

## Yığma duvarların mikro modellemesinde harcın çekme dayanımı ve kayma gerilmesi iletim katsayısının etkisi

### *Effect of tensile strength and shear transfer coefficient of the mortar in micro modeling of masonry walls*

Muhammet Karaton<sup>1\*</sup>, Kağan Çanakçı<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, [mkaraton@firat.edu.tr](mailto:mkaraton@firat.edu.tr), <https://orcid.org/0000-0002-1498-4659>

<sup>2</sup> Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, [canakcikagan@gmail.com](mailto:canakcikagan@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-8701-2762>

#### MAKALE BİLGİLERİ

*Makale geçmişi:*

Geliş: 9 Aralık 2019  
Düzeltilme: 7 Ocak 2021  
Kabul: 10 Ocak 2021

*Anahtar kelimeler:*

Eindhoven duvarları, mikro modelleme, yayılı çatlak modeli, harcın basınç dayanımı ve kayma gerilmesi iletim katsayısı.

#### ÖZET

Bu çalışmada, yığma duvarların mikro model ile analizinde 3 boyutlu sabit doğrultulu yayılı çatlak modelinin etkinliği incelenmiştir. Duvarın harç ve tuğla kısımlarının lineer olmayan davranışını hesaplamak için William ve Warnke modelinin özel hali olan üç değişkenli beton modeli kullanılmıştır. Nümerik analizler için Ansys sonlu eleman programı içerisinde bulunan Solid65 beton elemanı seçilmiştir. Nümerik sonuçların karşılaştırılması amacıyla, JD4, JD6 ve JD7 Eindhoven duvarlarının deney sonuçlarından elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi ile oluşan çatlak bölgeleri kullanılmıştır. Harcın çekme dayanımının ve bu bölgenin sonlu eleman modelinde tanımlanan kayma gerilmesi iletim katsayısının nümerik çözümler üzerine olan etkisi incelenmiştir. Yığma yapıların mikro seviye statik itme analizlerinde kullanılması amacıyla harcın çekme dayanımı için bir katsayı ve kayma gerilmesi iletim katsayıları için bazı değerler önerilmiştir.

#### ARTICLE INFO

*Article history:*

Received: 9 December 2019  
Revised: 7 January 2021  
Accepted: 10 January 2021

*Keywords:*

Eindhoven walls, micro modelling, smeared crack model, compressive strength of mortars and shear transfer

#### ABSTRACT

In this study, the effectiveness of 3-dimensional smeared crack model in the micro-model analysis of masonry walls is investigated. The three parameters concrete model which special case of William Warnke model, is used to calculate the nonlinear behavior of mortar and brick regions of the wall. For numerical analysis, Solid65 concrete element in Ansys finite element program is selected. For the comparison of the numerical results, the base shear force-top displacement curve and the fracture zones obtained from the experimental results of the Eindhoven walls which called as JD4, JD6 and JD7, are used. Tensile strength of the mortar and defined shear transfer coefficient in finite element model of mortar region are investigated effect on the numerical solutions. For purpose of using in micro level static pushover analyzes of masonry walls, a coefficient for tensile strength of the mortar, and some values for shear stress transfer coefficients are recommended.

Doi: 10.24012/dumf.656781

\* Sorumlu yazar / Correspondence  
Muhammet KARATON  
✉ [mkaraton@firat.edu.tr](mailto:mkaraton@firat.edu.tr)

## Giriş

Yığma duvarlar, bina inşaatlarında belirli alanların ayrılmasında tercih edilen önemli yapı elemanlarıdır. Yığma duvarlar tuğla/taş ve harçtan meydana geldiği için kompozit bir malzeme davranışına sahiptir. Bu duvarların nümerik olarak modellenmesi farklı malzeme etkileşim ve davranışlarından dolayı karmaşık işlemler gerektirmektedir. Bu nedenle söz konusu yapıların nümerik modellenmesi üzerinde otuz yılı aşan bir süreden beri araştırmalar devam etmektedir. Yığma duvarların nümerik modellenmesi konusunda mikro, basitleştirilmiş mikro ve makro modelleme teknikleri geliştirilmiştir [1]. Mikro ölçekli analizlerde yığma birimler ayrı ayrı modellenmektedir. Basitleştirilmiş mikro modelde ise tuğla/taş ile harç arasında yer alan ara yüzey bölgesi sonlu elemanlarla, diğer kısımlar ise rijit veya şekil değiştirebilen ayırık elemanlarla modellenmektedir. Makro modelleme tekniğinde ise tuğla/taş ve harç eşdeğer bir malzemeye dönüştürülmektedir [1].

Yığma duvarların mikro ölçekli analizlerinde birçok araştırma yapılmış olup bunlar içerisinde, Adam ve ark. [2], sonlu elemanlar yöntemi ile bir mikro mekanik model geliştirmişlerdir. Sonlu eleman modelinde harç ve tuğla, katı eleman olarak bu iki ortamın ara yüzü ise ara yüzey elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Katı elemanların doğrusal olmayan davranışları için sabit doğrultulu yayılı çatlak modelini kullanmışlardır. Doğrusal olmayan nümerik analiz sonuçları ile deney sonuçları yük-yer değiştirme ve eğilme momenti-dönme tepkileri açısından karşılaştırılmıştır. Mohyeddin ve ark. [3], üç boyutlu ayırık sonlu elemanlar kullanarak yığma duvar ile doldurulmuş betonarme çerçevelerin analizlerini elde etmişlerdir. Çözümlerinde, Ansys sonlu elemanlar programını kullanmışlardır. Harç ve tuğla bölgelerinin doğrusal olmayan davranışları için sabit doğrultulu yayılı çatlak modelini kullanmışlardır. Bu modelin etkinliğini incelemek amacıyla literatürde yer alan deneysel verilerden yararlanmışlardır. Modelin düzlem içi ve düzlem dışı yüklenme durumlarında, dolgu çerçeve üzerindeki etkisini doğru bir şekilde yansıttığını göstermişlerdir. Petracca ve ark. [4]

yığma duvarların analizi için yeni bir hasar mekaniği tabanlı sürekli ortama ait mikro model sunmuşlardır. Bu modeli literatürde yer alan ayırık mikro modelleme yöntemleriyle karşılaştırmışlardır. Zucchini ve Lourenço [5], yığma duvarların, doğrusal olmayan analizi için bir mikro mekanik model geliştirmişlerdir ve Vermeltfoort ile Raijmakers [6]' ın yığma duvarlar için yaptıkları deney sonuçlarını kullanarak modelin doğrulamasını yapmışlardır. Chaimoon ve Attard [7], donatısız yığma duvarların, kesme ve basınç yüklemeleri altındaki doğrusal olmayan davranışını analiz etmek için bir model sundular ve bu modelin doğrulamasını yapmak amacıyla Vermeltfoort ve ark. [8]' nın yığma duvarlar için yaptıkları deney sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır.

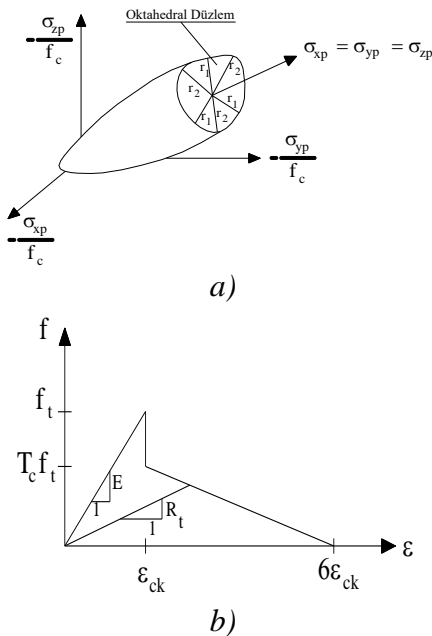
Yukarıda verilen literatür incelemesinden yığma duvarların nümerik analizlerinde kırılma ve hasar mekaniği teorilerinden faydalandığı görülmektedir. Yığma duvarların mikro ölçekli analizlerinde sabit doğrultulu yayılı çatlak modeli en yaygın olarak kullanılan modellerden biridir. Bu sebepten yığma yapıların mikro ölçekli analizlerinde söz konusu metodun nümerik çözümler üzerindeki etkinliğinin incelenmesi önem arz etmektedir. Birçok araştırmacı Eindhoven duvarı deney sonuçlarından elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri ve çatlak geometrisini elde etmek için makro ve mikro modelleme tekniklerini kullanarak incelemeler yapmışlardır. [9] Bu nedenle nümerik sonuçları karşılaştırmak amacıyla Eindhoven duvarı deney sonuçlarından elde edilen deney verileri kullanılmıştır.

Bu çalışmada, yığma duvarların mikro model ile analizinde JD4, JD6 ve JD7 Eindhoven duvarlarının [6] 3 boyutlu sabit doğrultulu yayılı çatlak yaklaşımı ile doğrusal olmayan statik itme analizleri yapılmıştır. Duvarın harç ve tuğla kısımlarının lineer olmayan davranışını hesaplamak için William ve Warnke modelinin özel bir hali olan üç değişkenli beton modeli kullanılmıştır. Nümerik analizler için Ansys sonlu eleman programı içerisinde bulunan Solid65 beton elemanı seçilmiştir. Bu model yığma duvarların nümerik modellenmesinde yaygın olarak kullanılmıştır [1-3]. Tüm bu

sebeplerden bu çalışmada mikro seviye modelde kullanılan harcın çekme dayanımının ve kayma gerilmesi iletim katsayısının nümerik çözümler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Eindhoven duvarlarının deney sonuçlarından elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi ile oluşan çatlak bölgeleri nümerik sonuçlarla karşılaştırılarak yöntemin etkinliği incelenmiştir.

### William-Warkne modeli

Bu çalışmada, William ve Warnke [10], modelinin özel hali olan üç değişkenli beton modeli kullanılmıştır. Üç değişkenli model William tarafından geliştirilmiş olup, düşük basınç altında çekmeye maruz kesitlerdeki beton için göçme yüzeyini tanımlamaktadır. Zeinkiewicz ve Taylor [11], beton gibi gevrek özelliğe sahip malzemeler için bu malzeme modelinin kullanılabilirliğini ortaya koymuşlardır.



Şekil 1. Üç parametrelili model için a) göçme yüzeyi ve b) tek eksenli gerilme-şekil değiştirme bağıntısı [9].

William-Warnke' nin beton göçme yüzeyi modeli yığma yapıların geniş çapta modellenmesinde etkin bir şekilde kullanılmıştır [12]. Bu model, Şekil 1.a' da görüldüğü gibi kesiti konveks olan bir koniye yakın görünüme sahiptir. Konveks kesit, simetrik ve düzgün

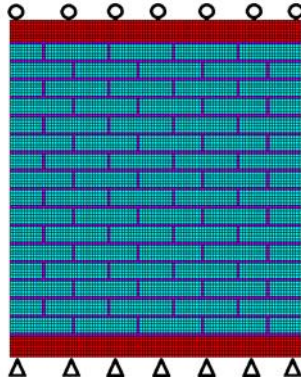
yapıdadır. Burada,  $\sigma_{xp}$ ,  $\sigma_{yp}$  ve  $\sigma_{zp}$  birbirlerine dik asal gerilmeleri,  $f_c$  ise malzemenin tek eksenli basınç dayanımını belirtmektedir. Aynı zamanda, von Mises veya Drucker-Prager yaklaşımları bu modelin özel bir durumu olarak belirlenebilir [13]. Bu modelde, göçme yüzeyi içerisinde kalan gerilme değerleri elde edildiğinde malzeme doğrusal elastik davranış göstermektedir. Göçme yüzeyinin dışına çıkılan gerilme değerleri elde edildiğinde ise malzemede çatlama ve ezilmelerin ortaya çıkacağı ifade edilmektedir. Malzemede ortaya çıkan çatlaklar gerilme yumuşaması (stress softening) olarak dikkate alınmaktadır (Şekil 1.b).

### JD4, JD6 ve JD7 Eindhoven yığma duvarlarının mikro model analizi

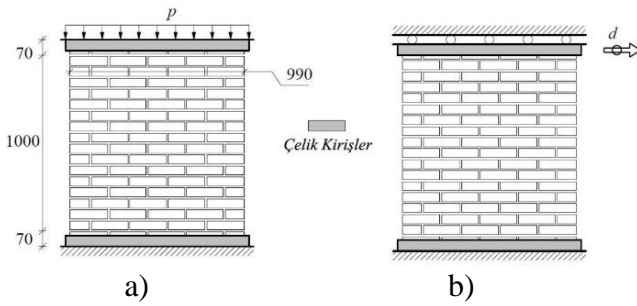
Bu çalışmada, JD4, JD6 ve JD7 Eindhoven yığma duvarlarının mikro ölçekli modeli kullanılarak doğrusal olmayan statik itme analizleri yapılmıştır. Bu duvarların boyutları  $990 \times 1000 \times 100$  mm olup  $210 \times 52 \times 100$  mm ölçülerinde sahip tuğlalar ile harç kalınlığı 10 mm olacak şekilde 16 sıra tuğla-harç kullanılarak inşa edilmiştir. Modelin en üst ve en altında 2 sıra çelik kiriş yer almaktadır. Deneysel çalışmada, ön yükleme olarak üst kirişe düşey bir tekil yük uygulanmış olup sonraki yükleme adımında ise aynı kirişe yatay yer değiştirme yükü uygulanarak duvarın kuvvet-yer değiştirme grafiği ile çatlak bölgeleri elde edilmiştir. Söz konusu bu ön yükleme durumu 30, 120 ve 210 kN olarak uygulanmış ve Eindhoven yığma duvarları sırasıyla JD4, JD6 ve JD7 olarak adlandırılmıştır.[6]. Bu duvarlar arasındaki tek fark toplam düşey yüküdür.

Bu modelde harç ve tuğla için ayrı ayrı malzeme özellikleri tanımlanmış olup malzemeler arası bağlantının rijit olduğu kabul edilmiş ve herhangi bir ara yüzey elemanı kullanılmamıştır. Çözümler için Ansys sonlu eleman programı kullanılmıştır. Sayısal modelde 33600 adet düğüm noktası ve 21978 adet üç boyutlu katı sonlu eleman kullanılmıştır (Şekil 2). Duvarın tabanındaki çelik kirişlerin alt yüzeyi yatay ve düşey doğrultularda tutulu, üstteki çelik kirişin üst yüzeyi ise sadece düşey doğrultuda tutulu

olacak şekilde sınır şartları uygulanmıştır (Şekil 3).



Şekil 2. Eindhoven duvarlarının sonlu elemanlar modeli ve sınır şartları.



Şekil 3. Eindhoven duvarlarının düşey ve yatay yükleme durumları.

Bu çalışmada, Eindhoven yığma duvarlarının mikro modelleme ile doğrusal olmayan statik itme analizlerinde; harçın çekme dayanımının ve kayma gerilmesi iletim katsayısı  $\beta_t$ 'nin çözümler üzerine olan etkisi incelenmiştir. Tuğla ve harç malzemelerinin elastik ve elastik olmayan malzeme özellikleri Hemant ve ark. [14]'nin önerdiği eşitlikler yardımıyla belirlenmiştir. Bu araştırmada tuğla malzemesinin elastisite modülü,

$$E_b = 300 f_{b,c} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada  $f_{b,c}$  tuğlanın tek eksenli basınç dayanımını göstermektedir. Tuğla malzemesinin tek eksenli çekme dayanımı  $f_{b,t}$  ise,

$$f_{b,t} = f_{b,c} / 25 \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. Harç malzemesinin elastisite modülü ise,

$$E_m = 200 f_{m,c} \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

### Harçın çekme dayanımının çözümler üzerindeki etkisi

Bu bölümde JD4, JD6 ve JD7 Eindhoven duvarlarında kullanılan harçın çekme dayanımının, yığma duvarın nümerik analizleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. JD4, JD6 ve JD7 Eindhoven duvarları için harçın tek eksenli basınç dayanımı 10 MPa olarak seçilmiş olup [14] harçın elastisite modülü değerleri (3) denklemi yardımıyla hesaplanmıştır. Harçın tek eksenli çekme dayanım ( $f_{m,t}$ ) değerleri ise sırasıyla 1/25, 1/20, 1/15, 1/10 ve 1/5 katsayıları kullanılarak hesaplanmış olup Tablo 1' de verilmiştir [14]. Tablo 2' de ise söz konusu duvarların tuğla malzemesine ait malzeme özellikleri görülmektedir. Kayma gerilmesi iletim katsayıları ise her iki malzeme de aynı değerlere sahip olduğu kabul edilmiş olup çatlağın açık ve kapalı durumları için sırasıyla 0.05 ve 0.90 olarak dikkate alınmıştır.

Tablo 1. JD4, JD6, JD7 Eindhoven duvarları harç malzeme özellikleri.

	M1	M2	M3	M4	M5
$E_m$	2000	2000	2000	2000	2000
$f_{m,c}$	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
$f_{m,t}$	0.40	0.50	0.67	1.00	2.00

Tablo 2. JD4, JD6, JD7 Eindhoven duvarları tuğla malzeme özellikleri.

	JD4	JD6	JD7
$E_b$	3750	9000	16500
$f_{b,c}$	12.50	30.00	55.00
$f_{b,t}$	0.50	1.20	2.20

JD4 duvarının deney sonuçlarından maksimum taban kesme kuvveti 50.30 kN olarak belirlenmiştir. Nümerik analizlerden hesaplanan taban kesme kuvveti değerleri ise JD4-M1, JD4-

M2, JD4-M3, JD4-M4 ve JD4-M5 için sırasıyla 50.50, 50.21, 43.41, 52.34 ve 59.11 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 4). Hesaplanan maksimum taban kesme kuvveti değerleri, deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında; JD4-M1, JD4-M2, JD4-M3, JD4-M4 ve JD4-M5 için sırasıyla %0.45, %0.13, %13.65, %4.11 ve %17.5 oranlarında farkların olduğu belirlenmiştir. Bu değerler dikkate alındığında en az farkın JD4-M2 için hesaplandığı görülmektedir.

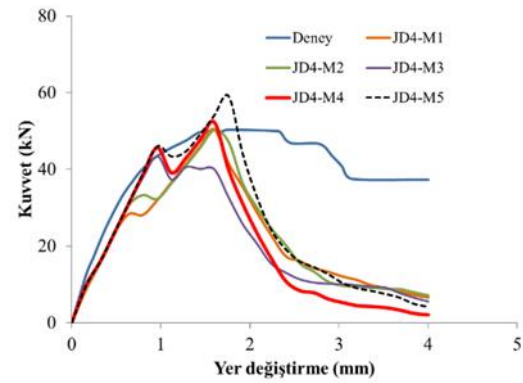
JD4 duvarının deney sonuçlarından maksimum yükün olduğu andaki duvarın tepe yer değiştirme değeri (eşik yer değiştirme) 1.74 mm olarak belirlenmiştir. Nümerik analizlerde ise bu yer değiştirme değeri, JD4-M1, JD4-M2, JD4-M3, JD4-M4 ve JD4-M5 için sırasıyla 1.60, 1.60, 0.96, 1.60 ve 1.76 mm olarak elde edilmiştir. Bu yer değiştirme değerleri deney sonucuyla karşılaştırıldığında, JD4-M1, JD4-M2, JD4-M3, JD4-M4 ve JD4-M5'in nümerik sonuçları ile deney sonucu arasında sırasıyla %8.05, %8.05, %44.83, %8.05 ve %1.15 oranlarında farklar elde edilmiştir. Bu farklar içerisinde en küçük değer JD4-M5 çözümünden hesaplanmıştır. Ancak, taban kesme kuvvetleri arasındaki farklar dikkate alındığında en büyük farkın bu çözüm için elde edildiği görülmektedir. Bu nedenle en uygun çözümün JD4-M2 için elde edildiği kabul edilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. JD4 duvarı için harcın dayanım değeri değişiminin deney ve nümerik sonuçlar arasındaki farklar üzerindeki etkisi.

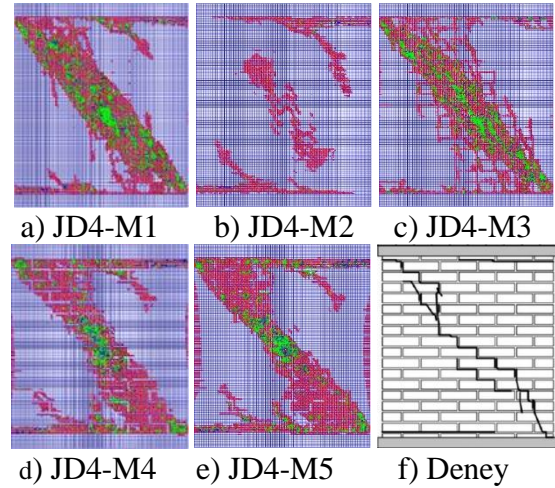
Duvar Adı	Maks. Taban Kesme Kuv. (% fark)	Eşik yer değiştirme (% fark)
JD4-M1	0.45	8.05
JD4-M2	<b>0.13</b>	<b>8.05</b>
JD4-M3	13.65	44.83
JD4-M4	4.11	8.05
JD4-M5	17.5	1.15

JD4-M1, JD4-M2, JD4-M3, JD4-M4 ve JD4-M5 için tepe yer değiştirme değerlerinin sırasıyla 1.60, 1.60, 0.96, 1.60 ve 1.76 mm'ye ulaştığı anlarda JD4 duvarında oluşan çatlak bölgeleri ve deneyden elde edilen çatlak bölgeleri Şekil 5' de görülmektedir. Tüm çözümlerde çatlak bölgeleri

JD4 duvarının sağ üst köşesinden başlayıp sola doğru ve sol alt köşesinden başlayıp sağa doğru yatay olarak ilerleyen iki bölge şeklinde elde edilmiştir. İlerleyen yükleme adımlarında JD4-M2 çözümü hariç sol üst köşeden sağ alt köşeye doğru ilerleyen diyagonal bir çatlak bölgesi daha meydana gelmiştir. JD4-M2 çözümünde ise bu diyagonal çatlak bölgesi sadece duvar orta bölgesinde yer almıştır. Üst ve alt kısımlarda elde edilen çatlak bölgeleri bu çatlak bölgesi etrafında dönerek ilerleyen bir forma geçiş yapmıştır. Bu durum JD4-M1, JD4-M4 ve JD4-M5 çözümlerinde de görülmektedir.



Şekil 4. JD4 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

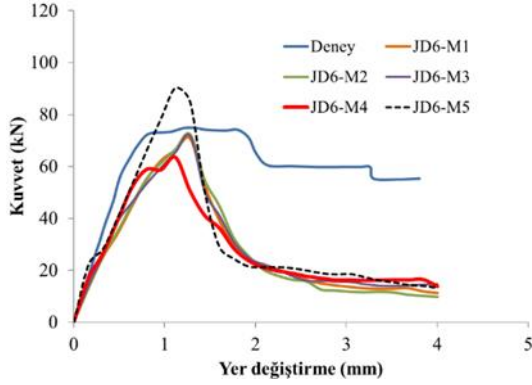


Şekil 5. JD4 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen çatlak bölgeleri.

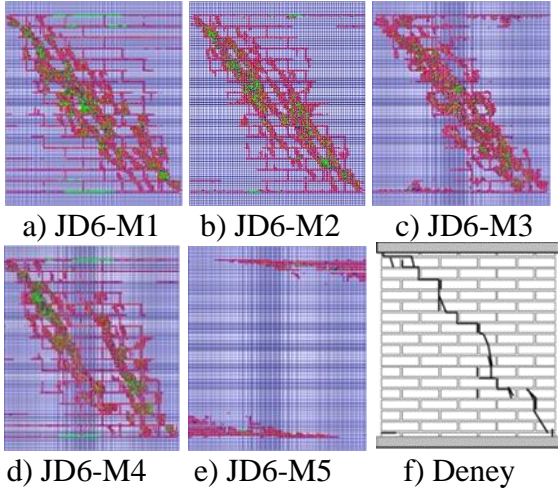
JD6 duvarının deney sonuçlarından maksimum taban kesme kuvveti 74.87 kN olarak elde edilmiştir. Nümerik analizlerden hesaplanan taban kesme kuvveti değerleri ise JD6-M1, JD6-M2, JD6-M3, JD6-M4 ve JD6-M5 için sırasıyla



70.78, 72.46, 71.70, 63.49 ve 90.33 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. JD6 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.



Şekil 7. JD6 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen çatlak bölgeleri.

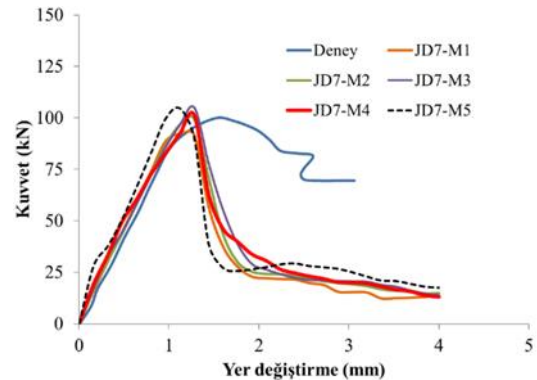
Tablo 4. JD6 duvarı için harcın dayanım değeri değişiminin deney ve nümerik sonuçlar arasındaki farklar üzerindeki etkisi.

Duvar Adı	Maks. Taban Kesme Kuv. (% fark)	Eşik yer değiştirme (% fark)
JD6-M1	5.46	4.92
JD6-M2	3.22	4.92
JD6-M3	4.24	4.92
JD6-M4	15.20	8.20
JD6-M5	20.65	8.20

Nümerik sonuçlarda elde edilen maksimum taban kesme kuvveti değerleri deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında; JD6-M1, JD6-M2, JD6-M3, JD6-M4 ve JD6-M5 için sırasıyla

%5.46, %3.22, %4.24, %15.20 ve %20.65 oranlarında farkların olduğu belirlenmiş olup en az fark JD6-M2 için hesaplanmıştır. JD6 duvarının deney sonuçlarından maksimum yükün olduğu andaki duvarın tepe yer değiştirme değeri, 1.22 mm olarak belirlenmiştir. Nümerik analizlerde ise bu yer değiştirme değeri, JD6-M1, JD6-M2, JD6-M3, JD6-M4 ve JD6-M5 için sırasıyla 1.28, 1.28, 1.28, 1.12 ve 1.12 mm olarak hesaplanmıştır. Deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında bu yer değiştirme değerleri deney sonuçlarına göre sırasıyla %4.92, %4.92, %4.92, %8.20 ve %8.20 oranlarında farklar elde edilmiştir. Taban kesme kuvveti ve tepe yer değiştirme değerleri dikkate alındığında her iki büyüklük için en az fark JD6-M2 çözümünden elde edilmiştir (Tablo 4).

JD6-M1, JD6-M2, JD6-M3, JD6-M4 ve JD6-M5 için tepe yer değiştirme değerlerinin sırasıyla 1.28, 1.28, 1.28, 1.12 ve 1.12 mm'ye ulaştığı anlarda JD6 duvarında oluşan çatlak bölgeleri ve deneyden elde edilen çatlak bölgeleri Şekil 7' de görülmektedir. Tüm nümerik çözümlerde çatlak bölgeleri JD6 duvarının sağ üst köşesinden başlayıp sola doğru ve sol alt köşesinden başlayıp sağa doğru yatay olarak ilerleyen iki bölge şeklinde elde edilmiştir. İlerleyen yüklemelerde JD6-M5 çözümü hariç, sol üst köşeden sağ alt köşeye doğru ilerleyen diyagonal bir çatlak bölgesi daha meydana gelmiştir. JD6-M4 çözümünde elde edilen bu diyagonal çatlak bölgesi ise iki parça şeklinde elde edilmiştir.

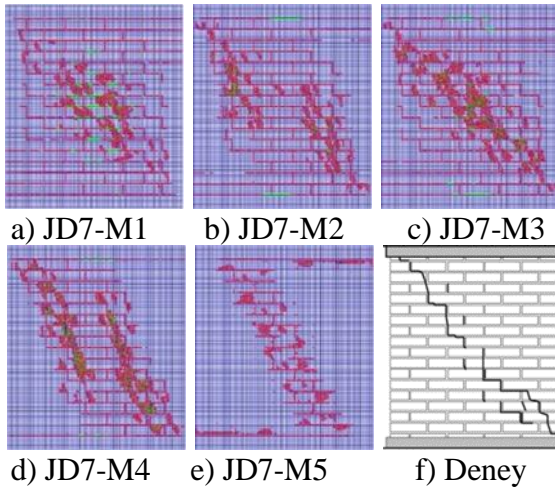


Şekil 8. JD7 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

JD7 duvarının deney sonuçlarından maksimum taban kesme kuvveti 100.17 kN olarak

belirlenmiştir. Nümerik analizlerden hesaplanan taban kesme kuvveti değerleri ise JD7-M1, JD7-M2, JD7-M3, JD7-M4 ve JD7-M5 için sırasıyla 93.38, 99.62, 104.98, 101.32 ve 104.70 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 8). Hesaplanan maksimum taban kesme kuvveti değerleri deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında; JD7-M1, JD7-M2, JD7-M3, JD7-M4 ve JD7-M5 için sırasıyla %7.78, %0.55, %4.80, %1.15 ve %4.52 oranlarında farkların olduğu belirlenmiştir. Bu değerler dikkate alındığında en az fark JD7-M2 için hesaplandığı görülmektedir. JD7 duvarının deney sonuçlarından maksimum yükün olduğu andaki duvarın tepe yer değiştirme değeri 1.56 mm olarak belirlenmiştir. Nümerik analizlerde ise bu yer değiştirme değeri, JD7-M1, JD7-M2, JD7-M3, JD7-M4 ve JD7-M5 için sırasıyla 1.12, 1.28, 1.28, 1.28 ve 1.12 mm olarak elde edilmiştir. Bu yer değiştirme değerleri deney sonucuyla karşılaştırıldığında; deney sonucuna göre sırasıyla %28.20, %17.95, %17.95, %17.95 ve %28.20 oranlarında farklar elde edilmiştir. Taban kesme kuvveti ve tepe yer değiştirme değerleri dikkate alındığında her iki büyüklük için en az fark JD7-M2 çözümünden elde edilmiştir (Tablo 5).

JD7-M1, JD7-M2, JD7-M3, JD7-M4 ve JD7-M5 için tepe yer değiştirme değerlerinin sırasıyla 1.12, 1.28, 1.28, 1.28 ve 1.12 mm'ye ulaştığı anlarda JD7 duvarında oluşan çatlak bölgeleri ve deneyden elde edilen çatlak bölgeleri Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 9. JD7 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen çatlak bölgeleri.

Tüm çözümlerde çatlak bölgeleri JD7 duvarının sağ üst köşesinden başlayıp sola doğru ve sol alt köşesinden başlayıp sağa doğru yatay olarak ilerleyen iki bölge şeklinde elde edilmiştir. İlerleyen yükleme adımlarında tüm çözümler için sol üst köşeden sağ alt köşeye doğru ilerleyen diyagonal bir çatlak bölgesi daha meydana gelmiştir. Bu çatlak bölgesi JD7-M5 çözümü haricindeki tüm çözümlerde dağınık bir formda oluşmuştur. Aynı zamanda JD7-M4 çözümünde elde edilen bu diyagonal çatlak bölgesi iki parça şeklinde elde edilmiştir.

Tablo 5. JD7 duvarı için harcın dayanım değeri değişiminin deney ve nümerik sonuçlar arasındaki farklar üzerindeki etkisi.

Duvar Adı	Maks. Taban Kesme Kuv. (% fark)	Eşik yer değiştirme (% fark)
JD7-M1	7.78	28.20
JD7-M2	<b>0.55</b>	<b>17.95</b>
JD7-M3	4.80	17.95
JD7-M4	1.15	17.95
JD7-M5	4.52	28.20

Bu bölümde harcın çekme dayanımı üzerine yapılan nümerik analizler dikkate alındığında, William-Warnke beton modeli için harcın çekme dayanımının 1/20 katsayısı kullanılarak hesaplanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

#### Harcın $\beta_1$ katsayısının çözümler üzerindeki etkisi

Bu bölümde JD4, JD6 ve JD7 Eindhoven duvarlarının nümerik çözümlerinde, harc malzemesine ait katsayısının çözümler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Harcın kayma gerilmesi iletim katsayıları; çatlakın kapalı durumu için 0.90 seçilmiş olup çatlakın açık durumu için sırasıyla 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 değerlerinde seçilmiştir. Seçilen bu katsayılar göre adlandırılan duvarlar Tablo 6'da görülmektedir. Tuğlanın kayma gerilmesi iletim katsayıları ise çatlakın açık ve kapalı durumları için sırasıyla 0.05 ve 0.90 olarak alınmıştır. Çözümlerde, tuğla malzemesinin mekanik özellikleri için Tablo 1'de JD4-M2, JD6-M2 ve

JD7-M2 çözümleri için verilen değerler kullanılmıştır.

Tablo 6. Çatlağın açık durumuna göre isimlendirilen Eindhoven duvarları.

	JD4	JD6	JD7
0.01	JD4-MBT1	JD6-MBT1	JD7-MBT1
0.05	JD4-MBT2	JD6-MBT2	JD7-MBT2
0.1	JD4-MBT3	JD6-MBT3	JD7-MBT3
0.2	JD4-MBT4	JD6-MBT4	JD7-MBT4
0.3	JD4-MBT5	JD4-MBT5	JD7-MBT5

JD4 duvarının deney sonuçlarından maksimum taban kesme kuvveti 50.30 kN olarak belirlenmiştir. Nümerik analizlerden hesaplanan taban kesme kuvveti değerleri ise JD4-MBT1, JD4-MBT2, JD4-MBT3, JD4-MBT4 ve JD4-MBT5 için sırasıyla 37.20, 50.21, 51.85, 51.45 ve 57.00 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 10). Hesaplanan maksimum taban kesme kuvveti değerleri deney sonucuyla karşılaştırıldığında; JD4-MBT1, JD4-MBT2, JD4-MBT3, JD4-MBT4 ve JD4-MBT5 için sırasıyla %25.97, %0.13, %3.15, %2.34 ve %13.58 oranlarında farkların olduğu belirlenmiştir. Bu değerler dikkate alındığında en az farkın JD4-MBT2 çözümünden hesaplandığı görülmektedir.

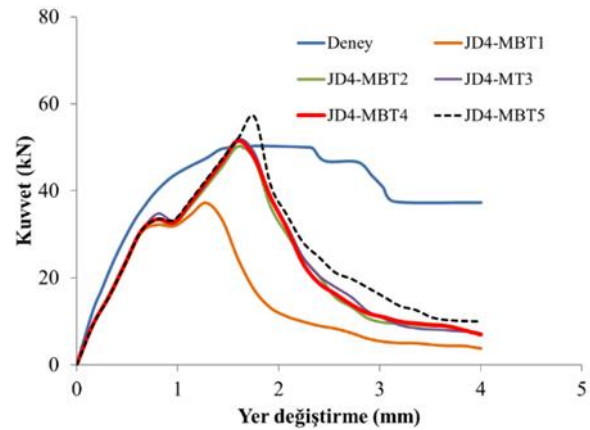
JD4 duvarının deney sonuçlarından maksimum yükün olduğu andaki duvarın tepe yer değiştirme değeri 1.74 mm olarak belirlenmiştir. Nümerik analizlerde ise bu yer değiştirme değeri, JD4-MBT1, JD4-MBT2, JD4-MBT3, JD4-MBT4 ve JD4-MBT5 için sırasıyla 1.28, 1.60, 1.60, 1.60 ve 1.76 mm olarak elde edilmiştir. Bu yer değiştirme değerleri deney sonucuyla karşılaştırıldığında sırasıyla %27.27, %8.05, %8.05, %8.05 ve %1.15 oranlarında farklar elde edilmiştir. Bu farklar içerisinde en küçük değer JD4-MBT5 çözümünden hesaplanmıştır. Ancak, deney sonuçlarından ve nümerik çözümlerden elde edilen maksimum taban kesme kuvveti değerleri arasındaki farklar dikkate alındığında en büyük farkın bu çözüm için elde edildiği görülmektedir. Bu nedenle en uygun çözümün JD4-MBT2 için olduğu kabul edilmiştir (Tablo 7).

JD4-MBT1, JD4-MBT2, JD4-MBT3, JD4-MBT4 ve JD4-MBT5 için tepe yer değiştirme değerlerinin sırasıyla 1.28, 1.60, 1.60, 1.60 ve 1.76 mm' ye ulaştığı anlarda JD4 duvarında oluşan çatlak bölgeleri ve deneyden elde edilen çatlak bölgeleri Şekil 11' de görülmektedir.

Tüm çözümlerde çatlak bölgeleri, JD4 duvarının sağ üst köşesinden başlayıp sola doğru ve sol alt köşesinden başlayıp sağa doğru yatay olarak ilerleyen iki bölge şeklinde elde edilmiştir. İlerleyen yüklemelerinde sol üst köşeden sağ alt köşeye doğru ilerleyen diyagonal bir çatlak bölgesi daha meydana gelmiştir. Taban kesme kuvveti ve tepe yer değiştirme değerleri için en uygun çözüm olan JD4-MBT2' in hasar bölgesi deneyden elde edilen çatlak yörüngesine benzer bölgelerde meydana gelmiş olup çok dağınık bir formda elde edilmiştir.

Tablo 7. JD4 duvarı için harcın  $\beta_t$  katsayısı değişiminin deney ve nümerik sonuçlar arasındaki farklar üzerindeki etkisi.

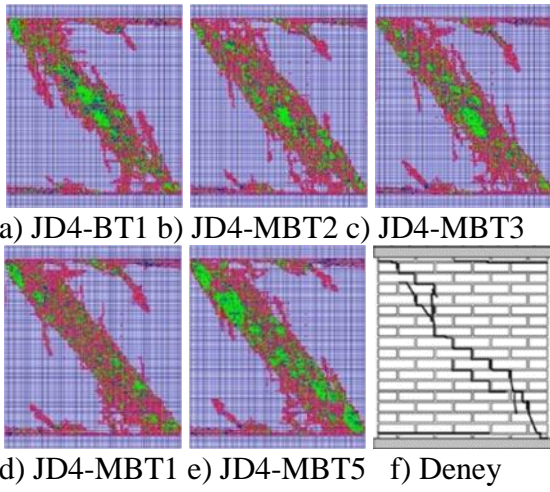
Duvar Adı	Maks. Taban Kesme Kuv. (% fark)	Eşik yer değiştirme (% fark)
JD4-MBT1	25.97	27.27
JD4-MBT2	<b>0.13</b>	<b>8.05</b>
JD4-MBT3	3.15	8.05
JD4-MBT4	2.34	8.05
JD4-MBT5	13.58	1.15



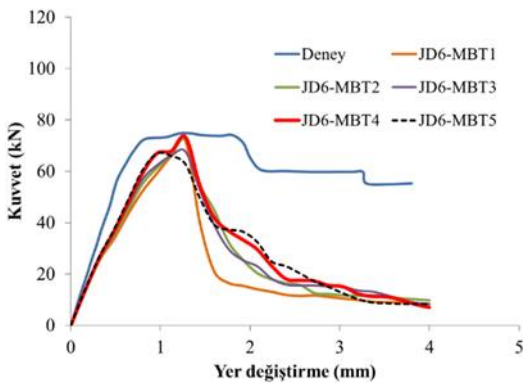
Şekil 10. JD4 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.



JD6 duvarının deney sonuçlarından maksimum taban kesme kuvveti 74.87 kN olarak elde edilmiştir. Nümerik analizlerden hesaplanan taban kesme kuvveti değerleri ise JD6-MBT1, JD6-MBT2, JD6-MBT3, JD6-MBT4 ve JD6-MBT5 için sırasıyla 71.79, 72.46, 67.67, 73.35 ve 66.94 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 12). Hesaplanan maksimum taban kesme kuvveti değerleri deney sonucuyla karşılaştırıldığında; JD6-MBT1, JD6-MBT2, JD6-MBT3, JD6-MBT4 ve JD6-MBT5 için sırasıyla %4.11, %3.22, %9.62, %2.02 ve %10.60 oranlarında farkların oluştuğu belirlenmiş olup en az fark JD6-MBT4 için hesaplanmıştır.



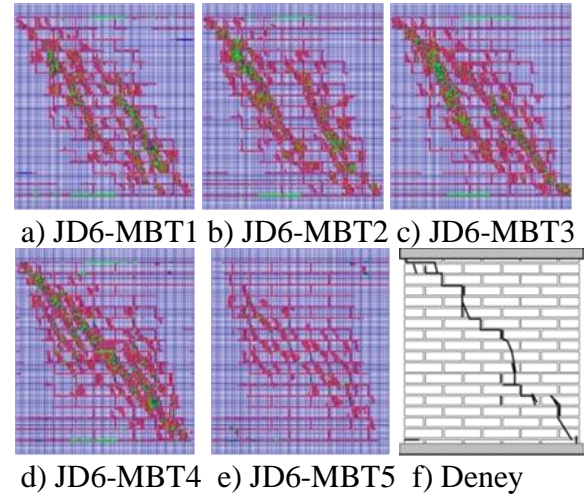
Şekil 11. JD4 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen çatlak bölgeleri.



Şekil 12. JD6 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

JD6 duvarının deney sonuçlarından maksimum yükün oluştuğu andaki duvarın tepe yer değiştirme değeri, 1.22 mm olarak belirlenmiştir. Nümerik analizlerde ise bu yer değiştirme

değeri, JD6-MBT1, JD6-MBT2, JD6-MBT3, JD6-MBT4 ve JD6-MBT5 için sırasıyla 1.28, 1.28, 1.28, 1.28 ve 0.96 mm olarak hesaplanmıştır. Bu yer değiştirme değerleri deney sonucuyla karşılaştırıldığında JD6-MBT1, JD6-MBT2, JD6-MBT3, JD6-MBT4 ve JD6-MBT5 çözümleri için sırasıyla %4.92, %4.92, %4.92, %4.92 ve %21.31 oranlarında farkların olduğu belirlenmiştir. Taban kesme kuvveti ve tepe yer değiştirme değerleri dikkate alındığında her iki büyüklük için en az fark, JD6-MBT4 çözümünden elde edilmiştir (Tablo 8).



Şekil 13. JD6 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen çatlak bölgeleri.

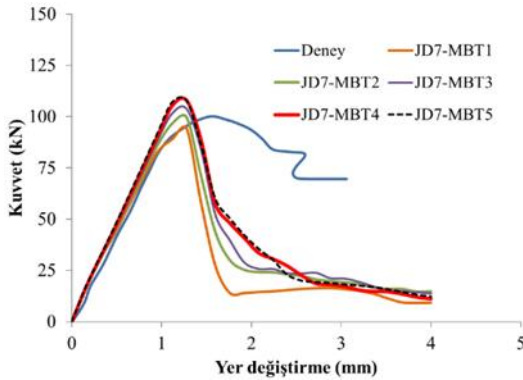
Tablo 8. JD6 duvarı için harcın  $\beta_1$  katsayısı değişiminin deney ve nümerik sonuçlar arasındaki farklar üzerindeki etkisi.

Duvar Adı	Maks. Taban Kesme Kuv. (% fark)	Eşik yer değiştirme (% fark)
JD6-MBT1	4.11	4.92
JD6-MBT2	3.22	4.92
JD6-MBT3	9.62	4.92
JD6-MBT4	<b>2.02</b>	<b>4.92</b>
JD6-MBT5	10.60	21.31

JD6-MBT1, JD6-MBT2, JD6-MBT3, JD6-MBT4 ve JD6-MBT5 için tepe yer değiştirme değerlerinin sırasıyla 1.28, 1.28, 1.28, 1.28 ve 0.96 mm'ye ulaştığı anlarda JD6 duvarında oluşan çatlak bölgeleri ve deneyden elde edilen çatlak bölgeleri Şekil 13' de görülmektedir. Tüm

çözümlerde çatlak bölgeleri JD6 duvarının sağ üst köşesinden başlayıp sola doğru ve sol alt köşesinden başlayıp sağa doğru yatay olarak ilerleyen iki bölge şeklinde elde edilmiştir. İlerleyen yükleme adımlarında, JD6-MBT1, JD6-MBT2 ve JD6-MBT3 çözümlerinden elde edilen bu diyagonal çatlak bölgesi iki parça şeklinde elde edilmiştir. Bu çatlak bölgesi, JD6-MBT4 ve JD6-MBT5 çözümlerinde ise dağınık bir formda ortaya çıkmıştır.

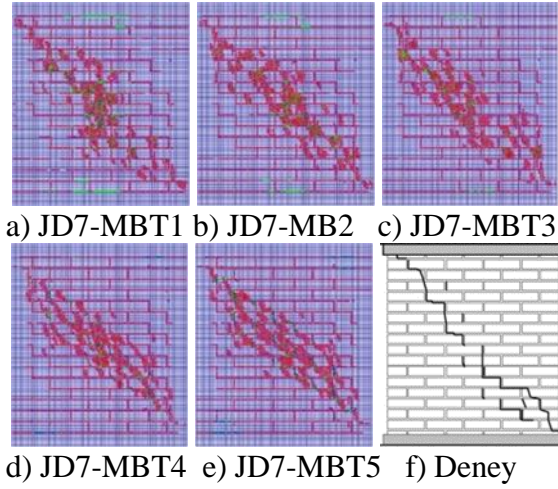
JD7 duvarının deney sonuçlarından maksimum taban kesme kuvveti 100.17 kN olarak belirlenmiştir. Nümerik analizlerden hesaplanan taban kesme kuvveti değerleri ise JD7-MBT1, JD7-MBT2, JD7-MBT3, JD7-MBT4 ve JD7-MBT5 için sırasıyla 94.00, 99.63, 103.81, 107.83 ve 107.76 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 14). Hesaplanan maksimum taban kesme kuvveti değerleri deney sonucuyla karşılaştırıldığında; JD7-MBT1, JD7-MBT2, JD7-MBT3, JD7-MBT4 ve JD7-MBT5 için sırasıyla %6.16, %0.55, %3.63, %7.65 ve %7.58 oranlarında farkların oluştuğu belirlenmiştir. Bu değerler dikkate alındığında en az fark, JD7-MBT2 için hesaplandığı görülmektedir.



Şekil 14. JD7 Eindhoven duvarının deney ve nümerik çözümlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri.

JD7 duvarının deney sonuçlarından maksimum yükün oluştuğu andaki duvarın tepe yer değiştirme değeri 1.56 mm olarak belirlenmiştir. Nümerik analizlerde ise bu yer değiştirme değeri, JD7-MBT1, JD7-MBT2, JD7-MBT3, JD7-MBT4 ve JD7-MBT5 çözümlerinin tamamında 1.28 mm olarak hesaplanmıştır. Bu yer değiştirme değeri deney sonucuyla karşılaştırıldığında %17.95 oranında daha küçük

olarak elde edilmiştir. Taban kesme kuvveti ve tepe yer değiştirme değerleri dikkate alındığında her iki büyüklük için en az fark JD7-MBT2 çözümünden elde edilmiştir (Tablo 9).



Şekil 15. JD7 Eindhoven duvarının deneysel ve nümerik çözümlerden elde edilen çatlak bölgeleri.

JD7-MBT1, JD7-MBT2, JD7-MBT3, JD7-MBT4 ve JD7-MBT5 için tepe yer değiştirme değerinin 1.28 mm'ye ulaştığı anlarda JD7 duvarında oluşan çatlak bölgeleri ve deneyden elde edilen çatlak bölgeleri Şekil 15'de görülmektedir. Tüm çözümlerde çatlak bölgeleri JD7 duvarının sağ üst köşesinden başlayıp sola doğru ve sol alt köşesinden başlayıp sağa doğru ilerleyen iki bölge şeklinde elde edilmiştir. İlerleyen yükleme adımlarında sol üst köşeden sağ alt köşeye doğru ilerleyen diyagonal bir çatlak bölgesi daha meydana gelmiştir.

Tablo 9. JD6 duvarı için harcın  $\beta_1$  katsayısı değişiminin deney ve nümerik sonuçlar arasındaki farklar üzerindeki etkisi.

Duvar Adı	Maks. Taban Kesme Kuv. (% fark)	Eşik yer değiştirme (% fark)
JD7-MBT1	6.16	17.95
JD7-MBT2	<b>0.55</b>	<b>17.95</b>
JD7-MBT3	3.63	17.95
JD7-MBT4	7.65	17.95
JD7-MBT5	7.58	17.95

## Sonuçlar

Bu çalışmada, yığma duvarların mikro ölçekli analizinde 3 boyutlu sabit doğrultulu yayılı çatlak modelinin etkinliği incelenmiştir. Nümerik analizler için Ansys sonlu eleman programı içerisinde bulunan Solid65 beton elemanı seçilmiştir. Nümerik sonuçların karşılaştırılması amacıyla, JD4, JD6 ve JD7 Eindhoven duvarlarının deney sonuçlarından elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri ve oluşan çatlak bölgeleri kullanılmıştır. Sabit doğrultulu yayılı çatlak modelinde, çatlama oluştuktan sonra kayma gerilmelerinin diğer yüzeye iletimi için “kayma gerilmesi transfer katsayısı” tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, harcın çekme dayanımının ve harcın kayma gerilmesi transfer katsayısının çözümler üzerine olan etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Harcın çekme dayanımı üzerine yapılan nümerik analizler dikkate alındığında, William-Warnke beton modeli için harcın çekme dayanımının 1/20 katsayısı kullanılarak hesaplanabileceği belirlenmiştir.
- Tüm duvarlarda harcın basınç ve çekme gerilmesi için kayma iletim katsayıları sırasıyla 0.90 ve 0.05 seçildiği zaman deney sonucundan elde edilen taban kesme kuvveti, eşik yer değiştirme değerleri ile nümerik çözümler arasında sırasıyla en fazla %3.22 ve %17.95’ lik farklar elde edilmiştir.
- Tüm Eindhoven duvarı için ilk hasarlar duvarların sağ üst köşesinden başlayıp sola doğru ve sol alt köşesinden başlayıp sağa doğru yatay olarak ilerleyen iki çatlak bölgesi şeklinde elde edilmiştir. Sonraki yükleme adımlarında ise sol üst köşeden sağ alt köşeye doğru ilerleyen diyagonal bir çatlak bölgesi daha meydana gelmiştir.

## Kaynaklar

[1] Karaton, M., Aksoy, HS., Sayın, E. ve Calayır, Y., “Nonlinear seismic performance of a 12th century historical masonry bridge under different earthquake levels”, *Engineering Failure Analysis*, 79, 408-421. (2017).

[2] Adam, JM., Brencich, A., Hughes, TG. and Jefferson, T., “Micromodelling of eccentrically loaded brickwork: Study of masonry wallettes”, *Engineering Structures*, 32, 1244-1251, (2010).

[3] Mohyeddin, A., Goldsworthy, HM. and Gad, EF., “FE modelling of RC frames with masonry infill panels under in-plane and out-of-plane loading”, *Engineering Structures*, 51, 73-87, (2013).

[4] Petracca, M., Pelà, L., Rossi, R., Zaghi, S., Camata, G. and Spacone, E., “Micro-scale continuous and discrete numerical models for nonlinear analysis of masonry shear walls”, *Construction and Building Materials*, 149, 296-314, (2017).

[5] Zucchini, A., Lourenço, P.B., 2009, A micromechanical homogenisation model for masonry: Application to shear walls, *International Journal of Solids and Structures*, 46, 871-886.

[6] Vermeltfoort, AT. and Raijmakers, TMJ., “Deformation Controlled Tests in Masonry Shear Walls”, Part 2, Eindhoven University of Technology, Netherlands Scientific Report, TUE/BKO/93.08, (1993).

[7] Chaimoon, K., Attard, M. M., 2007. Modeling of unreinforced masonry walls under shear and compression, *Engineering Structures*, 29, 2056-2068.

[8] Vermeltfoort, A.Th, Raijmakers T.M.J., Janssen H.J.M., 1993, Shear tests on masonry walls. *Proceeding of the 6th North American masonry conference*. 1183-93.

[9] DOĞAN, H.N.A, 2016. Yığma duvarların mikro ve makro modelleme teknikleri ile lineer olmayan analizi, YL. Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

[10] William, KJ. and Warnke, EP., “Constitutive Model for the Tri-axial Behaviour of Concrete, *Proceeding of the International Association for Bridge and Structural Engineering*”, Zurich, Switzerland, 19, 174, (1975).

[11] Zeinkiewicz, OC. and Taylor, RL., “Finite Element Method”, McGraw-Hill, Volume 2, 2th Edition, New York, USA, (1991).

[12] Cavicchi, A. and Gambarotta, C., Collapse “Analysis of Masonry Bridges Taking Into Account Arch Fill Interaction”, *Engineering Structures*, 27, 605-615, (2005).

[13] ANSYS, Finite Element Software, Houston, Texas, USA: Swanson Analysis System. Inc., (2015).

[14] Hemant, BK., Durgesh, CR. and Sudnir, KJ., “Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19, 728-739, (2007).