



Yığma yapıların düzlem dışı davranışlarına yan duvarın ve yan duvar boşluğunun etkisi

The effect of side wall and side wall opening on the out-of-plane behavior of masonry structures

Fırat Kıpçak^{1,*} , Barış Erdil² 

¹ Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, İnşaat Bölümü, Van, Türkiye

² Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye

Öz

Teknik bilgi içermeden yapılan yığma yapılar yaşanan depremler nedeniyle oldukça hasar görmekte ve göçmektedir. Yığma yapıların taşıyıcı sistemini oluşturan duvarlar; malzeme, işçilik, harç, duvar narinliği, duvarda bulunan boşluklar ve düzlem içi/dışı konumu gibi parametrelerden etkilenmektedir. Duvar davranışını etkileyen parametrelerden biri olan destek duvarların varlığı ve duvarda bırakılan boşluklar davranışı oldukça değiştirmektedir. Bu çalışmada tuğla yığma duvarların düzlem dışı davranışları deneysel ve analitik olarak araştırılmıştır. Düzlem dışı konumda bulunan ana duvara dik yerleştirilmiş destek duvarların varlığı ve destek duvarlarda bulunan kapı, pencere boşluklarının ana duvar davranışına etkisi araştırma konusu olmuştur. Bu bağlamda harman tuğlası kullanılarak tek sıra ve düz örgü ile ½ ölçekte duvarlar üretilmiştir. Duvarlar tek yönlü hareket eden eğilme masası üzerinde test edilmiştir. Duvarlar tuğla birimleri arasında harç kullanılmadan örülmüş ve 7 farklı duvar modeli göz önüne alınmıştır. Bunlar yan duvarların ve boşlukların etkisinin araştırıldığı 4 adet U ve 3 adet L geometrisinde duvar modelidir. Her modelde doğru sonuca ulaşmak için 3 adet deney tekrarlanmıştır. Duvarlar Abaqus-2019 programında basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği ile sadece sürtünme esaslı modellenmiş ve itme analizleri yapılmıştır. Sonuçlara göre yan duvarların bulunması ana duvar rijitliğini ve yatay yük kapasitesini artırmıştır. Yan duvarlarda bulunan kapı ve pencere boşlukları hem bulunduğu duvarın hem de ana duvarın rijitliğini düşürmüştür. Boşluk miktarı artışı ile daha erken ve gevrek göçme görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Düzlem dışı davranış, Eğilme masası, İtme analizi, Tuğla, Yığma yapı

1 Giriş

Yığma yapılar, taşıyıcı sistemi duvarlardan oluşan doğal ya da yapay yığma birimlerinin, harçlı ya da harçsız üretilmesi ile inşa edilir. Yığma birimler gevrek yapıya sahip olmaları nedeniyle bu birimlerden inşa edilen taşıyıcı duvarlar da gevrek yapıdadır. Bu tür yapılar deprem yükleri altında can ve mal kaybına neden olmaktadır. Taşıyıcı duvarların gevrek davranışını sınırlayıp sünek davranışını

Abstract

The masonry structures built without technical knowledge are damaged and collapsed due to earthquakes. The walls forming the structural system of masonry structures are affected by parameters; such as material, labor, mortar, wall slenderness, gaps in the wall and in/out of plane position. The presence of supporting walls and the openings left in the wall, which are one of the parameters affecting the wall behavior, change the behavior considerably. In this study, the out-of-plane behavior of brick masonry walls was investigated experimentally and analytically. The presence of support walls placed perpendicular to the main wall in an out-of-plane position and the effect of door and window openings on the supporting walls on the main wall behavior have been the subject of research. In this context, ½ scale walls were produced with a single line and plain bond using harman bricks. The walls were tested on a one-way bending table. The walls were built between brick units without using mortar and 7 different wall models were considered. These are 4 U and 3 L geometry wall models in which the effects of side walls and openings are investigated. Three experiments were repeated in order to reach the correct result in each model. In the Abaqus-2019 program, the walls were modeled only on the basis of friction and pushover analysis were made with the simplified micro modeling technique. According to the results, the presence of side walls increased the stiffness of the main wall and the horizontal load capacity. The door and window openings on the side walls have reduced the rigidity of both the wall and the main wall. Earlier and brittle failure was observed with the increase in the number of openings.

Keywords: Out-of-plane behavior, Bending table, Pushover analysis, Brick, Masonry

artırmaya yönelik birçok çalışma ve yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden biri yığma birimler arasındaki aderansın artırılmasıdır. Aderansa bağlı olarak duvarların düşey ve yatay yük kapasiteleri artırılıp deplasmanları sınırlandırılabilir. Harçlı inşa edilen duvarlarda bu aderans harç ile sağlanırken harçsızlarda aderans doğal sürtünme ile sağlanmaktadır. Birimler arasındaki yük birinden bir diğerine sürtünme direnci ile aktarılmaktadır. Bununla

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: firatkipcak@yyu.edu.tr (F. Kıpçak)

Geliş / Received: 21.03.2023 Kabul / Accepted: 08.06.2023 Yayınlanma / Published: 15.07.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1268912

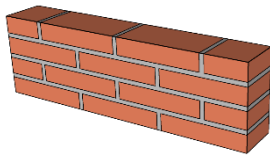
birlikte taşıyıcı duvarların davranışını buldukları konum ve doğrultuları etkilemektedir. Duvar ataletinin yüksek olduğu doğrultu düzlem içi, düşük olduğu doğrultu ise düzlem dışı doğrultuyu ifade etmektedir. Duvarın düzlem içi ve dışı davranışını duvar narinliği, malzeme türü, harç durumu ve kapı, pencere boşlukları etkilemektedir. Yatay yüklemeye ile düzlem içi hareket eden duvarın direnci yüksektir. Düzlem dışı hareket eden duvar daha yüksek narinliğe sahip olduğu için daha düşük direnç göstermektedir. Duvarların bu tür hareketlerini araştırmak için yapılan birçok çalışmada düzlem dışı duvarın düzlem içi hareket eden duvara göre daha erken hasar aldığı ve göçtüğü görülmüştür [1-5]. Ayrıca düşey ve yatay derzi oluşturan harcın karakteristik dayanımı, duvar rijitliğini etkilediği farklı çalışmalarda belirtilmiştir [6, 7]. Bunlara ek olarak yan duvar mevcudiyetinin düzlem dışı hareket eden duvara destek olduğu ve rijitliğini artırarak daha dirençli hale getirdiği görülmüştür [2, 8, 9, 10]. Yapılan araştırmalarda iki veya bir yan duvara sahip ve düzlem dışı hareket eden duvar modelinin, yan duvarsız modele oranla daha yüksek yatay yük kapasitesine sahip olduğu görülmüştür [10]. Ayrıca duvarda bırakılan kapı ve pencere boşlukları duvarda düzensizlik oluşturmada ve rijitliği düşürmektedir. Boşluklu duvara etkileyen yükler boşluk çevresinde gerilme yığılmaları oluşturmaktadır. Bu gerilmeler boşluk çevresinde çatlak oluşumuna ve çatlağın duvarın en zayıf noktasına doğru ilerlemesine ve duvarın göçmesine neden olmaktadır [10]. U geometrisine sahip duvarlarda düzlem dışı hareket eden orta duvarda maksimum deplasman üst orta noktada iken L geometrisine sahip duvarlarda serbest üst köşede olduğu görülmüştür [11].

Yığma yapı duvarı yığma birimi ve birimler arasında kullanılan bağlayıcı malzeme ile yapıldığından kompozit bir yapıya sahiptir. Bu nedenle deneysel çalışmaların yanı sıra analitik modelleme ile modellenip analizlerin yapılması için özel programlar gerektirmektedir. Modellemelerde temelde iki farklı teknik kullanılmaktadır bunlar: mikro ve makro modelleme tekniğidir.

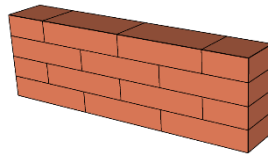
Mikro modelleme detaylı mikro modelleme ve basitleştirilmiş mikro modelleme olarak ikiye ayrılmaktadır. Mikro modelleme tekniği kullanılarak kompozit bir duvarın tam anlamıyla gerçek davranışı ve göçme mekanizması

belirlenebilir [12]. Detaylı mikro modelleme tekniğinde harçlar ve yığma birimler gerçek boyutları ve mekanik özellikleri ile ayrı ayrı modellenmektedir (Bk. Şekil 1(a)). Birimler arasında düşey ve yatay harç kalınlığı modellemeye dikkate alınır. Bu teknik karmaşık ve çözülmesi güç olduğundan dolayı çoğunlukla küçük sistemlerin çözümünde kullanılır. Büyük sistemlerin modellenmesi için zaman açısından çok efektif olmayan bir tekniktir. Harcın gerçek özellikleri ile modellenmesi durumunda hesaba katılacak eleman sayısı artmakta, davranış karmaşıklaşmakta, çözüm sırasında problemler ortaya çıkmakta ve çözüm süresi uzamaktadır. Bu etkenleri ile birlikte küçük ölçekli birleşimlerde oldukça doğru ve tutarlı sonuç elde edilmektedir [5, 13, 14, 15]. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğinde ise harç malzemesi ayrı bir katı eleman olarak modellenmemekte, harç malzemesi ile yığma birim malzemesi eşdeğer bir malzemeye dönüştürülmektedir (Bk. Şekil 1(b) ve Şekil 2). Bu teknikte dönüşüm neticesinde eşdeğer malzemenin boyutları yığma birim boyutlarına bir düşey ve bir yatay harç boyutunun eklenmesiyle elde edilir [16]. Yapılan çalışmalarda basitleştirilmiş mikro modelleme analizinde etkili parametrelerin yığma birimler arasında kesme ve çekme gerilmeleri oluşturduğu belirlenmiştir [5]. Ayrıca birimler ve harç ilişkisini içeren; yapışma, ayrılma, kesilme, sürtünme gibi özelliklerin analizde tanımlanması gerekir [17, 18]. Mikro modelleme tekniklerinin dışında kompozit duvarlar tek bir malzemeden oluşuyormuş gibi kabul edilerek makro modelleme tekniği ile de modellenmektedir (Bk. Şekil 1(c)). Bu teknikte yığma birim ve harcın ayrı ayrı mekanik deneyleri yapılır ve bulunan parametreler formüller ile hesaplanarak tek bir katı elemana ve malzeme özelliğine indirgenir. Bu teknik karmaşık, çoğunlukla büyük ve yığma yapının tamamının modellenmesinde çözüm süresini kısaltmak ve hataları önlemek için tercih edilir [5].

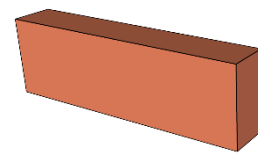
Literatürde yığma yapıların yatay yük kapasitelerinin belirlenmesi için başlıca 3 farklı yüklemeye tekniği bulunmaktadır. İlk teknikte sarsma tablası ile yapı hareketine geçirilir ve ivme değerleri ile yatay yükler hesaplanır ve deplasmanlar ölçülür [3, 8, 12, 19, 20].



(a) Yığma duvar görünüşü ve detaylı mikro modelleme

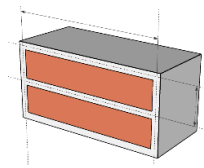


(b) Basitleştirilmiş mikro modelleme



(c) Makro modelleme

Şekil 1. Analitik yığma duvar modelleme teknikleri



Şekil 2. Basitleştirilmiş mikro modellemeye eş değer birim boyutları

İkinci teknikte statik eğilme masası üzerinde inşa edilen yapının yatay yük kapasitesi, masanın eğilmesi ve kütle merkezinin yer değiştirilmesiyle ölçülür. Bu teknikte belirli açılarda yatay yük ve hasarlar adım adım kaydedilir [9, 10, 11, 20, 21]. Üçüncü teknikte ise yapıya doğrudan yatay yük uygulanarak yük ve deplasman kapasiteleri ölçülür [1, 6, 22]. Bu makale çalışmasında tek yönde eğilme masası üzerinde farklı şekillerde yığma duvarlar inşa edilerek anlık yatay yük ve hasarlar hesaplanmıştır. Yan duvar ya da duvarlarında bırakılan kapı ve pencere boşluklarının düzlem dışı hareket eden ön duvara etkisi araştırılmıştır. Çalışmada öncelikle mevcut yığma yapılarda kullanılan duvar şekilleri, boşluk miktarları ve boyutları referans alınmıştır. Bu doğrultuda laboratuvar koşulları nedeniyle 1/2 ölçekte duvarlar küçültülmüştür. Duvar malzemesi olarak harman tuğlası kullanılmıştır. Duvarlarda en olumsuz durum ve tarihi yapılarda zamanla meydana gelen harç azalması durumunu temsil etmek için harçsız inşa edilmiştir. Bu durumda birimler arasındaki bağlantı sürtünme ile sağlanmıştır. Böylece duvar narinliği artırmıştır. Ayrıca deney duvarlarının basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği ile yalnızca sürtünme esaslı bağlantı ile Abaqus-2019 programında dinamik itme analizleri gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

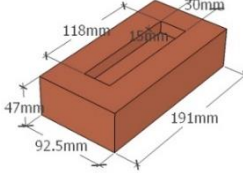
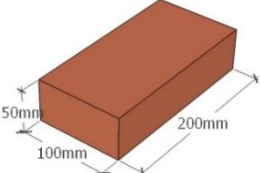
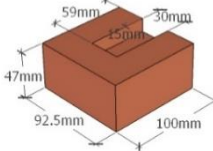
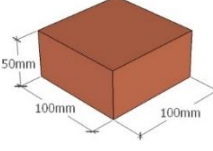
2 Materyal ve metot

Çalışmada 4 adet U ve 3 adet L geometrisinde toplam 7 farklı duvarın modeli bulunmaktadır. U geometrisinde iki yan duvara sahip dolu olan U-00, bir yan duvarında pencere boşluğu olan U-W0, bir yan duvarında kapı boşluğu olan U-D0 ve bir yan duvarında pencere diğer yan duvarında kapı boşluğu olan U-WD duvarları bulunmaktadır. L geometrisinde boşluksuz tek yan duvara sahip L-00, bir yan duvarında pencere boşluğu olan L-W0 ve bir yan duvarında kapı boşluğu olan L-D0 duvarları bulunmaktadır. Duvar deneyleri laboratuvar koşulları nedeniyle 1/2 ölçekte eğilme masası üzerinde gerçekleştirilmiştir. Duvar yapımında pişirilmiş kilden meydana gelen oluklu harman tuğlası kullanılmıştır. Çalışmada düzlem dışı hareket eden ön duvardan doğrudan yüzeyden ölçüm alınmış yan duvarlardan ölçüm alınmamıştır. Ön duvar genişliği 10 cm, uzunluğu 280 cm ve yüksekliği 140 cm'dir. Yan duvarların ise genişliği 10 cm, uzunluğu 200 cm ve yüksekliği 140 cm'dir. Yan duvarlarda bırakılan boşluklardan pencere boşluğu 50x50 cm, kapı boşluğu 50x100 cm ve duvarların köşe birleşim noktasına uzaklığı dıştan 60 cm'dir. Pencere boşluğu duvarın 45 cm yüksekliğinde iken kapı boşluğu zeminle aynı seviyede yapılmıştır. Birimlerin yaklaşık boyutları 5x10x20 cm'dir. Analitik çalışmada Abaqus-2019 lisanslı programı kullanılmıştır. Duvar boyutları ve mesnet koşulları değiştirilmeden analitik modellemeleri yapılmıştır. Duvar büyüklükleri nedeniyle basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği kullanılmıştır. Tam boyutta ve yarı boyutta kullanılan tuğlalara ait boyut ve görseller Tablo 1'de verilmiştir.

Yığma yapılarda yapı davranışını değiştiren birçok etken olması nedeniyle deneysel ve analitik modellemede bazı kabullerin yapılması kaçınılmaz olmuştur. Bunlardan detaylı

mikro modelleme yerine basitleştirilmiş mikro modelleme yönteminin kullanılması, birim boyutlarında düzeltmelerin yapılması ve analizlerde malzeme elastisite modülünün yanında duvar elastisite modülünün de dikkate alınması kabulleri yapılmıştır.

Tablo 1. Deneylerde ve mikro modelleme tekniğinde kullanılan tuğla boyutları

Gerçek tuğla boyutları	Mikro modellemede tanımlanan
Tam tuğla	
	
Yarım tuğla	
	
Birim hacim ağırlık 2 t/m ³	Birim hacim ağırlık 1.56 t/m ³

Analitik çalışmada davranışı değiştirmeyecek ve basitleştirecek şekilde tuğla birimlerinde bulunan boşluklar dolu olarak kabul edilmiştir. Boşluksuz modellenen tuğla birim ağırlığı gerçek ağırlığı ile aynı olması için birim hacim ağırlık 2 t/m³'ten 1.56 t/m³'e düşürülmüştür. Tuğla birimleri 25 mm ile kübik meşlenmiş ve C3D8R etiketli eleman tipi kullanılmıştır. Analitik modellemede alınan değerler Tablo 2'de verilmiştir. Modellemede sürtünme katsayısı ile birlikte tanımlanan sıkı temas verisi ve tuğla birimleri arasında yüklemeye başlangıcından analiz sonuna kadar her temasta yeniden sürtünmenin oluşması parametreleri etkin kılmıştır. Duvar ilk alt sıra tuğla deneyde ankastre sabitlenmiş ve programda ankastre mesnetlenmiştir. Analitik çalışmada duvarın göçmesini zorlayan yatay kuvvet buradan ölçülmüştür. Programda gerçekleştirilen dinamik analiz ile uzun bir süre aralığında çok küçük kuvvet artışlarıyla davranış ölçülmüştür. Buradaki amaç her kuvvet artışında ortaya çıkan taban kesme kuvvetinin büyüklüğü ve deplasmanların doğru elde edilmesindedir. Bu bağlamda analitik modellemede yatay yük tuğla birimlerin 8 köşesine uygulanmıştır. 0 N'dan başlayarak 15 saniye sonunda tam tuğlalar için 0.62 N yarım tuğlalar için 0.31 N yük uygulanmıştır. Deplasmanlar ise tüm birimlerden alınabilmektedir. Ancak maksimum deplasmanlar U duvarlarda duvarın orta üst kısmında, L duvarlarda ise serbest üst köşeden alınmıştır. Genişletilmiş tuğla elastisite modülünün hesaplanmasında H toplam duvar yüksekliği, E_u tuğla birimi elastisite modülü, E_m harç elastisite modülü, n düşey tuğla sıra sayısı, h_u tuğla yüksekliği, h_m harç yüksekliğidir.

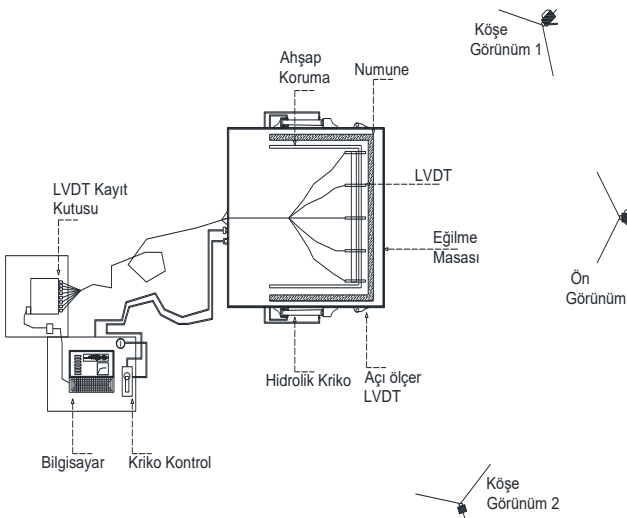
Tablo 2. Basitleştirilmiş mikro modelleme parametreleri

Parametre	Parametre değeri	Referanslar
Sürtünme katsayısı, $[\mu]$	0.82	hesaplandı
Bağlantı türü	Sıkı temas	
Mesnet koşulu	Alt sıra ankastre temel	
Modelde tanımlanan tuğla malzeme özellikleri		
Tuğla elastisite modülü, [MPa]	14000	[23]
Poisson oranı, $[\nu]$	0.22	[23]
Birim hacim ağırlığı, $[\gamma]$ $[t/m^3]$	1.56	hesaplandı
Genişletilmiş tuğla elastisite modülü, $[E_{adj}]$ [MPa]	50*	hesaplandı
	$E_{adj} = \frac{HE_u E_m}{nh_u E_m + (n-1)h_m E_u}$	[24]
Mikro modellemeye tuğla boyutları		
	Yükseklik, mm	Uzunluk, mm
Tam tuğla	50	200
Yarım tuğla	50	100
		Genişlik, mm
		100

*Genişletilmiş tuğla elastisite modülünün hesaplanmasında harçsız durum nedeniyle $E_m = 1$ MPa ve $h_m = 1$ mm varsayıldı.

Deneyler 3.00x3.00 m boyutlarında çelik masa üzerinde yapılmıştır. Masa üst kısmı bir kenarda serbest bırakılmış, diğer kenarda ise alt kısmı ile mafsallı birleşim yapılmıştır. İki yan kenarında bulunan hidrolik kriko vasıtası ile bir doğrultuda kaldırılıp mafsallı birleşim etrafında döndürülmüştür. Düzlem dışı deplasmanları kaydetmek amacı ile eğilme masası üzerine yerleştirilen deney duvarına düşeyde 3 yatayda 5 olmak üzere toplam 15 Lvdt yerleştirilmiştir. Ek olarak, 2 adet Lvdt eğilme masasının düşey deplasmanını kaydetmiş ve buradan masa açısı, kütle ve yatay kuvvet hesaplanmıştır.

Lvdt'leri sabitlemek için ayrı deney sırasında oluşan duvar göçmelerinin masa içerisine düşmesini önlemek için ayrı birer ahşap çerçeve yapılmıştır. Deneysel çalışma sırasında eğilme masası 0.25-0.40 °/s (derece/saniye) hızda sabit tutularak hareket ettirilmiştir. Düşük hızda ayarlanarak duvarların göçme noktası belirlenmek istenmiştir. Deney masası ve ölçüm aletlerinin konumları Şekil 3'te, deney modelleri ise Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Deney masası ve ölçüm konumları şeması.

3 Bulgular ve tartışma



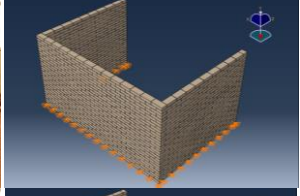


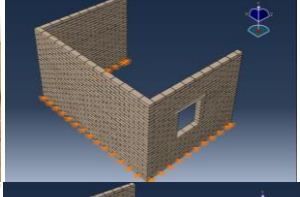


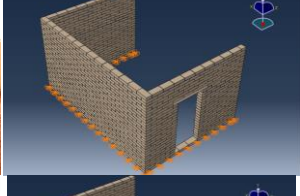


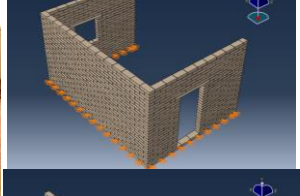


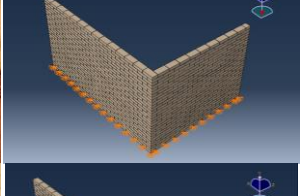


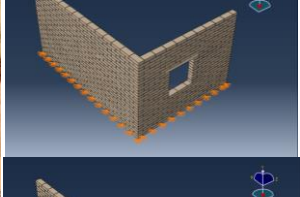


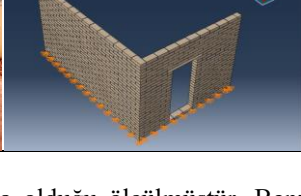
Çalışmada yığma duvarların düzlem dışı davranışını etkileyen faktörlerden, yan duvar etkisi ve yan duvarda bulunan kapı ve pencere boşluğunun etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar iki başlık altında değerlendirilmiştir. Deney duvarlarını oluşturan tuğla birimleri pürüzlü yüzeye sahip, tek sıra düz örgü ile örüldüğünden ve birimler arasında harç kullanılmadığından duvar rijitliği oldukça düşmüştür. Bu duruma Restrepo-Velez vd. [10] ile Yanan vd. [25] çalışmalarında da rastlanmıştır. Deneylerdeki duvar rijitliğini elde etmek için analitik model tasarlanırken malzemenin elastisite modülü harcın olmaması durumu dikkate alınarak Abbas ve Saeed [12]'de tanımlanan genişletilmiş tuğla elastisite modülü 50 MPa ile hesaplanmıştır. Tablo 4 ve 5'te deney ortamında ve analiz programında duvarların göçme anındaki şekilleri verilmiştir. Ayrıca yatay yük/kütle oranı ile düzlem dışı deplasman ilişkileri dikkate alınarak duvar sistemlerinin kapasiteleri kütlede bağımsız olarak maksimum 30 mm deplasman aralığında dikkate alınmıştır. Duvarların çok narin yapıya sahip olmaları nedeniyle aynı duvar modellerinden 3 tekrar deney yapılmış ve grafikleri verilmiştir. Tablo 4 ve 5'te grafiklerde L noktası hasarın ilk gerçekleştiği noktayı, G noktası ise göçmenin tamamlandığı noktayı göstermektedir. Deney videolarında L ve G noktası arasında duvara herhangi bir kuvvet etki etmese dahi göçmenin gerçekleşeceği ve deplasmanların artacağı görülmüştür.

3.1 U Geometrisindeki duvarlar

Geometrik olarak U şeklinde bulunan 4 modelde düzlem dışı hareket eden ön duvara iki kenarda bulunan duvarlar düzlem içi yönde mesnet oluşturmaktadır. Duvar yıkımlarında ön duvarın orta en üst kısmında maksimum deplasman gerçekleşmiştir. Bu noktadan alınan deplasman değerleri ile tabanda ölçülen kuvvet ilişkilendirilip duvarın yatay yük kapasitesi Tablo 4'teki gibi ölçülmüştür. U şeklinde duvarların literatürdeki çalışmalarda da benzer şekilde tablo 4'teki gibi göçtüğü ifade edilmiştir [6, 9, 10, 25, 26, 27]. Yan duvarların varlığı genel olarak sistemin rijitliğini artırdığı, davranışa olumlu katkı sağladığı görülmüştür. Yan duvarlarda bırakılan boşluklar ile tüm duvar sisteminin rijitliği düşmüş ve yatay yük kapasitesi azalmıştır. Boşlukların varlığı ön duvarın daha erken ve düzensiz göçmesine sebebiyet vermiştir. Deneysel ve analitik çalışmada tüm duvarlarda göçme şekilleri aynı çıkmıştır. Ön duvarın narin olması erken göçmesine neden olmuş ardından yan duvarların ya tamamı ya da bir kısmı göçmüştür. Duvar modellerinin üçer test edildiği deneysel çalışmada çoğu modelde yan duvarlarında göçtüğü görülmüştür ancak bunlara ait göçme sonrası fotoğraflar tablolarda bulunmamaktadır. Duvarlara ait deneysel ve analitik göçme şekillerinin aynı olduğu ve yük/kütle oranı ile deplasman değerlerinin doğrulandığı görülmüştür (Bk. Tablo 4).

Sonuçlara göre geometri duvarların başlangıç rijitliklerinin aynı olduğu ve benzer şekilde hasar aldıkları belirlenmiştir. U geometri duvarlarda başladığı L noktasının G noktasına oranı 0.70-0.80 arasında değiştiği hesaplanmıştır.


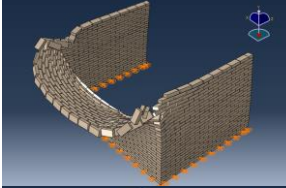
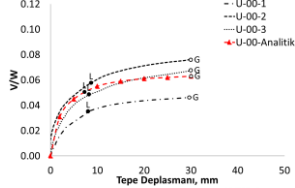

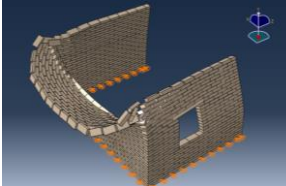
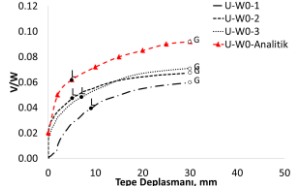

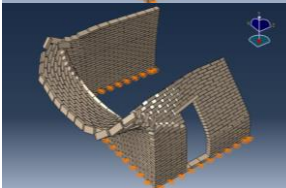
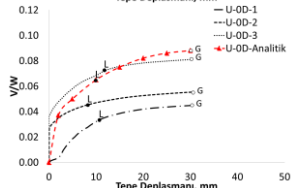

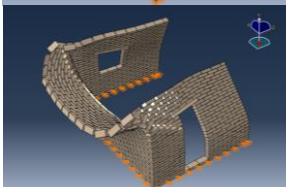
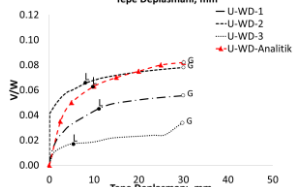
Tablo 3. Duvar modelleri, deney ve analitik görüntüleri

Duvar kodu	Tanım	Köşe görünümü-1	Köşe görünümü-2	Analitik görünüm
U-00	Boşluksuz U geometrisi nde			
U-W0	Pencere boşluklu U geometrisi nde			
U-0D	Kapı boşluklu U geometrisi nde			
U-WD	Pencere ve kapı boşluklu U geometrisi nde			
L-00	Boşluksuz L geometrisi nde			
L-W0	Pencere boşluklu L geometrisi nde			
L-0D	Kapı boşluklu L şeklinde			


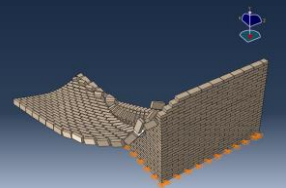
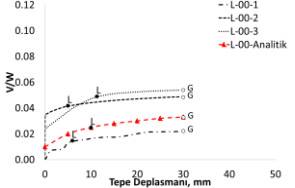

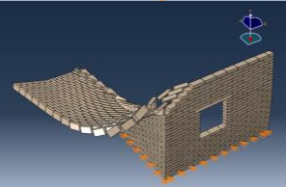
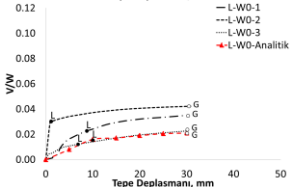

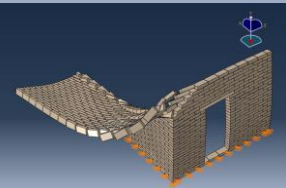
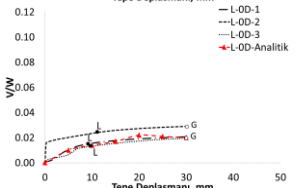
U-00 modelinde yan duvarlarda boşluk olmaması sebebiyle en yüksek kapasiteye sahip olmuştur. U-WD modeli ise bir kenarda pencere bir kenarda kapı boşluğu bulunması sebebiyle bu gruptaki en düşük kapasiteye sahip olmuştur. U-00 modelde grafik eğrilerinin 0.04 ile 0.065 arasında yatay ilerlediği V/W oranının sabit kaldığı görülmüştür. U-W0'ın U-0D ve U-WD'a göre boşluk miktarının az olması ile V/W oranı daha yüksek bulunmuştur. Boşluğun daha çok bulunduğu U-WD duvarında deney sonuçlarındaki standart

sapmanın daha fazla olduğu ölçülmüştür. Benzer literatür çalışmalarında U şeklindeki duvarlarda boşluk sayısının artışı ile yatay yük kapasitelerinin düştüğü ifade edilmiştir [10, 12]. Analitik sonuçlarda da aynı şekilde boşlukların bulunması ile ön duvarın V/W oranı düşmüştür. Tüm duvarlarda yatay yük kapasitesi, kütlelerin %2-8 arasında bulunmuştur. U-00'dan U-WD'ye yan duvarda bulunan boşluk sayısı artışı ile sürtünme yüzeyleri arasındaki bağlantı zayıflamış ve ön duvarın rijitliği düşmüştür.

Tablo 4. U geometrisinde deneysel ve analitik yığma duvar modellerinin göçme şekilleri ve yatay yük kapasiteleri

Duvar kodu	Deneysel göçme profili	Analitik göçme profili	Yatay yük/kütle oranı ve tepe deplasmanı
U-00			
U-W0			
U-0D			
U-WD			

Tablo 5. L geometrisinde deneysel ve analitik yığma duvar modellerinin göçme şekilleri ve yatay yük kapasiteleri

Duvar kodu	Deneysel göçme profili	Analitik göçme profili	Yatay yük/kütle oranı ve tepe deplasmanı
L-00			
L-W0			
L-0D			

3.2 L geometrisindeki duvarlar

Tek yan duvara sahip L geometrisinde bulunan duvarlarda U duvarlarına benzer şekilde boşluklar nedeniyle duvarların düzlem içi ve dışı rijitliği düşmüştür. Bu azalışın ön duvara etkisi kendi rijitliği kadar olmuştur. Tek yan duvarın destek olduğu L duvarlarda kapı ve pencere boşlukları nedeniyle zayıflayan yan duvar tüm sistemin yatay yük kapasitesini düşürmüştür. Maksimum deplasman yan duvarın bulunmadığı serbest kenarın üst noktasında gerçekleşmiştir. Restrepo-Velez vd. [10] çalışmasında L duvarların Tablo 5'teki gibi benzer şekilde göçtüğü ifade edilmiştir. Deneysel çalışmalarla birlikte yapılan analitik modellemede göçme şekilleri ve yük/kütle oranı-deplasman ilişkisi Tablo 5'te verilmiştir.

L duvarlarda tek yan duvarın tek taraflı destek olması nedeniyle iki yan duvarlı U duvarlara oranla dayanım ve rijitlikleri daha düşük bulunmuştur. Göçme şekillerinden de görüleceği üzere L duvarlarda yan duvarın birleştiği üst kenarında lokal hasar oluştuğu ve hasarın yan duvarın tamamına yayılmadığı görülmüştür. Boşluk bulunmayan U-00 duvarının en yüksek kapasiteye sahip olduğu ve sonra pencere boşluklu U-W0'ın ve U-U-0D'nin geldiği görülmüştür. Boşluğun nispeten fazla olduğu U-0D duvarda yan duvarın daha çok hasar aldığı belirlenmiştir. Deneysel ve analitik sonuçlarda 3 duvarda da V/W oranı aynı olduğu görülmüştür. Tüm duvarlarda V/W oranının boşluk artışı ile düştüğü görülmüştür. L-00 duvarında yatay yük kapasitesi kütlelerin %3'ü, L-W0'da %2'si ve L-0D'de ise %1.5-%2'si kadar çıkmıştır. L noktasının G noktasına oranı 0.75-0.90 arasında çıkmıştır. Hasarın ilk gerçekleştiği L noktalarından sonra artık duvar göçmeye ilerlemiş ve G noktasında tamamen göçme gerçekleşmiştir.

4 Sonuçlar

Yığma yapılarda düzlem dışı hareket eden duvara yan duvarın etkisi ve yan duvarda bulunan kapı, pencere boşluğunun etkisi deneysel ve analitik olarak araştırılmıştır. Deneyler sırasında düzlem dışı hareket eden yığma duvar üzerinden deplasman verileri anlık kaydedilmiş ve masanın anlık yaptığı eğilme açısı ile ilişkilendirilerek duvarların yatay yük kapasiteleri hesaplanmıştır. Analitik ve deneysel sonuçların örtüştüğü görülmüştür. Analitik çalışmada duvar narinliğinin yansıtılması için birçok ön analiz yapılmış ve basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğinin en uygun sonucu vereceği saptanmıştır. İki yan duvara sahip U duvar modelleri tek yan duvara sahip L duvar modellerinden daha rijit ve daha yüksek yatay yük kapasitesine sahip olmuştur. Harman tuğlasının pürüzlü ve tamamen düz yüzeyli olmaması tuğlalar arasındaki bağlantıyı zayıflatmıştır. Bu durum duvar kapasitelerinin düşük çıkmasına neden olmuştur. Analitik modellemede bu durumu yansıtmak zorlaşmış ve davranışın iyi anlaşılmasını gerektirmiştir. Yan duvarların destek oluşturması ile U duvarların ön duvarlarında göçme şekilleri duvarın ilk hareketinde doğrusal bir deplasman profili oluşturduğu görülürken artan deplasman ile bu profil dış bükey olmuştur. Deneysel ve analitik U duvar sonuçlarında iki yan duvarı boşluksuz inşa edilen duvarın pencere boşlukludan %10, pencere boşluklu

duvarın ise kapı boşlukludan %8.1 ve kapı boşluklunun da hem pencere hem de kapı boşluklu olandan %5.1 daha fazla dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir. L şeklinde bulunan duvar modellerinde ise deplasman ve göçme şekilleri incelendiğinde düzgün bir formda göçtüğü görülmüştür. L duvarlarda ise yan duvar desteğinin bulunmadığı serbest kenarda ilk hasar oluşmuş ve göçme durumuna kadar bir yay şeklinde ilerlemiştir. Göçmeler, destek yan duvara doğru uzanan yaklaşık 20-25 derecelik açı ile plastik mafsallık etrafında dönerek gerçekleşmiştir. Yan duvarı boşluksuz duvarın kapı boşlukludan %58, kapı boşluklunun ise pencere boşlukludan %37 daha fazla dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir. Ön duvarlar göçmeye geçtikten sonra yan duvarlarında hem deneyde hem de analitikte göçmeye geçtiği gözlenmiştir. Boşluklar ile duvar narinliğinin arttığı ve göçmelerin daha erken gerçekleştiği söylenebilir. Pencere ve kapı boşluğunun bulunduğu duvarlarda boşluk üstünde ve kenarında tuğlalar arasında açılma görülmüştür. Duvar altına doğru gittikçe ağırlığın ve sürtünme direncinin artışıyla tuğla açılmaları azalmıştır. Tüm duvarlarda ilk hasarın görüldüğü noktaya kadar rijit davranış görülmüştür. Ardından göçmeye karşı direncin çok düşük olduğu belirlenmiştir. Yan duvarın bulunması duvar sisteminin dayanım ve rijitliğini artırdığı sonucu çıkarılabilir. Duvarda bulunan boşluk sayısı artışı ile de dayanım ve rijitliğin düştüğü söylenebilir.

Teşekkür

Bu çalışma yüksek lisans tez çalışması kapsamında tezden üretilmiştir. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 117M316 projesi ile desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %0

Kaynaklar

- [1] A. B. Mehrabi, P. Benson Shing, M. P. Schuller, and J. L. Noland, Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames. *Journal of Structural Engineering*, 122(3), 228-237, 1996. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:3\(228\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:3(228))
- [2] A. Karaşin ve E. Karaesmen, Bingöl depreminde meydana gelen yapısal hasarların irdelenmesi. *Deprem Sempozyumu*. Kocaeli, 386:396, 2005.
- [3] A. Turer, S. Z. Korkmaz and H. H. Korkmaz, Performance improvement studies of masonry houses using elastic post-tensioning straps. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36: 683-705, 2007. <https://doi.org/10.1002/eqe.649>
- [4] O. A. Shawa, G. de Felice, A. Mauro and L. Sorrentino, Out of plane seismic behaviour of rocking masonry walls. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(5): 949-968, 2012. <https://doi.org/10.1002/eqe.1168>
- [5] P. B. Lourenço and J. G. Rots, Multisurface interface model for analysis of masonry structures. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE. 123(7): 660-668,

1998. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:7\(660\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:7(660))
- [6] H. Maccarini, G. Vasconcelos, H. Rodrigues, J. Ortega, and P. B. Lourenço, Out-of-plane behavior of stone masonry walls: Experimental and numerical analysis. *Construction and Building Materials*, 179, 430-452, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.216>
- [7] V. Akansel, G. Ameri, A. Askan, A. Caner, B. Erdil, Ö. Kale and D. Okuyucu, The 23 October 2011 MW7.0 Van (Eastern Turkey) earthquake: interpretations of recorded strong ground motions and post-earthquake conditions of nearby structures. *Earthquake Spectra*, 30(2): 657-682, 2014. <https://doi.org/10.1193/012912EQS020M>
- [8] A. Dazio, The effect of the boundary conditions on the out-of-plane behaviour of unreinforced masonry walls. In 14th World Conference on Earthquake Engineering, 8: Beijing, China, 112-17, 2008.
- [9] C. Casapulla and L. U. Argiento, The comparative role of friction in local out-of-plane mechanisms of masonry buildings. Pushover analysis and experimental investigation. *Engineering Structures*, Naples, Italy, 126: 158-173, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.036>
- [10] L. f. Restrepo-Velez, M. Guido and C. G. Michael, Dry stone masonry walls in bending part 1: static tests. *International Journal of Architectural Heritage*, 8(1):1-28, 2014. <https://doi.org/10.1080/15583058.2012.663059>
- [11] Y. Shi, D. D'Ayala and P. Jain, Analysis of out of plane damage behaviour of unreinforced masonry walls. 14th International Brick & Block Masonry Conference, Bath, England, 02-17, 2008.
- [12] A. L. Abbas, and M. H. Saeed, Representation of the masonry walls techniques by using FEM. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 11(13), 39-48, 2017. <https://doi.org/10.22587/ajbas.2017.11.13.5>
- [13] P.B. Lourenço, Analysis of masonry structures with interface elements: Theory and applications, Report 03-21-22-0-01. Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 1994.
- [14] S. Ahmad, R. A. Khan and H. Gupta, Seismic performance of a masonry heritage structure. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 4(3), 2014.
- [15] S. S. Ali, and A. W. Page, Finite element model for masonry subjected to concentrated loads. *Journal of structural engineering*, 114(8), 1761-1784, 1988. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339445\(1988\)114:8\(1761\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(1988)114:8(1761))
- [16] P. Shing, M. Schuller and V. Hoskere, In-plane resistance of reinforced masonry shear walls. *Journal of Structural Engineering*, 116(3): 619-40, 1990. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339445\(1990\)116:3\(619\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(1990)116:3(619))
- [17] A. W. Page, Finite element model for masonry. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 104(8), 1267-1285, 1978. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0004969>
- [18] S. K. Arya, and G. A. Hegemier, On nonlinear response prediction of concrete masonry assemblies. Proc., North Am. Masonry Conference, Masonry Society, Boulder, Colo., 19.1-19.24, 1978.
- [19] G. Francesco, U. Tomassetti, A. Penna and G. Magenes, Out-of-plane shaking table tests on URM single leaf and cavity walls. *Engineering Structures*, 125: 455-470, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.011>
- [20] N. Mendes, P. B. Lourenço and A. Campos-Costa, Shaking table testing of an existing masonry building: assessment and improvement of the seismic performance. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 10: 23-42, 2013. <https://doi.org/10.1002/eqe.2342>
- [21] A. Turer, M. Golalmis, H. H. Korkmaz and S. Z. Korkmaz, Tilting table tests on strengthened masonry houses. Proceedings of the 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM13), Jeju, Korea, 4084-4099, 2013.
- [22] M. S. Döndüren, Bağlayıcı özelliği artırılan duvar ve sıva harcının düzlem dışı yüklenen tuğla duvarların mekaniksel davranışına etkisi. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2008.
- [23] J. M. Nichols, and Y. Z. Totoev, Experimental determination of the dynamic MOE of Masonry Units, 15th Australian Conf. on the Mechanics of Structures and Materials, Melbourne, Vic., 1997.
- [24] K. F. Abdulla, L. S., Cunningham, and M. Gillie, Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach. *Engineering Structures*, 151, 349-365, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.021>
- [25] S. Yanan, D. D'Ayala and J. Prateek, Analysis of out of plane damage behaviour of unreinforced masonry walls. In 14th International Brick and Block Masonry Conference. 02-17, 2008.
- [26] P. Taforel, F. Dubois and S. Pagano, Evaluation of numerical uncertainties on the modeling of dry masonry structures submitted to out of plane loading, using the NSCD method in comparison with experimental test. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012), Vienna, Austria, 2013.
- [27] A. Giuffrè, A mechanical model for statics and dynamics of historical masonry buildings. In Protection of the Architectural Heritage Against Earthquakes, CISM Courses and Lectures, 359: 71-152, 1996. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2656-1_4

