



**AN INVESTIGATION ON THE NONLINEAR BEHAVIOR OF
UNREINFORCED MASONRY WALLS**

Oktay JAFAROV^{*1}, H. Orhun KÖKSAL², Bilge DORAN³, Cengiz KARAKOÇ⁴

¹*Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Anabilim Dalı, Esenler-İSTANBUL*

²*Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, ÇANAKKALE.*

³*Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Esenler-İSTANBUL*

⁴*Boğaziçi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bebek-İSTANBUL*

Received/Geliş: 13.06.2011 Revised/Düzeltilme: 21.02.2012 Accepted/Kabul: 12.03.2012

ABSTRACT

Recently, numerous studies on the modeling technique for masonry structures and their structural components have been carried out, such as masonry shear walls existing in the literature. This paper is focused on nonlinear finite element modeling of masonry walls at a micro-level. For this purpose, Drucker-Prager yield criterion is employed in the elasto-plastic analyses of walls deriving the material parameters from the compressive strength of both brick and mortar. The performance of the proposed approach is verified by simulating a series of experiments reported in the literature.

Keywords: Elastoplastic analysis, Drucker-Prager yield criterion, unreinforced masonry walls.

DONATISIZ YIĞMA DUVARLARIN DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞI ÜZERİNE BİR İRDELEME

ÖZET

Günümüzde, yığma yapıların ana taşıyıcılarından olan yığma duvarların numerik modelleme teknikleri ile ilgili bir çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmada, düşey ve yatay yükler etkisindeki yığma duvarlar için doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile mikro düzeyde bir modelleme tekniği önerilmiştir. Elastoplastik analizlerde, kırılma kriteri olarak Drucker-Prager modeli kullanılmış, kriterin ihtiyaç duyduğu malzeme parametrelerinden kohezyon ve içsel sürtünme açısı için malzemenin basınç dayanımına bağlı bağıntılar irdelenmiştir. Önerilen çözüm yöntemi ile elde edilen sonuçların literatürde yer alan farklı çalışmalarda elde edilen deneysel verilere oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Elastoplastik analiz, Drucker-Prager akma kriteri, donatısız yığma duvar.

1. GİRİŞ

Yığma yapılar, Türkiye’de yapı stokunun önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Özellikle inşaat tarzı açısından diğer yapılara nazaran daha az maliyet ve mühendislik hizmeti gerektirdiğinden özellikle kırsal kesimlerde halen sıklıkla kullanılmaktadır[1,2]. Bu bağlamda, yığma yapıların artan yükler altındaki davranışlarının bilinmesi faydalı olacaktır. Yığma duvarlar, yığma yapıların

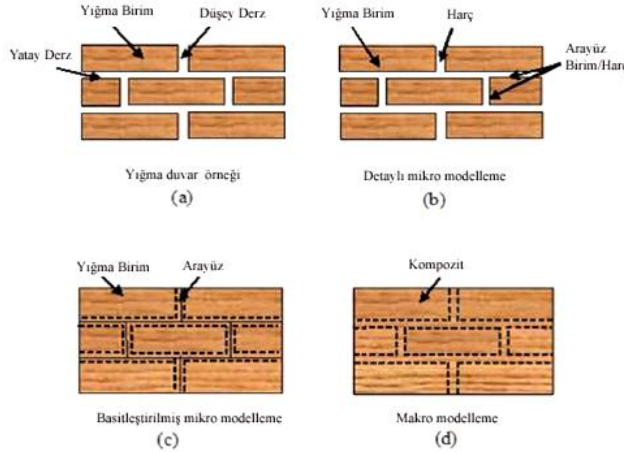
* Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: oktaycafer@gmail.com, tel: (536) 835 75 12

en temel taşıyıcı elemanları olduklarından, yapısal davranışın belirlenmesinde ilk akla gelen yığma duvar davranışının incelenmesi olacaktır. Bu amaçla gerçekleştirilen yapısal analizlerde, yığma yapı elemanları için birçok numerik modelleme teknikleri ve malzeme davranışı ile ilgili yaklaşımlar önerilmektedir. Anılan yaklaşımlarda kullanılan malzeme parametrelerinin doğruluğu ise sıklıkla, numerik çözüm sonuçlarının literatürde yer alan deneysel çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılması yoluyla belirlenmektedir [3,5–15].

Bu çalışmada, tuğla ile harç arasındaki etkileşimin dikkate alındığı, 3 boyutlu bir mikro modelleme tekniği önerilmektedir. Önerilen yaklaşım ile, malzeme parametrelerinin pratik bir şekilde belirlenmesi nedeniyle hem modelleme aşaması oldukça kolay olmaktadır hem de doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar tatminkârdır.

2. MALZEME DAVRANIŞI

Yığma duvarların kesme ve basınç altındaki davranışlarını duvarın ortotropik yapısını da dikkate almayı hedefleyen birçok analitik çalışma literatürde yer almakla beraber, önerilen numerik modeller oldukça karışık ve/veya malzeme parametreleri açısından bir takım belirsizlikler içermektedir. Modelleme tekniği olarak genelde iki farklı yaklaşım tercih edilmektedir; makro ve mikro modelleme yaklaşımı (Şekil 1). Makro modelleme tekniğinde, tuğla ve harç beraber modelleneceği için malzeme parametreleri farklı bir teknikte birleştirilerek dikkate alınmaktadır (Şekil 1d). Mikro modelleme tekniğinde ise, yığma elemanların bünyesinde yer alan tüm bileşenlere ve harçblok etkileşimine ait mekanik özelliklerin bilinmesini gereklidir (Şekil 1b). Ayrıca, çatlak oluşumu ve çatlak gelişiminin doğrusal olmayan davranışı yansıtması konusunda modelleme aşamasında çok sayıda belirsizlik bulunmaktadır [10,19]. Özellikle çatlak gelişimini belirlemek ve duvarın mekanizma durumunu yansıtabilmek için tuğla-harç etkileşimini dikkate alan modelleme teknikleri de mevcuttur (Şekil 1c). Ancak bu durumda modelleme aşaması oldukça uzun ve malzeme parametrelerinin belirlenmesi bir o kadar zorlaşmaktadır. Bu çalışmada, basitleştirilmiş bir mikro modelleme tekniği üzerinde durulacak ve özellikle duvarın doğrusal olmayan hesabında kullanılmak üzere tuğla ve harç için malzeme parametrelerini belirleyen bağıntılar önerilecektir.



Şekil 1. Modelleme Yaklaşımları

Çalışmada, yarı gevrek ve elasto-plastik malzemeler için matematiksel olarak uygulama kolaylığına sahip Drucker-Prager akma/kırılma kriteri hem tuğla hem harç malzemesi için

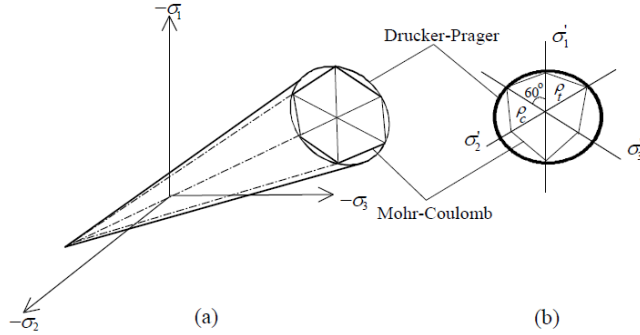
uygulanmıştır. Literatürde anılan kriter yardımıyla sonlu eleman uygulamalarına rastlamak mümkündür [20-23]. Anılan kriter, beton ve metal türü malzemeler için başarıyla kullanılan, gerilme kriterinin en pratik matematiksel formu von-Mises kriterinin modifikasyonu olan bir kırılma kriteri olarak tanımlanabilecektir. Kriter en yüksek dayanımda hem hidrostatik basınç, hem de deviyör gerilme etkilerini dikkate almaktadır. Akma yüzeyi,

$$f(I_1, J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir [24]. Burada α ve k malzeme sabitleridir. $\alpha = 0$ olması durumunda kriter, von-Mises kriteri ile aynı olacaktır. (1) numaralı bağıntının gösterdiği akma yüzeyi asal gerilme uzayında bir dairesel konidir. Ayrıca α ve k değerleri, Mohr-Coulomb kriterindeki içsel sürtünme açısı, ϕ ve kohezyon, c değerlerine bağlı,

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}, k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (2)$$

şeklinde belirlenebilir [24].



Şekil 2. Drucker-Prager ve Mohr Coulomb kriterlerinin karşılaştırılması
(a)asal gerilme uzayında, (b) deviyör düzlemde [24]

Malzemelerin ölçülmesi en kolay olan mekanik özelliği basınç dayanımıdır. Bu yüzden malzeme parametreleri beton gibi yarı gevrek malzemelerde genellikle basınç dayanımına bağlı olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada, donatısız yığma duvarların elastoplastik çözümlenmesinde kullanılmak üzere kohezyon için aşağıdaki genel bağıntıdan yararlanılmıştır [20-22]:

$$c = A f_c \text{ (MPa)} + B \quad (3)$$

Yığma duvarların analizlerinde anılan kriter kullanılması durumunda tuğla ve harç için önerilen bağıntılar [23,25]:

$$c_{mr} = 1.55 \sqrt{f_{mr}} \quad ; \quad \phi_{mr} = 1.519 f_{mr} \quad (4)$$

$$\frac{c_{mu}}{f_{mu}} = \frac{\tan \phi_{mu}}{3} \sqrt{\frac{\sigma_m \leq c_{mu}}{f_{mu}} \bigg|_{\frac{\sigma_m}{f_{mu}}=1}} \quad ; \quad \phi_{mu} = \phi_i - 0.75 \frac{\sigma_m}{f_{mu}} \geq \phi_f = \phi_{mu} \bigg|_{\frac{I_1}{f_{mu}}=1} \quad (5)$$

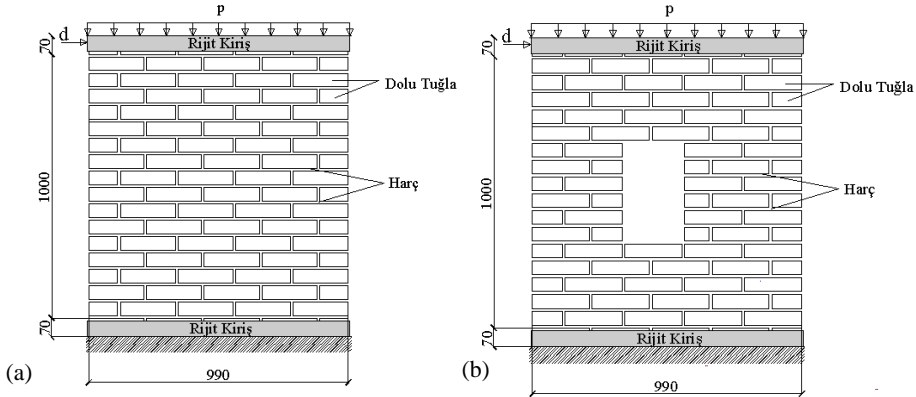
şeklinde. Bu bağıntılarda ϕ_i , başlangıç içsel sürtünme açısıdır ve yaklaşık olarak $\pi/3$ alınabilir [25]. σ_m , ortalama gerilmedir ve $\sigma_m = I_1/3 = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})/3$ bağıntısı ile hesaplanacaktır.

3. YIĞMA DUVARDA DOĞRUSAL OLMAYAN SONLU ELEMANLAR YAKLAŞIMI

Çalışmada yığma duvarların doğrusal olmayan çözümünde kullanılmak üzere önerilen basitleştirilmiş mikro modelde, tuğla ve harç için malzeme parametreleri 4 ve 5 numaralı bağıntular yardımıyla belirlenerek modelin elasto-plastik çözümlemesi Drucker-Prager akma/kırılma kriteri yardımıyla sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Önerilen algoritmanın doğruluğunun kontrol edilebilmesi amacıyla literatürde yer alan ve akademik çevrede kabul görmüş olan TU Eindhoven (EHTZ) duvarları [5, 26] ile ilgili deneysel çalışmalardan yararlanılmıştır. Eindhoven duvarları (Şekil 3), 210x52x100 mm boyutlarında dolu kil tuğladan üretilmiş olup, yatay ve düşeyde harç kalınlığı 10 mm'dir. Deney duvarlarını sabitlemek, uygulanan düşey yüklerin üniform dağılımını sağlayabilmek açısından duvarların üzerine ve altına rijit kirişler yerleştirilmiştir (Şekil 3). Deney duvarları dolu duvarlar J4D, J6D ve J7D ve boşluklu duvar J2G şeklinde isimlendirilmiş (Çizelge 1) ve sırasıyla 0.30 MPa, 1.20 MPa, 2.10 MPa ve 0.30 MPa değerlerinde basınç yüküne maruz bırakılan duvarlara üstteki rijit kirişler aracılığı ile yatay yükleme yapılmış, deplasman kontrollü olarak duvarlar kırılmıştır. Orta bölgesinde boşluk olan duvar modeli (J2G) için mekanik özellikler ve yükleme düzeni J4D duvarı ile aynı alınmıştır. Duvarların doğrusal olmayan çözümlemelerde kullanılan malzeme parametreleri ile mekanik özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Geometrik boyutlar

Deney	Duvar Adı	Yük (kN)	Duvar (mm)	Tuğla (mm)
EHTZ	J4D	30	990x1000x100	210x52x100
	J6D	120	990x1000x100	210x52x100
	J7D	210	990x1000x100	210x52x100
	J2G	30	990x1000x100	210x52x100

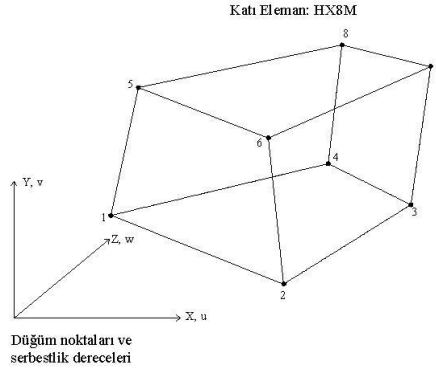


Şekil 3. Eindhoven duvarı deney düzeneği (a) Dolu duvar (b) Boşluklu duvar

Çizelge 2. Malzeme parametreleri ve mekanik özellikler

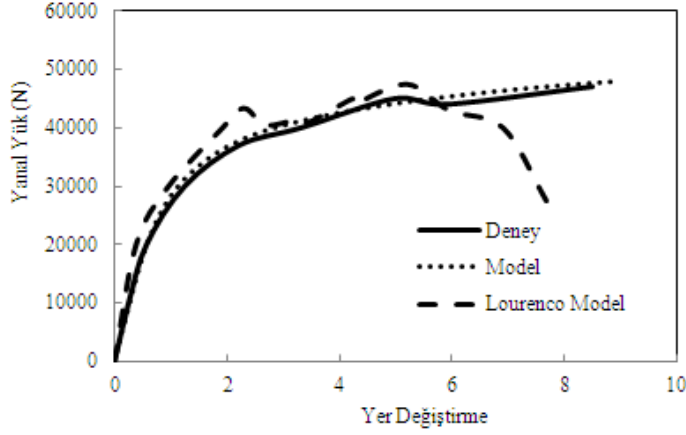
Tuğla					Harç				
Elastisi te Modül ü (MPa)	$f_{tuğla}$ (MPa)	Poisson Oranı	c	ϕ	Elastisi te Modülü (MPa)	Poisson Oranı	c	ϕ	
8100	24	0,2	0,88	59,82	2,3	2100	0,2	2,05	3,49
8100	24	0,2	1,74	59,27	2,3	2100	0,2	2,05	3,49
8100	24	0,2	2,25	58,74	2,3	2100	0,2	2,05	3,49
8100	24	0,2	0,88	59,82	2,3	2100	0,2	2,05	3,49

Önerilen numerik modelde, tuğla ve harç birimler, 3 boyutlu, 8 düğüm noktalı izoparametrik katı elemanlar ile modellenmiş ve doğrusal olmayan 3 boyutlu çözümleme ile blok davranışı irdelenmiştir. J4D, J6D ve J7D duvarları nümerik olarak modellenirken toplamda 4424 düğüm noktasına sahip 600 adet sekiz düğüm noktalı izoparametrik katı eleman (HX8M) kullanılmıştır. Bunların 208 adedine tuğla, 358 adedine harç, 34 adedine ise duvarın alt ve üst kısmına konulan plak elemana ait malzeme özellikleri atanmıştır. J2G duvarında ise 4084 düğüm noktasına sahip toplamda 535 katı eleman kullanılmıştır. Bunların 187 adedi tuğla, 315 adedi harç, 34 adedi ise duvarın alt ve üst kısmına konulan plak elemana ait malzeme özelliklerini içermektedir. Rijit plak elemanlar için malzeme doğrusal elastik kabul edilmiş, tuğla ve harç elemanlara ait malzeme özellikleri ise elasto- plastik malzeme modelleri yardımıyla tanımlanmıştır. Duvarların rijit plağa oturduğu taban kesitlerinde mesnetlenme şekli ankastre olarak kabul edilmiştir. Sayısal modelde kullanılan katı elemana ait geometri ve düğüm noktası serbestlikleri şematik olarak Şekil 4’te verilmiştir [28].



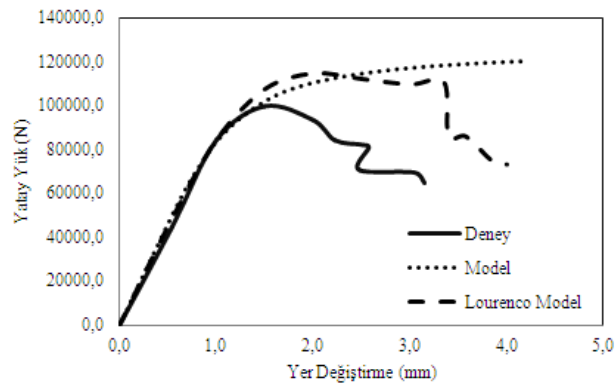
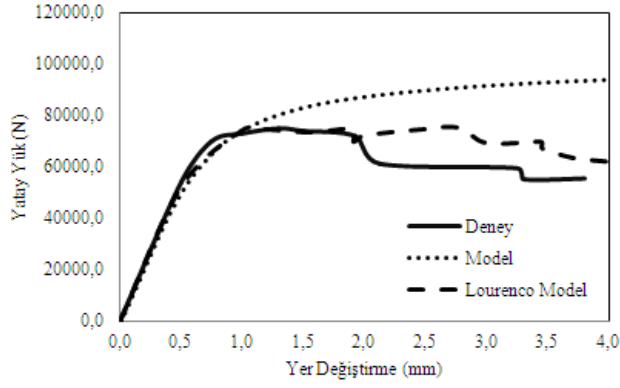
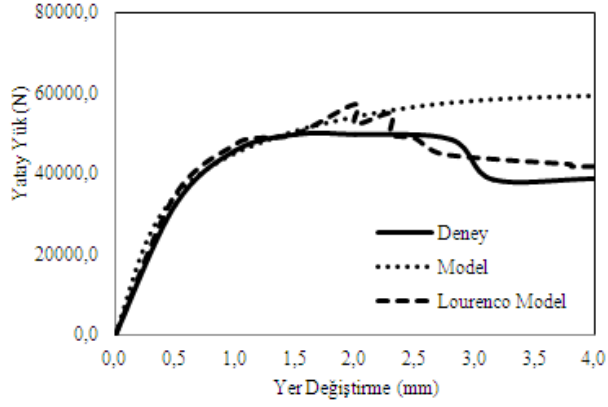
Şekil 4. İzoparametrik Katı Eleman

Doğrusal olmayan 3 boyutlu numerik çözümleme sonucu elde edilen gerek duvar taşıma güçleri gerekse taşıma gücü düzeyindeki asal gerilme yörüngeleri deneysel verilerle oldukça uyumludur (Şekil 5-8). Şekil 5’de verilen yük-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, boşluklu duvar için elde edilen nümerik sonuçların deneysel sonuçlara uygunluğu, anılan yaklaşım ile elde edilen malzeme parametrelerinin geçerliliğini göstermektedir. Şekil 6’da ise, deneysel sonuçlarda maksimum yük değerine ulaşıldıktan sonra yumuşama davranışı gözlenmesine rağmen, önerilen modelin bu sonucu desteklemediği görülmektedir.

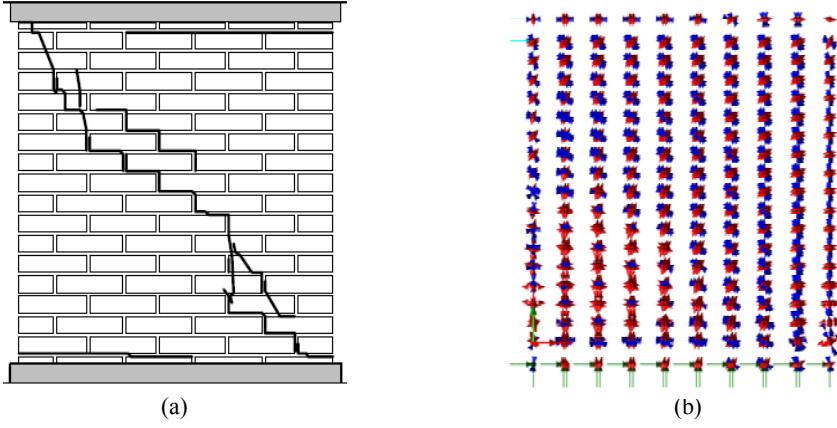


Şekil 5. Eindhoven duvarları (J2G) yatay yük-yer değiştirme eğrileri

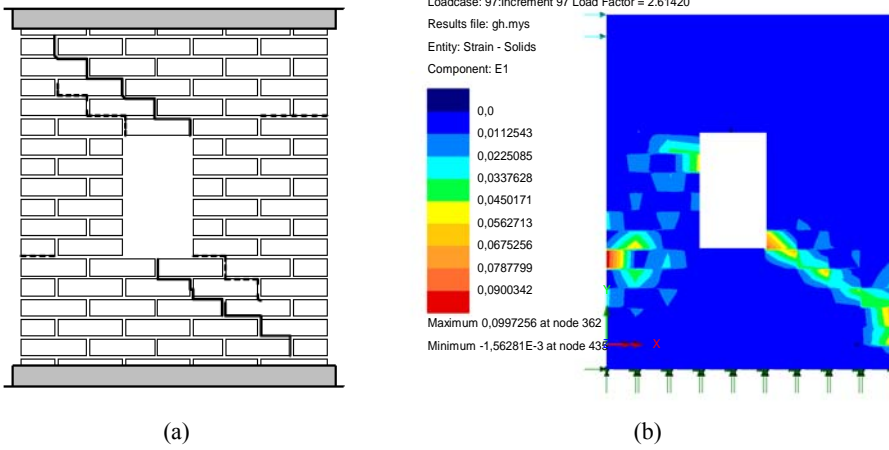
Bunun başlıca nedeni, önerilen nümerik modelin, tuğla-harç arasında ayrık enterfaz eleman tanımlanmamış olması ile açıklanabilir [27]. Aynı deney duvarları Mohr- Coulomb kırılma kriterine yardımıyla Lourenço, P (1996) tarafından incelenmiştir [10]. Özellikle şekil 6 a ve b’de deney ve nümerik sonuçlarının uyumluluğu tatminkardır. Ancak anılan çalışmada, analiz sonuçlarını deneysel verilere uydurabilmek için duvarın kesmeye ait mekanik özellikleri %30, basınçla ilgili mekanik özellikleri %20 oranında azaltılırken basınç altındaki kırılma enerjisinin ise 3 (üç) gibi bir katsayı ile çarpılmış olduğu ayrıca ifade edilmiştir [10]. Bu durum özellikle eğimin değiştiği bölge için elde edilen deneysel verilerde bir sorun olabileceği izlenimini doğurmaktadır.



Şekil 6. Eindhoven duvarları yatay yük-yer değişirme eğrileri: a) J4D, b) J6D, c) J7D



Şekil 7. (a)DeneySEL mekanizma durumu (b) Asal gerilme vektörleri (Nümerik model)



Şekil 8. (a) DeneySEL mekanizma durumu (b) Şekil değıştirmeler (Nümerik model)

Ayrıca Çizelge 3’de, dolu ve boşluklu duvarlarda maksimum yatay yüke ulaşıldığı anda elde edilen yer değıştirme değeri verilmiştir. Nümerik sonuçların deneysel verilerle uyumlu olduğu söylenebilir.

Çizelge 3. Maksimum yatay yük/yatay yer değiştirme değerleri

Deney	Duvar Adı	Deneysel		Model	
		Maksimum Yük (kN)	Yer Değiştirme (mm)	Maksimum Yük (kN)	Yer Değiştirme (mm)
EHTZ	J4D	50,00	1,50	51,23	1,50
	J6D	73,00	1,00	75,07	1,00
	J7D	100,00	1,50	103,14	1,50
	J2G	47,00	8,51	46,90	8,51

Şekil 7 ve 8’de dolu ve boşluklu duvar örneklerine ait asal gerilme yörüngeleri ve şekil değiştirmelerin yayılışı dikkatle incelendiğinde deney sırasında oluşan çatlak yörüngelerinin nümerik model ile benzer olduğu görülebilir. Şekil 7’de kırmızı renk çekme, mavi renk ise basınç gerilmelerini işaret etmektedir [28]. Deneylerde zikzak formundaki çatlaklar oluştuğunda ve duvar rijitliği azaldıkça ortaya çıkan yumuşama davranışını önerilen modelde görmek mümkün değildir. Ancak, uygulama pratiğine sahip model, göçme yüklerini belirlemede son derece hızlı bir çözüm seçeneği sunmaktadır.

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Yığma yapı elemanlarının deprem etkisi altında tasarımında yatay yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesinde gerçekçi sonuçlar üreten nümerik yöntemlere oldukça ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, yığma duvarların düşey ve artımsal yatay yükler altındaki doğrusal olmayan davranışlarının irdelenebilmesi amacıyla basitleştirilmiş mikro düzeyde bir modelleme tekniği önerilmiştir. Plastik analizlerde, Drucker-Prager akma kriteri kullanılmış ve kriterin ihtiyaç duyduğu malzeme parametreleri için uygun bağıntılar irdelenmiştir. Çalışmada ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Drucker-Prager akma/kırılma kriterine dayalı elasto-plastik modelde, kriterin ihtiyaç duyduğu malzeme sabitleri için basınç dayanımı temel alınarak birtakım bağıntılar önerilmiş ve bu bağıntılarla gerçekleştirilen 3 boyutlu doğrusal olmayan çözümlerde deneysel verilerle oldukça uyumlu sonuçlar elde edildiği gösterilmiştir (Şekil 5,6).
2. Çizelge 3 incelendiğinde, önerilen nümerik simülasyonlarda aynı yer değiştirme düzeyleri için elde edilen maksimum yatay yük taşıma kapasitelerinin deneysel verilere oldukça yakın olduğu görülmektedir.
3. Şekil 7 ve 8’den açıkça görüleceği üzere önerilen modelde çatlak doğrultuları ve yayılışları deneysel elde edilen kırılma mekanizmalarını destekler niteliktedir.
4. Düşey ve yatay yükler altındaki yığma duvarların deneysel çalışmalar ile sayısal model sonuçları karşılaştırıldığında taşıma güçlerinin doğru olarak belirlendiği görülmüştür. Taşıma gücüne ulaşıldıktan sonra deney duvarlarında görülen rijitlik azalması ve bundan doğan yumuşama davranışı ise önerilen modellemenin hedefleri dışında kalmaktadır. Buna karşın önemli bir yumuşamanın olmadığı durumlarda analiz sonuçları deneysel veriler ile uyum içindedir.

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Krstevska, L., Tashkov, Lj., Arun, G., Aköz, F., Evaluation of Seismic Behavior of Historical Monuments, SHH07 International Symposium on Studies on Historical Heritage Symposium Book, p. 411-418, Antalya, 2007.
- [2] Mele E., Deluca, A., Giordano, A., Modeling and Analysis of A Basilica Under Earthquake Loading, *Journal of cultural Heritage*, 4, 355-367, 2003.
- [3] Oliveira, D. V., Mechanical Characterization of Stone and Brick Masonry, Rep. No. 00-DEC/E-4, Univ. do Minho, Guimaraes, 2000.
- [4] Ganz, H.R., Thürlimann, B., Tests On Masonry Walls Under Normal and Shear Loading (In German), Report No. 7502-4, Institute of Structural Engineering, ETH Zurich, 1984.
- [5] Raijmakers, T. M. J., Vermeltfoort A.Th. "Deformation Controlled Tests In Masonry Shear Walls [in Dutch], Report B-92-1156, TNO-Bouw, Delft, 1992.
- [6] Roca, P., Oliveira, D, Lourenco, P, Carol, I., Mechanical Response of Dry Joint Masonry, *Studies in ancient structures*, Istanbul, Yildiz Teknik Universitesi, p.291–300, 2001.
- [7] Oliveira, D. V., Lourenço, P. B., Roca, P., Cyclic Behaviour of Stone and Brick Masonry Under Uniaxial Compressive Loading, *Materials and Structures*, 39(2), 219-227, 2006.
- [8] Chaimong, K., Attard, M., Modeling of Unreinforced Masonry Walls Under Shear and Compression, *Engineering Structures*, 29(9), 2056-2068, 2007.
- [9] Formica, et al., A Mixed Solution Strategy For The Nonlinear Analysis of Brick Masonry Walls, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 191(51-52), 5847-5876, 2002.
- [10] Lourenco, P. B., Computational Strategies For Masonry Structures, PhD thesis, Delft University, Netherlands, 1996.
- [11] Lourenco, P. B., Rots, J. G., Multisurface Interface Model For Analysis of Masonry Structures, *Journal of Engineering Mechanics*, 123(7), 660-668, 1997.
- [12] Berto, L et al., An Orthotropic Damage Model for Masonry Structures, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 55(2), 127-157, 2002.
- [13] Tasnimi, A. A., Farzin, M., Inelastic Behavior of RC Columns Under Cyclic Loads on Cohesion and Internal Friction Angle of Concrete, *Modarres Technical Eng. J.*, 23, 29-40, 12, 2006.
- [14] Mohebkhah, A., Tasmini, A. A., Moghadam, H. A., Nonlinear Analysis of Masonry-Infilled Steel Frames With Openings Using Discrete Element Method, *Journal of Constructional Steel Research*, 64(12), 1463-1472, 2008.
- [15] Popehn, J. R. B., Schultz A. E., Lu M., Stolarski H. K., Ojard N.J., Influence of Transverse Loading on The Stability of Slender Unreinforced Masonry Walls, *Engineering Structures*, 30(10), 2830-2839, 2008.
- [16] Roca, P., Simplified Methods for Assessment of Masonry Shear-Walls, 6th National Congress of Seismology and Earthquake Engineering and International Workshop, *Masonry Walls and Earthquakes*, SISMICA, 101-118, 2004.
- [17] Lourenço, P. B., Rots, J. G., Blaauwendraad, J., Continuum Model For Masonry: Parameter Estimation and Validation, *Journal of Structural engineering*, 124(6), 642-652, 1998.
- [18] Dhanasekar, M., Haider, W., Explicit Finite Element Analysis of Lightly Reinforced Masonry Shear Walls, *Computers and Structures*, 86, 15-26, 2007.
- [19] Bazant, Z. P., Oh, B. H., Crack Band Theory for Fracture of Concrete, *Material Structure*, 16, 155-177, 1983.
- [20] Köksal, H. O., Doran, B., Turgay, T., A Practical Approach For Modeling FRP Wrapped Concrete Columns, *Construction and Building Materials*, 23(3), 1429-1437, 2009.

- [21] Doran, B., Köksal, H. O., Turgay, T., Nonlinear Finite Element Modeling of Rectangular/Square Concrete Columns Confined With FRP, *J. Materials and Design*, 30(8), 3066-3075, 2009.
- [22] Doran, B., Numerical Simulation of Conventional RC Columns Under Concentric Loading, *J. Materials and Design*, 30(6), 2158-2166, 2009.
- [23] Köksal, H. O., Doran, B., Özsoy, A. E., Alacalı, N. S., Nonlinear Modeling of Concentrically Loaded Reinforced Blockwork Masonry Columns, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31, 1012-1023, 13, 2004.
- [24] Chen, W.F., Han, D.J., *Plasticity for Structural Engineers*, Springer-Verlag New York Inc. 1988.
- [25] Köksal H.O., Aktan, S., Kuruşçu A.O., Elasto-Plastic FE Analysis of FRP-Confined Masonry Columns, Revised from submitted to *Journal of Composites for Construction*. DOI 10.1061/(ASCE) CC. 1943- 56140000268, (2011).
- [26] Vermelfoort, A. T., Raijmakers, T.M.J., *Deformation Controlled Tests in Masonry Shear Walls, Part 2* [in Dutch], Report TUE/BKO/93.08, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 1993.
- [27] Małyżsko L. 2005. In-plane shear and tensile strength tests of small brickwork specimens. Proc. IVth International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions – Modena, Lourenco & Roca (eds), 10-13 Nov. 2004, Padua, Italy, p. 291-298, vol.1, Taylor & Francis Group, London.
- [28] Lusas Finite element system. Version 14.5-2. FEA ltd, Surrey, UK 2011.