



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Göçme yükü etkisindeki köprü kemerlerinin yapısal davranışı

## *The structural behavior of bridge arches under collapse load*

Yazar(lar) (Author(s)): Gökhan Barış SAKCALI<sup>1</sup>, Alper GÖNÜL<sup>2</sup>, İsmail Enes PARLAK<sup>3</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-9906-0641

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-8257-3026

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-0694-9220

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Sakcalı G.B., Gönül A. ve Parlak İ.E., “Göçme yükü etkisindeki köprü kemerlerinin yapısal davranışı”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 929-939, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.633173

# Göçme Yüğü Etkisindeki Köprü Kemerlerinin Yapısal Davranışı

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Gökhan Barış SAKCALI<sup>1\*</sup>, Alper GÖNÜL<sup>2</sup>, İsmail Enes PARLAK<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 15.10.2019 ; Kabul/Accepted : 28.01.2020)

## ÖZ

Osmanlı İmparatorluğu Klasik Döneminin önde gelen mimarlarından Mimar Sinan tarafından tasarımı yapılan köprülerin birçoğu, kullanılan malzeme ve yapım tekniklerine bağlı olarak günümüzde varlıklarını sürdürmektedir. Bu köprülerde genellikle kemer formlarının tercih edilmesinin sebebi çekme dayanımı düşük doğal malzemelerden inşa edilmesidir. Çalışmada, Mimar Sinan tarafından tasarlanan 10 köprü ve bu köprülerde bulunan 48 kemer yapısı üzerinde istatistiksel bir değerlendirme yapılmıştır. Bu değerlendirmeye bağlı olarak açıklığı ve yüksekliği farklı 25 kemer sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiştir. Bu kemer yapılarının mafsallaşma durumları, göçme yükü, maksimum yerdeğiştirmesi, sünekliliği, enerji tüketme kapasitesi incelenmiş ve regresyon analizi yapılmıştır. Çalışma sonucunda, incelenen köprü kemerleri için maksimum yerdeğiştirmeyi ve göçme yükünü veren bağıntılar önerilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Mimar Sinan, köprü kemeri, sonlu elemanlar yöntemi, regresyon analizi.

# The Structural Behavior of Bridge Arches Under Collapse Load

## ABSTRACT

Many of the bridges designed by Mimar Sinan, the leading architect of the Classical Ottoman Period, has continued to exist today thanks to their materials and construction techniques. The reason that arch forms are generally preferred on these bridges is that they are constructed from natural materials with low tensile strength. In the study, 10 bridges and 48 arches in these bridges designed by Mimar Sinan were analysed statistically. Depending on this analysis, 25 arches with varying lengths and heights were modeled by finite element method. For these arches; hinge conditions, collapse loads, maximum displacements, ductility and energy dissipation capacities were examined and regression analyses were performed. Equations have been proposed which gives maximum displacement and collapse load for examined arches.

**Keywords:** Mimar Sinan, bridge arch, finite element method, regression analysis.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

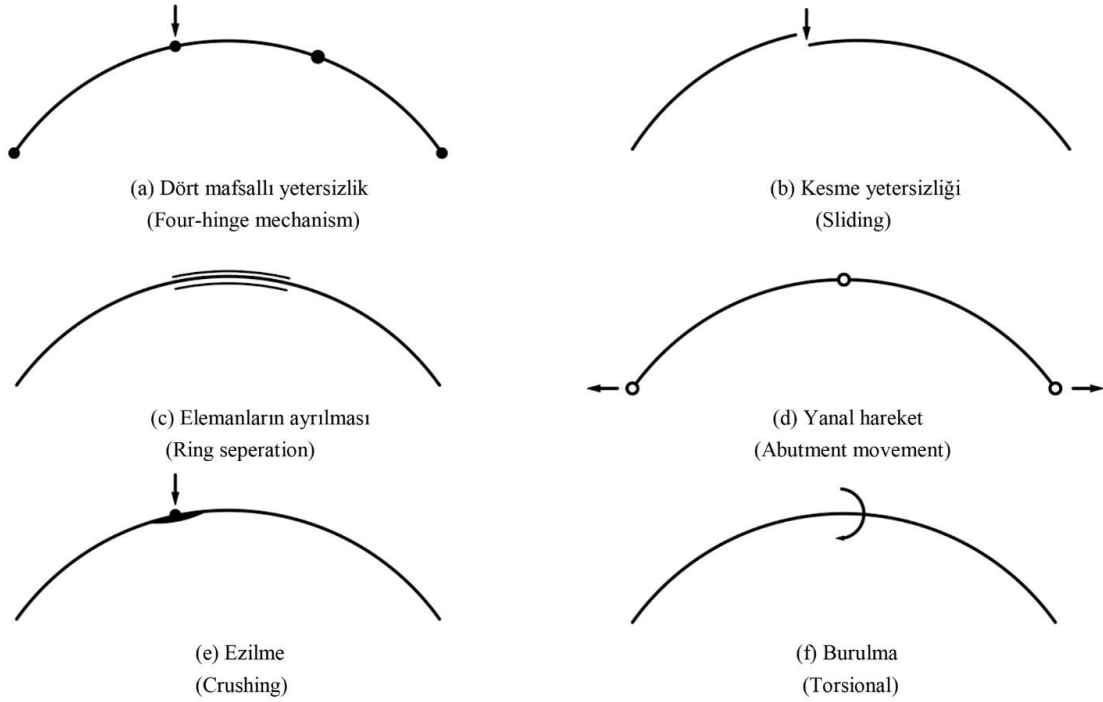
Osmanlı döneminde inşa edilen yığma köprülerde rastlanan en yaygın yapı formu köprü kemerleridir. Kemerli yığma köprüler yüksek taşıma gücüne ve sünekliliğe sahiptir [1-3]. Osmanlı Döneminde kemer ve kubbe öğelerinin kullanımı Mimar Sinan zamanında gerçekleştirilmiştir. Mimar Sinan köprülerinin proje çizimlerine tarihsel süreçte rastlanmamış olsa da Tezkiretü-ül Bünyan ve Tezkiretü-ül Ebniye’de Mimar Sinan tarafından tasarımı yapılan 10 adet kemerli köprüden bahsedilmektedir. Çalışma kapsamında incelenen bu köprülerden Kanuni Sultan Süleyman Köprüsü, Lüleburgaz Sokullu Mehmet Paşa Köprüsü, Büyükçekmece Köprüleri (4 adet), Alpullu Köprüsü, Drina Köprüsü, Kapuağası Köprüsü, Edirne Kanuni Sultan Süleyman Köprüsü ve bu köprülere ait kemerler ele alınarak; köprü kemerlerinin yükseklik, açıklık, ge-

nişlik ve kalınlık parametrelerine yönelik istatistiki bir değerlendirme yapılmıştır.

Literatürde, yapıların nihai yük kapasitesi üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda yapısal değerlendirme metodlarından ilki malzemenin elastik olduğu kabulüne dayanırken, sonraki yıllarda malzeme ve geometrinin doğrusal olmayan davranışını göz önünde bulunduran plastik analiz yaklaşımı kullanılarak, yapısal davranış gerçeğe daha yakın elde edilebilmiştir.

Gerçek ölçekli yığma yapıların deneysel testinde altı farklı göçme mekanizması tespit eden çalışmalar bulunmaktadır. Bu göçme mekanizmaları; dört mafsallı yetersizlik, kesme yetersizliği, elemanların birbirinden ayrılması, yanal hareket, ezilme ve burulmadan meydana gelen yetersizlikler olarak sıralanabilir (Şekil 1) [4-6]. Bu göçme mekanizma durumlarından en yaygını dört mafsallı yetersizlik mekanizmasıdır.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : gokhan.sakcali@btu.edu.tr



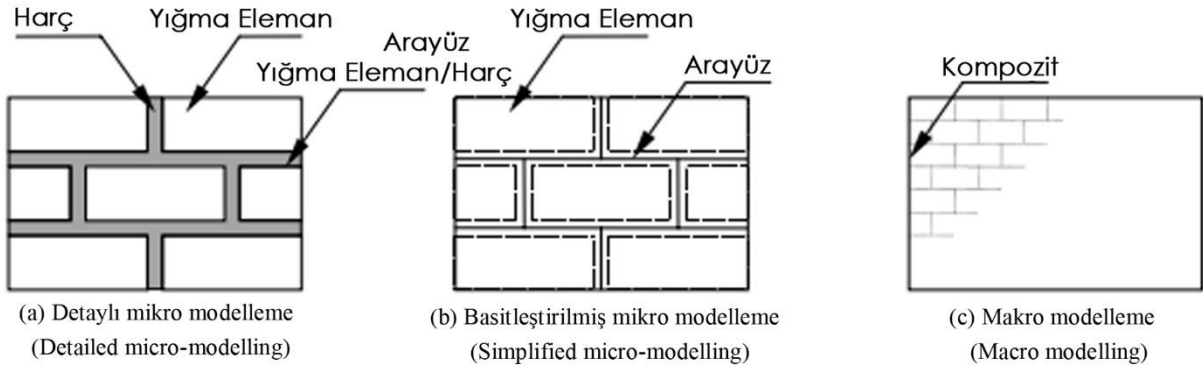
**Şekil 1:** Yığma kemerler için göçme modları (Failure modes for masonry arches)

## 2. YÖNTEM (METHOD)

Tarihi yığma yapılarda modelleme bir, iki ve üç boyutlu olmak üzere gerçekleştirilebilir. Yığma yapılarda modelleme bir boyutlu yaklaşım ile başlamıştır. Bu yaklaşımın, malzemenin elastik şekil değiştirme bölgesinde kaldığı sürece doğru sonuçlar verdiği; fakat malzemenin plastik şekil değiştirme bölgesinde (çatlaklar oluşuktan sonra) gerilme dağılımının gerçeği yansıtmadığı yapılan çalışmalarda görülmüştür [7]. Çatlaklar oluşuktan sonraki gerilme dağılımında daha doğru sonuçlar elde edebilmek için iki boyutlu modelleme yaklaşımı kullanılmaya başlanmıştır. Ancak bu modelleme yaklaşımı asimetrik kemer ve köprülerde göçme mekanizmasının tayininde gerçekçi sonuçlar vermemiştir [8]. Bu nedenle göçme mekanizması tayininde daha gerçekçi yöntem olan üç boyutlu modelleme yaklaşımı benimsenmiştir. Bu nedenlere

bağlı olarak sunulan çalışmada üç boyutlu modelleme yaklaşımı kullanılmıştır.

Yığma yapıların modellenmesinde genel olarak üç farklı modelleme tekniği kullanılmaktadır (Şekil 2). Mikro modelleme tekniğinde bağlayıcı ile taş ya da tuğla malzeme ayrı ayrı modellenmektedir (Şekil 2a). Bu modelleme tekniğinde malzemelerin mekanik özellikleri birbirinden bağımsız ve tam olarak tanımlandığı için sistem davranışını oldukça gerçekçi yansıtır. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğinde tuğla kalınlıkları harç kalınlığının yarısı kadar uzatılır ve sonlu elemanlar ağı arasına arayüz elemanları kullanılarak modellenir (Şekil 2b). Ancak büyük ölçekli yapılarda bu tip modelleme büyük hesap yükü ve zaman gerektirir. Bu nedenle, yapının bütünsel olarak değerlendirildiği çalışmalarda makro modelleme yöntemi tercih edilmektedir (Şekil 2c). Malzemelerin mekanik



**Şekil 2.** Yığma yapılar için modelleme yöntemleri (Modelling strategies for masonry structures) [9].

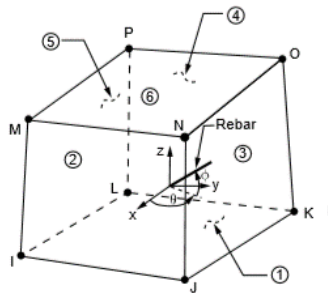
özellikleri ve sınır şartları doğru tanımlandığında, makro modelin de mikro model kadar gerçeğe yakın sonuçlar verdiği deneysel incelemeler sonucunda kanıtlanmıştır. Bunun yanı sıra, makro modelleme tekniğinin analiz süresini ciddi derecede azalttığı görülmüştür [10]. Çalışmada analiz süresini kısaltmak amacıyla makro modelleme yöntemi kullanılmıştır.

Yığma yapılar genelde ayırık elemanlar veya sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmektedir. Bu yöntemlerden sonlu elemanlar yöntemi yapısal veya yapısal olmayan fiziksel bir sistemi, matematiksel bir denkleme dönüştürerek yaklaşık çözümü vermektedir. Bu yöntem kullanılırken analiz tipi, malzeme özellikleri, model geometrisi, sınır şartları ve yüklerin tanımlanmasının yanı sıra; eleman tipi ve eleman sayısının doğru seçilmesi, analizlerin doğruya yakın elde edilmesinde büyük öneme sahiptir.

Sonlu elemanlar yönteminde statik analizler için Denklem 1 kullanılmaktadır [11]. Denklemde yer alan [K] elemanın ya da sistemin geometrik özelliklerine bağlı oluşturulan rijitlik matrisini, [R] elemanın veya sistemin yük vektörünü; [D] ise yük vektörüne ve rijitlik matrisine bağlı olarak elde edilen deplasman vektörüne karşılık gelmektedir. Elde edilen deplasman değerlerine bağlı olarak elemandaki gerilmeler, kuvvetler ve sistemde istenilen diğer veriler bulunabilir.

$$[K].[D]=[R] \quad (1)$$

Sonlu elemanlar yönteminde katı cisimlerde dörtyüzlü (tetrahedral) ve altıyüzlü (hexahedral) olmak üzere iki tip ağ (mesh) tipi kullanılmaktadır [11]. Her iki eleman tipi aynı serbestlik derecesine sahip olması sebebiyle, dörtyüzlü eleman tipi karmaşık geometriler için daha uygunken, altıyüzlü eleman tipinde dörtyüzlü eleman tipine oranla eleman sayısı önemli derecede düşmekte ve daha doğru sonuçlar vermektedir. Bu nedene bağlı olarak çalışmada altıyüzlü mesh eleman tipi kullanılmıştır.



Şekil 3. Solid65 eleman tipi (Solid65 element type) [12].

Çalışma kapsamında Ansys [12] sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Sistemin modellenmesinde kullanılan Solid65 eleman tipi sekiz düğümden oluşmakta ve her bir düğümden üç serbestlik derecesine sahiptir (Şekil 3). Ayrıca bu eleman tipinde betonun doğrusal olmayan malzeme modelini dikkate alabilmek için Williams ve Warnke [13] tarafından geliştirilen üç parametrelili beton modeli kullanılmaktadır. Bu eleman modelinde doğrusal olmayan malzeme modeli kullanabilmek için, basınç bölgesinde oluşan ezilmeler

ve çekme bölgesinde oluşan çatlaklar birlikte dikkate alınabilir. Betonun doğrusal olmayan malzeme modelini dikkate alabilmek için dört farklı sabit tanımlanmaktadır. Bunlardan ilk ikisi 0 ile 1 arasında değişen açık ve kapalı çatlak kayma gerilmesi aktarım katsayılarıdır. Pürüzsüz bir çatlak istenmesi durumunda kayma çatlak aktarım katsayısı 0 ve tam kayma aktarımı istendiği zaman 1 kullanılabilir. Çalışmada, sayısal modelde stabiliteyi sağlamak amacıyla bu katsayılar 0.01 alınmıştır [14].

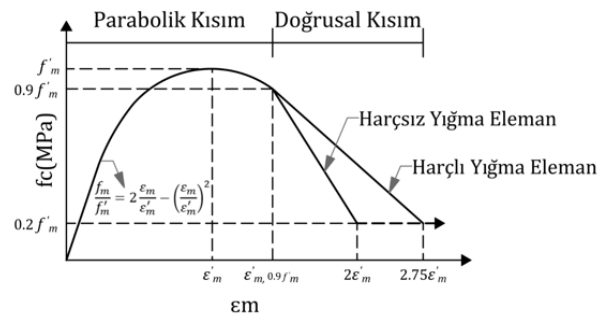
Mimar Sinan tarafından tasarlanan köprü kemerlerinin inşasında genellikle küfeki taşı tercih edilmiştir. Bunun sebebi malzemenin temininin kolay olmasının yanı sıra küfeki taşın kolay işlenebilir olmasıdır. İki küfeki taşı arasına ince bir harç tabakası ilave edilerek küfeki taşlarının birlikte hareket etmesi sağlanabilir. Çalışmada kullanılan küfeki taşının tek eksenli basınç dayanımı 32 MPa alınırken, harcın eksenel basınç dayanımı 1.24 MPa olarak alınmıştır [15].

$$f_c = f_b^{0.65} f_m^{0.25} \quad (2)$$

$$Y_c = Y_b V_B + Y_m V_m \quad (3)$$

$$v_c = v_b V_B + v_m V_m \quad (4)$$

Yığma yapılar taş ve harcın bir araya gelmesiyle meydana gelen kompozit bir malzemedir. Bu tip kompozit malzemeler homojenleştirme tekniği kullanımıyla bir araya getirilerek malzeme özellikleri birleştirilebilir. Yığma yapıların basınç dayanımının homojenleştirilmesinde Denklem 2'de verilen eşitlik kullanılmıştır. Burada;  $f_c$  homojenleştirilmiş yığma elemanın basınç dayanımını,  $f_b$  taş veya tuğla malzemesinin basınç dayanımını ve  $f_m$  harç malzemesinin basınç dayanımını temsil etmektedir [16]. Beton, taş ve tuğla gibi gevrek malzemelerin basınç dayanımı yüksek; çekme dayanımı düşük olması nedeniyle, çekme dayanımları oldukça düşük alınabilir veya ihmal edilebilir. Çalışmada, yığma elemanın çekme dayanımı, basınç dayanımının %10'u olarak alınmıştır [17,18]. Homojenize edilmiş malzemenin poisson oranı ve yoğunluğu sırasıyla Denklem 3 ve Denklem 4 kullanılarak hesaplanmıştır. Burada;  $Y$ ,  $v$  ve  $V$  sırasıyla yoğunluk, poisson oranı ve hacimsel orana karşılık gelirken  $c$ ,  $b$  ve  $m$  sırasıyla homojenleştirilmiş malzeme, taş malzeme ve harç malzemesi olarak tanımlanmaktadır [19].



Şekil 4. Yığma yapılar için idealleştirilmiş gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi (Idealized stress-strain relationship for masonry structures)[20].

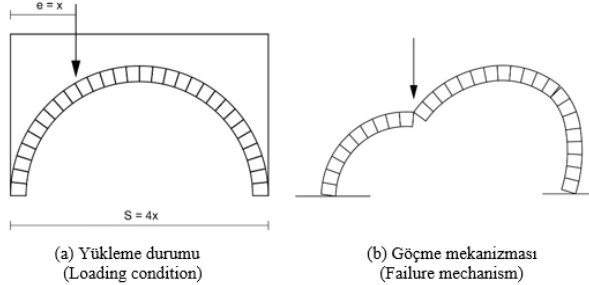
$$C_j = \frac{0.27}{f_m^{0.25}} \quad (5)$$

$$\varepsilon'_c = C_j \frac{f'_c}{E_c} \quad (6)$$

$$\frac{f_c}{f'_c} = 2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \right)^2 \quad (7)$$

Yığılma yapılarında malzemenin gerilme ve birim şekil değiştirme eğrisi ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) Denklem 7'de verilen bağıntıdan elde edilebilir (Şekil 4). Birim şekil değiştirme değeri Denklem 5 ve Denklem 6'da verilen denklemlerden elde edilebilir [20]. Ayrıca, Denklem 6'da  $E_m=1000f_c$  alınabilir [21]. Denklem 5-7'de  $C_j$  harcın gerilme değerine bağlı bir faktörü ve  $\varepsilon_c$  yığılma malzemesinin birim şekil değiştirme değerini ifade etmektedir.

Sistemin taşıyabileceği kritik yükün belirlenmesi sistemin toplam açıklığının 1/4'ü ya da 1/3'üne etki etmesiyle bulunabileceği, yapılan deneysel çalışmalarca saptanmıştır. Bu çalışmada, sistem kritik yükünün belirlenmesi toplam açıklığın 1/4'üne etki ettiği öngörülerek gerçekleştirilmiştir. Şekil 5' de sisteme etkiyen kritik yük ve sistem kırılma şekli verilmiştir.



Şekil 5. Kemer yapısı (Arch structure)

Sonraki aşamada, modeldeki veriler kullanılarak çoklu regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizi neticesinde değişkenler arasındaki ilişkiyi bir fonksiyon ile açıklamak ve bu ilişkiyi bir model yardımıyla tanımlayabilmek amaçlanmaktadır. İki değişken arasındaki ilişki Denklem 8 ile ifade edilir.

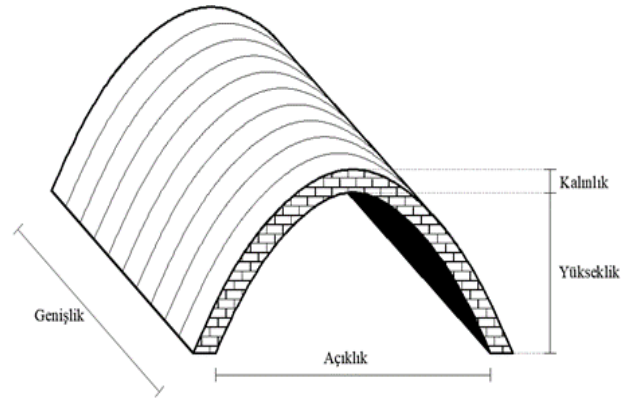
$$Y = \beta_0 + \beta_1 x \pm \varepsilon \quad (8)$$

Burada  $x$  bağımsız değişkeni,  $Y$  bağımlı değişkeni,  $\beta$  terimleri modelin katsayılarını ve  $\varepsilon$  terimi hatayı göstermektedir. Bu denklem ile  $Y$  bağımlı değişkeninin,  $x$  bağımsız değişkeninin belli bir düzeyi için alabileceği sonuç  $\varepsilon$  kadar bir hata ile modellenilebilir [22]. Basit doğrusal regresyonda tek bir bağımsız değişken varken çoklu regresyonda bağımsız değişkenlerin sayısı birden fazladır. Bu durum çoklu regresyon denklemleri olarak bilinen Denklem 9 ile ifade edilebilir. Denklem 9 gibi denklemler çoklu regresyon denklemleri olarak kullanılır [22, 23]. Denklem 8 ve 9' da yer alan  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  parametreleri en küçük kareler yöntemi ile elde edilebilmektedir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \pm \varepsilon \quad (9)$$

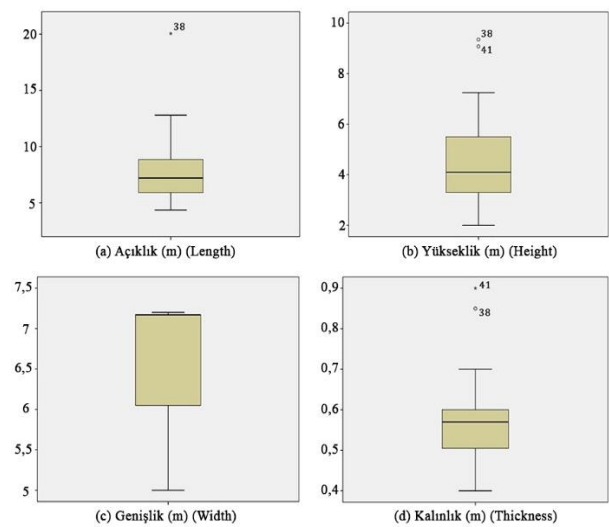
### 3. KÖPRÜ KEMERLERİ VE MALZEME ÖZELLİKLERİ (BRIDGE ARCHES AND MATERIAL PROPERTIES)

Çalışmada; açıklık kemer yapısının net açıklığını, yükseklik kemer yapısının net yüksekliğini, kalınlık kemer yapısında kullanılan duvar malzemesinin et kalınlığını ve genişlik ise kemer yapısının uzunluğunu ifade etmektedir (Şekil 6). Çalışmada, Mimar Sinan tarafından tasarlanan 10 tarihi köprüde bulunan 48 adet kemer yapısı incelenmiştir (Tablo 1). Bu köprü kemerleri üzerine SPSS [24] yazılımı kullanılarak bir istatistiksel çalışma yapılmış ve kutu grafikleri elde edilmiştir (Şekil 7).



Şekil 6. Kemer geometrisi (Arch geometry)

Mimar Sinan tarafından tasarlanan köprü kemerlerinde yapılan istatistiksel çalışma sonucunda kemer açıklığı, yüksekliği, kalınlığı ve genişliği sırasıyla 5.825 ile 8.875 m, 3.3 ile 5.6 m, 0.5 ile 0.6 m ve 6.05 ile 7.17 m aralıklarında olduğu belirlenmiştir (Şekil 7). İstatistiksel çalışma sonucunda kalınlık 0.55 m ve genişlik 6.5 m olarak seçilmiştir. Buna karşın, kemer açıklığı ve yüksekliği değişken olarak seçilmiştir.



Şekil 7. Köprü kemer boyutları üzerine yapılan istatistiksel kutu grafikleri (Statistical box plots for the arch dimensions)

Çalışmadaki analitik modellerin etkinliğini belirlemek amacıyla, İngiltere’de göçme deneyi yapılan Prestwood köprüsünün sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve karşılaştırılmıştır. Deney sonucunda göçme yükü 228 kN

olarak belirlenirken, oluşturulan sonlu elemanlar modelinde göçme yükü 224.6 kN olarak belirlenmiştir. Oluşturulan deneysel model ile sonlu elemanlar modeli arasında %1.5’lik bir fark olduğu gözlemlenmiştir [2].

**Tablo 1.** Mimar Sinan tarafından tasarlanan tarihi köprü kemerleri (Historical bridge arches designed by Mimar Sinan) [25,26]

Köprü No	Köprü Adı	Köprü No	Şehir	Yükseklik (m)	Açıklık (m)	Genişlik (m)	Kalınlık (m)
1	Kanuni Sultan Süleyman Köprüsü	1	Gebze	3.65	9.70	6.05	0.45
		2		2.00	6.35	6.05	0.40
		3		2.30	6.30	6.05	0.40
2	Lüleburgaz Sokullu Mehmet Paşa Köprüsü	4	Edirne	3.70	6.70	6.05	0.60
		5		4.50	8.80	6.05	0.60
		6		4.30	8.90	6.05	0.60
		7		3.80	6.60	6.05	0.60
		8		4.25	6.05	7.17	0.50
		9		5.20	7.30	7.17	0.60
		10		5.80	9.10	7.17	0.60
3	Büyükdemece Köprüsü 1	11	İstanbul	6.20	10.30	7.17	0.65
		12		6.95	11.40	7.17	0.60
		13		6.25	10.30	7.17	0.55
		14		5.70	8.95	7.17	0.55
		15		5.15	7.40	7.17	0.52
		16		4.30	6.15	7.17	0.58
4	Büyükdemece Köprüsü 2	17	İstanbul	3.30	5.40	7.17	0.62
		18		4.25	6.60	7.17	0.55
		19		4.80	8.15	7.17	0.62
		20		5.30	9.20	7.17	0.63
		21		4.75	8.05	7.17	0.58
		22		4.05	6.75	7.17	0.60
		23		3.50	5.50	7.17	0.49
		24		2.95	4.85	7.17	0.50
5	Büyükdemece Köprüsü 3	25	İstanbul	3.30	5.30	7.17	0.52
		26		4.15	6.65	7.17	0.56
		27		3.30	5.30	7.17	0.52
		28		3.10	4.85	7.17	0.51
6	Büyükdemece Köprüsü 4	29	İstanbul	3.10	4.45	7.17	0.53
		30		3.37	5.44	7.17	0.55
		31		3.42	5.47	7.17	0.60
		32		4.30	7.00	7.17	0.60
		33		3.95	5.75	7.17	0.53
		34		3.55	5.25	7.17	0.52
7	Alayuntlu (Sokullu Mehmet Paşa) Köprüsü	35	Kırklareli (Babaeski)	3.20	4.35	7.17	0.42
		36		3.25	7.10	5.94	0.70
		37		6.35	12.80	5.94	0.70
		38		9.35	20.05	5.94	0.85
		39		6.15	12.60	5.94	0.65
8	Dünya Köprüsü (Sokullu Mehmet Paşa Köprüsü)	40	Vişegrad	3.15	7.10	5.94	0.65
		41		9.08	10.70	7.20	0.90
9	Kapuğazı Köprüsü	42	Edirne (Havaçukçular)	6.10	7.40	6.10	0.58
		43		7.25	8.80	6.10	0.50
		44		6.10	7.40	6.10	0.58
		45		2.85	7.85	5.00	0.45
10	Edirne Kanuni Sultan Süleyman Köprüsü	46	Edirne	3.40	7.95	5.00	0.50
		47		3.50	8.25	5.00	0.50
		48		2.90	8.10	5.00	0.45

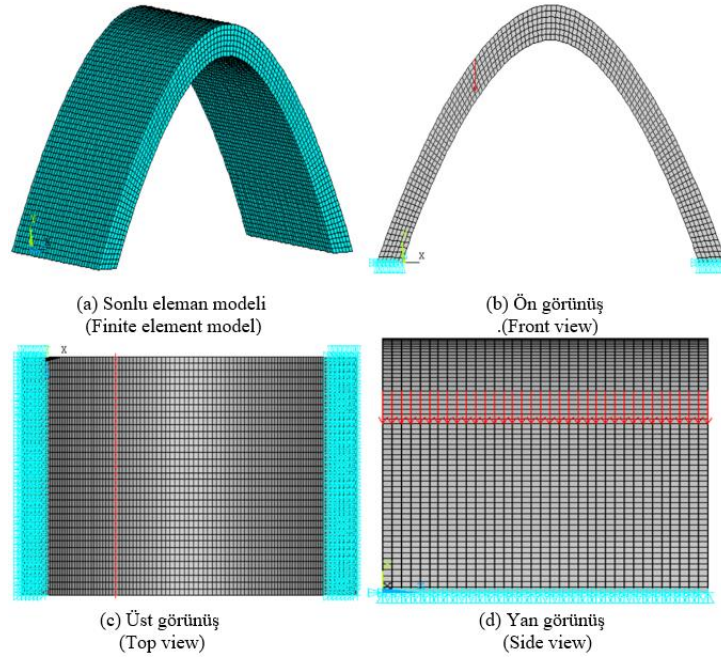
Hazırlanan köprü modelleri Tablo 2’ de verilmiştir.

**Tablo 2.** Model boyutları (Model dimensions)

Model	Açıklık (m)	Yükseklik (m)	Kalınlık (m)	Genişlik (m)
M1_L6xH3.5	6	3.5	0.55	6.5
M2_L6.5xH3.5	6.5	3.5	0.55	6.5
M3_L7xH3.5	7	3.5	0.55	6.5
M4_L7.5xH3.5	7.5	3.5	0.55	6.5
M5_L8xH3.5	8	3.5	0.55	6.5
M6_L6xH4	6	4	0.55	6.5
M7_L6.5xH4	6.5	4	0.55	6.5
M8_L7xH4	7	4	0.55	6.5
M9_L7.5xH4	7.5	4	0.55	6.5
M10_L8xH4	8	4	0.55	6.5
M11_L6xH4.5	6	4.5	0.55	6.5
M12_L6.5xH4.5	6.5	4.5	0.55	6.5
M13_L7xH4.5	7	4.5	0.55	6.5
M14_L7.5xH4.5	7.5	4.5	0.55	6.5
M15_L8xH4.5	8	4.5	0.55	6.5
M16_L6xH5	6	5	0.55	6.5
M17_L6.5xH5	6.5	5	0.55	6.5
M18_L7xH5	7	5	0.55	6.5
M19_L7.5xH5	7.5	5	0.55	6.5
M20_L8xH5	8	5	0.55	6.5
M21_L6xH5.5	6	5.5	0.55	6.5
M22_L6.5xH5.5	6.5	5.5	0.55	6.5
M23_L7xH5.5	7	5.5	0.55	6.5
M24_L7.5xH5.5	7.5	5.5	0.55	6.5
M25_L8xH5.5	8	5.5	0.55	6.5

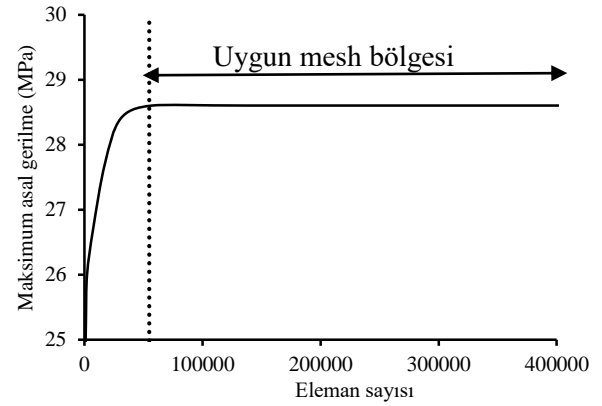
Mx: Model numarası, Lx: Kemer açıklığı, Hx: Kemer yüksekliği

M1\_L6xH3.5 modeline ait sonlu elemanlar modeli ile bu modele ait mesnet koşulları ve yükleme durumları Şekil 8’de verilmiştir. Mesnetler kemer yapısının alt bölgesine ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır. Yükleme ise yapının 1/4’üne etki edecek şekilde yayı yük olarak kemer genişliği boyunca uygulanmıştır.



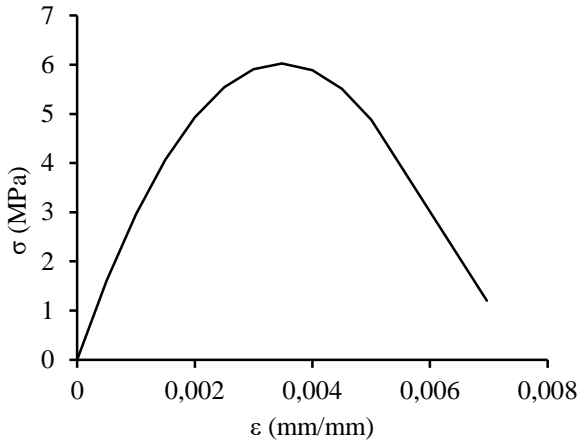
**Şekil 8.** M1\_L6xH3.5 durumu için model görselleri (Model images for M1\_L6xH3.5)

Her bir model için gerçekleştirilen yakınsama çalışması kapsamında kemer modellerinin dış yüzeyine 1 MPa basınç gerilmesi uygulanmış ve eleman sayısına bağlı asal gerilmelerdeki değişimler incelenmiştir. Böylece, her bir kemer modeli için ideal eleman sayısı belirlenmiştir. M25\_L8xH5.5 modeli için 55000 elemandan daha fazla eleman kullanılarak oluşturulan modellerde gerilmenin 28.6 MPa ile 28.7 MPa aralığında değiştiği gözlenmiştir (Şekil 9). Bu durum, modellerden elde edilen sonuçlarda hatanın yaklaşık %0.34 olacağını göstermiştir. Örnek olması amacıyla, M25\_L8xH5.5 durumu için eleman sayısı 61620 ve düğüm noktası 73458 seçilmiştir.



**Şekil 9.** M25\_L8xH5.5 durumu için yakınsama çalışması (Convergence study for M25\_L8xH5.5)

Köprü kemerlerinde kullanılan küfeki taşı ve harç malzemesi için homojenleştirme tekniği kullanılmış (Denklem 2-4) ve gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi belirlenmiştir (Denklem 5-7) (Şekil 10).



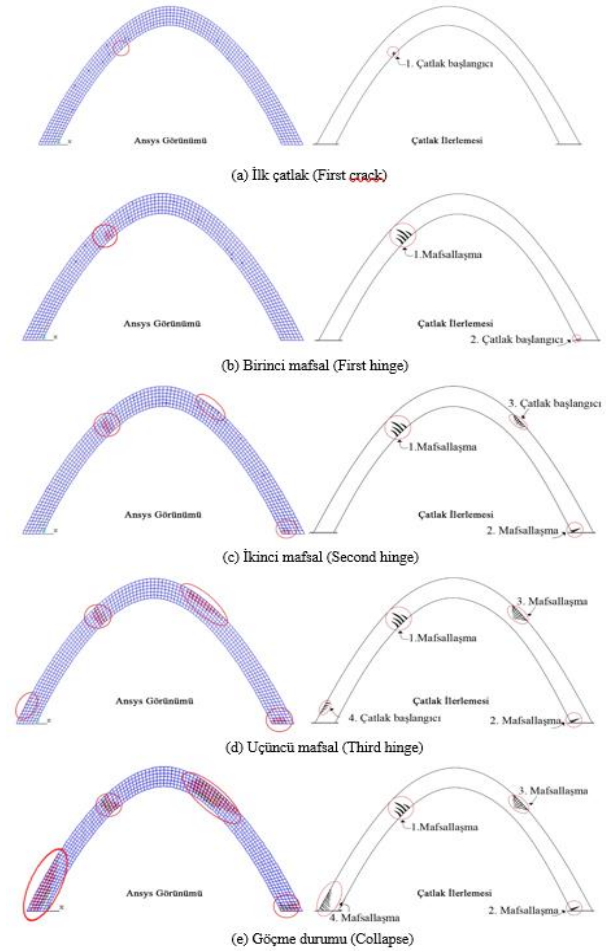
Şekil 10. Kemer yapılarında kullanılan malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi (Stress-strain relationship of material used in arches)

#### 4. BULGULAR VE İSTATİSTİKSEL ÇALIŞMA (RESULTS AND STATISTICAL STUDY)

Çalışmada, sonlu elemanlar yöntemiyle modellenen boyutları farklı köprü kemerleri, göçme yüküne maruz bırakılmıştır. Bu kemerlerdeki; mafsallaşma durumları, göçme yükü ve yerdeğıştirmelerinde meydana gelen değişimler ile süneklik ve enerji tüketme kapasitelerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Ayrıca, modellerde göçme yükü ve yerdeğıştirme için regresyon analizi yapılmıştır.

##### 4.1. Bulgular (Results)

M1\_L6xH3.5 modeli için kemer yapılarında oluşan çatlak görünümleri ve çatlak ilerlemeleri Şekil 11'de verilmiştir. Kemerlerde ilk çatlakların, yüklemenin yapıldığı bölgede oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 11a). Etkiyen yük arttıkça yapıda yüklemenin uygulandığı yerde çatlakların genişlediği, sonrasında ise mafsallaştığı gözlenmiştir. Bu mafsallaşma ile beraber sağ mesnet bölgesinde çatlaklar oluşmaya başlamıştır (Şekil 11b). Yükleme arttıkça sağ mesnette çatlakların arttığı, bu bölgenin mafsallaştığı ve yükleme bölgesinin simetrisinde çatlakların oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 11c). İlerleyen adımlarda bu bölgede de mafsal oluştuğu ve sol mesnette çatlaklar meydana geldiği gözlenmiştir (Şekil 11d). Son aşamada, dördüncü mafsalın oluştuğu ve yapının göçme moduna geçtiği görülmüştür (Şekil 11e). Ayrıca, birinci ve ikinci mafsalın oluştuğu bölgelerde daha kalın ve uzun çatlakların meydana geldiği; buna karşın üçüncü ve dördüncü mafsalın oluştuğu bölgelerde çatlakların daha ince ve geniş alana yayıldığı görülmüştür.

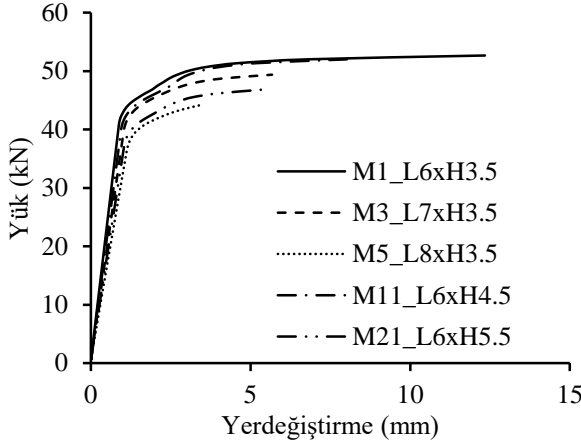


Şekil 11. Kemer yapısında mafsal oluşumları (Hinge formations for arch)

Modellerin statik analizi neticesinde elde edilen yük-yerdeğıştirme ilişkileri beş model için Şekil 12'de verilmektedir. Analizler sonucunda, M1\_L6xH3.5 durumunun yük taşıma kapasitesi ve maksimum yerdeğıştirme kapasitesinin M3\_L7xH3.5 ve M5\_L8xH3.5 durumlarının yük taşıma kapasitelerinden daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bu üç durumdaki kemerlerin yüksekliği 3.5 m olmasına karşın açıklıkları sırasıyla 6 m, 7 m ve 8 m'dir. M1\_L6xH3.5 durumunun M3\_L7xH3.5 durumuna göre %6.2 ve M5\_L8xH3.5 durumuna göre %16 daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Aynı durumlar dikkate alındığında, M1\_L6xH3.5 durumunun sırasıyla %54 ve %72.2 daha fazla yerdeğıştirme kapasitesine sahip olduğu gözlenmiştir. Kemer açıklığının artması kemerin yük taşıma kapasitesini ve yerdeğıştirme kapasitesini önemli ölçüde düşürdüğünü göstermektedir. Yük taşıma kapasitesinde meydana gelen azalmanın yerdeğıştirme kapasitesinde meydana gelen azalmadan daha düşük olduğu söylenebilir. M1\_L6xH3.5, M11\_L6xH4.5 ve M21\_L6xH5.5 durumlarının açıklığı 6 m ve yükseklikleri sırasıyla 3.5, 4.5 ve 5.5 m'dir. M1\_L6xH3.5 durumunun M11\_L6xH4.5 ve M21\_L6xH5.5 durumundan sırasıyla %1.2 ve %11.1 daha fazla yük taşıma kapasitesine ve M1\_L6xH3.5

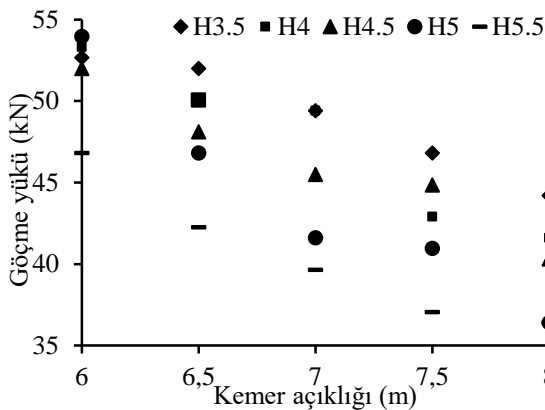


durumunun diğer durumlara göre sırasıyla %35 ve %56.9 daha fazla yerdeğiştirme kapasitesine sahip olduğu gözlenmiştir. Kemer yüksekliği arttıkça yük taşıma ve yerdeğiştirme kapasitesinin düştüğü gözlenmektedir. Kapasitelerdeki bu düşüşlerden yerdeğiştirmede meydana gelen düşüşün oransal olarak daha fazla olduğu söylenebilir. Kemer açıklığındaki artış, kemer yüksekliğindeki artışa göre yük taşıma kapasitesini ve yerdeğiştirme kapasitesini daha fazla oranda azaltmaktadır.

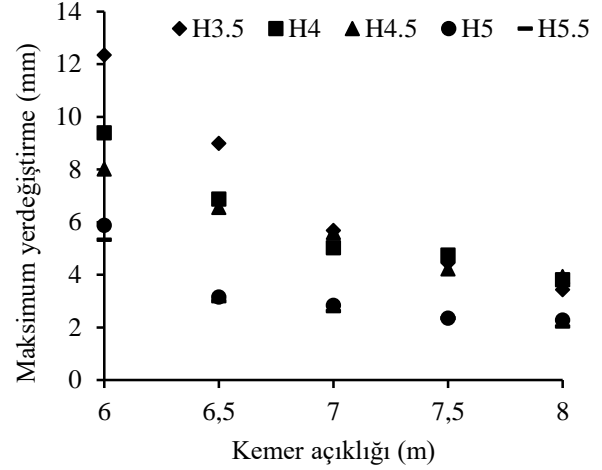


Şekil 12. Yük-yerdeğiştirme ilişkisi (Load-displacement relationship)

İncelenen kemer yapıları arasında en fazla yük taşıma kapasitesine sahip olan kemer yapısının açıklığı 6 m ve yüksekliği 5 m olan (basıklık oranı 1.2) M16\_L6xH5 adlı durumda meydana geldiği görülmüştür. En düşük yük taşıma kapasitesine sahip kemer yapısının açıklığı 8 m ve yüksekliği 5 m olan (basıklık oranı 1.6) M20\_L8xH5 durumu ile kemer yapısının açıklığı 8 m ve yüksekliği 5.5 m olan (basıklık oranı 1.45) M25\_L8xH5.5 durumunda olduğu gözlenmiştir. İncelenen kemer yapıları arasında en büyük yük taşıma kapasitesine sahip durumun en küçük yük taşıma kapasitene sahip durumlardan %32.5 daha fazla yük taşıyabildiği sonucuna varılmıştır. Tüm durumlarda yük taşıma kapasitesinin kemer açıklığına göre değişimi benzer eğilim gösterirken yük taşıma kapasitelerinde en keskin düşüşlerin 5 m yüksekliğindeki durumlarda olduğu gözlenmiştir (Şekil 13).

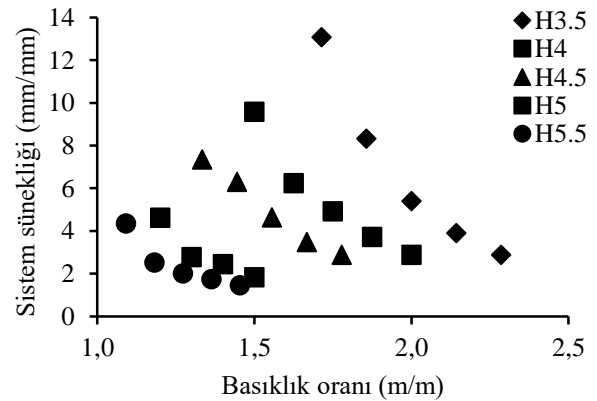


Şekil 13. Kemer boyutlarının göçme yükü üzerine etkisi (Effect of arch dimensions on collapse load)



Şekil 14. Kemer boyutlarının yerdeğiştirme üzerine etkisi (Effect of arch dimensions on displacement)

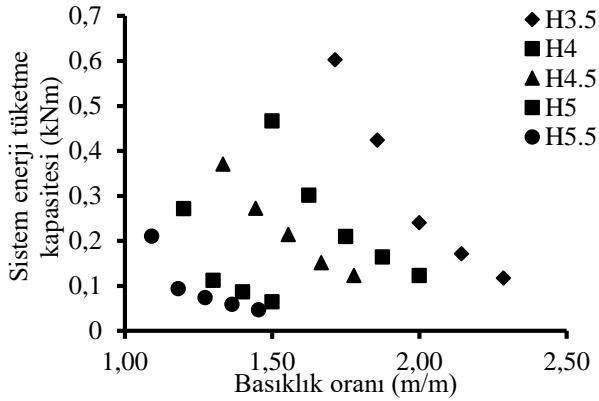
İncelenen kemer yapılarında en fazla yerdeğiştirme kapasitesine sahip olan yapının kemer açıklığı 6 m ve yüksekliği 3.5 m olan (basıklık oranı=1.71) M1\_L6xH3.5 adlı durumda olduğu görülmüştür (Şekil 14). En düşük yerdeğiştirme kapasitesine sahip olan kemer yapısının ise kemer açıklığı 8 m ve yüksekliği 5.5 m olan (basıklık oranı=1.45) M25\_L8xH5.5 adlı durumda olduğu görülmüştür. M1\_L6xH3.5 adlı durumun M25\_L8xH5.5 adlı duruma göre yaklaşık 6 kat daha fazla yerdeğiştirme kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, kemer açıklığı ve yüksekliğindeki boyut artışı kemerin yerdeğiştirme yapabilme kapasitesini düşürürken; kemer açıklığındaki artış, kemer yüksekliğindeki artışa göre yerdeğiştirme kapasitesini yaklaşık %11.5 daha fazla etkilediği sonucuna varılmıştır. Bunlara ek olarak, kemer yükseklikleri aynı olan durumlar dikkate alındığında 3.5 m yüksekliğine sahip kemer yapılarında yerdeğiştirme kapasitesinde daha keskin düşüşler gözlenmektedir. Kemer yüksekliği azaldıkça kemer açıklığının artması yapının yerdeğiştirme kapasitesindeki değişimi azaltmaktadır.



Şekil 15. Sistem sünekliliğinin kemer basıklık oranına göre değişimi (Change of system ductility according to rise to span ratio of arch)

Kemer yapılarındaki sünekliliğin basıklık oranına göre değişimi Şekil 15'te verilmiştir. Burada, kemer yapısında

yükseklik arttıkça ve basıklık oranı azaldıkça sistem sünekliliğinin azaldığı belirlenmiştir. Örnek olarak; basıklık oranı 1.71 olan M1\_L6xH3.5 durumundaki sünekliliğin, basıklık oranı 2.29 olan M5\_L8xH3.5 durumundaki sünekliliğe göre yaklaşık 3.6 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca, yakın basıklık oranına sahip M2\_L6.5xH3.5 ve M9\_L7.5xH4 durumlarında ise yüksekliği düşük olan kemerin sünekliliğinin diğerine göre yaklaşık 1.9 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum, kemerdeki yükseklik ve basıklık oranı arttıkça yapı sünekliliğinin azaldığını göstermektedir.



**Şekil 16.** Sistem enerji tüketme kapasitesinin kemer basıklık oranına göre değişimi (Change of system energy dissipation capacity according to rise to span ratio of arch)

Şekil 16'da sistem enerji tüketme kapasitesinin kemer basıklık oranına göre değişimi verilmiştir. Bu değişim sistem sünekliliğinin basıklık oranı değişimi ile benzerlik göstermektedir. En yüksek enerji tüketme kapasitesine sahip kemer modeli basıklık oranı 1.71 olan M1\_L6xH3.5 durumu iken en düşük kemer modeli basıklık oranı 1.45 olan M25\_L8xH5.5 durumunun olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, basıklık oranı 2 olan M3\_L7xH3.5 ve M10\_L8xH4 durumları kıyaslandığında yüksekliği ve açıklığı düşük olan kemer yapısının büyük enerji tüketme kapasitesine sahip olduğu gözlenmiştir. Bu durum, aynı basıklık oranına sahip kemer yapılarında küçük açıklık ve yüksekliğe sahip yapının daha fazla enerji tüketebildiği sonucunu göstermektedir.

#### 4.2. İstatistiksel Değerlendirme (Statistical Evaluation)

Çalışmada, regresyon modeli için seçilen bağımsız değişkenler sırasıyla açıklık ve yükseklik parametreleridir. Bu bağımsız değişkenlerin etkilediği öngörülen bağımlı değişkenler de maksimum yerdeğiştirme ve göçme yüküdür. Her iki bağımlı değişken için ayrı regresyon analizi yapılmıştır. Burada yükseklik ve açıklık  $m$  cinsinden hesaba katılarak, yerdeğiştirmeler  $mm$  ve göçme yükü  $kN$  cinsinden verilmiştir. Göçme yükü değerleri ve yerdeğiştirme değerleri sırasıyla Şekil 13 ve Şekil 14'te verilmektedir. Kemer modellerine ait açıklık ve yükseklik değerleri Tablo 2' de yer almaktadır. Bu veriler kullanılarak yerdeğiştirme için Denklem 10 ve göçme yükü için

Denklem 11' de verilen tahmin modelleri oluşturulmuştur.

$$\hat{Y}_{\text{yerdeğiştirme}} = 31.628 - 2.455X_1 - 2.099X_2 \quad (10)$$

$$\hat{Y}_{\text{göçme yükü}} = 104.949 - 5.850X_1 - 4.134X_2 \quad (11)$$

Burada,  $\hat{Y}$  değişkeni bağımlı değişken yani maksimum yerdeğiştirme ve göçme yükü tahmin değerlerini göstermektedir.  $X$  değişkenleri ise bağımsız değişkenler olup 1 ve 2 indisleri sırasıyla açıklık ve yüksekliği belirtmektedir. Bu iki tahmin modeli ile ANOVA (varyans analizi) tabloları oluşturulmuş ve böylece elde edilen denklemlerin geçerliliği sınanmıştır (Tablo 3 ve Tablo 4). Modeller için geliştirilen hipotezde;  $H_0$ : Gözlenen noktaların regresyon doğrusuna uyumu önemsizdir (Model geçersizdir),  $H_1$ : Gözlenen noktalar regresyon doğrusu ile tanımlanabilir (Model geçerlidir).

**Tablo 3.** Yerdeğiştirme denklemi için ANOVA tab-losu (ANOVA table for displacement equation)

Varyasyon				
Varyasyon kaynağı	Serbestlik der.	Kareler top. (SS)	Kareler ort. (MS)	F değeri
Regresyon modeli	2	130.426	65.213	48.791
Hata	22	29.405	1.337	
Toplam	24	159.831		

**Tablo 4.** Göçme yükü denklemi için ANOVA tab-losu (ANOVA table for collapse load equation)

Varyasyon				
Varyasyon kaynağı	Serbestlik der.	Kareler top. (SS)	Kareler ort. (MS)	F değeri
Regresyon modeli	2	641.406	320.703	121.680
Hata	22	57.984	2.635	
Toplam	24	699.390		

Hipotezler oluşturulduktan sonra ANOVA tablosu yardımıyla Tablo 3 ve Tablo 4'te yer alan F değerleri ile istatistikte kullanılan F dağılım tablosu değeri ( $F_{2,22,0.05}=2.561$ ) kıyaslanmıştır. Her iki denkleme ait F değeri de  $F_{2,22,0.05}$  değerinden büyük olduğu için  $H_0$  reddedilir, bu iki model de geçerlidir.

Modellerin geçerliliği kanıtlandıktan sonra her model için  $R^2$  (determinasyon katsayısı) hesaplanır.  $R^2$ , oluşturulan modelin gerçeğe uygunluğunu yansıtan bir göstergedir. Bu katsayı, bağımlı değişkenin gözlenen değeri ile modelde tahmin edilen değeri arasındaki korelasyon katsayısının karesidir.  $R^2$ 'nin formülü Denklem 12'de verilmiştir. Bu değer bağımlı değişkenlerin bağımsız değişkenler tarafından ne kadarının açıklandığını gösterir ve nedensellik hakkında bilgi verir.  $R^2$  değeri 1'e ne kadar yakınsa değişkenler, modeli o kadar çok açıklamaktadır [22-23].

$$R^2 = SSR/SST \quad (12)$$

Burada SST, toplamın kareler toplamını belirtirken SSR ise modelin kareler toplamını göstermektedir. Bu iki değer determinasyon katsayısı yerdeğiştirme ve göçme yükü için sırasıyla 0.816 ve 0.917 olarak elde edilmiştir. Bu değerler sırasıyla modellerin yaklaşık %82' si ve %92'sini açıklamaktadır. Elde edilen bu değer 1'e

yakın olması tahmin edilen değer in doğruya yakın olduğunu göstermektedir.

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Tarihi yapıların modellenmesi ve analizinde yaklaşık yöntemler ve basit ampirik bağıntıların geliştirilmesi gerekmektedir. Çalışmada, Mimar Sinan tarafından tasarımı yapılmış 10 tarihi köprü ve bu köprülere ait 48 kemer yapısı incelenmiştir. İnceleme kapsamında, köprü kemer boyutlarının (yükseklik, açıklık, genişlik ve kalınlık) hangi aralıkta değiştiği istatistiksel değerlendirme sonucu oluşturulan kutu grafiklerinden belirlenmiştir. Genişlik ve kalınlık için sabit değerler alınırken, yükseklik ve açıklık değerleri değişken olarak seçilmiştir. Yükseklik ve açıklık değerleri farklı 25 kemer yapısının sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve göçme yükü altındaki davranışı incelenmiştir. İncelemeler sonucunda,

- Farklı dört bölgede mafsallın oluşmasıyla sistemin göçme mekanizmasına ulaştığı belirlenmiştir.
- İlk mafsallaşmanın yüklemenin uygulandığı bölgede oluştuğu görülmüştür.
- Kemerlerin solundan yapılan yükleme durumunda yükleme bölgesinde ve sağ mesnette kalın ve uzun çatlakların oluştuğu, bu bölgelerin simetriğinde ise ince ve geniş alana yayılan çatlakların oluştuğu gözlenmiştir.
- Kemerde açıklığın ve yüksekliğin artması yük taşıma ve yerdeğiştirme kapasitesini azaltmıştır.
- Kemerlerde basıklık oranının artması kemerin sünekliğini ve enerji tüketme kapasitesini düşürmektedir.

Elde edilen veriler regresyon analizine tabi tutulmuş ve sonuçların istatistiksel olarak doğruluğu belirlenmiştir. Denklem 13 ve Denklem 14'te verilen regresyon denklemleri;

$$Y_{\text{yerdeğiştirme}} = 28 - 2(X_1 + X_2), X_1 \in [6,8], X_2 \in [3,5,5,5] \quad (13)$$

$$Y_{\text{göçme yükü}} = 105 - 6X_1 + 4X_2, X_1 \in [6,8], X_2 \in [3,5,5,5] \quad (14)$$

şeklinde sadeleştirilerek önerilmiştir. Bu denklemler Mimar Sinan kemer yapılarında yerdeğiştirme ve göçme yükü hesabında kullanılabilir. Sonraki çalışmalarda, köprü kemerlerinin sayısı artırılıp genişlik, kalınlık, malzeme, modelleme şekli değiştirilerek çalışmalar yapılabilir. Aynı zamanda bu faktörler esas alınarak yapay sinir ağları yaklaşımı ile fonksiyon kestirimi yapılabilir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Oliveira D.V., Lourenço P.B., Lemos C., "Geometric issues and ultimate load of masonry arch bridges from the northwest Iberian Peninsula", *Engineering Structures*, 32(12):3955-65, (2010).
- [2] Cavicchi A., Gambarotta L., "Collapse analysis of masonry bridges taking into account archfill interaction", *Engineering Structures*, 27(4): 605-15, (2005).
- [3] Cavicchi A., Gambarotta L., "Two-dimensional finite element upper bound limit analysis of masonry bridges", *Computers & Structures*, 84(31-32): 2316-28, (2006).
- [4] Melbourne C., Wang J., Tomor A., Holm G., Smith M., Bengtsson P.E., Bien J., Kaminski T., Rawa P., Casas J.R., Roca P., Molins C., "Masonry arch bridges background document D4.7.", *Sustainable Bridges*, Report number: Deliverable D4.7, (2007).
- [5] Hughes T.G., Blackler M.J., "A review of the UK masonry arch assessment methods", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 122 (3):305-315, (1997).
- [6] Page J., "TRL State of the Art Review: Masonry arch bridges", London, UK, *Her Majesty's Stationery Office*, (1993).
- [7] Rouf M.A. "Fundamental properties of brickwork with particular emphasis to brickwork arches", *PhD Thesis*, University of Liverpool, Liverpool, England, (1984).
- [8] Zhang Y., "Advanced nonlinear analysis of masonry arch bridges", *PhD Thesis*, Imperial College London, London, England, (2015).
- [9] Lourenço P.B., "Computational Strategies for Masonry Structures", *PhD Thesis*, Delft University of Technology, Delft, Holland, (1996).
- [10] Lourenço P.B., "Current experimental and numerical issues in masonry research", *SISMICA 2004 - 6<sup>o</sup> Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sismica*, Guimaraes, Portugal, (2004).
- [11] Liu G.R., Quek S.S. "The finite element method: a practical course", *Butterworth-Heinemann*, (2013).
- [12] ANSYS, Swanson Analysis System, Ansys Inc, Canonsburg, PA, (2013).
- [13] Williams K.J., Warnke E.P., "Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete", *Proceeding of the International Association for Bridge and Structural Engineering*, Bergamo, Italy, 19:174-86, (1975).
- [14] Gibbons N., Fanning P.J., "Progressive cracking of masonry arch bridges", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Bridge Engineering*, 169:93-112, (2015).
- [15] Alaboz M., "Mimar Sinan Köprülerinin Güncel Durum Değerlendirmesi ve Kapuağası Köprüsü Restorasyon Projesi", *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, (2009).
- [16] Ril 805:Richtlinie 805, Guideline for Load and Resistance Assessment of Existing European Railway Bridges, COWI A/S, (2007).
- [17] Kahraman S., Fener M., Kozman E. "Predicting the compressive and tensile strength of rocks from indentation hardness", *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112(5): 331-339, (2012).
- [18] Karaton M., Aksoy H.S., Sayın E., Calayır Y., "Nonlinear seismic performance of a 12th century historical masonry

- bridge under different earthquake levels”, *Engineering Failure Analysis*, 79: 408-421, (2017).
- [19] Ersoy HY. “Kompozit malzeme”, *Literatür Yayınları*, (2001).
- [20] Kaushik H.B., Durgesh C.R., Sudhir K.J., “ Stress-strain characteristic of clay brick masonry under uniaxial compression”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(9): 728-739, (2007).
- [21] ENV 1996-1-1, C.E. de Normalisation, Eurocode 6: Design of masonry structures-part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures, *Comit Europen de Normalisation, Brussels*, Belgium, (2005).
- [22] Lindley D.V., “Regression and correlation analysis”, *New Palgrave: A Dictionary of Economics*, 4:120-23, (1987).
- [23] Hocking R.R., “The analysis and selection of variables in linear regression”, *Biometrics*, (1976).
- [24] SPSS: IBM Corp., IBM SPSS Statistics for Windows, Version 21.0. Armonk, NY: IBM Corp., (2012).
- [25] Çeçen K. Sinan’ın yaptığı köprüler. Editör: Sadi Bayram. Mimarbaşı Koca Sinan yaşadığı çağ ve eserleri, Cilt 1, 429-438, Ankara, Türkiye, Vakıflar Genel Müdürlüğü & Türkiye Vakıflar Bankası, (1988).
- [26] Bozkurt O. “Koca Sinan’ın köprüleri (XVI. Asır Osmanlı Medeniyeti içinde Sinan, köprülerin Mimari bakımdan tetkiki, siluet ve abide a-kıymetleri)”, İstanbul, Türkiye, İTÜ Mimarlık Fakültesi, (1952).