



## YIĞMA DUVARLARIN DÜZLEM İÇİ KIRILMA MEKANİZMALARININ NÜMERİK OLARAK BELİRLENMESİ

Sedat Kömürcü<sup>1</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

### ABSTRACT

In this study, fracture mechanisms of the in-plane loaded masonry walls with and without opening are analyzed. Macro modeling technique known as homogenization is used for modeling of masonry walls. To determine material properties for the masonry walls, the elementary wall part which periodically repeats itself on the masonry wall is used. The Drucker-Prager fracture hypothesis, a suitable hypothesis for materials with high compressive strength but low tensile strength, is used to determine the fracture state in ANSYS software. Elastoplastic material model is used together with the Drucker-Prager hypothesis in determining the fracture mechanisms of the masonry walls. Deformations, stresses and fracture mechanisms which occur on the walls are investigated as a result of the finite element analyzes. When the results obtained after the analysis are compared with the experimental results, it is found that the results obtained are compatible with the results of the experimental study.

### ÖZET

Bu çalışmada, boşluksuz ve boşluklu yığma duvarlar modellenerek düzlem içi yükleme sonucu oluşacak kırılma mekanizmaları analiz edilmiştir. Yığma duvarların modellenmesinde homojenleştirme tekniği olarak bilinen makro modelleme tekniği kullanılmıştır. Modellerde kullanılacak olan malzeme parametrelerinin belirlenmesinde yığma duvar üzerinde kendisini periyodik olarak kendisini tekrar eden elemanter duvar parçasından yararlanılmıştır. ANSYS yazılımında kırılma durumunu belirlemek amacıyla basınç dayanımı yüksek fakat çekme dayanımı düşük olan malzemeler için uygun bir hipotez olan Drucker-Prager kırılma hipotezi kullanılmıştır. Yığma duvarların kırılma mekanizmalarının belirlenmesinde Drucker-Prager hipoteziyle beraber elastoplastik malzeme modeli kullanılmıştır. Yapılan sonlu eleman analizleri sonucunda duvarlarda meydana gelen şekil değiştirmeler, gerilmeler ve kırılma mekanizmaları incelenmiştir. Yapılan analizlerde bulunan sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, elde edilen sonuçların deneysel çalışmadaki sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

### GİRİŞ

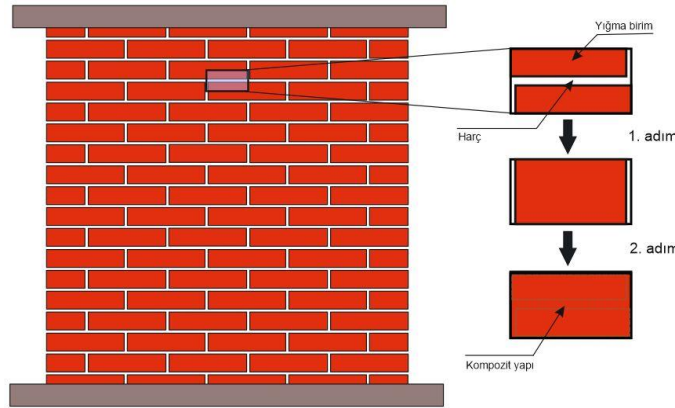
Yığma yapılar sahip oldukları tarihsel dokuları ve sanatsal mimarileriyle insanlığın ortak mirasçılarıdır. İlk çağlardan günümüze kadar tarihi değeri olan saray, cami, köprü, kervansaray gibi anıtsal yapılar ve daha birçok mühendislik yapısı yığma yapı tekniği kullanılarak inşa edilmiştir. Hem tarihi yapıları onarmak ve güçlendirmek hem de yeni inşa edilecek modern yapıları tasarlamak için yığma yapı davranışının iyi anlaşılması gerekmektedir. Tarih boyunca mühendisler ve mimarlar yığma duvarlarda oluşan çekme, basınç ve kayma etkilerini belirlemek için çalışmalar yapmışlar ve yığma duvarları tasarlamak için modeller ortaya

koymuşlardır. Literatürde yığma yapıların davranışlarının belirlenmesi amacıyla deneysel çalışma örnekleri bulunmaktadır [1-3]. Deneysel çalışmaların kontrolü ve desteklenmesi amacıyla nümerik analizler yapılmıştır [4-8]. Yığma yapıların taşıyıcı sistemlerini oluşturan yığma duvarların modellenmesi amacıyla birçok teknik geliştirilmiş olup bu konuda çalışmalar günümüzde de devam etmektedir. Yığma duvarların nümerik olarak modellenmesi ve düzlem içi etkilerin analiz edilmesi bu çalışmanın odak noktasını oluşturmaktadır.

### YIĞMA DUVARLARDA MAKRO MODELLEME YÖNTEMİ

Modellemedeki amaç, bir yapıyı gerçeğe en yakın şekilde analiz etmektir. Nümerik modeller günümüzde mevcut yığma yapıların modellenmesinde, yeni yapılacak olan yığma yapıların modellenmesinde ve yığma yapılar üzerinde yapılan deneylerin modellenmesinde kullanılmaktadır. Yığma birimler ve bu birimleri birbirine bağlayan harç birlikte kompozit bir malzeme oluştururlar. Yığma duvarların gerçeğe en yakın şekilde modellenmesi, yığma duvarı oluşturan yığma birimler ve harcın farklı özellikte olması sebebiyle özen gerektiren bir husustur. Araştırmacılar yığma duvarların modellenmesi için heterojen ve homojen modelleme tekniklerini kullanmışlardır. Heterojen modeller; mikro modelleme tekniği ve basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği olarak iki sınıfta incelenebilir. Mikro modelleme tekniğinde yığma yapıyı oluşturan tuğla, taş vb. birimler ve kullanılan harç ayrı ayrı modellenir. Ayrıca bu elemanların birleşim bölgelerinde oluşan ara yüzeyler de modele dahil edilir. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğinde yığma yapıyı oluşturan yığma birim ve sadece ara yüzeyler modellenirken harç farklı bir eleman olarak modele dahil edilmez [9].

Yığma yapıların modellenmesinde kullanılan bir diğer yöntem makro modelleme yöntemidir. Homojenleştirme yöntemi olarak da bilinen makro modelleme tekniğinde yığma yapıyı oluşturan tuğla, taş gibi birimler ve bunları birbirine bağlayan harç tek bir malzeme şeklinde idealleştirilerek modellenir. Yığma duvarların homojen yapılar olarak modellenmeleri, özellikle büyük ölçekli yığma yapıların analiz edilebilmeleri için uygun bir yaklaşımdır. Yığma yapıların homojen olarak modellendiği çalışma örnekleri mevcuttur [10-13]. Makro modellerde yığma duvarı oluşturan malzemelerin özellikleri ortalama özellikteki monolitik bir yapıya dönüşmektedir. Makro modelleme tekniğiyle oluşturulan modeldeki malzeme parametrelerini elde etmek amacıyla yığma duvar üzerinden seçilen uygun bir eleman parçadan faydalanılır. Yığma duvardan alınan bu eleman birim, duvarın özelliklerini yansıtan çekirdek parça olarak da düşünülebilir. Yığma duvar üzerinde kendisini periyodik olarak tekrar eden eleman duvar parçasının seçilmesi ve homojenleştirilmesi Şekil 1’de görülmektedir. Elastik homojenleştirme, eleman duvar parçası üzerinde düşey doğrultuda iki adımda yapılmıştır [14].



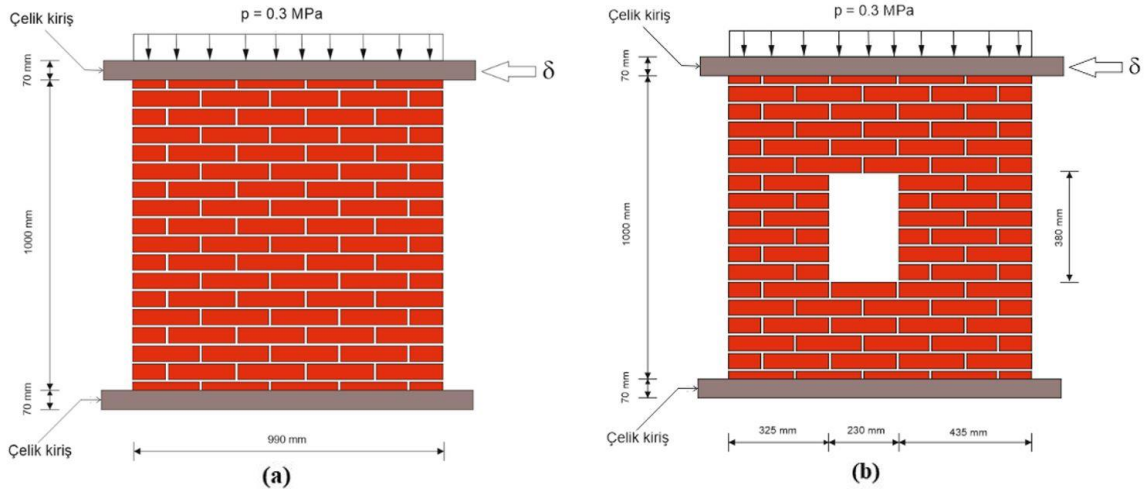
Şekil 1. Yığma duvardan seçilen eleman duvar parçasının homojenleştirilmesi

### YIĞMA DUVARLARIN SONLU ELEMAN MODELLERİ

Bu bölümde yığma duvarların düzlem içi doğrusal olmayan davranışlarını anlayabilmek ve kırılma mekanizmalarını belirleyebilmek amacıyla makro modelleme yöntemi kullanılarak bir nümerik modelleme tekniği sunulmuştur. Bu teknik kullanılarak yığma boşluksuz ve yığma boşluklu duvarlar modellenerek yığma duvarların düzlem içi davranışları analiz edilmiştir.

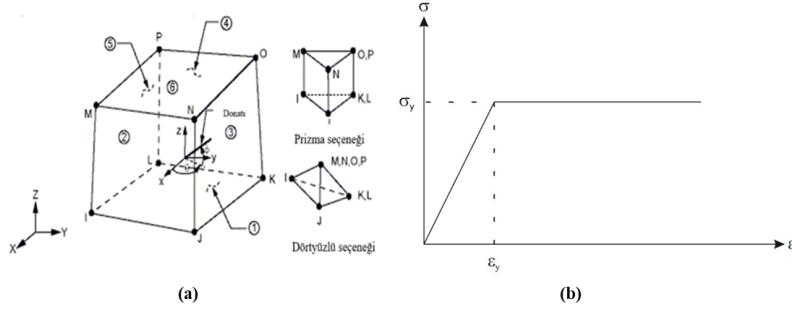
### Model Özellikleri

Modellenen duvarların geometrileri ve malzeme özellikleri Raijmakers ve Vermeltfoort tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalara aittir [1,2]. Modellenen duvarların geometrileri ve yükleme durumları Şekil 2’de görülmektedir. Taban genişliği 990 mm ve yüksekliği 1000 mm ve kalınlığı 100 mm olan duvarlar 18 sıra tuğlanın aralarda 10 mm harç tabakası kullanılarak üst üste örülmesiyle oluşturulmuştur. Yığma duvarları oluşturan her bir tuğla birimin boyutları 210x52x100 mm’dir. 18 sıra tuğlanın 16 sırası aktif olarak çalışırken, alt ve üst kısımlarda bulunan 2 sıra tuğla çelik kirişlerin içine yerleştirilmiştir. Çelik kirişler duvarlarda yatay yükleme sonucu oluşabilecek dönmeleri engellemektedir. Yığma duvarlara yapılan yükleme iki aşamada uygulanmıştır. Birinci adımda duvarların üst yüzeylerine düşey doğrultuda 0,3 MPa basınç uygulanmıştır. İkinci yükleme ise duvarların üst yüzeyine alt adımlara bölünerek yatay yer değiştirme verilerek uygulanmıştır.



Şekil 2. Modellenen duvarların geometrileri ve yükleme durumları a) Boşluksuz b) Boşluklu

Yığma duvarların modellenmesi ve analizinde ANSYS sonlu eleman yazılımından yararlanılmıştır. Yazılım yardımıyla yığma duvarlarda sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve analizler yapılmıştır. Sonlu eleman modellerinde duvarların hem doğrusal hem de doğrusal olmayan analizlerini gerçekleştirmek için Şekil 3a’da görülen SOLID65 sonlu elemanı kullanılmıştır. Bu eleman tüm düğüm noktalarında üç doğrultuda yer değiştirme serbestliğine sahip olup toplamda yirmi dört serbestlik derecesine sahip olan sekiz düğüm noktalı bir elemandır. SOLID65 elemanı, duvara uygulanan yükleme sonrasında duvarda oluşacak çatlakları ve kırılma mekanizmalarını incelemek için elverişli bir sonlu elemandır. Bu eleman elastik analizlerde izotrop malzeme kabulünü uygulamaktadır. Yapıların doğrusal olmayan analizleri için uygun bir elemandır. Yığma duvarların kırılma mekanizmalarının belirlenmesinde yığma duvar davranışını yansıtabilmek amacıyla SOLID 65 elemanı ile beraber Şekil 3b’de gerilme-şekil değiştirme diyagramı görülen elastoplastik malzeme modeli kullanılmıştır. Diyagramdaki  $\sigma_y$  ve  $\epsilon_y$  değerleri sırasıyla malzemenin doğrusal davranışının sona erdiği gerilme ve şekil değiştirme değerlerini göstermektedirler.



Şekil 3. a) SOLID 65 sonlu elemanı b) Elastoplastik malzeme modeli

Bir yapıyı oluşturan malzemelerin kırılma durumları malzemelerin özelliklerine göre seçilecek kırılma hipotezleriyle belirlenmektedir. Yığma duvarların tasarımı ve modellenmesinde çekme almayan malzeme kabulü yapılabilir. ANSYS yazılımında kırılma durumunu belirlemek için basınç dayanımı yüksek fakat çekme dayanımı düşük olan malzemeler için uygun bir hipotez olan Drucker-Prager kırılma hipotezi kullanılmıştır. Klasik Drucker-Prager modeli tuğla, toprak, taş, beton gibi içsel sürtünme açısına sahip granüler malzemeler için uygun bir kırılma varsayımdır. Bu hipotez Denklem 1'de ifade edilmektedir [15].

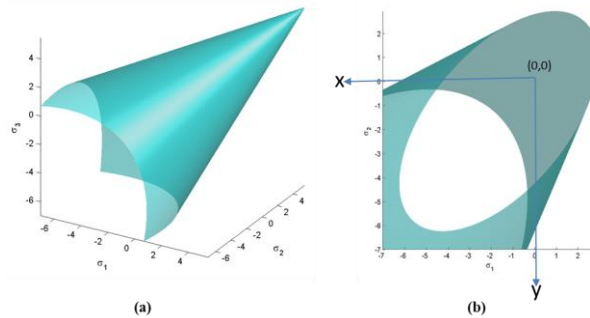
$$\left(\frac{\eta-1}{2}\right)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + \left(\frac{\eta+1}{2}\right)\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} = f_b \quad (1)$$

Bu ifadedeki  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  asal gerilme değerleri olup  $\eta$  ve  $\xi$  değerleri aşağıda görüldüğü üzere belirlenir.

$$\eta = \frac{f_b}{f_c}$$

$$\xi = \frac{\eta - 1}{\eta + 1}$$

Bu ifadelerdeki  $f_b$  ve  $f_c$  parametreleri yığma duvarın basınç ve çekme dayanımı değerlerini göstermektedir. Drucker-Prager hipotezi  $f_b$  ve  $f_c$  değerlerinin eşit olması durumunda Von Mises hipotezine indirgenir. Şekil 4a'da üç boyutlu asal gerilme uzayında Drucker-Prager kırılma yüzeyi ve Şekil 4b'de düzlemde Drucker-Prager kırılma yüzeyi gösterilmektedir. İki boyutlu durumda ortaya çıkan gerilme yüzeyi, üç boyutlu konik yüzeyin  $\sigma_1$  ve  $\sigma_2$  gerilmelerinin bulunduğu düzlemdeki kesitidir. Bu hipotez üç boyutlu uzayda bir koni olarak ortaya çıkmakta olup koninin uç kısmı malzemenin düşük olan çekme dayanımını temsil ederken koninin taban kısmı malzemenin yüksek basınç dayanımını temsil etmektedir.



Şekil 4. Drucker-Prager hipotezi a) Üçboyutlu uzayda b) Düzlemde

Drucker-Prager kırılma kriteri elastoplastik davranış gösteren malzeme modeliyle birleştirilerek uygulanmaktadır. Bu modelin oluşturulması için gerekli olan malzeme parametreleri duvarın içsel sürtünme açısı  $\phi$ , dilatasyon açısı  $\phi_d$ , ve kohezyon  $c$  değerleridir. Kohezyon değerinin belirlenmesinde Denklem 2 kullanılmıştır [9]. Burada  $f_t$  duvarın çekme dayanımını ifade etmektedir. Dilatasyon kavramı malzemenin akmasından kaynaklanan hacim artışını ifade eder ve dilatasyon açısıyla kontrol edilir [16]. Bu çalışmada malzemenin akmasından kaynaklanan hacim artışı olmadığı varsayılarak dilatasyon açısı  $\phi_d$  sıfır olarak girilmiştir.

$$c = 1,4 f_t \quad (2)$$

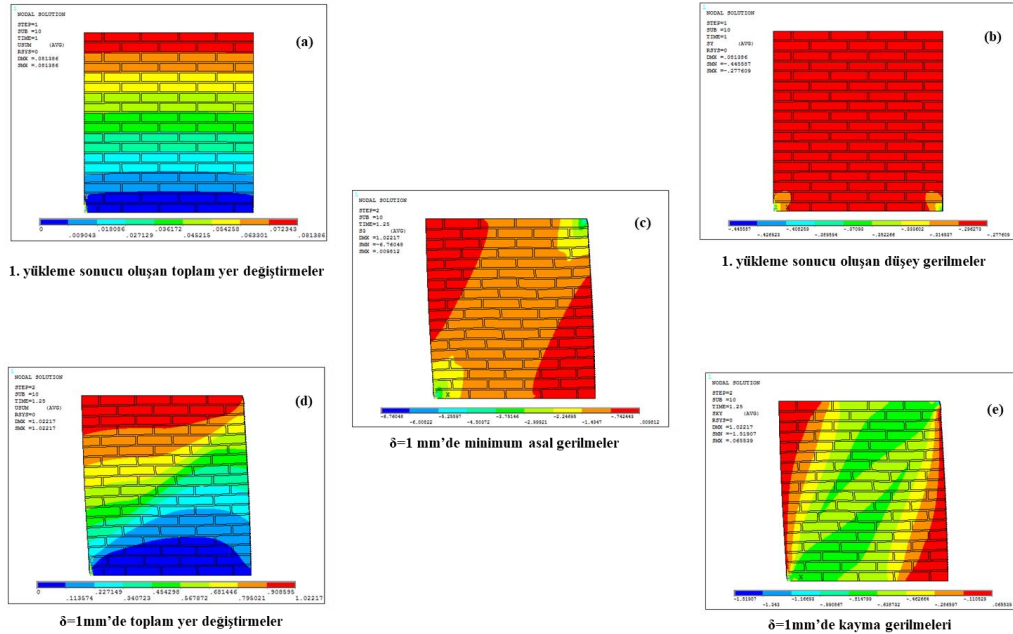
Yığma duvarlarda kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 1’de görülmektedir.

Çizelge 1. Yığma duvar modellerinde kullanılan malzeme özellikleri

Elastisite Modülü [MPa]	Poisson Oranı	Kohezyon [MPa]	Sürtünme Açısı [Derece]	Dilatasyon Açısı [Derece]
3655	0,15	0,35	60	0

### Boşluksuz Yığma Duvar Modeli

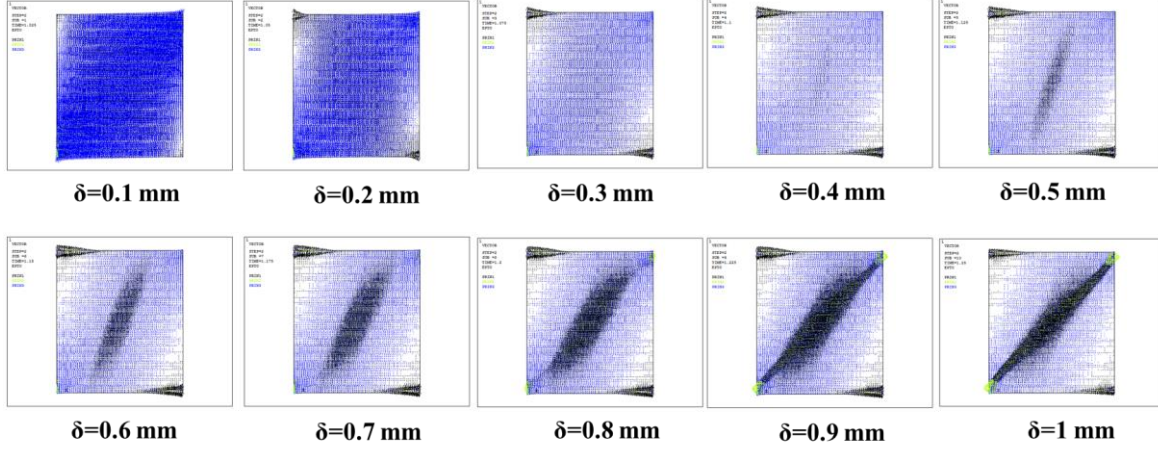
Boşluksuz yığma duvar üzerinde yapılan sonlu eleman analizleri sonrasında duvarda oluşan yer değiştirmeler ve gerilmeler Şekil 5’de görülmektedir. Şekil 5a’da ve Şekil 5b’de sırasıyla boşluksuz yığma duvara 1. yükleme olarak uygulanan düşey basınç sonrasında duvarda meydana gelen toplam yer değiştirmelerin ve düşey gerilmelerin dağılımlarını göstermektedir. Şekil 5c, Şekil 5d ve Şekil 5e’de sırasıyla 2. yükleme adımı içerisinde duvar üst kısmına uygulanan  $\delta=1$  mm yer değiştirme sonrasında duvarda meydana gelen minimum asal gerilmelerin dağılımları, toplam yer değiştirmeler ve kayma gerilmelerinin dağılımları görülmektedir.



Şekil 5. Boşluksuz yığma duvarda a) 1. yükleme sonucu toplam yer değiştirme b) 1. yükleme sonucu düşey gerilmelerin dağılımı c) 1mm yer değiştirme sonrasında minimum asal gerilmelerin dağılımı d) 1mm yer değiştirme sonrasında toplam yer değiştirmeler e) 1 mm yer değiştirme sonrası kayma gerilmelerinin dağılımı

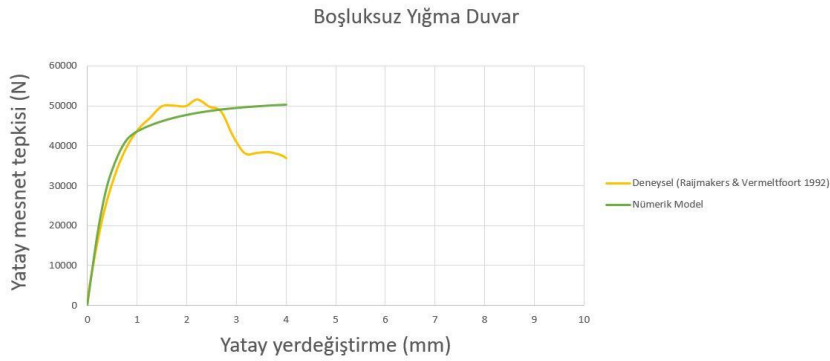


Yüklemenin artırılmasıyla duvarlarda oluşan şekil değiştirmelerin dağılımı Şekil 6'da aşama aşama incelenmiştir. Şekil değiştirme ve gerilmelerin incelenmesinde vektörle gösterim kullanılmıştır. Siyah renkli kısımlar duvarda çekme etkisi sonucu meydana gelen şekil değiştirmeleri gösterirken mavi renkli kısımlar basınç sonucu meydana gelen şekil değiştirmeleri göstermektedir.



Şekil 6. Boşluksuz yığma duvarda meydana gelen asal şekil değiştirmelerin dağılımı

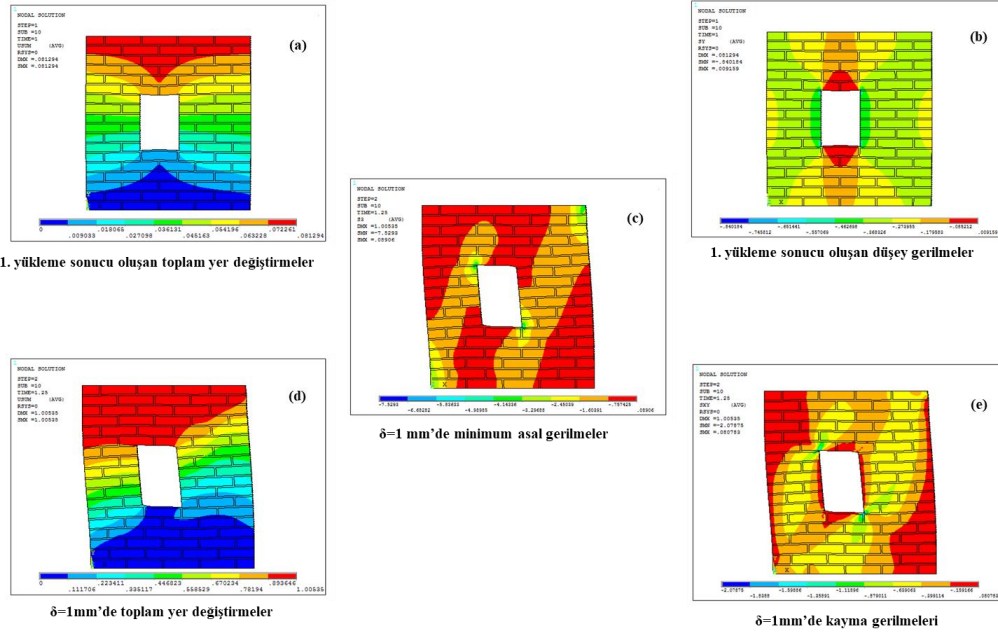
Yapılan analizler sonucunda boşluksuz duvarın yatay mesnet tepkisi-yatay yer değiştirme diyagramı elde edilmiştir. Nümerik modelden elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında yapılan analizlerin yığma duvarların düzlem içi davranışını başarılı bir şekilde yansıttığı görülmektedir



Şekil 7. Boşluksuz yığma duvardaki yük-yer değiştirme diyagramı

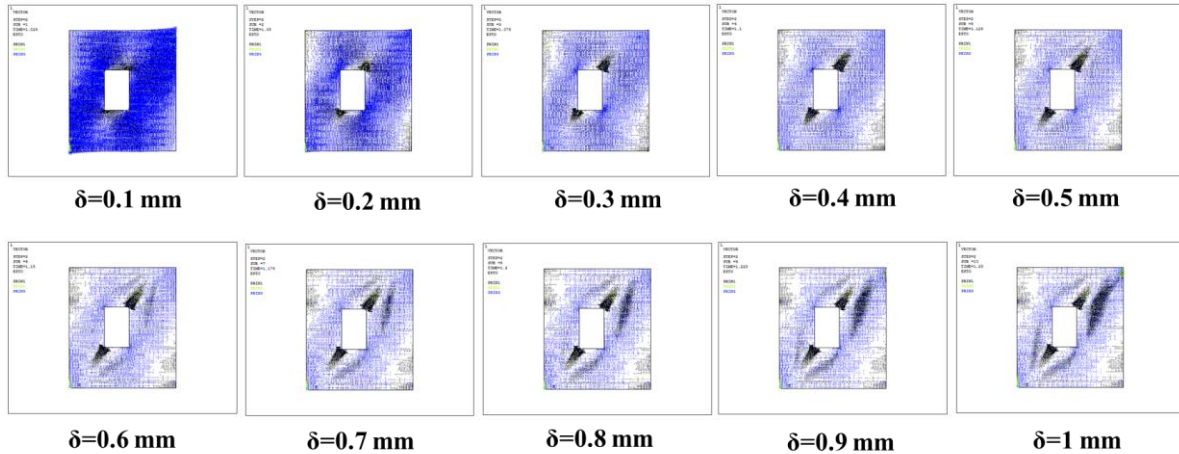
### Boşluklu Yığma Duvar Modeli

Boşluklu yığma duvar üzerinde yapılan sonlu eleman analizleri sonrasında duvarda oluşan yer değiştirmeler ve gerilmeler Şekil 8'de görülmektedir. Şekil 8a'da ve Şekil 8b'de sırasıyla boşluklu yığma duvara 1. yükleme olarak uygulanan düşey basınç yüklemesi sonrasında duvarda meydana gelen toplam yer değiştirmelerin ve düşey gerilmelerin dağılımlarını gösterilmektedir. Şekil 8c, Şekil 8d ve Şekil 8e'de sırasıyla 2. yükleme adımı içerisinde duvar üst kısmına uygulanan  $\delta=1$  mm yer değiştirme sonrasında duvarda meydana gelen minimum asal gerilmelerin dağılımlarını, toplam yer değiştirmeleri ve kayma gerilmelerinin dağılımlarını göstermektedir.



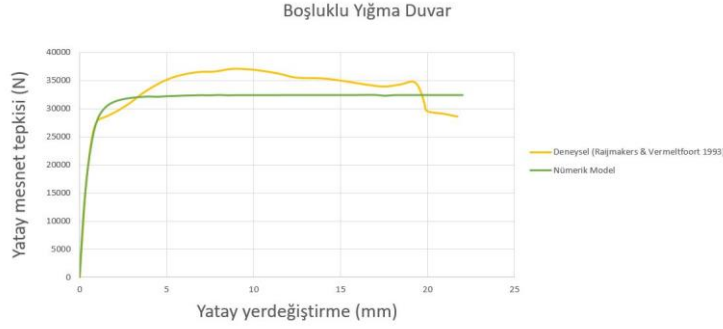
Şekil 8. Boşluklu yığma duvarda a) 1. yükleme sonucu toplam yer değiştirme b) 1. yükleme sonucu düşey gerilmelerin dağılımı c) 1 mm yer değiştirme sonrasında minimum asal gerilmelerin dağılımı d) 1 mm yer değiştirme sonrasında toplam yer değiştirmeler e) 1 mm yer değiştirme sonrası kayma gerilmelerinin dağılımı

Yığma duvarlar üzerinde uygulanan yükleme sonucunda oluşan çekme, kayma ve basınç çatlaklarının oluşması beklenen bölgeler belirlenmiştir. Yapılan analizler neticesinde düzlem içi yükler etkisi altında yığma duvarlarda meydana gelen şekil değiştirmelerin dağılımı Şekil 9'da görülmektedir. Siyah renkli kısımlar duvarda çekme etkisi sonucu meydana gelen şekil değiştirmeleri gösterirken mavi renkli kısımlar basınç sonucu meydana gelen şekil değiştirmeleri göstermektedir.



Şekil 9. Boşluklu yığma duvarda meydana gelen çatlakların dağılımı

Yapılan analizler sonucunda Şekil 10'da görülen yatay mesnet tepkisi-yatay yer değiştirme diyagramları elde edilmiştir.



Şekil 10. Boşluklu yığma duvardaki yük-yer değiştirme diyagramı

Nümerik modelden elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında yapılan analizlerin yığma duvarların düzlem içi davranışını başarılı bir şekilde yansıttığı görülmektedir.

## SONUÇLAR

Yığma duvarların nümerik olarak modellenebilmeleri amacıyla seçilen modelleme tekniği, kullanılan malzeme modeli ve kırılma hipotezi bir bütün oluşturur. Bu çalışmada kullanılan makro modelleme tekniği ile SOLID 65 elemanı, elastoplastik malzeme kabulü ve Drucker-Prager kırılma varsayımının yığma duvarların doğrusal olmayan davranışlarının modellenmesinde kullanılabilir olduğu görülmüştür. Bu çalışmada sunulan nümerik modelleme yöntemi kullanılarak yığma duvarlarda meydana gelen şekil değiştirmeler ve gerilmeler belirlenerek yığma duvarların kırılma mekanizmaları başarılı bir şekilde elde edilebilmektedir. Ancak, yığma duvarlarda ortaya çıkması beklenen yığma birim ve harç birleşimindeki hasarlar belirlenememekte olup yığma duvarlar üzerindeki hasarlar sürekli bir yapıda izlenebilmektedir. Boşluksuz yığma duvar ve boşluklu yığma duvar üzerinde yapılan sonlu eleman analizleri ile bulunan sonuçlar, deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, elde edilen sonuçların deneysel çalışmadaki sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Yığma yapıların modellenmesi konusunda yapılacak her bir çalışma, tarihi ve sanatsal değeri olan yığma yapıları daha iyi anlamamızı sağlayacak ve insanlığın ortak mirası olan bu eserleri gelecek kuşaklara taşıyabilmemizi kolaylaştıracaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] A.Th. Vermeltfoort, T.M.J. Rajmakers, *Deformation controlled meso shear tests on masonry piers*, Report B-92-1156 TNO-BOUWrrU, Building and Construction Research, Eindhoven, The Netherlands, 1992.
- [2] A.Th. Vermeltfoort, T.M.J. Rajmakers, *Deformation controlled meso shear tests on masonry piers*, Report B-92-1156 TNO-BOUWrrU Part 2 Draft report, Building and Construction Research, Eindhoven, The Netherlands, 1993.
- [3] C. Oliviera, *Experimental and Numerical Analysis of Blocky Masonry Structures under Cyclic Loading*, Doctoral Dissertation, Universidade do Minho, Portekiz, 2003.
- [4] P.B. Lourenço, *An Orthotropic Continuum Model for The Analysis of Masonry Structures*, Report 03-21-1-31-27, TU Delft, The Netherlands, 1995.
- [5] S. Oller, *Numerical Simulation of Mechanical Behavior of Composite Materials*, Springer, Barcelona Spain, 2014.
- [6] R. Quinteros, S. Oller, L. Nallim, Nonlinear homogenization techniques to solve masonry structures problems, *Composite Structures*, 94 (2011) 724–730. doi:10.1016/j.compstruct.2011.09.006



- [7] L. Pela, M. Cervera, P. Roca, An orthotropic damage model for the analysis of masonry structures, *Construction and Building Materials*, 41 (2012) 57-967. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.014
- [8] E. Nasiri, Y. Liu, Development of a detailed 3D FE model for analysis of the in-plane behavior of masonry infilled concrete frames, *Engineering Structures*, 143 (2017) 603–616. doi:10.1016/j.engstruct.2017.04.049
- [9] P.B. Lourenço, *Computational Strategies For Masonry Structures*, Doctoral Dissertation, Universidade do Minho, Portekiz, 1996.
- [10] R. Marques, P.B. Lourenço, Unreinforced and confined masonry buildings in seismic regions: Validation of macro-element models and cost analysis, *Engineering Structures*, 64 (2014) 52-67. doi:/10.1016/j.engstruct.2014.01.014
- [11] B. Panto, F. Cannizzaro, S. Caddemi, I. Calio, 3D macro-element modelling approach for seismic assessment of historical masonry churches, *Advances in Engineering Software*, 97 (2016) 40-59. doi:/10.1016/j.advengsoft.2016.02.009
- [12] G. Castori, B. Antonio, D.M. Alessandro, C. Marco, S. Romina, Seismic vulnerability assessment of a monumental masonry building, *Engineering Structures*. 136 (2017) 454-465. doi:10.1016/j.engstruct.2017.01.035.
- [13] M. Regan, E. Bourgeois, A.S. Colas, P. Chatellier, A. Desbordes, J.F. Douroux, Application of a coupled homogenization-damage model to masonry tunnel vaults, *Computers and Geotechnics*, 83 (2017) 132-141. doi:/10.1016/j.compgeo.2016.10.024.
- [14] S. Kömürcü, *Yığma Duvarların Düzlem İçi Davranışlarının Modellenmesi ve Analizi*, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2017.
- [15] D.C. Drucker, W. Prager, Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design, *Quarterly of Applied Mechanics*, 10 (1952), 157-165.
- [16] ANSYS 14.5. (2014) *Element Reference*, U.S.A.