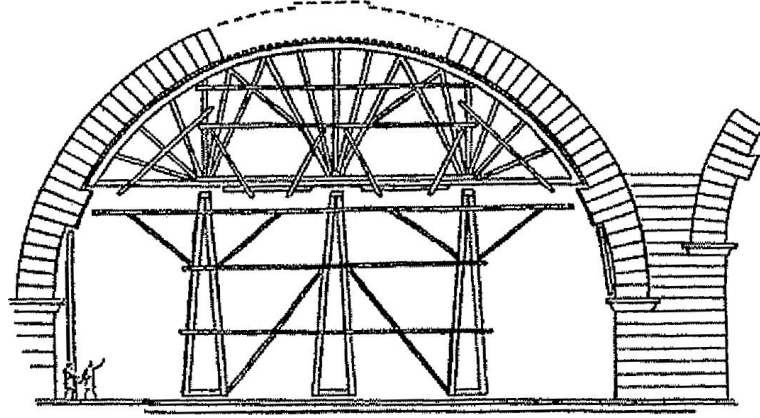
sahip bağımsız bir duvar şiddetli bir rüzgârda düz olarak savrulmamalıdır ve bu da yine hesaplanabilir bir minimum yapı kalınlığına yol açar. Yeterli kalınlığa sahip bağımsız bir duvarın başka bir desteğe ihtiyacı yoktur. Bir duvarın ortaçağ inşaatı, belki bir metre kalınlığında, genellikle iyi işlenmiş kesme taştan (kabuklar 20 ila 30 cm kalınlığındadır) iki dış kaplamadan oluşur, rastgele moloz ve harç dolgusu içerir. Kaplamalardan ve moloz dolgudan oluşan bir yapı, duvarın kalınlığı boyunca çok az doğal gerilme mukavemetine sahiptir ve inşaat sırasında takviye sağlamaya çalışmak için yaygın olarak iki yöntem kullanılmıştır. Birinci yöntemde duvarlar; kabuklar arasında çok az bağlantı sağlayan moloz ve harçtan oluşan merkezi çekirdek içine yatay olarak yerleştirilmiş uzun ahşap kirişlerden oluşur. İkinci yöntemde duvarlar; duvarın içinden geçen daha büyük duvar blokları olan duvar bağlantı taşların kullanımını ve inşaatla az ya da çok düzenli aralıklarla kaplamaları birleştirmeyi içerir. Şekil 1.1'de duvar kaplamasının bir birinden uzaklaşması görünmektedir. Daha kalın duvarlar için, yeterince büyük parçalar genellikle taşlar işlev görmez. O zaman duvarın iki yüzü arasında pozitif bir bağlantı olmayacak ve kaplamalar birbirinden ayrılma eğiliminde olacaktır (Heyman, 1995).



Şekil 1.1. Duvar kaplamalarının birbirinden uzaklaşması (Heyman, 1995)

Yığma kemer tüm kemerler yerine oturuncaya kadar kendi ağırlığını taşıyamaz. Uygulama aşamasında, kemerin ağırlığı ahşap merkezleme tarafından taşınır. Merkezleme kaldırıldığında kemer yapısal olarak çalışmaya başlayacaktır. Kemerin inşası sırasında yerleştirilen ilk birkaç taş, her biri bir alttakinin üzerinde durarak, kendilerini ayakta tutabilir. Kemer içe doğru hareket ettikçe, yeni yerleştirilmiş bir taş kayma tehlikesiyle karşı karşıya kalacak ve merkezleme ihtiyacı ortaya çıkacaktır. Tamamlanmış kemer halkasındaki herhangi bir taş bütünü istikrarını sağlayan kilit taşı

taşı olarak kabul edilebilir. Dekoratif oyma kilit taşı normalde halkadaki merkezi taş olarak düşünülür, en son yerleştirilecek ve genellikle boyutuna göre mimari önem verilir. Şekil 1.2’de varsayımsal merkezleme çalışması görülmektedir (Heyman, 1995).



Şekil 1.2. John Fitchen'in Pont Du Gard'ın varsayımsal merkezleme çalışması (Heyman, 1995)

### 1.3. Yığma Taş Köprüler

İnsanoğlu yaratılışından itibaren ve dünyadaki yaşamsal döngüsü boyunca hep yeni yurt ve yeni coğrafyalar keşfetme amacıyla göçler gerçekleşmiş ve göçler sonucunda savaşlar kaçınılmaz olmuştur. Kendilerine yurt edindikleri yerlerde kalıcılıklarını sabitlemek için kâgir yapılardan saraylar, surlar, kaleler ve köprüler inşa etmişlerdir. Savaşlarda da rakibe karşı üstünlük sağlamak için çevresel koşulların yardımı ile yeni yöntemler üremiş ve gelişmişlerdir. Günümüzde yapılan modern köprülerin üstlenmiş oldukları jeopolitik ve stratejik özellikleri olduğu gibi; taş köprülerde yapılmış oldukları zamanlarda da jeopolitik ve stratejik özelliklerinin olduğu unutulmamalıdır. Savaş esnasında düşmana karşı üstünlük sağlamak için ahşaptan köprüler yapılmıştır. Savaş sonrası bu köprülerin çoğu taş köprülere dönüştürülmüştür. Köprüler bazen savunma amaçlı olabileceği gibi ticaret kervanlarının geçişini de üstlenen rollere sahip olmuştur. Bazı köprülerin ayakları içinde köprü muhafızları ve memurlarının veya yolcuların barınması için odacıklar meydana getirilmiştir. Kervan geçişleri tarihin en eski çağlarından beri; günümüzdeki ücretli oto yollara benzeyen şekilde ücretliymiş (Çulpan, 2002).

Çulpan (2002)'a göre insanların suları aşma amacının gelişmiş bir fonksiyonu olarak kâgir taş köprülerinin planlaması ve uygulanmasına geçilmiştir.

Günümüzde de aynı şekilde modern teknoloji sayesinde betonarmeden ve çelik konstrüksiyondan çok geniş açıklıklar geçilebilmektedir. Kâgir yapılardan olan taş

köprülerin pek çoğu yüzyıllardır ayakta durmakta ve tarihin tanıkları olarak günümüze ulaşmayı başarmışlardır. Taş köprüler mimari ve estetik açıdan günümüzde betonarme ve çelik konstrüksiyondan yapılan köprülere göre daha üstün özelliklere sahiptirler.

Köprülerde en önemli bilgileri zamanımıza aktaran şüphesiz kitabelerdir. Kitabeler köprünün ayaklarında, beden duvarlarında, köprü gözleri arasında bir levha olarak yerleştirilmiştir. Kitabelerin çoğunda hayır işlemek amacıyla yapıldıkları yazmıştır. İslam da sadaka-ı cariyeye (insanın ölümünden sonra devam eden hayır) işleme amacı vardır. İslam inancına göre; köprü, okul, hastane ve çeşme gibi umumi ortak kullanım hizmetlerini yapmak insanın ölümünden sonra amel defterinde hayır olarak eklenmektedir. Bundan dolayı her sultan veya paşa köprü, okul, hastane ve çeşme gibi yapıları yapma azim ve hedefinde olmuştur (Çulpan, 2002).

## 2. MALABADİ KÖPRÜSÜ

Malabadi Köprüsü mimari modül olarak pek çok taş köprüden ayrılmaktadır. Köprü tarihçilerin, seyyahların, gezginlerin, mimarların, arkeologların, mühendislerin ve sanat tarihçilerinin ilgi odağı olmuş ve köprü hakkında bir literatür oluşmuştur. Bu çalışmada bu literatür incelenerek köprü hakkında kapsamlı bir değerlendirme yapılması amaçlandığından köprünün tarihçesi ve mimarisi hakkında detaylı bilgiler aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

### 2.1. Tarihçesi

Malabadi Köprüsü günümüzde Diyarbakır ili Silvan ilçesi sınırları içinde kalmaktadır. Köprünün tarihçesi hakkında en eski ve kesin bilgiler H.510 - 577 (1117-1181) yılları arasında yaşamış Silvanlı tarihçi İBN'UL EL-AZRAK Ahmed b. Yusuf b. Ali'nin eserinde yapmış olduğu anlatımıdır. Şehrin olduğu yerde Farikin ve Batman adlarında bulunan iki sudan dolayı şehir tarihte (Miyafarikin) adı ile anılmıştır. Farikin suyu, şehir burçları önündeki hendekleri doldurup bir engel oluşturmuş, şehrin su ihtiyacını karşılamakta ve kanalizasyonların temizliğinde kullanılmıştır (Çulpan, 2002).

İBNU'L-EZRAK (1992)'in anlatımına göre, Akraman Köprüsü'nün<sup>3</sup> yapımı; es-Saîd Hüsameddin Timurtaş döneminde H.541 (1146) yılında ez-Zâhid Ebu'l-Hasan Ali b. et-Tavîl sorumluluğunda büyük kemer üzerine yapımına başlanmıştır. İlk olarak Doğu tarafındaki ayakları yerleştirilmiş, fakat köprünün temelini zayıf olmasından ötürü fazla gelen su köprüyü yerinden söküp yıkmıştır. Köprünün yıkılmasından dolayı ez-Zâhid İbnu't-Tavîl'e tazminat cezası verilerek görevinden alınmıştır ve sonra bu görev Emir Seyfeddin Şirbârik Memdud b. Ali b. (Alpyâruk ) b. Artuk'a verilmiş, o da Ebu'l-Hayr b. el-Hâkim el-Fâsıl'ın kontrolünde köprünün yapımına başlamıştır. Eşi görülmemiş keresteler getirtmiş ve H.548 (1153) yılına kadar inşası devam etmiştir.

Köprüde iki kitabenin bulunduğu ancak günümüzde sadece bir kitabe bulunmaktadır. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi kitabe kabartma tekniğinde, Arapça dilinde cel-i sülûs hat sanatı karakterindedir.

Arapçası:

هذا ما أمر بانشائه وعمله والانفاق عليه من ماله في سنة اثنين وأربعين وخمسمائه ... تمر تاش ... (بسملة  
بن ايل غازی بن ارتق)

<sup>3</sup> Akraman Köprüsü Malabadi Köprüsüdür (bknz., Gabriel, 2014, s 202).

Türkçe Tercümesi ise “Besmele. Bu köprünün yapılmasını ve masraflarının kendi malından beş yüz kırk iki yılında Temirtaş b. İlgazi b. Artuk emretti.” şeklindedir.



Şekil 2.1. Malabadi Köprüsündeki kitabe (KGM, 2009)

Taylor hasar görmüş ama hala yerinde duran bir kitabeden Osman adını ve 643’ü okuduğunu iddia eder. M. Sauvaget kitabeden parçalı bir okuma yapmış olmasına rağmen kesin bir şekilde Timurtaş adını ve 542 (1147 - 1148) tarihini verir (Gabriel, 2014).

## 2.2. Yeri ve Konumu

Diyarbakır-Batman il sınırında yer alan köprü, Diyarbakır merkezine 100 km uzaklıkta, Silvan ilçesine 18 km uzaklıkta ve E99 karayoluna 4 km yakınlıktadır. Köprü Dicle suyuna dökülen Batman Çayı üzerindedir. Köprünün memba tarafında 1955 yılında Karayolları 9. Bölge Müdürlüğü tarafından yaptırılmış olan kemerli betonarme bir köprü bulunmaktadır. Köprünün kuzey cephesinde yaklaşık olarak 700 m uzaklıkta Batman barajı bulunmaktadır. Şekil 2.2’de Malabadi Köprüsü ve Batman barajının görünüşü yer almaktadır. Köprüye en yakın yerleşim yeri Çatak Köprü Mahallesi olup merkezden köprüye olan mesafe 400 m’dir.



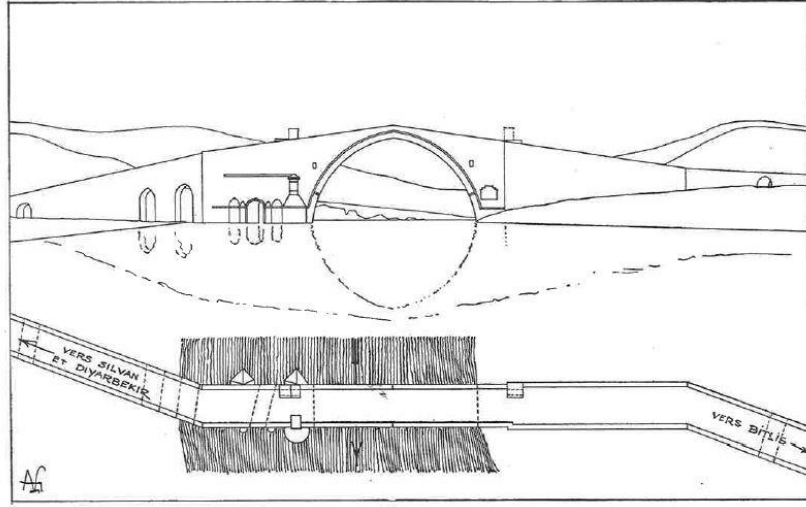
Şekil 2.2. Malabadi Köprüsü ve Batman barajı (parselsorgu.tkgm.gov.tr)

### 2.3. Seyyahların Düşünceleri

Ünlü seyyahlardan Evliya Çelebi'den köprü hakkında seyahatname adlı eserinde köprüye yer vermiş ve köprü hakkında bilgiler verirken kişisel düşüncelerini de yazmıştır, (Evliya Çelebi Seyahatname, Çeviren, Kahraman, S.A. ve Dağlı, Y. 2001):

İbret verici acayip yapı, garip sanatlı hayrat, mühendislerin seçilmiş eseri seyre değer Batman Köprüsü Diyarbakir ve Mefarikin'den Hazzo'ya, Bitlis'e, Van'a ve başka yerlere geçiş yeridir. Batman Köprüsü'nün yapısı, tarzı tavrı, temel konumu, boyu posu ve sağlamlığı başka bir köprüde yoktur. Bu büyük nehrin bir tarafı kayadır ve bir tarafı. Köprü'nün altından geçen, tatlı sulu Batman çayı yakın dağlardan akıp gökkuşağı benzeri köprü'nün altından geçip doğu tarafa ve bazen de kıbleye akarak altında Şat Nehri'ne katılır, Batman Köprüsü altından geçtiğinde öyle şiddetli ve gürültülü akar ki insanın kulağı sağır olur. Köprü'nün baş ustası Batman nehri üzerinde bir göz açıklığında köprü yapmak zorunda kalıp köprü'nün iki tarafına sağlam temel üzerine derin ızgara temeller yapıp Kısra kemerinden nişan veren bir göz inşa etmiştir ki uzak mesafelerden halka gibi bellidir. Köprü'nün boyu tam 173 adımdır. Mostar Köprüsü de bir gözdür ama Batman Köprüsü mühendislik olarak gayet ağır bir köprüdür. Çünkü Batman köprüsündeki sağlamlık, istihkâm, zarafet ölçüleri ve incelikler hiçbir ünlü köprüde yoktur (Kahraman ve Dağlı, 2001).

Şekil 2.3'te görüldüğü gibi köprünün yansıması Evliya Çelebi'nin söylemiş olduğu gibi Kisra'nın (İran) kemerlerinin gözüne benzetmektedir.



Şekil 2.3. Malabadi Köprüsü mansap cephesi ve planı (Gabriel, 2014)

Köprüün kemeri altında iki odacık vardır ve konuklar bu odacıklarda konaklayıp kemerin karşı tarafındaki insanlar ile sohbet eder veya balık tutarlar. Köprüün baş ustası köprüün kemere yük olmasın diye odacıklar yaparak köprüün içini boşaltmıştır. Köprüün Hazzo tarafındaki handa Hazzo beyi adamları gecen tüccardan bac alırlar. Mefarikin tarafındaki handa Mefarikin beyi adamları bac alırlar, ama bu han denilen yapıların tamamı köprüün iki tarafı altında bulunan büyük hanlardır (Kahraman ve Dağlı, 2001).

Batman Köprüsü Samanyolu gibi göklere baş uzatıp göklerin zirvesine benzersiz bir kement atmıştır. Yapı ustası bu köprüde öyle sanatlar göstermiştir ki geçmişte dünyada öyle bir güzel işçiliği hiçbir mimar yapmamıştır. Köprüün övgüsünde dil kısa ve kalemler yetersizdir. Cenab-ı Kayyum kıyamete kadar köprüyü sağlam ve dayanıklı eylesin (Kahraman ve Dağlı, 2001).

Osmanlı İmparatorluğunda Sultan Mahmud zamanı orduda görevli VON MOLTKE köprü hakkındaki izlenimlerini ise (bkz., Çulpan, 2002, s 44) kayalık dağın köşesinden döndükten sonra devasa bir yapı ile karşılaştığını ve Batman çayının gürlemesi ve bir Türk süvari kafilesinin hareket sahneleri, gecenin serinliğinde seyrine doyulmaz bir manzara meydana getirdi şeklinde aktarmıştır (Çulpan, 2002).

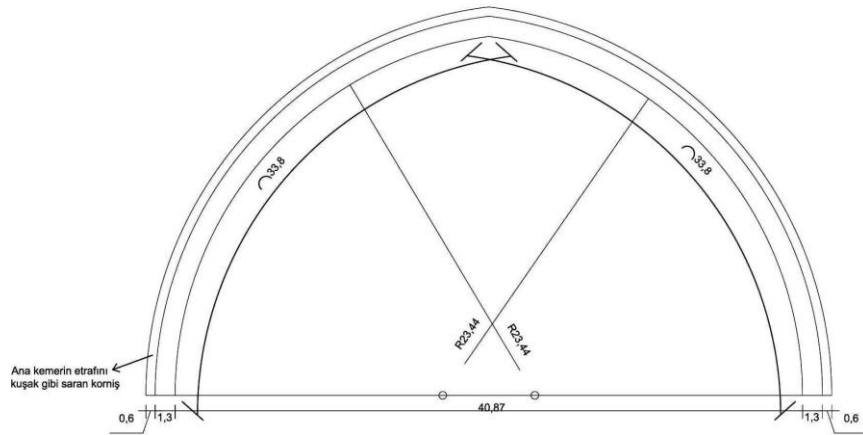
Konyar ana kemerin üstünün çok dik olmasından dolayı yıkılacağı izlenimini verdiğini ve kamburluğunun otomobillerin geçmesine engel olduğunu belirtmiştir (Konyar, 1936).

#### 2.4. Mimari Özellikleri

Malabadi Köprüsü plan itibari ile tek bir ana kemere sahip ve ortaya doğru her iki taraftan meyilli köprüler grubunda değerlendirilebilir. (bknz., Çulpan, 2002, s 43) Köprü eğri köprüler sınıfında, köprü ayakları nehir tabanında sağlam zemini izlemesi veya nehrin akıntı kitlesinin köprü gövdesine yapacağı ana basıncı dağıtmak gibi nedenlerin etkisi ile iki şekil medyana gelir. Buna bağlı olarak köprü; birkaç geniş açılı, zikzak şekiller grubunda değerlendirilebilir (Çulpan, 2002).

Malabadi Köprüsü doğu ve batıda hafif meyillerle (%19'luk eğim) yollara bağlanmaktadır. Orta kısım, kayalıklar üzerine kurulmuş bir kitledir.

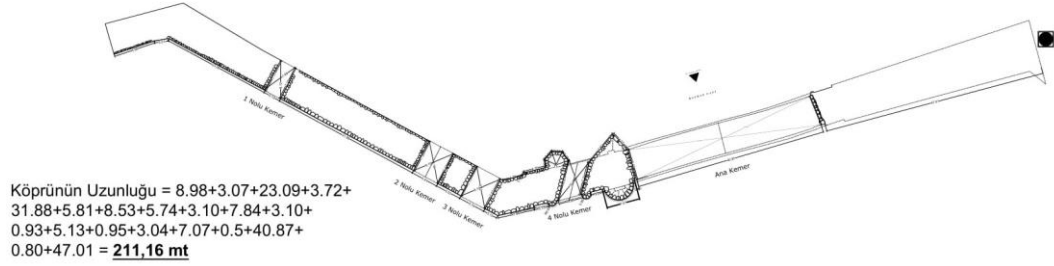
Şekil 2.4.te görüldüğü gibi köprünün ana kemer açıklığının 40.87 m olması dünyada mevcut taş köprüler arasında en üstün dereceye varılmış olduğunun kanıtıdır.



Şekil 2.4. Ana kemer formu ve ölçüleri (KGM, 2009)

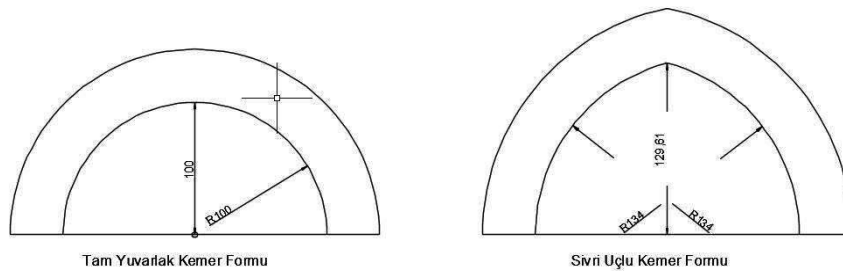
Köprünün Batman tarafındaki girişi ile Silvan tarafındaki giriş kısmı plandan bakıldığında hemen hemen paralel oldukları görülür. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi köprünün boyu 211.16 m ve eni (korkuluk dâhil) 7.00 m'dir. Köprünün memba cephesine bakan cephede Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından 1954 yılında yapılmış Şekil Ek 2.4'te görüldüğü gibi kemerli betonarme tarzda yapılan modern köprü yer almaktadır.

1968 Diyarbakır ili yıllığında, köprünün büyük kemerinin altında 26.50 m çapında olan Süleymaniye camisinin kubbesi sığabileceği yazılıdır (bknz, Çulpan, 2002, s 41).



Şekil 2.5. Köprü planı (KGM, 2009)

Sivri uçlu kemerler genellikle İran mimarisinden esinlenerek hem köprülerde hem de binalarda sıkça kullanılmıştır. Bu kemerin tam yuvarlak kemere göre farklı birkaç fonksiyonu vardır. Sivri uçlu kemerlerle yapı yüksekliği arttırılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan; açıklığın üç eşit parçaya bölünmesiyle çizilen kemer modelidir. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi açıklığı 200 cm olan iki farklı kemer modeli çizilmiştir. Tam yuvarlak kemerin kemer yüksekliği 100 cm iken sivri uçlu kemerin yüksekliği ise 129.61 cm olmaktadır. Su yapısı olan köprülerde kemerin tepe noktasından memba seviyesine kadar daha yüksek bir açıklık elde edileceğinden sivri uçlu kemerler tercih edilmiştir. Sonbahar, Kış ve İlkbahar aylarında yağmur ve kar sularının nehir yataklarında su seviyesini yükseltip suyun kabarma ihtimalide dikkate alınmıştır.



Şekil 2.6. Tam yuvarlak kemer ve sivri uçlu kemer formları (Çetin, 2021)

Tarih boyunca kemerlerin montaj ve uygulamaları esnasında bazı bilgilere sahip olunmuştur. Bunlardan en önemli olan kısmı da kemerler yapılırken kilit taşının olması gerekliliği, kemeri oluşturan taşların tek sayıdan oluşu ve en önemlisi kemerler daha önce kemer formuna uygun hazırlanan kalıplar yardımı ile örülme işlemi ile

gerçekleşmeleridir. Bu kalıplar günümüzde teknolojinin gelişimi ile beraber iki farklı malzemeden ahşap veya çelikten yapılabilmektedir. Oysaki Malabadi Köprüsü yapıldığı zamanlarda veya antik çağlarda yapılan kemerler ahşap malzemeden yapılan kalıp veya ahşap iskele yardımı ile merkezleme yapılmıştır. Şekil 2.7’de merkezlemesi yapılan taş köprü’nün kemeri görülmektedir.



Şekil 2.7. Tarihi Orta Köy köprüsü kemer kalıbı çelik malzemeden

Köprüde ana kemerin dışında memba ve mansabın her iki tarafında açık olan dört küçük kemer bulunmaktadır. Köprü’nün ana kemeri ve diğer kemerler el aletleri ile düzgün bir şekilde işlenen kesme taştan yapılmıştır. Ana kemerde profil (korniş) taşları düz kemer taşlarından 15 cm dışa doğru uzatılmış silme görevi görmektedir. Profil (korniş) köprü duvarından da 5 cm dışa doğru çıkıntılıdır. Taş ustaları kemerlerde prizmatik olarak daha düzenli bir forma sahip taşları kullanmaktadır. Köprü’nün ana kemer, diğer kemerler ve duvarlarında kullanılan taşlar aynı mekanik özelliklere sahip taşlardır. Sadece kemer taşları daha özenli hazırlanmıştır.

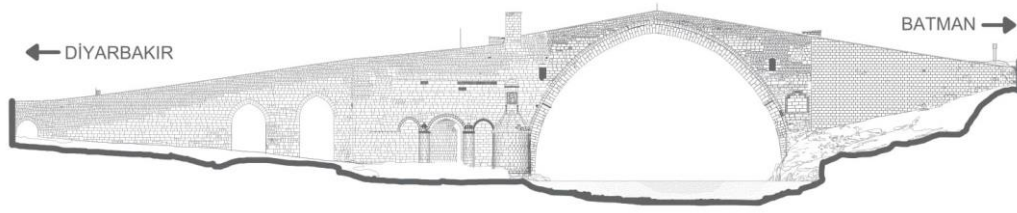
Malabadi Köprüsü’nün ana kemer formu iki merkezli olup merkezler kemer ortasına yakın yerden olacak şekilde zamanında yapılmıştır.

Yığma olarak yapılan pek çok mimari yapıda; kemerlerde, pencerelerde, kapılarda ve bina köşelerinde korniş, silme taşları, köşe taşları ve söveler yapılarak yapı elemanlarında hareket, estetik ve mimari açıdan bir canlılık oluşturan bir gelenek haline gelmiştir. Ustalar antik çağlardan beri bu geleneği bilip uygulamış, kendilerinden sonra

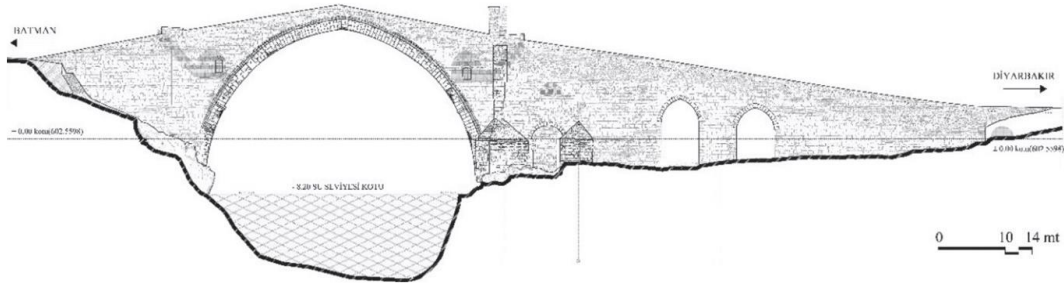
gelen kuşaklara aktarmış ve her kuşak bu geleneğe katkı sunarak geliştirilmesinde rol oynamıştır.

Köprüde ana kemer dışında yapılan küçük kemerlerin estetik ve mimari güzelliğin dışında membadan mansaba akacak olan suyun ana kemerde oluşması muhtemel basınçları azaltma amacı vardır.

Şekil 2.5, Şekil 2.8 ve Şekil 2.9’da görülen kemer planı, mansap cephe görünüşü ve memba cephesi görünüşlerine göre köprüde yer alan kemerlerin mimari özellikleri için Çizelge 2.1 oluşturulmuştur.



Şekil 2.8. Köprü mansap cephesi görünüşü (KGM, 2009)

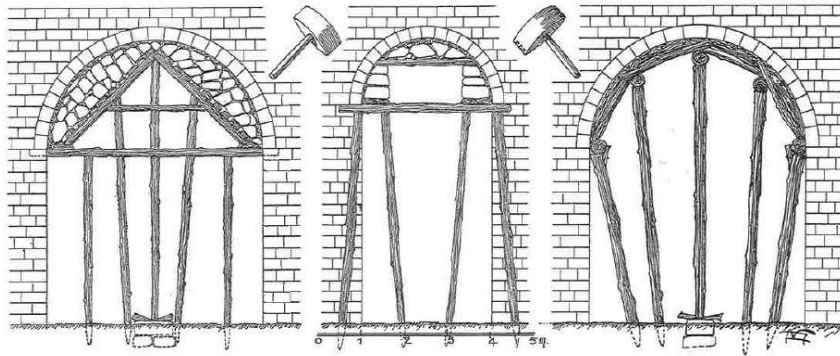


Şekil 2.9. Köprü memba cephesi görünüşü (KGM, 2009)

Çizelge 2.1. Malabadi Köprüsü kemerlerinin mimari özellikleri

	Kemer açıklığı (m)	Kemer formu (Şekli)	Kemer yüksekliği (m)	Destek duvar yüksekliği (m)	Kemer yüzü genişliği (m)	Profil genişliği (korniş) (m)	Kemer derinliği (m)
Ana kemer	40.87	Sivri Kemer	22.35	-	1.30	0.6	6.85
1 nolu kemer	3.72	Sivri Kemer	2.05	0.75	0.4	-	7.00
2 nolu kemer	5.78	Sivri Kemer	3.56	4.63	0.4	-	7.00
3 nolu kemer	5.74	Sivri Kemer	3.56	7.15	0.4	-	7.00
4 nolu kemer	5.06	Basık Kemer	2.16	5.93	0.6	0.45	7.00
4 nolu kemerin solu kapalı kemer	3.10	Sivri Kemer	1.96	6.23	0.4	-	0.5
4 nolu kemerin sağı kapalı kemer	3.10	Sivri Kemer	1.68	6.12	0.4	-	0.5

Gabriel (2014) 1932 yıllarında Mardin'e yapmış olduğu gezide Şekil 2.10'da görüldüğü gibi Mardin ustalarının kemer ve tonozları bükme yöntemini çizmiştir. Kerestenin çok nadir bulunduğu, pahalı oluşu kemer ve tonoz kalıpları yanı sıra yapıyı yapmak içinde kullanılan iskelede keresteyi azaltmak amacıyla ahşap kütük yerine toprak kazıklarla, otlarla ve dal yığınlarıyla tonozun yapılacağı alanı desteklenirmiş. Daha sonra, balçıkla kazık ve otların yüzeyine tonoz şekli verilir ve balçık kuruyup dayanıklı hale geldikten sonra balçığın üzerine beşik tonozun kemer taşları dizilirmiş. Başka şekilde de zayıf dallarla yapılan kaba çatı makasları kemerin yüzüne sık aralıklarla paralel bir şekilde yerleştirilirmiş. Makas mertegi ile tonoz karnı arasındaki kısım balçıkla sıvanarak moloz taşı dolgusuyla doldurulmuş (Gabriel, 2014).



Şekil 2.10. Kemer ve tonozlarda ahşap kalıplar (Gabriel, 2014)

Malabadi Köprüsünün ana kemerinin eğrisi incelendiğinde biraz hatalar olduğu görülebilir. Köprü yapıldıktan sonra yıkılmış olduğu ve geriye kalan kısmı eksenden kaymış, mevcut kalan yapı üzerine ilavesi yapılırken ana kemerin merkezlemesi tam olarak yapılamamıştır. Köprünün diğer küçük kemerlerinde bu tür merkezleme hatası bulunmamaktadır.

Köprünün ana kemerin sağ ve sol tarafında yer alan odacıklar bulunmaktadır. Batman ve Silvan tarafında yer alan her iki odacıkta mimari olarak bir birine benzemektedir. Silvan tarafındaki odacıkta duvarlarda yer alan bazı taşların ölçüleri Batman tarafındaki odacığa göre daha devasa boyutlardadır. Batman tarafındaki odacığın üst örtüsü takoz tuğladan beşik tonozu formundadır. Silvan tarafındaki odacığın üst örtüsü takoz tuğladan çift merkezli tonoz formundadır. Odacıklarda yer alan taşların sıra yükseklikleri Midyat ta son 150 yıldır inşa edilmiş olan yapılar gibi 25 cm yüksekliğindedir.

Malabadi Köprüsünü yapan ustalar kemer bükme yöntemini veya başka bir ifade ile merkezleme yapma yöntemi bilinirmiş. Köprünün yapıldığı bölge ahşabın çok az olduğu bir bölge olup Mardin ustalarının yöntemlerine benzer şekilde merkezleme yapılarak köprü inşa edilmiştir.

En son yapılan restore çalışması sonrasında odacıkların zeminleri 25 cm sıra genişlikte yontu taşı ile döşenmiştir. (Şekil 2.11)

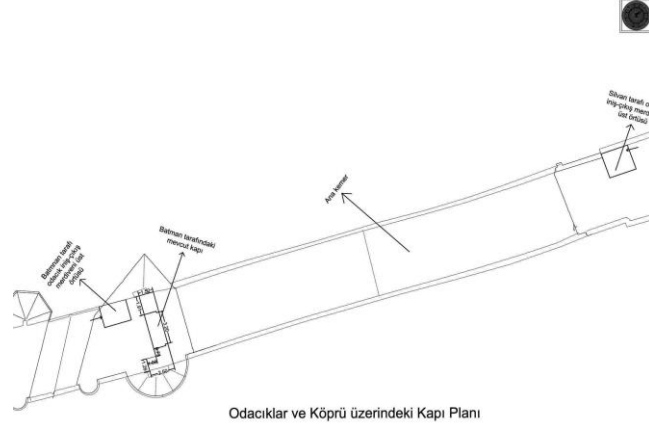
Silvan tarafındaki odacıkta hela veya banyo niyetinde kullanılmak üzere geniş ölçülü bir niş olmasına rağmen Batman tarafındaki odacıkta ise daha küçük bir niş (şömine tarzına benzer) yer almaktadır. Silvan tarafındaki helanın dış duvarda cumba şeklinde çıkıntısı memba cephesindedir.



Şekil 2.11. Batman tarafındaki odacığın iç kısmı

Silvan tarafındaki odacığın pencereleri Batman tarafındaki odacığın pencerelerine göre daha yüksektir. Silvan tarafındaki odacığın içindeki pencerelerin üst kısmı takoz tuğladan yapılı kubbeye benzer formda kemer sistemi ile yapılmıştır. Batman tarafındaki pencerelerin üzeri ise tek parça olan düz lento ile yapılmıştır. Lento taşının arka kısmı ile köprünün ana duvarını teşkil eden dış duvar arasında kalan kısımda ise ahşaptan kirişler bulunmaktadır.

Şekil 2.11’de görüldüğü gibi köprünün her iki tarafında yol geçiş ve kontrolü sağlama amacıyla kemerli kapılar yapılmış olup bugün Silvan tarafındaki kapı yıkılmış Batman tarafındaki kapı bulunmaktadır. Günümüze kadar ulaşan kapının kemeri basık kemer olup köprü planına göre mansap cephesi memba cephesine göre daha geniş olup L formunda yapılmıştır. L formunun sanatsal, mimari ve mühendislik olarak niçin yapıldığı konusunda literatürde herhangi bir bilgi ve bulgu bulunmamaktadır. Ancak kişisel kanaat ve ustalığın vermiş olduğu tecrübeye göre; Silvan tarafındaki kapı yıkıldıktan sonra veya yıkılmadan önce onarım esnasında payanda görevi görecektir şekilde kapının yıkılmasının engellenmesi amacıyla yapılmış olduğu düşünülebilir.



Şekil 2.12. Odacıklar ve köprü üzerindeki kapı planı (KGM, 2009)

Köprüde yer alan odacıkların yapılmasının birkaç nedeni vardır. İlk olarak yığma yapı olan Malabadi Köprüsü'nde hafifletme amacı ile yapılmış oldukları düşünülebilir. Bir diğer neden ise böyle bir devasa köprüde geçişin ücretli oluşu ve yakın yerde han olmayışının sonucu olarak köprüde yapılmış oldukları düşünülebilir. Her iki düşüncede haklı ve yerindedir.

Odacıklara iniş-çıkışı sağlayan merdivenlerin üzerleri kesme taştan yapılmış basık tonozun formunda yapılmıştır (Şekil 2.13). Odacıklardaki taşların ölçülerinin farklılığı köprü'nün tarihsel süreçte kısmi olarak yıkılmış olduğu ve onarılması sonucunda ortaya çıkmış olduğu kanaatine varılabilir.



Şekil 2.13. Odacıklara inişi sağlayan merdiven örtüsü

Köprü ayaklarında, basıncı azaltmak için memba ve mansap cephelerinde gemi burnu veya yarım silindir şeklinde yapılan mimari şeklindeki çıkıntılar memba cephesinde yapılanlara topuk adı verilirken mansap cephesinde yapılanlara ise selyaran veya mahmuz adı verilir (Hasol, 2020).

Memba cephesinde ana kemerin sağında büyük üçgen biçiminde ve hemen sağdaki kemerin sağında da sekizgen formunda iki adet topuk vardır.

Mansap cephesinde ana kemerin solundaki selyaran 700 cm çapında yarım silindir biçiminde ve üst kısmı konik şekliindedir. Sol taraftaki kemerin her iki tarafındaki selyaran 180 cm çapında yarım silindir biçiminde ve üst kısmı konik şekliindedir.

Memba cephesinde altıgen şeklindeki topuğun üzerinde oturan bir insan heykeli vardır. Bu heykelin üstünde kenarları tırtıllı güzel bir çerçeve içerisinde iki insan motifi vardır. Biri ayakta durmakta ve oturana bir şey takdim ederken öteki de ellerini uzatarak sunulanı alır bir vaziyettedir. Motiflerin etrafında yer alan çerçeve hiç bozulmamıştır. Motifler köprüye mi aittir, yoksa her hangi bir tamir sırasında başka yerlerden alınıp ta buraya konulup konulmadığı bilinmemektedir. Oturan heykelin şekli daha çok kadına benzemektedir. Bu motiflerin koruma altına alınması gerekmektedir (Konyar, 1936).

Kitabenin ilerisinde büyük kemerle küçük kemer arasını bölen selyaranın üzerinde güzel bir çerçeve içinde bir güneş ve bunun göbeğinde bir kadın olması muhtemel olup güneşin altında bir hayvan resmi, aslandan fazla domuza benzemekte ve suya bakar bir vaziyettedir (Konyar, 1936).

## 2.5. Yapımı ve Onarımı

Malabadi Köprüsü ilk olarak ahşap malzemeden yapılmış olması muhtemeldir (Gabriel, 2014).

Malabadi Köprüsü büyük bir köprü olup içerdiği taş malzeme ve işçiliği dikkate alındığında bir iki usta ile yapılamayacağı, bir mimarın eşliğinde yüzlerce usta ve işçiden oluşan bir ekip tarafından yapılmış olduğu aşikârdır.

Evliya Çelebiye göre Abbasoğulları soyundan Hüsamettin Timurtaş tarafından helal temiz malından 3000 kese harcayarak Batman nehri üzerine en iyi yapı ustalarını, mimar ve mühendislerini toplayıp büyük bir köprü yaptırmıştır (Kahraman ve Dağlı, 2001).

Köprünün ilk yapım kitabesi günümüze kadar ulaşmamış olması nedeniyle köprüyü yapan baş ustanın kim olduğu konusunda herhangi bir kanaate varılamamıştır.

Genellikle yığma yapılar inşa edilirken en yakın yöre taşları kullanılmıştır. Uzak mesafede olan taşların inşaat sahasına naklinin zorluğu ve maliyeti de hem o zamanlarda hem de günümüzde önemli bir etkidir. Şekil 2.14'te görülen Diyarbakır Ulucami'de olduğu gibi Diyarbakır yöresinde bulunan siyah taş (bazalt) beyaz renkli taşlarla birlikte kompozit olarak veya tek başına yapı taşı malzemesi olarak yıllar boyu kullanılmıştır. Bazı eski yapılarda renkli iki farklı taşın kemerlerde ve duvarlarda örneklerini bulmak mümkündür.

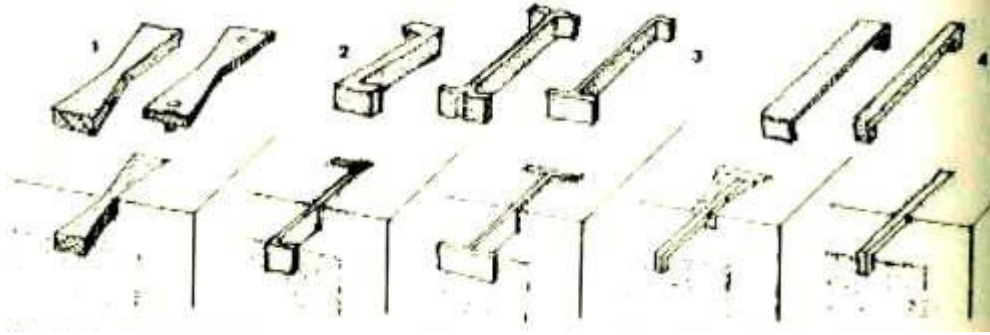


Şekil 2.14. Diyarbakır Ulucami cepheden görünüş (Mungan, 2020)

Kalker taşı maden ocaklarından çıkarılmış olduğu zamanlarda farklı tonlarda ve renklerde olabilmektedir. Köprüde kullanılan taş malzeme yıllar sonra çevresel faktörlerin sonucunda yüzeyde insan derisi rengine gelmektedir. Malabadi Köprüsü'nün dış beden duvarlarında kullanılan malzeme yöre taşı olan kalker taşıdır. Doğal taş bakımından zengin maden yataklarına sahip olan Silvan İlçesinin sınırlarında bulunan köprüde Silvan taşının kullanılmış olduğunu söylemek oldukça yerinde ve isabetli bir tespit olacaktır.

Malabadi Köprüsü'nün dış duvarlar arasında kalan boşluk ise Roma yapılarında olduğu gibi muhtemelen kireç harcıyla örülen moloz taştan yapılmıştır. Kireç harçları hava bağlayıcı malzeme olup çimento harcının aksine yıllar sonra priz almaktadır. Bundan dolayı antik yapılarda bağlayıcı malzemeler kullanılmadan önce ve kirecin bu ani olumsuz davranışından dolayı taş malzemeyi yatayda ve dikeyde demir lamalarla birleştirerek duvarın tek parçaymış gibi davranış sergilemesi amaçlanmıştır. Şekil

2.15'te bu tip yapılarda kullanılan kenet ve zıvanaların çizimleri verilmektedir. Malabadi Köprüsü'nün uzun yıllar boyunca ayakta durmasının önemli bir etkeni de taşlar örülürken kenet ve zıvanalarla birleştirilmiş olması ve ayrıca dış duvarlar arasında toprak dolgu malzemesi yerine kireç harçlı moloz taşlarla dolgu yapılmış olduğudur.



Şekil 2.15. Yığıma yapılarda taşlar arasında kullanılan kenet çeşitleri (Anonim, 2013)

Köprü'nün genişliği ortalama 700 cm, dış beden duvarlarının her bir cidar kalınlığı 50 cm olup geriye kalan 600 cm'lik dolgu kısmı ise moloz duvar yapma tekniğine göre yapılmış olduğu tahmin edilmektedir. Şayet bu boşluk toprak ile doldurulmuş olsaydı hidrostatik kuvvetler sonucunda duvarlarda şişme ve ciddi çatlaklar oluşacaktı. Ancak Malabadi Köprüsü'nde dikeyde eksenden kayma veya çok kalın duvar çatlakları olmadığı, Kahraman ve Dağlı (2001) ve Gabriel (2014) anlatımlarında köprü'nün sağlamlığından bahsedilmektedir.

Kesme yontu taştan yapılmış binalarda yaptığım kendi gözlemlerimde aralarında dolgu toprak olan binalarda oturmalar ve duvarlarda çatlama olduğunu tesbit ettim ve Midyatta yetişmiş en son Müslüman taş ustası olan Davut ÇETİN ile yaptığım görüşmede kendisi de bu şekilde ifade etmiştir. Şekil 2.16'te iki cidar arasında toprak dolgu yapılmış ve çatlamaya uğramış bina görülmektedir. Çünkü çift cidarlı yani her iki tarafı düzgün örülen duvar sistemleri aslında iç duvar ve dış duvar bağımsız olarak hareket etmekte ve duvarların birbirleriyle etkileşimleri olmamaktadır.



Şekil 2.16. Çift cidarlı yığma yapı binada duvar çatlaması (Mungan, 2020)

Köprüdeki harpuşta duvarları yerine Evliya Çelebi'nin seyahatnamesine göre; köprünün sağında ve solunda korkulukların yer aldığı ve bunların işlenmiş demirden büyük ustalıkla yapıldığı belirtilirken, Gabriel (2014) 1932 yılında köprüye yapmış olduğu gezide harpuşta duvarının yapılı olduğunu yazmaktadır. Demir korkuluğun ne zaman sökülüp yerine harpuşta duvarının yapıldığı hakkında herhangi bir yazılı bilgi bulunamamaktadır. Evliya Çelebi'nin köprü hakkında yazmış olduğu 17. Yüzyıl ile Gabriel'in 1932 tarihleri arasında yapılan onarım çalışmaları arasındaki bir zamanda tehlike arz etmesi sonucu değiştirilmiş olduğu söylenebilir.

Köprünün harpuşta duvarı ortalama 100 cm yüksekliğinde, 70 cm genişliğinde ve harpuştanın yüzü % 19 eğimlidir. Harpuştanın taşları moloz duvar sistemine göre örülmüş oldukları ve en son duvar üzerine konan harpuşta taşlarının ölçüleri düzenli Şekil 2.17'de görüldüğü gibi 15 cm yükseklikindedir.



Şekil 2.17. Restore sonrası köprünün harpuşta duvarı

Köprüde kullanılan döşeme taşları Evliya Çelebi'ye göre; Diyarbakır kalesinden getirilerek yapıldığı ve çakmak taşından bile çok daha sert olduğu yazılıdır (Kahraman ve Dağlı, 2001). Ancak bu konuda Gabriel (2014) bunun doğru olmadığını Diyarbakır surlarının bazalt taştan yapılmış olduğu, Malabadi Köprüsünün ise kalker taşından yapılmış olduğunu yazmaktadır.

Kalker taşının kimyasal bileşimi  $\text{CaO}$  olup karbondioksit ile ( $\text{CO}_2$ ) reaksiyona (hava ile) girerek  $\text{CaCO}_3$  (kalsiyum karbonatı) oluşturur. Kalker taşında ilerleyen zamanlarda taşın yüzeyinde sertleşen ince bir tabaka oluşur (Erdoğan ve Erdoğan, 2007). Malabadi Köprüsünün taş malzemesi kalker taşı olup üzerinden bu kadar yıl geçmiş olmasına rağmen taş malzemenin yüzeyinde sertleşme meydana gelmiştir.

Köprünün ayaklarının kayalık zemin üzerine inşa edilmesi sonucu ana kemerin yüksekliği her iki tarafta eğimli merdiven basamakları ile döşeme yapılmasını zorunlu kılmıştır (Şekil 2.18).

Köprüde kullanılan döşeme taşlarının yüksekliği 17 cm olup köprü duvarında kullanılan taşların aksine sert yüzeyi açılmamış ancak etrafı düzeltilmiş moloz taşların ölçüleri geliş güzel formdadır. Evliya Çelebi'nin döşeme taşları için söylemiş olduğu çakmak taşı benzetmesi haklı ve yerindedir.



Şekil 2.18. Restore sonrası Malabadi Köprüsü döşeme

Malabadi Köprüsü 1955 yılında mansabına inşa edilen yeni köprünün hizmete açılmasına kadar aktif olarak Batman Çayı geçişi için kullanılmıştır. Eğer köprünün hizmete girdiği tarihin yaklaşık olarak 1150-1950 yılı olduğu kabul edilirse köprü yaklaşık olarak 800 yıl kullanılmıştır. Tabii bu süreçte değişik zamanlarda köprünün bakım ve onarım yapılmıştır. Köprüde yer yer tamir izleri olup bazı yazılı taşlar tamirler arasında farklı yerlere konulmuştur. Kurt İsmail paşanın döneminde Silvan tarafında olan kısmı tamir ettirmiştir. Vali Faiz beyefendi tarafından ciddi bir şekilde onarımı yaptırılmıştır (Konyar, 1936).

Gabriel'e göre; 1930 yılında Türkiye Köprü ve Şose Hizmetleri görevlileri tarafından aslına uygun bir şekilde restore edilmiş ve köprü sağlam hasar görmemiş durumda olduğunu söylemiştir (Gabriel, 2014).

1952 yılına kadar özgün görüntüsünü koruyan köprünün daha sonraki yıllarda önemli bir kısmı çimento esaslı harç ile sıvanarak taşların yüzeyi kapatılmış ve sıva yüzeyinde yalancı derzler açılmıştır. Suya iskele kurulamadığından dolayı ana kemer ve çevresi, yazıt, diğer küçük kemerler ile figürler sıvasız bırakılmıştır. Üst döşemenin üzerine beton tabaka atılmıştır (Halifeoğlu ve ark., 2017). Doğal afetler ve diğer çevresel etkiler karşısında yüzyıllarca ayakta kalan bu gibi taş kemer köprülerde yapılacak restore çalışmalarında köprülerin özgün yapım sistemi ve malzeme özellikleri korunarak en az müdahale ile yapılması tavsiye edilmektedir (Partal ve ark., 2015).

Oğuz (2001) 1957 yılında onarım sonrası Şekil Ek 2.15'te görüldüğü gibi çok kötü bir onarımın o günkü şartlarda yapılmıştır. 1957 yıllarında bu şekilde kötü onarım işlerinin yapılması tarihi eserleri kapsamlı restore edecek kadar imkân ve olanaklarının kısıtlı olmasından kaynaklanmış olduğu söylenebilir.

Köprü, sürekli su basıncına maruz kalması, malzemenin hassasiyeti, yakın dönemde yapılmış aykırı müdahaleler (sıvalar) doku kayıpları, derzlerin boşalması gibi nedenler, yapının güçlendirme zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır (Halifeoğlu ve ark., 2017). Önceki yıllarda köprüde yapılan onarım çalışmalarında ana kemere müdahale edilememiş bundan dolayı mühendislik (yapısal) hesaplamasına dayalı oluşturulan çelik iş iskelesi sayesinde ana kemerin her alanında çalışma imkânı oluşturmuştur (Halifeoğlu ve ark., 2017).

Köprüde en kapsamlı onarım çalışması ise 2009-2014 yılları arasında Karayolları Genel Müdürlüğü ve Diyarbakır Karayolları 9. Bölge Müdürlüğü'nün ortak çalışması sonucunda yapılmıştır. Köprüde güçlendirme çalışmalarının yanında yakın zamanda özgün taş yüzeyini kapatan ve yüzey tahribatına neden olan mozaik ve sıva kaplamaları ile özgün mimariye aykırı tüm müdahaleler, zamanla oluşan bitkilenme ve faunal kalıntılar temizlenmiştir. Odacıkların tuğla tonoz örtüleri ve kısmen malzeme kaybına uğramış kemer tempan yüzeyi basamak korkuluk harpuşta ve selyaranlarda tamamlamalar yapılmıştır. Cephe yüzeylerinde sıva ve derz temizliğinden sonra yapılan analiz çalışmaları doğrultusunda özgün malzemeye uyumlu hazırlanan harçla derz çalışmaları yapılmıştır (Halifeoğlu ve ark., 2017).

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Yığma yapı olarak yapılan tarihi köprülerin çökme mekanizmalarını tahmin etmek için literatürde araştırmacılar doğrusal elastik yöntemlerle analiz yerine doğrusal olmayan elastik analiz yöntemlerle analiz yapılmasını önermektedirler, (Frunzio ve ark. (2001), Lourenço (2002), Giordano ve ark. (2002), De Luca ve ark. (2004), Toker ve Ünay (2004), Milani ve Lourenço (2012), Altunışık ve ark. (2015), Zampieri ve ark. (2015)). Bilindiği gibi taş köprüler iki farklı malzemeden yani kompozit (taş ve harç) malzemeden yapılmıştır. Doğrusal elastik analiz yerine Heyman (1982) tarafından geliştirilen ve Plastik Teori'ye dayalı olan limit analiz; Rots (1991) ve Lourenço (1995) tarafından geliştirilen doğrusal olmayan sonlu elemanlar makro analiz yöntemi ile köprünün analizleri yapılacaktır.

Limit analizi LimitState (ring 3.1) versiyonu programı ile analizi yapılacaktır. Yapısal analiz programı DIANA FEA BV 2019 (10.3 sürüm) yazılımı ile doğrusal olmayan sonlu elemanlar makro analizi yapılacaktır.

#### 3.1. Yapısal Analizin Tarihsel Sürecinde Kemer Teorisi

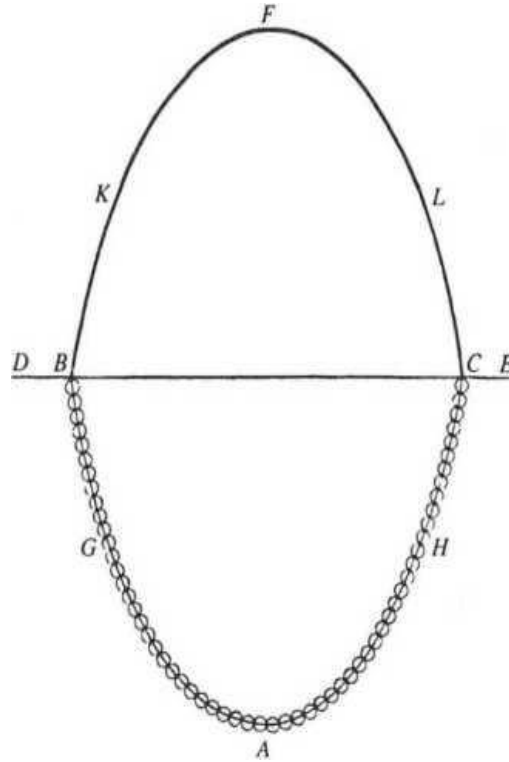
Yapısal analiz gerilme kavramını ilk olarak ortaya atan Galileo ile başladığı varsayılır. Galileo'dan önce günümüze ulaşan Villard ve Vitruvius'un yazılı kaynaklarında kemer teorisi üzerine hesaplamalara yönelik herhangi bilgi bulunmamaktadır (Heyman, 2006). Öte yandan kemer teorisini ilk olarak ortaya atan Robert Hook'tur. Bu çalışmada Hook'tan başlayarak limit analiz yöntemini ortaya atan Pippard'a kadar olan zamana atıf yapılacaktır. Ayrıca yapısal analiz konusunda yapılan deneysel çalışmalara da yer verilecektir (Heyman, 2006).

##### 3.1.1. Teorik Çalışmalar

Kemerler üzerine önemli teorik çalışmalar yaparak kemer sisteminin gelişmesine katkıda bulunan başlıca araştırmacıların; Robert Hooke (1675), Blondel (1683), David Gregory (1697), Gautier (1717), La Hire (1695), Couplet (1729) bulguları Heyman (1982, 1995, 1998, 2006) tarafından detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu bölümde bu çalışmaların kısa bir özeti verilecektir.

Hooke; 1675 yılında zincir eğrisini (katener) matematiksel olarak inceleyerek çözümü bir anagram şeklinde vermiştir: "Esnek bir zincir asılı durduğu gibi ve ters çevrildiğinde sert kemer gibi duracaktır". Gerilmiş bir asma ipinin statüğünün matematiği, sıkıştırılmış kemerinkiyle aynıdır. Hooke yapı için her türlü kemerin gerçek

matematiksel ve mekanik biçimi ile ilgilenmişti. Böylece olası bir ters çevrilmiş zincir Şekil 3.1’te yarım daire şeklindeki kemerin sınırları içinde yer alan kemer kendi ağırlığını taşıyabileceği sonsuz sayıda yoldan birini temsil eder (Heyman, 2006).



Şekil 3.1. Robert Hooke’un asılı zinciri (Heyman, 2006)

Blondel 1683 yılında sığ kemerlerin daha fazla itme kuvveti sağladığını, daha kalın dayanaklara ihtiyaç duyacaklarını ve yuvarlak bir kemerin sivri bir kemere göre dayanakları daha az itebildiğini belirtmiştir. Şekil Ek 3.1’de farklı kemer açıklıkları ve kemer modelleri için Blondel kuralı görülmektedir, (Heyman, 1995). Günümüzde yaşayan, bir yığma yapı ustabaşı olan ve yığma yapıların mekaniği konusunda hiçbir kuramsal bilgiye sahip olmayan Davut ÇETİN’de sivri kemerin daha fazla yük taşıyabileceğini ifade etmektedir.

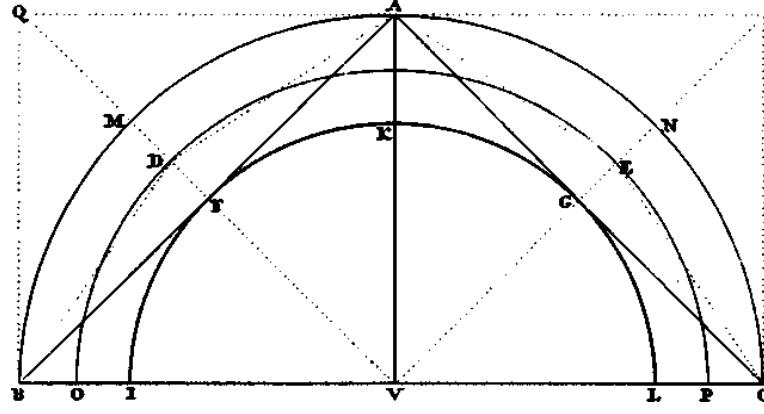
David Gregory’ya (1967) göre; bir kemerin dayanma kuvvetinin yatay bileşeni eşdeğer asılı zincirin uyguladığı yatay çekme ile aynı değere sahiptir. Ters asılı zincire bir kemerin itme hattı denir ve duvar içinde basınç kuvvetlerinin mesnetlere iletilme şeklini temsil eder. Bu itme çizgisi belirli bir kemer için yerleştirildiğinde, basit statik denklemler, kemerin itme kuvvetinin büyüklüğünün hesaplamasını sağlar ve tasarım tamamlanabilir (Heyman, 2006).

Köprü ayakları üzerine bilinen ilk eser Gautier tarafından 1717 yılında yayımlanmıştır. Gautier'a göre; köprü kemerleri için çözülmesi gereken beş zorluk olup bunlar; dayanak ayaklarının kalınlığı, kemer açıklığının bir oranı olarak iç payandaların boyutları, kemer halkasının kalınlığı, kemerlerin şekli ve toprağı tutmak için istinat duvarlarının boyutları şeklinde özetlemiştir (Heyman, 2006).

La Hire 1695 kemer taşlarını bir araya getirilmiş yarı dairesel bir kemerin statüğünü düşünmüştür ve taşlar arasındaki bağlantıların sürtünmesiz olduğunu varsaymıştır. Şekil Ek 3.3'te görüldüğü gibi dengenin korunması için yarı dairesel geometrik kemerin ağırlığını bulma problemini ortaya koyarak düz kemerlere sahip bir kemer için, itme çizgisi eklemlere dik olmalıdır sonucunu elde etmiştir. Daha sonra geriye doğru çalışarak kuvvet poligonu oluşturulabileceğini ve son olarak kemer taşlarının ağırlıkları bulunabileceğini göstermiştir. La Hire 1712 de ise pürüzsüz kemerler varsayımını terk ederek sürtünmenin kaymanın meydana gelmesine olanak vermeyecek bir büyüklükte ele almıştır. Bunun sonucunda kemer içindeki itme hattının yönü artık eklemlere dik olarak sabitlenmemiş ve statik analiz için basit bir başlangıç noktası oluşmamıştır. Analizin amacı, dayanakların tasarlanabilmesi için kemer baskısının değerini belirlemek olup kemerin yay ile kilit taşı arasında bir yerde kırılacağını belirtmiştir (Heyman, 1998).

Couplet 1729 ve 1730'da kemer baskısı üzerine iki önemli çalışmasını yayımladı. Bu makalelerin ilki, La Hire'nin sürtünmesiz durum analizini etkili bir şekilde tekrarlamıştır. İkinci çalışmasında duvarın davranışı hakkında üç temel varsayımda bulunmuş ve bu varsayımlar; duvarın çekme dayanımı yoktur, sonsuz basınç dayanımı vardır ve kayma kırılması meydana gelemez demektir (Heyman, 1998).

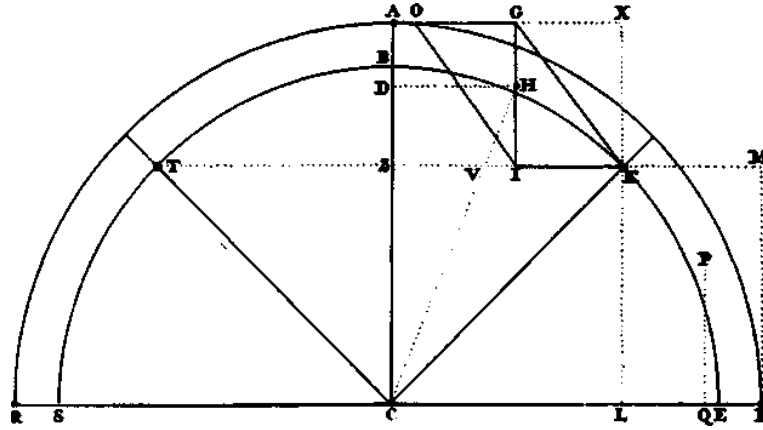
Couplet'ın ilk teoremine göre; bir kemerin dış eğrisi ile iç eğrisinin ortasında geçen kiriş iç eğriyi kesmeyip kemerin kalınlığı içinde kalırsa kemerin çökmeyeceğini belirtmiştir. Şekil 3.2'de kemere uygulanan yükün büyüklüğü ne olursa olsun, destek kuvvetleri, AFB ve AGC düz itme çizgilerini izleyerek doğrudan B ve C dayanaklarından oluşturulabilir. Kemerin çökmesi için BAC açısının açılması gerekmekte ve bu sadece dayanakların yayılmasının bir sonucu olarak gerçekleşebilir (Heyman, 1998).



Şekil 3.2. Tepedeki dikey bir yük altında çökemeyen bir kemer (Heyman, 1998)

Couplet tarafından ele alınan bir sonraki problem, yalnızca kendi ağırlığını taşıyan yarım daire şeklindeki bir kemerin en az kalınlığını bulmaktır. Kemer; R, T, A, K ve F menteşeleriyle birbirine bağlanan dört parçaya ayrılarak çökecektir. Şekil 3.3'te kemer altında T ve K menteşeleri 45°'de yerleştirilmiştir. Bu durumda kemerin dengesi dikkate alınır ve kemerin kalınlığı  $t$  olarak seçilir, yarıçapı ise  $r$  ile ilişkilendirilen tek bir ifade bulmuştur (Heyman, 1998).

$$t/r = 0.101. \quad (3.1)$$



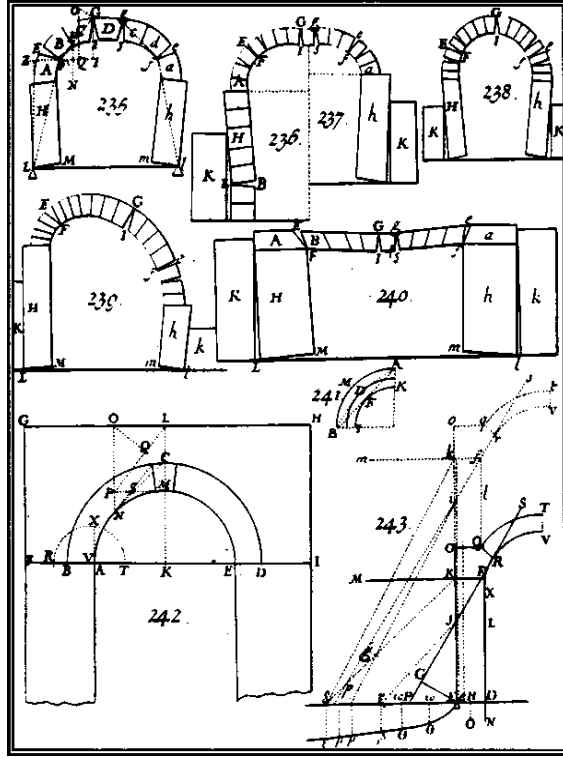
Şekil 3.3. Menteşelerin oluşumuyla kendi ağırlığı altında çöken kemer, (Heyman, 1998).

1740'a gelindiğinde kemerin mekaniği artık iyice anlaşılmıştı ve yapısal sorun çözülmekle kalmamış ve aynı zamanda teori daha genel olarak duvarcılık analizine uygulanabilir hale gelmiştir (Heyman, 1998).

### 3.1.2. Deneysel Çalışmalar

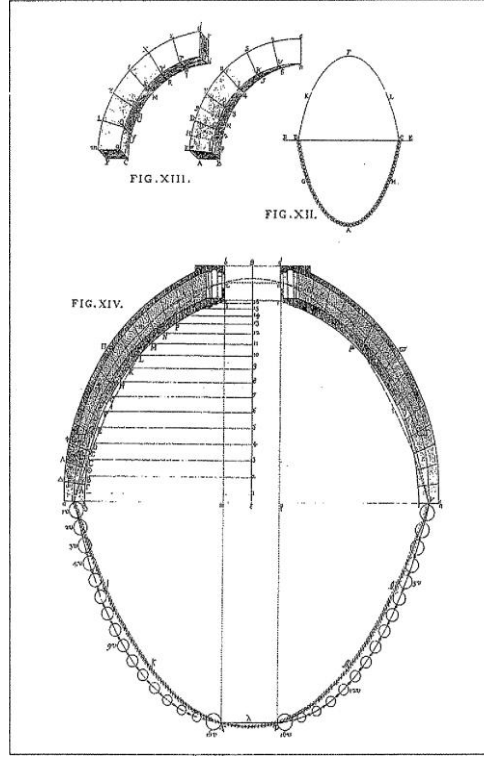
Kemer teorileri üzerine yapılan başlıca deneysel çalışmalar Danyzy (1737), Giovanni Poleni (1748), Couloumb (1773), Barlow (1846), Castigliano (1879) aşağıda özetlenmiştir.

Şekil 3.4'te 1737'de Danyzy tarafından model kemerler üzerinde yapılan deneysel çalışmanın çizimleri görülmektedir.



Şekil 3.4. Danyzy'nin model kemerler üzerindeki deneyleri (Heyman, 1998)

Poleni 1748 yılında Roma'daki Aziz Petrus'un kubbesindeki çatlakların deneysel yöntemle güvenli olup olmadığını araştırmıştır. Kubbenin enine kesitinin bir çiziminden, Şekil 3.5'te gösterilen (FIG. XIII.) dilimlenmiş kemerin ağırlığını hesaplamıştır. Şekil 3.5'te gösterilen (FIG. XIV) kemerin merkez dışını ve iki düzgün yüklü zincire karşılık gelen ters çevrilmiş bir kateneri temsil eder. Poleni'nin temel amacı, tamamen kemer malzemesi içinde kalan kemer için bir bindirme çizgisinin bulabilmektir (Heyman, 1995).



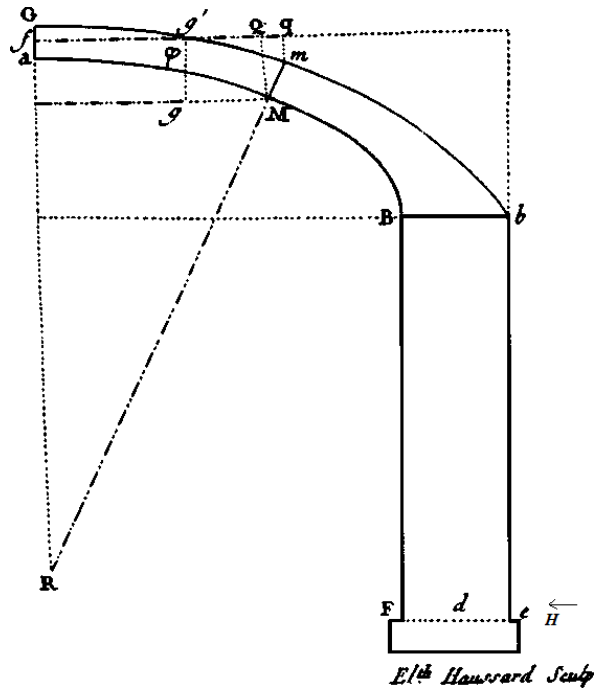
Şekil 3.5. Poleni'nin deneysel çalışması (Heyman, 1995)

Poleni, gözlemlenen çatlamanın kritik olmadığı sonucuna varmış ve daha fazla çevreleme bağlarının sağlanması gerektiğine dair daha önceki bir tavsiyesini önermiştir. Asılı zincirin destek noktalarındaki eğimi, dilimli kemer ve dolayısıyla bir şekilde kontrol altına alınması gereken tüm kubbe tarafından sağlanan yatay bir itme olduğunu bir kez daha göstermiştir (Heyman, 2006).

Coulomb 1773 yılında taşın sıkıştırılamayan ve uzatılamayan sert liflerden oluştuğunu varsayımını ortaya koymuştur. Malzemesi belirli bir çekme kuvvetine ve sonsuz bir sıkıştırma kuvvetine sahip bir cismin kırılmasını varsayarak, eksenel olarak basınçla yüklenen bir duvar ayağının malzemenin sürtünme ve kohezyon özellikleri tarafından yönetilen bir açıda eksene eğimli bir düzlem boyunca kesmede kırılacağını gösterir. Taş numuneler üzerinde hem gerilimde hem de saf kesmede testler yapmıştır. Taşın gücünü saf gerilimde ve saf kesmede kendi makul memnuniyetine göre ölçerek ve bu iki kuvveti, iki fiziksel parametreyi, kohezyon ve sürtünmeyi içeren kendi adını verdiği denklem ile ilişkilendirmiştir (Heyman, 1998).

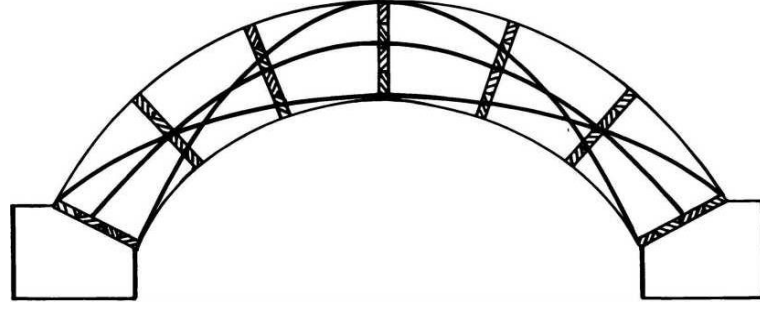
Coulomb'un yığma kolonlar üzerinde yaptığı testler, kopma mukavemetinin uzunluktan bağımsız olduğunu göstermiştir. Bükülmeyen kısa taş sütunların kırılma yükleri sadece kesit alanıyla orantılı olduğu deneysel çalışmalar sonucunda elde etmiştir (Heyman, 1998).

Coulomb ilk olarak kemerin iç tarafında menteşelenmenin Şekil 3.6'da verilen kemerin dengesi şeklinde gösterilen M noktasında meydana geldiğini dikkate alarak ve  $H_1$  yatay itme kuvveti değeri için genel bir ifade yazmıştır.  $M$ 'nin konumunun  $H_1$ 'nin değeri maksimize edilecek şekilde seçilmesi gerektiğini gösterir ve menteşe keyfi olarak örneğin,  $45^\circ$ 'de yerleştirilemez.  $H_1$ 'nin bu maksimum değeri, bir kez bulunduğunda, kemerin sabit kalacağı minimum değerdir. Kemerin tepesinde  $m$  noktası etrafında menteşe ile kırılma meydana geliyorsa o zaman  $m$ ,  $H_1$  değeri en aza indirilecek şekilde seçilmelidir ve bu kemerin kararlı olacağı maksimum değerdir (Heyman, 1998).



Şekil 3.6. Coulomb tarafından ele alınan kemerin dengesi (Heyman, 1998)

Barlow 1846'da Şekil 3.7'de görülen bir model kemer üzerinde deneysel bir çalışma yapmıştır. Kemerde altı eklem olup her bir eklemdaki harç, çıkarılabilen dört küçük tahta parçası şeklinde modellemiştir. Güçlerin kalan parçadan iletilmesi gerektiğinden dört parçadan üçü çıkarıldı, itme kuvveti görünür hale gelmiştir. İtme çizgisinin üç farklı konumu çizmiştir. En dik eğri kemerin tepesine dokunan direnç çizgisi ve en düz eğri sıkıştırma çizgisi olarak adlandırmıştır (Heyman, 1998).

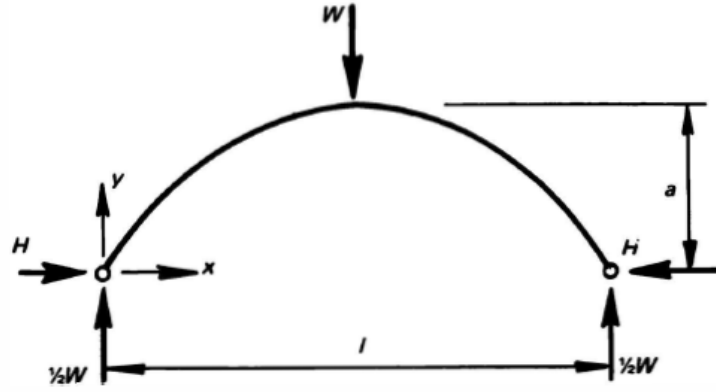


Şekil 3.7. Barlow tarafından çizilen kemer itme hattı çizgileri (Heyman, 1998)

Castigliano 1879 elastik yapılarda çözümler bulmak için enerji ilkelerinin formülasyonunu vermiştir. Çok basit bir şekilde eğer bir yapı hiperstatikse ve belirli uygulanan yükü taşımak için sonsuz sayıda yolu varsa o zaman yapının gerçek elastik durumu, depolanan gerinim enerjisinin minimum olacağı şekilde olacaktır. Castigliano'nun bu teoremi temelinde yapının bir anlamda canlı olduğunu ve içinde bulunduğu durumu seçtiğini hayal etmek kolaydır. Elastik enerji teoremlerini diğer pratik örneklerin yanı sıra yığma köprüye de uygulamıştır. Taş ve harcın elastik özelliklerinden yararlanan ve itme çizgisinin enine kesitin 'orta-üçte'lik kısmının dışında kalması durumunda çatlama izin veren çözümler elde etmiştir (Heyman, 2006).

Kazinczy 1914 çelik kiriş üzerine deneyler yapmıştır. Yükleme arttıkça, kasadaki çatlaklar ilk olarak kirişlerin uçlarında ortaya çıkmış ve bu noktalarda akmayı göstermiştir. Kirişler daha fazla yük taşıyabilir ve büyük ölçüde daha fazla ağırlık eklenene kadar bükülmeler çok büyük hale gelmemiştir. Boşaltma üzerine, her kirişin iki ucunda ve merkezinde kalıcı bükülme deformasyonu olduğunu bulmuştur. Bu bükülmelere 'menteşeler' adını vermiş ve sabit uçlu bir kirişin üç menteşe oluşana kadar çökemeyeceğini belirtmiştir (Heyman, 1998).

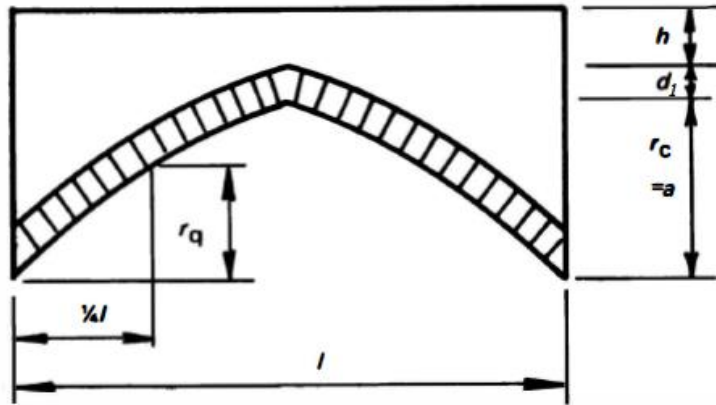
Pippard 1948 bir kemerin kemer taşlarının dayanaklarının çok hafif yayılarak dayanaklarda pimler veya menteşeler üreteceği gözlemlemiştir. Şekil 3.8'de görülen iki menteşeli bir kemeri analiz etmiştir (Heyman, 1998).



Şekil 3.8. İki pimli (menteşeli) kemer sistemi (Heyman, 1998)

Pippard, kemerin merkez hattına denk gelen varsayımsal bir kaburgayı yani iki pimli bir parabolü analiz etmiştir. Analizini orta açıklıkta tek bir nokta yüküyle sınırlandırmıştır.

Şekil 3.9’da görülen kemerli bir köprü varsayımı yaparak analiz eder ve teoride bir kemer kaburgasının, tepeden ziyade yaklaşık çeyrek açıklıktaki bir nokta yükün etkisi altında en zayıf olduğunun farkında olmasına rağmen yükü kemerin ortasında almıştır. Yükün yol yüzeyinden dolgu yoluyla uygun kemere dağılımı temelinde merkezi yük için sonucun kullanılmasını savunmuştur (Heyman, 1998).



Şekil 3.9. Pippard’ın analiz yapılacak olan köprü varsayımı (Heyman, 1998)

### 3.1.3. Sonuç

Yirminci yüzyılın ilk yarısındaki teorik çalışma esas olarak yaklaşık yöntemleri iyileştirmeye ve basitleştirmeye adanmıştır. Elektronik bilgisayarın ortaya çıkmasıyla bu teorik çalışmalar sona ermiş ve elastik yapısal analizin matematiği kompakt

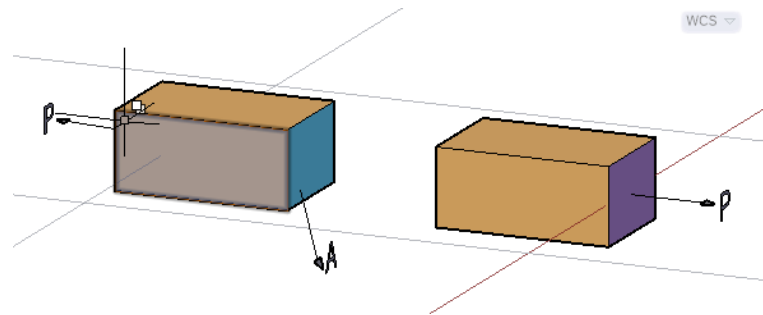
terimlerle formüle edilmiştir. On dokuzuncu yüzyıl denklemleri matrisler cinsinden yazılmıştır. Bu geniş sayısal bilgi dizileri bilgisayar tarafından işlenebilir ve on dokuzuncu yüzyıl denklemleri tam olarak veya en azından mühendislerin istediği kadar yakın bir yaklaşımla çözülebilir. Bu sebeple, analizi yapacak olan tasarımcıya yalnızca yapıyı bilgisayara genel geometrisini ve temellere bağlanma noktalarını elemanların boyutlarını, malzemenin özelliklerini vb. tanımlaması ve taşınacak yükleri belirlemesi gerekiyor (Heyman, 2006).

### 3.2 Yapıların Teorisi (Plastik Teori)

Yapıların tasarımı matematiksel olarak Rönesans ile birlikte ortaya çıkmış ve ortaçağ tasarımcısının bilimleri gerilimler ve gerinimlerden ziyade şekiller ve orantılarda aramıştır, (Heyman, 2006). Yapılar teorisi hakkında oluşturulacak olan genel ilkeler, herhangi bir kâgir yapı biçimi için de geçerlidir. Yığma yapılarda duvarın davranışını kavrayabilmek için kemer teorisi geliştirilecektir. Duvarcılıkta uygulanan yapı mühendisliği problemlerinin en kritik halleriyle karşılaşıldığı yer Gotik mimari olmuştur. İncelenmesi gereken üç ana yapısal kriter; mukavemet, sertlik ve stablitedir. Yapı, kendi ağırlığı da dâhil olmak üzere, yüklenen her türlü yükü taşıyabilecek kadar güçlü olmalıdır, gereğinden fazla sapmamalıdır ve ister yerel ister genel olsun büyük istikrarsız yer değiştirmeler geliştirmemelidir (Heyman, 1995).

Gerilmenin mühendislik tanımı basit ve kesin olmakla beraber kavramsal anlamı ve yapısal analize uygulamada bazı zorluklar vardır. Malzemede gerilme fikrini ilk olarak Galileo tarafından ortaya atılmış olup, gerilme ( $\sigma$ ); malzemenin birim alanı ( $A$ ) malzeme başına bir yük ( $P$ ) olarak tanımlanmaktadır (Gordon, 2003).

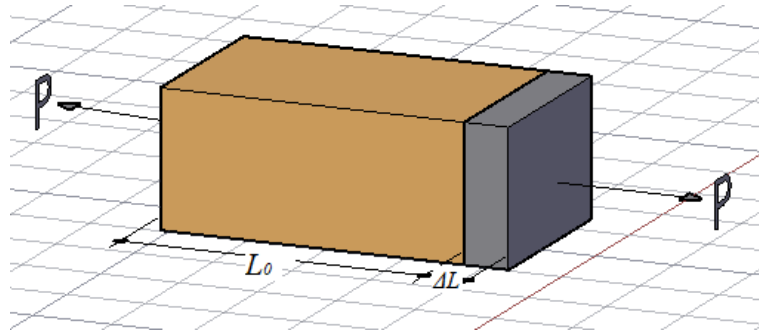
$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.2)$$



Şekil 3.10. Katı malzemede gerilme

Aslında, bir malzemenin bozulmasına neden olan aşırı gerilmedir (Şekil 3.10). Gerinim ( $\varepsilon$ ), numunenin birim uzunluğu başına düşen uzama olarak tanımlanır (Şekil 3.11) ve boyutsuz bir kavramdır, (Gordon, 2003). Buna göre numunenin yük altında uzama miktarının ( $\Delta L$ ) orijinal boyuna ( $L_0$ ) bölünmesiyle elde edilir;

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.3)$$



Şekil 3.11. Katı malzemede gerinim

Malzemenin sertliği diye tanımlanan Young Modülü (Elastisite Modülü) ise gerilmenin gerinime oranı olarak tanımlanır;

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.4)$$

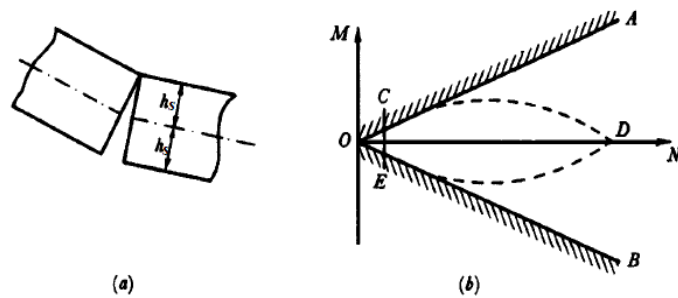
Elastikiyet bilimi, malzeme ve yapılarıdaki kuvvetler ve yer değiştirmeler arasındaki etkileşimlerle ilgilidir. Her tür katı, kendisine bir ağırlık veya başka bir mekanik kuvvet uygulandığında bir dereceye kadar şeklini değiştirir de, pratikte meydana gelen eğilmeler çok çeşitlidir. Bu tür hareketler genellikle çıplak gözle görülemeyecek kadar küçük olup ölçmek için özel aletlere ihtiyacımız olsa bile, her zaman var olurlar ve tamamen gerçektirler. Bir cisme yük uygulanıp yük kaldırıldığında orijinal şeklini geri alıyorsa bu malzemelere elastik malzeme denir. Bir cisme yük uygulanıp yük kaldırıldığında orijinal şeklini geri almıyorsa bu malzemelere plastik malzeme denir (Gordon, 2003).

Taş ahşaptan çok daha serttir ve taş en azından ahşap ile karşılaştırıldığında kırılmandır ve kırılma noktasına kadar yüklenirken lineer elastik bir şekilde davranır. Yapılar teorisi hafifçe deforme olabilen cisimlerin mekaniği ile ilgilidir. Bir yapının pratik kullanımını olması durumunda, yer değiştirmelerinin çok küçük olması gerekir. Bir

bütün olarak yapı ve bileşenleri tamamen katı değildir ve bu nedenle çok küçük deformasyonlar büyük iç kuvvetler doğurur. İç kuvvetler, değerlerini dış yüklerinkilerle birleştiren denge denklemlerini sağlamalıdır. Ancak hiperstatik bir yapı için, denge denklemlerinin sonsuz sayıda çözümü vardır. Geometrik sınır koşulları üç ana denklemi sağlamalıdır. İlki denge denklemleri olup bu denge denklemleri koşulu kesinlikle sağlanmalıdır. İkinci denklem setinde kullanılan Young modülü ve akma gerilimi gibi malzeme özellikleridir. Malzeme özellikleri deformasyonları hesaplamak için gereklidir. Böylece deformasyonun uyumluluğunu geometrik olarak ifade eden üçüncü denklem seti yazılabilir. Ana yapısal problem, mukavemetin değerlendirilebilmesi için iç kuvvetlerin hesaplanması kalır. Böylece denge denklemleri ve malzemenin akma gerilimi bilgisi kesinlikle korunmalıdır. Ancak elastik özellikler, yalnızca uyumluluk denklemlerini çözmek amacıyla geleneksel bir analize dâhil edilir ve sünek bir yapının mukavemeti, elemanların uyumsuzluğu, mesnetlerin oturması vb. gibi hatalardan bağımsızdır. Sınır koşulları bilinmeyen olarak kabul edilmelidir ve bu durumda asal yapısal hesaplamalara girmek için elastik özelliklere gerek yoktur. Geriye denge denklemleri ve verim koşulu kalır. Bunlar basit plastik teorisinin ikiz temelleridir ve verimi karşılayan bir denge çözümü güvenlidir (Heyman, 1998).

Kooharian (1953) duvarcılık analizinin plastisite çerçevesinde yorumlanabileceğini göstermiştir.

Sonlu bir ezilme mukavemetine sahip taşın akma yüzeyi  $AOB$ , iki parabolik yay tarafından oluşturulan  $OCDEO$  eğrinin sınırındadır. Ancak, bu gerçek akma yüzeyinin sadece küçük bir kısmı, pratik yığma yapılar için geçerlidir. On dokuzuncu yüzyılda büyük köprülerin tasarımında kullanılan gerilmenin tipik bir değeri, ezilme mukavemetinin yüzde 10'udur (Yvon Villarceau). Nominal gerilmelerin bundan daha az olması muhtemeldir. Şekil 3.12'de görülen duvarcılık için akma yüzeyinde ancak yüzde 10'da akma yüzeyinin kısmı hafif eğrisel üçgen  $OCE$ 'yi oluşturur.

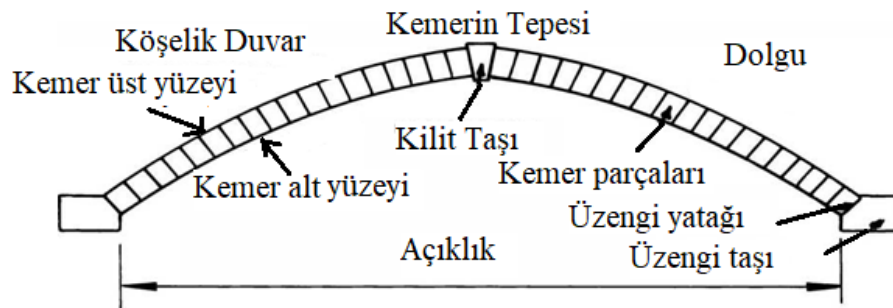


Şekil 3.12. Duvarcılık için akma yüzeyi (Heyman, 1998)

Düz veya hafif kavisli sınırlar kullanılsın ya da kullanılsın güvenli plastiklik teoremi, eğer tüm gerilim bileşkeleri akma yüzeyi *OCE* üçgeni içindeyse o zaman yapının gerçekten güvenli olduğunu ve çökemeyeceğini belirtir. Bu teoremin gücü, böyle bir güvenli durum bulmanın yeterli olması gerçeğinde yatmaktadır. Kemer konstrüksiyonu açısından, uygulanan yükleri dengeleyen sonsuz sayıdaki itme çizgilerinden herhangi birinin kemer profili içinde olduğu gösterilebilirse, kemerin bu yükler altında çökemeyeceğinin kanıtıdır. Kemerlerin plastik teoriyle analizi güvenliklerinin aslında dayanaklardaki kesin koşullara veya kemerlerin orijinal olarak bu dayanaklara tam olarak uyacak şekilde yapıp yapılmadığına bağlı olmadığını göstermektedir. Tasarımcının bu geometrik kusurlar hakkında bilgiye ihtiyacı yoktur (Heyman, 1982).

Heyman (1982) geometriye dayanan bir taş kemer teorisi oluşturmaya çalışmıştır. Harçlı veya harçsız herhangi bir makul taştan yapılmış bir kemer, uygulanan yükleri rahatça kabul edebilir. Bundan dolayı kemerlerde malzemenin ezilmesi problemi yoktur. Verilen yükleri taşımak için en iyi kemer şekli nedir? Kemer halkası ne kadar kalın olmalıdır? Belirli bir ortaçağ köprüsü hangi yükleri taşıyabilir? Gibi sorulara cevap bulmak için plastik teoriye dayalı ve Pippard (1948) tarafından ortaya atılan limit analiz yöntemini geliştirmiştir.

İlk olarak kemerin elemanlarını tanımamız gerekir. Şekil 3.13'te kemerin elemanları verilmiş olup bunlar; kemer taşları (segment), kilit taşı, dolgu, kemerin üst kısmında kalan duvar (spandrel), kemerin alt yüzeyi (intrados), kemerin üst yüzeyi (estrados) ve kemer açıklığı gibi kavramlardır (Heyman, 1982).

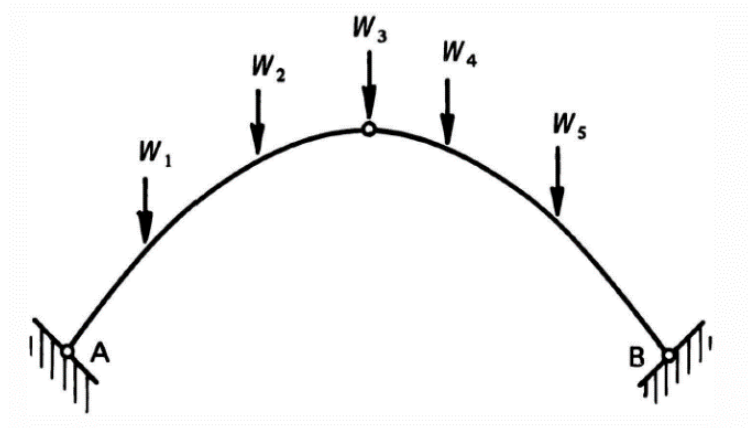


Şekil 3.13. Bir yığma köprünün parçaları (Heyman, 1982)

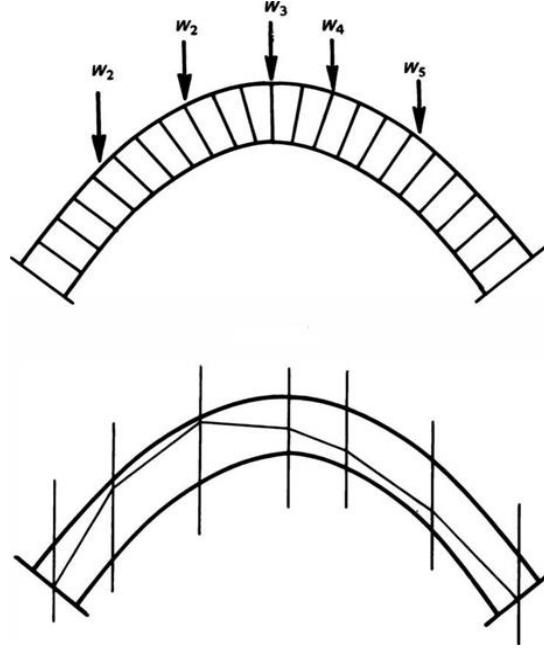
Küçük bir köprüde dolgu yol yüzeyini taşımak için istenilen yüksekliğe inşa edilmiş moloz veya çakıldan oluşabilir. Dolgu, köprünün iki yüzündeki kemer halkaları üzerine inşa edilen köşelik duvarlarla korunmaktadır. Dolgu yapısal olarak hareket edemez ancak pratikte yol yüzeyine uygulanan bir yük, kemerin üst yüzeyine uygulanmadan önce dolgu boyunca yayılabilir. Bir kemerin belirli yükler için bir itme hattı içermesi için minimum bir kalınlığa sahip olması gerektiği fikri pratik inşaat için bir güvenlik faktörünün oluşturulmasının anahtarıdır (Heyman, 1982).

Şekil 3.14'teki kemerin merkez hattının yüklendiğinde tam olarak orijinal şeklini koruması gerekli değildir ve dayanakların A ve B, kemer ayağı itme kuvvetinin altında hafifçe eğilebilir. Ancak bu deformasyonlar gerçekten fark edilecek kadar büyük olmamalıdır, gevşek bir şekilde konulduğunda, denge denklemlerinin yazılmasında geometri değişikliğinin dikkate alınmasına gerek kalmaması için yüklü kemerin bozuk şekli orijinal forma yeterince benzemelidir (Heyman, 1982).

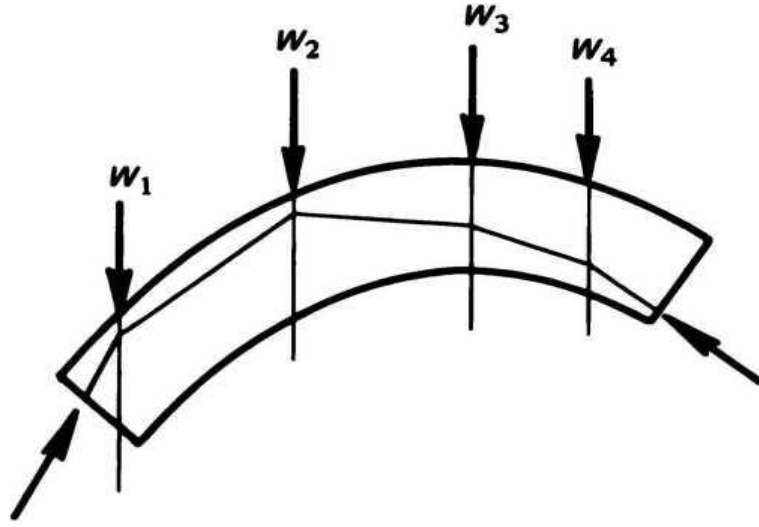
Şekil 3.15'te düşey yükler altında üç menteşeli bir kemerde oluşan itme hattı çizgisi görülmektedir. Şekil 3.16'da üç menteşeli kemerin kesilen bir parçasında oluşan itme hattı çizgisinin yakından görünüşü görülmektedir.



Şekil 3.14. Üç pimli kemere uygulanan düşey yükler (Heyman, 1982)

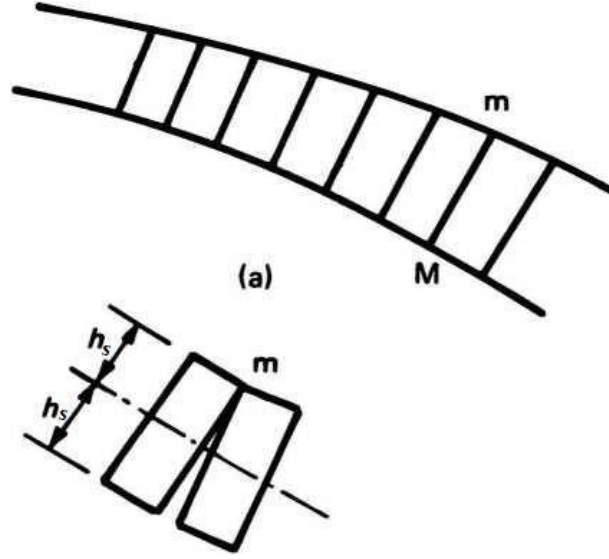


Şekil 3.15. Düşey yükler altında üç pimli kemerde oluşan itme hattı çizgisi (Heyman, 1982)



Şekil 3.16. Üç pimli kemerin kesilen parçasında oluşan itme hattı çizgisi (Heyman, 1982)

Şekil 3.17'de bir kemerin kemer taşları ve yükleme altında oluşan itme hattı çizgisi yakından görünmektedir.

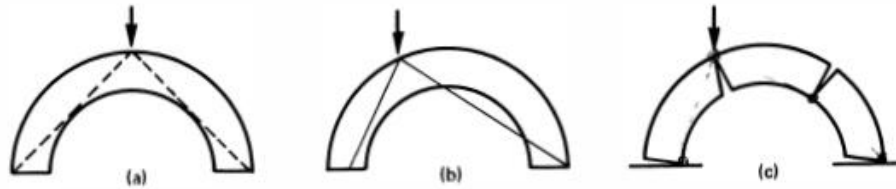


Şekil 3.17. Kemer taşları yakından (Heyman, 1982)

Böylece genel noktanın ( $m, M$ ), Şekil 3.12'deki açık üçgen AOB içinde yer almakla sınırlıdır. Görüldüğü gibi, kemerin itme hattının duvar içinde olması gerektiği anlamına gelir. Kuvvet poligonunun 0 kutbuna karşılık gelen itme hattının duvar içinde uzanacağı bir konumda yerleştirilmesi gerektiği anlamına gelir.

### Güvenli Teorem (Limit Analiz)

Heyman (1995) güvenli teorem kemerin tepede herhangi bir yoğunlukta bir nokta yükü taşıyabileceğini ifade eder. Bu teoremin karşılığı bir menteşenin tepede olduğu ve Şekil 3.18 (a)'da gösterilen tipte bir dört çubuklu zincir mekanizmasına yol açacak hiçbir menteşe düzeninin olmamasıdır. Dört çubuklu zincir, bir kemerin çökmesi için temel mekanizmadır. Yapısal teori üç varsayımı hesaba katmakta olup bu varsayımlar;



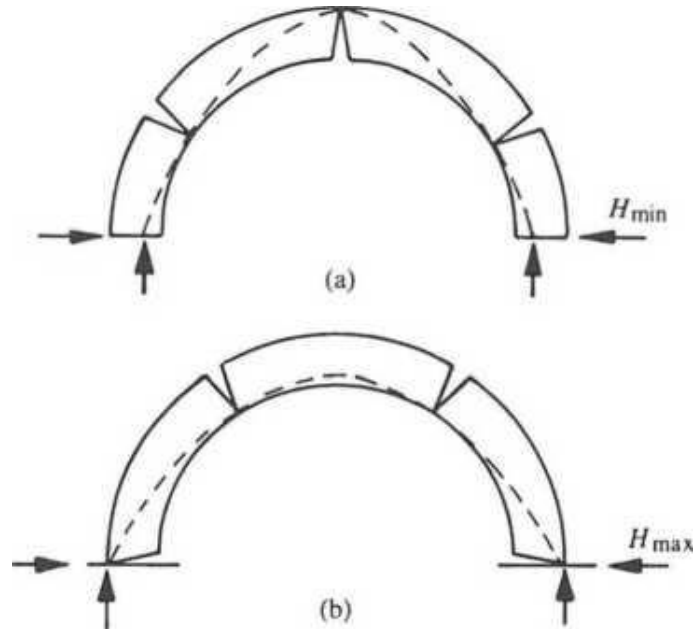
Şekil 3.18. Kemerde dört menteşe oluşma mekanizması (Heyman, 1982)

a) Denge denklemleri kesinlikle sağlanmalı ve kemerdeki iç kuvvetler dış yükleri (öz ağırlık dâhil) dengelemelidir.

b) Malzemenin davranışına ilişkin herhangi bir ifade, üç basitleştirici varsayımla uyumlu olması gerekmektedir. Malzeme sıkıştırmada sonsuz derecede güçlüdür, gerilimi kabul edemez ve kayma meydana gelmez. Bu varsayım, yığma yapılarda gerilmelerin o kadar düşük olduğu ve malzemenin ezilme tehlikesi olmadığı anlamına gelir. Plastik teoremlerin ilkelerine uygun olarak, bu varsayım güvenlidir. Kemer taşları arasındaki sürtünmenin yeterince yüksek olduğu veya taşların birbiri üzerinden kaymamaları için etkili bir şekilde birbirine kenetlendiği varsayılmaktadır. Kayma ve genel kohezyon kaybı tehlikelerinden kaçınmak için gereken tek şey çok küçük bir sıkıştırma ön gerilimidir.

c) Sınır koşulları hakkında herhangi bir açıklama yapılamayacağı kabul edilerek dayanağın hareketleri bilinmiyor olarak kabul edilmektedir.

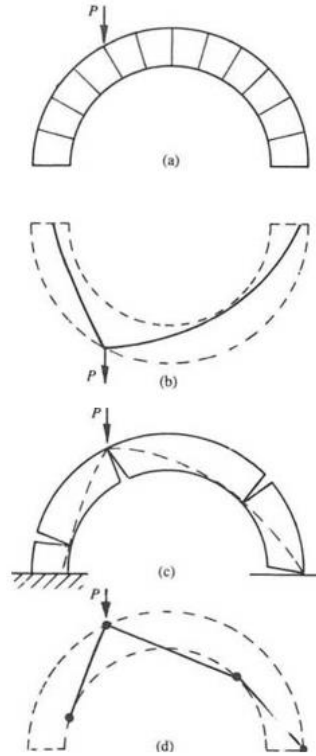
Baskı hattının her konumu, farklı bir dayanak itme değerine karşılık gelir. Eğer kemer yayılırsa, itme minimum bir değere düşer ve eğer kemer, açıklıkta bir azalmaya zorlanırsa; itme maksimuma yükselir. Şekil 3.19 (a)'da görüldüğü gibi dayanak biraz ayrık olmak yerine birbirine biraz daha yakın hareket etse o zaman bir kez daha menteşeler oluşacaktır. Taşta bir miktar ezilme olabilir veya kabarma ve yarıma meydana gelebilir. Şekil 3.19 (b)'de görüldüğü gibi bu tür dökülmeler bazen bir köprünün taç kısmının (kilit taşı) altında görülebilir (Heyman, 1995).



Şekil 3.19. Tam yuvarlak kemerin kendi ağırlığı altında maksimum (a) ve minimum (b) itme kuvvetleri (Heyman, 1995)

İdealize edilmiş malzemede Plastisite teorisinden kaynaklanan temel fikirleri duvarcılık için geçerli terimlere çevirmek mümkündür. İlk olarak, basit kemerin nasıl çökebileceği düşünülebilir. Şekil 3.20 (a)'da yarım daire biçimli kemer, kendi ağırlığı ve ek bir nokta yükü  $P$  ile hareket eder. Böylece, Hooke'un asılı zinciri, Şekil 3.20 (b)'de gösterilen şekilde deforme olacaktır.  $P$  arttıkça, ters çevrilmiş zincir (itme hattı) kemere daha az rahat oturacaktır ve belirli bir  $P$  değerinde, itme hattı sadece kontrol altına alınabilir. Bu sınırlayıcı aşama, Şekil 3.20 (c)'de gösterilmiştir. İtme hattı üst ve alt yüzeyine dört yerden ulaşmaktadır. Bu konumların her birinde bir menteşe oluşacak ve dört menteşe, sabit kemer yapısını bir çökme mekanizmasına dönüştürecek, Şekil 3.20 (d)'de dört çubuklu zincir siyah noktaların olması varsayımı yapılarak sürtünmesiz menteşeleri temsil ediyorsa gösterilen konfigürasyon gerçek bir mekanizmaya karşılık gelmiştir (Heyman, 1995).

Şekil 3.21'de görüldüğü gibi bir kemerin çökmesi için dört mafsal (menteşe) oluşturması gerekmektedir.



Şekil 3.20. Bir nokta yükü altında dairesel bir kemerin çökmesi (Heyman, 1995)



Dolgunun mukavemeti olmadığı ve canlı  $P$  yükünü yay halkasına dağılmadan ilettiği varsayılır. Hem dolgunun hem de kemer halkasının birim ağırlığı  $\gamma$ 'dır.  $\alpha_1$  kemer şeklinin bir ölçüsünü,  $\beta_1$  köprünün derinliğinin (halka artı dolgu) bir ölçüsünü ve  $\tau$  kemer halkasının çeyrek açıklıktaki dikey kalınlığının bir ölçüsünü ifade eder. Bu değerler kemerin yüksekliğine göre normalleştirilirse;

$$\alpha_1 = \frac{h_q}{h_c} \quad (3.5)$$

$$\beta_1 = \frac{h_0}{h_c} \quad (3.6)$$

$$\tau = \frac{t}{h_c} \quad (3.7)$$

denklemleri elde edilir.

Burada;

$h_0$  : dolgu yüksekliği,

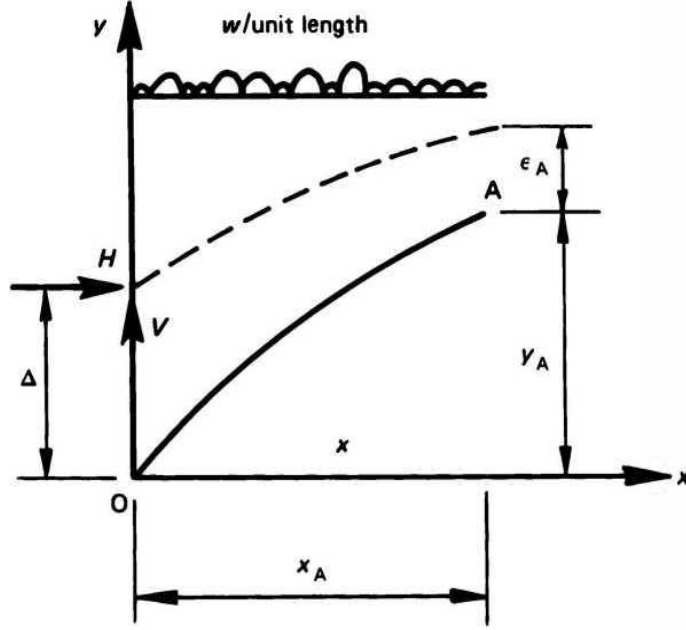
$h_c$  : kemer yüksekliği,

$h_q$  : kemerin dörtte bir açıklığındaki dikey mesafe,

$t$  : kemerin dörtte bir açıklığındaki kalınlığıdır.

Çeyrek açıklığa yerleştirilen yük, kemer halkası derinliğinin en kritik değerini verir. Böylece köprünün çökmesine neden olmak için gerekli hareketli yükün yoğunluğunu sadece  $\alpha_1, \beta_1$  ve  $\tau$  olmak üzere üç parametre cinsindedir (Heyman, 1982).

Şekil 3.23'te görüldüğü gibi eğik çizgi OA, kemer halkasının alt yüzeyi ve kemer halkasının üst yüzeyi de kesik çizgi ile temsil edilir. Orijinin üzerinde dikey bir mesafeden geçen itme çizgisini  $\Delta$  ile temsil edilir. Kemerin herhangi bir A bölümünde, kemer için referans çizgisi OA ile itme çizgisi arasındaki dikey mesafe  $\epsilon_A$ 'dır.



Şekil 3.23. Duvarda Kemer halkasının temsili çizimi (Heyman, 1982)

Kemere etki eden düzgün olmayan dikey yüklemeye, birim yatay uzunluk başına  $w$  yoğunluğuna sahiptir; o zaman statik denge denklemi,

$$(y_A + \epsilon_A - \Delta)H + \int_0^{x_A} (X_A - z)w dz = VX_A \quad (3.9)$$

yani

$$\epsilon_A = \Delta - y_A + \frac{V}{H} X_A - \frac{1}{H} \int_0^{x_A} (X_A - z)w dz \quad (3.10)$$

Burada,

$V$  : dayanaklardaki dikey kuvvet bileşeni,

$H$  : dayanaklardaki yatay kuvvet bileşenidir.

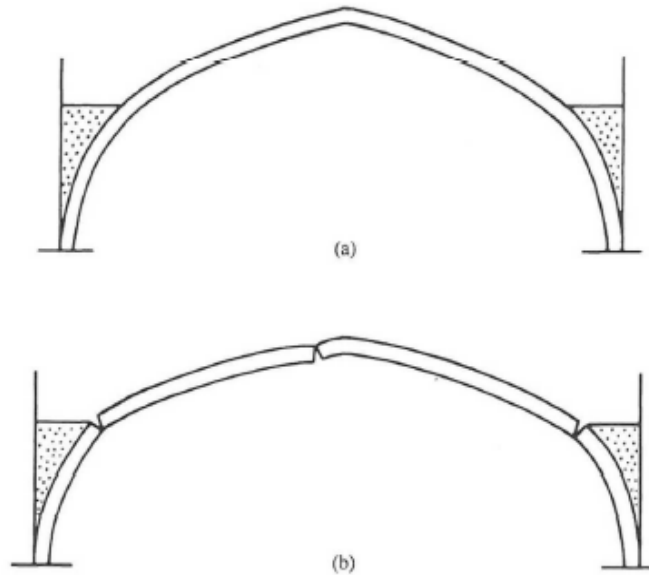
Değerleri henüz belirlenmemişse, o zaman denklem (3.10)'daki  $V/H$ ,  $1/H$  yerine sırasıyla  $\mu$ ,  $v$  yazılırsa ve denklem (3.10)'daki değerlerin alt simgesi olan  $A$  kaldırılırsa;

$$\epsilon = \Delta - y + \mu x - v \int_0^x (X - z)w dz \quad (3.11)$$

denklemini elde edilir.

Denklem (3.11) kemer merkez çizgisine göre itme çizgisinin konumunu verir. Herhangi üç bölümde konum biliniyorsa, bilinmeyen nicelikler  $\Delta$ ,  $\mu$  ve  $\nu$  belirlenebilir ve pozisyon daha sonra başka herhangi bir bölümde hesaplanabilir (Heyman, 1982).

Şekil 3.24'de destek sistemlerinin akması sonucunda sivri kemerde oluşan dört menteşe çatlakları görülmektedir.



Şekil 3.24. Destek sisteminin akması sonucu sivri uçlu kemerde menteşe çatlakları (Heyman, 1998)

### 3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi

İlk olarak 1980 yılında R.Clough makalesinde sonlu elemanlar kavramını dile getirmiştir. Metodun amacı sonsuz sayıda serbestlik derecesine sahip olan sistemi, düğüm noktalarında bir biri ile bağlantılı olan sonlu sayıda elemanlarla tahmin etmektir (Kasımzade, 2018).

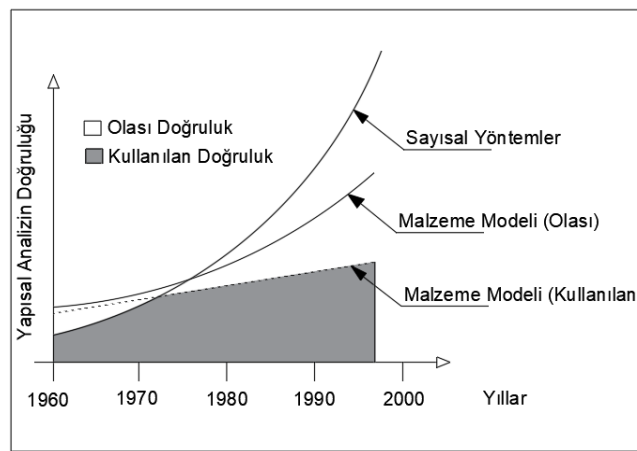
#### 3.3.1. Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Analizi

Yığma yapılarda detaylı yapısal analizlerinde genellikle sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılır. Yapısal analizle yapının tamamı ya da belirli bir elemanın matematiksel modelinin hazırlanmasıyla başlanılarak yapının ayrıştırılması yapılır. Yapı ayrıştırılırken analizin amacına uygun bir şekilde ve uygun boyutlarda sonlu eleman parçalarına ayrılır. Yapıyı oluşturan taşıyıcı elemanlar, yapının geometrik boyutları, yapı üzerine etki eden yükler, mesnetlerin ve elemanların birleşim noktalarının hareket yetenekleri ve serbestlik derecesi dikkate alınarak modellenir. Matematiksel modelin amacı, yapının tamamının belli bir bölümünün ya da taşıyıcı elemanlarının

çeşitli yükler veya fiziksel etkiler altında gerçek davranışını bulmaktır (Toker ve Ünay, 2004).

Sonlu elemanlar yöntemi genellikle malzeme davranışının matematiksel olarak açıklanması için cismin bir maddi noktasındaki gerilme ve gerinim tensörü arasındaki ilişkiyi verir. Bu matematiksel açıklama genellikle kurucu model olarak adlandırılır (Toker ve Ünay, 2004).

Şekil 3.25'te 1960-2000 yılları arasında yapısal analizlerin doğruluğu uygulanan yöntemlere göre grafiği verilmiştir. 2000'li yıllara gelindiğinde yapısal analizlerde kullanılan malzeme modeli daha doğru sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 3.25. Zaman içinde yapısal analizlerin doğruluğu (Lourenço, 1998)

Doğrusal olmayan analiz bir yapının elastik aralıktan çatlama ve ezilme yoluyla tam bir bozulmaya kadar tepkisini izleyebilen en güçlü analiz yöntemidir (Lourenço, 2021). Doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi; üç farklı yöntem altında incelenmektedir. Bu yöntemler; mikro analiz yöntemi, basitleştirilmiş mikro analiz yöntemi ve makro analiz yöntemidir.

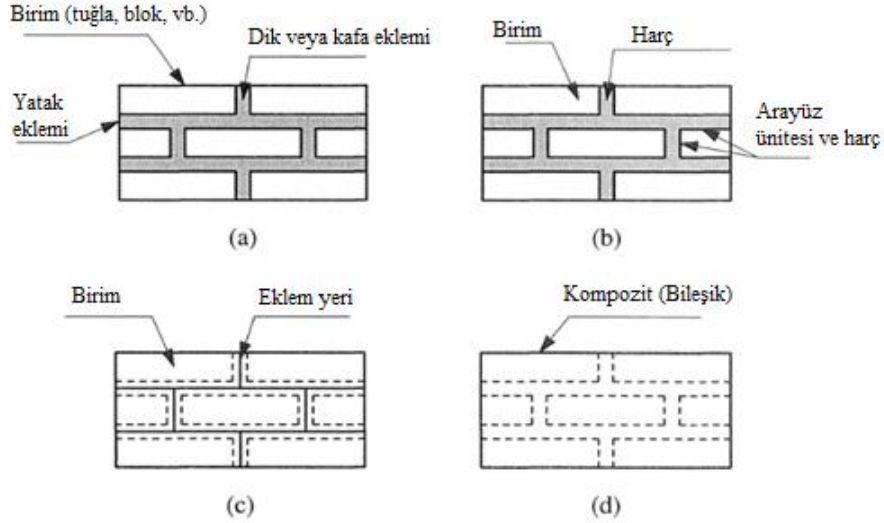
### 3.3.1.1. Mikro Analiz Yöntemi

Young modülü, Poisson oranı ve isteğe bağlı olarak hem tuğla hem de derz malzemesinin elastik olmayan özellikleri dikkate alınarak; tuğlaların ve derzlerin birleşik hareketleri bir büyüteç altındaymış gibi incelenerek eklemler sürekli öğelerle temsil edilir (Rots, 1991).

Yığma yapıların yerel davranışlarının daha iyi anlaşılması için mikro modelleme çalışmaları gereklidir. Mikro modelleme yapısal detaylar, pencere ve kapı açıklıklarının

genellikle sadece birkaç blok uzunluğundaki ayaklarla sonuçlandığı beton veya kalsiyum silikat bloklar gibi modern bina sistemleri için de geçerlidir (Lourenço, 1995).

Şekil 3.26'da (a) Yığma duvara örnek, (b) Yığma duvarda ayrıntılı mikro modelleme, (c) Yığma duvarda basitleştirilmiş mikro modelleme, (d) Yığma duvarda makro modelleme adı altında geliştirilen üç farklı strateji görülmektedir.



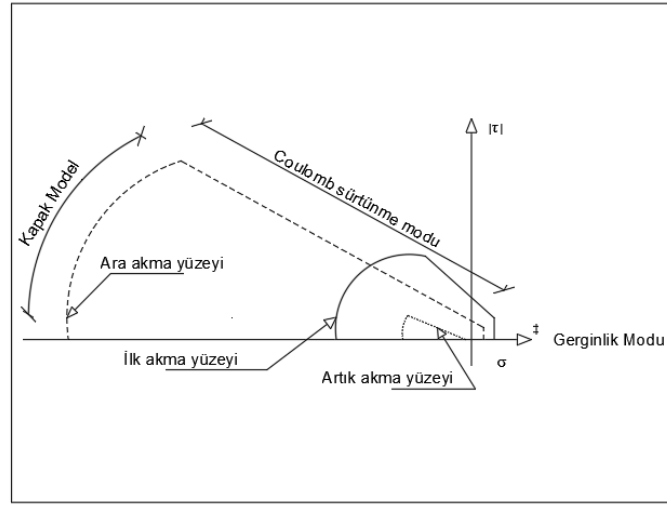
Şekil 3.26. Yığma yapılar için modelleme yöntemleri (Lourenço, 1995)

### 3.3.1.2. Basitleştirilmiş Mikro Analiz Yöntemi

Tuğlalar yine sürekli elemanlar olarak modellenerek, eklemler çizgi ara yüz elemanları ile temsil edilir. Yığma yapıyı, birleşim yerlerindeki potansiyel kırılma çizgileriyle birbirine bağlanmış bir dizi elastik blok olarak düşünmek mümkündür. Eklemlerin Poisson etkisi dâhil edilmediğinden doğruluk kaybolarak eklemler süreksiz elemanlarla temsil edilir (Rots, 1991).

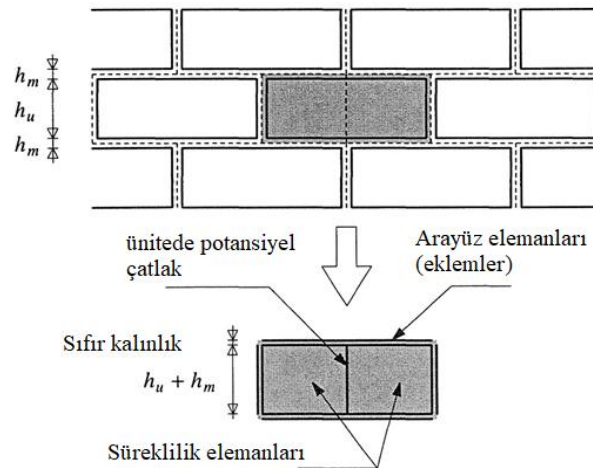
Ara yüz sürekliliğinin iç içe geçmesini önlemek için başlangıçtaki yapay sertliğe sahip potansiyel bir çatlak ve kayma düzlemini temsil eder. Genişletilmiş birimler süreklilik elemanları ile temsil edilirken harç derzlerinin ve birim-harç ara yüzünün davranışı süreksiz elemanlarda toplanmıştır. Birim-harç arabiriminden oluşan her bir bağlantı, geometriyi değiştirmeden tutmak için birimler genişletilirken ortalama bir arabirimde toplanır. Duvar eklemlerde potansiyel kırılma/kayma çizgileri ile bağlanmış bir dizi elastik blok olarak kabul edilir (Lourenço, 1995).

Şekil 3.27'de Lourenço tarafından ara yüzler için önermiş olduğu bir kapak modeli görülmektedir.



Şekil 3.27. Ara yüzler için önerilen bir kapak modeli (Lourenço, 1995)

Şekil 3.28’de ara yüz elemanlarının potansiyel çatlak, kayma veya ezilme düzlemleri olarak kullanıldığı basitleştirilmiş bir modelleme stratejisine dikkat edilmektedir. Mod I arızası için bir gerilim kesme, Mod II arızası için bir Coulomb sürtünme zarfı ve sıkıştırma arızası için bir kapak modu içeren bir kompozit ara yüz modeli sunulmaktadır. Ek olarak, birimlerdeki potansiyel çatlakları modellemek için ara yüz elemanları düşünülmüştür.



Şekil 3.28. Önerilen modelleme stratejisi (Lourenço, 1995)

Harç kalınlığına göre her iki yönde genişleyen birimler (u) sürekli elemanlarla modellenmiştir. Birimlerdeki harç derzleri (m) ve olası çatlaklar sıfır kalınlıkta ara yüz elemanları ile modellenmiştir (Lourenço, 1995).

$$k_n = \frac{E_u E_m}{h_m (E_u - E_m)} \quad k_s = \frac{G_u G_m}{h_m (G_u - G_m)} \quad (3.12)$$

$k_n$  ve  $k_s$  kafa eklemelerindeki yay sabitleridir.

Burada;

$E_u$  : taş veya tuğla malzemesinin elastisite modülü,

$E_m$  : harcın elastisite modülü,

$G_u$  : taş veya tuğla malzemesinin kesme modülü,

$G_m$  : harcın kesme modülü,

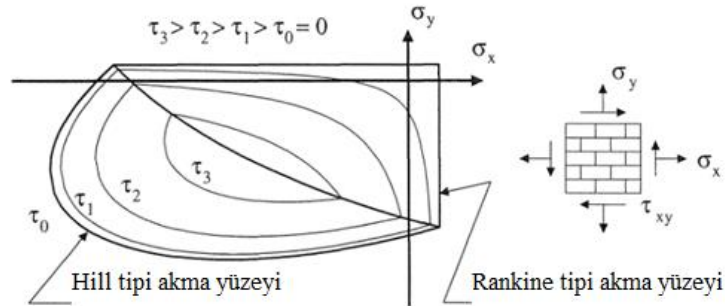
$h_m$  : harç bağlantının gerçek kalınlığıdır.

Sıkıştırımadaki kırılma süreci gerçekte birimlerin ve harcın mikro yapısı ve bunlar arasındaki etkileşim ile açıklanmaktadır. Mikro modeller duvarın davranışını anlamak için mevcut en iyi araçtır. Böyle bir yaklaşımı kullanmanın yararı, tüm farklı başarısızlık mekanizmalarının dikkate alınabilmesidir (Lourenço, 1995).

### 3.3.1.3. Makro Analiz Yöntemi

Münferit tuğlalar ve derzler arasında bir ayırım yapılmadan tuğlayı anizotropik bir bileşik olarak ele alınıp derzler ve çatlaklar lekelenir. Bu yaklaşım büyük ölçekli yığma yapıların küresel analizinde çekicidir. Eklemler sıvanır (Rots, 1991).

Şekil 3.29'da Makro modelleme yönteminde çekme için Rankine tipi akma yüzeyi ve sıkıştırma için Hill tipi akma yüzeyi içeren bir anizotropik süreklilik modeli görülmektedir. Anizotropik elastikiyet anizotropik plastisite ile birleştirilerek malzeme eksenleri boyunca hem çekme hem de sıkıştırmada tamamen farklı davranışlar tahmin edilebilir (Lourenço, 1995).



Şekil 3.29. Eş-kayma gerilme çizgileri ile önerilen kompozit akma yüzeyi (Lourenço, 1995)

Makro modelleme yaklaşımında, birimler ve eklemler, ortalama duvar gerilmeleri ve ortalama duvar şekil değiştirmeleri arasında bir ilişkinin kurulduğu homojen bir süreklilik içinde dağıtılır. Gerilim ve basma yüklü duvarın göçme mekanizmasının mikro düzeydeki çatlak büyümesi tarafından yönetildiği varsayılmaktadır. Ayrıca, her bir hasar mekanizmasıyla ilişkili dâhili hasarın, çekmede kırılma enerjisi ve sıkıştırma kırılma enerjisi ile ilgili dâhili parametreler kullanılarak modellenebileceği varsayılmaktadır. Enerji bazlı (plastisite) model, sonlu eleman ağ boyutuna göre objektif sonuçlar elde etmek için iyi bilinen çatlak bant teorisine başvurulur. Model malzeme eksenleri boyunca tamamen çeşitli davranışlar anlamında bağımsız tahmin etme yeteneğine sahiptir. Taş ve harç için homojenik elastisite modülü hesaplanmasında 3.13'te verilen bağıntı önerilmektedir (Lourenço, 1995).

$$E_{dh} = \frac{t_h + t_d}{\frac{t_h}{E_h} + \frac{t_d}{E_d}} \rho \quad (3.13)$$

Burada;

$E_{dh}$  : homojenik elastisite modülü,

$t_h$  : harç kalınlığı,

$t_d$  : duvar kalınlığı,

$E_h$  : harcın elastisite modülü,

$E_d$  : duvarın elastisite modülü olup

$\rho$  : değeri 0.5 olarak alınabilir (Lourenço, 2001).

Makro modeller yapı yeterince büyük boyutlara sahip katı duvarlardan oluştuğunda uygulanırsa makro uzunluk boyunca gerilmeler üniform olacaktır. Makro modelleme azaltılmış zaman ve bellek gereksinimlerinin yanı sıra kullanıcı dostu bir ağ oluşturma nedeniyle daha uygulamaya yöneliktir. Modelleme doğruluk ve verimlilik arasında bir uzlaşma gerektiğinde çok değerlidir (Lourenço, 1995).

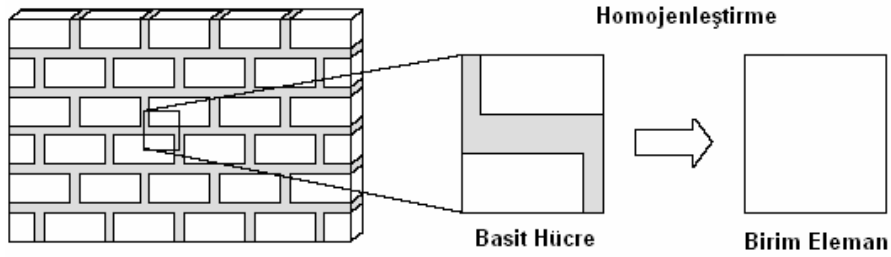
### 3.4. Literatür Taraması

#### 3.4.1. Yığma Duvarcılık Üzerine Yapılan Çalışmalar

Pegon ve Anthoine (1994) Tuğla ve harçtan oluşan anizotropik iki farklı malzemeyi makro ölçekte doğrusal olmayan davranışını dikkate alıp iki boyutlu homojenleştirme tekniğine başvurarak bir duvar modelinde yapısal analiz yapmışlardır. Sonuç olarak makro analiz yöntemiyle homojenleştirme yapılması doğrusal olmayan yapısal analizlerde katkısının büyük olduğunu söylemişlerdir.

Lourenço (1995) yığma yapıların analizi için sonlu elemanlar yöntemi benimsenerek mikro ve makro analizi olmak üzere iki farklı model sunmuştur. Mikro ve makro modeller için farklı uygulama alanları bulunduğundan bir modelleme stratejisi diğerine tercih edilemez.

Anthoine (1997) yığma yapılarda homojenleştirme teorisi yoluyla duvarın makroskobik davranışı malzemelerin (tuğla-harç) davranışından türetilbildiğini belirtmiştir. Özellikle duvarcılıkta duvar sonsuz ince düzlem ya da sonsuz kalın düzlem olarak kabul edilir. Her iki varsayımın geçerlilik aralığını belirlemek için homojenleştirme teorisi yani duvarın sonsuz kalınlığı hesaba katılarak uygulanmaktadır. Hem tuğla hem de harcın izotropik hasara maruz kaldığında sayısal hesaplamalar duvarın makroskobik elastik davranışı üzerinde çok az etkiye sahip olup doğrusal olmayan tepkisini nihai yük ve arıza modu önemli ölçüde etkileyebileceği gösterilmiştir. Şekil 3.30.te duvarcılıkta homojenleştirme tekniği için önerilen makro analiz stratejisi görülmektedir.



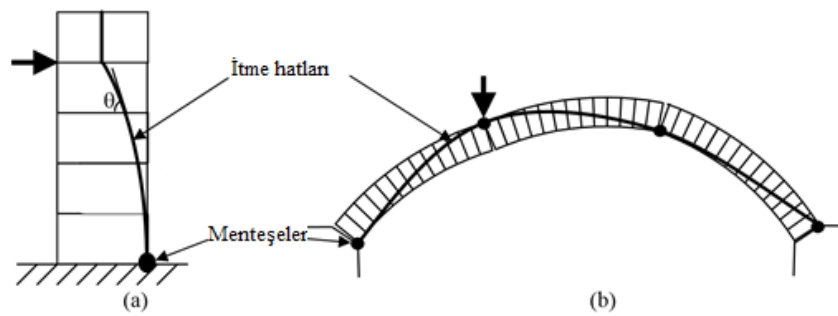
Şekil 3.30. Heterojen iki farklı malzemenin homojenleştirilmesi tekniği

Zucchini ve Lourenço (2002) duvarın anizotropik malzeme olmasından dolayı analiz öncesinde homojenleştirme teknikleri kullanılarak yapısal analizin yapılması daha doğru olduğunu iddia etmişlerdir. Temel sorun iki bileşenin (taş ve harç) sertlikleri arasında büyük bir fark olduğunda homojenleştirme sürecinde hatalar ortaya çıkmaktadır. Homojenleştirme teknikleri ilk olarak 1989 yılında Bakhvalov ve Panasenko tarafından ortaya atılmıştır. Lourenço (1996) doğrusal elastik homojenleştirme algoritmalarının çok daha net bir şekilde uygulanmasına, doğrusal olmayan davranışa nispeten basit bir genişlemeye izin veren yeni bir matris formüllerini sunarak yöntemi daha da geliştirmiştir. Lourenço (1997), birim ve harç arasında büyük sertlik farklılıkları oranı 10 kattan daha fazla ise standart iki aşamalı homojenleştirme tekniğinde büyük hataların meydana gelebileceğini göstermiştir.

### 3.4.2. Limit Analiz İle İlgili Çalışmalar

Ordunã ve Lourenço (2003) yığma yapıların limit analizi ve güçlendirilmesi amacıyla rijit bloklardan (kinematik teorem) yapılmış bir kemerde kapak model geliştirerek genel bir yöntem sunmuşlardır. Bloklu yapının geometrisini AutoCAD yazılımında yaparak birim hacim ağırlık, blok kalınlığı, sürtünme katsayısı ve basınç dayanımı gibi parametreleri tanımlamıştır. Köprü genişliği boyunca dağıtılan monoton artan hareketli yükler, açıklığın dörtte birine uygulanmıştır. Geliştirilen limit analizi yaklaşımı yapısal analizlerde küçük ve orta büyüklükteki eski kâgir yapıların değerlendirilmesi için güçlü bir araç olma potansiyeline sahip olduğunu iddia etmişlerdir.

Gilbert (2007) yığma kemer köprülerine uygulanan limit analizi yapıların güvenliğini doğrulamak için potansiyel olarak oldukça etkili bir yöntem olmuştur ve uzun yıllardır bu yöntem yığma kemer köprülerde başarıyla uygulanmıştır. El tabanlı limit analiz teknikleri bilgisayar tabanlı yöntemlere yerlerini bırakmışlardır. Yıllar içinde limit analizi teoremlerine dayanan çeşitli özel analiz programları geliştirilmiştir. Şu anda mevcut araçlar arasında ArchieM (Obvis 2007) ve ring2.0 (LimitState 2007b) bulunmaktadır. Şekil 3.31'de yığma duvarda ve yığma kemerde limit analiz sonucunda oluşan itme hatları ve menteşeler gösterilmiştir.



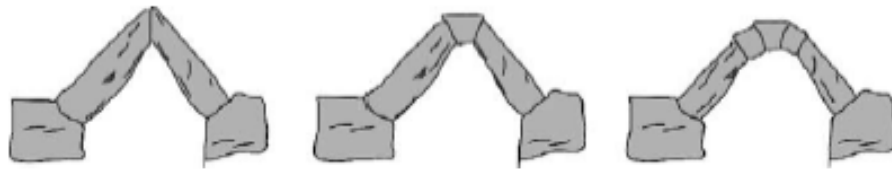
Şekil 3.31. (a) Yığma iskelede ve (b) Yığma kemerde çökme noktasındaki bindirme hattı (Gilbert, 2007)

Limit analizi yığma kemer köprülerinin nihai çökme durumunu analiz etmek için kavramsal olarak basit ve sağlam modeldir. Bugüne kadar çoğu araştırmacı bir kemer köprüyü oluşturan duvar kemerleri, payandalar ve payandaların stabilitesini oluşturmaya odaklanmıştır. Bu alandaki çalışmalar, genellikle itme hattı (statik yöntem)

veya ayrık rijit blok tipi (kinematik yöntem) analiz prosedürleri kullanılarak devam etmektedir.

### 3.4.3. Kemerlerle İlgili Yapısal ve Sismik Analiz

Köprülerin kemer uygulaması birkaç bin yıl öncesine dayanmaktadır. Literatürde (Heinrich (1983); Kurrer (2002)) kemerlerin ortaya çıkması ile ilgili birkaç teori olduğunu iddia etmişlerdir. Bir teoriye göre, sahte tonozların devrilmesi neticesinde kemerler meydana gelmiş, diğer teoriye göre ise, destek taş elemanlarının veya taş kirişlerin alt bölümlerinin Şekil 3.32.de gösterildiği gibi tekil parçalara ayrışması sonucu kemerlerin oluştuğu varsayılır (Özkaya, 2019).



Şekil 3.32. Taş kayaların tekli elemanlara ayrılması (Özkaya, 2019)

Frunzio ve ark. (2001) bir yığma kemer köprüsünü iki farklı yöntemle yapısal analizini yapmışlardır. İlk yöntemde; Heyman'ın geliştirdiği limit analizi yöntemiyle iki boyutlu (2B) analiz yapılmıştır. İkinci yöntemde; ANSYS bilgisayar yazılımı ile üç boyutlu (3D) doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemiyle köşelik duvarları ile dolgu duvarın yapısal rolü de dikkate alınarak yığma taş blokların ve harçların kompozit bir ortamda birleştirilmesiyle homojenleştirme yapılarak makro ölçekte analiz yapılmıştır. Sonuç olarak; üç boyutlu analizler bir duvar kemerinin restoresi durumunda, müdahale edilmesi gereken alanların haritasını vererek faydalı olabileceğini söylemişlerdir. İki boyutlu analizde kemerlerde altı menteşeli bir arıza mekanizması gerçekleşmiştir.

Lourenço (2002) yığma bir kemeri üç farklı yöntemle yapısal analizini yapmıştır. Şekil 3.33'te yer alan kemer modeline göre üç farklı analiz yapılarak sonuçlar karşılaştırmıştır. Bu analizler sırasıyla; doğrusal elastik sonlu elemanlar analizi, plastik analiz, doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizidir.



basitleştirilmiş modelleme tarihi merkezlerdeki binalar gibi günlük yapılar için harika bir araçtır.

Giordano ve ark. (2002) tarihi yığma yapıların yapısal analizi için üç farklı sayısal yöntemlerini uygulamış ve hesapladığı sonuçları tam ölçekli yığma numune üzerinde elde edilen deneysel test verileriyle karşılaştırmışlardır. ABAQUS bilgisayar yazılımında homojenleştirme tekniğine bağlı olan sonlu elemanlar model makro modelleme stratejisi kullanılmıştır. Visual CASTEM 2000 bilgisayar yazılımı ile düşey ve yatay harç derzlerinin varlığını simüle etmesi amaçlanan süreksiz elemanlarla sonlu elemanlar yöntemini uygulaması için kullanılmıştır. Son olarak ayrık öge modellemesi için UDEC bilgisayar yazılımı benimsemiştir. Her modelin kendine özgü sınırlamalarına rağmen üç yöntem de bir dereceye kadar test edilen numunelerin genel davranışı doğru bir şekilde açıklamışlardır. Monoton yüklemdeki gerçek nihai dayanım doğrusal olmayan itme analizi gerçekleştiren iyi bir yaklaşımla tahmin etmişlerdir.

De Luca ve ark. (2004) yığma kemerlerin sismik kapasitesini değerlendirmek için basitleştirilmiş bir yöntem önermişlerdir. Geliştirdiği algoritma, oldukça basit iki analiz yaklaşımını, doğrusal sonlu elemanlar analizi ve Heyman'ın hipotezlerini içeren strateji limit analizini birleştirir. Doğrusal analiz, duvar elemanındaki çekme ve basınç gerilme bölgelerini saptamak ve daha sonra standart bir parametrik CAD (AutoCAD) bilgisayar yazılımdan yararlanarak çökme çarpanının hesaplandığı olası bir hasar mekanizması sınıfını belirlemiştir. Geliştirilen yöntem sismik kapasitenin yaklaşık bir değerlendirmesi için değerli bir araç olarak kabul edilmiştir. Doğrusal olmayan analizler kurucu modellerin içsel özelliklerinden dolayı bazı durumlarda çok kararsız oldukları durumlarda limit analiz sayısal sonuçların kontrol edilmesinde çok etkili bir yöntem olduğu ortaya çıkmıştır.

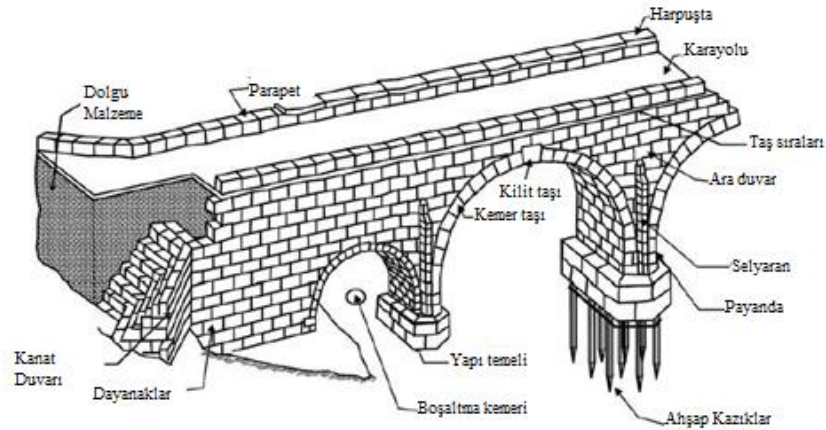
Toker ve Ünay (2004) yığma kemer köprülerin korunması ve onarılması amacıyla yapılacak olan yapısal analizlerde ilk olarak doğrusal elastik analiz yapmak daha doğru olduğunu söylemişlerdir. Doğrusal elastik analiz sonrasında tespit edilen zayıf bölgeler için doğrusal olmayan elastik malzeme özellikleri ve geometrik düzensizliklerde dikkate alınarak ayrıntılı modelleme stratejileri ile tekrar analiz yapılabileceğini tavsiye etmişlerdir. Yığma yapıların gerçek davranışını anlayabilmek için doğrusal olmayan analiz yöntemleri gereklidir. Doğrusal olmayan analiz yöntemleri çok karmaşık ve özel

bilgisayar programları gerektirmekte olup matematiksel modelin çok dikkatli bir şekilde hazırlanması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Brencich ve Morbiducci (2007) tarihsel kuralların modern mekanik açısından yorumlamak için gerekli tüm bilgileri toplayarak yapıların mekanik konularını incelemişlerdir. Yapısal performans, tarihi yapıların ortalama gerçek güvenlik faktörünün tahmin edilmesini sağlamış ve yığma kemerlerin genellikle beklenenden çok daha yüksek sınır yükleri taşıdığını göstermişlerdir. Kemerlerdeki; gerilme durumun tahmini için doğrusal elastik analiz yöntemi ve sınır yükünün tahmini için ise en yaygın kullanılan limit analizi yöntemleri kullanılarak analizler yapılmıştır.

Sonuç olarak; antik çağlardan beri kemerler ve tonozlar inşa edilmiş malzeme ve yapıların zayıf mekanik bilgisine rağmen, duvarcılık köprüleri olağanüstü performanslar sergileyip hala orijinal tasarımdakilerden çok daha fazla yükü karşı karşıya kalmakta, ciddi çevresel bozulmaya ve neredeyse hiç bakım gerektirmeyecek şekilde hizmet vermişlerdir. Duvarcılık köprüleri hakkındaki eski bilgileri geri kazanmak ve geleneksel kuralları modern mekanikle ortak bir paydada güncellenmesi gerektiğini söylemişlerdir.

Ural ve ark. (2008) tarafından Türk tarihi kemer köprülerinde bozulmaları ve başarısızlıkları mimari ve mühendislik kapsamında araştırılmışlardır. Köprüler tarih boyunca birçok depreme maruz kalmışlardır. Depremlerden kaynaklanan hasarlar özellikle ana kemerlerin çatlak ve yolun ayrılması olarak köprü ortalarında meydana gelmiştir. Sismik bölgelerdeki deprem etkileri nedeniyle dikey yüklere ek olarak köprülere yanal yükler de uygulanabilir. Yanal yer değiştirmeler de meydana gelebilir ve hasara neden olabilir. Kemerin dolgusu yoluyla kemerin üst kısmını etkileyen tüm dikey yükler, tonoz üzerinde yatay itme eğilimi gösterecektir. Kemer köprüsü yeterli mukavemete sahip değilse, bu ağır yükler yapısal bozulmaya neden olabilir. Yığma kemer köprülerinin yapısal analizi çok karmaşık olup köprülerin restorasyonu için yapılan hesaplamalarda inşaat malzemelerinin doğrusal olmayan malzeme özellikleri, harç veya diğer bağlama malzemelerinin mekanik özellikleri çok iyi tanımlanmalıdır. Şekil 3.35'te bir taş kemer köprüsünün elemanlarını göstermektedir.



Şekil 3.35. Taş kemer köprüsünün eleman özellikleri (Ural ve ark., 2007)

Yığma kemer köprülerinde çökmeler ve hasarların çoğu; destek yerleşimleri, seller, depremler, yetersiz kaplamalar ve drenaj, duvar malzemelerinin zayıf dayanıklılığı, aşırı ve düzensiz yükleme, savaşılar, bitki örtüsü ve biyolojik kolonizasyon varlığı, azalan dere yatağı ve tasarım hataları sonucu ortaya çıkmıştır. 1000'den daha fazla olan yığma kemer köprülerin gözlemlenmesi, bakım ve onarımları zor olduğu için 2003 yılında Karayolları Genel Müdürlüğüne bağlı olarak kurulan Tarihi Köprüler Bölümü kurulmuştur.

Milani ve Lourenço (2012) yığma köprülerin doğrusal olmayan statik davranışını iki farklı yöntemle araştırmışlardır. İlk analiz yöntemde; Strand 7.2 yazılımı kullanılarak üç boyutlu (3D) sonlu elemanlar yöntemiyle Drucker-Prager kırılma kriterine göre modellenmiş ve yapısal analiz yapılmıştır. Köprüün her bir elemanı için (kemer, payandalar, payandalar ve dolgu), farklı yapısal davranışa ve mekanik özelliklere sahip ara yüzler kullanarak makro ölçekte üç boyutlu davranışı ayrıntılı bir yaklaşım stratejisi geliştirmişlerdir. İkinci analiz yöntemde; UDEC yazılımı kullanılarak iki boyutlu (2B) analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda; üç boyutlu (3D) modelleme yalnızca karmaşık geometriler ve simetrik olmayan yükleme koşulları altında kullanmak daha doğru olduğunu bulmuşlardır. İki boyutlu (2B) analiz yaklaşımları her zaman yeterli olup zaman alıcı üç boyutlu (3D) analiz yöntemlerinden kaçınılması gerektiği sonucuna varmışlardır.

Altunışık ve ark. (2015) tarafından yığma kemer köprülerin yapısal davranışında kemer kalınlığının etkisini dikkate almış, ANSYS (2014) yazılımı ile doğrusal olmayan

sonlu elemanlar yöntemini kullanarak yapıyla analiz yapmışlardır. Kemer kalınlığının kemer geometrisine etkisinin daha doğru belirlenmesi için dokuz farklı yapısal analiz planlanmışlardır. Analizde ölü ve hareketli yükü arttırarak yükün kemer kalınlığına olan etkisini araştırmışlardır. Yığma köprülerde kemer kalınlığının yapısal analizde hayati bir parametredir. Geçtiğimiz yüzyılda yüksek trafik yüklerine maruz kalan köprülerin restore ve onarım uygulamalarında hareketli yüklerinde dikkate alınması gerekmektedir.

Zampieri ve ark. (2015) tarafından çok açıklıklı yığma kemer köprülerin üzerinde gerçekleştirilen sismik güçlendirme müdahale türleri köprülerin geometrik özellikleri temelinde değerlendirilerek için basitleştirilmiş bir yöntemi açıklamışlardır. Yapısal analizde MidasFEA (2009) yazılımı ile doğrusal olmayan sonlu elemanlar makro analiz yöntemini benimsemiştir. Analiz sonucunda köprülerde boyuna doğrultuda küresel yenilme mekanizmaları; enine doğrultuda büyük bir diyagonal çatlağını ortaya çıkarmış kesme göçmesi ana göçme mekanizması olarak kabul edilmişlerdir.

Lourenço (2021) bir yığma kemer ile düzlem dışı yüklü bir yığma duvarın yapısal analizini üç (3) farklı yöntemle yapmıştır. Bu yöntemler; doğrusal elastik davranış, plastik davranış ve doğrusal olmayan elastik davranıştır. Analiz sonucuna göre; karmaşıklığa karşı basitlik ve kullanıcı tarafından doğrulanıp değerlendirilebilen bir analiz aracı tercih edilmesini önermektedir. Tüm yapılardan ziyade yapısal parçaları modellemek daha doğru olup gerekli olmadıkça tam yapılı üç boyutlu modelleri kullanmamak ve tarihi yapılar için doğrusal elastik analiz yapılmaması gerektiğini söylemektedir.

#### **3.4.4. Malabadi Köprüsü Hakkında Yapılan Yapısal Analizler**

Doğangün ve Ural (2007) Anadolu'daki tarihi taş kemer köprülerinin geometrik ve yapısal özelliklerini araştırmışlardır. Malabadi Köprü'sünün analizi; çok çeşitli sonlu eleman tipleri ve malzeme modellerine sahip olan LUSAS (2006) bilgisayar yazılımı ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak doğrusal olmayan malzeme davranışı da dâhil edilerek analiz yapılmıştır. Analiz iki farklı şekilde yapılmıştır.

İlk analizde sadece ölü yük altında doğrusal analiz yapılmış ve ikinci analizde ölü ve hareketli yükler altında köprünün genel davranışını belirlemek için doğrusal olmayan analiz yöntemi tercih edilmiştir. İkinci analiz sonucunda, açıklığın sağ iskelesindeki destek hareketi dikkate alınarak doğrusal olmayan analiz yapılır.

Demir (2016) yığma taş kemer köprülerin yapısal davranışlarının değerlendirilmesi amacıyla farklı dönemlerde inşa edilmiş açıklık, yükseklik ve uzunluk gibi farklı geometrik özelliklere sahip dört tarihi köprü seçerek çalışmasını yapmıştır. Bölümünde FX+ DIANA bilgisayar yazılımı ile Malabadi Köprüsü iki farklı ağ boyutu kullanılarak modellenerek sonlu elemanlar yöntemi ile makro modelleme yaklaşımı analizi yapmıştır. Farklı ağ boyutları içeren her iki model için doğrusal statik analiz, modal analiz ve tepki spektrum analizi yapılmıştır.

Karaton ve ark. (2017) tarafından Malabadi Köprüsünün doğrusal olmayan sismik davranışını değerlendirmiştir. Sismik yükleme için üç farklı deprem seviyesi (D1, D2 ve D3) seçilmiştir. Sentetik ivme verileri, bölgenin sismik özellikleri dikkate alınarak üretilmiştir. Köprünün malzeme özelliklerinin belirlenmesi için tek eksenli basınç dayanımı testleri, ultrason testleri, Schmidt çekiç testleri ve kütle kaybı testleri yapılmıştır. Makro modelleme tekniği için homojenize malzeme özellikleri test sonuçları kullanılarak elde edilmiştir. Yığma malzeme için çekme çatlama ve basmalı ezme etkisini içeren sıvanmış çatlak modeli seçilmiştir. Dolgu malzemesi olarak da Drucker-Prager malzeme modeli kullanılmıştır. Analizde ANSYS bilgisayar yazılımı (2015) sonlu elemanlar programı kullanılmıştır.

Bayraktar ve ark. (2019) tarafından çalışmasında kohezyonlu ara yüzey etkileşimli ve kohezyonsuz ara duvarların modal ve düzlem dışı sismik yenilme tepkileri belirlenmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Kohezyonlu ara yüz kullanarak Malabadi Köprüsünün doğrusal olmayan sismik tepkisini hesaplamalı olarak incelemektedir. Seçilen köprünün üç boyutlu (3D) sonlu eleman modelinde, yığma yapılara uyarlanmış Beton Hasar Plastisitesi (CDP) malzeme modeli ve dolgu ve köşebent duvarlar ile kemer arasındaki kohezyonlu ara yüz etkileşimi dikkate alınmıştır. Köprünün sonlu eleman modeli ABAQUS (2010) bilgisayar yazılımı ile analiz edilmiştir.

#### 4.YAPISAL ANALİZLER VE SONUÇLARI

Yığma kemerlerin analizleri ile ilgili literatürde farklı yöntemler kullanılmıştır. Genel olarak bu yöntemler Pippard (1948) tarafından ortaya atılan ve Heyman (1982) tarafından geliştirilen limit analiz ve Rots (1991) tarafından ortaya atılan üç farklı yaklaşım modeli ile analizler yapılmaktadır. Rots (1991)'un önerdiği numerik modeller daha sonra Lourenço (1995) tarafından deneysel yöntemlerle desteklenerek geliştirilmiştir. Lourenço (2021) son yıllarda doğrusal elastik sonlu elemanlar analizi, limit analiz (plastik analiz) ve doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizlerini karşılaştırmış olup yığma yapılar için genellikle limit analiz ve doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizlerinin daha doğru sonuçlar verdiğini söylemektedir.

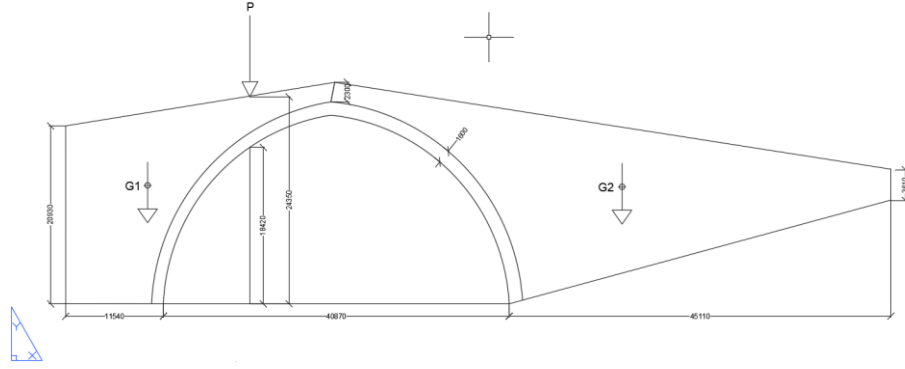
##### 4.1. Limit Analiz

Malabadi Köprüsü ile ilgili yapılan literatür taramasında plastik teoriye dayalı limit analizin yapılmadığı belirlenmiştir.

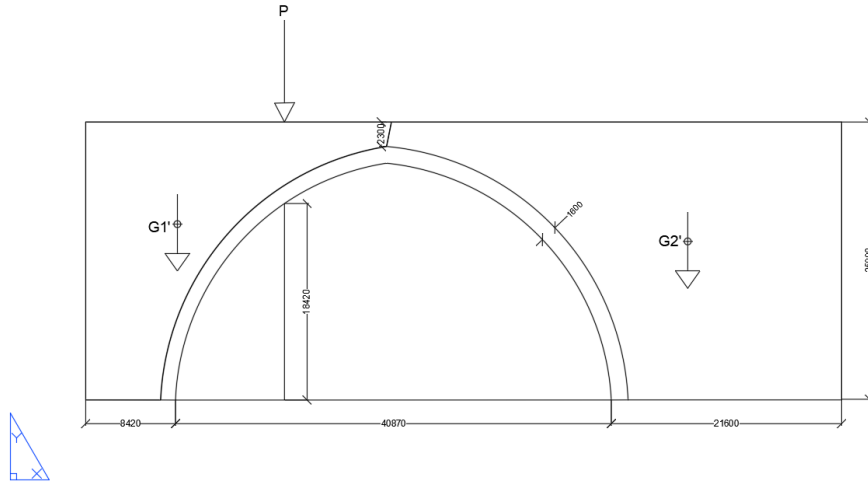
Limit analiz ile plastik teoriyi esas alarak malzememin birim hacim ağırlığı ve yapının geometrisinin bilinmesi ile analiz yapılabilir. Pippard (1948)'a göre; üç menteşe olduğu zaman kemerde çökme oluşur. Heyman (1982) dört menteşe olduğu zaman kemerde çökme oluşur. Gilbert (2007) altı menteşe olduğu zaman kemerde çökme oluşur.

Limit analiz veri eksikliği olduğu zamanlarda en iyi analiz yöntemi olup kemer sisteminin çökme yükünün tahmininde vazgeçilmez hızlı bir uygulama yöntemidir (Lourenço, 2002). Limit analizi yapmak için Gilbert (2007)'in teorik çalışmasına göre geliştirilen LimitState (ring3.1) yazılımı ile analiz yapılacaktır. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi analizi yapılan kısım; ana kemerin solundaki en yakın boşaltma kemeri ile ana kemerin sağındaki destek duvarı kısmının geometrik şekli AutoCAD yazılımı ile hazırlanmıştır.

Şekil 4.2'de görüldüğü gibi köprünün sağ ve solunda yer alan her bir parça AutocCAD'te MASPROP komutu ile ağırlık merkezleri bulunarak geometrik formlar idealleştirilmiştir.



Şekil 4.1. Malabadi Köprüsünün ana kemeri ve yan duvarları geometrik formu

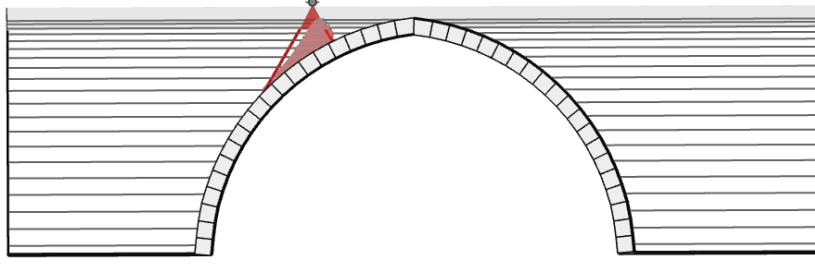


Şekil 4.2. Malabadi Köprüsünün limit analiz için idealleştirilmiş geometrik formu

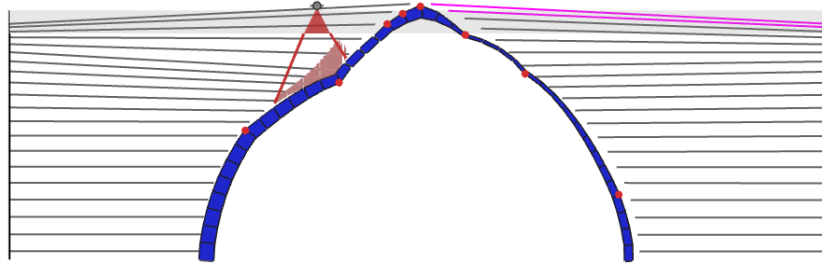
Kemerdeki taşların temas uzunlukları (genişlik) 1600 mm olarak seçilmiş, kemeri oluşturan blok sayısı 40 adet, sürtünme açısı  $30^{\circ}$ , kemer taşlarının birim hacim ağırlığı  $21 \text{ kN/m}^3$  ve dolgu birim hacim ağırlığı  $19 \text{ kN/m}^3$  olarak programda tanımlanır. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi köprünün ana kemerinde açıklığın dörtte birinde 10.5 tonluk ( $102.97 \text{ kN}$ ) yük uygulanmıştır.

Köprüde birinci adımda  $102.97 \text{ kN}$  (10 ton) yükleme, ikinci adımda  $500 \text{ kN}$  yükleme, üçüncü adımda ise  $1000 \text{ kN}$  yükleme yapılmıştır.

Şekil 4.4'te analiz sonrası kemerde oluşan itme hattı çizgisi görülmektedir.

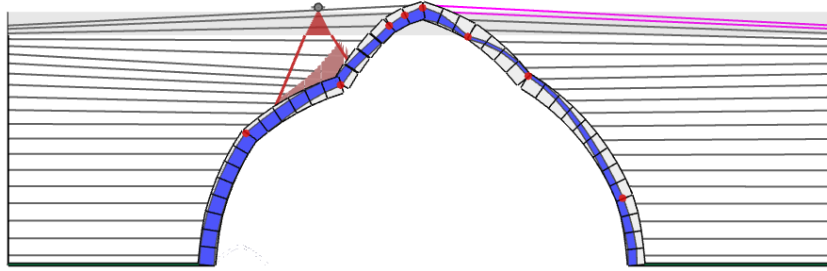


Şekil 4.3. LimitState ile analiz öncesi geometrik model

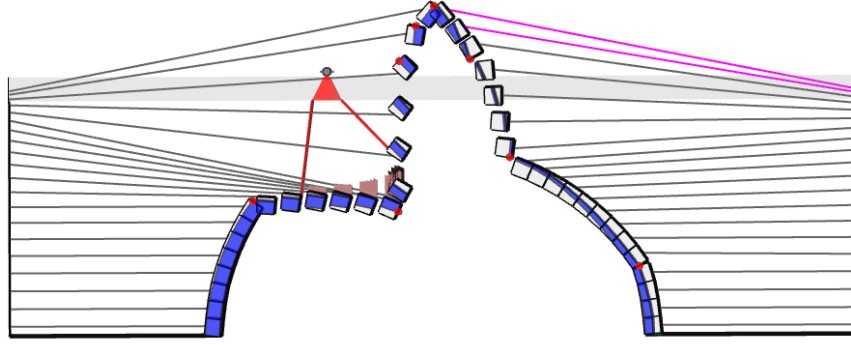


Şekil 4.4. Analiz sonrası oluşan itme hattı çizgisi

Şekil 4.5'te analiz sonrası kemerde oluşan altı menteşe görülmektedir. Şekil 4.6'da analiz sonrası kemerde olası çökme senaryosunun simülasyonu görülmektedir. Analiz sonrasında çökme mekanizmasını oluşturan menteşeler ve bu menteşelerde gerçekleşen veriler Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3 hazırlanarak eklenmiştir.



Şekil 4.5. Analiz sonrası oluşan menteşeler



Şekil 4.6. Analiz sonrası çökme senaryosu

Köprüde sol açıklığın dörtte birinde birinci adımda 10.5 tonluk yükleme, ikinci adımda 500 kN yükleme ve üçüncü adımda 1000 kN yükleme altında çökme sistemine esas altı menteşe oluşur. Analiz sonucunda maksimum dolgu yatay kuvveti, dolgu yatay kuvveti ve dolgu yatay gerilme kuvveti değerleri köprüye uygulanan yükleme altında değişmemiştir.

Çizelge 4.1. Oluşan menteşeler ve değerleri 10.5 ton yükleme için

Menteşeler	Yatay Yer Değişirme (mm)	Dikey Yer Değişirme (mm)	Gerçek Dolgu kuvveti kN/m <sup>2</sup>	Maksimum Dolgu kuvveti kN/m <sup>2</sup>	Dolgu Yatay Kuvvet kN	Gerçek Dolgu Gerilme Kuvveti kN/m <sup>2</sup>	Dolgu Yatay Gerilme Kuvveti kN/m <sup>2</sup>	Dönme (Radyan)
1. Menteşe Alt	0.02	-0.03	248.71	428.93	224.23	167.82	237.47	0.00
1.Menteşe Üst	113.08	-206.66	0.00	369.50	219.77	0.00	209.99	-0.25
2. Menteşe Alt	1547.29	-1731.05	0.00	142.12	141.69	0.00	96.27	-0.25
2.Menteşe Üst	1434.64	-1524.53	0.00	111.67	121.50	0.00	79.06	0.52
3. Menteşe Alt	133.64	2000.00	768.15	21.11	49.57	2815.00	25.40	0.17
3.Menteşe Üst	2.50	1997.16	1407.39	21.80	48.30	4999.92	25.48	-0.18
4. Menteşe Alt	-207.92	996.20	28.51	64.92	84.07	45.32	51.25	-0.28
4.Menteşe Üst	-137.51	1388.38	1025.32	47.21	67.94	2006.36	40.42	-0.18
5. Menteşe Alt	-793.37	-550.22	0.00	178.63	162.19	0.00	115.99	0.07
5.Menteşe Üst	-860.78	-280.46	0.00	143.06	142.29	0.00	96.75	-0.28
6. Menteşe Alt	-0.01	0.00	39.16	702.45	183.86	22.94	359.62	0.00
6.Menteşe Üst	-58.05	-7.05	0.09	624.05	196.02	0.05	327.80	0.07

Çizelge 4.2. Oluşan menteşeler ve değerleri, 500 kN yükleme için

Menteşeler	Yatay Yer Değişirme (mm)	Dikey Yer Değişirme (mm)	Gerçek Dolgu kuvveti kN/m <sup>2</sup>	Maksimum Dolgu kuvveti kN/m <sup>2</sup>	Dolgu Yatay Kuvvet kN	Gerçek Dolgu Gerilme Kuvveti kN/m <sup>2</sup>	Dolgu Yatay Gerilme Kuvveti kN/m <sup>2</sup>	Dönme (Radyan)
1. Menteşe Alt	0.00	-0.01	87.49	428.93	224.23	59.04	237.47	0.00
1.Menteşe Üst	112.90	-207.26	0.00	369.50	219.77	0.00	209.99	-0.25
2. Menteşe Alt	1548.61	-1733.26	0.00	142.12	141.69	0.00	96.27	-0.25
2.Menteşe Üst	1435.01	-1527.45	0.00	111.67	121.50	0.00	79.06	0.52
3. Menteşe Alt	134.33	2000.00	771.49	21.11	49.57	2827.23	25.40	0.17
3.Menteşe Üst	2.50	1997.33	1407.30	21.80	48.30	4999.96	25.48	-0.18
4. Menteşe Alt	-208.12	996.50	27.53	64.92	84.07	43.77	51.25	-0.28
4.Menteşe Üst	-137.57	1388.90	1031.92	47.21	67.94	2019.27	40.42	-0.18
5. Menteşe Alt	-794.12	-551.14	0.00	178.63	162.19	0.00	115.99	0.07
5.Menteşe Üst	-861.50	-281.14	0.00	143.06	142.29	0.00	96.75	-0.28
6. Menteşe Alt	-0.07	-0.01	12.74	702.45	183.86	7.46	359.62	0.00
6.Menteşe Üst	-58.52	-7.73	0.02	624.05	196.02	0.01	327.80	0.07

Çizelge 4.3. Oluşan menteşeler ve değerleri, 1000 kN yükleme için

Menteşeler	Yatay Yer Değişirme (mm)	Dikey Yer Değişirme (mm)	Gerçek Dolgu kuvveti kN/m <sup>2</sup>	Maksimum Dolgu kuvveti kN/m <sup>2</sup>	Dolgu Yatay Kuvvet kN	Gerçek Dolgu Gerilme Kuvveti kN/m <sup>2</sup>	Dolgu Yatay Gerilme Kuvveti kN/m <sup>2</sup>	Dönme (Radyan)
1. Menteşe Alt	0.01	-0.03	233.91	428.93	224.23	157.84	237.47	0.00
1.Menteşe Üst	112.77	-207.99	0.00	369.50	219.77	0.00	209.99	-0.25
2. Menteşe Alt	1150.45	-1736.07	0.00	142.12	141.69	0.00	96.27	-0.25
2.Menteşe Üst	1436.73	-1550.04	0.00	111.67	121.50	0.00	79.06	0.52
3. Menteşe Alt	133.93	2000.00	773.92	21.11	49.57	2836.15	25.40	0.17
3.Menteşe Üst	2.50	1997.43	1407.40	21.80	48.30	4999.98	25.48	-0.18
4. Menteşe Alt	-208.03	996.04	26.85	64.92	84.07	42.69	51.25	-0.28
4.Menteşe Üst	-137.58	1388.37	1036.75	47.21	67.94	2028.72	40.42	-0.18
5. Menteşe Alt	-793.71	-550.85	0.00	178.63	162.19	0.00	115.99	0.07
5.Menteşe Üst	-861.07	-280.98	0.00	143.06	142.29	0.00	96.75	-0.28
6. Menteşe Alt	-0.05	0.00	82.81	702.45	183.86	48.52	359.62	0.00
6.Menteşe Üst	-58.41	-7.69	0.20	624.05	196.02	0.01	327.80	0.07

Uygulanan yükleme arttıkça yatay yer değiştirme değeri azalmıştır. 1000 kN yükleme altında maksimum yatay yer değiştirme ikinci menteşenin üst kısmında 1436 mm, maksimum dikey yer değiştirme üçüncü menteşenin alt kısmında 2000 mm olarak gerçekleşmiştir. Gerçek dolgu kuvveti (akma değeri) üçüncü menteşenin üst kısmında 1407 kN/m<sup>2</sup>, gerçek dolgu gerilme değeri üçüncü menteşenin üst kısmında 4999.98 kN/m<sup>2</sup> olarak gerçekleşmiştir. Kemerin maksimum göçme yükü altıncı menteşenin alt kısmında 702 kN/m<sup>2</sup> olarak gerçekleşmiştir. En büyük dönme değeri ikinci menteşenin üst kısmında 0.525 radyan olarak gerçekleşmiştir.

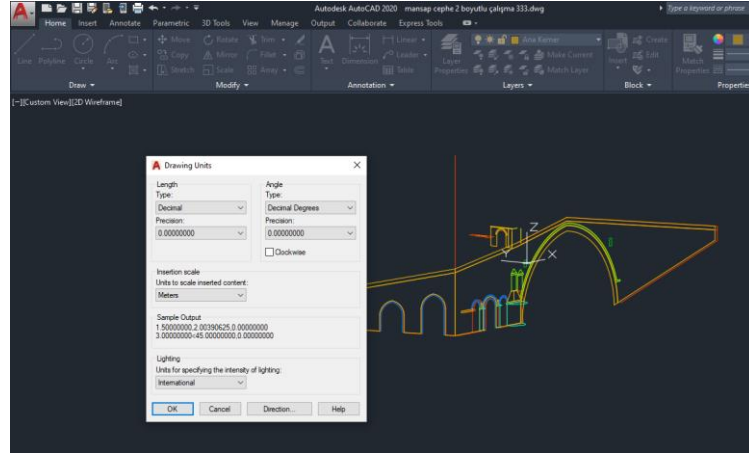
#### 4.2. Doğrusal Olmayan Sonlu Eleman Analizi (Makro Analiz)

Lourenço yapısal analizde üç boyutlu (3D) analizi sadece karmaşık yapılarda kullanılmasını önermekte, köprü planının doğrusal bir düzlemde olmaması, üç (3) kırık formda olması analizin üç boyutlu matematiksel model oluşturularak analiz yapılmasını gerektirmiştir.

Sap2000 yazılımı doğrusal olmayan sonlu elemanlar makro analizi yöntemi ile analiz yapma olanağı sunmakta, ancak köprünün planının üç (3) kırık formda olması matematiksel modelin oluşturulmasında zorluk oluşturmuş bundan dolayı Sap2000 yazılımı ile analiz yapılamamıştır ve DIANA programı ile çalışma yapılmıştır. DIANA yazılımı için (yer değiştirme analizörü) hem mühendislik tasarım kurumları hem de inşaat mühendisliği alanındaki bilimsel araştırma kurumları için geçerli olan mükemmel bir yapısal sonlu eleman doğrusal olmayan analiz yazılımı olduğu görüşünü öne sürmüştür (Chai, 2020).

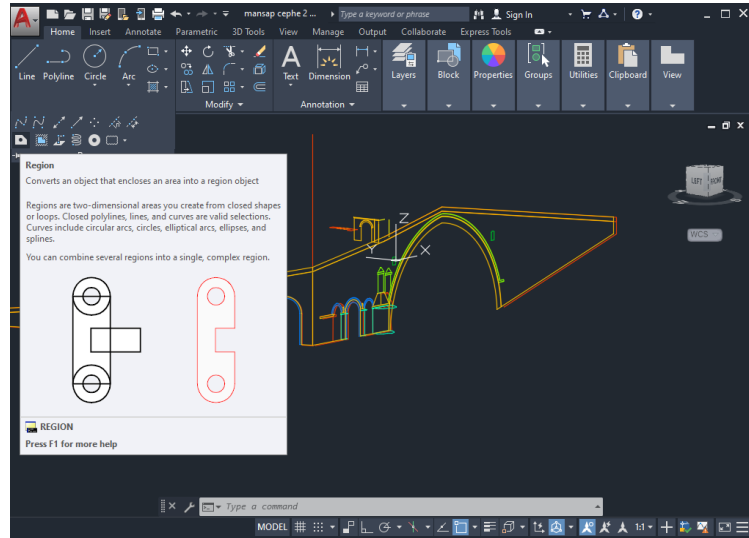
Makro analiz yöntemi ile duvarı oluşturan taş malzeme ve harcın ortak bir homojenik elastisite modülü hesaplanır. Bunun temel nedeni taşın elastisite modülü ile harcın elastisite modülünün farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Lourenço'nun homojenleştirme tekniğini kullanabilmek için taşın ve harcında elastisite modülünü bilmek gerekir. Köprüdeki taş ve harç malzemesinin basınç dayanımları arasındaki oran 10.69 olup Lourenço'nun on kat kriterine uygun olup bir adımda homojenleştirme yapılabilir. Ayrıca Eurocode 6 (1996) Yığma Yapı Tasarım Kuralları Standardı da duvar için homojenik bir elastisite modülü formülünü vermektedir.

Yapısal analizi yapabilmek için ilk olarak köprünün geometrik ölçülerinin analiz programına aktarılması gerekmektedir. Bu sebeple bazı parametre ayarlarını yapmak gereklidir. Şekil 4.7'de görüldüğü gibi AutoCAD programında Drawing Units ayarları ondalık sayı hassasiyet oranı hem uzunluk hem de açı için sekiz basamak olarak ayarlanmıştır.

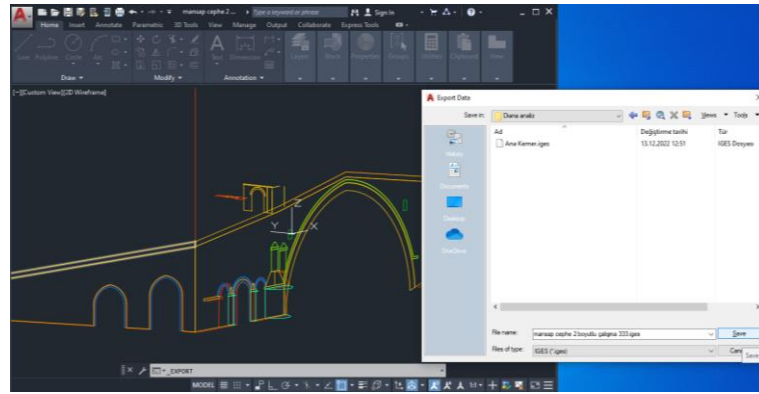


Şekil 4.7. AutoCAD Drawing Units parametre ayarları

Köprü'nün her elemanı için ayrı katman (Layer) oluşturulmuştur. Her eleman Polyline yani kapalı tek bir çizgi ile çizilmelidir. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi Region komutu ile çizgisel bir alan kapalı düzlem alana dönüştürülmüştür. DIANA programına ölçekli olarak köprü'nün modelini aktarabilmek için Iges formatında her bir elemanın kaydedilmesi gereklidir. Şekil 4.9'da Iges formatında her elemanın kaydedilmesi görülmektedir.

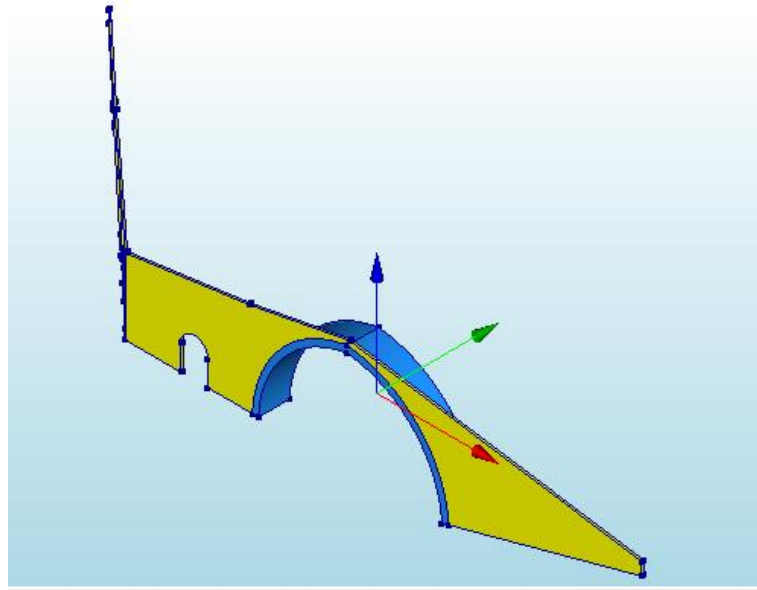


Şekil 4.8. Region komutu



Şekil 4.9. Iges formatında her elemanın kaydedilmesi

Iges formatında DIANA'ya aktarılan her eleman için Extrude komutu ile kalınlık ayarları koordinat düzlemine göre yapılır. Şekil 4.10'da Extrude komutu ile düzlemde köprünün her parça elemana kalınlık verildiği görülmektedir. Şekil 4.11'de köprünün çizilen katı modeli görülmektedir.



Şekil 4.10. Extrude komutu ile düzleme kalınlık verme

Çizelge 4.4'te doğal yapı taşlarının fiziksel özelliklerinin ortalama değerleri verilmektedir. Çizelge 4.5'te kullanılacak olan değerlerin alt- üst sınırları içinde kalıp kalınmadığının kontrolü için bu bölüme Çizelge 4.4 eklenmiştir.

Çizelge 4.4. Doğal yapı taslarının fiziksel özelliklerinin ortalama değerleri (Yılmaz, 2006)

Taşın Cinsi	Basınç Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Granit	30-70	14-33	4-7	30000-55000
Mermer	25-65	9-45	1-15	25000-70000
Kireç Taşı	18-35	6-20	2-6	10000-55000
Kum Taşı	5-30	2-10	2-4	13000-50000
Kuvars	10-30	3-10	3-4	15000-55000
Serpantin	7-30	2-10	6-11	23000-45000

*Homojenik elastisite modülü ( $f_k$ )*; yapısal analizde kullanım için duvarın kısa vadeli sekant elastisite modülü, Eurocode 6 (1996) Yığma Yapı Standardına göre alınabilir.

Buna göre elastisite modülü hesaplanırsa;

$$f_k = K f_b^\alpha f_m^\beta \quad (4.1)$$

bağıntısı kullanılmış  $f_b$  ve  $f_m$  değerleri sırasıyla taşın basınç dayanımı ve harcın basınç dayanımıdır.  $K$ ,  $\alpha$  ve  $\beta$  değerleri Eurocode 6 (1996)'da sabit değerler olup harçlı yüzeylerde sırasıyla; 0.50, 0.65 ve 0.25 olarak alınması tavsiye edilir. Bu bağıntıya göre hesaplanan elastisite modülü  $f_k = 7200$  MPa olur.

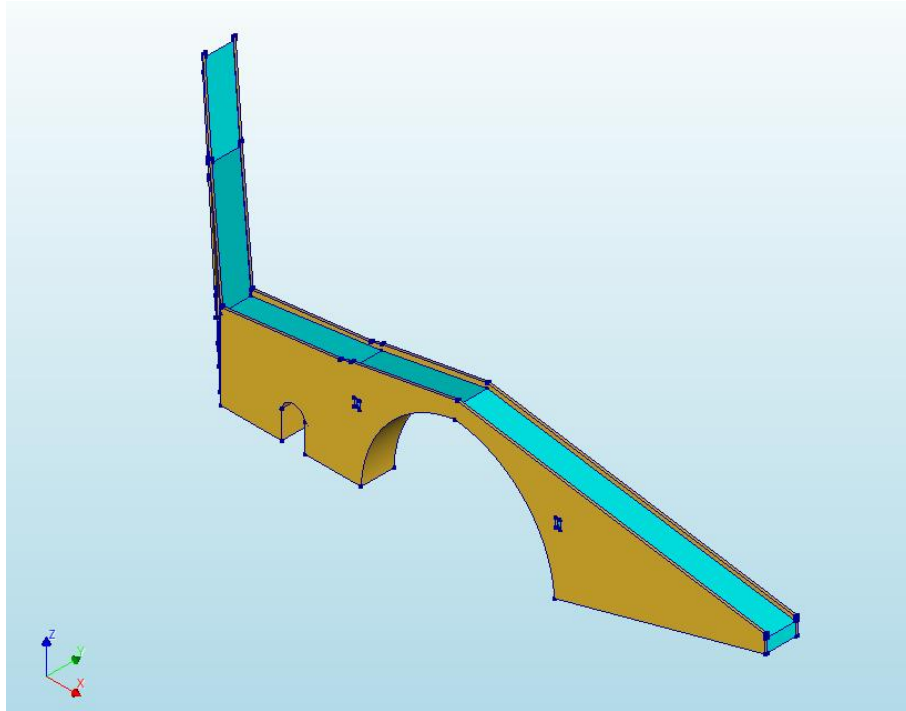
Taş duvarın ve harcın basınç değerleri konservasyon raporu ve literatürde köprü ile ilgili yapılan çalışmalardaki bazı değerler referans alınarak tesbit edilmiş ve Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Köprü üzerinde hareketli yük araçların geçemeyeceği ve sadece ziyaretçilerin (insan) yükü olduğundan  $-Z$  koordinat düzlemine düşey olarak metrekaareye düşen yük 150 kN olarak alınmıştır. Köprünün katı modeli dış duvarlar ve harpuşta duvar kalınlıkları 50 cm, kemer genişlikleri 700 cm olarak alınmıştır. Geriye kalan 600 cm'lik kısım ise dolgu duvar olarak tanımlanmıştır.

Şekil 4.11'de köprünün katı modeli oluşturulduktan sonra malzeme özellikleri tanımlanmış; malzeme sınıfı "Concrete and Masonry", malzeme modeli "Mohr-Coulomb and Drucker-Prager" olarak atanmıştır. Doğrusal malzeme özellikleri elastisite modülü, poisson oranı ve yoğunluk (birim hacim ağırlık) değerleri ile Plastisite modeli Mohr-Coulomb modelinde kohezyon, sürtünme açısı ve genişleme açısı parametreleri Çizelge 4.5'e göre programda tanımlanmıştır.

Çizelge 4.5. Köprünün malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri	Duvar	Harç	Dolgu	Duvar +Harç	Ara Yüz
Basınç dayanımı (MPa)	37.42	3.50	19.00	-	-
Birim hacim ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	2100.00	-	1900.00	-	-
Homojenik elastite modülü (MPa)	-	-	-	7200.00	-
Poisson oranı	0.20	0.20	0.25	-	-
Normal sertlik (N/mm <sup>2</sup> )	-	-	-	-	2400.00
Kesme Sertliği (N/mm <sup>2</sup> )	-	-	-	-	1000.00
Kohezyon (MPa)	0.30	-	0.05	-	-
Sürtünme açısı (Derece)	30.00	-	30.00	-	-
Genişleme açısı (Derece)	10.00	-	10.00	-	-



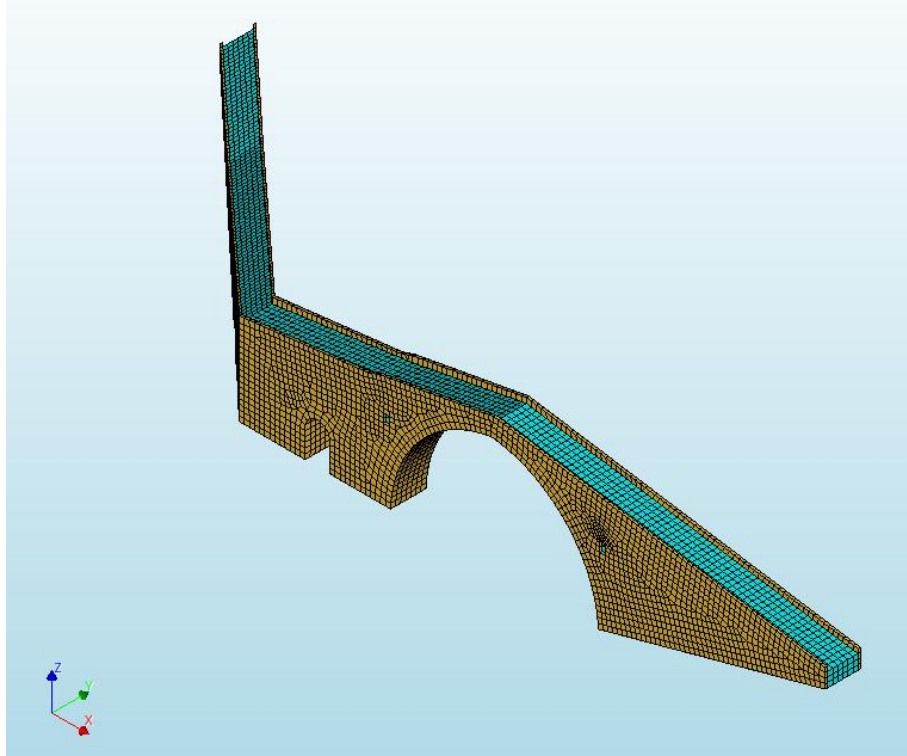
Şekil 4.11. Malabadi Köprüsü katı modeli

Köprü'nün alt zemini ve yan iki yüzü sabit mesnet ile mesnetlenmiştir. Köprüde üç farklı adımda doğrusal olmayan sonlu elemanlar makro analiz yapılmıştır.

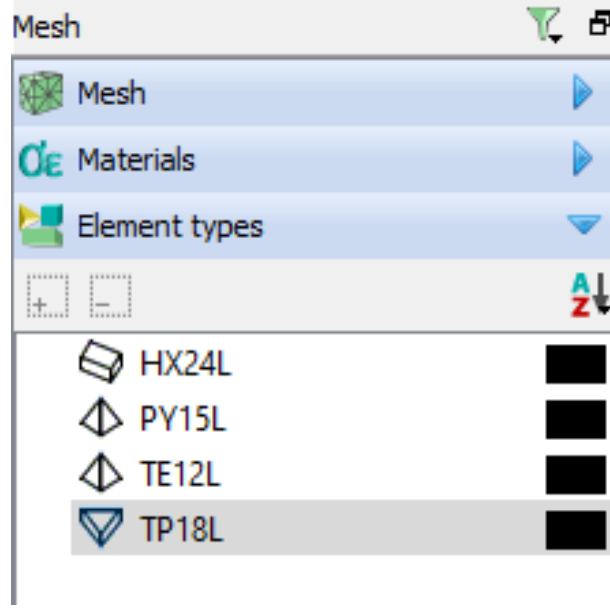
Birinci adımda köprü kendi ağırlığı ölü yük altında, ikinci adımda köprü hareketli yük altında ve üçüncü adımda hem ölü yük hem de hareketli yük altında hesaplama yapılmıştır. Köprü için deprem analizi yapılmamıştır.

Katı model sonlu elemanlar yöntemine göre analiz edileceği için çözüm ağının oluşturulması (meshing) yani elemanların sonlu küçük parçacıkları bölünmesi gerekir. Yapısal analizin uzun süresi ve programsal hataları azaltmak amacıyla ortalama 100 cm ölçülerinde olacak şekilde ağ yöntemi tanımlanmıştır. Programda akıllı ağ yöntemi olması nedeniyle geometride herhangi bir hata olması sonucunda katı model için çözüm ağı oluşmamakta ve bir önceki adıma dönülüp gerekli düzeltmeler yapıldıktan sonra yeni ağ oluşturulmaktadır.

Şekil 4.12’de köprü için oluşturulan çözüm ağı görülmektedir. Bu ağda; dolgu duvar 13994 katı elemana (solid element) ve duvar-harpuşa-kemerler 11965 katı elemana dönüşmüş olup toplam 25965 katı eleman olduğu görülmektedir. Ağ eleman tipleri de; HX24L, PY15L, TE12L ve TP18L’dir (Şekil 4.13). Bundan sonra farklı yükleme durumları için analizler yapılmıştır.

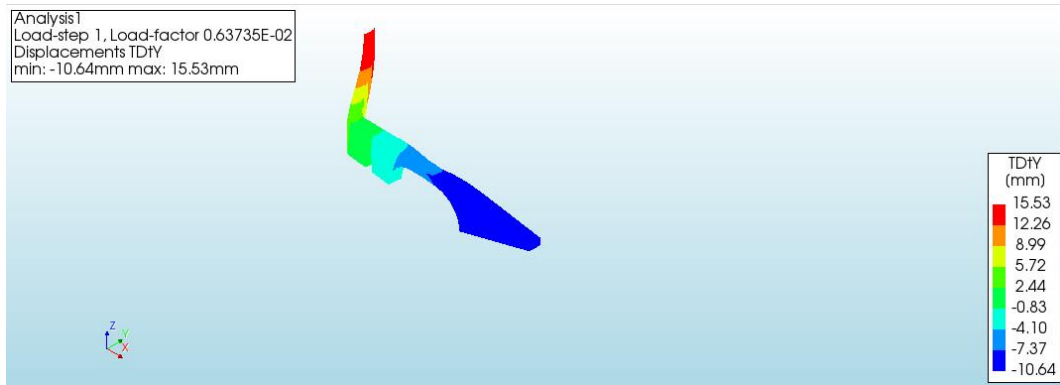


Şekil 4.12. Köprünün ağ elemanlarına ayrılmış durumu

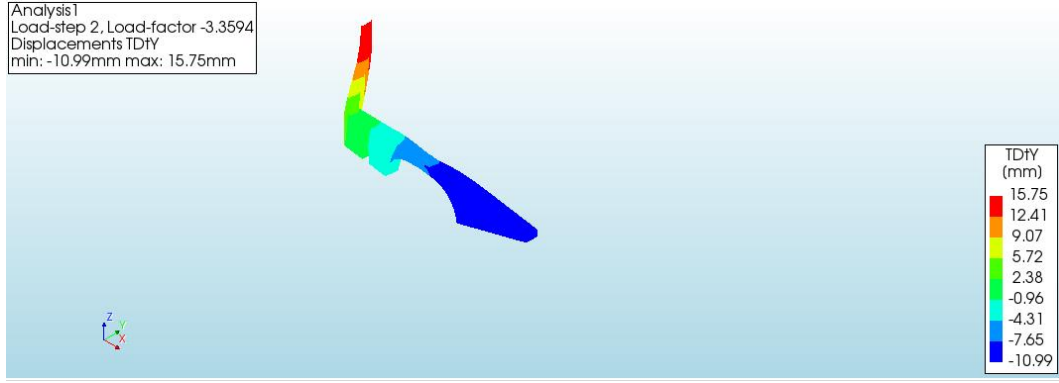


Şekil 4.13. Ağ eleman şekilleri

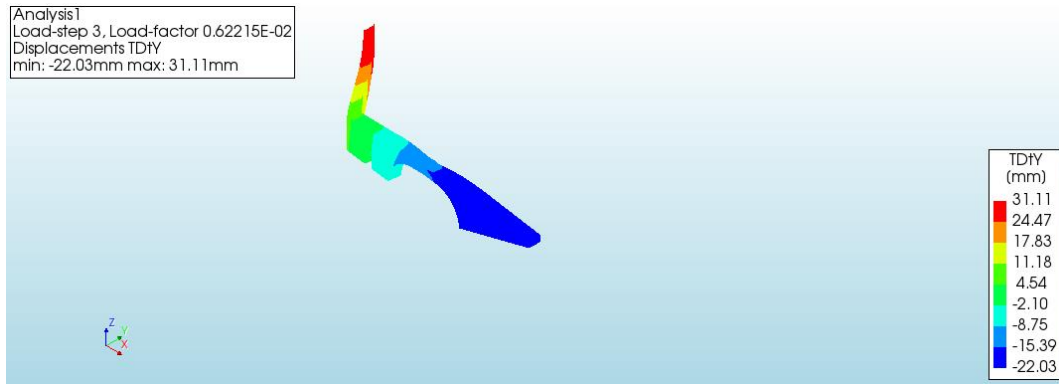
Şekil 4.14'te ölü yük analizi sonucunda düşeyde yer değiştirmenin minimum 10.64 mm ve maksimum 15.53 mm olduğu görülmektedir. Şekil 4.15'te hareketli yük analizi sonucunda düşeyde yer değiştirmenin -10.99 mm ve 15.75 mm arasında olduğu görülmektedir. Şekil 4.16'da ise ölü yük ve hareketli yük birlikte alınmış ve yer değiştirmenin -22.03 mm ve 31.11 mm arasında olduğu ve oluşan deformasyon görülmektedir.



Şekil 4.14. Sabit yük (G) altında dikey yer değiştirme (TDtY)

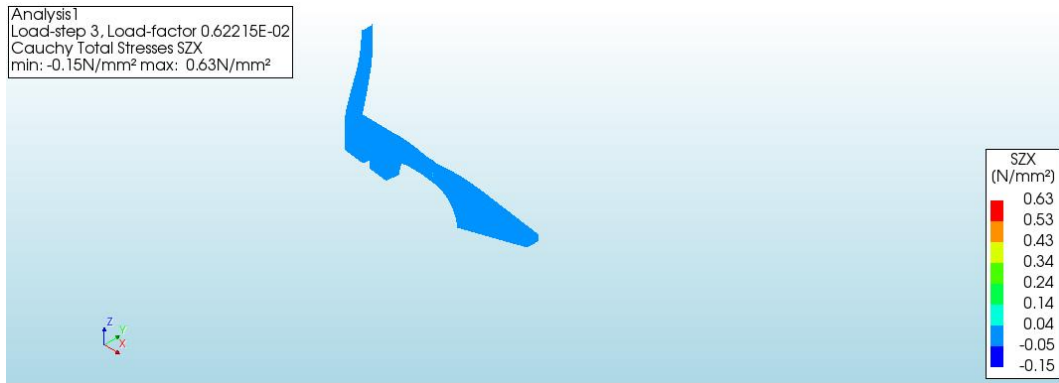


Şekil 4.15. Hareketli yük (Q) altında dikey yer değıştirme (TDtY)

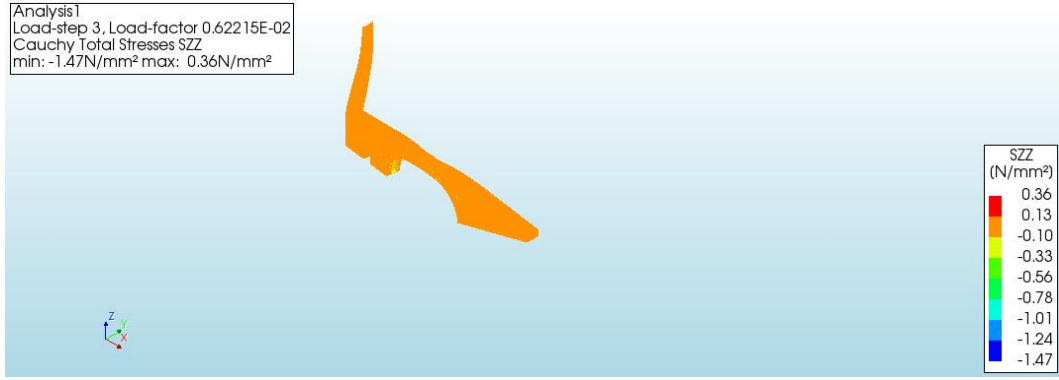


Şekil 4.16. Sabit + hareketli yük (G+Q) altında dikey yer değıştirme (TDtY)

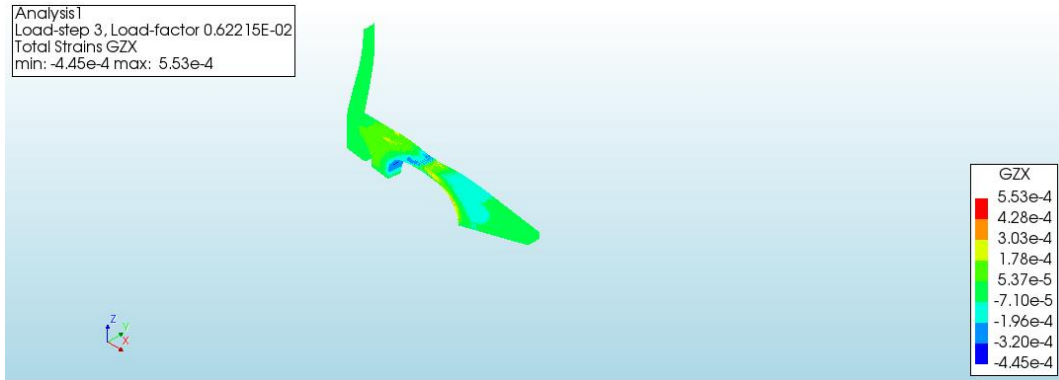
Şekil 4.17’de analiz sonrası min=-0.15 MPa ve max = 0.63 MPa kayma gerilmesi oluşmakta köprünün deforme olmuş hali görülmektedir. Şekil 4.18’de analiz sonrasında dikey gerilim dağılımı min=-1.47 MPa ve max = 0.36 MPa oluşmakta ve köprünün deforme olmuş hali görülmektedir. Şekil 4.19’da analiz sonrasında min=-4.45e-4 ve max = 5.53e-4 gerinim oluşmakta ve köprünün deforme olmuş hali görülmektedir.



Şekil 4.17. Sabit + hareketli yük (G+Q) altında kayma gerilmesi (SZX)

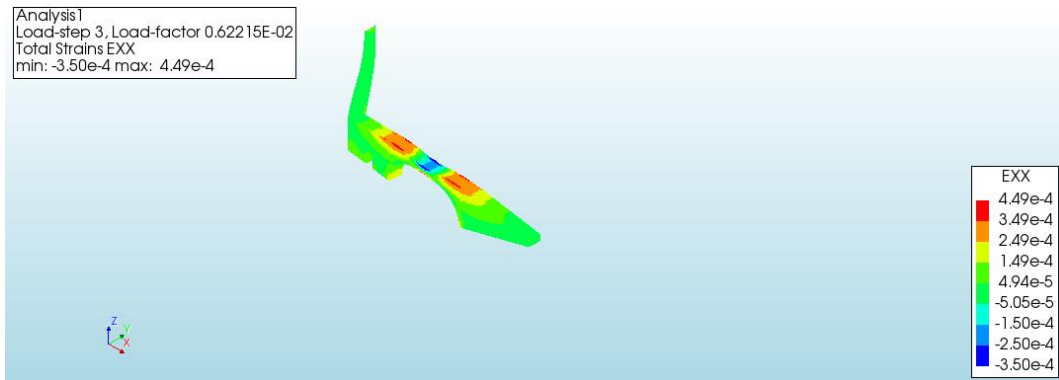


Şekil 4.18. Sabit + hareketli yük (G+Q) altında dikey gerilim dağılımı (SZZ)

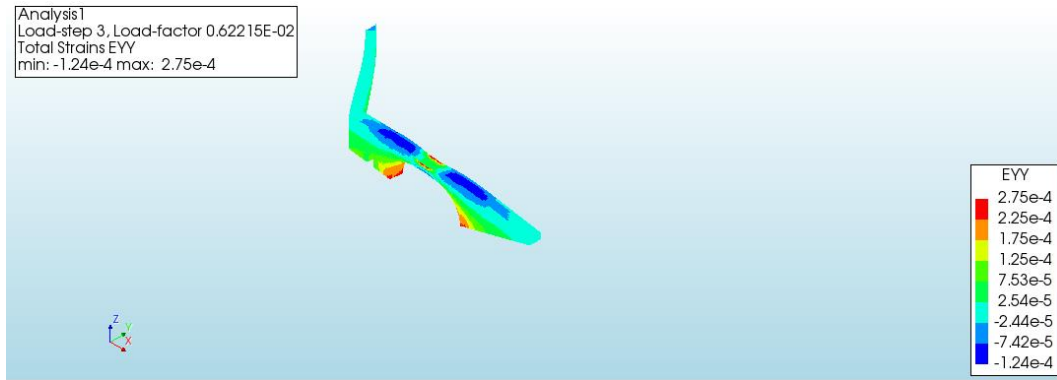


Şekil 4.19. Sabit + hareketli yük (G+Q) altında kayma gerinimi (GZX)

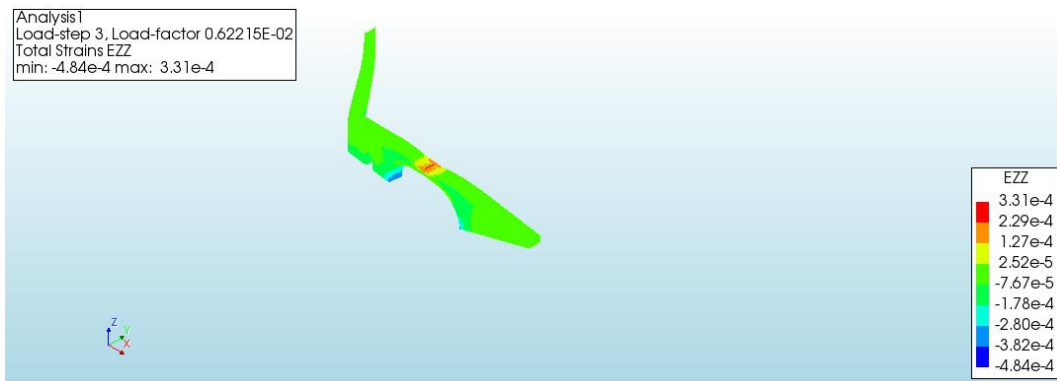
Şekil 4.20’de analiz sonrasında  $\min=-3.50e-4$  ve  $\max = 4.49e-4$  gerinim oluşmakta köprünün deforme olmuş hali görülmektedir. Şekil 4.21’de analiz sonrasında  $\min=-1.24e-4$  ve  $\max = 2.75e-4$  gerinim oluşmakta köprünün deforme olmuş hali görülmektedir. Şekil 4.22’de analiz sonrasında  $\min=-4.84e-4$  ve  $\max = 3.31e-4$  gerinim oluşmakta köprünün deforme olmuş hali görülmektedir.



Şekil 4.20. Sabit + hareketli yük (G+Q) altında x yönünde oluşan gerinim (EXX)



Şekil 4.21. Sabit + hareketli yük (G+Q) altında y yönünde oluşan gerinim (EYY)



Şekil 4.22. Sabit + hareketli yük (G+Q) altında oluşan gerinim (EZZ)

Çizelge 4.6. Analiz sonucunda elde edilen veriler

Yüklem Şekli	TDtX (mm)	TDtY (mm)	TDtZ (mm)	SXX (MPa)	SZX (MPa)	SYZ (MPa)	SZZ (MPa)	EXX (10 <sup>-4</sup> )	EYY (10 <sup>-4</sup> )	EZZ (10 <sup>-4</sup> )	GZX (10 <sup>-4</sup> )
Ölü yük (G)	0.48	15.75	0.04	0.24	0.45	0.17	0.31	2.30	1.39	2.12	3.13
Hareketli yük (Q)	0.52	15.53	0.07	0.09	0.15	0.12	0.13	2.22	1.45	1.55	2.52
Ölü + Hareketli yük (G+Q)	1.00	31.11	0.01	0.26	0.63	0.23	0.36	4.49	2.75	3.31	5.53

Analiz sonucunda Çizelge 4.6 oluşturulmuştur. Dikey yer değiştirme Sabit yük (G) (öz ağırlık) altında 15.75 mm, hareketli yük (Q) altında dikey yer değiştirme 15.53 mm ve sabit + hareketli yük (G + Q) kombinasyonu altında dikey yer değiştirme 31.11 mm olarak gerçekleşmiştir. Bulunan yer değiştirme değerlerine göre köprü statik olarak iyi bir performans sergilemiş ve köprünün geometrisinin mükemmel olduğu sonucuna varılmıştır.

Sabit + hareketli yük (G + Q) altında z yönünde dikey kayma gerilmesi (SZZ) 0.36 Mpa, x yönünde yatay kayma gerilmesi (SXX) 0.26 Mpa ve y yönünde yatay kayma gerilmesi (SYZ) 0.16 Mpa değerinde gerçekleşmiştir. X yatay yönünde oluşan

gerilme değeri ana kemerin üst kısmında döşeme üstünde  $L/3$  açıklığının her iki tarafında gerçekleşmiştir. Y yönünde oluşan gerilme değeri ana kemerin alt başlangıç uçlarında gerçekleşmiştir. Z yönünde oluşan gerilme değeri ana kemer açıklığının  $L/3$  oranının ortasında (ana kemerin kilit taşının etrafında) gerçekleşmiştir.

Sabit + hareketli yük (G + Q) altında z yönünde dikey olarak gerinim değeri (EZZ)  $3.31 \times 10^{-4}$  değerinde gerçekleşmiş, x yönünde yatay gerinim değeri (EXX)  $4.49 \times 10^{-4}$  değerinde gerçekleşmiş ve y yönünde yatay gerinim değeri (EYY)  $2.75 \times 10^{-4}$  değerinde gerinim gerçekleşmiştir. EXX x yatay yönünde oluşan gerinim değeri ana kemerin üst kısmında döşeme üstünde  $L/3$  açıklığının her iki tarafında gerçekleşmiştir. EYY y yönünde oluşan gerinim değeri ana kemerin alt başlangıç uçlarında gerçekleşmiştir. EZZ z yönünde oluşan gerinim değeri ana kemer açıklığının  $L/3$  oranının ortasında (ana kemerin kilit taşının etrafında) gerçekleşmiştir.

Köprü ile ilgili literatürde daha önce yapılan analizlerin sonuçları aşağıda yazılmıştır.

Doğangün ve Ural (2007) Malabadi Köprüsü iki adımda analizini yapmıştır. Doğrusal statik analizden köprünün yapısal formunun mükemmel olduğu bulunmuş, kemer formunda meydana gelen maksimum dikey yer değiştirmeler yaklaşık 9.7 mm olarak bulunmuştur. Öz-ağırlık analizinden elde ettiği sonuçlara göre köprü mükemmel olarak koşullandırılmıştır ve doğrusal olmayan destek hareketinden, ana kemerin orta boşluğunda dikey yer değiştirme 300 mm'den daha fazla meydana geldiğini bulunmuştur.

Demir (2016) Malabadi Köprüsünün analiz sonucu olarak; germe ve basma gerilmeleri (SZZ) her iki model için de 2MPa ve 0.7MPa civarında gerçekleştiğini bulunmuştur. Ana kemer tabanının her iki tarafında 0.8MPa olarak en yüksek sıkıştırma gerilimine sahip olduğunu bulunmuştur. SZX kayma gerilimi ana kemerin batısında 2MPa seviyesine kadar çıkmış, DtX yatay yer değiştirme 14.93 mm ve DtY dikey yer değiştirme 95.71 mm olarak gerçekleştiğini bulunmuştur.

Karaton ve ark. (2017) tarafından D1 ve D2 deprem yükleri altında Malabadi Köprüsü kemer ve köşelik duvarlarında hasar bölgesi oluşmadığını bulunmuştur. Ancak D2 deprem yüklemeleri altında dolgu malzemesinde plastik deformasyonların gerçekleştiğini gözlemlemiştir. Köprüde D3 deprem seviyesi yüklemesi altında hasar çatlama ve ezilme bölgeleri elde edilmiştir. Köprünün mansap yüzündeki ana kemerin sağında ve solunda iki hasar zonu meydana gelmiştir. Bu hasar bölgeleri, ana kemerin akış yönündeki hareketinden dolayı gelişmiştir. Mansap yüzündeki ana kemerin sağ orta bölgesinde ilave bir çatlama zonu belirlenmiştir.

Bayraktar ve ark. (2019) tarafından Malabadi Köprüsünü; kohezyonlu ara yüz kullanarak doğrusal olmayan sismik tepkisini hesaplamalı olarak incelemiştir. Yığma köşelik duvarların ara yüzey etkileşimleri ile düzlem dışı tepkilerinin enine deprem kuvvetlerine karşı çok hassas olduğu, analizlerde köşelik duvarlar ile dolgu ve kemer arasındaki ara yüzey etkileşimlerinin dikkate alınması önermiştir.

Yapılan analize göre bulunan değerler ile literatürlerde köprü ile ilgili analiz yapan; Doğangün ve Ural (2007), Demir (2016) ve Karaton ve ark. (2017)'un bulmuş olduğu değerlere göre kısmi olarak biraz farklılıklar göstermektedir. Bu farkların olmasının nedenleri aşağıda maddeler halinde yazılmıştır.

- 1) Köprünün ana kemer açıklığı gerçek değeri olan 40.87 m yerine 38.6 m olarak alınmıştır.
- 2) Analizlerde kullanılan programların kurucu modellerinde bazı farklılıklar bulunmaktadır.
- 3) Analizlerde deprem performansı da dikkate alınmıştır.
- 4) Analizlerde kullanılan malzemelerin elastisite modülleri, Poisson oranı, sürtünme açıları ve diğer parametrelerin özelliklerinde farklılık vardır.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Malabadi Köprüsü yaklaşık olarak 876 yıl kadar bir yaşa sahip olması, günümüze kadar sağlam bir şekilde ayakta kalmış olması ve Dünya kültür mirasına aday olabilecek nitelikte olması nedeniyle köprü her kesimin ve meslek grubunun ilgi odağı ve araştırma kütüphanesi olmuştur. Köprü tarihsel süreçte misyon ve vizyonunu iyi bir şekilde sergilemiştir. Bu tez çalışmasında ilk olarak; köprünün tarihsel serüveni ve mimari fonksiyonları literatür ve ustalık bağlamında değerlendirilmiştir. Daha sonra kemer teorisinin tarihsel boyutu incelenerek günümüzde yığma yapılar için sıklıkla kullanılan limit analiz ve doğrusal olmayan sonlu elemanlar makro analizi yöntemleri ile analizler yapılmıştır.

### 5.1. Mimari Açıdan Sonuçlar

Tarihi Malabadi Köprüsü ana kemer açıklığının büyüklüğü, köprü ayaklarının altında bulunan odacıkların fonksiyonelliği ve stratejik olarak konumu birçok açıdan diğer köprülere göre farklılık arz etmektedir. Köprünün ana kemer formu Dicle ve Hasankeyf formuna yakın olup ancak planda üç adet kıvrım ve daha geniş açıklıklı kemeri nedeniyle diğer köprülere nazaran daha ihtişamlı ve zarafetlidir. Köprüde yer alan heykel ve figürler Artuklu devrinden kalma olup her figürün o günkü şartlarda bir takım anlam ve manalara bağlı olarak yapılmış olduğu düşünülebilir. Köprü Evliya Çelebi gibi ünlü seyyahın bile dikkatini celb etmiş ve köprü hakkında övgülerden bahsetmiştir.

Köprü planının zamanında üç kırık çizgi şeklindeki bir formda yapılmış olması askerî açıdan stratejik bir fonksiyon amacını icra etmek için inşa edilmiş olma ihtimalini arttırmaktadır.

Karayolları Genel Müdürlüğünce 1955 yılında Malabadi Köprüsü'nün yanında kemerli bir betonarme köprü inşa ettikten sonra köprü koruma altına alınmış ziyaretçilerine yaya olarak gezme imkânı tanımaktadır.

Malabadi Köprüsü her taş köprüsü gibi yıllar boyunca onarım ihtiyacı duymuştur. Nehir yatağının aşındırıcılığı sonucu köprüde oluşan zararlar, çevresel faktörlerin etkisi ile köprü sürekli onarım görmek zorunda kalmıştır, ileriki yıllarda da onarım ve restore ihtiyacı duyacaktır. Önemli olan bu yapıların hangi metot ve yöntemlere göre nasıl restore edileceğinin bilimsel olarak bilinmesidir. Aksi takdirde köprüde daha önce yapılmış olan onarım çalışmaları gibi köprüye zarar vermenin dışında başka bir şey yapılmayacaktır.

Cumhuriyet döneminde köprüde yapılan yanlış onarımlar sonucunda köprünün ana yüzey taşlarında bir takım bozulmalar gerçekleşmiş olup bundan ders çıkarılarak eski yapılarda yapılacak olan onarım ve restore çalışmalarında daha dikkatli ve işin uzmanlarınca yaptırılması daha doğru ve yerinde olacaktır.

En son yapılan restore ve onarım sonucunda köprü hak ettiği yere ve konuma ulaşmıştır.

Yaklaşık dokuz asırdır ayakta duran ve tarihin çeşitli savaşlarına, doğal afetlerine ve her anına tanıklık eden bu köprünün sağlam ve ayakta durması günümüze ulaşmış en önemli miraslar arasında değerlendirilebilir. Bize düşen bu mirası turizme anlamlı bir şekilde kazandırmak ve gelecek nesillere sağlam bir şekilde teslim etmek olmalıdır.

## **5.2 Yapısal Analiz Sonuçları**

### **5.2.1 Limit Analiz Sonuçları**

Veri eksikliği olduğu zamanlarda kemer sisteminin çökme tahmininde tercih edilen limit analiz yöntemi kullanılarak, Malabadi Köprüsünün yapısal analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda sistemde çökmeye esas altı farklı menteşe oluşmuştur. Analiz sonucunda maksimum dolgu yatay kuvveti, dolgu yatay kuvveti ve dolgu yatay gerilme kuvveti değerleri köprüye uygulanan yükleme altında değişmemiştir.

Dörtte bir açıklıkta uygulanan yükleme arttıkça yatay yer değiştirme değeri azalmıştır. Maksimum yatay yer değiştirme ikinci menteşenin üst kısmında, maksimum dikey yer değiştirme üçüncü menteşenin alt kısmında, gerçek dolgu kuvveti (akma değeri) üçüncü menteşenin üst kısmında, gerçek dolgu gerilme değeri üçüncü menteşenin üst kısmında, gerçekleşmiştir. Kemerin maksimum göçme yükü altıncı menteşenin alt kısmında ve en büyük dönme değeri ikinci menteşenin üst kısmında gerçekleşmiştir.

Limit analize göre köprüde yer alan ana kemerin sağ ve solunda bulunan yan destek duvarlarının geniş olması nedeniyle zeminde menteşe oluşmamıştır.

Analizler sonucunda kemerin çökme yükü 0.7 MPa ve doğrusal olmayan sonlu elemanlar makro analiz yönteminde bulunan maksimum gerilme değeri 0.36 MPa olup yaklaşık limit değerinin yarısı oranında gerçekleşmiştir.

Sonuç olarak Malabadi Köprüsü 9 asır kadar bir zamanda sağlam olarak ayakta duruyor olması Heyman'ın 5 dakikalık kuralını hatırlamamıza neden olmaktadır. Dünyada en geniş açıklığa sahip olan yığma kemer köprüsü ayakta durmasının temel nedeni Heyman'ında dediği gibi merkezlemesi kaldırılan köprüde menteşe sistemi

çalışmaya başlayacak ve ilk zamanlarda köprü yıkılmadıkça ileriki yıllarda ayakta kalma şansı artacaktır.

### 5.2.2. Doğrusal Olmayan Yapısal Analiz Sonuçları

Öz ağırlık ve hareketli yükleme altında köprü statik olarak iyi bir performans sergilemiş ve köprünün geometrisi mükemmel olduğu sonucuna varılmıştır.

Analiz sonucunda hesaplanan gerilme-gerinim değerleri çok düşük olup zaten taş malzeme sonsuz basınç dayanımının yanında çekme gerilmesinin olmadığı veya çok az olduğu bilinmektedir. Yatay yönünde oluşan gerinim değerleri ana kemerin üst kısmında döşeme üstünde L/3 açıklığının her iki tarafında ve ana kemerin alt başlangıç uçlarında gerçekleşmiştir. Dikey yönde oluşan gerinim değerleri ana kemer açıklığının L/3 oranının ortasında (ana kemerin kilit taşının etrafında) gerçekleşmiştir.

Sonlu elemanlar makro analiz yöntemi ile yapılan analize göre köprüde hesaplanan yer değiştirmeler, gerilme değerleri ve gerinim değerleri literatürde analizleri yapılan yığma kemerlerde izin verilen güvenlik sınırlarında kalmıştır. Köprü kendi ağırlığı ve ziyaretçilerinin ağırlığı altında herhangi bir tehlike ile karşı karşıya kalmayacaktır.

### 5.3 Öneriler

Yığma yapılarda dikey ve yatay bağlantı elemanları olan kenet ve zıvanaların dikkate alındığı bir matematiksel modelin geliştirilmesi ileride yapılacak olan çalışmalardandır.

## KAYNAKLAR

- Altunışık, A. C., Kanbur, B. and Genç, A. F., 2015, The effect of arch geometry on the structural behavior of masonry bridges. *Smart Structural System*, 16 (6), 1069-1089.
- Anonim, 2012, İslâm Ansiklopedisi, Cilt 42, *TDV Yayın Evi*, İstanbul, 421-423.
- Anonim, 2013, Taşın Mimaride Kullanımı, *MEB Yayınları*, Ankara, 76.
- Anthoine, A., 1997, Homogenization of periodic masonry: plane stress, generalized plane strain or 3d modelling? *Communications in Numerical Methods in Engineering*, (13), 319-326.
- AutoCAD, Version 2020, Autodesk Computer Aided Design User Manual, Student version.
- Bayraktar, A., Hökelekli, E., Halifeoğlu, M., Halifeoğlu, Z., and Ashour, A., 2019, Out-of-plane seismic failure assessment of spandrel walls in long-span masonry stone arch bridges using cohesive interface. *Earthquakes and Structures*, 18 (1), 83-96.
- Brencich, A. and Morbiducci, R., 2007, Masonry Arches: Historical Rules and Modern Mechanics. *International Journal of Architectural Heritage*, 1 (2), 165-189.
- Chai, S., 2020, Finite Element Analysis for Civil Engineering with DIANA Software, *Nanjing University Press*, First Press, China, 1-2.
- Çetin, A., 2021, Kesme yontu taşından geleneksel yöntemlerle yığma yapılar nasıl yapılır? ve örnek uygulama, *Yüksek Lisans Seminer Notu*, Batman, 26-30.
- Çetin, D., 2021, Sözlü konuşma.
- Çulpan, C., 2002, Türk Taş Köprüleri, *TTK Basım Evi*, İkinci Baskı, Ankara, 5-205.
- De Luca, A., Giordano, A. and Mele, E., 2004, A simplified procedure for assessing the seismic capacity of masonry arches. *Engineering Structures*, 26 (13), 1915-1929.
- Demir, A., 2016, Structural investigation of masonry stone arch bridges, M.Sc. Thesis, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Mühendisliği ve Teknoloji Enstitüsü*, İstanbul, 29-93.
- DIANA FEA BV, Version 2019, DIANA Finite Element Analysis User Manual. Delph: Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek.

- Doğangün, A. and Ural A., 2007, Characteristics of Anatolian stone arch bridges and a case study for Malabadi Bridge, *ARCH'07-5th International Conference on Arch Bridges 2007*, Portugal, 179-186.
- Erdoğan, S. T. ve Erdoğan, T. Y., 2007, Bağlayıcı malzemelerin ve betonun on bin yıllık tarihi, *ODTU Yayıncılık*, Ankara, Birinci Baskı, 7-8.
- Eurocode 6., 1996, Design of masonry structures, *European Union*, Brussel, Belgium.
- Evliya Çelebi, (Ed.), 2001, Evliya Çelebi Seyahatname (Günümüz Türkçesiyle Evliya Çelebi Seyahatnamesi: Bağdad - Basra - Bitlis – Diyarbakır İsfahan - Malatya - Mardin – Musul Tebriz – Van), Dördüncü Kitap, Cilt:I, Çeviren: Seyit Ali Kahraman-Yücel Dağlı, *Yapı Kredi Yayınları*, İstanbul, 113-115.
- Frunzio, G., Monako, M. and Gesualdo, A., 2001, 3D F.E.M. analysis of a Roman arch bridge, *Historical Constructions 2001*, Guimarães, 581-598.
- Gabriel, A. (Ed.), 2014, Şarki Türkiyede arkeolojik geziler, Çeviren: İdil Çetin, *Dipnot Yayınları*, Ankara, 55-205.
- Gilbert, M., 2007, Limit analysis applied to masonry arch bridges: State-of-the-art and acent developments, *5th International arch bridges conference 2007*, Portugal, 13-28.
- Giordano, A., Mele, E. And De Luca, A., 2002, Modelling of historical masonry structures: Comparison of different approaches through a case study. *Engineering Structures*, 24 (8), 1057-1069.
- Gordon, J. E., 2003, Structures or Why things don't fall down, *Da Capo Press*, London, Second Press, 32-155.
- Halifeoğlu, F. M., Noyan, C., Halifeoğlu, Z., 2017, Tarihi Malabadi Köprüsü'nün restorasyon çalışmasında kullanılan iskele sisteminin özellikleri ve korumadaki önemi, *Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu 2017*, Trabzon, 579-587.
- Hasol, D., 2020, Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü, *YEM Yayınları*, İstanbul, 17. Baskı.
- Heyman, J., 1982, The masonry arch, *Ellis Horwood Limited*, New York, First Edition, 41-80.
- Heyman, J., 1995, The stone skeleton, *Cambridge Universty Press*, New York, First Edition, 33-161.
- Heyman, J., 1998, Structural analysis a historical approach, *Cambridge Universty Press*, New York, First Edition, 34-169.

- Heyman, J., 2006, The science of structural engineering, *Imperial College Press*, London, Secon Edition, 19-99.
- İbnu'l-Ezrak, (Ed.), 1992, Meyyâfârikîn ve Âmid Târihi, Çeviren: Ahmet Savran, *Atatürk Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Yayın Evi*, Erzurum, 76.
- Karaton, M., Aksoy, H. S., Sayın, E., and Calayır, Y., 2017, Nonlinear seismic performance of a 12th century historical masonry bridge under different earthquake levels. *Engineering Failure Analysis*, 79, 408-421.
- Kasımzade, A. A., 2018, Sonlu elemanlar metodu temelleri ve yapı mekaniğinde uygulamaları, *Nobel Yayınları*, Ankara, Üçüncü Baskı, 1-2.
- KGM, 2009, Tarihi Malabadi Köprüsü Restitüsyon Proje ve Teknik Raporu, *Yayınlanmamış Teknik Rapor, Kgm Arşivi, Arşiv Kayıt No: B.09/İ.21/N.01/RUP-2009*, Ankara, 10-24.
- Konyar, B., 1936, Diyarbekir Kitabeleri, Cilt:II, *Ulus Basımevi*, Ankara, 322-325.
- Kuban, D., 1978, 100 Soruda Türkiye Sanatı Tarihi, *Gerçek Yayınevi*, İstanbul, Üçüncü Baskı, 10-150.
- LimitState RING(3.1), Version 2022, Theory and modelling guide. Sheffield UK.
- Lourenço, P. B., 1995, Two approaches for the analysis of masonry structures: micro and macro-modeling. *Heron*, 40 (4), 314-340.
- Lourenço, P. B., 1998, Experimental and numerical issues in the modelling of the mechanical behaviour of masonry, *International Center for Numerical Methods in Engineering, Structural analysis of historical constructions II 1998*, Barcelona, 57-91.
- Lourenço, P.B., 2002, Computations of historical masonry constructions. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4 (3), 301-319.
- Lourenço, P. B., 2021, Finite Elements in Civil Engineering Applications. Hendriks, M.A.N ve Rots J.A. (Ed.), *Guidelines for the analysis of historical masonry structures*. (s.241-249). London: CRC Press.
- Milani, G. and Lourenço, P. B., 2012, 3D non-linear behavior of masonry arch bridges. *Computers and Structures*, 110-111, 133-150.
- Mungan, M. E., 2020, Mardin ve yöresi yığma yapılar resim arşivi.
- Oğuz, B., 2001, Türkiye Halkının Kültür Kökenleri, *Anadolu Aydınlanma Vakfı Yayınları*, İstanbul, Cilt:III, 103.

- Ordunã, A. and Lourenço, P. B., 2003, Cap model for Limit Analysis and strengthening of masonry structures. *Journal of Structural Engineering*, 129 (10), 1367-1375.
- Özkaya, S. G., 2019, Yığma Köprülerin Deprem Davranışlarının Doğrusal Olmayan Statik Yöntemlerle Tahmini, Doktora Tezi, *Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 14-15.
- Partal, E.M., Demirci, H., Avşın, A., Nas, M., Turan, S., 2015, Tarihi Malabadi (Batman Su) Köprüsü'nde Yürütülen Restorasyon-Konservasyon Çalışmaları, 5. *Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 2015*, Erzurum, 143-153.
- Pegon, P. and Anthoine, A., 1994, Numerical strategies for solving continuum damage problems involving softening: application to the homogenization of masonry. *Prepared for the Second International Conference on Computational Structures Technology*, Italy, 1-16.
- Rots, J. G., (1991), Numerical simulation of cracking in structural masonry. *Heron*, 36 (2), 49-63.
- Toker, S. and Ünay, A. İ., (2004), Mathematical modeling and finite element analysis of masonry arch bridges. *Gazi University Journal of Science*, 17 (2), 129-139.
- Ural, A., Oruç, Ş., Doğangün, A., and Tuluk, Ö. İ., (2008), Turkish historical arch bridges and their deteriorations and failures. *Engineering Failure Analysis*, 15 (1), 43-53.
- Yazır, E. H., 2007, Kur'an yolu Türkçe meal ve tefsir, Cilt:II, *Diyanet Yayınları*, Ankara, Üçüncü Baskı, 549.
- Yılmaz, P., 2006, Tarihi Yapıların Modellenmesi Ve Deprem Güvenliklerinin Belirlenmesi, Yüksek lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 18.
- Zampieri, P., Zanini, M. A., and Modena, C., 2015, Simplified seismic assessment of multi-span masonry arch bridges. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13 (9), 2629-2646.
- Zucchini, A. and Lourenço, P.B., 2002, A micro-mechanical model for the homogenisation of masonry. *International Journal of Solids and Structures*, 39 (12), 3233-3255.

## EKLER

### EK-1 SÖZLÜK

**Anizotropik:** Bir malzemenin mekanik, fiziksel, termal ve elektriksel özellikleri materyal içindeki her yönde farklı ise bu malzemeye anizotropik denir.

**Bağlayıcı malzeme:** Bir malzemenin harç malzemesi ile birleştirilmesi işlemine denir.

**Basık kemer:** Merkezi açıklığın yarısından daha az olan kemer formu.

**Bazalt taşı:** Feldispalt asıllı, çok yoğun ve yüksek dayanımlı, az çok koyu renkte bir çeşit yanardağ külesinden yapı malzemesi olarak kullanılan taş.

**Beşik tonoz:** Tam yuvarlak kemer formunun ötelenmesiyle oluşan örtüye denir.

**Cumba:** Eski Türk evlerinde zemin katının üzerindeki katlarda dışa taşan, çoğu kafesli oda bölümü, çıkma, şahniş.

**Çift cidarlı duvar:** Her iki yüzü yatayda ve dikeyde terazide olacak şekilde örülen ve arasındaki dolgusu topraktan veya moloz taştan olan yığma duvara denir.

**Elastik:** Bir cisme yük uygulanıp kaldırıldıktan sonra eski haline dönmesi olayıdır.

**Harpuşta köprü:** Üstü harpuşta biçiminde eğik ya da yuvarlak olan, tek gözlü kemerli köprü.

**Harpuşta:** Dış etkilere açık duvarların üstünü örterek yağmur ve kar sularını yan taraflara akıtan eğimli kapak taşı.

**Hava bağlayıcı:** Atmosferde hava koşullarına bağlı olarak yıllarca sertleşen harçlardır. Örneğin; kireç harçları hava bağlayıcı malzemelerdir.

**İzotropik:** Bir malzemenin mekanik, fiziksel, termal ve elektriksel özellikleri her yönde bağımsız ise bu malzemeye izotropik denir.

**Kalker taşı:** Maden ocaklarından çıkarılan ve yapılarda yapı malzemesi olarak kullanılan kimyasal bileşimi  $CaO_3$  olan kireçli taşta kalker taşı denir.

**Kemer:** Herhangi bir eğrisel forma kemer denir.

**Kenet:** Yığma taş yapılarda yatayda iki taşın ucu kıvrılmış olan demir lama ile bağlanmasına denir.

**Kesme taş:** Dikdörtgenler prizması biçiminde olan taş, bütün yüzeyleri projesine göre düzgün ve geometrik şekilde yontulmuş taş.

**Kilit taşı:** Kemer, kubbe ve tonozların tepe noktalarına konan, örgüyü kilitleyerek üstüne gelen ağırlığı yanındaki taşlara aktaran taş, anahtar taşı

**Korniş:** Bir binanın yüzünde üst kenarı sınırlamak, katları birbirinden ayırmak veya bir kemerin yüzünde yay boyunca yapılmış profilli çıkıntı.

**Kubbe:** Bir kemer yayının tepe noktasından inen dikin çevresinde dönmesiyle meydana gelen örtü.

**Küresel-bingi (pandantif):** Bir kubbeyi taşıyan kemerler ile kubbe kaidesinin arasını ve kare bir plandan kubbenin dairesel kaidesine geçmeyi sağlayan küresel üçgen.

**Limit analiz:** Plastik teori esas alınarak bir kemerin dörtte bir açıklığında uygulanan yük altında çökme mekanizması oluşması için oluşan menteşelerde meydana gelen kesit tesirleridir.

**Lineer elastik analiz:** Taşıyıcı herhangi bir sisteme elastik teori esas alınarak malzemenin izotropik olarak davranış sergileyeceği varsayımı yapılarak yük altında sistemin taşıma gücünün hesaplanması işlemidir.

**Mansap:** Suyun gittiği taraf (ön kısım) denir.

**Memba:** Suyun geldiği taraf (arka kısım) denir.

**Merkezleme:** Herhangi bir açıklıktaki kemerin eğri formuna göre yapılabilmesi için gereken kalıbın yapılması işlemidir. (Kalıp; tahtadan veya demir doğramadan yapılabilir.)

**Moloz duvar:** Ocaktan ilk olarak çıkan ve herhangi bir işleme tabi tutulmadan örülen taş duvarlardır.

**Niş:** Yiğma yapılarda kalın duvarların içerisinde iç tarafta yapılan genellikle üzeri kemerli bazen de düz lento ile geçilen gömme boşluk. (Bu tanım benim tarafımdan yapılmıştır.)

**Nonlineer elastik analiz:** Taşıyıcı herhangi bir sisteme elastik teori esas alınarak malzemenin anizotropik olarak davranış sergileyeceği varsayımı yapılarak yük altında sistemin taşıma gücünün hesaplanması işlemidir.

**Plastik:** Bir cisme yük uygulanıp kaldırıldıktan sonra eski haline dönmemesi olayıdır.

**Restorasyon projesi:** Aslına uygun yapının onarımının yapılması maksadıyla çizilen proje.

**Sağır kemer:** Bir duvar gibi doldurulmuş ve bu yüzden içinden yürüyerek geçmenin mümkün olmadığı süsleme kemerine verilen isimdir.

**Selyaran:** Köprü ayaklarında, basıncı azalmak için suyun geldiği ve gittiği yönlere doğru yapılan gemi burnu biçimindeki çıkıntıya denir. Diğer adı mahmuzdur.

**Silme:** Duvar, tavan, kapı pencere, yazıtlık gibi öğeleri çevrelemek için düz ya da eğri profilde kabartmalı olarak yapılan, çubuk biçiminde sürekli bezeme ögesine denir.

**Sivri kemer formu:** Yarıçapı kemer açıklığının yarısından büyük olan ve kilit noktasında birleşen iki daire yayından oluşan kemer formu.

**Tam yuvarlak kemer formu:** Merkezi açıklığın yarısı kadar olan kemer formu.

**Tonoz:** Geometrik olarak bir kemerin ötelenmesiyle meydana gelen örtü, yarım silindir biçimdeki tavan.

**Tonoz-bingi (tromp):** Bir bina köşesine bindirmeli olarak örülen tonoz parçası.

**Yapısal analiz:** Taşıyıcı bir sisteme belirli yükler altında performansının değerlendirilmesi işlemine denir.

**Yığma yapı:** Taş, tuğla, briket veya benzeri malzeme ile yapılan ve ana taşıyıcı elemanları duvarlar olup yapıya etkiyen yükleri emniyetli bir şekilde zemine aktarabilme kabiliyetine sahip olan yapılardır.

**Zıvana:** Yığma yapılarda taşları dikeyde birleştiren lama demiri.

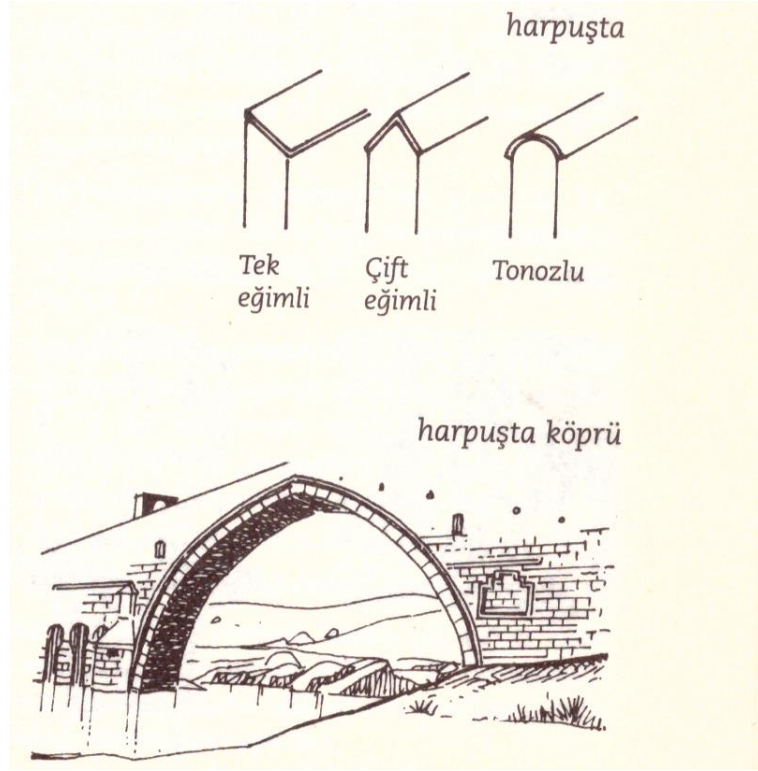
## EK-2 Köprü İle İlgili Resim Arşivi



Şekil Ek 2.1. Malabadi Köprüsü memba cephesi (Gabriel, 2014)



Şekil Ek 2.2. Malabadi Köprüsü memba cephesi (Gabriel, 2014)



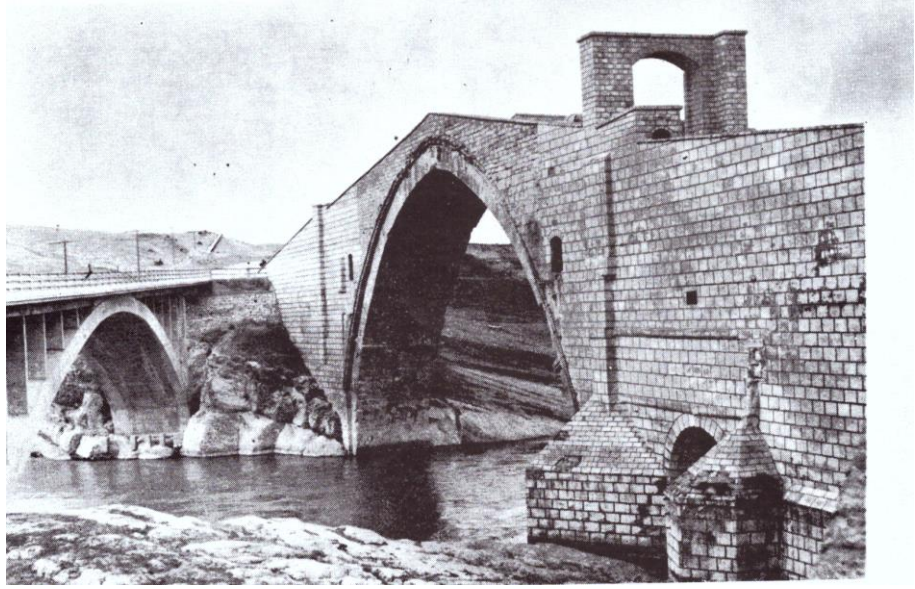
Şekil Ek 2.3. Harpušta köprüye örnek Malabadi Köprüsü (Hasol, 2020)



Şekil Ek 2.4. Malabadi Köprüsü ve hemen yanındaki betonarme köprü



Şekil Ek 2.5. Malabadi Köprüsü memba cephesi (Çulpan, 2002)



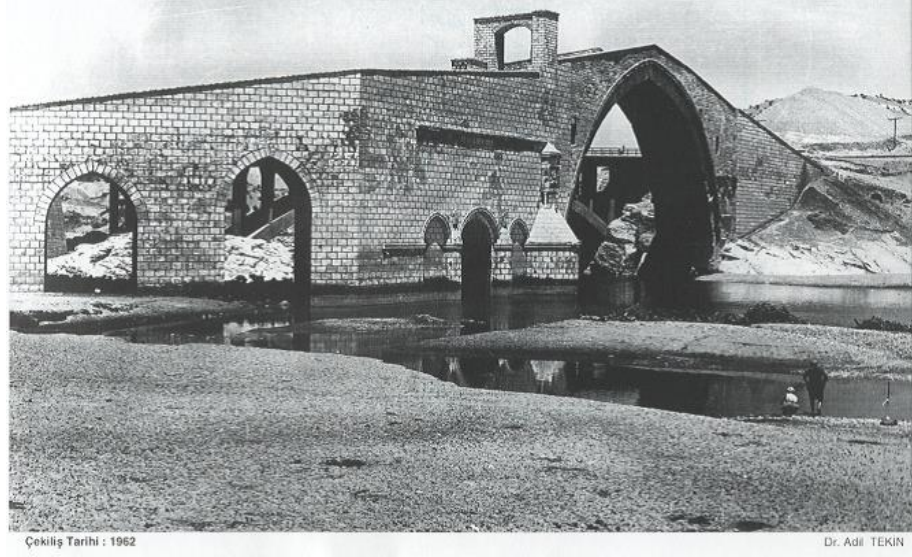
Şekil Ek 2.6. Malabadi Köprüsü mansap cephesi (Çulpan, 2002)



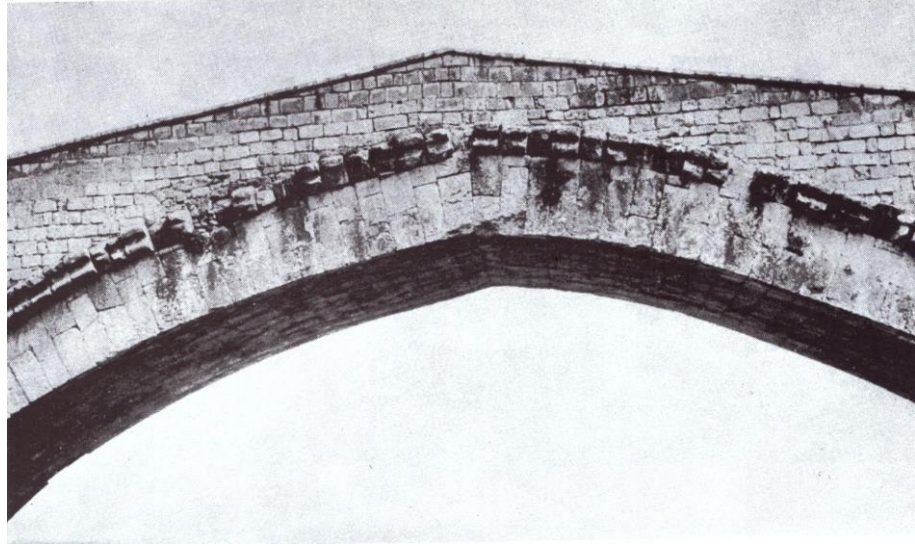
Şekil Ek 2.7. Malabadi Köprüsü memba cephesi (Çulpan, 2002)



Şekil Ek 2.8. Malabadi Köprüsü 1952 yılı öncesine ait görüntü (KGM, 2009)



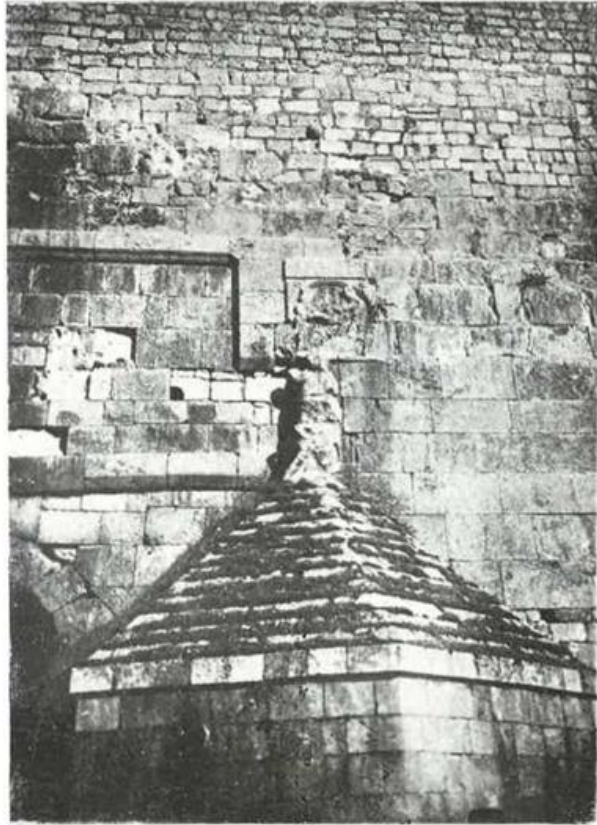
Şekil Ek 2.9. 1962 yılında Malabadi Köprüsü'nün mansap cephesi (KGM, 2009)



Şekil Ek 2.10. Malabadi Köprüsü kemeri çevresinde taş dizileri (Çulpan, 2002)



Şekil Ek 2.11. Malabadi Köprüsündeki figürler (Çulpan, 2002)



Şekil Ek 2.12. Malabadi Köprüsündeki figürler (Konyar, 1936)



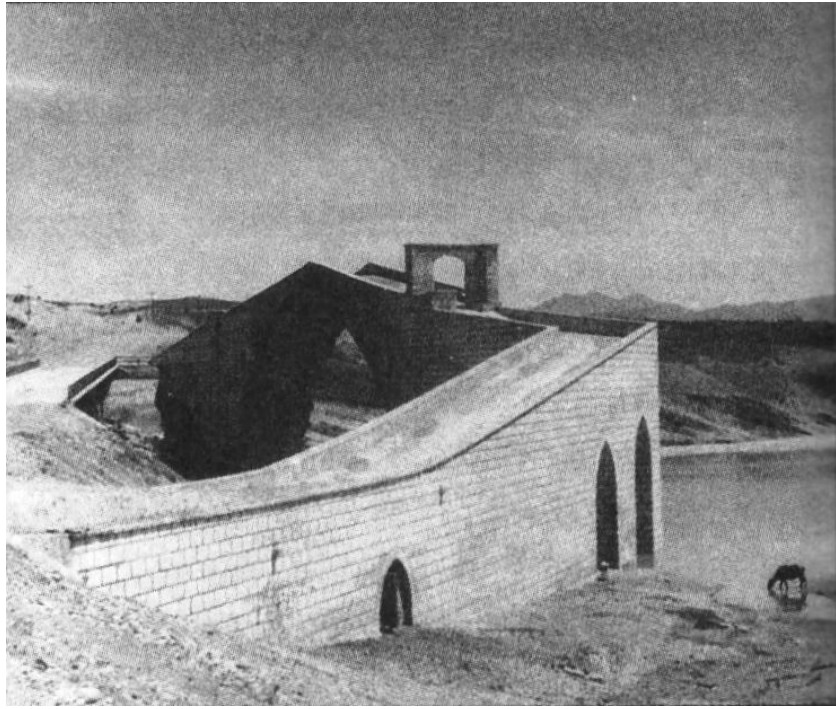
Şekil Ek 2.13. Malabadi Köprüsündeki figürler (KGM, 2009)



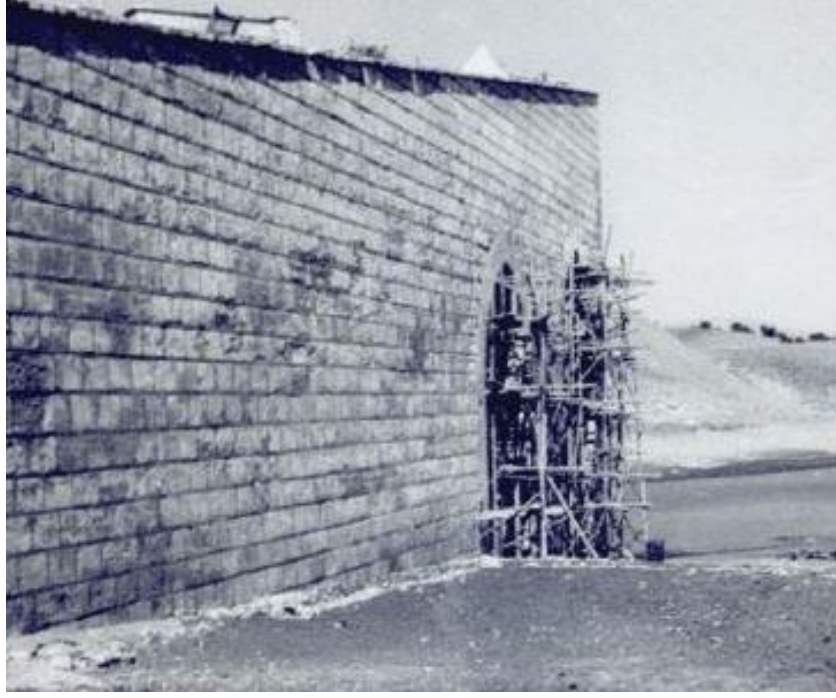
Şekil Ek 2.14. Malabadi Köprüsündeki topuğun üstündeki figürler (KGM, 2009)



Şekil Ek 2.15. Malabadi Köprüsü mansap cephesi (Oğuz, 2001)



Şekil Ek 2.16. Malabadi Köprüsü memba cephesi (Oğuz, 2001)



Şekil Ek 2.17. Malabadi Köprüsü memba cephesi 1954 yılı onarım (KGM, 2009)



Şekil Ek 2.18. Malabadi Köprüsü mansap cephesi 1954 yılı onarım (KGM, 2009)



Şekil Ek 2.19. Restore öncesi döşeme üzerine atılan beton örtüsü (KGM, 2009)



Şekil Ek 2.20. Köprüde 1985 yılında yapılan onarım (KGM, 2009)

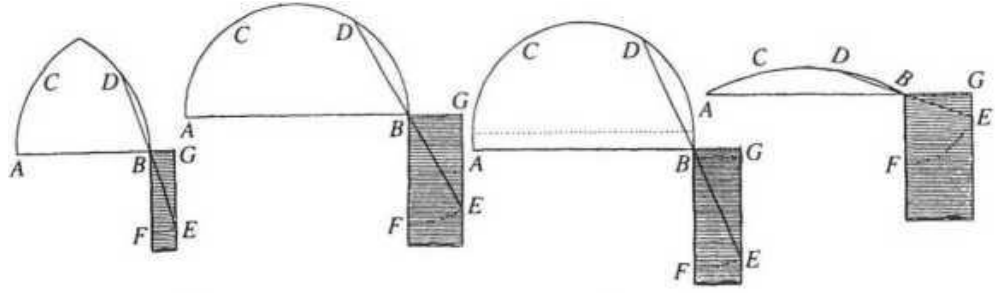


Şekil Ek 2.21. Ana kemer için yapılan iskele sistemi (Halifeoğlu ve ark., 2017)

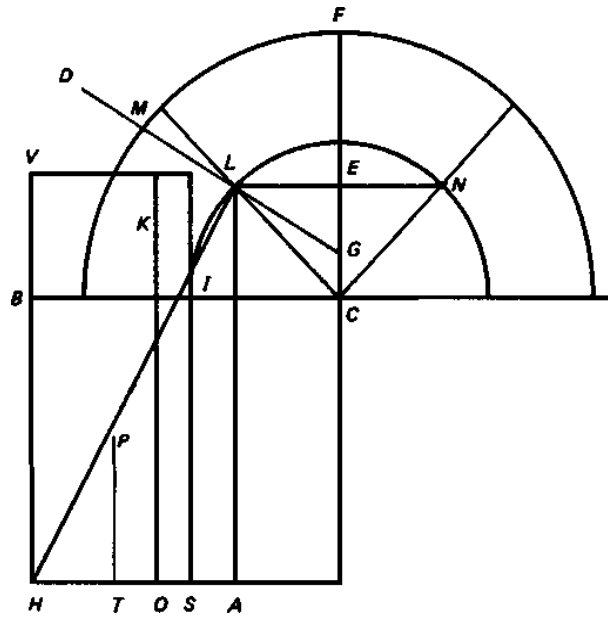


Şekil Ek 2.22. Restore sonrası köprünün mansap cephesi.

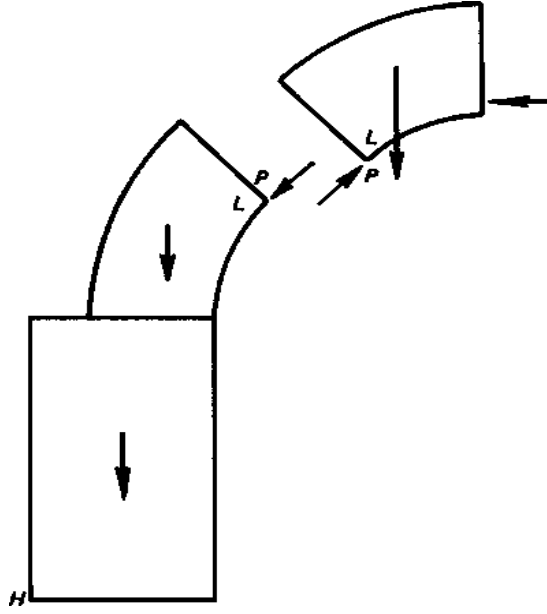
### EK-3 Yapısal Analizin Tarihsel Sürecinde Kemer Teorisi



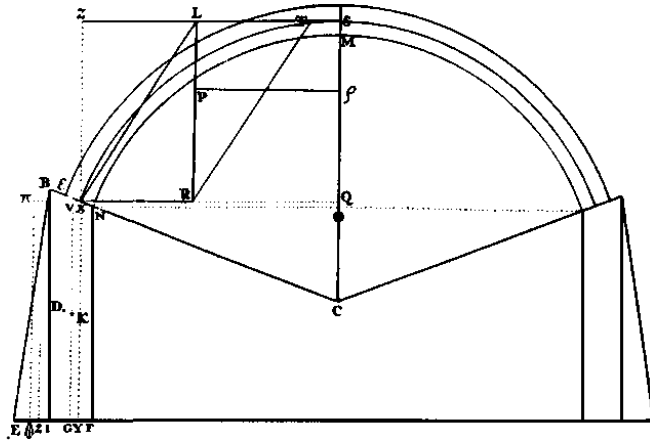
Şekil Ek 3.1. Kemer açıklıkları için Blondel'in Kuralları 1683 (Heyman, 2006)



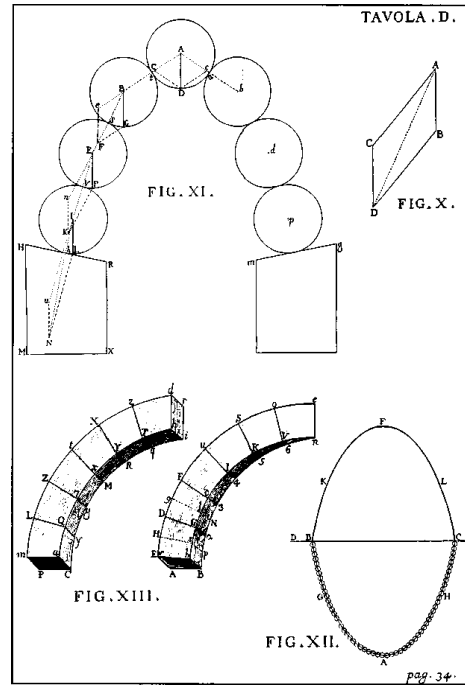
Şekil Ek 3.2. Yarım daire kemerin mekaniği La Hire'den 1712 sonra (Heyman, 1998)



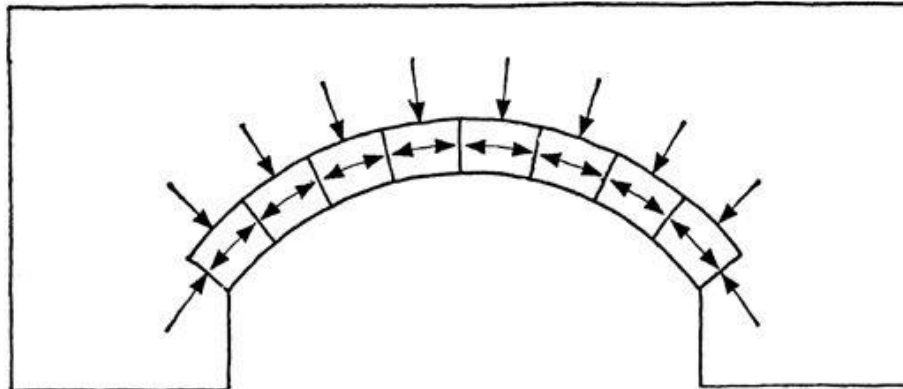
Şekil Ek 3.3. Kemerin statığı La Hire 1712'den sonra (Heyman, 1998)



Şekil Ek 3.4. Dayanak tasarımı için Couplet kuvvet sistemi (Heyman, 1998)



Şekil Ek 3.5. Yığma kemerlerin mekaniğinin çizimleri Poleni'den 1748 (Heyman, 2006)



Şekil Ek 3. 6. Bir kemer dikey yükleri toplar ve yanal yüklere dönüştürür (Gordon, 2003)