

## Yığma Yapıların Düzlem İçi Davranışının Kafes Model Yaklaşımı ile Analizi

Yunus GÜNER\*<sup>1</sup>, Ayhan NUHOĞLU<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35040, İzmir, Türkiye

<sup>1</sup>Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 09010, Aydın, Türkiye

(Alınış / Received: 27.04.2022, Kabul / Accepted: 27.07.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 20.12.2022)

### Anahtar Kelimeler

Yığma yapı,  
Eşdeğer kafes model,  
Doğrusal olmayan analiz,  
Çubuk eleman

**Öz:** Yığma yapılarda, malzeme parametrelerindeki belirsizliklerin yanı sıra düzensiz duvar örgü biçimi ve taşıyıcı elemanlarda oluşan hasarlar da göz önünde bulundurulduğunda yapısal davranışının ve taşıma kapasitesinin belirlenmesi oldukça karmaşık bir hale gelmektedir. Bu durumlarda nümerik analizlerde basitleştirilmiş yaklaşımların tercih edilmesi, çözüme pratik olarak ulaşılmasına olanak sağlar. Bu çalışmada, yığma taşıyıcı sistemlerin düzlem içi hasar oluşumları ve taşıma kapasiteleri kafes elemanlardan oluşan sayısal analiz modeli kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Yığma yapılarda kullanılması açısından yenilikçi bir yaklaşım olarak önerilen bu yöntemde, sadece uzun eksen doğrultusunda yük taşıyan çubuk elemanlar kullanılmaktadır. Böylece oluşturulan eşdeğer hesap modeliyle gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizler ile yapıda dış yük etkisinde meydana gelebilecek hasarların ve maksimum taşıma kapasitesinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Literatürde daha önce incelenen yığma yapıların esas alındığı çalışmada, yöntemin avantajları ve dezavantajları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Gerçek yapıdaki süneklik tepkisinin tam olarak temsil edilememesine rağmen, maksimum taşıma kapasitesinin ve hasar oluşum bölgelerinin kabul edilebilir düzeyde doğrulukla belirlenebileceği görülmüştür. Yaygın olarak tercih edilen kapsamlı modelleme prosedürlerine bir alternatif olarak önerilen eşdeğer kafes model yaklaşımının umut verici olduğu sonucuna varılmıştır.

## Analysis of In-Plane Behaviour of Masonry Structures by Truss Model Approach

### Keywords

Masonry structure,  
Equivalent truss model,  
Nonlinear analysis,  
Frame element

**Abstract:** In masonry structures, determination of a structural behavior and load-bearing capacity becomes quite complicated when irregular wall bond patterns and the damages developing in load-bearing elements are considered, as well as the unclear in the material parameters. In these cases, preferring simplified approaches in a numerical analysis allows to obtain solution practically. In this study, in-plane damage developments and load-bearing capacities of masonry structure were tried to be determined using a numerical analysis model consisting of truss elements. In this method, which was proposed as an innovative approach in terms of use in masonry structures, frame elements that only load-bearing in the direction of the longitudinal axis were used. Thus, in the structure, it was aimed to obtain the maximum load-bearing capacity and damages that may occur, under external loads with the nonlinear analyzes performed by the equivalent calculation model. In the study based on masonry structures discussed in the literature previously, the advantages and disadvantages of the method were evaluated comparatively. Although the ductility response of a real structure couldn't be fully represented, it was observed that the maximum load-bearing capacity and damage formation zones could be determined with acceptable accuracy. Consequently, the equivalent truss model approach, which is proposed as an alternative to the commonly preferred detailed modeling procedures, is promising.

### 1. Giriş

Yığma taşıyıcı sistemlerin yapısal davranışlarının

belirlenmesinde bilgisayar ve yazılım teknolojileri ile geliştirilen alternatif modelleme ve analiz teknikleri tercih edilebilmektedir [1]. Ele alınan yığma yapılar

kendine has sahip oldukları koşullar dikkate alarak çeşitli yaklaşımlara göre sınıflandırılabilir. Buna bağlı olarak geliştirilen sayısal analizlerde esas alınan kabuller de değişiklik göstermektedir. Örneğin, tek açıklıklı dairesel kâgir kemer köprüler [2], antik tiyatro tipi [3] veya ibadethane tarzında inşa edilmiş yapılar [4],[5] karakteristik özelliklerine bağlı olarak spesifik olarak ele alınabilmektedir.

Her bir modelleme yaklaşımının doğrulukla uygulanabilmesi için çeşitli kabuller yapılmakta ve analiz sonuçları da bu durumdan etkilenmektedir. Yapısal davranışın daha gerçekçi olarak elde edilebilmesi için; detaylı modellemeye, yüksek analiz kapasitesine sahip bilgisayarlara, teorik altyapısı gelişmiş yazılımlara, kapsamlı malzeme bilgisine ve konusunda uzman mühendislere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun yanında analiz sürelerinin uzunluğu ve sonuçların doğru yorumlanması hususları da karşılaşılan önemli sorunlar arasındadır. Basitleştirilmiş yaklaşımlarla amaca yönelik sayısal analiz modellerinin tasarlanması, hızlı ve etkili sonuçların alınması hususunda önemlidir. İlerleyen süreçte gerek duyulması halinde daha kapsamlı yaklaşımlar tercih edilmelidir. Nihayetinde, teorik analizlerin ve buradan elde edilecek sonuçların uygunluğu yapılan kabullerin doğruluğu ile orantılı olacaktır [6].

Riskli deprem kuşağında yer alan Anadolu coğrafyası civarında son yüzyılda büyüklüğü 6 ve üzeri olan onlarca deprem meydana gelmiştir. Depremler sonrasında oluşan hasarların giderilmesi için büyük maliyetlerle karşılaşmaktadır [7]. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda yapıların hızlıca elden geçirilmesi ve gerekli olacak yapısal tedbirlerin alınması öncelikli konulardandır. Bu kapsamda arşiv ve saha çalışmalarıyla [8],[9] birlikte hızlı ve pratik sayısal analiz modellerinin sürece büyük katkılar sağlayacağı açıktır.

Bu çalışma yiğma yapıların sayısal analizlerinde kafes elemanlardan oluşan eşdeğer analiz modelleri kullanılarak taşıyıcı sistemde meydana gelebilecek düzlem içi hasarların ve maksimum taşıma kapasitesinin pratik olarak belirlenmesi konusunu ele almaktadır. Sayısal analizlerde sadece eksenleri doğrultusunda yük taşıyan çubuk elemanların kullanılmasının çeşitli avantajları beraberinde getirmektedir. Başlıca düğüm noktası serbestliğinin azalması, pratik modelleme, hızlı analiz, basit malzeme davranış modeli ve malzeme parametrelerindeki sadeleşme olarak sıralanabilirler [10]. Bunun yanında elde edilen sonuçların oldukça kolay yorumlanabilmesi açısından kapsamlı modellere göre önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Bu çalışma kapsamında ele alınan konu başlıklarından biri olmasa da sayısal analiz süreleri de oldukça önemlidir. Yiğma yapıların modellenmesinde yaygın kullanılan üç boyutlu katı

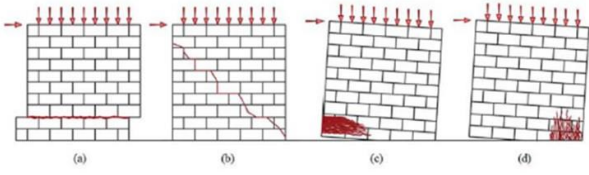
elemanların her biri 8 düğüm noktası ve 48 serbestlik derecesine veya düzlem analizlerde tercih edilen kabuk elemanların her biri 4 düğüm noktası ve 12 serbestlik derecesine sahiptir. Eşdeğer kafes model yaklaşımıyla ise her bir eleman 2 düğüm noktası ve 4 serbestlik derecesine sahiptir. Özellikle kompleks yiğma yapıların tek bir modelle ele alındığı çalışmalarda analiz sürelerinin kısaltılmasında önemli katkılar sunmaktadır [11]. Beraberinde bellek ve depolama alanı ihtiyacı da azalmaktadır.

Kafes giriş yaklaşımının daha yaygın olarak betonarme yapı elemanlarının iki veya üç boyutlu düzlemlerde incelenmesinde ele alındığı farklı çalışmalarda görülmektedir [10],[12]. Tekrarlı yüklemeye etkisindeki betonarme kolonlarda kritik kesme [13] ve tekrarlı yüklemeye etkisinde betonarme kolon ve güçlendirilmiş yiğma duvarın kesme kırılması [14] doğrusal olmayan kafes model yaklaşımıyla araştırılmıştır. Yiğma yapılarda ise çubuk elemanlarla ilgili çalışmalar oldukça sınırlı kalmıştır. Yiğma duvarların elastik davranışları, düzlem çubuk elemanların kullanıldığı duvarın mikro modellemesi ile gerçekleştirilmiştir [15]. Bir başka çalışmada ise düşey taşıyıcı yiğma elemanların düzlem dışı davranışı ele alınmıştır [16]. Öngörülen hasar oluşum formuna dayanarak geliştirilen çubuk eleman benzeri ara yüzey elemanların kullanıldığı hibrit yaklaşım ise farklı bir çalışmanın konusu olmuştur [17]. Kafes elemanların plastik mafsallarla tanımlandığı alternatif bir modelleme yaklaşımı ise Pirsahab et al. [18],[19] tarafından geliştirilmiştir. 2020 yılındaki çalışmada [19] çubuk elemanlar ve yayların birlikte kullanıldığı alternatif bir mikro model yaklaşımının da ele alınmış olduğu görülmektedir. Yiğma yapılarda giriş formundaki çubuk elemanların kullanılması yani eşdeğer çubuk eleman yöntemi daha yaygın olarak çalışmalarda yer bulmuştur [20]. Farklı bir çalışmada ise aynı yöntemin basitleştirilmesinde çubuk elemanlardan yararlanılmıştır [21].

## 2. Materyal ve Metot

Düzlem dışı davranışın engellendiği yiğma taşıyıcı sistemlerde düzlem içi hasar oluşum formları (Şekil 1), kafes model yaklaşımının temelini oluşturmaktadır. Kayma kesmesi, harç dayanımının yetersiz, düşey yükün nispeten az veya sürtünme katsayısının düşük olmasına bağlı olarak tersinir sismik etkiler sonucunda yatay harç yüzeyinde meydana gelen kesme gerilmelerine bağlı çatlak oluşması ile tarif edilebilir. Bir diğer bozulma türü olan diyagonal kesme hasarı ise, duvarın asal çekme gerilme değerinin çekme dayanımını aştığı durumlarda meydana gelmektedir. Eğilme hasarı olarak adlandırılan üçüncü durumda yüklem bölgesinin çapraz alt köşesinde duvarın basınç dayanımının aşılması sonucunda ezilmelerin meydana gelmesi ve taşıma kapasitesinin

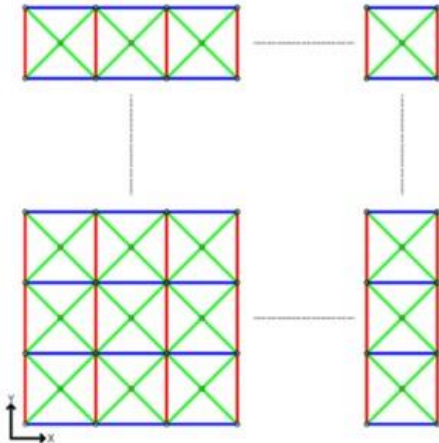
yitirilmesiyle oluşmaktadır. Aynı zamanda diğer alt köşede ise çekme hasarlarının oluşması muhtemeldir.



**Şekil 1.** Yığma duvarlarda düzlem içi yüklemeye meydana gelen tipik kırılma modları; a) Kayma kesmesi, b) Diyagonal kesme ve c), d) Eğilme hasarları [22].

Bu çalışma kapsamında önerilen kafes model yaklaşımında her bir doğrultudaki çubuk elemanın olası yapısal hasar formlarıyla eşleşmesi öngörülmüştür. Mafsallarla birbirlerine bağlanan doğrusal eksenlerine göre, Şekil 2'de görüldüğü gibi, üç farklı kafes elemandan bahsetmek mümkündür; düşey (kırmızı), yatay (mavi) ve diyagonal (yeşil). Düşey elemanlar eğilme etkisiyle meydana gelebilecek çekme gerilmelerine bağlı açılmaları ve basınç gerilmelerine bağlı ezilmeleri, yatay elemanlar yatay harç boyunca oluşabilecek kayma çatlaklarını ve son olarak da diyagonal elemanlar asal çekme veya basınç kaynaklı oluşabilecek hasarları temsil etmektedir.

Modelleme yaklaşımında çubuk kesit alanlarının belirlenmesi, malzeme modeli ve parametreleri, sınır koşullarının modele ne ölçüde yansıtılabildiği gibi alternatifli durumlar sonuçlar üzerinde oldukça etkilidir. Betonarme yapı elemanlarının analizi için Lu and Panagiotou [23] tarafından önerilen kafes model yaklaşımı, yığma yapılar için geliştirilen yeni prosedürün oluşturulmasında önemli rol oynamıştır.



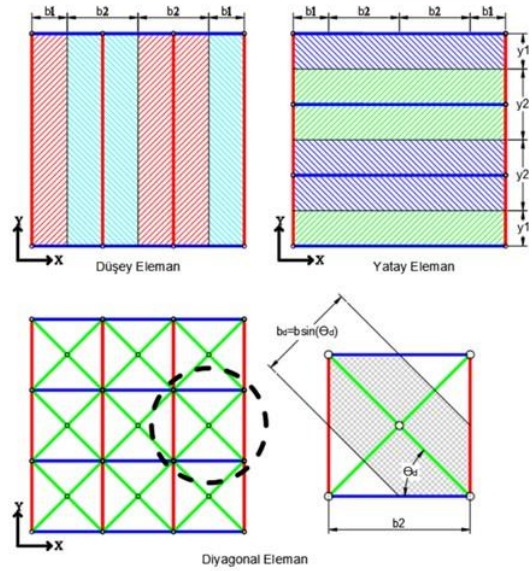
**Şekil 2.** Kafes model yaklaşımı.

## 2.1. Kesit alanları

Üç farklı doğrultudaki çubuk elemanlar için etkili kesit alanları taralı bölgelerle Şekil 3'te görüldüğü gibi tanımlanmıştır. Diyagonal çubukların etkili alanlarının belirlenmesinde açının da rolü bulunmaktadır. Yapılardaki düzlem içi diyagonal kesme hasarının normal ve kayma gerilmelerine bağlı olarak asal çekme gerilmelerine dik doğrultuda

oluşması beklenmektedir. Buradan yola çıkılarak açının belirlenmesinde yaklaşık bir yöntem kullanılabilir [24]. Fakat, yığma yapılarıdaki ana taşıyıcı duvarların genellikle en/boy oranının düşük olması ve narinlikten uzak olmaları nedeniyle daha çok kesme duvarları olarak tanımlanabilirler. Hem modellemenin pratik hale gelmesi hem de literatürde sunulan öneriler dikkate alındığında diyagonal elemanların yatay eksen ile yaptıkları açı yaklaşık  $45^\circ$  olarak kabul görmüştür [11],[19],[24].

Kesit alanları ile ilgili bir diğer önemli nokta ise, düşey elemanların taşıma kapasitesine ek olarak diyagonal elemanlarında taşıyıcı özellik sergilemesi beklenenden daha rijit bir davranışın ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Bu durum ilerleyen bölümde detaylı olarak ele alınmış ve örnekler üzerinden araştırılmıştır.



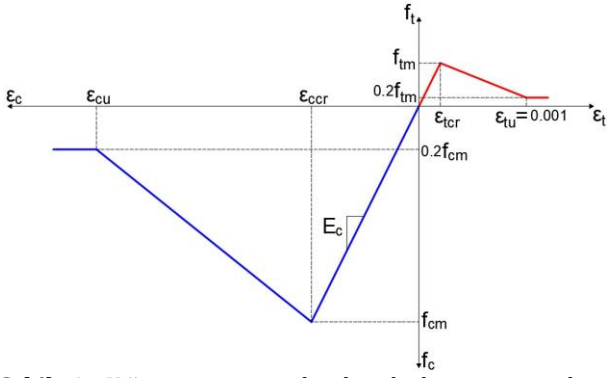
**Şekil 3.** Kesit alanlarının belirlenmesi [14].

## 2.2. Malzeme modeli ve parametreleri

Malzeme modelinde yığma yapıların basınç ve çekme dayanımları arasında var olan büyük davranış farklılığının kafes modele yansıtılabilmesi, sonuçların doğruluğu bakımından oldukça önem arz etmektedir. Bu nedenle kullanılan Abaqus yazılımının bünyesinde bulunan *concrete damaged plasticity* [25] malzeme modeli tercih edilmiştir. Esasında beton malzemesi için geliştirilmiş olan malzeme modeli, yığma taşıyıcı elemanlarında betona benzer bir davranış sergilemesi ve hem basınç hem de çekme davranışlarının ayrı ayrı tanımlanabilmesi nedenleriyle tercih edilmiştir. Düşey ve diyagonal elemanlar için basınç elastisite modülü, maksimum basınç ve çekme dayanımları ve lineer ötesi davranış parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yatay elemanlar için ise kayma modülü, maksimum basınç ve kayma dayanımları ve lineer ötesi davranış parametreleri kullanılmaktadır.

Yiğma yapıları ayakta tutan taşıyıcı elemanların imal edildiği malzemelere ait parametrelerindeki değişkenlik sonuçlar üzerinde oldukça etkilidir. Parametrelerin belirlenmesindeki metotlar ve makro yaklaşım için homojenize edilmeleri sonuçlar üzerindeki hassasiyeti önemli oranda değiştirebilmektedir. Bahsedilen husus göz önünde bulundurulduğunda, yiğma yapıların basınç ve çekme etkisindeki davranışı Şekil 4'teki gibi tanımlanmıştır. Literatürde farklı çalışmalarda da benzer eğrilerle sıklıkla rastlanmaktadır [26],[27].

parametreleri sırasıyla basınç elastisite modülü, çekme dayanımı, çatlamış çekme birim deformasyonu, maksimum çekme birim deformasyonu, basınç dayanımı, çatlamış basınç birim deformasyonu ve maksimum basınç birim deformasyonu temsil etmektedir. Maksimum çekme birim deformasyon değeri farklı çalışmalarda 0.001 olarak varsayılabileceği belirtilmiştir [18],[28]. Dayanım değerleri deneysel çalışmalar sonucunda elde edilirken diğer parametreler Denklem 1-3'teki bağıntılar vasıtasıyla belirlenmektedir.



Şekil 4. Yiğma yapının tek eksenli basınç ve çekme yüklemesi etkisindeki gerilme-birim deformasyon eğrisi [18].

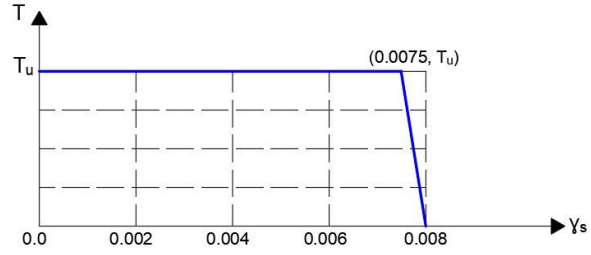
$$\text{---} \quad (1)$$

$$\text{---} \quad (2)$$

$$\text{---} \quad (3)$$

Yatay elemanlara dair kayma davranışı Şekil 5'teki gibi tanımlanmıştır. Düşey eksenindeki maksimum kayma dayanım değeri Mohr-Coulomb teorisi (Denklem 4) dikkate alınarak belirlenebilmektedir. Bu eşitlikte  $\tau_u$  maksimum kayma dayanımı,  $\sigma_v$  düşey basınç gerilmesi,  $c$  kohezyon ve  $\mu$  sürtünme katsayısı olarak ifade edilmiştir. İlaveten sürtünme katsayısı TBDY'de [29] 0.4 olarak önerilmiştir. Buna karşın denklemdeki parametreler için farklı çalışmalarda alternatif değerler önerilmektedir [30]. Şekil 5'teki yatay eksen, analiz programının sürtünme modelindeki davranışı göz önünde bulundurularak literatürdeki bir çalışmadan [31] ele alınmıştır. Kayma modülünün belirtilmediği durumlarda TBDY'e

[29] göre elastisite modülünün %40'ı olarak alınabilmektedir.



Şekil 5. Yiğma yapının kesme yüklemesi etkisindeki gerilme-birim deformasyon eğrisi [31].

(4)

### 3. Uygulamalar

Bu çalışma kapsamındaki örnek uygulamalar, daha öncesinde literatürde deneysel ve/veya alternatif nümerik yaklaşımlarla ele alınmıştır. İlgili çalışmalarda geometrik ve malzeme parametre değerlerinden yararlanılarak bir önceki bölümde ifade edilen malzeme yaklaşımları da kullanılarak eşdeğer kafes model ile çalışmalar tekrar analiz edilmiştir. Literatür ve eşdeğer kafes modelden elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Şekil değiştirmelerin ihmal edilebilir düzeyde küçük olduğu yiğma yapılarda geometrik nonlineer etkileri göz ardı edilmiştir. Eşdeğer kafes modelde zati ağırlık tüm düğüm noktalarına eşdeğer yük olarak uygulanmıştır. Düşey ve yatay etkilerin birlikte bulunduğu durumlarda, yükleme iki aşamalı uygulanmıştır. İlk olarak düşey yükler, bilahare yatay etkiler analiz modeline yansıtılmıştır. Yiğma yapının taşıma kapasitesi, taban kesme kuvvetine karşılık maksimum tepe deplasmanı arasındaki ilişkiden değerlendirilmiştir. Hasar oluşum bölgeleri ve nedenleri ise çubuk elemanlarda meydana gelen plastik şekil değiştirme üzerinden incelenmiştir.

Alternatif çubuk kesit alanlarının analiz sonuçları üzerindeki etkisinin araştırılabilmesi için Şekil 3'te önerilen yöntemle göre belirlenen çubuk kesit alanları alan katsayıları ile çarpılmış (1.0, 0.667 veya 0.5) ve çubuk kesit alanları bu oranda azaltılmıştır. Kesit alanının değişmesiyle eşdeğer kafes modelin birim hacim ağırlığı ve düşey gerilmeye bağlı değişen kayma dayanımı değerlerinde güncellemeler yapılmıştır.

Kafes model geometrisinin oluşturulmasında detaylı ve yaklaşık olmak üzere iki farklı yaklaşım ele alınmıştır. Her iki yaklaşımda da literatürdeki öneriler göz önünde bulundurularak, diyagonal elemanların yatayla yaptığı açının detaylı modelde 45° civarında, yaklaşık modelde ise tam 45° olması amaçlanmıştır. Detaylı modeldeki temel amaç geometrik olarak gerçek yapı ile birebir uyum sağlanmaya çalışılmasıdır. Mesnetler ise tüm çalışma

boyunca benzerlik göstermiş ve en alt düğüm noktalarının düzlemdeki hareketleri kısıtlanmıştır.

### 3.1. Uygulama 1

İki farklı çalışmada [18],[32] nümerik yaklaşımlarla incelenmiş olan düzlemdeki boyutu 12.0x7.8 m olan üç katlı yığma yapı, kafes ve kabuk model yaklaşımlarıyla ele alınmıştır (Şekil 6). Her kat seviyesinde betonarme döşeme ile birbirinden ayrılan yığma yapının duvar kalınlığı 0.175 m'dir. Yapıdaki zati ve hareketli yükleri temsilen kat döşeme hizalarından taşıyıcı duvarlara 127.8 kN'luk düşey yük uygulanmıştır. Yapının birim hacim ağırlığı ise 10.8 kN/m<sup>3</sup> olarak belirtilmiştir.

Detaylı ve yaklaşık olmak üzere iki farklı kafes model yaklaşımı 1.0, 0.667 ve 0.5 alan katsayılarıyla analizlerde ele alınmıştır. Detaylı kafes modelin geometrik ölçüleri yapı modeliyle birebir olacak şekilde belirlenmiştir. Bu nedenle 3 farklı diyagonal açısına ve toplamda 19 farklı çubuk kesit alanına sahiptir. Buna karşın yaklaşık kafes modelde tüm diyagonaller 45° olarak kullanılmış ve toplamda 10 farklı kesit alanı bulunmaktadır. Eşdeğer kafes modellerde betonarme kat döşemelerinin olduğu bölgelerdeki düğüm noktalarının düşey ve yatay doğrultulardaki hareketleri birbirine bağlanmış ve yüklemeler için bu bölgeler kullanılmıştır. Yatay kuvvet ise ters üçgen formatı oluşturacak şekilde, katlara sırasıyla 0.43, 0.77 ve 1.00 olarak belirtilen

etki katsayı kullanılarak yapıya oransal olarak uygulanmıştır.

Kafes model analizlerine ilaveten sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan kabuk model ile de yapısal analizler gerçekleştirilmiş ve yapının taşıma kapasitesi belirlenmiştir. Buradaki temel amaç kullanılan malzeme modeli ve parametrelerinin kabuk model yaklaşımıyla ne ölçüde farklılıklar ortaya koyacağını tespit etmektedir. Kafes model yaklaşımına benzer sınır koşulları kabuk model için de uygulanmıştır.

Nümerik analizlerde kullanılan malzeme parametreleri Tablo 1-3 arasında belirtilmiştir. Bunlar haricinde betonun elastisite modülü 28000 MPa ve çubuk eleman analiz sonuçları üzerinde etken olmayan fakat malzeme modeli için gerekli diğer parametreler için yazılım tarafından önerilen değerler kullanılmıştır [33].

**Tablo 1.** Malzeme parametreleri (MPa) [18].

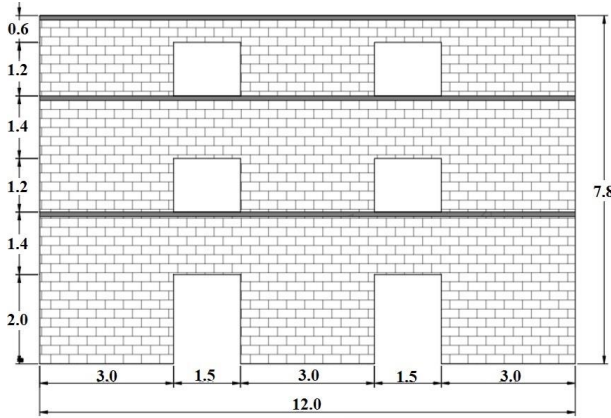
E	G	Poisson	f <sub>cm</sub>	f <sub>tm</sub>	c
1650	660	0.25	3	0.06	1.4*f <sub>tm</sub>

- Poisson oranı kabuk model için belirlenmiştir.

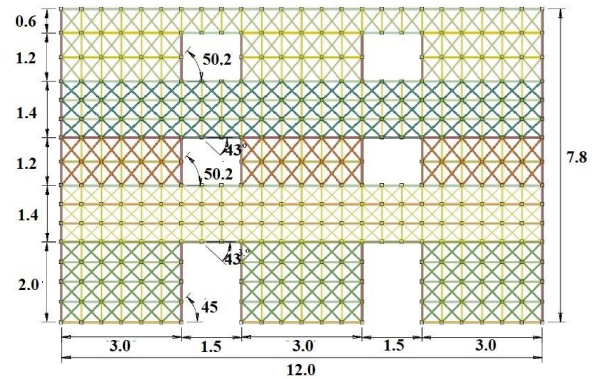
**Tablo 2.** Detaylı kafes model için düşey gerilmeler ve kayma dayanım değerleri (MPa).

Alan	c						
Alan*1.0	0.084	0.17	0.15	0.10	0.12	0.05	0.10
Alan*0.667	0.084	0.25	0.19	0.15	0.14	0.07	0.11
Alan*0.5	0.084	0.34	0.22	0.20	0.16	0.09	0.12

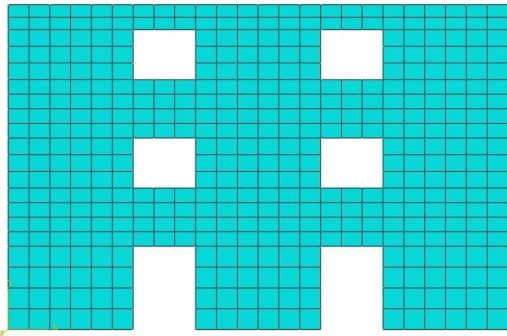
- Düşey gerilmelerin belirlenmesinde boşluklu enkesit alanları kullanılmıştır.



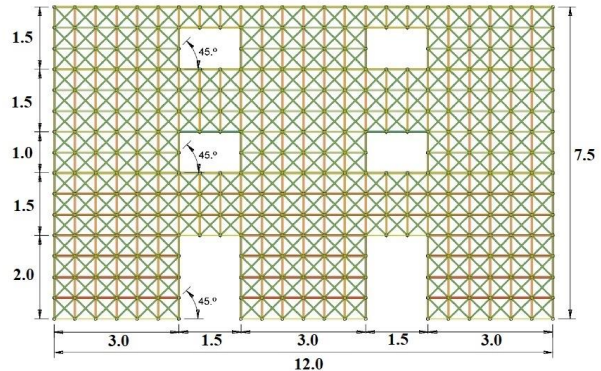
**Yapı modeli**



**Detaylı Kafes Model**



**Kabuk Model**



**Yaklaşık Kafes Model**

**Şekil 6.** Yığma yapı [18], kafes ve kabuk model yaklaşımları (m).

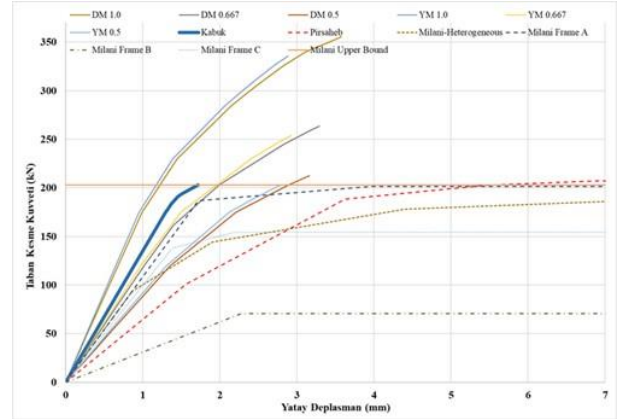
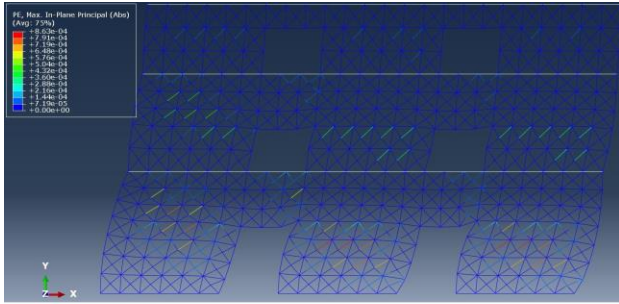
**Tablo 3.** Yaklaşık kafes model için düşey gerilmeler ve kayma dayanım değerleri (MPa).

Alan	c						
Alan*1.0	0.084	0.17	0.15	0.11	0.13	0.05	0.10
Alan*0.667	0.084	0.25	0.19	0.16	0.15	0.08	0.11
Alan*0.5	0.084	0.34	0.22	0.22	0.17	0.10	0.13

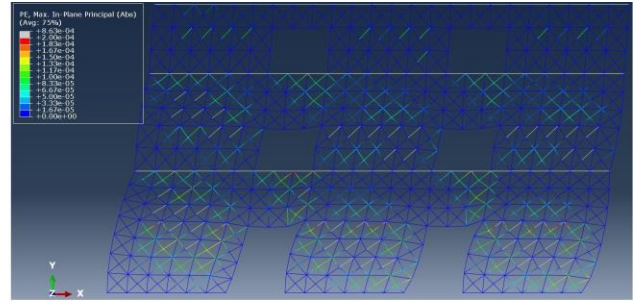
- Düşey gerilmelerin belirlenmesinde boşluklu enkesit alanları kullanılmıştır.

Yığma yapının taşıma kapasitesi yönünden diğer çalışmalarla kıyaslandığı sonuçlar Şekil 7'de verilmiştir. Alan katsayısının düşürülmesiyle hem yapının başlangıç rijitliğinde hem de maksimum taşıma kapasitesinde aşağı yönlü belirgin değişiklikler meydana gelmiştir. Kabuk model ve diğer çalışmalara ait veriler de göz önünde bulundurulduğunda, alan katsayısının 0.5 olduğu durumda en uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Her iki kafes model yaklaşımının maksimum taşıma kapasiteleri arasında %4.5'lik fark (detaylı model yüksek) olmasına karşın üst sınıra yakın sonuçlar gözlemlenmiştir. Fakat nümerik analiz sonuçlarında

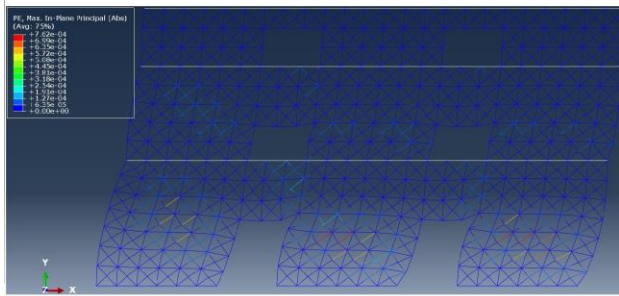
en belirgin eksiklik, süneklik olarak göze çarpmaktadır. Diğer çalışmalarda yaklaşık 30 mm'ye ulaşan yatay öteleme kapasitesi bu çalışmada 3-4 mm civarlarında kalmıştır.

**Şekil 7.** Analiz sonuçları (DM: Detaylı Model; YM: Yaklaşık Model; 1.0, 0.667 ve 0.5 alan katsayılarıdır.)

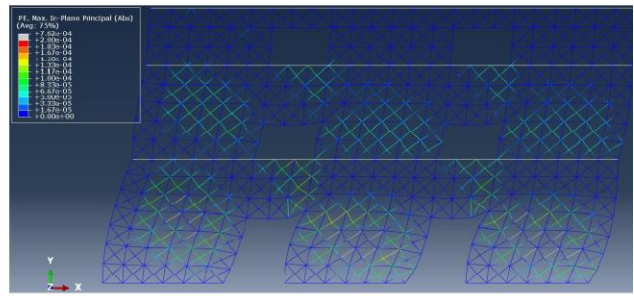
(a)



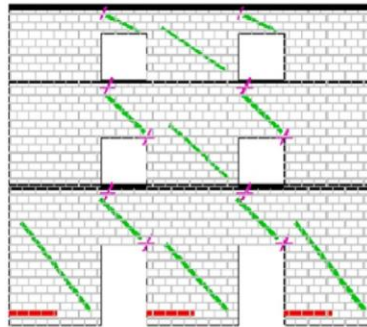
(b)



(c)



(d)



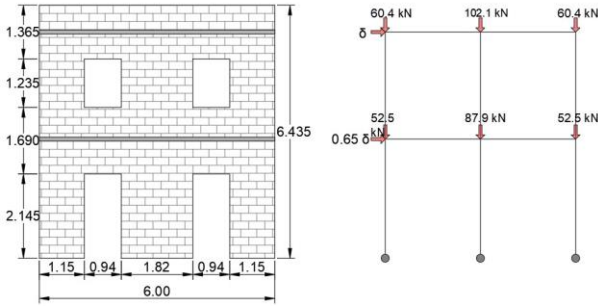
(e)

**Şekil 8.** Hasar oluşum bölgeleri a) DM b) DM (daraltılmış ölçek) c) YM d) YM (daraltılmış ölçek) e) Pirsahab et al. [18] tarafından gerçekleştirilen çalışma sonucu (yeşil: diyagonal kesme çatlağı; kırmızı: çekme çatlağı; mor: ezilme)

Şekil 8'de ise hasar oluşumlarının yoğunlaştığı bölgeler görülmektedir. Her iki kafes model için de benzer hasar oluşumlarının gözlemlendiği yaklaşımlarda, birinci ve ikinci katlardaki diyagonal kesme hasarlarının belirlenebildiği fakat ezilme ve yatay kayma hasarlarının ise tespit edilemediği görülmektedir. Ölçeğin daraltılmasıyla hasar oluşumları daha belirgin olarak ortaya çıkmakta ve detaylı ve yaklaşık modellere ait hasar oluşumları arasındaki üçüncü kattaki ufak farklılık gözlemlenebilmektedir.

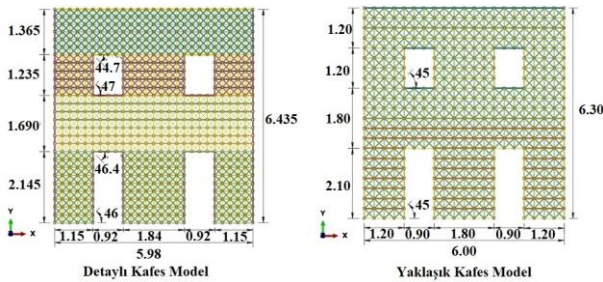
### 3.2. Uygulama 2

Sangirardi et al. [34] tarafından nümerik ve Magenes et al. [35] tarafından deneysel olarak ele alınan düzlemdeki boyutu 6.000x6.435 m olan iki katlı yığma yapının duvar kalınlığı 0.25 m'dir. Her kat seviyesinde yapı çelik kirişlerle desteklenmiş ve böylece rijit bir kat düzlemi elde edilmiştir. Yiğma yapı ve yükleme durumu Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 9. Yiğma yapı (m) ve yükleme durumu [34].

Birinci uygulamaya benzer şekilde detaylı ve yaklaşık olmak üzere iki farklı kafes model tasarımı (Şekil 10) ile 1.0 ve 0.5 alan katsayıları kullanılmak kaydı ile nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Detaylı model, 4 farklı diyagonal açısına ve toplamda 20 farklı kesit alanına sahiptir. Buna karşın yaklaşık modelde tüm diyagonaller 45° olarak belirlenmiş ve toplamda 8 farklı kesit alanı mevcuttur. Kat döşemelerinin olduğu bölgelerdeki düğüm noktaları düşey ve yatay doğrultulardaki hareketleri birbirine bağlanmış ve yüklemeler için bu bölgeler kullanılmıştır. Bu uygulamaya dair gerçekleştirilen nümerik analizlerde kullanılan malzeme parametreleri Tablo 4-6 arasında verilmiştir.



Şekil 10. Kafes model yaklaşımları (m).

Yapı düşey yüklemekten sonra yatay doğrultuda tekrarlı yüklemeye maruz bırakılmıştır. Eşdeğer kafes

model ve kabuk yaklaşımları ile deney sonucuna ait taşıma kapasiteleri Şekil 11'de verilmiştir. Deneysel çalışmada tekrarlı yükleme uygulanmış olması nedeniyle detaylı bir yük-deplasman grafiği şeklin yorumlanmasındaki zorluktan dolayı oluşturulamamıştır. Fakat, maksimum taşıma kapasitesinin de içerisinde olduğu ilk 4 döngüde bulunan değerler ele alınmıştır. Aynı zamanda deneysel modelin 3. döngüden sonra taşıma kapasitesinde eğriliğin başladığı orijinal verilerde açık bir şekilde görülebilmektedir [35].

Tablo 4. Malzeme parametreleri (MPa) [34].

E	G	Poisson	$f_{cm}$	$f_{tm}$	c
1700	300	0.25	6.2	0.14/1.4	0.14

Tablo 5. Detaylı model için düşey gerilmeler ve kayma dayanım değerleri (MPa).

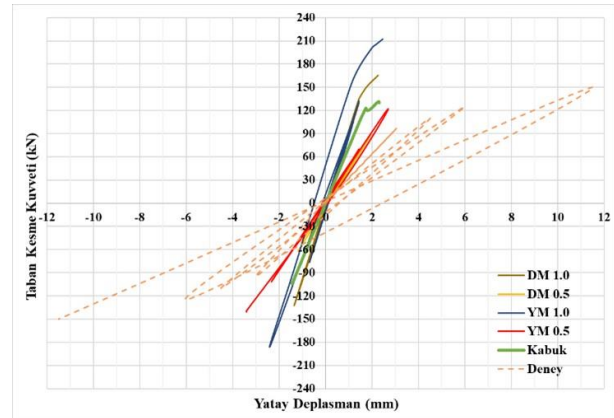
Alan	c				
Alan*1.0	0.14	0.198	0.22	0.104	0.18
Alan*0.5	0.14	0.396	0.30	0.207	0.22

- Düşey gerilmeler sol ve orta taşıyıcı duvar bölümleri için ayrı ayrı belirlenmiş ve ortalamaları kullanılmıştır.

Tablo 6. Yaklaşık model için düşey gerilmeler ve kayma dayanım değerleri (MPa).

Alan	c				
Alan*1.0	0.14	0.20	0.22	0.107	0.18
Alan*0.5	0.14	0.40	0.30	0.214	0.23

- Düşey gerilmeler sol ve orta taşıyıcı duvar bölümleri için ayrı ayrı belirlenmiş ve ortalamaları kullanılmıştır.

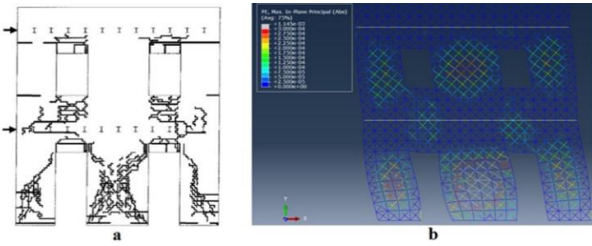


Şekil 11. Analiz sonuçları (DM: Detaylı Model; YM: Yaklaşık Model; 1.0 ve 0.5 alan katsayılarıdır.)

Sayısal sonuçlar değerlendirildiğinde detaylı ve yaklaşık kafes model yaklaşımlarının dayanım ve davranış açısından bir önceki örnek (uygulama 1) kadar iyi bir uyum içerisinde olmadıkları görülmektedir. Yük-deplasman eğrilerindeki sayısal değerler belli bir noktaya kadar birbirine örtüşse de maksimum taşıma kapasiteleri arasında farklar söz konusudur. DM 1, YM 1, DM 0.5 ve YM 0.5 modellerinin maksimum taşıma kapasiteleri sırasıyla 165 kN, 212 kN, 88 kN ve 140 kN'dur. Çubuk kesit alanının azaltılmasıyla eğriliğin deneysel sonuçlara yaklaştığı ve YM 0.5 modelinde %7'lik fark ile maksimum yük taşıma kapasitesinin (150 kN) altında kaldığı görülmektedir. Kabuk modele ait sayısal analiz sonucundan elde edilen 131 kN'luk taşıma

kapasitesinin de azaltılmış alan sonuçlarıyla daha uyumlu olduğunu tespit edilmiştir. Nümerik analiz sonuçlarında elde edilen eğriliklerin deney sonucuna göre başlangıç rijitliğinin yüksek, sünekliliğinin ise düşük olduğu görülmektedir.

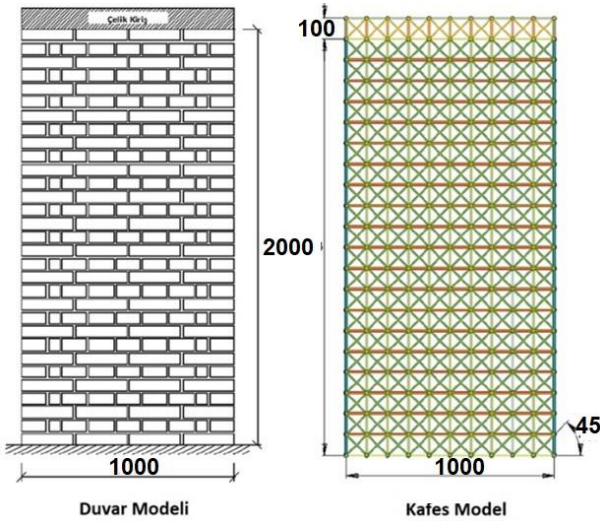
Kafes model yaklaşımında gözlemlenen diyagonal kesme hasarlarının deney sonuçlarıyla ilk katta tamamen, ikinci katta ise kısmen uyumlu olduğu söylenebilir. Fakat, sayısal analizde kayma hasarları tespit edilememiş ve ilaveten ikinci katta pencere seviyesinde diyagonal kesme hasarları meydana gelmiştir. En yakın sonucun elde edildiği YM 0.5 kafes modeline ait hasar oluşum görseli deney sonucuyla birlikte Şekil 12'de verilmiştir. Diğer kafes model yaklaşımlarında da hasar gelişiminin benzer davranışa sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 12. Hasar oluşumları a) Deney yapısı [35] b) Yaklaşık kafes model (YM 0.5; daraltılmış ölçek).

### 3.3. Uygulama 3

Calvi et al. (1992) tarafından gerçekleştirilen deneyler, ilerleyen yıllarda iki ayrı çalışmada nümerik olarak ele alınmıştır [36],[37]. İki sıra tuğla örgüsüne sahip duvarın kalınlığı 0.25 m ve yükseklik/genişlik oranı 2'dir (Şekil 13). En üst bölgede yer alan çelik profil vasıtasıyla 150 kN değerindeki düşey yük yapıya homojen olarak dağıtılmış, akabinde ise tepe kotundan yatay deplasman etkisi uygulanmıştır. Ele alınan prototip duvarın toplam zati ağırlığı ise yaklaşık 9 kN'dur.



Şekil 13. Yiğma duvar [36] ve kafes model (mm).

Yiğma duvarın geometrik ölçülerinin uygun olmasından kaynaklı kafes model yaklaşımında, diyagonal elemanların yatayla yaptığı açı 45° olarak tercih edilmiştir. Rijit çelik plaka da kafes formunda tanımlanmış ve üst iki sıra düğüm noktaları yatay ve düşey yönde hareketleri birbirine bağlanmıştır. Düşey yük en tepe düğüm noktalarına, düşey eleman kesit alanları oranınca dağıtılırken, duvarın zati ağırlığı tüm noktalara uygulanmıştır. Sayısal analizler 1 ve 0.5 olmak üzere 2 farklı alan katsayısıyla ele alınmıştır. Kullanılan malzeme parametreleri ise Tablo 7-8'de belirtilmiştir. Çeliğin elastisite modülü 210 GPa olarak dikkate alınmıştır.

Tablo 7. Malzeme parametreleri (MPa) [37].

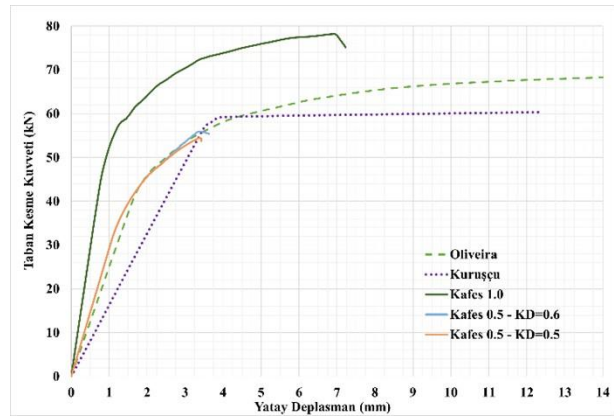
E	G	f <sub>cm</sub>	f <sub>tm</sub>	c
2500	0.4*E	5	0.15	0.35

Tablo 8. Kafes model için düşey gerilmeler ve kayma dayanım değerleri (MPa).

Alan	c	(TBDY) [29]		
Alan*1.0	0.35	0.320	0.48	0.1*f <sub>cm</sub> =0.5
Alan*0.5	0.35	0.636	0.60*	0.1*f <sub>cm</sub> =0.5

\* Yönetmelik sınırlarını aşması nedeniyle, kayma dayanım değeri 0.5 olarak değerlendirilmiştir.

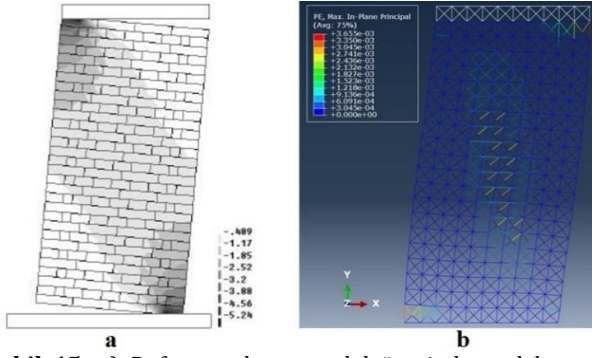
Sayısal analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 14'te görülmektedir. Çubuk kesit alanının azalmasıyla eşdeğer kafes modelin taşıma kapasitesinde ve sünekliliğinde belirgin bir düşüş meydana gelmiştir. Alan katsayısının 0.5 olduğu kafes model yaklaşımına ait eğri, diğer sayısal çalışmalarla yaklaşık 55.0 kN mertebelerine kadar benzerlik göstermektedir. Bu örnek çalışma kapsamında TBDY'e [29] göre sınırlandırılan kayma dayanım değerinin daha düşük alınmasının sonuç üzerinde belirleyici bir etkisi olmamıştır.



Şekil 14. Analiz Sonuçları (KD: Kayma dayanımı; 1.0 ve 0.5 alan katsayılarıdır.)

Şekil 15'te hasar oluşumlarının yoğunlaştığı bölgeler görülmektedir. Yiğma duvarda hasar oluşumları üst ve alt bölgelerdeki yatay harçlarda açılma formunda meydana gelmiştir. Eşdeğer kafes modelde ise benzer bölgelerde hasar oluşumlarının yoğunlaştığı, bunun yanında diyagonal elemanlarda kesme hasarlarının ortaya çıkmaya başladığı görülmektedir.





Şekil 15. a) Deforme olmuş model üzerinde asal basınç gerilmeleri (MPa) [37] b) Kafes model hasar oluşumu.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Yığma yapıların çubuk elemanlarla idealize edilmesi ve düzlem içindeki doğrusal olmayan davranışlarının irdelenmesi bu çalışmanın odak noktası olmuştur. Böylece oldukça karmaşık problemlerle karşılaşılacak yığma yapıların analizinin daha pratik yaklaşımlar ile gerçekleştirilebilmesi amaçlanmıştır. Bu vesileyle geliştirilen eşdeğer kafes model yaklaşımının bazı eksikleri olmasına karşın ele alınan örneklerde genel olarak tutarlı sonuçlar sergilemiştir.

Kafes model yaklaşımı daha detaylı olarak ele alındığında, karşılaşılacak önemli hususlardan biri kullanılacak çubuk elemanlara dair kesit alanlarının belirlenmesidir. Alan katsayısının 0.5 olarak tercih edilmesiyle toplam kesit alanındaki çakışmaların önüne geçilmiş ve daha makul sonuçlar elde edilmiştir. Fakat taşıma kapasiteleriyle birlikte hasar oluşumları da göz önüne alındığında, kayma dayanım parametresinin kafes model yaklaşımına uygulanmasında iyileştirilmelerin yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Analizlerde kayma gerilmeleri nedeniyle meydana gelen hasarların açıkça gözlemlenemiyor olması yapının olağandan daha farklı davrandığını göstermektedir. Bunun yanı sıra kafes modelin süneklik davranışının da geliştirilmesinin önemli bir konu olduğu anlaşılmaktadır. Sayısal modelin tanımlanmasında yapılan kabullerin sonuçlar üzerinde doğrudan etken olması nedeniyle kafes model yaklaşımında gerçekleştirilecek olan teknik iyileştirmelerin tüm sonuçlara olumlu katkı sunacağı açıkça söylenebilir.

Yapılardaki asal çekme gerilmeleri 45°'den büyük konumlanmış olsa da diyagonal kesme hasarlarının tespitinde belirgin bir sorun yaşanmamaktadır. Eşdeğer kafes modelin yaklaşık olarak oluşturulmasının sayısal analiz sonuçlarında uyumsuzluk yaratmadığı ve hatta açıdan kaynaklı daha uygun sonuçlar elde edilebildiği görülmüştür. Her ne kadar sonuçlar belli seviyelerde uygun olsa da asal çekme gerilmelerinden kaynaklı daha büyük diyagonal açılar kullanılması sonuçlar üzerinde etken olabileceği ve kafes modelin davranışını değiştirebileceği de düşünülerek, bu kısmın ayrıca çubuk kesit alanlarıyla birlikte ele alınması sonuçların güvenilirliğine katkı sağlayacaktır.

Yığma yapılarda hem fiziki sınır koşullarının uygulanmasındaki zorluklar hem de malzeme parametrelerindeki belirsizlikler elde edilen sonuçların güvenilirliğini her nümerik yaklaşım için tartışmaya açmaktadır. Yeni yaklaşımın avantajları kullanılarak, malzeme parametrelerinin alt ve üst limitleri genişletilerek yapının taşıma kapasitesi için bir aralık belirlenebilir. Ayrıca alternatif sınır koşulları da farklı analizlerde hızlıca ele alınabilir. Mevcut haliyle umut verici olan yeni yaklaşımın geliştirilmesiyle yaygın olarak kullanılabilmesi öngörülmektedir.

#### Etik Beyanı

*Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.*

#### Kaynakça

- [1] D'Altri, A.M., Sarhosis, V., Milani, G., Rots, J., Cattari, S., Lagomarsino, S., Sacco, E., Tralli, A., Castellazzi, G., De Miranda, S. 2020. Modeling strategies for the computational analysis of unreinforced masonry structures: review and classification. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27, 1153-1185. Doi: 10.1007/s11831-019-09351-x
- [2] Orhan, S.N., Özyazıcıoğlu, M.H. 2015. Tek açıklıklı dairesel kâgir kemer köprülerin göçme yüklerinin limit analiz yöntemleri ile hesaplanması. *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, 21(3), 88-93. Doi: 10.5505/pajes.2014.28863
- [3] Turer, A., Boz, B. 2008. Computer modeling and seismic performance assessment of historic Aspendos Theatre in Antalya, Turkey. *Engineering Structures*, 30, 2127-2139. Doi: 10.1016/j.engstruct.2007.05.011
- [4] Mosoarca, M., Gioncu, V. 2013. Failure mechanisms for historical religious buildings in Romanian seismic areas. *Journal of Cultural Heritage*, 14S, 65-72. Doi: 10.1016/j.culher.2012.11.018
- [5] Oto, A., Hara, T. 2017. Structural characteristics of Hagia Sophia under consideration of the ribs inside the dome. *Procedia Engineering*, 171, 797-804. Doi: 10.1016/j.proeng.2017.01.366
- [6] Vakıflar Genel Müdürlüğü. 2018. Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu (TYK). Ankara, Türkiye.
- [7] Usta, P., Bozdağ, Ö. 2021. Tarihi Başdurak camisinin deprem analizi. *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, 27(3), 244-250. Doi: 10.5505/pajes.2020.31384

- [8] Gökarslan, A.B., Çelebi, M.E. 2016. Investigation of the traditional Seljuks and Principalities period baths within the conservation and restoration: the example of Isparta Baths. *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences*, 20(1), 80-90. Doi: 10.19113/sdufbed.71792
- [9] Mıhladı, N.Ş., Sancak, E. 2015. Sakarya İli Ali Fuat Paşa Köprüsü (II. Bayezid Köprüsü) üzerinde oluşan yapısal değişiklikler üzerine bir araştırma. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19(3), 66-73. Doi: 10.19113/sdufbed.00783
- [10] Ilgadi, O.B. 2013. Advanced three-dimensional analysis of concrete structures using nonlinear truss models. The Colorado School of Mines, PhD Thesis, 133p, United States.
- [11] Williams, S.A. 2013. Numerical analysis of reinforced masonry shear walls using the nonlinear truss approach. The Faculty of The Virginia Polytechnic Institute and State University, MSc Thesis, 104p, United States.
- [12] Girgin, S.C. 2019. Kesme etkin betonarme elemanların doğrusal olmayan kafes giriş analojisi ile modellenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 10(3), 1177-1186. Doi:10.24012/dumf.587804
- [13] Girgin, S.C., Lu, Y., Panagiotou, M. 2013. Nonlinear cyclic truss model for shear-critical reinforced concrete columns. 2<sup>nd</sup> Turkish Conference on Earthquake Engineering and Seismology (TDMSK-2013), 25-27 September, Hatay, Turkey.
- [14] Moharrami, M., Koutromanos, I., Panagiotou, M. 2015. Nonlinear truss modeling method for the analysis of shear failures in reinforced concrete and masonry structures. Second ATC & SEI Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures, 10-12 December, San Francisco, United States. Doi: 10.1061/9780784479728.007
- [15] Kafkas, U. 2015. Yığma duvar elastik davranışının düzlem çubuk elemanlarla mikro modellenmesi. *Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 99s, Kütahya.
- [16] Ridwan, M., Yoshitake, I., Nassif, A.Y. 2017. Two-dimensional fictitious truss method for estimation of out-of-plane strength of masonry walls. *Construction and Building Materials*, 152, 24-38. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.138
- [17] Verbrugge, M. 2017. Modelling in-plane behaviour of masonry shear walls through a predefined crack pattern at macro level. Delft University of Technology, MSc Thesis, 77p, The Netherlands.
- [18] Pirsaeheb, H., Wang, P., Moradi, M.J., Milani, G. 2021. A Multi-Pier-Macro MPM method for the progressive failure analysis of perforated masonry walls in-plane loaded. *Engineering Failure Analysis*, 127, 105528. Doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105528
- [19] Pirsaeheb, H., Moradi, M.J., Milani, G. 2020. A Multi-Pier MP procedure for the non-linear analysis of in-plane loaded masonry walls. *Engineering Structures*, 212, 110534. Doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110534
- [20] Aşıkoğlu, A., Vasconcelos, G., Lourenço, P.B., Panto, B. 2020. Pushover analysis of unreinforced irregular masonry buildings: lessons from different modeling approaches. *Engineering Structures*, 218, 110830. Doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110830
- [21] Najafgholipour, M.A. 2018. An equivalent truss model for in-plane nonlinear analysis of unreinforced masonry walls. *Civil Engineering Journal*, 4(4), 828-835. Doi:10.28991/cej-0309136
- [22] Oyguc, R.A. 2017. 2011 Van depremlerinden sonra yığma yapılarda gözlemlenen hasarlar. *BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi*, 19(2), 296-315. Doi:10.25092/baunfbed.348482
- [23] Lu, Y., Panagiotou, M. 2014. Three-dimensional cyclic beam-truss model for nonplanar reinforced concrete walls. *Journal of Structural Engineering*, 140(3), 04013071. Doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000852
- [24] Gargari, M.M. 2016. Development of novel computational simulation tools to capture the hysteretic response and failure of reinforced concrete structures under seismic loads. The Faculty of The Virginia Polytechnic Institute and State University, PhD Thesis, 243p, United States.
- [25] Abaqus Documentation. Concrete Damaged Plasticity. <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usb/default.htm?startat=pt05ch18s05abm36.html#usb-mat-cconcretedamaged> (Erişim Tarihi: 26.04.2022)
- [26] Bansal, N., Rai, D.C. 2017. Behaviour of masonry walls at corners under lateral loads. 13<sup>th</sup> Canadian Masonry Symposium, 4-7 June, Halifax, Canada.
- [27] Angelillo, M., Lourenço, P.B., Milani, G. 2014. Masonry behaviour and modelling. 1-26 pp. Editor: Angelillo, M. *Mechanics of Masonry Structures*, CISM International Centre for Mechanical Sciences, Springer, Vienna, 341p. Doi: 10.1007/978-3-7091-1774-3\_1

- [28] Rai, D.C., Singhal, V., Paikara, S., Mukherjee, D. 2014. Sub-paneling of masonry walls using precast reinforced concrete elements for earthquake resistance. *Earthquake Spectra*, 30(2), 913-937. Doi: 10.1193/102010EQS178M
- [29] Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBYD). Ankara, Türkiye, Resmî Gazete Sayı: 30364 (Mükerrer).
- [30] Xu, H., Gentilini, C., Yu, Z., Wu, H., Zhao, S. 2018. A unified model for the seismic analysis of brick masonry structures. *Construction and Building Materials*, 184, 733-751. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.208
- [31] Thuyet, V.N., Deb, S.K., Dutta, A. 2018. Mitigation of seismic vulnerability of prototype low-rise masonry building using U-FREIs. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 32(2), 04017136. Doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001136
- [32] Milani, G., Beyer, K., Dazio, A. 2009. Upper bound limit analysis of meso-mechanical spandrel models for the pushover analysis of 2D masonry frames. *Engineering Structures*, 31(11), 2696-2710. Doi: 10.1016/j.engstruct.2009.06.015
- [33] Abaqus Documentation. "Concrete Damaged Plasticity". <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/key/default.htm?startat=ch03abk27.html#usb-kws-mconcretedamagedplast> (Erişim Tarihi: 26.04.2022)
- [34] Sangirardi, M., Liberatore, D., Addessi, D. 2019. Equivalent frame modelling of masonry walls based on plasticity and damage. *International Journal of Architectural Heritage Conservation, Analysis, and Restoration*, 13(7), 1098-1109. Doi: 10.1080/15583058.2019.1645240
- [35] Magenes, G., Calvi, G.M., Kingsley, G.R. 1995. Seismic testing of a full-scale, two-story masonry building: Test procedure and measured experimental response. University of Pavia, Italy. Doi: 10.13140/RG.2.1.4590.2962
- [36] Kuruşçu, A.O. 2012. Yığma duvar ve temellerde doğrusal olmayan modelleme. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 192s, İstanbul, Türkiye.
- [37] Oliveira, D.V. de C. 2003. Experimental and numerical analysis of blocky masonry structures under cyclic loading. The University of Minho, PhD Thesis, 221p, Portugal, 2003.