



Research Article / Araştırma Makalesi CONSTITUTIVE MODELING OF MASONRY WALLS UNDER IN-PLANE LOADINGS

Selen AKTAN*¹, Bilge DORAN²

¹Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ÇANAKKALE

²Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İSTANBUL

Received/Geliş: 14.06.2016 Accepted/Kabul: 23.09.2016

ABSTRACT

The aim of this study is to examine the behavior of the historic masonry walls by analyzing both the experimental and numerical results. In the experimental part of the study, original material parameters used in repair, strengthening and restoration of historical monuments were determined. For this purpose, in the context of the research Project numbered as 111M568; the characteristics of the original building materials for the brick and mortar specimens from two distinct historical monuments that are located in Turkey were obtained. Physical and mechanical properties of these materials were calculated and in the direction of this results, new mortars were produced. New masonry walls were constructed with the clay bricks and different types of produced mortar. The experimental walls were subjected to compression and incremental lateral loads and the results were evaluated within the load-displacement relations. Experimental walls were modelled with a new approach called 'fictitious joint material' in which the constitutive behavior of the mortar joint and the brick-mortar interface were included together. In this scope of this work, an elasto-plastic damage (EPD) approach is adapted calibrating the parameters of Oliver's damage model [1] together with the modified von-Mises yield criterion for the masonry constituents.

Keywords: Constitutive modeling, finite element method, elasto-plastic damage model, historical masonry wall.

DÜZLEM İÇİ YÜKLER ETKİSİNDEKİ YIĞMA DUVARLARDA BÜNYESEL MODELLEME

ÖZ

Bu çalışmada tarihi yapıların onarım-güçlendirme ve restorasyon çalışmalarında kullanılmak üzere özgün malzemelerin üretimi ve sayısal modeller yardımıyla bu malzeme parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen, yazarın da yer aldığı 111M568 no'lu Tübitak Projesi kapsamında 2 adet tarihi yapıdan alınan harç ve tuğla örnekleriyle özgün malzeme özellikleri belirlendikten sonra bu özellikler doğrultusunda yeni harçlar üretilmiş ve üretilen harçlar ve piyasadan temin edilen harman tuğlaları ile duvar üretimleri yapılmıştır. Hazırlanan duvar numuneleri düşey ve kademeli artan yatay yük etkisinde test edilmiş, sonuçlar yatay yük ve yatay yer değiştirme kapsamında incelenmiştir. Çalışmanın sayısal modelleme kısmında, harç bölgesi ile tuğla-harç birleşim bölgesi davranışını birlikte yansıtan bir sanal birleşim bölgesi önerilmiştir. Bu tez çalışmasında yığma duvarların modellenmesinde önerilen ve kullanılan malzeme modeli, yığmanın gerilme birim şekil değiştirme davranışını ifade etmek için plastisite ile hasar mekaniği yaklaşımlarının birleştirildiği elasto-plastik hasar mekaniğinden türetilmiş ve gerekli malzeme parametreleri kullanılmıştır. Plastik şekil değiştirme için, kırılma yüzeyindeki çekme ve basınç gerilme değerlerini ayrı ayrı dikkate alan geliştirilmiş von-Mises plastisite modeli ile hasar mekaniğindeki şekil değiştirme artışı Oliver modeli [1] kullanılarak ifade edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Bünyesel modelleme, sonlu elemanlar yöntemi, elasto-plastik hasar modeli, tarihi yığma duvar.

* Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: saktan@comu.edu.tr, tel: (286) 218 00 18 / 2837
Doktora Öğrencisi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

1. GİRİŞ

Tarihi yapılar, taşıyıcı sistemi, özgün biçimi ve malzemesi ile birlikte bir bütünlüğün sağlandığı oranda başarılı olarak korunuyor demektir. Özgün malzemelerinin özelliklerin tespit edilmesi, yapının özgün malzemeleri ile yapıya eklenen yeni malzemelerin uyumu ve bütünleşmesi, sağlıklı bir restorasyon çalışmasının gerçekleştirilebilmesi için temel adımlardandır. Mevcut özgün malzemeler hakkında yapılan karakterizasyon çalışması sonucu elde edilen bilgilerin, özgün malzemeye uygun onarım malzemelerinin hazırlanabilmesini sağlayacak yeterlilikte olması, yapının restorasyon/onarım çalışmalarında kullanılmak üzere gerekli malzeme ve elemanların yeniden üretilmesini sağlayacaktır [2]. Yapısal analizde kullanılan geleneksel yöntemler, tarihi yapıların karmaşık geometrik yapısı ve homojen olmayan malzeme özellikleri nedeniyle yetersiz kalmaktadır. Günümüz hesaplama olanakları ve yöntemleri karmaşık geometri ve homojen olmayan malzeme özellikleri için sonlu elemanlar yöntemini en uygun analiz yöntemi haline getirmektedir [3]. Yığma yapıların karmaşık mekanik davranışları, büyük ölçüde yapı malzemelerinin kompozit niteliğine bağlıdır. Çeşitli tuğla ve taş elemanlardan (yığma birim) ve farklı içeriklerde harç (bağlayıcı) malzemeden oluşan yığma duvarlarda, zayıf bölgede olan ve kompozit yapıda olan malzeme harçtır. Tarihi harçın yığma birimlere nazaran mekanik olarak zayıf olması, bu etkiyi sayısal modelleme çalışmalarına yansıtma gerekliliğini ortaya çıkarmıştır.

Bütün mühendislik elemanlarında başlangıç hali ve kullanımından itibaren içsel boşluklar ve mikro-çatlaklar mevcuttur. Hasarın kademeli artış miktarıyla aynı zamanda malzemedeki nitelik azalması bozulma olarak tanımlanır. Yapı malzemelerinde oluşan gerilmelerin, fiziksel, kimyasal ve mekanik bozulmalar oluşturması hasara yol açmaktadır [4]. Hasar sonrası çatlak oluşumuyla birlikte malzemenin ve dolayısıyla yapının rijitliğinde bir azalma olduğu bilinmektedir [5].

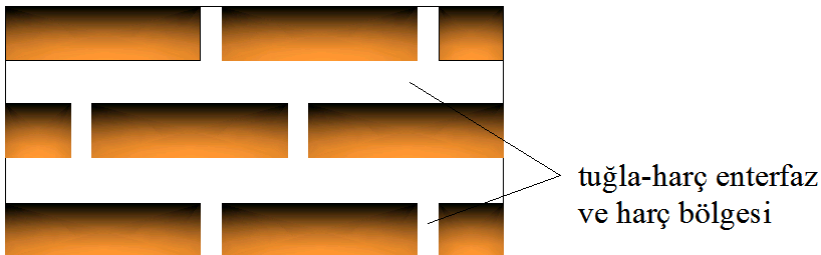
Hasar mekaniğindeki temel yaklaşım, herhangi bir taşıyıcı elemanın yapıdaki kusurlarının da bir yansıması olan başlangıç elastisite modülü değerinin belli bir hasar eşiğinin aşılmasıyla birlikte kademeli olarak azaltılması varsayımına dayanmaktadır. Bu azaltma işlemi, yükleme ve şekil değiştirmeler ile birlikte artan, değeri 0 ila 1 arasında olan bir hasar değişkeni (d) yardımıyla analizlerde dikkate alınmaktadır [1], [6].

$$\sigma = E(1 - d)\varepsilon \quad (1)$$

Burada, σ gerilmeyi, E elastisite modülünü, ε birim şekil değiştirmeyi ifade eder.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, harç derzleri ve harç-yığma birim arasındaki enterfaz bölgeyi tanımlamak amacıyla Şekil 1'de görülen "sanal birleşim bölgesi malzemesi" önerilmiştir. Bu sanal bölgenin çok zayıf özellikte olduğunu ve deney sırasında aksel yük uygulandıktan yani yatay yükün uygulanmasından hemen önce, tanımlanan sanal birleşim bölgesi malzemesinin başlangıç rijitliği değerlerinin önemli ölçüde azaldığı şeklinde ifade edilir.



Şekil 1. Yığma duvar için önerilen sanal birleşim bölgesi tanımı

Yığılma bileşenler için önerilen ve kullanılan malzeme modeli, yığılmanın gerilme birim şekil değiştirme davranışını ifade etmek için plastisite ile hasar mekaniği yaklaşımlarının birleştirildiği elasto-plastik hasar mekaniğinden türetilmiş ve gerekli malzeme parametreleri kullanılmıştır. Oliver hasar modelinde çok eksenli basınç altındaki izotropik homojen bir malzemenin davranışını ifade etmek için kullanılan 3 tane malzeme parametresi bulunmaktadır. Bunlardan ilki, “başlangıç hasar eşiği” τ^* ; elastik olmayan davranışın başlangıcını, diğer bir ifadeyle çekme çatlaklarının başlangıcını ifade eder. Elasto-plastik malzeme analizlerinde başlangıç akma gerilmesine benzer bir fonksiyon olarak göz önüne alınır. Doğrusal elastik sınır noktasıdır. Doğrusal olmayan hasar malzeme modeli kullanıldığında, bu değer in altında malzemede hasar oluşmadığı kabul edilen başlangıç gerilme sınırır:

$$\tau^* = \frac{f_t}{\sqrt{E_0}} \quad (2)$$

Burada, f_t , malzemede hasarın başladığı çekme dayanımını, E_0 ise elastisite modülünü ifade eder.

Hasar modeli için tanımlanan ikinci parametre olan A değeri, doğrusal olmayan sonlu eleman analizinde elde edilen sonuçların seçilen ağ boyutuna bağlı olmasını önlemek amacıyla kullanılan bir malzeme parametresidir. Hasar, çatlak genişlemesi ile ortaya çıkan ve ilerleyen bir mekanizma olduğundan kırılma enerjisi G_f 'e bağlı olarak ifade edilmektedir:

$$A = \left(\frac{G_f \cdot E_0}{h \cdot f_t^2} - \frac{1}{2} \right)^{-1} \geq 0 \quad (3)$$

G_f ifadesinde tuğla için, (b : brick); sanal birleşim bölgesi malzemesi için (fm : fictitious material) olmak üzere:

$$G_{f_{fm}} = 15,48d_{\max} f_t^2 / E_0 \quad (4)$$

$$G_{f_b} = 25,8d_{\max} f_t^2 / E_0 \quad (5)$$

şeklinde göz önüne alınmıştır.

A ifadesindeki h değeri 3 boyutlu modeldeki sonlu eleman boyutları kullanılarak aşağıdaki bağıntı ile elde edilmektedir:

$$h = \sqrt[3]{h_x h_y h_z} \quad (6)$$

Hasar modeli için tanımlanan son parametre ise, malzemenin basınç dayanımı ile çekme dayanımı arasındaki oranı ile ifade eden η değeridir:

$$\eta = \frac{f_c}{f_t} \quad (7)$$

Çalışma kapsamında 2 tarihi yapıdan alınan tuğla ve harç örnekleri üzerinde fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi için gerekli deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucu, ilk yapı örneği olan apsidal yapı kalıntısında kullanılan tuğlanın basınç dayanımını ortalama 10,3 MPa; ikinci yapı örneği tarihi kütüphanede kullanılan tuğlanın basınç dayanımını ortalama 10,2 MPa olarak hesaplanmıştır. Harç basınç dayanımları ise ilk yapıda, 1,1-2,6 MPa, ikinci yapıda ise 3,9 MPa olarak ölçülmüştür. Bu doğrultuda, tarihi harç özelliklerine sahip, kireç ve puzolan katkısı ile yeni harçlar üretilmiştir. Üretici firmadan temin edilen harman tuğlaları ve üretilen harçlardan yeni duvar üretimleri yapılmıştır. Harman tuğlaların boyutları 180x50x80 mm, basınç

dayanımı 9,4 MPa, elastisite modülü 6085 MPa ve Poisson oranı 0,18 olarak ölçülmüştür. Üretilen harçların malzeme içeriklerine göre sınıflandırılması Çizelge 1'de; bu çalışmada kullanılan A1 ve A3 kodlu harçların özellikleri ise Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Üretilen harçların sınıflandırılması

A: Hidrolik Harç	B: Hidrolik Olmayan Harç
A1 Hidrolik Kireç+Kum+Su	B1 Hava Kireci+Kum+Su
A2 Hidrolik Kireç+Kum+Su+Tuğla kırığı (puzolanik aktivitesi düşük)	B2 Hava Kireci+Kum+Su+Tuğla kırığı (puzolanik aktivitesi düşük)
A3 Hidrolik Kireç+Kum+Su+Tuğla kırığı (puzolanik aktivitesi yüksek)	
A4 Hava Kireci+Kum+Su+Tuğla kırığı (puzolanik aktivitesi yüksek)	

Çizelge 2. A1 ve A3 harçlarına ait özellikler

Harç Türü	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Poisson Oranı	Elastisite Modülü (MPa)
A1	0,9	1,5	0,24	3860
A3	1,1	3,1	0,23	3000

Üretilen duvarlarda yatay derz kalınlığı değeri olarak özellikle Bizans döneminde pek çok tarihi eserde kullanılmış olan 40 mm değeri seçilmiştir. Harman tuğlasının boyutları göz önüne alınarak, model duvar boyutları 860x860x80 mm olarak seçilmiştir. Deneyler esnasında model duvarlara 50 kN düşey yük uygulanırken, yatay yük değeri 5 kN olarak uygulanmaya başlanmış ve yer değiştirme değeri okunduktan sonra kademeli olarak artırılmıştır ($\Delta P=5$ kN). Model duvarlarda duvarın en alt ucuna kadar 45°'lik gözle görülür çatlak oluştuğundan sonra deneye son verilmiştir.



Şekil 2. Deney düzeneği

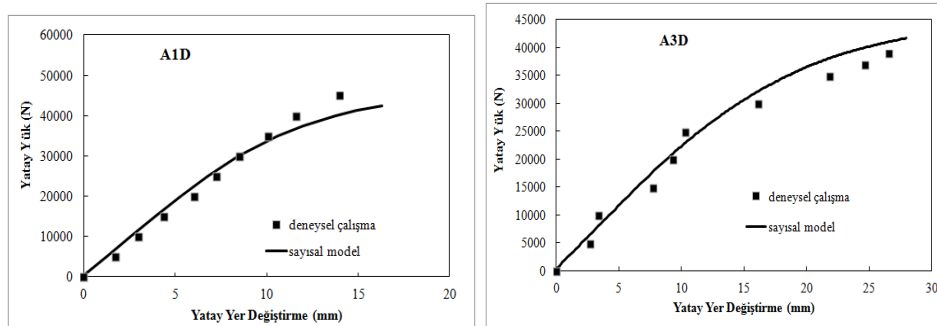
Deney duvarlarına ait sayısal model için, önerilen bünye denklemlerinde tuğla için ölçülen basınç dayanımı, elastisite modülü ile Poisson oranı değerleri kullanılmıştır. Anılan mekanik parametreler dikkate alınarak hesaplanan hasar parametreleri ile sanal birleşim bölgesi malzemesi için göz önüne alınan özellikler ve bu parametreler dikkate alınarak hesaplanan hasar parametreleri ise Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Sayısal modellerde kullanılan mekanik parametreler

	Elastik parametreler		Plastik parametreler		Hasar parametreleri		
	E (MPa)	ν	f_t (MPa)	f_c (MPa)	τ^*	A	η
Tuğla	6085	0,18	3,9	9,4	0,05	13,2	2,41
Sanal birleşim bölgesi malzemesi (A1)	100	0,24	0,9	3	0,09	2,1	3,33
Sanal birleşim bölgesi malzemesi (A3)	60	0,23	0,6	3,5	0,077	2,1	5,83

2. SONUÇLAR

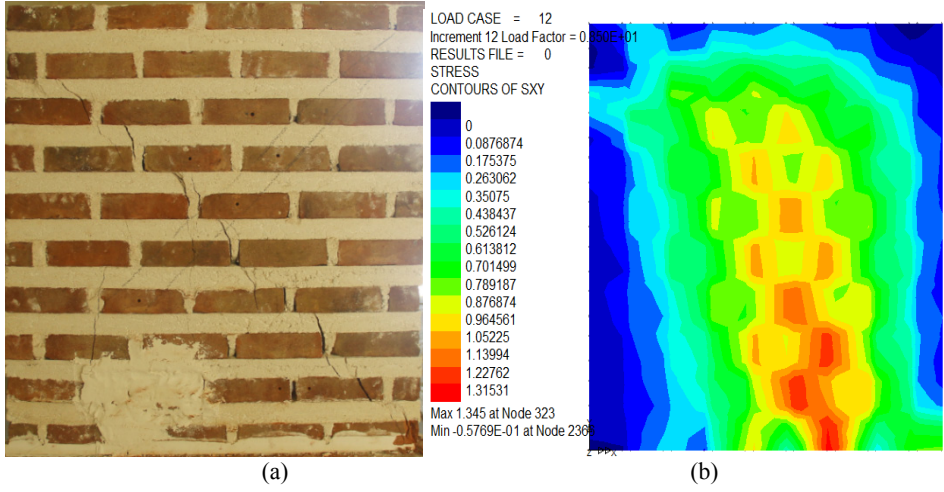
A1 harcıyla üretilen duvara uygulanan 45 kN yatay yük sonucunda oluşan yer değiştirme değeri 13,97 mm olmuştur. A3 kodlu harç ile oluşturulan duvara ise 35 kN yatay yük uygulanmış, bu değerinde oluşan yer değiştirme değeri 23,58 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 3'te duvarlara ait deneysel ve sayısal modellerden elde edilen yük-yer değiştirme ilişkileri görülmektedir.



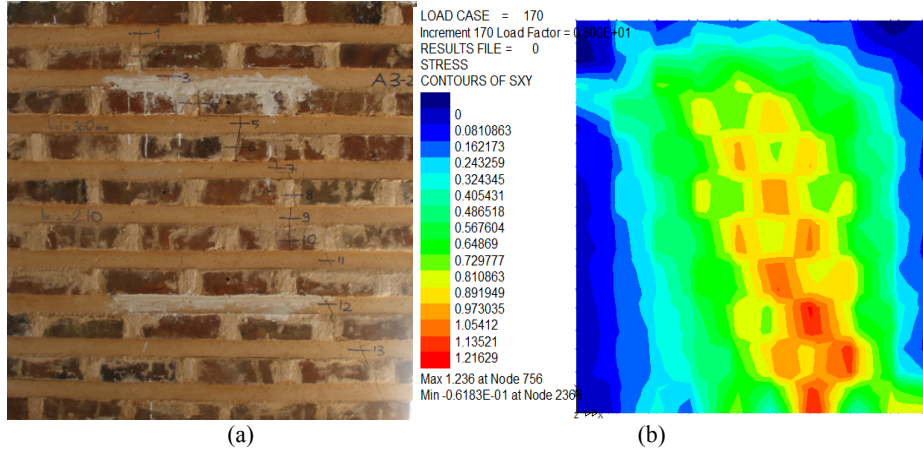
Şekil 3. Deney duvarlarına ait yatay yük – yatay yer değiştirme ilişkileri

A1 harcıyla oluşturulmuş duvarda yük etkileriyle birlikte, yatay yükün uygulandığı noktadan itibaren duvarın alt ucuna kadar devam eden bir diyagonal çatlak gözlenmiştir (Şekil 4a). Bu çatlak figürü yatay yük etkisiyle duvarda oluşan kayma gerilmelerinin birleşim bölgelerinde meydana getireceği kayma şekil değiştirmelerine bağlı olarak oluştuğu söylenebilir (Şekil 4b). Duvarı oluşturan harman tuğlasının basınç dayanımı harç numunesinin basınç dayanımından büyük olduğu için bu çatlaklar düşey ve yatay harç yüzeylerinde yoğunlaşmıştır. Yatay yükün uygulama noktası dikkate alınacak olursa, duvarın sol alt kısmında (mesnetlenme noktası) bir süre sonra çekme gerilmeleri oluşmakta, sağ alt kısmında ise basınç gerilmelerinden dolayı ezilme gözlenmektedir.

A3 harcıyla üretilmiş duvarda A1 harcıyla üretilen duvara göre daha sünek bir davranış gözlenmiştir. Bunun nedeni, A3 harcının hidrolik kireçle birlikte puzolanik aktivitesi yüksek tuğla kırığı birleşiminden oluşmuş olması ve en büyük basınç dayanımına sahip harç numunesi olmasıdır. Oluşan çatlak biçimi diyagonal bir şekilde harç tuğla birleşim yerlerinden ilerlemiştir (Şekil 5).



Şekil 4. a) Deney sonucu mekanizma durumu b) Analiz sonunda oluşan kayma gerilmeleri dağılımları



Şekil 5. a) Deney sonucu mekanizma durumu b) Analiz sonunda oluşan kayma gerilmeleri dağılımları

Sonuç olarak puzolanik aktivitesi yüksek puzolan kullanımının harcın basınç dayanımını 2,1 kat artırdığı ve duvarın sünek davranışına çok büyük etki ettiği görülmüştür. Deneysel sonuçlardan elde edilen malzeme parametreleri ile önerilen modelin tarihi duvarlarda yapılacak sayısal modellemelerde kullanılabilir olması bakımından önemli bir çalışma olduğu düşünülmektedir.

Acknowledgments / Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 1001 Program kodlu 111M568 numaralı projesi ile Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 2013-05-01-DOP01 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Oliver J., Cervera M., Oller S. ve Lubliner J., (1990) Isotropic damage models and smeared crack analysis of concrete, Conference: *II International Conference on Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures*, SCI-C'90, At Zell am See, Austria, 945-958.
- [2] Kozlu H.H., (2010) Kayseri Yöresindeki Tarihi Harçların Karakterizasyonu ve Onarım Harçlarının Özellikleri, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [3] Özen G.Ö., (2006) Comparison of Elastic and Inelastic Behavior of Historic Masonry Structures at the Low Load Levels, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Ankara.
- [4] Price C., (1996) Stone Conservation. An Overview of Current Research. The Getty Conservation Institute, U.S.A.
- [5] Capozucca R., (2011) Experimental analysis of historic masonry walls reinforced by CFRP under in-plane cyclic loading, *Composite Structures* 94, 277–289.
- [6] Koksall H.O. ve Karakoç C., (1999) An isotropic damage model for concrete, *Materials and Structures/Matériaux et Constructions* 32, 611-617.