NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 504-515

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi
Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araştırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh

Kohezif ara yüzey elemanlar aracılığıyla dairesel yığma kemerlerin sistematik olarak modellenmesi ve kırılma mekanizmalarının belirlenmesi

Modeling of circular masonry arches systematically via cohesive interface elements and determination of failure mechanisms

Sedat Kömürcü[1,*]

[1*] *İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul Türkiye*

Öz

Bu çalışmada, yığma kemerler geliştirilen basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği ile modellenmekte ve yığma kemerlerin doğrusal olmayan davranışları 3 boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak analiz edilmektedir. Yığma kemerlerin doğrusal olmayan davranışı, kohezif bölge malzemesi (KBM) kullanılarak temas ve hedef elemanlarla elde edilmektedir. Sunulan modelde, yığma kemerleri oluşturan yığma birim sayısı, yığma birimlerin yerleştirildiği açı değeri, kemer üzerinde yükün etki ettiği bölgeler göz önüne alınarak sistematik şekilde ara yüzey elemanlar oluşturulmaktadır. Ayrıca yığma kemerlerin analizlerinde önemli bir aşama olan yığma kemer geometrisinin oluşturulması konusunda pratik bir yaklaşım sunulmaktadır. Böylece farklı geometrik parametrelere sahip yığma kemerler modele kolaylıkla dâhil edilebilmektedir. Oluşturulan model ile hem düzlem içi hem de düzlem dışı davranış incelenebilmektedir. Oluşturulan model ile yığma kemerlerin kırılma mekanizmaları pratik şekilde analiz edilmekte ve model kullanılarak mafsal bölgeleri başarıyla belirlenmektedir. Bu çalışmayla yığma kemerlerin doğrusal olmayan davranışlarının analizine katkı sağlayan bir model sunularak bu yapıların analizleri için pratik olarak kullanılabilir bir çözüm aracı ortaya konulmaktadır.

Anahtar kelimeler: Basitleştirilmiş mikro modelleme, Kırılma mekanizması, Kohezif bölge malzemesi, Plastisite, Yığma kemer

Abstract

In this study, masonry arches are modeled using developed simplified micro modeling technique and nonlinear structural behavior of masonry arches are analyzed using 3D finite element models. Nonlinear behavior of masonry arches is obtained with the contact and target elements using cohesive zone material (CZM) model. Interface elements are systematically created by taking into account the number of masonry units, the angle value at which the masonry units are placed, and the loading conditions. In addition, a practical approach is presented for the creation of the geometry of the masonry arch, which is an important stage in the analysis of masonry arches. In this way, masonry arches with different geometric parameters can be easily included in the model. Hinge zones are also determined with this model very efficiently. With the created model, both in-plane and out-of-plane behavior can be examined. It is seen that; the collapse mechanisms of masonry arches can be analyzed practically and the hinge regions are determined successfully using the model. In this study, a model that contributes to the analysis of nonlinear behavior of masonry arches is presented and a practically usable solution is presented for the analysis of these structures.

Keywords: Cohesive zone material, Fracture mechanism, Masonry arch, Plasticity, Simplified micro modeling technique

1 Giriş

Yığma kemerler, tarih boyunca mühendislik dehası ve estetiğin birleşimini temsil eden temel bir mimari ve yapısal unsur olarak kullanılmışlardır. Mezopotamya, Mısır, Yunan, Roma ve Türk mimarilerinde kemerli ve tonozlu yapıların oldukça sık kullanıldığı bilinmektedir. Kemerlerin inşa yöntemleri ve analizleri, eski çağlardan beri mimarlık ve mühendislik alanlarında önemli konular olup kemerlerin dayanım ve stabilitesi ile ilgili çeşitli problemler her zaman var olmuştur. Harcın düşük çekme mukavemeti ve tuğla veya bloklar arasındaki zayıf bağlantılar nedeniyle, yığma yapı elemanları çekme ve eğilme dayanımları açısından zayıflık göstermektedirler. Bu durum, yapıların taşıma kapasitesini azaltarak tasarım seçeneklerini kısıtlamaktadır. Tarihi yığma kemerlerin analizi, korunması ve restorasyonu gibi konularda kemerlerin davranışları hakkında araştırmalar devam etmekte olup özellikle yığma kemerlerin modellenmesi ve sayısal analizler günümüzde önemli çalışma alanlarıdır.

Kemer yapılar, dayanıklı ve yüksek mukavemetli yığma yapıların inşası amacıyla birçok yapıda çeşitli formlarda kullanılmışlardır. Ancak yığma malzeme kullanılarak oluşturulan kavisli elemanların yapısal davranışlarını anlamak son derece karmaşık bir konudur. Heyman'ın yığma yapıların sınır analizi teorisi üzerine yaptığı öncü çalışma, yığma kemerlerin yapısal davranışını anlamak adına temel bir çalışmadır [1]. Heyman'ın teorik çalışmaları, hesaplamalı ve analitik modellerin gelişiminde önemli rol oynamıştır.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: komurcus@itu.edu.tr (S. Kömürcü)
Geliş / Received: 25.11.2024 Kabul / Accepted: 28.01.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025
doi: 10.28948/ngmuh.1590866

Lourenço, yığma yapılar için ileri düzey modelleme yöntemleri sunarak birçok çalışmaya ilham kaynağı olmuştur [2]. Çalışmada sunulan modelleme teknikleri, özellikle bilgisayar kullanımıyla yaygınlaşan sayısal modellere örnek teşkil etmektedir.

Çeşitli yükleme koşulları altında yığma kemerlerin davranışını anlamak için deneysel ve sayısal analizler önemli birer rol oynamıştır. Geçmişten günümüze yığma kemerlerin analizleri konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Bir çalışmada, çeşitli geometrilerde oluşturulan yığma kemerlerin yanal yük taşıma kapasiteleri ve minimum kalınlıkları araştırılmıştır [3]. Başka bir çalışmada, kemerli yığma duvarların statik yüklere karşı düzlem dışı davranışları üzerine çalışma yapılmıştır [4]. Yığma kemerlerin inşasında kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi de oldukça önemli bir konudur. Yığma kemerlerin sonlu eleman yapısal analizinde elastisite modülünün etkisi araştırılmıştır [5]. Bir diğer çalışmada yığma kemerlerin en uygun itme eğrilerini belirlemek için sayısal bir yaklaşım gerçekleştirilmiştir [6]. Yığma kemerlerin analizlerinde kullanılmak üzere çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Yığma kemerlerin doğrusal olmayan davranışının değerlendirmesi için ayrık makro elemen yöntemi önerilmiştir [7]. Bir diğer çalışmada yığma kemerler için kuvvet tabanlı eğri eksenli bir kiriş elemanı önerilmiştir [8].

Yığma kemerler özellikle tarihi köprülerde yaygın olarak kullanılmıştır. Bu amaçla yığma köprülerde kemerlerin kullanımı üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Yığma kemer köprülerin geometrik özelliklerinin yapının dayanımına olan etkisi araştırılmıştır [9]. Yığma kemer köprülerde kullanılan dolgu malzemesinin modellenmesi için bir yaklaşım önerilmiştir [10]. Tarihi yığma kemerler için özellikle kritik bir konu olan sismik performans birçok çalışmada incelenmiştir. De Felice ve Giannini, kemer yapıların sismik davranışını ve düzlem dışı direncini araştırarak zayıflıkları vurgulamış, analiz ve koruma yöntemleri önermiştir [11]. Yığma kemer köprüler konusunda bir diğer sismik araştırma Pela ve ark. tarafından yapılmıştır [12]. Bir diğer çalışmada yığma kemerler için sismik kapasitenin parametrik olarak incelemesi yapılmıştır [13]. Düzensiz temellere ve kemer kalınlığına sahip yığma kemerlerin sismik kapasitesi incelenmiştir [14]. Bir diğer çalışmada, güçlendirilen yığma kemerlerin deneysel testleri ve sayısal modellemesi yapılmıştır [15]. Çeşitli kompozitlerle güçlendirilmiş antik yığma kemerler ve tonozlar sayısal olarak analiz edilmiştir [16].

Valluzzi ve ark. laminatlarla güçlendirilen tuğla örtülü kemerlerin davranışı üzerine bir çalışma gerçekleştirdiler. Bu çalışmada, dış veya iç yüzeylerinden elyaf takviyeli polimer (FRP) şeritlerle güçlendirilmiş tuğla örgülü tonozlar üzerinde yapılan deneysel araştırmanın sonuçlarını sundular [17]. Milani ve Lourenço, yığma kemer köprülerinin 3 boyutlu doğrusal olmayan davranışını incelediler [18]. Yığma köprülerinin statik doğrusal olmayan davranışı, sonlu elamalar ile sayısal olarak analiz edilerek özellikle yapıların eksantrik yüklere maruz kaldığındaki davranışı ve dolgunun neden olduğu güçlendirme etkisi dikkate alınmıştır. Michiels ve Adriaenssens, düzlem içi deprem yüklemesi etkisinde olan yığma kemerler için bir yapısal form elde etme algoritması geliştirdiler [19]. Lewis ve ark. yeni bir kemer formunu analiz ederek, bu formu geleneksel kemer formlarıyla karşılaştırdılar [20]. Liu ve ark. tek ve çok gözlü yığma kemer köprülerinin çatlak yayılımlarını ve genel kırılma mekanizmalarını incelediler [21]. Grosman ve ark. kemerli köprü ve viyadüklerin sonlu eleman analizleri için sonlu elemanlar ağının oluşturulması için yeni bir parametrik model tasarladılar [22]. Bertolesi ve ark. özellikle FRP takviyeli duvar kemerlerinin analizi için tasarlanmış basit ve güvenilir bir sonlu eleman modeli sundular [23].

Tarihi yığma kemerlerin analizi, bu yapıların korunması için kritik bir öneme sahiptir. Kemerler ve kubbeler gibi yığma yapı elemanlarının çökme davranışları üzerine yapılan çalışmalar, bu yapıların mekanik özelliklerinin yanı sıra çevresel etkilerle nasıl etkileşimde bulunduğunu anlamaya yönelik önemli bulgular sunmaktadır. Aita ve ark. yığma kemerler ve kubbelerde sürtünme ve basınç dayanımındaki belirsizliklerin etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada, sınırlı sürtünme ve belirsizlikler dikkate alınarak yapılan analizler, yığma yapılar için daha gerçekçi çökme modelleri sunmaktadır [24]. Avasthi ve Rai, yığma kemerlerin deprem altındaki davranışını, derzlerdeki çekme dayanımını da göz önüne alarak analiz etmiştir. Bu çalışma, yığma kemerlerin dinamik yükleme altındaki davranışına ışık tutmakta ve bu tür yapıların deprem dayanıklılığını artırmak için tasarım stratejileri önermektedir [25]. Pingaro ve ark. uzun açıklıklı tarihi kubbelerde meydana gelen çökme risklerini değerlendirmek için ileri düzey sonlu eleman modelleri geliştirmiştir. Bu modeller, özellikle kubbe tepe noktalarındaki ağır yüklerin etkilerini detaylı bir şekilde analiz ederek yapının zayıf noktalarını ortaya koymaktadır [26]. Varró ve ark. taş yığma kemerlerin güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş durumlarını laboratuvar testleri ve sayısal analizlerle incelemiştir. Çalışma, güçlendirme yöntemlerinin yığma yapıların dayanımını artırmada ne kadar etkili olduğunu göstermektedir [27]. Zampieri ve ark. yığma kemerlerde hasarın sismik çökme davranışına olan etkilerini araştırmıştır. Bu çalışma, hasar seviyesinin kemer stabilitesini nasıl etkilediğini açıklamaktadır [28]. Zhao ve ark. yığma kemerlerin çökme süreçlerini analiz etmek için iki aşamalı bir modelleme stratejisi önermiştir. Bu yöntem, yığma kemerlerin davranışını daha iyi anlayarak, yapıların çökme mekanizmalarını daha hassas bir şekilde tahmin etmeyi sağlamaktadır [29]. Yığma yapıların sismik davranışını ve kırılma mekanizmalarını inceleyen çalışmalar yapılmıştır [30-33]. Farklı modelleme stratejileri ve deneysel yaklaşımlar, yığma yapıların mekanik davranışını daha iyi anlamaya ve bu yapıların korunmasını optimize etmeye olanak sağlamaktadır.

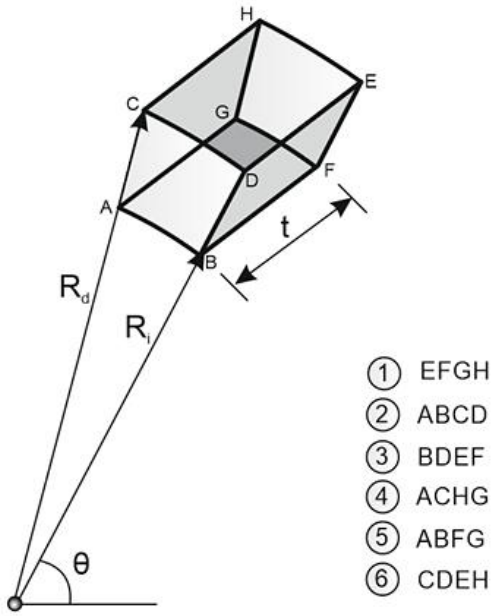
Bu çalışmada yığma kemerler, sistematik bir şekilde kohezif ara yüzey malzemesi kullanılarak modellenerek, yığma kemerlerde çeşitli yüklemeler altında ortaya çıkan kırılma mekanizmaları belirlenmektedir. Yığma kemerler için hem malzeme hem de ara yüzey elemanlar açısından yüksek derecede doğrusal olmayan bir davranışın incelenmesine olanak sağlayan bir sayısal modelin sunulması ve kemerlerin kırılma mekanizmaların pratik ve

etkili bir şekilde belirlenmesi bu çalışmanın önemli sonuçları arasındadır.

Çalışmanın kısımları şu şekilde sıralanmaktadır: Öncelikle yığma kemerlerin sayısal olarak modellenmesi kısmı sunulmaktadır. Bu amaçla, geometrik parametrelerin sistematik olarak kullanılması, kohezif bölge malzeme (KBM) modelinin özellikleri ve yığma birimler arasındaki ara yüzeylerin modellenmesi incelenmektedir. Sonrasında oluşturulan modelin performansı farklı şekillerde yüklenen üç adet yığma kemer örneği ile sunulmaktadır. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi ve sonuçlar kısımlarıyla çalışma tamamlanmaktadır.

2 Yığma kemer sistemin modellenmesi

Yığma kemerleri oluşturan yığma birimler ve harcın modellenmesi için basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği farklı bir bakış açısıyla ele alınmakta ve sistematik bir yöntem sunulmaktadır. Bu yöntemin esası, yığma birimleri birbirine bağlayan harcın ayrı bir eleman olarak modellenmeyerek harcın yaptığı etkinin ara yüzey elemanlarla oluşturulmasına dayanmaktadır. Kullanılan semboller, metnin sonundaki semboller listesinde ayrıca belirtilmektedir. Şekil 1'de kemeri oluşturan yığma birim eleman görülmektedir. Burada R_i kemerin iç yarıçapını, R_d kemerin dış yarıçapını, t ise kalınlığını göstermektedir. Yığma kemer oluşturulurken θ açısına göre kemerin alacağı form belirlenmektedir. Yığma birim elemanı oluşturan köşe kısımları ABCDEFGH olarak isimlendirilmektedir. Elemanı meydana getiren 6 adet yüzey alanı şekilde görüldüğü üzere 1-2-3-4-5-6 olarak numaralandırılır. Bu numaralandırma sistemi yığma kemer formunun oluşturulmasını pratikleştirmektedir. Yığma kemeri oluşturan yığma birimler, alan numaralandırma sistemi göz önüne alınarak sistematik şekilde oluşturulmaktadır.



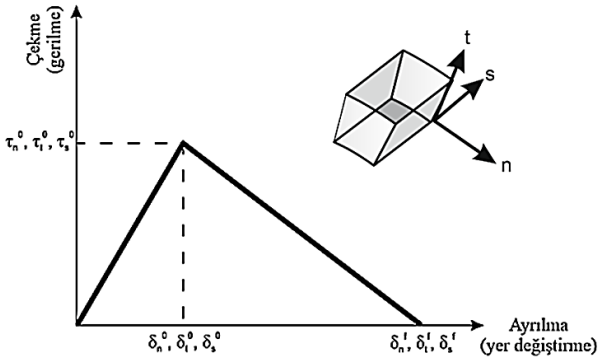
Şekil 1. Yığma birim geometrik parametreleri ve alan numaralandırması

2.1 *Kohezif bölge malzemesi (KBM) davranışı*

Yığma yapılar gibi birden fazla malzemenin kullanılmasıyla oluşturulan kompozit malzemelerde, kırılma ve ayrılma gibi durumlar malzemelerin tokluk ve süneklik gibi özelliklerini kısıtlamalarından ötürü yapısal analizlerin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi hususunda önemli birer rol oynarlar. Malzemeler arasındaki ara yüzeylerin bünye bağıntısını teşkil eden KBM, ara yüzeylerin birbirlerinden ayrılması için gerekli olan enerji olarak bilinen kritik kırılma enerjisi kavramını kullanarak yüklemeler ve ayrılma miktarı arasındaki ilişki sayesinde yapıda oluşacak olan kırılma mekanizmalarının belirlenmesini sağlar.

KBM modellenirken ara yüzey veya kontakt elemanlardan faydalanılır. KBM için malzeme davranışı bilineer veya eksponansiyel olarak seçilebilir. Buna ek olarak, malzemenin davranışı farklı modlara göre ayrı ayrı veya iki modun birleşimi şeklinde ele alınmaktadır. Ayrıca seçilen malzeme modeli, kritik kırılma enerjisi veya yüzeylerde meydana gelen ayrılmalar şeklinde farklı açılardan modellenebilir. Bu hususlar düşünüldüğünde, ara yüzey elemanlar veya kontakt elemanlarda kullanılan malzeme modelinin davranışının belirlenmesinin detaylı ve önemli bir durum olduğu görülmektedir.

Şekil 2'de görülen grafik kohezyonlu ek yerleri için çekme-ayrılma malzeme kanununu göstermektedir. Bu kanun, birbirine yapışmış malzemelerin gerilme altında nasıl ayrıldığını tanımlamak için kullanılır.



Şekil 2. Kohezif birleşimlerde malzeme davranışı

Burada görülen dikey eksen çekmeyi (birim alan başına kuvvet, yani gerilme) temsil eder. Yatay eksen ayrılmayı (yer değiştirme veya ayrılma mesafesi) temsil eder. Eğri, çekme gerilmesinin ayrılma ile nasıl değiştiğini gösterir. Başlangıçta ayrılma arttıkça çekme artar ve bir tepe değerine ulaşır. Tepe noktasından sonra, ayrılma artmaya devam ettikçe çekme azalır, bu da malzeme yumuşamasını ve nihayetinde kopmasını gösterir. Bu grafikte τ_n^0, τ_s^0, τ_t^0 farklı yönlerdeki başlangıç çekme değerleri. δ_n^0, δ_s^0, δ_t^0 farklı yönlerdeki başlangıç ayrılma değerleri. δ_n^f, δ_s^f, δ_t^f malzemenin tamamen koptuğu noktadaki son ayrılma değerlerini göstermektedir. Çekme-ayrılma eğrisinin altındaki alan G_c olarak belirtilir ve bu kırılma enerjisini temsil eder. Bu, malzemeyi ayırmak için gerekli olan enerjidir. K_n, K_s, K_t malzemenin farklı yönlerdeki ayrılmaya karşı direncini temsil eden rijitlik parametreleridir. Bu

değerler Denklem (1) ve Denklem (2) kullanılarak hesaplanabilir. Grafik, bir kohezyonlu malzemenin, onu ayırmaya çalışan kuvvetlere maruz kaldığında nasıl davrandığını göstermektedir. Malzeme başlangıçta ayrılmaya karşı direnç gösterir, ancak belirli bir noktadan sonra direnç azalır ve bu da malzemenin kopmasına neden olur. Bu kanun, malzemelerin ve yapıların incelenmesinde, özellikle yapışmış ek yerlerinin gerilme altında nasıl davrandığını anlamada önemlidir ve malzeme biliminde ve yapısal analizlerde sıklıkla kullanılır.

$$K_n = \frac{E_t E_h}{h_h(E_t - E_h)} \tag{1}$$

$$K_t = K_s = \frac{G_t G_h}{h_h(G_t - G_h)} \tag{2}$$

2.2 *Ara yüzeylerin modellenmesi*

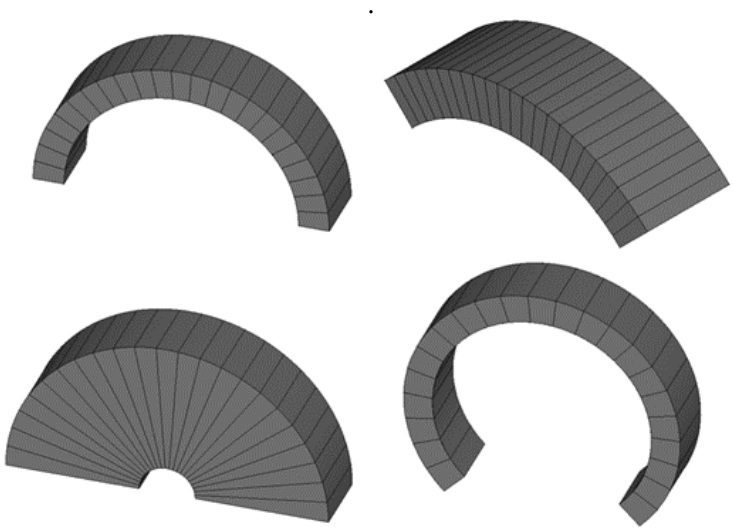
Modelin oluşturulmasında önemli adımlardan birisi yığma birimler arasında bulunan ve harcı temsil etmek üzere de kullanılan ara yüzeylerin oluşturulmasıdır. Bu çalışmada, yığma birimler arasında bulunan kontakt elemanlar (hedef ve temas) Tablo 1 ile gösterilen kod yapısı ile oldukça pratik bir şekilde oluşturulabilir.

Tablo 1. Temas ve hedef yüzeylerin tanımlanması işlemi

Temas yüzeyleri	Hedef yüzeyleri
*do,i,2,(((ts-1)/2)+1) i=i*6 ASEL,A,,,i *enddo	*do,i,1,(((ts-1)/2)-1) i=i*6+(2+((ts-1)/2))*6 ASEL,A,,,i *enddo
*do,i,1,(((ts-1)/2)+1) i=5+(i-1)*6 ASEL,A,,,i *enddo	*do,i,1,((ts-1)/2) i=(((2+((ts-1)/2))*6)-1)+(i-1)*6 ASEL,A,,,i *enddo

Burada "*ts*" kullanılan tuğla sayını ifade etmektedir. Elemanların oluşturulmasında Şekil 1'de sunulan numaralandırma sisteminden faydalanılmaktadır. Bu sayede alan numaraları sistematik bir şekilde tekrarlanarak istenilen sayıda ara yüzey kontakt elemanlar ile teşkil edilmektedir. Ortaya konulan kod sisteminde öncelikle tek numaralı ve sonrasında çift numaralı yığma kemer birimler oluşturulmaktadır. Kullanılan 6 rakamı yığma kemer birimleri oluşturan yüzey sayısını temsil etmektedir. Yığma kemer birimleri oluşturulduktan sonra birimler arasındaki ara yüzeyler tanımlanmaktadır. Bu aşamada da ara yüzey elemanlar, sistematik olarak yığma birimler arasına numaralandırma sırasına göre atanmaktadır.

Oluşturulan modelleme sistematiği sayesinde çeşitli geometrik parametrelere sahip kemer yapılar pratik şekilde modellenebilmektedir. Sunulan modelleme sistematiği kullanılarak modellenebilen dairesel kemer formları Şekil 3'te görülmektedir. Bu tür kemer formları, yapısal davranışları ve yük taşıma kapasiteleri açısından farklılık gösterirler. Yarım dairesel kemer, yığma yapıların en yaygın türlerinden biridir ve yükü her iki mesnede eşit olarak dağıtır. Simetrik yapısı nedeniyle, dengeli bir yük dağılımı sağlar. Yüksek basınca dayanıklı olduğu için tarihi yapılarda yaygın kullanılır. Düz formlu kemerler daha az kavisle oluşturulur. Daha düz bir profile sahip olduğu için, genellikle düşük yük taşıma kapasitelerine sahiptir ve daha kısa açıklıklar için kullanılır. Eliptik veya yassı formdaki kemerler, geniş açıklıklar geçmek için tasarlanabilir. Ancak, tepe kısmında yüksek çekme gerilmelerine maruz kalabilir. Bu da çatlak oluşumunu hızlandırabilir. Farklı kemer formları, tasarım sırasında yapının taşıması gereken yüke, açıklık genişliğine ve malzemenin özelliklerine göre seçilir. Bu formlar arasında yük taşıma kapasitesi ve stabilite açısından belirgin farklar bulunur.



Şekil 3. Kullanılan modelleme sistematiği ile oluşturulan kemer formları

3 Sayısal örnekler

Bu bölümde oluşturulan modelin yapısal analizlerdeki performansını değerlendirmek üzere sayısal örnekler sunulmaktadır. Yapılan analizler sonucunda yığma kemerlerin farklı yüklemeler sonucundaki kırılma mekanizmaları belirlenmektedir.

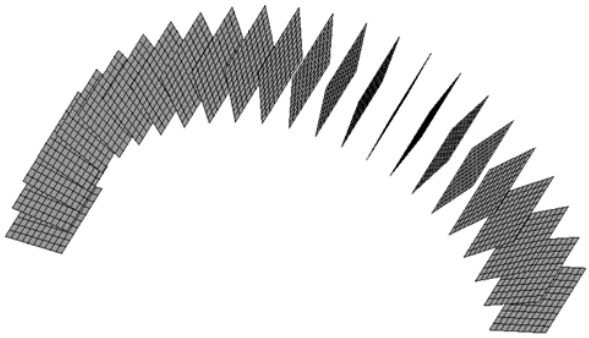
3.1 Model parametreleri

Yığma kemerlerin kırılma mekanizmalarını ANSYS [34] yazılımı ile analiz etmek amacıyla literatürde deneysel olarak incelenen kemer örneğinin geometrik ve malzeme parametreleri kullanılmaktadır [8, 15]. Açıklık L=920 mm, yüksekliği H=510 mm ve kalınlığı t=255 mm olan yığma kemer oluşturulmaktadır. Kemerin dış yarıçapı R_d=576 mm ve iç yarıçapı R_i=456 mm. Tuğlaların ölçüleri boy k=R_d-R_i=120 mm, en b=65 mm'dir. Tuğla eni ölçüsü 10 mm olan harç kalınlığını da içermektedir. Yığma birimler $\theta=8^o$ açı ile teşkil edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan tuğla ve harcın elastisite modülü tuğla için E_t=16000 MPa ve harç için E_h=1500 MPa olarak verilmektedir. Poisson oranı değerleri ise tuğla için v_t=0.2, ve harç için v_h=0.2'dir. Kayma modülleri tuğla için G_t=6666,67 MPa ve harç için G_h=625 MPa olarak verilmektedir.

Yığma kemerin KBM parametreleri; maksimum normal temas gerilimi σ_0=0,005 MPa, maksimum eşdeğer teğetsel temas gerilimi τ_0=1 MPa, Mod I normal ayrılma için kritik kırılma enerjisi G_{kI}=0,0003 MPa ve Mod II teğetsel kayma için kritik kırılma enerjisi G_{kII}=0,004 MPa'dır. Numerik analizler için yapay sönümleme katsayısı η=0'dır, normal basınç temas gerilmesi altında teğet kayma ayarı β=1 olarak seçilmiştir. Temas yüzeylerindeki sürtünme katsayısı μ=0,5'tir. Yığma birleşim yerlerinin normal doğrultudaki K_n rijitliği ile birinci kesme yönündeki K_s rijitliği ve ikinci kesme yönündeki K_t rijitliği Denklem (1) ve Denklem (2) yardımıyla; K_n=165 MPa, K_s=K_t=69 MPa olarak hesaplanır.

KBM modeli, malzemelerde çatlak oluşumu ve ilerlemesini modellemek etmek için kullanılır. Mikro düzeyde çatlak uçlarındaki gerilme ve deformasyonları modelleyen bu yöntem, çatlak başlangıcını ve ilerlemesini enerji temelli bir yaklaşımla tanımlar. Gerilme-yer değiştirme ilişkisi üzerinden, malzeme elastik davranıştan hasara ve nihayetinde kopmaya geçiş sürecini göstermektedir. Kırılma enerjisi, maksimum gerilme ve elastisite modülü gibi parametreler yardımıyla malzeme içindeki kopma ve hasar mekanizmaları tanımlanır. Bu model, beton, kompozit malzemeler ve yığma yapılar gibi kırılma mekaniğinin kritik olduğu mühendislik uygulamalarında, çatlak oluşumu ve yük taşıma kapasitesinin analiz edilmesi için kullanılır.

İki cisim arasındaki temas problemi, rijitliğin aniden kaybolması veya yeniden ortaya çıkması açısından ele alınması en zor doğrusal olmayan durumlardan biridir. Yığma kemerler açısından iki cisim arasındaki temas problemi, yığma birimler ve harç tabakaları veya doğrudan taş birimler arasındaki mekanik etkileşimleri anlamak için önemlidir. Her bir yığma birim, üzerindeki yükleri temas ettiği komşu birimlere iletir ve bu iletim sırasında temas yüzeylerinde basınç ve kayma gerilmeleri oluşur. Temas yüzeylerinin mekanik davranışı, özellikle harç tabakalarının elastik, plastik veya kırılma özellikleriyle belirlenir. Yük altında, temas bölgelerinde mikro çatlaklar ve plastik mafsallar oluşabilir, bu da taş birimleri arasındaki temas alanını küçülterek gerilme yoğunluklarını artırır. Ayrıca, taş birimleri arasında genellikle bir sürtünme kuvveti bulunur ve bu sürtünme, kemerin stabilitesine önemli katkı sağlar; ancak aşırı yükleme durumunda sürtünme yetersiz kalabilir ve kırılma gerçekleşebilir. Temas problemlerinin analizi, genellikle sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmaktadır. Analiz için 8 düğüm noktasına sahip SOLID65 elemanı kullanılmıştır. Her düğümün x, y ve z yönlerinde üç yer değiştirme serbestlik derecesi vardır. Eleman, hem çekmede hem de basınçta kırılma mekanizmalarını gösterebilir. Tuğla yığma birimler için bu eleman kullanılarak standart mesh ağı elde kullanılmaktadır. Yığma birimler arasında kullanılan CONTA174 ve TARGE170 elemanları yüzeysel elemanlardır. Temas ve hedef yüzeyler arasındaki etkileşimi göstermek için kullanılırlar [34]. Tuğlalar arasında teşkil edilen ara yüzeyler örnek olarak Şekil 4'te görülmektedir.

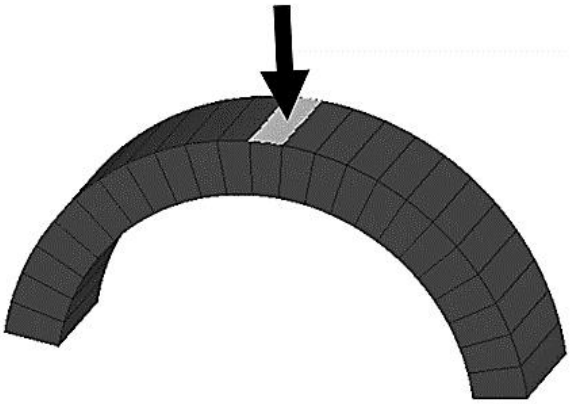


Şekil 4. Temas ve hedef elemanların kullanıldığı ara yüzeyler

Sınır koşulları olarak analizlerde kemerlerin sağ ve sol uç noktalarındaki yüzeyler mesnet olarak tamamen sabitlenir. Yüklemeler deplasman kontrollü şekilde kemer üst kısmından yapılır. Ayrıntılı bir veri seti elde etmek ve doğrusal olmayan analizin başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi için yükleme işlemi 50 alt adıma bölünmüştür. Deplasman kontrollü yüklemede, kemer üzerine uygulanan yük miktarı yerine, yapının belirli bir noktasındaki yer değiştirme miktarı kontrol edilir ve yükleme, bu deplasman doğrultusunda artırılır. Örneğin, kemerin tepe noktası veya açıklık ortasında bir yük uygulanıyorsa, bu yükleme, o noktadaki yer değiştirme değerine göre ayarlanır. Bu yöntem, özellikle kemerin kırılma davranışını ve yük taşıma kapasitesini anlamak açısından önemli bir husustur. Bu sayede, kemerin çatlak oluşumu, plastik mafsalların gelişimi ve mekanizma haline gelme süreci adım adım izlenebilir. Deplasman kontrollü yükleme, yığma kemerlerin taşıma kapasitesini, kırılma mekanizmasını ve stabilitesini detaylı bir şekilde analiz etmek için uygun bir yükleme türüdür.

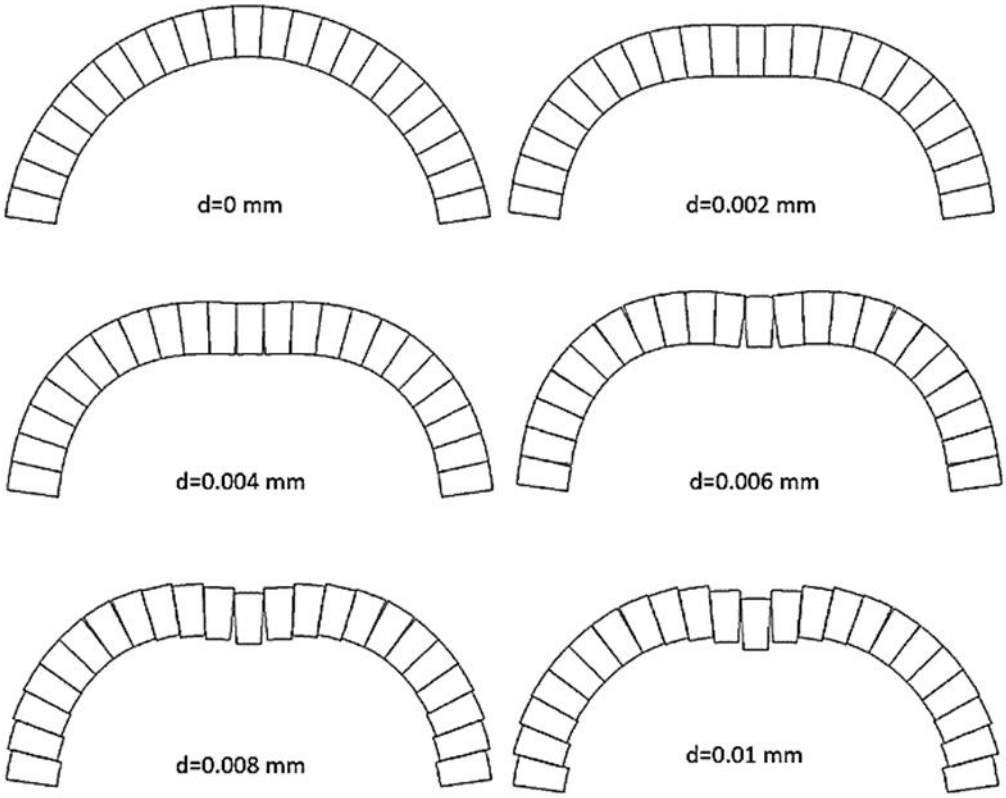
3.2 Yükleme 1: Kemer üst noktasından simetrik yükleme

Bu bölümde en üst noktasından, genellikle kilit taşı olarak adlandırdığımız yığma birim üzerinden yüklenen kemer örneği Şekil 5'te görülmektedir. Kemer 23 adet yığma birim ve yığma birimler arasında teşkil edilen KBM modeli ile oluşturulmaktadır.



Şekil 5. Kemer en üst noktasından yükleme durumu

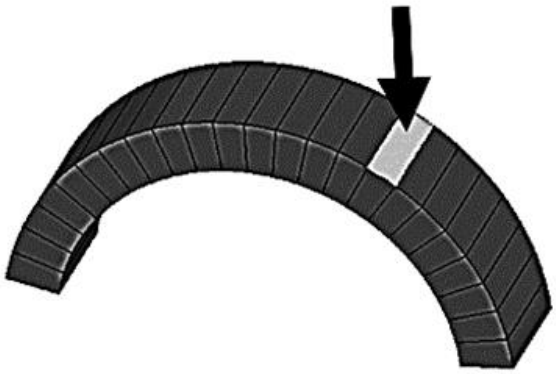
Analizler sonucunda yığma kemerlerin kırılma mekanizmaları Şekil 6'da detaylı olarak sunulmaktadır. Burada analiz sonuçlarında görülen yapıda meydana gelen maksimum yer değiştirme (d) değerine göre meydana gelen deformasyonlar adım adım görülmektedir. Şekilde yığma kemerlerin artan deformasyon miktarına (d) göre yapısal davranışlarını ve kırılma mekanizmaları görülmektedir. Yığma kemerdeki birimlerin d=0 mm'den d=0.01 mm'ye kadar artan deformasyonlar altında nasıl hareket ettiği ve birbirleriyle olan bağlantılarının nasıl değiştiği gözlemlenebilir. Bu tür deformasyon analizleri, kemerin yük altında kırılma mekanizmalarını belirlemeye yardımcı olur. Başlangıç durumunda (d=0 mm), kemerin bütünlüğü korunmuş, tüm taşlar birbirine sıkıca bağlıdır. Ancak deformasyon arttıkça (d=0.002 mm'den d=0.01 mm'ye kadar), taşlar arasında açıklıklar oluşmakta ve bazı bölgelerde ayrılmalar gözlemlenmektedir. Özellikle d=0.008 mm ve sonrasında kemerin tepe noktasında belirgin bir açıklık oluşmaktadır. Bu durum, kemerin yük altında maruz kaldığı gerilmeler sonucu mafsal bölgelerinin oluştuğunu ve taşıyıcı elemanlar arasındaki bağın zayıfladığını gösterir. Kemerlerin kırılma mekanizmalarının tepe noktası ve belirli mafsal bölgelerinde geliştiğini göstermektedir. Kemerin bu bölgelerindeki ayrılmalar, yükün dağılımına bağlı olarak yığma yapıların hasara en açık olduğu alanları işaret eder. Dolayısıyla, yığma kemerlerin yapısal analizlerinde bu kritik bölgelerin güçlendirilmesi gerektiğini veya bu bölgelerde oluşabilecek hasarları öngörmek için kullanılabilecek bir referans sunmaktadır. Yükleme sonucu kemerde meydana gelen kırılma mekanizması d=0.01 mm gibi düşük olarak nitelendirebileceğimiz bir miktarda ortaya çıkmaktadır. Sonrasında bazı mafsalların kapandığı, yığma birimler arasında kaymaların gerçekleştiği görülmektedir. Analiz sonucunda görülen deformasyon durumu, yığma kemerin göçme sonrasındaki durumunu temsili olarak gösterdiğini söylenebilir.



Şekil 6. Yığma kemerin farklı yükleme değerlerindeki deforme olmuş şekilleri

3.3 Yükleme 2: Yığma kemerde simetrik olmayan yükleme

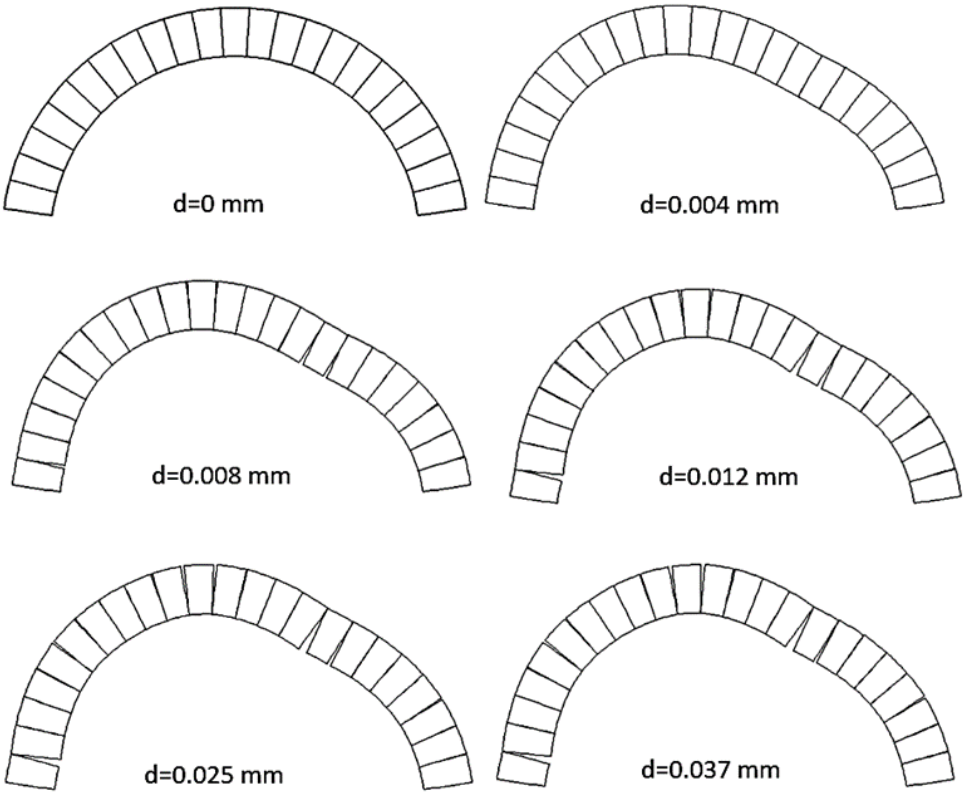
Bu bölümde keyfi olarak seçilen bir yığma birim üzerinden yüklenen kemer örneği Şekil 7'de görülmektedir. Bu analizde, yığma birimlerden oluşan bir kemerin üzerine bir tekil yük uygulandığı görülmektedir.



Şekil 7. Kemerde simetrik olmayan yükleme durumu

Kemerin üst kısmına bir noktada uygulanan yük, ok ile gösterilmektedir ve belirli bir yığma bloğu üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu tür bir yükleme, kemerin yapısal dayanımını test etmek veya yük etkisi altında kırılma davranışını incelemek için yapılmaktadır. Yığma kemerler genellikle yük altında doğrusal olmayan bir davranış sergiler ve uygulanan yük, kemerin taşıma kapasitesini zorlayarak taşlar arasında gerilme oluşmasına neden olur. Yükleme sonucu oluşacak deformasyon ve açıklıklar, kemerin bu yük altında nasıl tepki verdiğini, hangi bölgelerde çatlak veya ayrılma oluşabileceğini anlamaya yardımcı olmaktadır. Analizler sonucunda yığma kemerlerin kırılma mekanizmaları Şekil 8'de detaylı olarak sunulmaktadır.

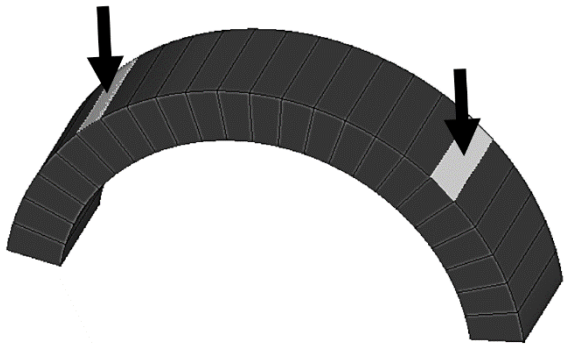
Analiz sonuçlarında görülen yapıda meydana gelen maksimum yer değiştirme (d) değerine göre meydana gelen deformasyonlar görülmektedir. Bu analiz, yığma kemerlerin farklı deformasyon seviyeleri (d) altında yapısal davranışlarını ve kırılma mekanizmalarını gösterir. Deformasyon d=0 mm'den başlayarak d=0.037 mm'ye kadar kademeli olarak artmaktadır. Kemerin her bir seviyede nasıl tepki verdiği, yapının yük altında maruz kaldığı gerilmelerle nasıl şekil değiştirdiği ve hangi bölgelerde çatlama ya da ayrılmaların oluştuğu gözlemlenebilir. Başlangıç durumunda (d=0 mm), kemer tamamen sağlam ve taşlar arasındaki bağlantılar eksiksizdir. Deformasyon arttıkça, taşlar arasında özellikle üst ve kenar bölgelerde açılmalar meydana gelmektedir. Bu açıklıklar, yük altında kemerde oluşan gerilmelerin etkisiyle taşların birbirlerinden ayrılma eğilimine girdiğini gösterir. Özellikle d=0.012 mm ve sonrasında, kemerin üst kısmında belirgin bir ayrılma oluşmakta ve mafsal bölgeleri netleşmektedir. d=0.025 mm ve d=0.037 mm seviyelerinde, bu ayrılmalar daha belirgin hale gelmekte, kemerin yük taşıma kapasitesi azalmaktadır. Yükleme sonucu ilk mafsalın, kemerin yükleme yapılan kısmında ortaya çıktığı görülmektedir. Sonrasında oluşan diğer üç mafsalla beraber kemer çökme durumuna ulaşmaktadır.



Şekil 8. Yığma kemerin farklı yükleme değerlerindeki deforme olmuş şekilleri

3.4 Yükleme 3: Kemere 2 noktadan simetrik tekil yükleme

Bu bölümde Şekil 9'da görülen kemere iki noktadan tekil yük etki etmektedir. Kemerin üst kısmına iki noktada uygulanan yükler, ok ile gösterilmektedir.

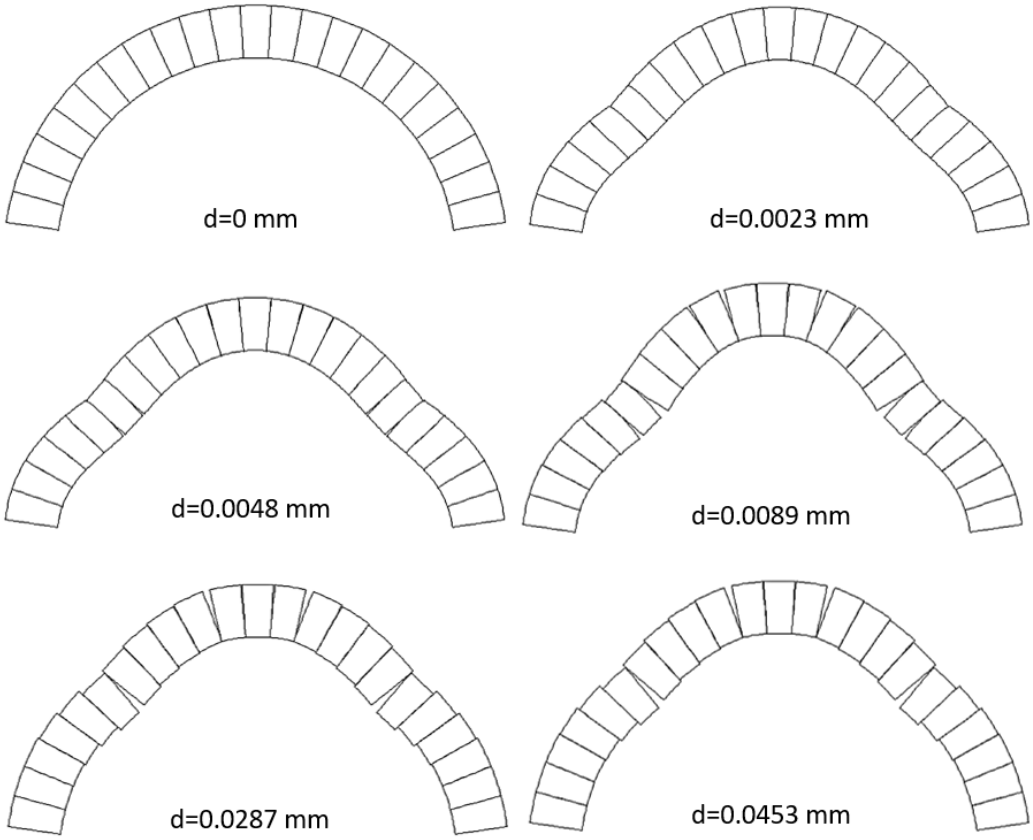


Şekil 9. Kemerde 2 noktadan simetrik tekil yükleme durumu

Analizler sonucunda yığma kemerlerin kırılma mekanizmaları Şekil 10'da detaylı olarak sunulmaktadır. Deformasyon d=0 mm'den başlayarak d=0.0453 mm'ye kadar kademeli olarak artmaktadır. Özellikle d=0.0089 mm ve sonrasında, kemerin üst kısmında belirgin bir ayrılma oluşmakta ve mafsal bölgeleri netleşmektedir. d=0.0453 mm deformasyonda, bu ayrılmalar daha belirgin hale gelmekte, kemerin dört mafsallı kırılma mekanizmasına ulaşmaktadır.

İlk durum, yük uygulanmadan önceki durumu göstermektedir. Küçük bir yük uygulandığında, yapıda hafif deformasyon başlamaktadır. Yük arttıkça, bazı bölgelerde küçük çekme gerilmeleri ve mikro çatlaklar başlamaktadır. Daha yüksek deformasyon seviyelerinde, kemerin kritik bölgelerinde plastik mafsalların oluşmaya başladığı görülmektedir. Mafsalların oluşumu yük dağılımını etkileyerek kırılma mekanizmasını tetiklemektedir. Son durumda d=0.0453 mm deformasyonda kemer artık mekanizmaya dönüşmüş durumdadır. Kritik yük sınırına ulaşıldığında, çatlaklar belirli bölgelerde genişler ve bu bölgeler mafsal haline gelir. Kemerin dört farklı noktasında plastik mafsallar oluştuğunda, yapı bir mekanizmaya dönüşür. Artık kemer yük taşıyamaz hale gelir, çünkü bu noktadan sonra herhangi bir ek yük yapının çökmesine neden olmaktadır. Plastik mafsalların oluşumu tamamlandığında kemer yük taşıyamaz hale gelmektedir.

Bu analizler, kemerin dayanımını ve kırılma mekanizmasını belirlemek için kullanılmaktadır. Deformasyon ve kırılma mekanizmaları, yığma kemerlerin tasarımında güvenlik sınırlarını anlamak ve olası hasarları önlemek açısından önemlidir.



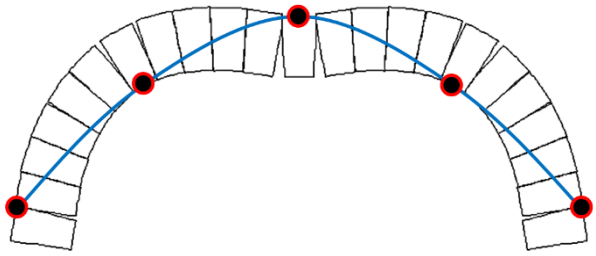
Şekil 10. Yığma kemerin farklı yükleme değerlerindeki deforme olmuş şekilleri

4 Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

Yığma kemerin yapısal davranışını görmek için sonlu elemanlar analizlerinin bazı sonuçları bu bölümde sunulmaktadır. Kilit taşı üzerinden yüklenen kemerin üç boyutlu deformasyonu Şekil 11'de görülmektedir.

Şekil 11. Kemerde görülen üç boyutlu deformasyon (d=0.01 mm)

Kemer üst noktasından simetrik olarak yüklenmesi sonucu ortaya çıkan kırılma mekanizması Şekil 12'de görülmektedir. En üst noktasından simetrik olarak yüklenen kemerde beş mafsallı kırılma mekanizması meydana gelmektedir.



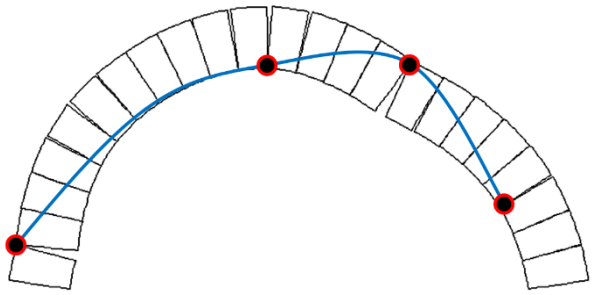
Şekil 12. Simetrik yüklü yığma kemerde kırılma mekanizması

Belirli bir yükleme koşulu altında kemer yapıların stabilitesi ve güvenliği, yapıların geometrisine ve malzemenin mekanik özelliklerine büyük ölçüde bağlıdır. Yığma kemerde çekme dayanımının ihmal edilebilir bir düzeyde olduğu bilinen bir durumdur. Kemerler için güvenlik koşulu, itme çizgisinin kemerin her bir bölümünün içinde tutulduğunda elde edilir. İç kuvvetlerin sonucu merkezin dışına doğru hareket ettiğinde kesit parçalanır ve yüksek deformasyonların olduğu bir aşama başlar. Bunun sonucu olarak kemerin basınç altındaki kenarının ezildiğini gösteren bir mafsal oluşur.

Üst kısmın sağından keyfi bir noktadan yüklenen kemerde, deforme olmuş şekil ve mafsal bölgeleri asimetrik olarak yüklenen kemer içinde başarıyla belirlenebilmektedir. Yığma birimler arasındaki ayrım şekilde açıkça görülmektedir. Yığma tuğlaların ayrılma noktası, taşıyıcı sistemin çökme noktaları olarak değerlendirilebilir. Kemerin üç boyutlu deformasyon Şekil 13'de görülmektedir.

Şekil 13. Kemerde oluşan üç boyutlu deformasyon (d=0.037 mm)

Kemerde simetrik olmayan yükleme durumunda ortaya çıkan kırılma mekanizması Şekil 14'te görülmektedir. Mafsal sayısı dörde eşit veya daha fazla olduğunda yapı kararsız hale gelir ve çökme meydana gelmektedir.



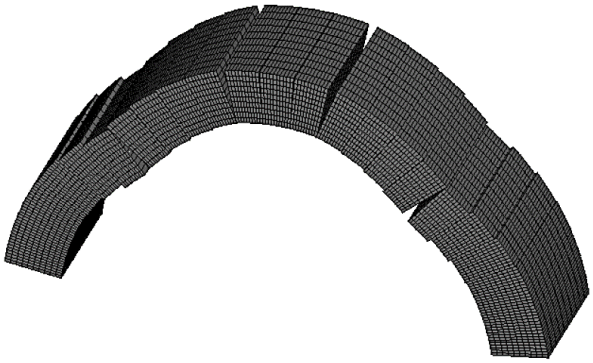
Şekil 14. Kemerde oluşan kırılma mekanizması

Tepe noktasından ve tepe noktasının sağından yüklü iki yığma kemer örneği incelendiğinde her iki yükleme senaryosunun yığma kemer üzerindeki etkileri farklı olacaktır. Tepe noktasından yükleme uygulandığında, kemer üzerindeki yük doğrudan yukarıdan gelen bir kuvvet olarak dağıtılır. Bu yük, kemerin eğimindeki değişikliklere göre taş birimleri arasında basınç ve kayma gerilmeleri oluşturur. Yükün simetrik bir şekilde uygulandığı bu durumda, kemer yükü her iki mesnete eşit şekilde aktarır, yani her iki yanındaki yığma birimler de simetrik olarak yük taşır. Bu simetrik yük dağılımı genellikle yapının daha dengeli olmasını sağlar. Yük simetrik olarak dağılır, dolayısıyla her iki mesnete ve yığma birimlerine eşit gerilmeler gelir. Yük arttıkça, taşıma kapasitesinin genellikle artması beklenir çünkü kemer homojen bir şekilde yükü taşır. Simetrik yükleme nedeniyle dayanıklılık, daha dengeli bir dağılım ile maksimum düzeyde olur. Tepe noktasının sağından yükleme uygulandığında, yük, kemerin sadece bir tarafına daha fazla gerilim uygular. Bu durum, yapıyı asimetrik bir şekilde yükler ve sağdaki yığma birimleri, yükü taşımada daha fazla zorlanır. Bu asimetri, kemerin deformasyonunu ve gerilme dağılımını etkiler. Yük sağ tarafta yoğunlaştığı için, sağdaki yığma birimler üzerindeki gerilmeler artacak ve kemerin yapısal stabilitesinde dengesizlikler meydana gelir. Kısa mesafede daha düşük yük taşıma kapasitesine sahip olabilir,

ancak bazı özel durumlarda yer değiştirmelerin kontrollü bir şekilde yönlendirilmesi sağlanabilir. Yük asimetrik olduğundan, sağ tarafta yığma birimlerde yerel aşırı gerilme ve potansiyel çatlaklar meydana gelebilir. Bu da yapının genellikle daha düşük dayanıklılığa sahip olmasına yol açar.

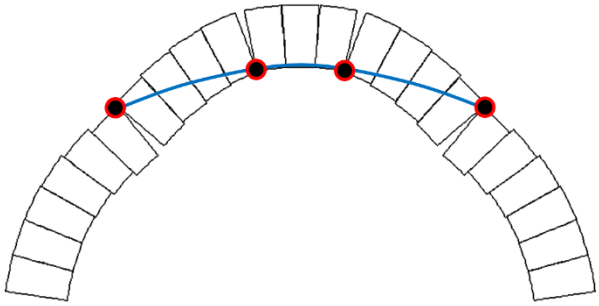
Tepe noktasından ve tepe noktasının sağından yüklenen iki kemerin yer değiştirme davranışı, yükün dağılımına ve yapının simetrik ya da asimetrik olmasına bağlı olarak farklılık gösterecektir. Yer değiştirme, yükün kemer üzerindeki yığma birimlerine nasıl etki ettiğiyle doğrudan ilişkilidir. Tepe noktasından simetrik yükleme, kemerin her iki tarafında daha düzenli bir yer değiştirme sağlar. Yük arttıkça, yer değiştirme de artar, ancak her iki tarafta yük eşit dağıldığı için yer değiştirme oranı genellikle daha kontrollü ve düzenlidir. Asimetrik yükleme nedeniyle sağ tarafta daha fazla yer değiştirme olur. Kemerin sağ tarafı, sol tarafa kıyasla daha büyük deformasyon gösterir. Bu, sağdaki yığma birimlerin daha fazla yer değiştirmesine neden olur.

İki noktadan simetrik asimetrik olarak yüklenen kemerde, deforme olmuş şekil ve mafsal bölgeleri belirlenmektedir. Kemerin üç boyutlu deformasyon Şekil 15'te görülmektedir.



Şekil 15. Kemerde oluşan üç boyutlu deformasyon (d=0.0453 mm)

Kemerde iki noktadan yapılan yükleme durumunda ortaya çıkan kırılma mekanizması Şekil 16'da görülmektedir. Kemerin yükleme noktalarına ek olarak üst kısımlarda iki adet daha mafsal bölgesi oluşarak kemer kırılma mekanizması formuna ulaşmaktadır.



Şekil 16. Simetrik iki tekil yük etkisindeki kemerde oluşan kırılma mekanizması

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, yığma kemerler basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğinin sistematik ve yeni bir şekilde kurgulanmasıyla oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modelleri kullanılarak analiz edilmektedir. Sunulan sistematik yapı kullanıldığında, yığma kemerlerin geometrilerinin oluşturulması ve ara yüzeylerin tanımlanması işlemleri oldukça pratik olarak yapılabilmektedir. Bu husus ise ortaya konulan sonlu eleman modelinin; farklı yığma birim sayısı, farklı yerleşim açıları ve farklı geometrik parametreler içeren yığma kemerlerin modellenmesinde kullanılmasını kolaylaştırmaktadır.

Yığma birimler, kontakt elemanlar bünyesindeki KBM modeliyle birleştirilerek yığma kemer davranışını etkili şekilde yansıtmaktadırlar. Bu durum, yığma kemerlerde meydana gelmesi beklenen çekme-ayrılma davranışının doğru bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır.

Sunulan model sayesinde, yığma kemerin deforme olmuş şekilleri ve kırılma mekanizmaları elde edilmektedir. Analizlerde kemerlerin kırılma mekanizmalarının oluşma aşamalarının sıra ile belirlenmesi kemer üzerindeki kısımların birbirlerine göre mukavemet durumları hakkında önemli bilgiler vermektedir. Simetrik yüklü kemerde beş mafsallı çökme mekanizması, asimetrik olarak yüklenen kemerde ve iki tekil yük ile yüklenen kemerlerde ise dört mafsallı çökme mekanizması başarılı olarak tespit edilmiştir. Kemerlerin kırılma mekanizmalarının önceden belirlenmesi sayesinde yığma kemerlere uygulanacak güçlendirme yöntemi ve güçlendirilecek bölgeler daha etkili bir şekilde tespit edilebilir.

Tepe noktasından yüklenen kemer, simetrik yük dağılımı sayesinde genellikle daha dayanıklı olacaktır. Bu durumda kemer, yükü daha dengeli bir şekilde taşır ve yapının stabilitesi korunur. Öte yandan, tepe noktasının sağından yüklenen kemerde, yük asimetrik olduğu için sağ tarafta daha fazla gerilme meydana gelir, bu da yapının daha erken hasar görmesine neden olabilir. Bu nedenle, simetrik yükleme genellikle daha yüksek dayanıklılık sağlar.

Tepe noktasının sağından yüklenen kemer, daha fazla yer değiştirme yapar çünkü yük, sadece bir tarafa uygulandığı için asimetrik gerilmeler ve deformasyonlar ortaya çıkar. Kemerin sağ tarafındaki birimler daha fazla deforme olacak, dolayısıyla bu bölgede daha büyük bir yer değiştirme meydana gelecektir. Öte yandan, tepe noktasından yüklenen kemer simetrik bir şekilde yük taşır ve bu nedenle yer değiştirme daha dengeli olur, ancak toplamda daha az yer değiştirme olmaktadır.

Deformasyon ve kırılma analizleri, kemerlerin kritik kırılma noktalarını belirlemede önemli birer araçtır. Analizler, kemerin tasarım veya restorasyon sürecinde hangi bölgelerin güçlendirilmesi gerektiği hakkında fikir vermektedir. Kemerin yük altında beklenilen dayanıklılığını sürdürebilmesi için bu kritik alanların takviye edilmesi, yapı güvenliği açısından önemli bir husustur. Yığma yapıların analizlerinde mikro modelleme tekniği, yaygın olarak kullanılan homojenize ya da makro modelleme yaklaşımına göre oldukça gerçekçi sonuçlar sunmaktadır. Bu nedenle yığma yapıların mikro modeller ile analiz edildiği çalışmaların yaygınlaşması gerekmektedir.

Semboller listesi

b : Tuğla eni

d : Yer değiştirme miktarı

E_t : Tuğla elastisite modülü

E_h : Harç elastisite modülü

G_c : Çekme-ayrılma eğrisinin altındaki alan, kırılma enerjisi

G_h : Harç kayma modülü

G_t : Tuğla kayma modülü

G_{kI} : Mod I normal ayrılma için kritik kırılma enerjisi

G_{kII} : Mod II teğetsel kayma için kritik kırılma enerjisi

H : Yükseklik

k : Tuğla boyu

K_n, K_s, K_t : Normal, kayma ve enine yönlerdeki ayrılmaya karşı rijitlik parametreleri

L : Açıklık

R_i : Kemerin iç yarıçapı

R_d : Kemerin dış yarıçapı

t : Kalınlık

β : Normal basınç temas gerilmesi altında teğet kayabilme ayarı

δ_n^0, δ_s^0, δ_t^0 : Farklı yönlerdeki (normal, kayma ve enine) başlangıç ayrılma değerleri

δ_n^f, δ_s^f, δ_t^f : Malzemenin tamamen koptuğu noktadaki son ayrılma değerleri

η : Yapay sönümleme katsayısı

θ : Yığma birimlerin yerleşim açısı

v_h : Harç Poisson oranı

v_t : Tuğla Poisson oranı

μ : Sürtünme katsayısı

σ_0 : Maksimum normal temas gerilimi

τ_0 : Maksimum eşdeğer teğetsel temas gerilimi

τ_n^0, τ_s^0, τ_t^0 : Farklı yönlerdeki (normal, kayma ve enine) başlangıç çekme değerleri

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

[1] J. Heyman, The Masonry Arch, Ellis Horwood Ltd, 1982.

[2] P. B. Lourenço, Computational Strategies for Masonry Structures, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, 1996.

[3] N. Cavalagli, V. Gusella, L. Severini, Lateral loads carrying capacity and minimum thickness of circular and pointed masonry arches, Int. J. Mech. Sci. 115-116: 645-656, 2016. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.07.015

[4] I.E. Edri, D.Z. Yankelevsky, O. Rabinovitch, Out-of-plane response of arching masonry walls to static loads, Eng. Struct., 201: 109801, 2019. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109801

[5] R. Quinteros-mayne, I. De Arteaga, R. Goñi-lasheras, A. Villarino, J.I. Villarino, The influence of the elastic modulus on the finite element structural analysis of masonry arches, Constr. Build. Mater., 221: 614-626, 2019. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.013

[6] E. Ricci, A. Fraddosio, M. Daniele, E. Sacco, A new numerical approach for determining optimal thrust curves of masonry arches, Eur. J. Mech. / A Solids 75: 426-442, 2019. https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2019.02.003

[7] F. Cannizzaro, B. Pantò, S. Caddemi, I. Caliò, A Discrete Macro-Element Method (DMEM) for the nonlinear structural assessment of masonry arches, Eng. Struct. 168: 243-256, 2018. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.006

[8] P. Di, D. Addessi, E. Sacco, A multiscale force-based curved beam element for masonry arches, Comput. Struct. 208: 17-31, 2018. https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2018.06.009

[9] I.De Arteaga, P. Morer, The effect of geometry on the structural capacity of masonry arch bridges, Constr. Build. Mater. 34: 97-106, 2012. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.037

[10] V. Sarhosis, T. Forgács, J.V. Lemos, A discrete approach for modelling backfill material in masonry arch bridges, Comput. Struct. 224: 106108, 2019. https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2019.106108

[11] G. De Felice, R. Giannini, Out-of-plane Seismic Resistance of Masonry Arches, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 05(2), 253-271, 2001. https://doi.org/10.1080/13632460109350394

[12] L. Pelà, A. Aprile, A. Benedetti, Seismic assessment of masonry arch bridges, Eng. Struct. 31, 1777-1788, 2009. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.012

[13] R. Dimitri, F. Tornabene, A parametric investigation of the seismic capacity for masonry arches and portals of different shapes, Eng. Fail. Anal. 52: 1-34, 2015. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.02.021

[14] P. Zampieri, N. Simoncello, C. Pellegrino, Seismic capacity of masonry arches with irregular abutments and arch thickness, Constr. Build. Mater. 201: 786-806, 2019. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.063

[15] I. Cancelliere, M. Imbimbo, E. Sacco, Experimental tests and numerical modeling of reinforced masonry arches, Eng. Struct. 32, 776-792, 2010. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.12.005

[16] E. Bertolesi, G. Milani, F.G. Carozzi, C. Poggi, Ancient masonry arches and vaults strengthened with TRM, SRG and FRP composites: Numerical analyses, Compos. Struct. 187: 385–402, 2018. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.021

[17] M.R. Valluzzi, M. Valdemarca, C. Modena, Behavior of brick masonry vaults strengthened by frp laminates, J. Compos. Constr., 5(3): 163-169, 2001. https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900268(2001)5:3(163)

[18] G. Milani, P. B. Lourenço, 3D non-linear behavior of masonry arch bridges, Computers and Structures 110–111, 133–150, (2012). https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.07.008

[19] T. Michiels, S. Adriaenssens, Form-finding algorithm for masonry arches subjected to in-plane earthquake loading, Computers and Structures, 195 (2018) 85–98, 2018. https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.10.001

[20] W.J. Lewis, J.M. Russell, T.Q. Li, Moment-less arches for reduced stress state. Comparisons with conventional arch forms, Computers and Structures, 251 (2021) 106524. https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2021.106524

[21] B. Liu, V. Sarhosis, J. V. Lemos, Quantification of the crack propagation and global failure mechanism of single-and multi-ring masonry arch bridges, Engineering Structures, 306 (2024) 117805. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117805

[22] S. Grosman, L. Macorini, B.A. Izzuddin, Parametric nonlinear modelling of 3D masonry arch bridges, Advances in Engineering Software, 185 (2023) 103514. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2023.103514

[23] E. Bertolesi, G. Milani, R. Fedele, Fast and reliable non-linear heterogeneous FE approach for the analysis of FRP-reinforced masonry arches, Composites Part B, 88 (2016) 189-200. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.11.005

[24] D. Aita, M. Bruggi, and E. Garavaglia, Collapse analysis of masonry arches and domes considering finite friction and uncertainties in compressive strength, Eng. Fail. Anal., vol. 163, no. PA, p. 108462, 2024. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108462

[25] R. Avasthi and D. C. Rai, Seismic behavior of circular segmental masonry arch considering tensile strength of joints, Bull. Earthq. Eng., vol. 21, no. 14, pp. 6367–6391, 2023. https://doi.org/10.1007/s10518-023-01771-2

[26] N. Pingaro, M. Buzzetti, and G. Milani, Advanced FE nonlinear numerical modeling to predict historical masonry vaults failure: Assessment of risk collapse for a long span cloister vault heavily loaded at the crown by means of a general-purpose numerical protocol, Eng. Fail. Anal., vol. 167, no. PB, p. 109070, 2025. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.109070

[27] R. Varró, G. Bögöly, and P. Görög, Laboratory and numerical analysis of failure of stone masonry arches with and without reinforcement, Eng. Fail. Anal., vol. 123, no. March 2020, 2021. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105272

[28] P. Zampieri, M. A. Zanini, and F. Faleschini, Influence of damage on the seismic failure analysis of masonry arches, Constr. Build. Mater., vol. 119, pp. 343–355, 2016. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.024

[29] C. Zhao, Y. Xiong, X. Zhong, Z. Shi, and S. Yang, A two-phase modeling strategy for analyzing the failure process of masonry arches, Eng. Struct., vol. 212, no. July 2019, p. 110525, 2020. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110525

[30] B. Ozturk, Seismic behavior of two monumental buildings in historical Cappadocia region of Turkey, Bulletin of Earthquake Engineering, 2017, 15: 3103-3123. https://doi.org/10.1007/s10518-016-0082-6

[31] D. Guney, E. Aydin, B. Ozturk, The evaluation of damage mechanism of unreinforced masonry buildings after Van (2011) and Elazig (2010) Earthquakes. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 628. No. 1. IOP Publishing, 2015. https://doi.org/10.1088/1742-6596/628/1/012066

[32] B. Ozturk, C. Yilmaz, T. Senturk, Effect of FRP retrofitting application on seismic behavior of a historical building at Nigde, Turkey. 14th European Conference on Earthquake Engineering 2010: Ohrid, Republic of Macedonia, 2010.

[33] B. Ozturk, T. Senturk, C. Yilmaz, Analytical investigation of effect of retrofit application using CFRP on seismic behavior of a monumental building at historical Cappadocia region of Turkey. 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Toronto, Canada. 2010.

[34] ANSYS 23.0 (2023) Element reference.