T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DONATISIZ YIĞMA DUVARLARIN DÜZLEM DIŞI DAVRANIŞININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Ahmet YILDIRIM

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Programı

Danışman
Prof. Dr. Bilge DORAN

Eş-Danışman
Doç. Dr. Sema ALACALI

Temmuz, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DONATISIZ YIĞMA DUVARLARIN DÜZLEM DIŞI DAVRANIŞININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Ahmet YILDIRIM tarafından hazırlanan tez çalışması 14.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Bilge DORAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Doç. Dr. Sema ALACALI
Yıldız Teknik Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Bilge DORAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Yıldırım Serhat ERDOĞAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep ÜNSAL ASLAN, Üye
Batman Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Bilge DORAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan DONATISIZ YIĞMA DUVARLARIN DÜZLEM DIŞI DAVRANIŞININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ahmet YILDIRIM

İmza

Sonsuz destekleriyle daima yanımda olan
Aileme

TEŞEKKÜR

Tezim süresince; çalışmanın çerçevesinin oluşturulması ve bu doğrultuda odaklanacağım noktalara beni yönlendirerek teşvik etmesi, konu kapsamındaki bilgi birikimi, aksayan yerlerdeki görüş ve önerileri, süreç boyunca sabrı ve anlayışı, bana olan inancı ve güveniyle gerçek manada bir öğretmen timsali Sayın danışman Hocam Prof. Dr. Bilge DORAN'a ve aynı vasıfları haiz olmakla, tezin her cümlesinde ve kısmında emeği olan ve beni adeta ince eleyip sık dokuyan Sayın eş-danışman Hocam Doç. Dr. Sema ALACALI'ya en derin teşekkürlerimi sunarım.

Tezin sayısal analiz kısımlarındaki destekleriyle baştan itibaren desteklerini esirgemeyen ve ailevi meşgalelerinin yanında bana zaman ayıran Sevgili Hocam Dr. Öğr. Üyesi Zeynep ÜNSAL ASLAN'a çok teşekkür ederim. Yazılımsal sorunlar konusunda çözüm önerileri ve yönlendirmeleri için Hocam Dr. Öğr. Üyesi Orkun YILMAZ'a teşekkür ederim. Yazılım ve malzeme bağıntıları arasında köprü kurmamı sağlayan, model konusunda ufkumu açan ve bu sayede tezin sonuçlanmasında büyük rol oynayan Hocam Doç Dr. Yıldırım Serhat ERDOĞAN'a özel teşekkürlerimi arz ederim.

Yüksek lisans sürecinde bursiyeri olduğum 2210-A Yurt İçi Genel Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında tarafıma maddi desteklerini ileten ve özellikle ilk zamanlarda yükümü hafifleten TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatıma anlam ve mana katan, maddi ve manevi destekleriyle her daim yanımda bulunan Sevgili aileme ne kadar teşekkür etsem kelimeler kifayetsiz kalır.

Ahmet YILDIRIM

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

TABLO LİSTESİ xii

ÖZET xiii

ABSTRACT xv

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 4

1.2 Tezin Amacı 10

1.3 Hipotez 10

2 DONATISIZ YIĞMA DUVARLARIN DÜZLEM DIŞI DAVRANIŞI 12

2.1 Genel Bilgiler 12

2.2 Yapısal Malzemeler 14

2.2.1 Tuğla 15

2.2.2 Harç 17

2.3 Düzlem Dışı Davranış 18

3 YIĞMA DUVARLARIN SAYISAL ANALİZİ 24

3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi 24

3.2 Yığma Duvarlarda Sayısal Modelleme Teknikleri 26

3.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yığma Duvarların Analizi 28

3.4 Bünye modelleri 29

3.4.1 Tresca Kriteri 31

3.4.2 von Mises Kriteri 31

3.4.3 Mohr-Coulomb Kriteri 32

3.4.4 Drucker-Prager Kriteri 33

3.4.5 Genişletilmiş Drucker-Prager (EDP) Kriteri 34

3.5 Deney Duvarlarının Modellenmesi 37
3.6 Analiz ve Değerlendirilme 42

4 PARAMETRİK ÇALIŞMA **45**

5 SONUÇ **49**

KAYNAKÇA **51**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **56**

SİMGE LİSTESİ

σ_1	1 Eksenindeki Asal Gerilme
η	1. Malzeme Parametresi
σ_2	2 Eksenindeki Asal Gerilme
ξ	2. Malzeme Parametresi
σ_3	3 Eksenindeki Asal Gerilme
$Q\left(\sigma, \sigma_y\right)$	Akış Kuralı Fonksiyonu
$\bar{\alpha}$	Akış Potansiyeli Basınç Duyarlılığı Parametresi
$f(\sigma_{ij}, \beta)$	Akma Fonksiyonu
σ_a	Akma Gerilmesi
τ_y	Akma Noktasındaki Maksimum Kayma Gerilmesi
α	Basınç Duyarlılığı Parametresi
L	Duvar Genişliği
H	Duvar Yüksekliği
σ_e	Efektif Gerilme
σ_{v0}	Eksenel Gerilme
E	Elastisite Modülü
σ_{ij}	Gerilme Durumu
$[D]$	Gerilme - Şekil Değiştirme (Elastisite) Matrisi
$\{\sigma\}$	Gerilme Vektörü
$tr(\sigma)$	Gerilme Vektörünün İzi
$p(\sigma)$	Hidrostatik (Ortalama Normal) Basınç
$\{\Delta u_i\}$	i. yineleme için Yinelemeler Arasındaki Yer Değiştirme Vektörü
ϕ	İçsel Sürtünme Açısı

τ	Kayma Gerilmesi
c	Kohezyon
$\left\{F_{n,i}^{nr}\right\}$	n. zaman adımı ve i. yineleme için Geri Yükleme Kuvveti Vektörü
$\left[K_{n,i}^{T}\right]$	n. zaman adımı ve i. yineleme için Tanjant Rijitlik Matrisi
$\left\{F_{n,i}^{a}\right\}$	n. zaman adımı ve i. yineleme için Toplam Kuvvet Vektörü
σ_n	Normal Gerilme
τ_{maks}	Maksimum Kayma Gerilmesi
σ_{maks}	Maksimum Normal Gerilme
β	Malzemeye Bağlı Parametreler
σ_{min}	Minimum Normal Gerilme
ν	Poisson Oranı
$J_2(s(\sigma))$	Sapma Gerilmesinin İkinci Değişmezi
$\{\epsilon\}$	Şekil Değiştirme Vektörü
$[B]$	Şekil Değiştirme - Yer Değiştirme Matrisi
σ_y	Tek Eksenli Akma Gerilmesi Parametresi
f_c	Tek Eksenli Basınç Dayanımı
f_t	Tek Eksenli Çekme Dayanımı
$[K]$	Toplam Rijitlik Matrisi
$\{u\}$	Yer Değiştirme Vektörü
$\sigma_{y,eks}$	y eksenindeki Normal Gerilme
$\{F\}$	Yük Vektörü
τ_{yz}	y - z düzlemlerindeki Kayma Gerilmesi
$\sigma_{z,eks}$	z eksenindeki Normal Gerilme
τ_{zx}	z - x düzlemlerindeki Kayma Gerilmesi
$\sigma_{x,eks}$	x eksenindeki Normal Gerilme
τ_{xy}	x - y düzlemlerindeki Kayma Gerilmesi

KISALTMA LİSTESİ

EDP	Genişletilmiş Drucker-Prager
LVDT	Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatör
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TSE	Türk Standartları Enstitüsü

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Ayasofya Cami, İstanbul 1
Şekil 1.2 Ulu Cami, Bursa 2
Şekil 2.1 Geyve Han, Bursa 13
Şekil 2.2 Donatısız yığma duvar 13
Şekil 2.3 Duvar örgü biçimleri, a) Amerikan (veya adi) örgüsü b) İngiliz (veya çapraz) örgüsü c) Flaman örgüsü d) Yığın örgüsü e) Sedye örgü 14
Şekil 2.4 Kil malzeme 15
Şekil 2.5 Tuğla biçimleri a) Dolu b) Çukur c) Düşey delikli 16
Şekil 2.6 Harcın tuğla duvar örümünde kullanımı 17
Şekil 2.7 Yığmanın basınç, çekme ve eğilme davranışları 18
Şekil 2.8 Rondelet'in çizimlerinde düzlem dışı yatay etkiler altında yığma duvarların göçme mekanizmaları 18
Şekil 2.9 Yığma yapılarda kutu davranışı, a) Düzlem dışı, b) Düzlem içi c) Kutu davranışı 19
Şekil 2.10 Yığma duvarların düzlem dışı göçme mekanizmaları ve nedenleri 20
Şekil 2.11 Yeterli mesnetlenmelerin olmaması nedeniyle yığma duvarlarda meydana gelen göçmeler 21
Şekil 2.12 Yığma duvarların mesnet şartlarının kırılma biçimlerine etkisi 22
Şekil 2.13 Kalkan duvara hatıl eklenmesi 22
Şekil 2.14 Mesnet şartlarının düzlem dışı yük kapasitesine etkisi 23
Şekil 3.1 Geometrisi oluşturulan bir modelin sonlu elemanlara ayrılması . . 24
Şekil 3.2 Newton-Raphson Yöntemi 27
Şekil 3.3 Modelleme yaklaşımları a) Yığma duvar kesiti b) Detaylı mikro modelleme c) Basitleştirilmiş mikro modelleme d) Makro modelleme 27
Şekil 3.4 Yığma yapılar için kullanılan sonlu eleman tipleri a)SOLID186 b)SOLID65 29
Şekil 3.5 Düzlem gerilme halinde akma yüzeyi 31
Şekil 3.6 Düzlem gerilme halinde Tresca ve von Mises akma kriterleri 32
Şekil 3.7 Mohr-Coulomb akma kriteri 33

Şekil 3.8 Drucker-Prager kriterinin asal gerilme uzayında gösterimi 34
Şekil 3.9 Drucker-Prager - Mohr-Coulomb tek ve iki eksenli uyum . . 36
Şekil 3.10 Kapasite deneyleri a) Kullanılan tuğlalar b) Geometrik özet model (S1 Duvarı) c) Deney duvarı (S3 Duvarı) d) Deney düzeneği (S1 Duvarı) 38
Şekil 3.11 Deney duvarları düzlem dışı kapasite test düzeneği 39
Şekil 3.12 S1 duvarının (dolu duvar) sonlu elemanlar modeli 41
Şekil 3.13 S1 duvarının yük - yer değiştirme ilişkisi 42
Şekil 3.14 S3 duvarının yük - yer değiştirme ilişkisi 43
Şekil 3.15 S1 duvarı a) Deney sonrası mekanizma durumu b) Model sonucu plastik şekil değiştirme dağılımı 43
Şekil 3.16 S3 duvarı a) Deney sonrası mekanizma durumu b) Model sonucu plastik şekil değiştirme dağılımı 44
Şekil 4.1 Boşluklu duvarlara ait temsili fiziksel modeller a) % 5 boşluklu b) % 10 boşluklu c) % 15 boşluklu d) % 20 boşluklu e) % 25 boşluklu f) % 30 boşluklu 46
Şekil 4.2 Boşluklu duvarlara ait sayısal modeller a) % 5 boşluklu b) % 10 boşluklu c) % 15 boşluklu d) % 20 boşluklu e) % 25 boşluklu f) % 30 boşluklu 46
Şekil 4.3 % 35 boşluklu duvar a) Eksenel yük uygulanırken göçme b) Göçme biçimi (plastik şekil değiştirme dağılımı) 47
Şekil 4.4 Boşluk oranının düzlem dışı davranışa etkisi 48
Şekil 4.5 Boşluk oranının normalize edilmiş düzlem dışı yük ile ilişkisi . . 48

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Bazı ülkelerdeki donatısız yığma binaların yüzdesi 3
Tablo 1.2 Yığma bina taşıyıcı sistemleri 4
Tablo 3.1 Deney duvarları 39
Tablo 3.2 S1 ve S3 duvarlarının özellikleri 40
Tablo 3.3 Makro modellemede kullanılan malzeme parametreleri 40
Tablo 3.4 S1 ve S3 duvarlarının model ve deney sonuçlarının karşılaştırılması 42
Tablo 4.1 Parametrik çalışmada kullanılan modellere ait boşluk özellikleri . 46
Tablo 4.2 Boşluk oranının düzlem dışı yüke etkisi 47

ÖZET

DONATISIZ YIĞMA DUVARLARIN DÜZLEM DIŞI DAVRANIŞININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Ahmet YILDIRIM

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Bilge DORAN
Eş-Danışman: Doç. Dr. Sema ALACALI

Yığma yapılar, Türkiye'de ve dünyada yapı stokunun önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Yığma yapıların temel taşıyıcı birimlerinden olan donatısız yığma duvarlar, düşük çekme dayanımları ve kompleks yapısı nedeniyle yatay yükler etkisinde düzlem dışı göçmeye (devrilmeye) karşı oldukça hassastır. Duvarın göçmesinin engellenmesiyle yığma yapılar ayakta kalabilir. Bu ise donatısız yığma duvarların yatay yükler altındaki davranışının anlaşılmasıyla mümkündür. Ancak davranışın iyi anlaşılmasıyla yığma türü yapılar, gelecek kuşaklara güvenle aktarılabilir. Bu doğrultuda eksenel sabit yükler ve düzlem dışı tek yönlü üniform basınç etkisi altındaki boşluksuz ve boşluklu donatısız yığma duvarların doğrusal olmayan davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Ayrıca, boşluk oranının duvarın düzlem dışı davranışına olan etkisi araştırılmıştır. Sayısal incelemeler çerçevesinde, makro modelleme yaklaşımı kullanılmış ve 3 boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri ANSYS yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. Bünye modeli olarak Genişletilmiş Drucker-Prager (EDP) malzeme modeli kullanılmıştır. Bünye modeli, sadece iki parametre (tek eksenli basınç ve çekme dayanımı) gerektirmekte ve sayısal incelemeler için büyük bir pratiklik sağlamaktadır. Analizler sonucu elde edilen yük-yer değiştirme ilişkilerinin deneysel verilere oldukça yaklaşmış olduğu görülmüştür. Ayrıca boşluk oranlarının düzlem dışı yüklere etkisi parametrik olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, yük – yer değiştirme grafikleri incelendiğinde, boşluk oranının artmasıyla düzlem dışı yük değerlerinin ve başlangıç rijitliklerinin azaldığı

görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Donatısız yığma duvar, düzlem dışı davranış, boşluklu duvar, sonlu elemanlar yöntemi, Genişletilmiş Drucker-Prager

ABSTRACT

NUMERICAL INVESTIGATION FOR THE OUT-OF-PLANE BEHAVIOR OF UNREINFORCED MASONRY WALLS

Ahmet YILDIRIM

Department of Civil Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Bilge DORAN
Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sema ALACALI

Masonry structures constitute a significant part of the building stock in Türkiye and worldwide. Unreinforced masonry walls, which are the basic structural components of masonry structures, are highly susceptible to out-of-plane collapse (overturning) under horizontal loads due to their low tensile strength and complex structure. By preventing the collapse of the wall, masonry structures can survive, which is possible by understanding the behavior of unreinforced masonry walls under lateral loads. A comprehensive understanding of the behavior is essential to ensure the safe preservation of masonry structures for future generations. To achieve this, the nonlinear behavior of unreinforced masonry walls, both with and without openings, subjected to constant axial loads and out-of-plane unidirectional incremental uniform pressure, is numerically investigated. Furthermore, the influence of the opening ratio on the out-of-plane behavior of the wall is examined. In the framework of the numerical investigations, a macro modeling approach is used, and 3D nonlinear finite element analysis is performed using ANSYS software. The Extended Drucker-Prager (EDP) material model is used as the constitutive model. The constitutive model requires only two parameters (uniaxial compressive and tensile strength) and provides great practicality for numerical investigations. The load-displacement relationships obtained from the analyses are found to be very close to the experimental data. In addition, the effect of the opening ratio on out-of-plane loads is parametrically investigated. As a result, examination of

the load–displacement graphs shows that the out-of-plane load values and initial stiffness decrease with increasing opening ratio.

Keywords: Unreinforced masonry wall, out-of-plane behavior, wall with opening, finite element method, Extended Drucker-Prager

1
GİRİŞ

Yığma yapılar, inşaat mühendisliği ve mimarlık alanlarında tuğla, taş ve benzeri yapı birimlerinin üst üste yığılması ve çoğu kez birbirine harç ile bağlanmasıyla oluşturulan taşıyıcı özelliğe sahip elemanlardan oluşan yapısal sistemlerdir. Yığma kelimesi yerine kâgir veya kârgir sözcükleri de kullanılmaktadır. Doğal taşların veya tuğla, beton, briket, kireç kumtaşı gazbeton blok vb. yapay taşların, kireç, çimento vb. bir mineral bağlayıcı ile yapılmış harç kullanılarak örülmesi ile oluşturulan kargir duvar, yığma yapıların belirli yükler altındaki en küçük yapısal birimi olarak tanımlanabilir [1]. Yığmanın uzun ömürlü olması ve dış etkilerden çok az etkilenen bir yapıya sahip olması, bu malzemenin kullanıldığı tarihi yapıları da günümüze dek taşımıştır (Şekil 1.1 ve Şekil 1.2).



Şekil 1.1 Ayasofya Cami, İstanbul



Şekil 1.2 Ulu Cami, Bursa

İşçiliğinin basit olması, malzemelerinin yakın çevrelerde ve doğal halde bulunabilmesi, ısı geçirgenliğinin diğer malzemelere nazaran daha düşük olması ve estetik görünümleri sayesinde yığma yapılar, tarihin her evresinde varlığını sürdürerek tercih edilen bir yapı sistemi olmuştur. Bu konuda yığma elemanların en eski yapı malzemesi olduğu söylenebilir [2]. Bu tür yapıların dünya genelinde yaygın olması ve ülkemizde de yapı stokunun önemli bir kısmını oluşturması konunun önemini gözler önüne sermektedir. Bu görüşü destekleyecek şekilde Tablo 1.1'de bazı ülkelerdeki donatısız yığma yapıların toplam bina stoku içerisindeki oranları verilmiştir [3]. Örneğin, bu oran Pakistan'da 1998'deki sayımda %93, Irak ve Sudan'da 1983'de yapılan sayımlarda %80, Peru'da 2007'deki verilerde %73.2 ve Avustralya'da 2000 yılı sayımlarında %52.9, Türkiye'de ise 2002 yılı sayımında %47.1 olarak kayıtlara geçmiştir.

Ülkemizde her ne kadar yeni inşa edilen yapıların büyük bir kısmı betonarme taşıyıcı sistemle yapılmakta olsa da yığma yapılar hâlen oldukça yaygın bir şekilde varlığını sürdürmektedir. Özer Ay ve Eroğlu Azak'ın [4] 2021 yılında yaptığı çalışmaya göre, Türkiye'de yığma yapıların toplam bina stokuna oranı 1980 yılında %74 iken, bu oran 2000 yılında %51'e, 2015 yılında ise %46'ya gerilemiştir. . Bu düşüşün nedeni büyük ölçüde beton teknolojisinin gelişmesi ve yaygınlaşmasıyla açıklanabilir. Görüldüğü gibi; ülkemizde, betonarme yapıların yaygınlaşmasına

Tablo 1.1 Bazı ülkelerdeki donatısız yığma binaların yüzdesi [3]

Ülke	Sayım yılı	Donatısız yığma bina stoku* (%)
Cezayir	1983	15.0
Irak	1983	80.0
Ürdün	1983	70.0
Sudan	1983	80.0
Suriye	1983	60.0
El Salvador	1990	48.0
Yeni Zelanda	1998	7.0
Pakistan	1998	93.0
Avustralya	2000	52.9
Meksika	2000	75.7
Filipinler	2000	30.8
Endonezya	2001	60.0
Türkiye	2002	47.1
ABD (CEUS)	2002	15.0
İran	2005	56.7
İtalya	2006	62.2
Peru	2007	73.2

*Kerpiç, blok ve tuğla ile yapılan evleri kapsar.

ve teknolojik gelişmelere rağmen yığma yapılar yadsınamaz bir oranda varlığını korumaya devam etmektedir. Bu durum, yapı mühendisliği açısından dikkat gerektiren bir alan oluşturarak, yığma yapıların incelenmesini gerekli ve kaçınılmaz kılmaktadır.

Yığma yapılar kendi içinde sınıflara ayrılmaktadır. Ülkemiz özelinde 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) kapsamında tanımlanan dört farklı yığma bina taşıyıcı sistem türü tanımlanmıştır [5].]. Bu taşıyıcı sistemler, ayrıca "süneklik düzeyi yüksek" ve "süneklik düzeyi sınırlı" olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma Tablo 1.2 ile özetlenmiştir. Tablo 1.2'ye göre, donatısız yığma binalar, süneklik düzeyi sınırlı taşıyıcı sistemler içerisinde yer almaktadır. Bunun sebebi, donatısız yığma yapıyı oluşturan birimlerin çekme dayanımının düşük olması ve çekme gerilmelerini karşılayacak donatı bulunmaması ile bu tür yapıların yüksek yer değiştirmeler altında gevrek davranış göstermesi olarak özetlenebilir. Bunun yanında, yapılan deneysel çalışmalarda donatısız yığma yapıları oluşturan duvarların, yüksek yer değiştirmelere rağmen göçmeden dayanımlarını koruyabildikleri gözlemlenmiştir [6]. Bu durum, donatısız yığma yapıları tamamen sünek olmayan sistemler sınıfına dahil etmenin doğru bir yaklaşım olmadığını açıkça ortaya koymaktadır.

Tablo 1.2 Yığma bina taşıyıcı sistemleri [5]

Süneklik düzeyi yüksek taşıyıcı sistemler	Süneklik düzeyi sınırlı taşıyıcı sistemler
• Donatılı yığma binalar • Donatılı gazbeton panel binalar	• Kuşatılmış yığma binalar • Donatısız yığma binalar

Tez kapsamında, süneklik düzeyi sınırlı yığma bina taşıyıcı sistemlerinden biri olan donatısız yığma binaların yapısal elemanı olan donatısız yığma duvarlar ele alınacaktır. Çalışmanın odak noktası, söz konusu duvarların düzlem dışı davranışlarının sayısal yöntemlerle incelenmesidir. Bu kapsamda, konuyla ilgili daha önce yapılmış bilimsel araştırmalar ve akademik çalışmalar Literatür Özeti başlığı altında özetlenmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Literatür Özeti bölümünde, ağırlıklı olarak bu tez kapsamında kullanılan deney verilerine ait donatısız yığma duvarları [6] incelemiş olan araştırmacıların çalışmaları ele alınmıştır. Söz konusu çalışmalar, 3. Bölüm: Sayısal Analiz ve Doğrulama kısmında detaylı şekilde açıklanan duvar tipleriyle doğrudan ilişkili olup, ilgili literatür geçmişten günümüze kronolojik bir sıra izlenerek özetlenmiştir.

Vaculik [6], donatısız yığma duvarların düzlem dışı davranışını inceleyerek, düzlem dışı taşıma kapasitesinin anlaşılmasına yönelik olarak yarı statik maksimum dayanım testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, ana duvarın tüm yüzeyine uygulanan basıncın, hava yastıkları aracılığıyla kulakçıklara (dönüş duvarlarına) doğru tek yönlü olarak iletildiği 8 farklı donatısız yığma duvar örneği üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Deneylerde kullanılan duvarların boyutları, mesnetlenme koşulları, isimlendirmeleri, uygulanan ön basınç değerleri ve diğer teknik detaylar, bu tezin 3. Bölüm: Sayısal Analiz ve Doğrulama başlığı altında ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Noor-E-Khuda vd. [7], makro modelleme tekniğini kullanarak geliştirdikleri açık sonlu elemanlar yöntemiyle donatısız ve güçlendirilmiş yığma duvarların düzlem dışı davranışını incelemişlerdir. ABAQUS yazılımı kullanılarak geliştirilen modelde her biri dört düğüm noktasına ve 24 serbestlik derecesine sahip dörtgen şekilli, üç boyutlu sonlu plak elemanları seçilmiştir. Modelin kalibrasyonu için Vaculik'in ön basınç uygulanmamış S2 numaralı duvarı referans alınmıştır. Kalibrasyon sürecinde 21 farklı malzeme parametresi dikkate alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Söz konusu modelleme yaklaşımında bu tez kapsamında kullanılan yöntemin sonuçlarının aksine maksimum yük sonrasındaki yumuşama davranışı da temsil edilebilmiştir. Geliştirilen model ile hem yük-yer değiştirme ilişkisi hem de kırılma biçimi çok yüksek bir doğrulukla modellenebilmiştir.

Noor-E-Khuda vd. [8], önceki paragrafta belirtilen açık sonlu elemanlar yöntemi temelli makro modelleme tekniğini kullanarak, boşluklu ve boşluksuz donatısız yığma duvarların düzlem dışı yükler altındaki davranışını modellemişlerdir. ABAQUS yazılımı kullanılarak oluşturulan modellerin kalibrasyonu bu tez kapsamında kullanılan S1 duvarı da dahil olmak üzere Vaculik'in deneysel olarak test ettiği duvarlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonrasında sınır şartları, en-boy oranı ve ön basınç gibi değişkenler üzerinde çeşitli varyasyonlar yapılarak parametrik analizler yapılmıştır. Sınır şartlarına ilişkin analizlerde, dört kenarından (alt, üst, sağ ve sol) mesnetlenmiş duvarların eğilme kapasitesinin, sırasıyla üç kenarından ve iki kenarından mesnetli duvarlara kıyasla %38 ve %98 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. En-boy oranı özelindeki analizlerde, H/L (yükseklik/genişlik) oranı arttıkça duvarların eğilme kapasitesinin yükseldiği, buna karşın sünekliğinin azaldığı belirlenmiştir. Ön basınç kapsamındaki analizlerde ise yaklaşık 2 MPa'ya kadar uygulanan ön basıncın hem düzlem dışı yük kapasitesi hem de sünekliği artırdığı, daha büyük değerler için duvarın basınç altında kırılmayla göçmeye ulaşması nedeniyle duvarın hem başlangıç rijitliğinin hem de dayanımında azalma meydana geldiği ve duvarın gevrek davrandığı gözlemlenmiştir.

Abdulla vd. [9], basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğini kullanarak plastisite tabanlı bünye modelleri ve genişletilmiş sonlu elemanlar yöntemiyle yığma duvarların düzlem içi ve düzlem dışı davranışlarını sayısal olarak irdelemişlerdir. Yığma malzemenin basınç etkisi altındaki ezilme davranışını modelleyebilmek için Drucker-Prager malzeme modeli kullanılmıştır. ABAQUS yazılımıyla oluşturulan sonlu eleman modelinde, genişletilmiş birimler için 8 düğüm noktalı 3 boyutlu sonlu elemanlar kullanılmıştır. Düzlem dışı modelin kalibrasyonu için bu tez kapsamında da kullanılan Vaculik'in S1 numaralı duvarı referans alınmış ve analiz süresi ortalama bir bilgisayar sisteminde çözüm süresi yaklaşık 238 dakika olarak kaydedilmiştir. Malzeme parametresi olarak birçok değişken kullanılmış ve elde sonuçlar S1 duvarının davranışını büyük ölçüde başarılı bir şekilde yansıtmıştır. Buna karşın, sayısal modelle elde edilen çatlakların dağılımı deneyde elde edilen verilerden biraz farklı olduğu raporlanmıştır. Bu farklılığın sebebinin bünye modelinde kullanılan bazı parametrelerin tanımlanmasında kullanılan bazı varsayımların belirsizliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Galvez vd. [10], donatısız yığma duvarların düzlem dışı davranışını hem makro modelleme tekniği ile sonlu elemanlar yöntemi kullanarak hem de basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği ile ayrık elemanlar yöntemiyle modellemişlerdir. Sonlu elemanlar analizleri, DIANA yazılımı kullanılarak dörtgen kabuk elemanlar ile gerçekleştirilmiştir. Modelin kalibrasyonu sürecinde, bu tez kapsamında da analiz

edilen S1 ve S3 duvarlarının yanı sıra, iki yönlü eğilmeye maruz bırakılmış Vaculik'e ait diğer iki duvar (S2 ve S7) ve bir adet tek yönlü eğilme altındaki duvar olmak üzere toplam beş farklı duvar tipi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde; elastisite modülü, çekme dayanımı, basınç dayanımı ile çekme ve basınç altındaki kırılma enerjileri olmak üzere beş farklı parametre tanımlanmıştır. Bu tez kapsamında olduğu gibi, basınç dayanımı doğrudan deneysel veriden alınmış, ancak çekme dayanımı değeri kalibre edilmiş ve bu tezde verilen değere oldukça yakın değerler alınmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde deneyde verilen çekme değerinden daha az olan bir değer ile en iyi sonuca ulaşılabildiği not edilmiştir. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde; başlangıç rijitliği, düzlem dışı yük kapasitesi ve maksimum yer değiştirme değerlerinin deneysel sonuçlarla yüksek düzeyde örtüştüğü, ayrıca yük-yer değiştirme ilişkilerinin deney verileriyle büyük ölçüde benzerlik gösterdiği görülmüştür.

Noor-E-Khuda vd. [11], önceki iki çalışmasında belirtilen makro modelleme tekniğini kullanarak geliştirdikleri açık sonlu elemanlar yöntemi temelli yaklaşımı kullanarak boşluklu ve boşluksuz donatısız yığma duvarların davranışını incelemişlerdir. Çalışmada, 3 kenarından mesnetli ve ön basınç içeren veya içermeyen düzlem içi ve düzlem dışı eş zamanlı yüklemeye maruz duvarların davranışlarına odaklanılmıştır. ABAQUS yazılımı kullanılarak oluşturulan modellerin kalibrasyonu, önceki paragrafta belirtilen çalışma [8] kapsamında elde edilen sonuçlardan da yararlanılarak, Vaculik'in S1, S2 ve S4 numaralı duvarları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonrasında üst kenar veya bir düşey kenar serbest bırakılmış, alt kenarın üç yöndeki ötelemesi sınırlandırılmış, diğer iki tutulu kenarda ise yalnızca düzlem dışı yöndeki öteleme hareketi kısıtlanarak sınır şartları tanımlanmıştır. Alt kenarın dönme serbestlikleri bu tez kapsamında da olduğu gibi serbest bırakılmış ve yaklaşık olarak ankastre mesnet davranışına karşılık gelecek şekilde modellenmiştir. Bu yaklaşımın gerekçesi olarak, yığma duvarlarda harç birleşimlerinin tam ankastre mesnet koşullarını sağlayamayacağı ifade edilmiştir. Sonuçta, düzlem dışı yük artışına bağlı olarak düzlem içi dayanımın azaldığı belirtilmiş, bu etkileşimleri göstermek üzere düzlem içi ve düzlem dışı kapasite etkileşim eğrileri sunulmuştur.

Adhikari vd. [12], basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğini kullanarak donatısız ve kuşatılmış yığma okul yapılarının yapısal davranışını uygulamalı elemanlar yöntemiyle modellemişlerdir. Birimlerin arasında literatürde "mafsal yayları" olarak bilinen normal ve kesme kuvveti yayları kullanılmıştır. Bu yaylar harç ve tuğla harç arayüzeyini yansıtan elemanlar olarak modellenmişlerdir. Uyguladıkları yöntemin kalibrasyonu literatürde yer alan düzlem içi ve düzlem dışı deneysel veriler referans alınarak "Extreme Loading for Structures" (ELS) yazılımı ile

gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon aşamasında kullanılan malzeme parametrelerinin deneysel verilerle birebir aynı alınması durumunda sonuçların hatalı elde dildiği belirtilmiş, ancak hangi malzeme parametrelerinin kullanıldığı çalışmada açık bir şekilde ifade edilmemiştir. Bu tez kapsamında da kullanılmış olan Vaculik'e ait S1 numaralı dolu duvar, düzlem dışı davranışın kalibrasyonunda referans olarak alınmıştır. Sonuç olarak, başlangıç rijitliği, düzlem dışı yük kapasitesi ve maksimum yer değiştirme değerleri yüksek doğrulukla kalibre edilmiş, yük-yer değiştirme ilişkisi deneysel verilerle büyük ölçüde uyumlu olarak elde edilmiş ve kırılma davranışı, gerçeğe yakın şekilde modellenebilmiştir.

Singh ve Munjal [13], dikdörtgen ve kare açıklıklara sahip kompozit bir malzemeyle güçlendirilmiş ve referans olarak kullanılan donatısız yığma duvarcıkların düzlem dışı tepkisini sayısal modellemeyle parametrik olarak incelemişlerdir. Kalibrasyon, dört noktalı eğilme deneyi yapılan, ikisi donatısız ve güçlendirme uygulanmamış dört duvarcık üzerinden elde edilen verilerle gerçekleştirilmiştir. Sayısal modelleme, ABAQUS yazılımında, yığma yapıların analizine uygun olarak kullanılan 8 düğüm noktalı 6 yüzlü tuğla sonlu elemanlarıyla ve makro modelleme tekniğiyle oluşturmuştur. Bünye modeli olarak beton hasar modeli kullanmış, güçlendirilen duvarcıklarda yapılan parametrik analizlerde, boşluk oranı arttıkça eğilme (düzlem dışı) dayanımının düştüğüne dikkat çekilmiştir. Ayrıca, artan boşluk oranı ile düzlem dışı yük kapasitesi arasında doğrudan bir ilişki olmadığı, ancak boşluk konumuyla dayanımın ilişkili olduğu vurgulanmıştır. Boşlukların duvarın merkezinden kayması durumunda düzlem dışı yük kapasitesinin düştüğü görülmüştür. Ayrıca genişlik/kalınlık oranının düşük olmasının, boşluklu duvarlarda yüksek düzlem dışı yük kapasitesi için tercih edilebilir bir özellik olarak belirtilmiştir.

Sharma vd. [14], doğrusal olmayan arayüzler vasıtasıyla birbirine bağlanan rijit dikdörtgen plakaların bir araya gelmesiyle oluşan bir temsil edici hacim elemanı geliştirmişlerdir. Bu modelleme sayesinde yığma yapının ortotropik özelliklerini, yumuşama davranışını ve göçme mekanizmasını temsil edebilmişlerdir. Kullanılan modelleme yaklaşımı, düzlem dışı yük kapasitesi (dayanımı) ve gözlemlenen hasarı deney sonuçlarıyla uyumlu olacak şekilde yansıtabilmiştir. Sayısal analiz kapsamında ele alınan bu yaklaşım, DIANA sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak uygulanmış ve elde edilen sonuçlar, analitik yöntemlerle bulunan verilerle karşılaştırılmıştır. Analitik yöntemler uygulama açısından her ne kadar pratik olsa da her farklı göçme mekanizması, yükleme durumu ve sınır şartı için yeni bir formülasyonun oluşturulması gerekliliği çalışmada dikkat çekilmektedir. Buna karşın, sayısal model bu tür sınırlamaları ortadan kaldırarak, düzlem dayanım ve göçme mekanizmalarının önceden tanımlamaya gerek duyulmadan tahmin

edilebilmesine olanak sağlamaktadır.

Chang vd. [15], H/L (yükseklik/genişlik) oranının ve ön basınç parametrelerinin değişken değerlerinin donatısız yığma duvarların iki yönlü eğilme kapasitesine (duvar yüzeyindeki maksimum basınç) etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle modellemeler gerçekleştirilmiştir. DIANA yazılımında birimler için 20 düğüm noktalı ikinci dereceden katı 6 yüzlü sonlu elemanlar ve arayüzeyler için 8 düğüm noktalı sıfır kalınlıklı kuadratik arayüz sonlu elemanları kullanılmıştır. Sayısal modellemenin kalibrasyonunda bu tez kapsamında da kullanılan S1 ve S3 duvarları dahil olmak üzere Vaculik'in toplam 8 duvarına (S1-S8) ait deneysel verilerden yararlanılmıştır. Ön basınç değeri 0 ile 0.5 MPa aralığında ve ara değerleri için analizler gerçekleştirilmiştir. Beklendiği gibi, ön basınç değerinin artmasıyla düzlem dışı eğilme kapasitesi artmış ve bu artış yaklaşık olarak doğrusal bir eğilim göstermiştir. Ancak H/L oranının 1 değerini aşmasından sonra H/L artışıyla düzlem dışı eğilme kapasitesinin artmasına rağmen süneklik ve maksimum yer değiştirme kapasitesi azalmıştır. Ayrıca, yalnızca H/L oranının artışı dikkate alındığında, düzlem dışı kapasitenin üstel biçimde arttığı belirlenmiştir. Bunlara ilaveten, ön basınç ile H/L oranının düzlem dışı kapasite üzerindeki etkilerinin birbirine bağlı olabileceği ifade edilmiştir.

Chang vd. [16], önceki çalışmasına benzer olarak, donatısız yığma duvarlarda bulunan boşlukların iki yönlü eğilme kapasitesine (duvar yüzeyindeki maksimum basınç) etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla makro, basitleştirilmiş mikro ve mikro modelleme yaklaşımlarının tümü kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. Ağ yapısı gibi diğerleriyle aynı şartlar altında oluşturulan makro modellemenin, yaklaşık 1 saat sürdüğü ve bu sürenin, basitleştirilmiş mikro ve mikro modellemelere kıyasla sırasıyla 4 ve 23 kat daha kısa olduğu ortaya konmuştur. Ancak makro modelin yumuşama davranışını yeterince yansıtamaması ve kırılmaların lokalize edilememesi gibi kısıtlar nedeniyle, hız avantajına rağmen analizlerde basitleştirilmiş mikro modelleme yöntemi tercih edilmiştir. Önceki çalışmayla aynı olacak şekilde, DIANA yazılımında birimler için 20 düğüm noktalı ikinci dereceden katı 6 yüzlü sonlu elemanlar ve arayüzeyler için 8 düğüm noktalı sıfır kalınlıklı kuadratik arayüz sonlu elemanları kullanılmıştır. Sayısal modellemenin kalibrasyonunda bu tez kapsamında da kullanılan Vaculik'in S1 ve S3 duvarları esas alınmıştır. Sonuçta; iki yönlü eğilme kapasitesinin ve buna bağlı olarak düzlem dışı yük kapasitesinin, boşluğun konumundan büyük ölçüde etkilenmediği, ancak yaklaşık %10 boşluk oranının üzerine çıkıldığında veya daha yüksek H/L oranlarında (yükseklik/genişlik) bu kapasitenin arttığı belirlenmiştir. Bunun sebebi olarak boşluk arttıkça oluşan çatlak sayısının arttığı ve bunun da daha fazla enerji

sönümü/yitimi oluşturduğu ileri sürmüştür. Ayrıca çalışmada, iki yönlü eğilme kapasitesinin tahmini için bir bağıntı da türetilmiştir.

Li vd. [17], basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğini ve bu modelleme tekniğinde kullanılan arayüzler için geliştirdikleri 3 boyutlu kohezif arayüz elemanlarını kullanarak yığma duvarların düzlem içi ve düzlem dışı yükler altındaki davranışını modellemişlerdir. Düzlem dışı yükler altında Vaculik'in S2 ve bu tez kapsamında da kalibrasyonu yapılan S1 duvarı kullanılmıştır. ABAQUS yazılımıyla genişletilmiş tuğla birimler için önceki çalışmalara benzer şekilde 8 düğüm noktalı tuğla elemanlar kullanılmıştır. Malzeme parametrelerinin önemli bir kısmının belirlenmesi için önceki paragraflarda bahsedilen aynı duvarı modelleyen Abdulla [9]'ın çalışması dikkate alınmıştır. Analiz sonuçları bu tez kapsamında olduğu gibi düşey eksende düzlem dışı mesnet tepkisi ve orta noktanın yer değiştirmesi dikkate alınarak yapılmıştır. Sonuçlar arayüzeylerde dikkate alınan genleşme yumuşamasının farklı değerleri için deney verileriyle karşılaştırılmış ve kalibrasyon hem başlangıç rijitliği hem de düzlem dışı yük kapasitesi anlamında önemli ölçüde sağlanmıştır. Ayrıca kırılma biçimleri de duvarın orta bölgelerinde farklılıklar olsa da kayda değer ölçüde yakalanabilmiştir.

Adhikari vd. [18], önceki çalışmasında bahsedilen yöntemin aynısını, yani basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğini kullanarak donatısız ve kuşatılmış yığma okul yapılarının modellemesini uygulamalı elemanlar yöntemiyle yapmışlardır. Uyguladıkları yöntemin kalibrasyonunu yine ELS yazılımını kullanarak ve literatürdeki düzlem içi ve düzlem dışı deneylerle gerçekleştirmişlerdir. Bu tez kapsamında da kullanılan Vaculik'in S1 duvarı düzlem dışı kalibrasyonda kullanılmıştır. Önceki paragrafta belirtilen çalışmadan farklı olarak bu kez malzeme parametrelerini açıkça belirtmişlerdir. Donatısız yığma yapıya ait birim hacim ağırlığı, basınç ve çekme dayanımı, elastisite modülü, kohezyon değeri ve sürtünme katsayısı gibi malzeme parametreleri kalibre edilmiştir. Kalibrasyon sürecinde kullanılan parametre değerlerine bakıldığında, deneysel çalışmada bildirilen değerlere kıyasla oldukça düşük seviyelerin tercih edildiği görülmektedir. Buna rağmen, model başlangıç rijitliği, düzlem dışı yük kapasitesi ve maksimum yer değiştirme değerleri çok iyi derecede kalibre edilmiş olup yük-yer değiştirme grafiği önceki çalışmadan biraz farklı olsa da yüksek doğrulukla elde edilebilmiştir. Elde edilen yük-yer değiştirme eğrisi, önceki çalışmadan bir miktar farklılık gösterse de genel eğilim açısından yüksek doğruluk sağlamıştır. Ayrıca, kırılma biçimi önceki çalışmadakine oldukça benzer şekilde, başarılı bir biçimde yakalanabilmiştir.

Chen vd. [19], basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğini kullanarak yığma duvarların yarı statik tek yönlü yanal yükleme ve patlama yüklemesi altında

düzlem dışı davranışını incelemiştir. İlk yükleme bu tez kapsamında dikkate alınan yükleme türü olup duvarların kalibrasyonu yine bu tez kapsamında kalibrasyon olarak kullanılan S1 ve S3 duvarları dahil olmak üzere Vaculik'in S1-S5 duvarları kullanılarak yapılmıştır. ANSYS LS-DYNA yazılımıyla, genişletilmiş birimler için 8 düğüm noktalı tuğla sonlu elemanları kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bünye modeli olarak Riedel-Hiermaier-Thoma malzeme modelinden yararlanılmış ve malzeme modelini kurarken birçok malzeme parametresi tanımı ya da varsayımı gerekmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, düzlem dışı yük kapasitesi tahminlerinde %18'e varan farklar ve 5 duvarın çoğunda başlangıç rijitliklerinde sapmalar olmasına karşın genel olarak analiz sonuçlarının deneysel bulgularla yeterli ölçüde uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca, sonlu eleman analizleriyle elde edilen kırılma biçimlerinin, deneysel gözlemlerle önemli ölçüde örtüştüğü belirtilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının hedefi, sabit eksenel yük ve düzlem dışı tek yönlü üniform basınç etkisi altındaki boşluksuz ve boşluklu donatısız yığma duvarların doğrusal olmayan davranışını sayısal olarak incelemek ve boşluk oranının duvarın düzlem dışı davranışına olan etkisini araştırmaktır. Bu bağlamda, 2. Bölüm'de donatısız yığma duvarlar hakkında genel bilgiler ile bu tür duvarların düzlem dışı davranışı ve deprem nedeniyle meydana gelen göçme biçimleri üzerinde durulmuştur. 3. Bölüm'de sayısal modelleme teknikleri ve bünye modelleri üzerinde durulmuş ve literatürde yer alan duvarlar dikkate alınarak önerilen sayısal modelin kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. 4. Bölüm'de ise önerilen ve bir önceki bölümde kalibre edilen sayısal model yardımıyla farklı boşluk oranları dikkate alınarak duvarın yük ve yer değiştirme kapasitesindeki değişimi incelemek üzere bir parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Tezin 5. ve son bölümünde, elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve yorumlanmıştır.

1.3 Hipotez

Yığma yapı elemanlarının doğrusal olmayan davranışlarının simülasyonunu yapmak üzere kullanılan bünye modellerinin büyük bir çoğunluğunun ihtiyaç duyduğu parametre sayısı oldukça fazladır. Anılan parametrelerin belirlenmesi ise ayrı bir problemdir. Bu tez kapsamında, düzlem dışı yüke maruz boşluklu/boşluksuz donatısız yığma duvarların yük taşıma kapasitesi ile yer değiştirme taleplerini belirlemek üzere uygun ve pratik bir bünye modeli ile uyumlu bir sayısal modelleme tekniği önerilmiştir. Makro modelleme yaklaşımı ve 2 parametreli bünye modeli olan genişletilmiş Drucker-Prager (EDP) malzeme modeli kullanılarak teknik literatürde yer alan duvarların 3 boyutlu doğrusal

olmayan sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, yeterli bir doğruluk derecesi ile duvarın doğrusal olmayan davranışının simüle edilebileceğine işaret etmektedir.

2
DONATISIZ YIĞMA DUVARLARIN DÜZLEM DIŞI DAVRANIŞI

Kubbe, tonoz, kemer ve duvar gibi elemanların bir araya gelmesiyle oluşan sistemler yığma yapılar olarak adlandırılır. Yığma yapıların en belirgin özelliği, basınç kuvvetlerine karşı yüksek dayanım göstermeleridir. Bu nedenle, taşıyıcı sistemleri genellikle basınca çalışacak şekilde düzenlenir. Ayrıca, deprem veya benzeri yatay yük etkileri altında da yapısal dengenin korunması temel tasarım hedeflerinden biridir (Şekil 2.1). Yığma duvarlar, yapının diğer taşıyıcı unsurlarını tamamlayıcı nitelikte olup, bu elemanlardan gelen yükleri güvenli bir şekilde mesnet noktalarına iletmekle görevlidir. Bu duvarların bir alt türü olan donatısız yığma duvarlar ise genellikle aralarına harç yerleştirilen tuğla, taş veya benzeri birimlerle oluşturulan, en sade ve temel yığma yapı elemanları arasında yer almaktadır (Şekil 2.2).

Donatısız yığma duvarların yapısal özelliklerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilebilmesi için, bu yapı elemanını meydana getiren malzemelerin özellikleri ile ilgili yapım teknikleri ilerleyen bölümlerde detaylı biçimde açıklanmıştır.

2.1 Genel Bilgiler

Donatısız yığma duvarlar, harçla birleştirilen tuğla, taş vb. birim malzemelerden oluşan ve herhangi bir donatı içermeyen geleneksel yapı elemanlarıdır. Bu tür duvarların taşıma kapasitesi ve genel davranışı, kullanılan malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri kadar, yapım sürecinde uygulanan tekniklere de bağlıdır. Yapının dayanım ve stabilite düzeyini doğrudan etkileyen temel faktörler arasında duvarın geometrisi, örgü düzeni, malzeme kalitesi, işçilik seviyesi, mesnetlenme şartları ve duvarın maruz kaldığı yükleme durumu yer almaktadır.

Donatısız yığma duvarların kompozit bir malzeme gibi çalışabilmesi için duvarın uygun bir örgü düzeniyle örülmesi gerekmektedir (Şekil 2.3). Özellikle kil tuğla

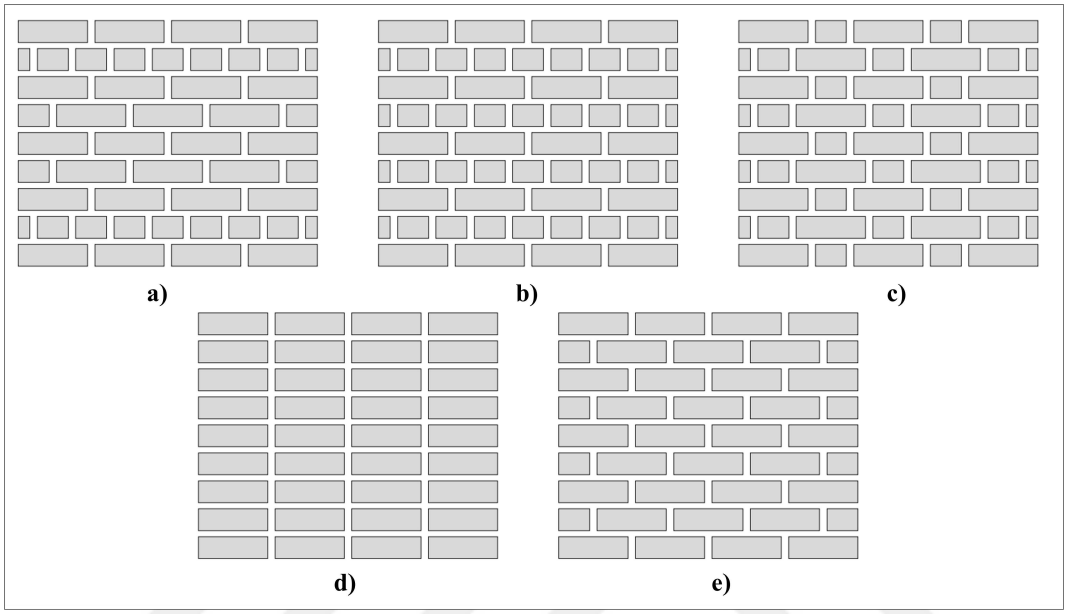


Şekil 2.1 Geyve Han, Bursa



Şekil 2.2 Donatısız yığma duvar

birimler kullanılarak tek tuğla kalınlıklı örülen duvarlarda en çok tercih edilen örgü düzeni, aralarındaki derzler üst üste gelmeyecek şekilde şaşırtmalı olarak dizilen "sedye örgü" tipidir (Şekil 2.3e). Bu örgü tipine Türkçe kaynaklarda "düz örgü" adı da verilmektedir. Bu örgü biçiminde tuğlalar, aralarındaki derzler üst üste gelmeyecek şekilde şaşırtmalı olarak dizilerek yük aktarımını daha etkili hâle getirerek duvarın dayanımını artırır.



Şekil 2.3 Duvar örgü biçimleri, a) Amerikan (veya adi) örgüsü b) İngiliz (veya çapraz) örgüsü c) Flaman örgüsü d) Yığın örgüsü e) Sedye örgü [20]

Donatısız yığma duvarların geometrisi, kalınlığı ve geometrik boşluklar düzlem dışı davranışını etkileyen önemli unsurlardır. Yapı içerisinde yer alan kapı, pencere gibi geometrik boşluklar, duvarın rijitliğini azaltarak düzlem dışı yükün düşmesine neden olabilir. Bu tür boşlukların konumu, boyutu ve dağılımı; oluşacak hasar mekanizmalarının şeklini de doğrudan etkileyebilir.

Donatısız yığma duvarların düzlem dışı yük kapasitesini ve kırılma davranışlarını etkileyen en önemli tasarım parametrelerinden biri de, mesnetlenme koşullarıdır. Örneğin, dört kenarından mesnetlenen duvarlar, düzlem dışı yükler altında daha yüksek taşıma kapasitesi sergilerken; yalnızca alt kenardan mesnetlenen duvarlar devrilmeye daha yatkındır. Mesnetlenme şekline bağlı olarak hem dayanım hem de kırılma mekanizmalarında önemli farklılıklar gözlemlenmektedir. Bu konuya ilişkin detaylı bilgiler 2.3 Düzlem Dışı Davranış başlığı altında verilmiştir.

2.2 Yapısal Malzemeler

Geleneksel yığma yapım tekniklerinde genellikle taşıyıcı sistemi oluşturan tuğla, taş, kerpiç ve harç gibi malzemeler kullanılmaktadır. Ancak bu bölümde, yığma

duvarların mekanik ve yapısal performansını doğrudan etkileyen iki temel malzeme olan tuğla ve harç malzemeler hakkında bilgi verilecektir. Yığma duvarlarda tuğla, birim eleman olarak taşıyıcı sistemin iskeletini oluştururken; harç, tuğla birimler arasında bağlayıcılık sağlayarak, duvarın tekdüze bir sistem gibi davranmasına olanak tanır. Malzeme özellikleri, üretim yöntemleri ve yapısal katkıları açısından bu iki bileşen, yığma yapı davranışının doğru modellenmesi ve analiz edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu bileşenler hakkındaki bilgiler alt başlıklarda kısaca özetlenmiştir.

2.2.1 Tuğla

Tuğla, esas olarak pişirilmiş topraktan üretilen bir malzeme olup, malzeme türü "seramik" olarak değerlendirilir [21]. Tuğlalar, genelde kil kullanılarak üretilirler (Şekil 2.4). Kil, ince taneli ve kolayca sıkıştırılabilir bir toprak türüdür. Ana bileşenini ise alüminyum silikat mineralleri oluşturur. Doğada yaygın olarak bulunan kil, saf halinde beyaz renkteyken, içeriğindeki doğal minerallere bağlı olarak kırmızı, kahverengi, sarı, gri ve siyaha yakın tonlarda da bulunabilir [22, 23].

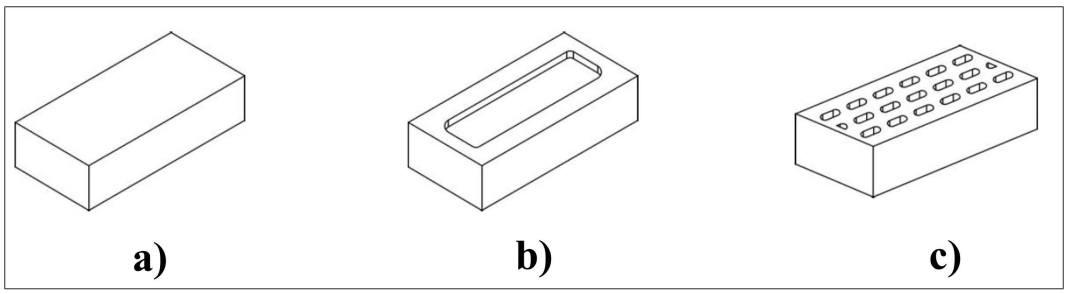


Şekil 2.4 Kil malzeme [24]

Kil malzemeye su verildiğinde plastik özellikler kazanır, sonrasında kurutulursa sert bir malzemeye dönüşür. Kil plastik özelliğini geometrik iç yapısına borçludur. Kilin iç yapısında bulunan levha halindeki geometrik yapı, su ilavesinde birbirleri üzerinde kayarak istenilen konuma getirilebilir. Ardından kurutulduğu takdirde şeklini büyük ölçüde korur [22, 23].

Yapı malzemesi olarak tuğla üretiminde, suya ilaveten ham madde olarak toprak kullanılır. Tuğlanın üretim sürecinde dayanım kazanabilmesi için yüksek derecelerde sıcaklık gereklidir. Bayülke [21], yapı tuğlalarının 950–1200 °C aralığında pişirildiğini belirtmektedir. Ayrıca, sert tuğla üretimi için en az 900–1000 °C sıcaklık gerekirken, harman ya da adi tuğlalar için yaklaşık 800 °C sıcaklığın yeterli olduğu vurgulanmıştır [21]. Sertliği yüksek olan tuğlalar daha dayanıklı ve

uzun ömürlüdür [25]. Tuğlalar, kalıplar yardımıyla istenilen biçimde şekillendirilir; bu şekillere bağlı olarak dolu, çukur ya da düşey delikli gibi farklı formlarda üretilebilir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Tuğla biçimleri a) Dolu b) Çukur c) Düşey delikli [26]

Tuğla, dışarıdan tamamen dolu gibi görünse de, yapısal olarak tamamen katı bir malzeme değildir. Üretim süreci nedeniyle içinde mikroskobik boşluklar bulunmaktadır. Bayülke'nin [21] ifade ettiğine göre, pişirme esnasında tuğla içerisinde birçok boşluklar, çatlaklar oluşmaktadır. Bu boşluklar tuğlanın pek çok fiziksel ve mekanik özelliğini etkileyen önemli bir unsurdur. Söz konusu boşluk oranı "porozite" olarak adlandırılmaktadır. Porozite, boşluk hacminin tuğlanın boşluklar dahil tüm hacmine oranı olarak tanımlanmaktadır. Sıvasız ve hava ile temas halinde olarak yapıda kullanılacak tuğlaların porozitesinin en fazla %15 olması gerektiği belirtilmiştir [21]. Porozitenin basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde; boşluk oranı %25'in üstü olan tuğlaların suyu emmesi sonucunda basınç dayanımlarının zamanla düştüğü ifade edilmiştir [21]. Yüksek su emme kapasitesine sahip tuğlalar, suya maruz kaldıklarında çatlama veya zayıflama olasılıklarının daha fazla olması nedeniyle taşıyıcı olarak pek tercih edilmezler [25]. Ayrıca, yüksek su emme kapasitesine sahip tuğlalar, harçtaki suyu hızlıca çekerek tuğla-harç aderansını azaltmakta ve bu durum, duvarın istenen kalitede örülmesini zorlaştırmaktadır [27]. Bu olumsuz durumu engellemek için tuğlalar duvar yapımına başlamadan önce ıslatılmalıdır [28].

Yapı mühendisliği kapsamında, tuğlanın mekanik özelliklerinden en önemlileri basınç dayanımı, elastisite modülü, çekme dayanımı ve poisson oranı olarak sıralanabilir. Tuğlalar, betona benzer şekilde, basınç dayanımları yüksek ve çekme dayanımları düşük malzemelerdir. Basınç dayanımı deneysel olarak kolaylıkla belirlenebildiği için diğer mekanik parametreler genellikle istatistiksel olarak bu değere bağlı oranlarla ifade edilmektedir. Örneğin çekme dayanımı literatürde yüksek varyasyonlar göstermekte olup basınç dayanımının %3 ila %10'u aralığında alınabilmekte, bazı çalışmalarda ise %1'i kadar kabul edilmektedir [2, 29]. Elastisite modülü de benzer şekilde yüksek değişkenlikler göstermekte olup basınç

dayanımının 500 ila 1000 katı arasında tanımlanabilmektedir [30]. Poisson oranı ise 0.18 ile 0.25 arasında arasında değişmektedir [21]. Yığma duvarların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan makro modelleme yaklaşımlarında bu tür malzeme özelliklerine dayalı benzer tanımlamalar dikkate alınmaktadır (bkz. 3.5 Deney Duvarlarının Modellenmesi)

2.2.2 Harç

Yığma yapı birimlerini birbirine bağlayan malzeme harçtır (Şekil 2.6). Yığma yapıda harç teknik anlamda, "örme, derz oluşturma ve derz doldurma işleri için, bir veya daha fazla sayıda inorganik bağlayıcı, agrega ve suyun, bazı durumlarda mineral ve/veya kimyasal katkılar da eklenerek hazırlanan karışım" olarak tanımlanmaktadır [31].



Şekil 2.6 Harcın tuğla duvar örümünde kullanımı [32]

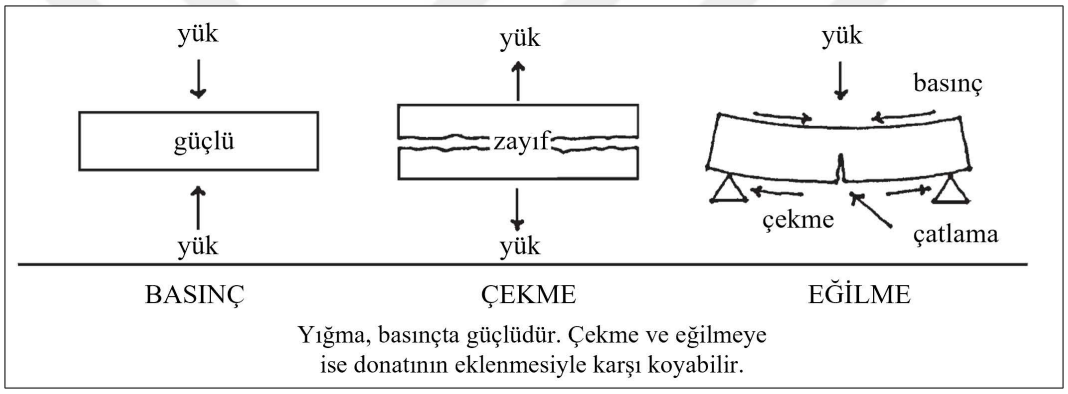
Harçların yükleri dağıtmak, düzgün bir yük akışı sağlamak, yığmanın tek bir eleman gibi çalışmasını sağlamak gibi önemli görevleri vardır. Ayrıca yığma birimlere kıyasla yüksek çekme mukavemetleri nedeniyle yığma elemanın çekme zafiyetini bir ölçüde gidermektedir.

Su ile reaksiyona girerek sertleşen hidrolik bağlayıcılardan biri olan çimentolu kireç harcı; çimento, kum ve kirecin belirli oranlarda karışımıyla elde edilir. Bayülke'nin [33] ifade ettiğine göre, yığma yapıların duvarlarında çoğunlukla çimentolu kireç harcı kullanılmaktadır. Kireç, su tutma özelliğiyle harcın sertleşmesini sağlarken, çimento ise karışımın dayanımını artırmaktır. Yavaş sertleşen çimentolu harç karışımı özellikle yığma duvarı örme hızı düşünüldüğünde uygun bir priz süresi sunar [33].

Tuğla bölümünde de bahsedildiği üzere harçtaki suyun tuğla tarafından hızla emilmesi, yığma duvar duvar yapımındaki en büyük sorundur. Kil ve kireç içeren su tutucu harç ve iyi pişmiş tuğlaların kullanılması bu temel sorunun önüne geçilmesinde fayda sağlamaktadır [21, 33]. Aksi durumda, harcın suyunu yitirmesi halinde, harç bir nevi yanarak istenilen dayanım seviyesi elde edilemez [21]. Ayrıca bu durum tuğla ile harç arasındaki aderansı da olumsuz etkileyerek duvarın kompozit olarak çalışmasını engellemeye çalışır.

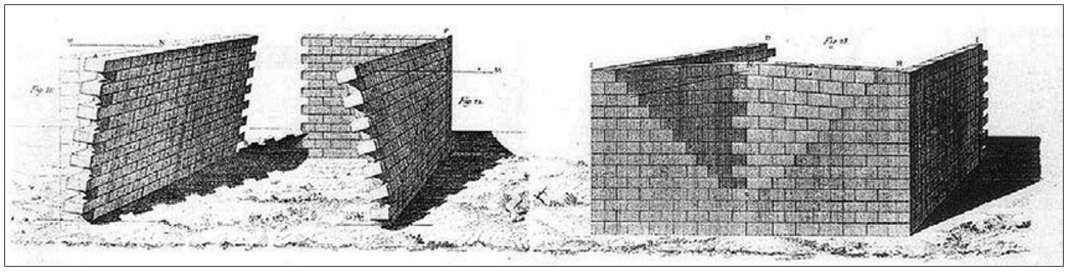
2.3 Düzlem Dışı Davranış

Donatısız yığma yapılar, basınç kuvvetlerine karşı güçlü, ancak çekme ve eğilme etkileri altında zayıf bir davranış gösterirler (Şekil 2.7). Düşük düzeydeki yanal yükler duvarın kendi ağırlığı tarafından karşılanırken kesme ve eğilme gerilmeleri sadece harç ve birimler arasındaki aderans (bağ) tarafından karşılanır [34].



Şekil 2.7 Yığmanın basınç, çekme ve eğilme davranışları [34]

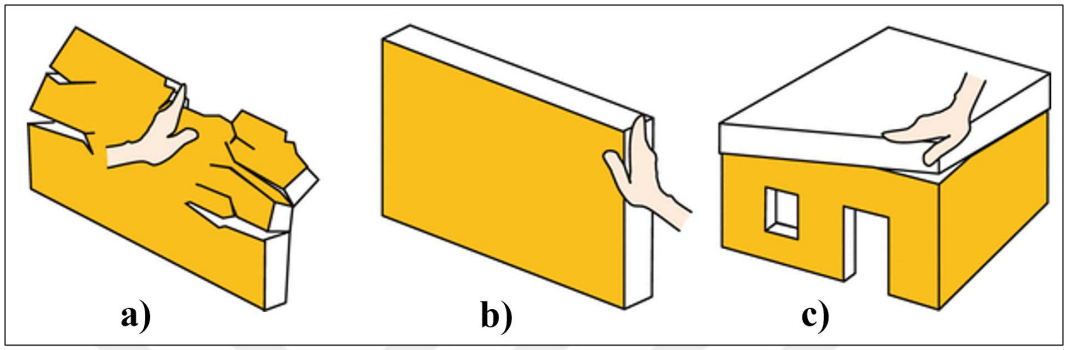
Yığma duvarların düzlem dışı hareketini anlamak için yapılan çalışmalar yüzyıllar öncesine dayanmaktadır [35].Bu konudaki örneklerden biri olan Rondelet'in çizimleri Şekil 2.8 ile gösterilmiştir [35].



Şekil 2.8 Rondelet'in çizimlerinde düzlem dışı yatay etkiler altında yığma duvarların göçme mekanizmaları [35]

Yığma yapıların yanal yükler altındaki davranışını anlamada kutu davranışı kavramı temel kabullerden biridir. Bu kabul, elemanların birleşimlerinin doğru yapılmasıyla geçerli olabilmektedir. Yığma yapı elemanları doğru birleşimlerle özellikle

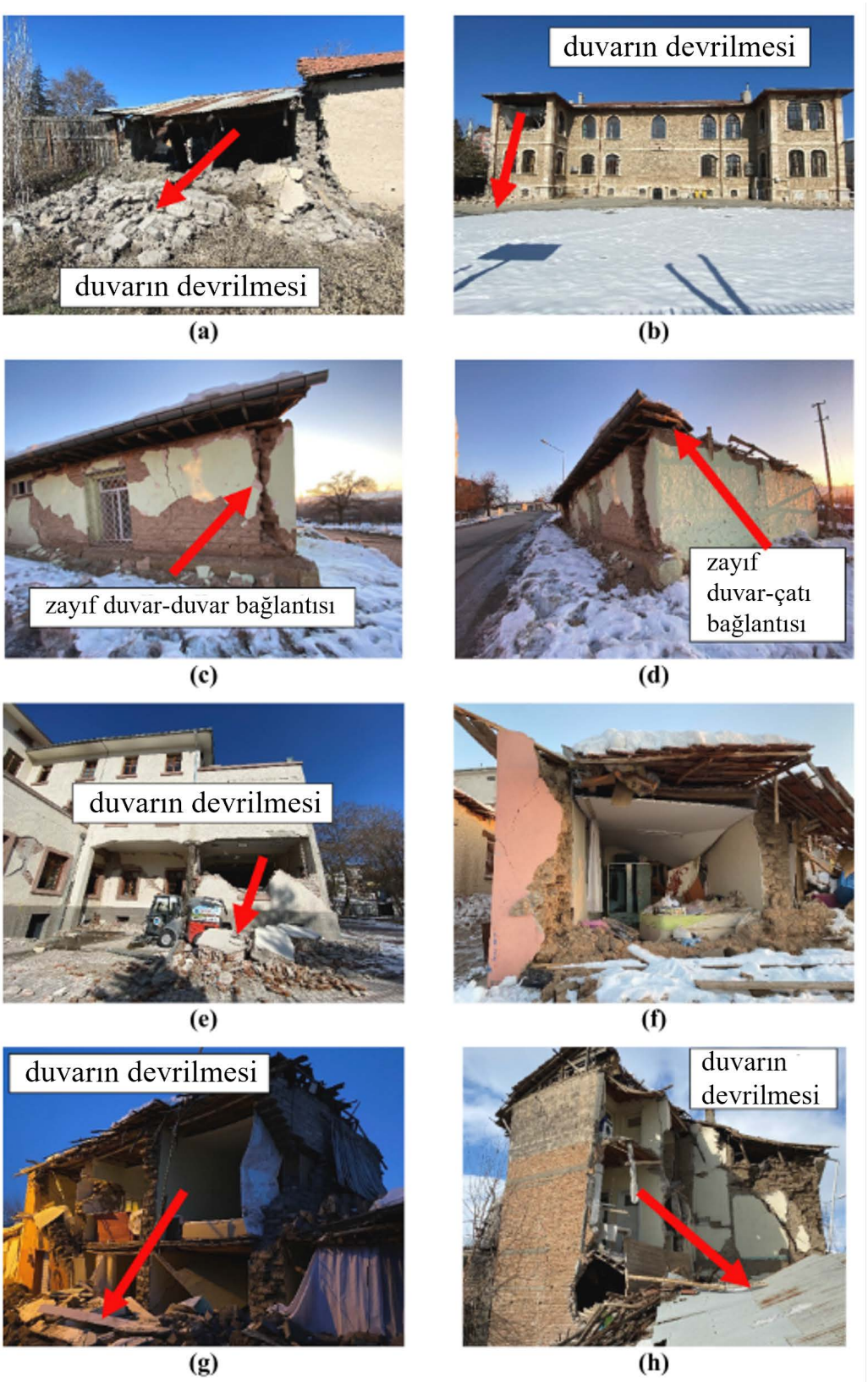
köşelerde birbirine ve kat döşemesine veya çatıya bağlandığı durumda, Şekil 2.9c ile gösterildiği gibi kutu davranışı yapacak şekilde etkileşim halinde olurlar. Kutu davranışı şartlarının sağlanması halinde duvarlar düzlem içi çalışmaya meyilli iken tersi durumda düzlem dışı zorlanmalar daha etkili olmaya başlar [36]. Şekil 2.9a ile verilen durumda kutu davranışı sağlanamayan bir duvarın düzlem dışı göçmesi gösterilmiş, Şekil 2.9b ile işaretlenen durumda ise kutu davranışı sonucu duvarın daha çok düzlem içi yüklerin etkisinde davrandığı anlatılmak istenmiştir.



Şekil 2.9 Yığma yapılarda kutu davranışı, a) Düzlem dışı, b) Düzlem içi c) Kutu davranışı [36]

Yığma duvarları yatay yüklemeye maruz bırakan ve Şekil 2.9'da gösterildiği gibi düzlem içi veya düzlem dışı etkiler oluşturan en önemli olaylardan biri depremlerdir. Bu konu kapsamında, yakın tarihte ülkemizde meydana gelen 2023 Kahramanmaraş Depremleri, yıkıcı etkileri ile tarihe geçen felaketler arasında yer almaktadır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın yayımladığı deprem raporuna göre, ülkemizde 6 Şubat 2023 tarihinde Türkiye saati ile 04:17'de Pazarcık merkezli Mw 7.7 (odak derinlik=8.6km) ve 13:24'te Elbistan merkezli Mw 7.6 (odak derinlik=7km) büyüklüklerinde iki büyük deprem meydana gelmiştir. Bu depremlerin ardından 20 Şubat 2023 tarihinde 20:04'te merkez üssü Hatay Yayladağı olan Mw 6.4 büyüklüğünde üçüncü bir deprem daha meydana gelmiş ve 11 ili etkilemiştir. Söz konusu depremlerde 48 bini aşkın can kaybı yaşanmış, 500 binden fazla bina ise ağır hasar görmüştür. Bu depremler şiddet ve kapsadığı alan açısından bakıldığında yakın tarihte eşi benzeri olmayan felaketlerdir [37]. Kahramanmaraş depremlerinde yığma binalarda farklı yapısal zafiyetlerden kaynaklı hasarlar görülmüştür. Örneğin, Şekil 2.10'de 6 Şubat Kahramanmaraş depremleri sonrasında yığma yapılarda yapılan incelemelerde meydana gelen düzlem dışı göçme mekanizmaları ve bunlara neden olan yapısal eksiklikler sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 2.11'de duvar bağlantılarının yetersizliği nedeniyle düzlem dışı kuvvetlerin etkisiyle oluşan göçmelerden etkilenen bazı yığma yapı örnekleri gösterilmiştir.

Donatısız yığma duvarların düzlem dışı davranışı üzerinde birinci dereceden etkili



Şekil 2.10 Yığma duvarların düzlem dışı göçme mekanizmaları ve nedenleri [38]

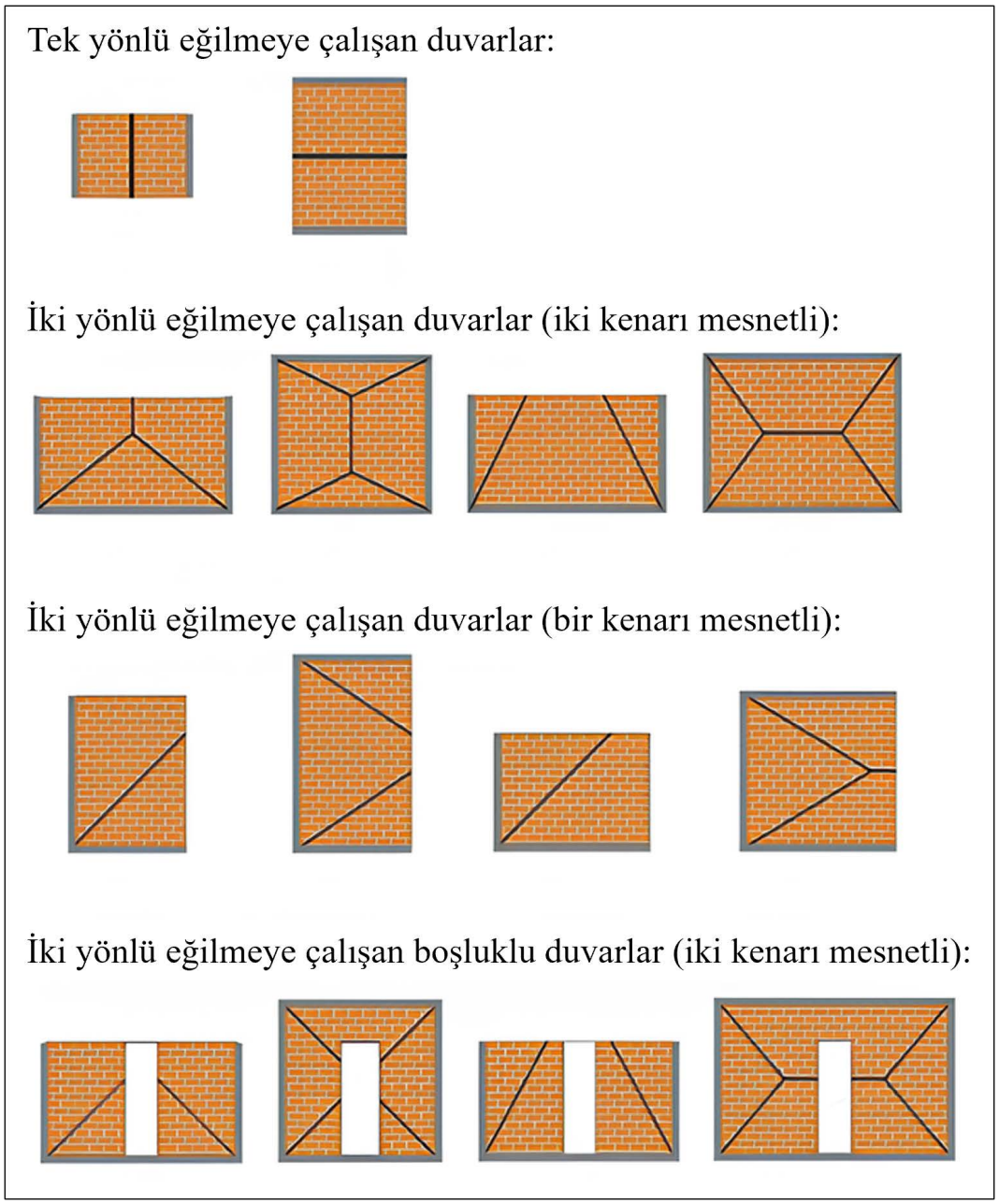


Şekil 2.11 Yeterli mesnetlenmelerin olmaması nedeniyle yığma duvarlarda meydana gelen göçmeler [39]

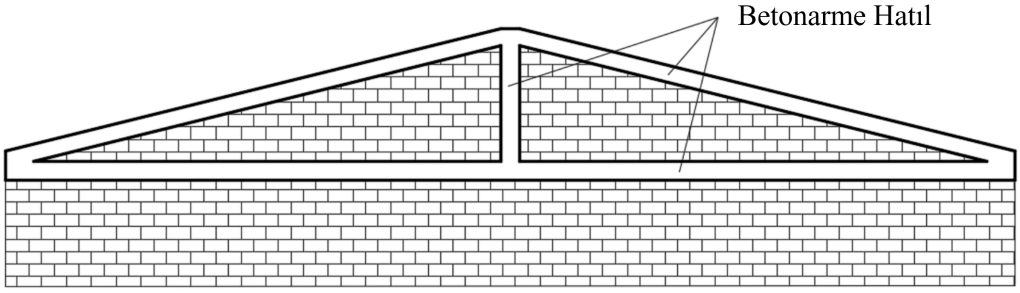
olan parametreler mesnetlenme şartı, en-boy oranı, duvar üzerinde boşluk olup olmaması olarak özetlenebilir. Bu parametrelerin mekanizma durumları (kırılma biçimleri) üzerindeki etkisi Şekil 2.12'de verilmiştir. Görüleceği üzere donatısız yığma duvarlar; karşı iki mesnet serbest ve diğer iki mesnet tutulu olması durumunda tek yönlü eğilmeye maruz kalmakta, diğer durumlarda iki yönlü eğilme etkisi altında olmaktadır. Burada kırılma/akma çizgileri ideal bir şekilde verilmiştir. Deneylerde görülmektedir ki kırılma çizgileri genelde tuğla – harç arayüzden zikzak yapacak şekilde tuğlaları atlayarak geçmektedir. Tuğlanın kırılma dayanımının daha düşük olduğu durumlarda kırılmaların tuğla yüzeylerinden geçecek şekilde olduğu da görülmektedir.

Ayrıca Şekil 2.12'de yer almayan ama sadece alt kısmından mesnetli olarak konsol çalışan kalkan duvarlarından da burada bahsetmek gerekir. Kalkan duvarları yığma yapıların en üst katlarında bulunan ve düzlem dışı devrilmeye karşı en korunaksız duvarlardır. Bu yüzden TBDY'de bu durumun engellenmesi için kalkan duvarın yüksekliği 80 cm'den büyük ise Şekil 2.13'deki gibi düşey ve yatay hatılların yapılması önerilmektedir [5]. Bu sayede duvara mesnet eklenmekte, sistem hiperstatik hale getirilmekte ve düzlem dışı yük artırılmaktadır.

Düzlem dışı davranışta birinci öneme sahip olan mesnet şartlarının etkisini araştıran bir çalışma Brandonisio vd. [40] tarafından yapılmış ve bu konuyu özetleyen bir

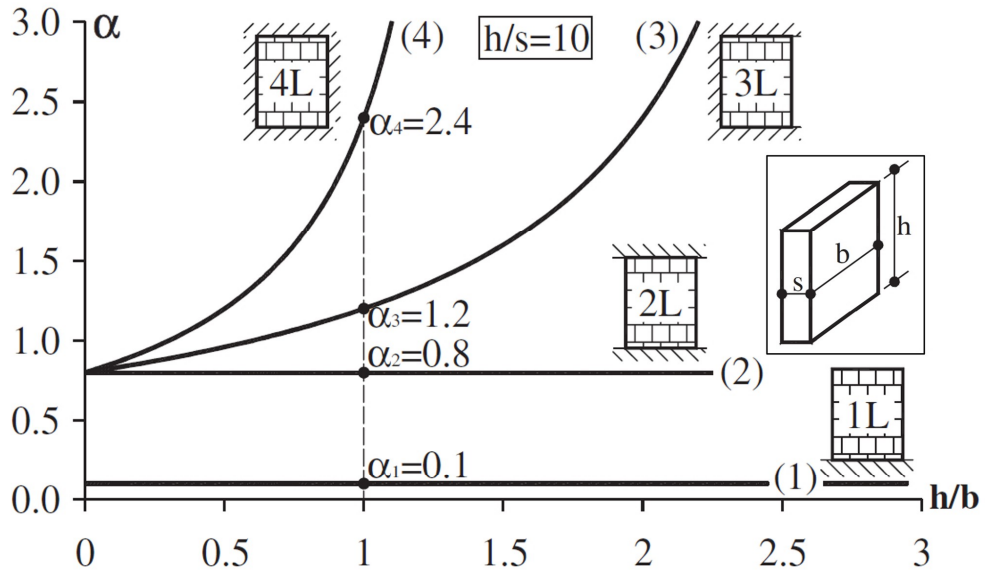


Şekil 2.12 Yığma duvarların mesnet şartlarının kırılma biçimlerine etkisi [6]



Şekil 2.13 Kalkan duvara hatıl eklenmesi [5]

grafik Şekil 2.14'te sunulmuştur. Çalışmada yükseklik/kalınlık (h/s) oranı 10 olarak sabit tutulmuş, yükseklik/genişlik (h/b) oranı ve mesnet şartlarının etkisinin düzlem dışı davranış üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Şekil 2.14'de düşey eksende göçme katsayısı olarak verilen α ile maksimum düzlem dışı yükün duvarın kendi ağırlığına oranı verilmiştir. Şekil 2.14'ten okunabileceği üzere, sadece alttan mesnetli durum ile sadece alt ve üstten mesnetli durumlarda düzlem dışı yük kapasitesi h/b oranından bağımsızdır. Yalnız (2) ile gösterilen durumda düzlem dışı yük kapasitesinin 8 katına çıktığını görmek mümkündür. Ayrıca yalnız bir yan kenarı mesnetsiz durum ile tüm kenarları mesnetli durumlardaki düzlem dışı yük kapasitesi h/b oranıyla artmaktadır. h/b oranının 1'e eşit olduğu durumda yalnız bir kenarı serbest duvar ile tüm kenarları mesnetli duvarın düzlem dışı yük kapasiteleri iki yan kenarı serbest duvarınkine göre sırasıyla 1.5 kat ve 3 kat daha fazladır. Aynı çalışmada düzlem dışı yük kapasitesinin artan duvar kalınlığıyla, tahmin edilebileceği üzere, artacağı grafiklerle gösterilmiştir. Çünkü artan duvar kalınlığı duvarın narinlik oranını düşürecek, eğilme rijitliğini arttıracak ve bu da düzlem dışı yük kapasitesinin artmasına yol açacaktır.



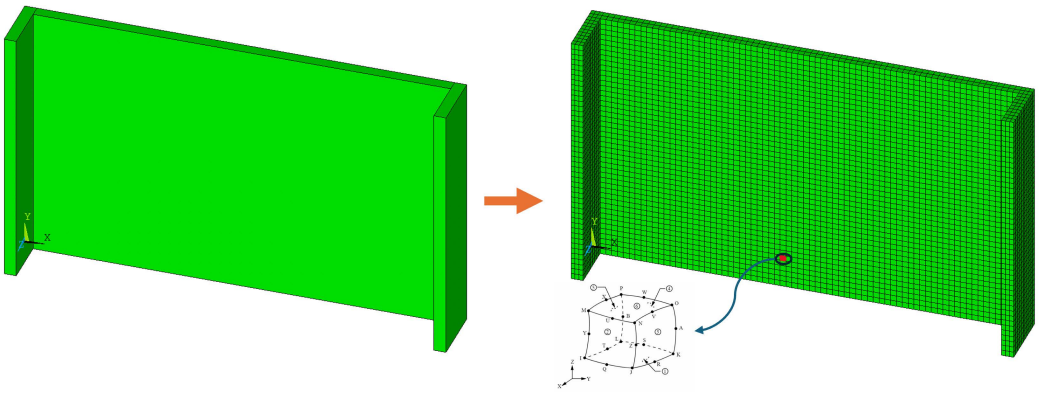
Şekil 2.14 Mesnet şartlarının düzlem dışı yük kapasitesine etkisi [40]

3
YIĞMA DUVARLARIN SAYISAL ANALİZİ

Sayısal analiz, mühendislik problemlerinin çözümü için gerekli olan matematiksel bağıntıların yaklaşık çözümünü veren algoritmaları irdeler. Yapı mühendisliğinde belirli koşulları haiz (malzeme özellikleri, sınır şartları vb.) yapı sistemlerinin farklı dış etkiler altındaki davranışının belirlenmesi için sıkça kullanılan sayısal analiz yöntemlerinden biri "Sonlu Elemanlar Yöntemi"dir.

3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), çeşitli mühendislik problemlerine kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan bir sayısal çözüm yöntemidir. Mühendislik biliminde karmaşık problemlerin çözümü için oldukça sık kullanılmış olan ve esası enerji prensiplerine dayanan yöntem, özellikle son yıllarda bilgisayarların hızlı gelişimine paralel olarak oldukça büyük bir hızla gelişmiş ve popüler hale gelmiştir. Yöntemde, sürekli veya süreksiz bir ortam fiktif sınırlarla sonlu sayıda elemana bölünür; üçgen, dörtgen, paralelkenar... gibi. Elemanın şekli, söz konusu ortamın şekline, sınır şartlarına bağlı olarak seçilir (Şekil 3.1). Elde edilen sayısal çözüm belirli bir yakınsaklık içinde kesin çözüme dair bilgi verir.



Şekil 3.1 Geometrisi oluşturulan bir modelin sonlu elemanlara ayrılması

Sonlu elemanlar yönteminin temellerinin ilk olarak 1940 yılında Alexander Paul Hrennikoff [41] tarafından atıldığı kabul edilir. Alexander Paul Hrennikoff,

"Eklemli çerçeve yöntemi ile plakaların düzlemsel gerilmesi ve eğilmesi" adlı doktora tezinde yöntemin fikir ve gelişiminin orijinal olduğunu, bununla beraber Profesör Hardy Cross'un moment dağıtım yöntemini arka plan olarak kullanmış olduğunu söylemektedir [41]. Bunu takiben, Richard Courant titreşim problemlerini çözmek için üçgen sonlu elemanların kullanıldığı bir makale kaleme almıştır [42].

Sonlu elemanlar yöntemi ilerleyen yıllarda geliştirilmiş ve pratikte kullanımı görülmeye başlanmıştır. Yöntemin ilk kullanımları havacılık sektöründe görülmüştür [43, 44]. Bu konunun nedenini açıklamak üzere, teknolojik ve bilimsel gelişmelerin ilk havacılık ve uzay endüstrilerinde kullanılıp sonra genel kullanım kazandığı gerçeğini burada ifade etmek gerekir. Sonlu elemanlar yönteminin gelişim süreci; Ioannis Argyris, Leonard Oganesyan, Feng Kang, John Argyris M. J. Turner, H. C. Martin, L. J. Topp, Ed Wilson ve burada sayılamayacak daha birçok bilim insanı tarafından katkı verilerek günümüze kadar getirilmiştir [43, 45].

Yığma yapılarda sonlu elemanların kullanımı 1970'li yılların sonlarında başlamıştır. 1978 yılındaki öncü çalışmasında Page [46]; derz çatlamaları, derzlerde kayma, birimlerin çatlaması, yığma malzemenin ezilmesi gibi olası hasar mekanizmalarını içeren kapsamlı bir model geliştirmiştir [35]. Bunu takip eden yıllarda, Ali ve Page [47] tarafından tekil/konsantre yüklere maruz yığma duvarların doğrusal olmayan davranışı incelenmiştir. Bahsedilen iki çalışmada da düzlem içi etkiler dikkate alınmıştır. Yığma yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerde yakın zamana kadar düzlem dışı davranışa dair çok az çalışma yapılmıştır [35].

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan doğrusal analizlerin temelinde Denklem 3.1 ile verilen bağıntı yer almaktadır [48].

$$[K]\{u\} = \{F\} \tag{3.1}$$

Burada $[K] = \sum_{m=1}^{N} [K_e]$ olarak "N" elemanlı bir sistem için hesaplanır ve toplam rijitlik matrisi olarak tanımlanır. $\{u\}$ yer değiştirme vektörüdür. $\{F\}$ ise toplam yük vektörünü ifade eder [48].

Şekil değiştirme vektörü yer değiştirmelere bağlı olarak Denklem 3.2 ile ifade edilir.

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u\} \tag{3.2}$$

Burada $[B]$, eleman şekil fonksiyonlarına bağlı olarak yazılan şekil değiştirme – yer değiştirme matrisidir.

Gerilme vektörü ise şekil değiştirmeler cinsinden Denklem 3.3 ile yazılabilir.

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \tag{3.3}$$

Burada $[D]$ malzemenin elastisite ve kayma modülü ile poisson oranına bağlı malzeme matrisini ifade eden gerilme – şekil değiştirme veya elastisite matrisidir.

Sonuçta rijitlik matrisi, hacim üzerinde integralle "N" elemanlı bir sistem için Denklem 3.4 ile tanımlanır.

$$[K] = \sum_{m=1}^{N} \int_{V} [B]^{T} [D] [B] d(V) \tag{3.4}$$

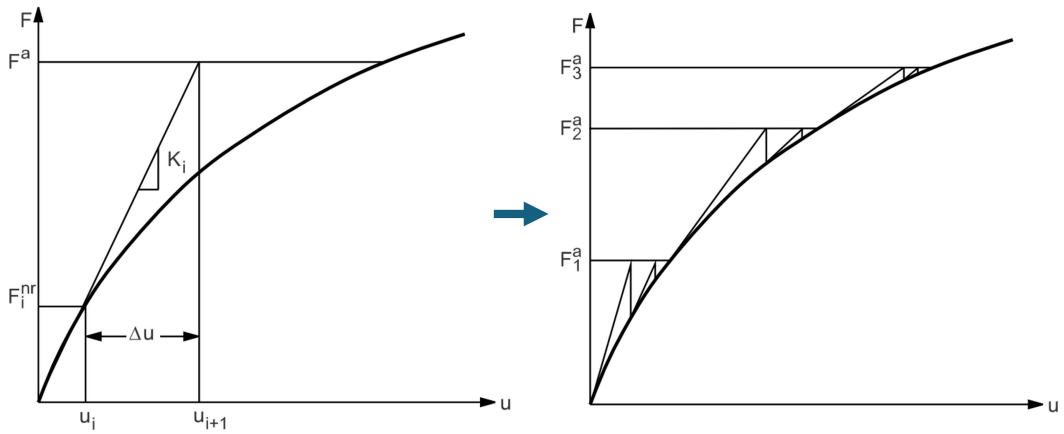
Malzeme veya geometri ölçeğinde doğrusal olmayan bir yapıya sahip sistemlerin çözümlerinde elastik ötesi analize ihtiyaç duyulur. Rijitlik matrisi, $[K]$, yer değiştirme vektörünün, $\{u\}$, bir fonksiyonu olarak yazıldığı durumlarda doğrusal olmayan davranış söz konusu olur [48]. Bu tür doğrusal olmayan davranış gösteren sistemlerin çözümü için ardışık yaklaşım yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın kullanılanı Newton-Raphson yöntemidir. Tez kapsamında sadece malzeme bazında doğrusal olmayan davranış dikkate alınmış olup bunu dikkate alan geliştirilmiş Newton-Raphson yöntemi Denklem 3.5 ile verilmiştir (Şekil 3.2).

$$\left\{K_{n,i}^{T}\right\} \{\Delta \mathrm{u}_i\} = \{F_n^a\} - \left\{F_{n,i}^{nr}\right\} \tag{3.5}$$

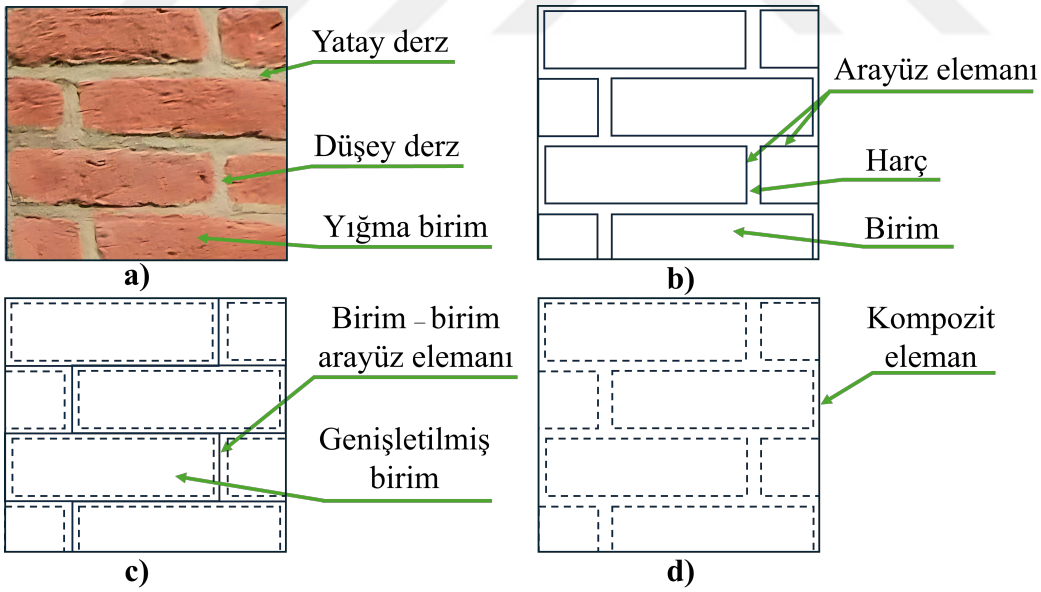
Burada; $\left\{K_{n,i}^{T}\right\}$, n. zaman adımı için i. yinelemenin tanjant rijitlik matrisi, $\{F_n^a\}$, n. zaman adımında uygulanan toplam kuvvet vektörü, $\left\{F_{n,i}^{nr}\right\}$ ise n. zaman adımında i. yinelemenin geri yükleme kuvveti vektörünü ifade eder. $\{\Delta \mathrm{u}_i\}$ yinelemeler arasındaki yer değiştirmeyi ifade etmekte olup Şekil 3.2 üzerinde gösterilmiştir. Tüm bu süreçleri ifade eden prosedür Şekil 3.2 ile özetlenmiştir.

3.2 Yığma Duvarlarda Sayısal Modelleme Teknikleri

Yığma yapıların sonlu elemanlar yöntemi ile çözümünde üç farklı sayısal modelleme tekniğinden bahsedilebilir: detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme tekniği (Şekil 3.3).



Şekil 3.2 Newton-Raphson Yöntemi



Şekil 3.3 Modelleme yaklaşımları a) Yığma duvar kesiti b) Detaylı mikro modelleme c) Basitleştirilmiş mikro modelleme d) Makro modelleme

Modelleme tekniklerinden ilki; tuğla birim, harç ve birim - harç birimin ayrı ayrı modellendiği detaylı mikro modellemedir. Birimler ve harçlar sürekli elemanlarla modellenir, ancak birim - harç arayüzleri süreksiz elemanlarla temsil edilir [2]. Bu yöntem, duvarların global davranışını anlamanın yanı sıra yerel olarak meydana gelen davranış biçimlerini değerlendirmek için anlamlı sonuçlar sağlar.

İkinci teknik, tuğla birimlerin ve harç ile birim-harç arayüzlerinin bir araya getirilerek oluşturulan "ortalama" arayüzlerin dikkate alındığı basitleştirilmiş bir mikro modelleme yöntemidir [2]. Tuğla birimleri, harcın iki tarafında harç kalınlığının yarısı kadar genişletilir. Genişletilmiş birimlerde sürekli elemanlar kullanılırken, harç ve birim-harç arayüzü sürekli olmayan elemanlar halinde bir araya getirilmiştir [2].

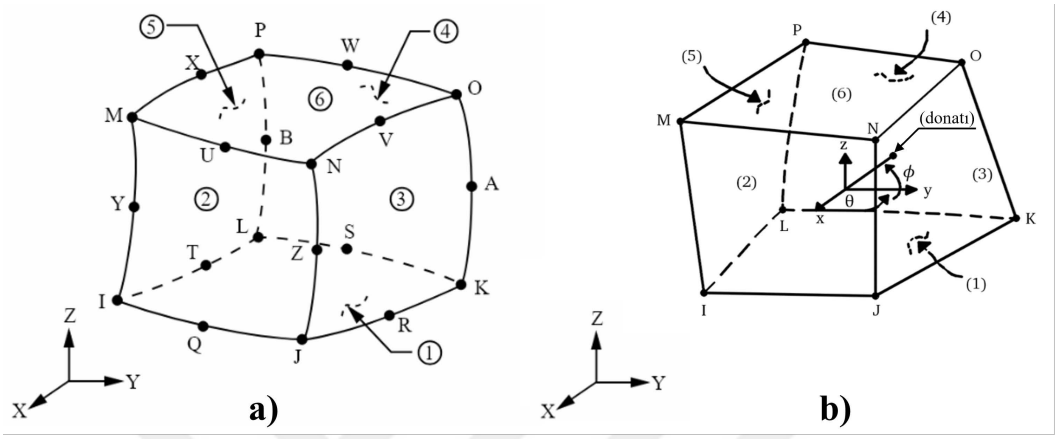
Makro modelleme tekniği ise birimleri, harçları ve birim-harç arayüzlerini tek bir homojenleştirilmiş sürekli malzeme olarak tanımlamaktır. Bu basitleştirme, söz konusu diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında hesaplama maliyetini büyük ölçüde azaltmaktadır [16]. Makro modelleme yaklaşımı diğer yöntemlere kıyasla daha pratik odaklıdır, kullanıcı dostu ağ oluşturma özelliklerine sahiptir ve analiz için daha az zaman gerektirir [2]. Bu yaklaşım, global davranışı ve bazı göçme mekanizmalarını ortaya koymak, maksimum yük ve maksimum şekil değiştirme/yer değiştirme değerlerini belirlemek için kullanılır [49]. Bu tez kapsamında da bu modelleme tekniği tercih edilmiştir.

3.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yığma Duvarların Analizi

Sonlu elemanlar yöntemi ile yığma duvarların analizinde, sayısal modeli oluşturulan duvarın davranışını doğru şekilde yansıtacak uygun bünye modeli ve bu model ile çalışacak uygun sonlu eleman tipinin seçimi önemlidir.

Yığma duvarlarda kullanılan sonlu eleman tipleri genelde küp şekli veya sekiz yüzlü diye tabir edilebilecek "hexahedron" elemanlardır. Bu elemanlar serbestlik derecelerine ve bu serbestliklerin konum ve özelliklerine göre birbirinden ayrışırlar. Şekil 3.4'te ANSYS yazılımında yığma duvarlar için sıklıkla kullanılan 2 sonlu eleman tipi verilmiştir. Tez kapsamında SOLID186 sonlu eleman tipi kullanılmıştır. SOLID186, 20 düğüm noktalı ve her bir düğüm noktasında 3 yönde (X, Y, Z) öteleme serbestliğine sahip bir sonlu eleman tipidir [50]. Diğer eleman tipi olan SOLID65'de ise 8 düğüm noktası ve her bir düğüm noktasında yine 3 yönde öteleme serbestliği vardır. Diğer yandan, tez kapsamındaki modellemelerde kullanılan SOLID186 sonlu eleman tipinin belki en önemli özelliği yığma yapılar gibi neredeyse sıkıştırılamaz bir halde olan malzemelerin analizinde meydana gelebilecek "hacimsel ağ kitlemesi"ni engellemesidir. Bu özellik SOLID65'de

bulunmamaktadır. Buna rağmen, SOLID65 eleman tipi ve benzerleri düzlem içi etkiler altında başarılı sonuçlar vermiştir [51–56]. Düzlem dışı davranış söz konusu olduğunda ise SOLID65 ve benzeri eleman tipleri yetersiz kalmaktadır. Tez hazırlığındaki analiz çalışmalarında SOLID65 sonlu eleman tipi ve buna uygun klasik Drukcer-Prager malzeme modeliyle yapılan çok sayıda analiz gerçeği yansıtmayan ve deney verileriyle uyuşmayan sonuçlar vermiştir.



Şekil 3.4 Yığma yapılar için kullanılan sonlu eleman tipleri a)SOLID186 b)SOLID65 [50]

Yöntemin uygulanmasında önem verilmesi gereken noktalardan biri de sonlu elemanların boyutlarına karar verip uygun sonlu eleman ağını oluşturmaktır. Ağ boyutu çok küçük seçildiği durumda düğüm noktası sayısı artmakta ve analiz süresi oldukça uzamaktadır. Çok büyük seçilirse de davranış tam olarak yansıtılamamakta ve uygun olmayan sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Bu optimum noktayı bulma prosedürüne “ağ hassasiyeti analizi" denilmektedir. Yığma duvarların düzlem dışı analizinde yaklaşık kalınlığın yarısı kadar uzunluğa sahip bir ağ yapısı oluşturmak optimum çözüm olabilmektedir.

Yığma yapılar doğası itibarıyla malzeme özelliklerinin tam ve doğru olarak belirlenmesi zor olan yapılardır. Modellemelerde basit, sade ve pratik yolların tercih edilmesi tavsiye edilir. Malzeme modellerinde de benzer bir düşünceyle, olabildiğince basit ve az parametreli yöntemlerin kullanılması pratik ve sonuç odaklı yaklaşımlarda tercih edilir [49, 57, 58].

3.4 Bünye modelleri

Bu bölümde ele alınacak bünye modelleri, elastoplastik malzeme davranışı kabulüyle yükleme hızından bağımsız plastisite teorilerini esas alacaktır. Bünye modelleri, farklı yükleme koşulları altında malzeme davranışını gerilme ve şekil değiştirme arasındaki matematiksel ilişkiyle tanımlar [59].Bunların uygulanma alanı olan malzeme modelleri, uygulanan bir yüke yanıt olarak malzemenin

beklenen davranışının sürekli bir matematiksel gösterimi olup malzemenin mekanik özellikleriyle sergilenen yapısını temsil eder [60]. Bünye modelleri içerisinde, yığma gibi malzemelerin matematiksel temelleri için plastisite teorisine dayanan modeller öne çıkmaktadır.

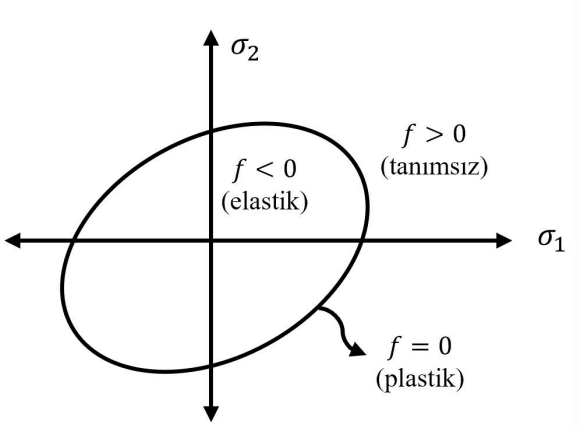
De Souza Neto vd. [61], plastisite teorilerinin kökenleri 19. yüzyılın ortalarına kadar uzandığını ve bu teorinin, özellikle 20. yüzyılın ilk yarısındaki gelişmelerle bugün sağlam matematiksel temellere oturduğunu belirtmektedir. Ayrıca plastisite teorisinin, katı cisim malzemelerin bünye modellemesinde en başarılı teorilerden biri olarak görüldüğünün altını çizmişlerdir. Sonuçta beton, kil malzeme, kaya nevi malzemeler gibi birçok mühendislik malzemesi geniş bir yelpazede birçok durum için pratiklik açısından plastisite teorisiyle çözümlenebilir [61]. Yığma malzeme de bu kategoriye girdiği için en pratik ve kullanışlı bünye modellerinden olan Drucker-Prager akma kriterini temel alan Genişletilmiş Drucker-Prager (EDP) malzeme modeli kullanılacaktır. EDP malzeme modeli yığma malzemenin makro modellemelerdeki davranışını iyi yansıtabilmekte ve az sayıda malzeme parametresi gerektirmektedir. Bu yüzden tez kapsamında EDP malzeme modeli seçilmiştir. EDP malzeme modelini açıklamak için öncelikle Tresca, von-Mises, Mohr-Coulomb ve Drucker-Prager kriterleri kısaca özetlenecektir. Bunlardan Tresca ve von-Mises akma kriterleri hidrostatik basıncı ihmal etmekte Mohr-Coulomb ise dikkate almaktadır. Drucker-Prager malzeme modeli de Mohr-Coulomb kriterinin modifiye edilmiş hali olup tez kapsamında kullanılan bünye modeline temel teşkil etmektedir.

Genel halde akma kriteri, bir akma fonksiyonu aracılığıyla matematiksel bir biçimde Denklem 3.6 ile ifade edilir [62]:

$$f(\sigma_{ij}, \beta) = 0 \tag{3.6}$$

Burada σ_{ij}, 6 bağımsız gerilme durumunu ($\sigma_{x,eks}$, $\sigma_{y,eks}$, $\sigma_{z,eks}$, τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{zx}) ifade ederken β sembolü malzemeye bağlı parametreleri (akma dayanımı, çekme dayanımı vb.) ifade eder.

Akma fonksiyonu düzlem gerilme durumunda bir akma yüzeyi oluşturur (Şekil 3.5). Fonksiyonun sıfırdan küçük olduğu durumlarda elastik davranış söz konusuyken aksi durumda problem tanımsız olur. Fonksiyonun sıfıra eşit olduğu durumda ise plastik davranış meydana gelir ve bir akma yüzeyiyle tanımlanır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Düzlem gerilme halinde akma yüzeyi

3.4.1 Tresca Kriteri

19. yüzyılın son yarısında Fransız makine mühendisi Henri Eduard Tresca tarafından önerilen maksimum kayma gerilmesi modeli, Tresca kriteri olarak bilinir [61, 63]. Buna göre malzemenin bir noktasında oluşan maksimum kayma gerilmesi kritik bir değere ulaşınca akmanın başladığı varsayımına dayanılır [64]. Bu kritik değer çekme veya basınç gerilmesinin yarısı olarak alınır. Maksimum kayma gerilmesi ise maksimum asal gerilme ile mininum asal gerilmenin farkının yarısıdır. Matematiksel olarak Denklem 3.7 ile verilmiştir [62].

$$f(\sigma) = \sigma_e - \frac{\sigma_a}{2} \tag{3.7}$$

Burada σ_e efektif gerilmedir ve $\sigma_e = 0.5\,(\sigma_{maks} - \sigma_{min}) = \tau_{maks}$ olarak tanımlanır. Tek eksenli basınç veya çekme dayanımından elde edilebilen ve akma gerilmesini ifade eden σ_a ise $\sigma_a = 2\tau_y$ olarak tanımlanır.

3.4.2 von Mises Kriteri

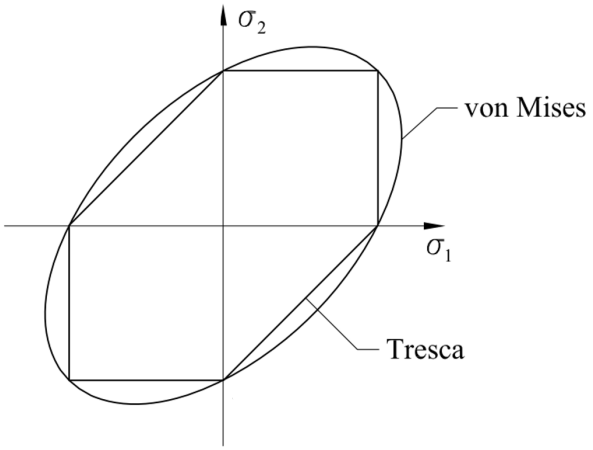
Tresca'dan sonra 20. yüzyılın başlarında Avusturyalı bilim adamı ve matematikçi Richard Martin Edler von Mises tarafından ortaya konulan 3 asal eksendeki kayma gerilmelerini dikkate alan şekil değiştirme kriteridir [61, 62, 64, 65]. Bu kriter $J_2\,(s(\sigma))$ sapma gerilmesinin (toplam gerilmeden ortalama-hidrostatik-gerilme bileşeninin çıkarılmasıyla elde edilen gerilme) değişmezinin kritik bir değere ulaşmasıyla akmanın başlaması koşuluna dayanır ve Denklem 3.8 ile verilmiştir [61].

$$f(\sigma) = \sqrt{J_2\,(s\,(\sigma))} - \frac{\sigma_a}{\sqrt{3}} \tag{3.8}$$

Burada sapma gerilmesinin ikinci değişmezi $J_2\left(s(\sigma)\right)$, Denklem 3.9 ile tanımlanır [61]. σ_a ise $\sigma_a = \tau_y\sqrt{3}$ ile tanımlanır. Burada τ_y kayma akma gerilmesidir.

$$J_2\left(s(\sigma)\right) = \frac{\sigma^2}{3} = \frac{\left(\sigma_1 - \sigma_2\right)^2 + \left(\sigma_1 - \sigma_3\right)^2 + \left(\sigma_2 - \sigma_3\right)^2}{6} \tag{3.9}$$

Burada σ_1, σ_2, ve σ_3 asal gerilmelerdir. Düzlem gerilme hali için Tresca ve von Mises kriterleri Şekil 3.6 ile özetlenmiştir.



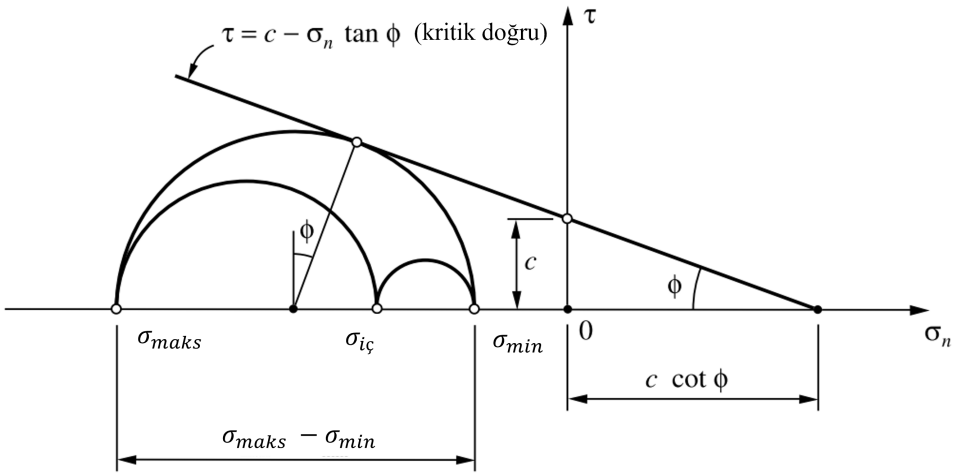
Şekil 3.6 Düzlem gerilme halinde Tresca ve von Mises akma kriterleri [62]

3.4.3 Mohr-Coulomb Kriteri

Tresca ve von Mises malzeme modelleri metaller gibi "basınçtan etkilenmeyen" sünek malzemeler için ideal olmasına karşın beton ve kaya benzeri kohezif malzemeler için Mohr-Coulomb kriteri gibi hidrostatik gerilme (basınç) etkisini de dikkate alan malzeme modeliyle çalışmak gereklidir [61, 64]. Mohr-Coulomb kriteri, bu problemlere karşı bir model geliştirmek üzere Tresca kriterinin hidrostatik basınç etkisini dikkate alan geliştirilmiş halidir [64]. Mohr-Coulomb kriterine göre, akma fonksiyonu gerilme durumu cinsinden yazılır ve kohezyon ile içsel sürtünme açısı olmak üzere iki temel parametreye bağlıdır [64]. Buna göre, kayma gerilmesi ve normal gerilme kritik bir kombinasyona ulaştığında akma başlar. Bu kriter Denklem 3.10 ile şöyle ifade edilebilir.

$$\tau = c - \sigma_n \, tan\phi \tag{3.10}$$

Burada τ kayma gerilmesini, c kohezyon değerini σ_n normal gerilmeyi ϕ içsel sürtünme açısını ifade etmektedir. Bu kriter Şekil 3.7 ile görselleştirilebilir. Buna



Şekil 3.7 Mohr-Coulomb akma kriteri [61]

göre üç Mohr dairesi de kritik çizginin altında kalmaktadır. Denklem 3.10, Şekil 3.7'e göre tekrar düzenlenirse,

$$\frac{(\sigma_{maks} - \sigma_{min})}{2} cos\phi = c - \left(\frac{\sigma_{maks} - \sigma_{min}}{2} sin\phi + \frac{\sigma_{maks} + \sigma_{min}}{2} \right) tan\phi \quad (3.11)$$

Her iki taraf $2\cos\phi$ ile çarpılırsa,

$$(\sigma_{maks} - \sigma_{min}) + (\sigma_{maks} + \sigma_{min})\ sin\phi = 2c\ cos\phi \quad (3.12)$$

Sonuçta önceki akma kriterlerine benzer olarak Mohr-Coulomb kriteri Denklem 3.13 ile ifade edilir.

$$f(\sigma, c) = (\sigma_{maks} - \sigma_{min}) + (\sigma_{maks} + \sigma_{min})\ sin\phi - 2c\ cos\phi \quad (3.13)$$

3.4.4 Drucker-Prager Kriteri

Drucker-Prager kriteri ilk olarak Drucker ve Prager tarafından Mohr-Coulomb akma kriterine yakın bir yaklaşıma dayanan hidrostatik gerilme (basınç) etkisini de dikkate bir malzeme modeli olarak geliştirilmiştir [61, 66, 67]. Mohr-Coulomb kriteri başlığı altında bahsedildiği gibi, basınç teriminin ihmal edildiği metal benzeri sünek malzemeler için ideal olan Tresca ve von Mises malzeme modellerine karşın basınca duyarlılık teriminin dahil edildiği beton ve kaya benzeri kohezif malzemeler için Drucker-Prager kriteri tercih edilir. Ayrıca bu tür kohezif malzemeler çekme ve

basınç altında farklı davranışlar gösterebilmekte ve artan basınç etkisi altında akma dayanımlarında artış meydana gelebilmektedir [64].

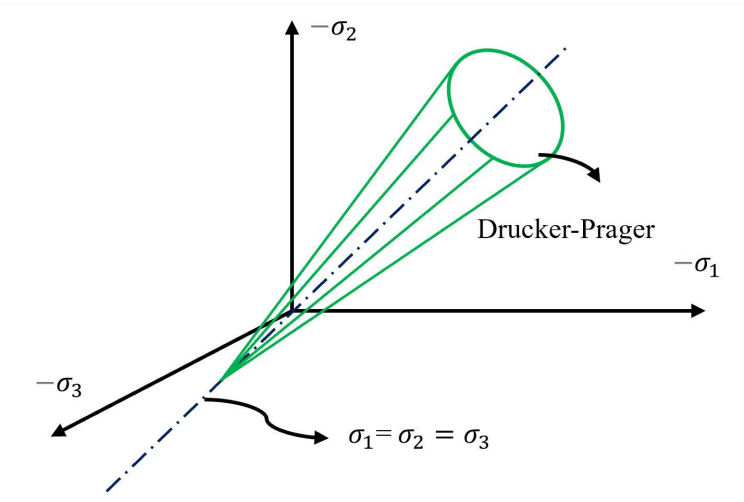
Drucker-Prager kriterinde, hidrostatik basınç (veya ortalama normal basınç), $p(\sigma)$, ve sapma gerilmesinin ikinci değişmezinin, $J_2(s(\sigma))$, kritik bir kombinasyon değerine ulaştığı durumun akmanın başlangıcı olduğu kabul edilmiştir. Bu sözel koşul matematiksel olarak Denklem 3.14 ile ifade edilebilir:

$$\sqrt{J_2(s(\sigma))} + \eta p(\sigma) = \xi c \tag{3.14}$$

Burada, c kohezyon değerini ifade eder. Hidrostatik basınç ve kohezyonun katsayıları olan η ve ξ ise Mohr-Coulomb akma kriterine benzeştirme yaklaşımları için kullanılan sırasıyla 1. ve 2. malzeme parametrelerdir. Denklem 3.14, önceki kriterlere benzer şekilde akma fonksiyonu olarak Denklem 3.15 ile tanımlanır:

$$f(\sigma, c) = \sqrt{J_2(s(\sigma))} + \eta p(\sigma) - \xi c \tag{3.15}$$

Drucker-Prager kriterinin asal gerilme uzayında gösterimi Şekil 3.8 ile verilmiştir. Görüleceği üzere çekme (+σ) ve basınç (-σ) bölgelerinde farklı kritik doğrularla sınırlanmış akma yüzeyleri bulunmaktadır. Bu da yığma malzemenin davranışına uygun bir modellemedir.



Şekil 3.8 Drucker-Prager kriterinin asal gerilme uzayında gösterimi

3.4.5 Genişletilmiş Drucker-Prager (EDP) Kriteri

Genişletilmiş Drucker-Prager veya EDP, Drucker-Prager (DP) kriterini temel alan ve bunun bir uzantısı olarak ANSYS yazılımında tanımlanan bir malzeme

modelidir. DP modeline ek olarak hem akma yüzeyinin hem de akış potansiyelinin bağımsız bir şekilde doğrusal, hiperbolik ve üstel olarak tanımlanmasına izin verir ve böylece ilişkili veya ilişkisiz bir akış kuralı ile tanımlanabilir [68]. ANSYS yazılımındaki EDP doğrusal akma kriteri Denklem 3.16 ile tanımlanabilir [68]:

$$f(\sigma, \sigma_y) = \sigma_e + \alpha \frac{1}{3} tr(\sigma) - \sigma_y = 0 \tag{3.16}$$

Burada, σ_e efektif gerilmedir. Gerilme vektörünün izi şeklinde tanımlanan $tr(\sigma)$ ise $tr(\sigma) = 3p(\sigma)$ olarak tanımlanır. α ve σ_y parametreleri ise sırasıyla "basınç duyarlılığı" ve "tek eksenli akma gerilmesi"ne karşılık gelir.

Akış kuralı, plastik şekil değiştirmeyle alakalı bir kavramdır. İlişkili veya ilişkisiz akış kuralı olarak tanımlanabilmektedir. İlişkili akış kuralı kullanıldığında plastik şekil değiştirme malzemenin gerilme artışıyla orantılı olarak artar [68]. Bu durum plastik şekil değiştirmelerle birlikte malzeme hacminin artmasına neden olacaktır. ANSYS yazılımda, doğrusal akış kuralı Denklem 3.17 ile tanımlanmaktadır [68].

$$Q(\sigma, \sigma_y) = \sigma_e + \bar{\alpha} \frac{1}{3} tr(\sigma) \tag{3.17}$$

Burada yine σ_e efektif gerilme ve $tr(\sigma)$ gerilme vektörünün izidir. ANSYS yazılımında tanımlanması gereken parametre ise "akış potansiyeli basınç duyarlılığı" olarak tanımlanan $\bar{\alpha}$ parametresidir. Eğer bu parametre "basınç duyarlılığı"na eşit alınırsa yani $\bar{\alpha} = \alpha$ olarak tanımlanırsa problem ilişkili akış kuralı prensipleriyle çalışır. Bu tez kapsamında basitlik açısından ilişkili akış kuralı benimsenmiştir.

ANSYS yazılımında Denklem 3.16 ile tanımlanan EDP modelini DP modeline benzeştirmek için efektif gerilme, σ_e, Denklem 3.18 ile von Mises efektif gerilmesi olarak tanımlanır [61].

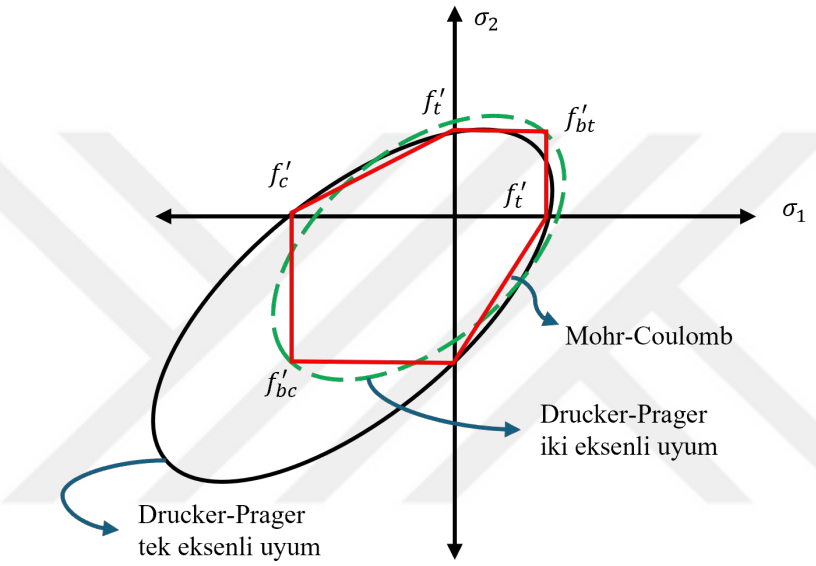
$$\sigma_e = \sqrt{3 J_2(s)} \tag{3.18}$$

Denklem 3.15 ile Denklem 3.16 benzeştirildiğinde, Denklem 3.16 ile verilen bağıntıyı elde etmek için Denklem 3.15 bağıntısında her iki tarafı $\sqrt{3}$ ile çarpmak gereklidir. Sonuçta Denklem 3.16 bağıntısında ANSYS yazılımında tanımlanması gereken α ve σ_y parametreleri şöyle yazılır:

$$\alpha = \eta\sqrt{3} \tag{3.19}$$

$$\sigma_y = \xi c\sqrt{3} \tag{3.20}$$

Sonuçta, η ve ξ katsayıları ile kohezyon değeri c parametresi tanımlanmalıdır. Bu amaçla, Şekil 3.9 ile gösterilen Drucker-Prager ile Mohr-Coulomb kriterinin tek veya iki eksenli uyumu tercih edilebilir.



Şekil 3.9 Drucker-Prager - Mohr-Coulomb tek ve iki eksenli uyum [61]

Tez kapsamında iki eksenli uyum seçilmiştir. Bunun sebebi yığma gibi malzemelerin yüksek basınç/çekme dayanımı (f_c/f_t) oranına sahip olmasıdır [61]. Yani bu tür malzemelerde genelde çekme dayanımı basınç dayanımına nazaran çok küçük kalmaktadır. Bu tür malzemeler için tek eksenli uyumun tercih edilmesi gerçekçi olmayan sonuçlar vermektedir. İki eksenli uyum parametreleri η ve ξ sırasıyla Denklem 3.21 ve Denklem 3.22 ile tanımlanmaktadır.

$$\eta = \frac{3sin\phi}{2\sqrt{3}} \tag{3.21}$$

$$\xi = \frac{2cos\phi}{\sqrt{3}} \tag{3.22}$$

Nihayetinde, içsel sürtünme açısı, ϕ, ile kohezyon değeri, c, belirlenirse ANSYS yazılımına girilecek olan α ve σ_y parametreleri belirlenebilir. Bunun için yığma

veya beton duvarlar gibi düzlem gerilmeye maruz sistemler için Drucker-Prager ve Mohr-Coulomb kriterlerinin tek eksenli basınç (f_c) ve tek eksenli çekme (f_t) gerilme durumları altında eşleşeceği bir yaklaşım kullanmak uygun olabilir [61]. Sonuçta, ϕ ve c parametreleri sırasıyla Denklem 3.23 ve Denklem 3.24 ile (f_c) ve (f_t) cinsinden yazılabilir.

$$\phi = sin^{-1}\left(\frac{f_c - f_t}{f_c + f_t}\right) \tag{3.23}$$

$$c = \frac{f_c f_t}{f_c - f_t} tan\phi \tag{3.24}$$

Denklem 3.19'da η yerine Denklem 3.21'de verilen değer yazıldığında Denklem 3.25 elde edilir.

$$\alpha = \frac{3sin\phi}{2} \tag{3.25}$$

Aynı şekilde Denklem 3.20'de ξ yerine Denklem 3.22'de verilen değer yazılırsa Denklem 3.26 elde edilmiş olur.

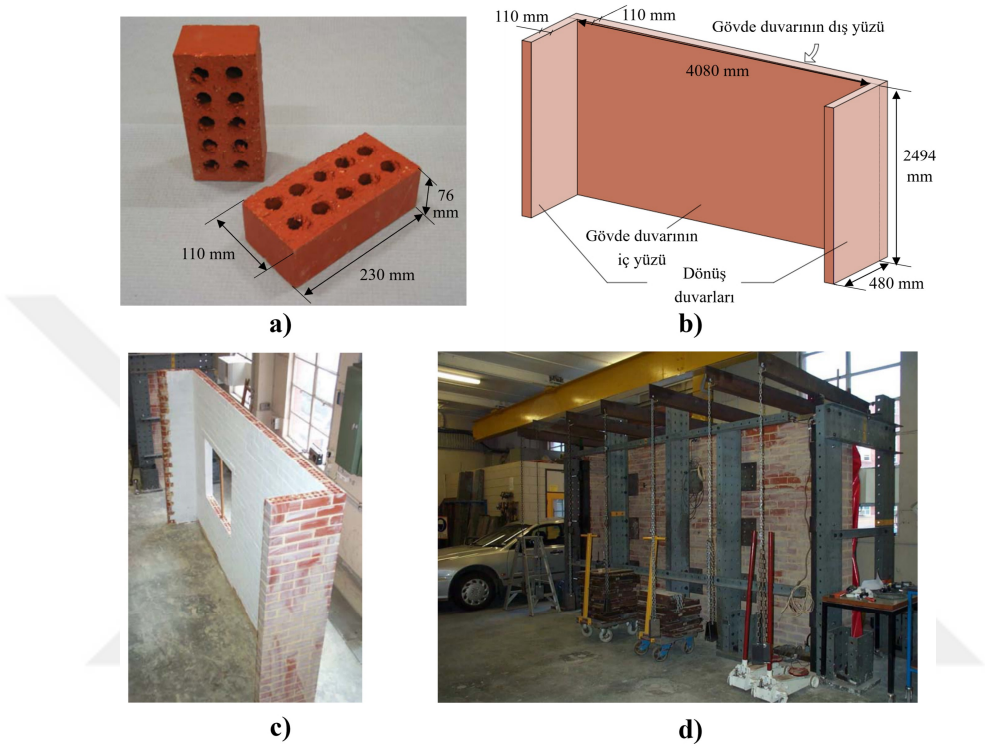
$$\sigma_y = 2ccos\phi \tag{3.26}$$

ANSYS yazılımında Denklem 3.16 içerisinde bulunan α ve σ_y parametreleri sırasıyla Denklem 3.25 ve Denklem 3.26 ile sadece iki parametre (f_c ve f_t) kullanılarak belirlenir. Bunun için öncelikle ϕ ve c parametreleri sırasıyla Denklem 3.23 ve Denklem 3.24 ile hesaplanmalıdır. Ek olarak, Denklem 3.17 içinde tanımlanması gereken $\bar{\alpha}$ parametresi $\bar{\alpha} = \alpha$ olarak alınarak ilişkili akış kuralı kabul edilebilir. Sonuçta ANSYS yazılımına, EDP için gerekli 3 parametre olan α, σ_y ve $\bar{\alpha}$ değerleri girilir. Bu sayede EDP modeli kullanılarak analizler gerçekleştirilebilir.

3.5 Deney Duvarlarının Modellenmesi

Sayısal yaklaşımın geçerliliği ve sayısal incelemeler için literatürde yer alan ve sıklıkla kullanılmış olan düzlem dışı yükler etkisindeki deney duvarları incelenmiştir. Bu kapsamda, Jaroslav Vaculik [6] tarafından gerçekleştirilen donatısız yığma duvarların düzlem dışı kapasite (tek doğrultuda itme) deneyleri doğrulama için uygun görülmüştür (Şekil 3.10). Duvarlar, boşluklu kil tuğlalar ve 10 mm kalınlıklı çimentolu kireç harcı kullanılarak örülmüştür. Deney

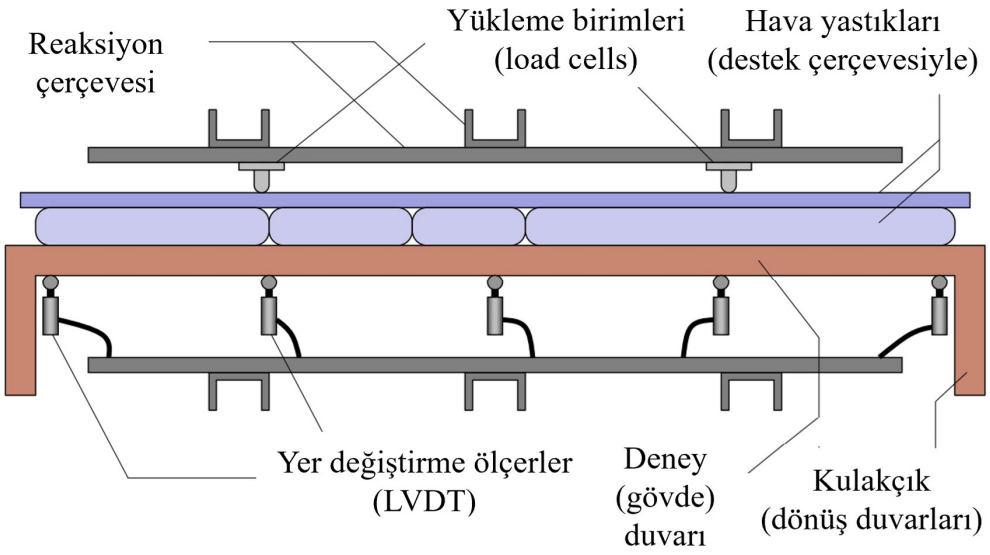
düzeneğinde gösterildiği gibi düzlem dışı yük, gövde duvarına hava yastıklarıyla tek yönlü basınç şeklinde uygulanmıştır (Şekil 3.11). Deney duvarlarının boyutları, mesnetlenme koşulları, isimleri ve maruz kaldıkları eksenel gerilmeler (σ_{v0}) Tablo 3.1 ile sunulmuştur. Burada gösterilen ankastre mesnet şartı dönüş duvarları ile, basit mesnet şartı ise o kenarın dönmesine izin verecek şekilde bir düzenekle sağlanmıştır.



Şekil 3.10 Kapasite deneyleri a) Kullanılan tuğlalar b) Geometrik özet model (S1 Duvarı) c) Deney duvarı (S3 Duvarı) d) Deney düzeneği (S1 Duvarı) [6]

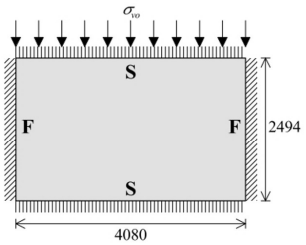
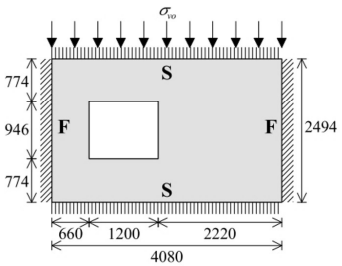
Tez kapsamında S1 ve S3 duvarları kullanılmıştır. Bunun nedeni bu iki duvarın boşluk özellikleri dışında tamamen aynı özelliklere ve deney koşullarına sahip olmalarıdır (Tablo 3.1). S1 duvarı dolu duvar, S3 duvarı ise boşluklu duvardır (Tablo 3.2). Tez kapsamında yapılan çalışmalarda bu iki duvar ile sayısal modelin doğrulaması sağlanmış, daha sonra boşluğun etkisi parametrik olarak 4. Bölümde incelenmiştir.

Yığma duvarların sonlu eleman analizleri ANSYS yazılımı [69] kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal modelde yığma duvarlar, 3 boyutlu SOLID186 sonlu elemanı kullanılarak modellenmiştir. Modelleme tekniği olarak makro modelleme yaklaşımı tercih edilmiştir. Makro modellemede kullanılan S1 ve S3 duvarlarının geometrik özellikleri ile S3 duvarına ait boşluk boyutları Tablo 3.2 ile verilmiştir. Tablo 3.2'de gösterilen boyut özellikleri genişlik × yükseklik × kalınlık olarak tanımlanmıştır. Boşluk boyutu ise genişlik × yükseklik şeklinde gövde duvarı



Şekil 3.11 Deney duvarları düzlem dışı kapasite test düzeneği [6]

Tablo 3.1 Deney duvarları [6]

Duvar boyutları (mm) ve mesnetlenme koşulları	Duvar adı	σ_{v0} (Mpa)
	S1	0.1 MPa
	S3	0.1 MPa

Not: F= Ankastre menset, S=Basit mesnet

üzerinde alansal olarak gösterilmiştir. Tez kapsamında deney düzeneğini birebir simüle edebilmek için gövde duvarları, dönüş duvarları (kulakçıklar) ile birlikte modellenmiştir. Gövde duvarının dönüş duvarlarına birleştiği kısım Tablo 3.1'de

Tablo 3.2 S1 ve S3 duvarlarının özellikleri [6]

Deney duvarı	Gövde duvarı boyutları (mm×mm×mm)	Dönüş duvarı boyutları (mm×mm×mm)	Boşluk boyutları (mm×mm)
S1	4080×2484×110	480×2484×110	—
S3	4080×2484×110	480×2484×110	1200×946

Tablo 3.3 Makro modellemede kullanılan malzeme parametreleri

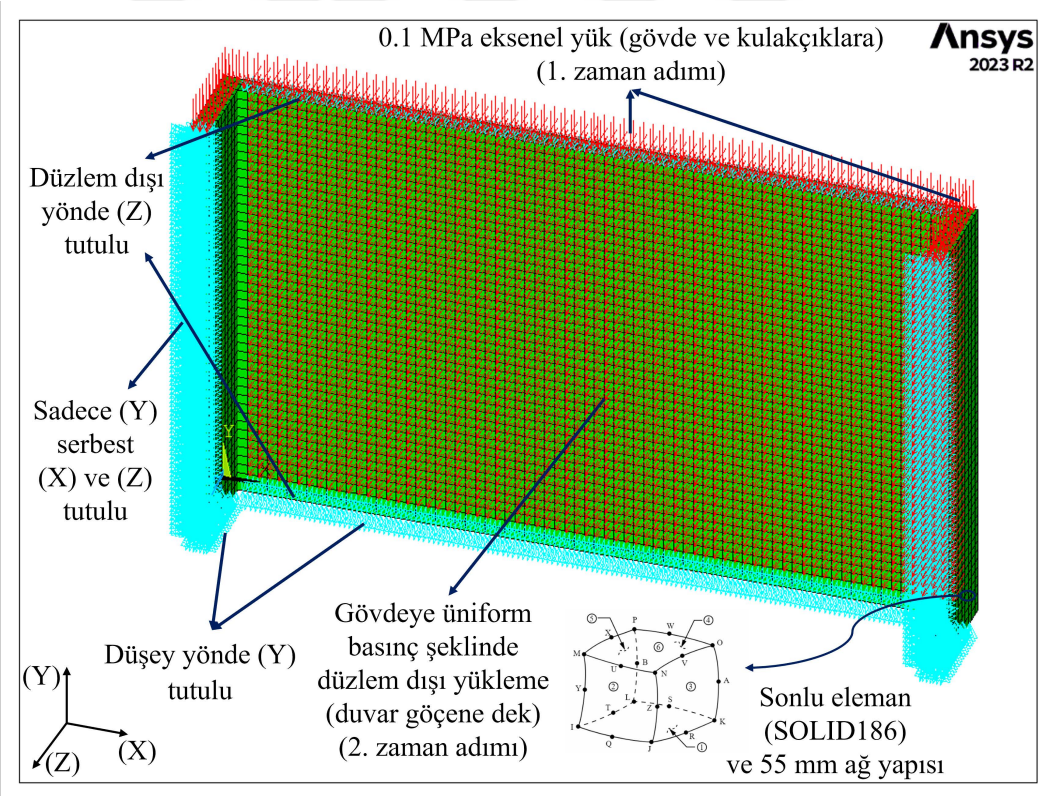
	Malzeme parametresi	Parametre anlamı	Parametre değeri	Kaynak
Elastik parametreler	E	Elastisite modülü	7000 MPa	[16]
	ν	Poisson oranı	0.2	[8, 13, 71]
	f_c	Basınç dayanımı	17.6 MPa	[6]
	f_t	Çekme dayanımı	0.15 MPa	
Plastik parametreler	α	Basınç duyarlılığı	1.4746	Denklem 3.25
	σ_y	Tek eksenli akma gerilmesi	0.2975 MPa	Denklem 3.26
	$\bar{\alpha}$	Akış potansiyeli basınç duyarlılığı	1.4746	$\bar{\alpha} = \alpha$

gösterildiği gibi ankastre mesnet davranışına yakın bir davranış sergilemektedir.

Yığma duvarların malzeme parametrelerinin elde edilmesinde deney verileri ile literatürdeki çalışmalar dikkate alınmıştır. Duvarların analizinde kullanılan basınç dayanımı değeri, S1 duvarı için deneyde verildiği gibi alınmıştır. S3 duvarı için de aynı değer tercih edilmiştir. Çekme dayanımı değeri deney verileri ile model sonuçlarının uyumu dikkate alınarak deneme-yanılma yöntemi kullanılarak elde edilmiştir [70]. Elastisite Modülü literatürde S1 duvarı ile ilgili bir diğer araştırmadan alınmıştır [16]. Poisson oranı olarak yığma için literatürde sıklıkla kullanılan 0.2 değeri tercih edilmiştir [8, 13, 71]. Bünye modeli olarak EDP malzeme modeli kullanılmıştır. Denklem 3.25 ve Denklem 3.26 ile basınç ve çekme dayanımı kullanılarak α ve σ_y parametreleri hesaplanmıştır. Denklem 3.17'de belirtildiği gibi, EDP malzeme modeli için ilişkili akış kuralı seçilmiştir ve bunu sağlamak için $\bar{\alpha} = \alpha$ olarak tanımlanmıştır. S1 ve S3 duvarları için oluşturulan makro modelde kullanılan malzeme parametrelerinin değerleri ve ilgili kaynaklar Tablo 3.3 ile özetlenmiştir.

Doğrulama için seçilen dolu ve boşluklu duvarlar olan S1 ve S3 duvarları için sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. ANSYS yazılımında dolu S1 duvarı için oluşturulan makro model Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Öncelikle, duvar geometrisi oluşturulmuştur. Sonlu eleman tipi olarak 20 düğüm noktalı SOLID186 tercih

edilmiştir. Duvar kalınlığının yarısına tekabül eden bir kenarı 55 mm uzunluklu altı yüzeyli (hexagonal) sonlu elemanlar ağı oluşturulmuştur. Malzeme parametreleri Tablo 3.3'ten alınmıştır. Mesnet şartları ise deney düzeneğini yansıtacak şekilde tanımlanmıştır. Duvarların en alt kısmı zemin ile temas ettiğinden düşey yönde hareketi tutulmuştur. Dönüş duvarları ise eksenel yük altında olduğundan sadece düşey yönde serbest bırakılmıştır. Gövde duvarının alt ve üst iç yüzeyinde bulunan kenarları düzlem dışı yönde tutulmuştur. Böylece deney düzeneğinde olduğu gibi basit mesnet şartı sağlanmıştır. Mesnet şartlarının tanımından sonra 1. zaman adımında, 0.1 MPa değerinde eksenel yük gövde ve dönüş duvarlarının üst yüzeylerine basınç şeklinde etkitilmiştir. Ardından 2. zaman adımında, ana duvarı dönüş duvarlarına doğru tek yönlü itecek şekilde gövde duvarına düzlem dışı üniform basınç uygulanmıştır. Basınç değeri 0.005 MPa ile 0.01 MPa değerleri arasındadır. Düzlem dışı basınç yükü, duvar göçene dek bu aralık arasından bir değer seçilerek alt adımlara bölünmek suretiyle gövde duvarına uygulanmıştır. Boşluklu olan S3 duvarı da benzer bir yol izlenerek modellenmiştir.



Şekil 3.12 S1 duvarının (dolu duvar) sonlu elemanlar modeli

Model oluşturulduktan sonra 1. zaman adımında tanımlanan eksenel yükler yaklaşık 1/10 adımda uygulanmıştır. Düzlem dışı yüklerin uygulanması ise 2. zaman adımında gerçekleştirilmiştir. Burada duvarın düzlem dışı kapasitesine ulaşacağı beklendiği için alt adımları sıklaştırmak gerekmiştir. Bu nedenle yaklaşık 150 alt adımda düzlem dışı yükler uygulanmıştır.

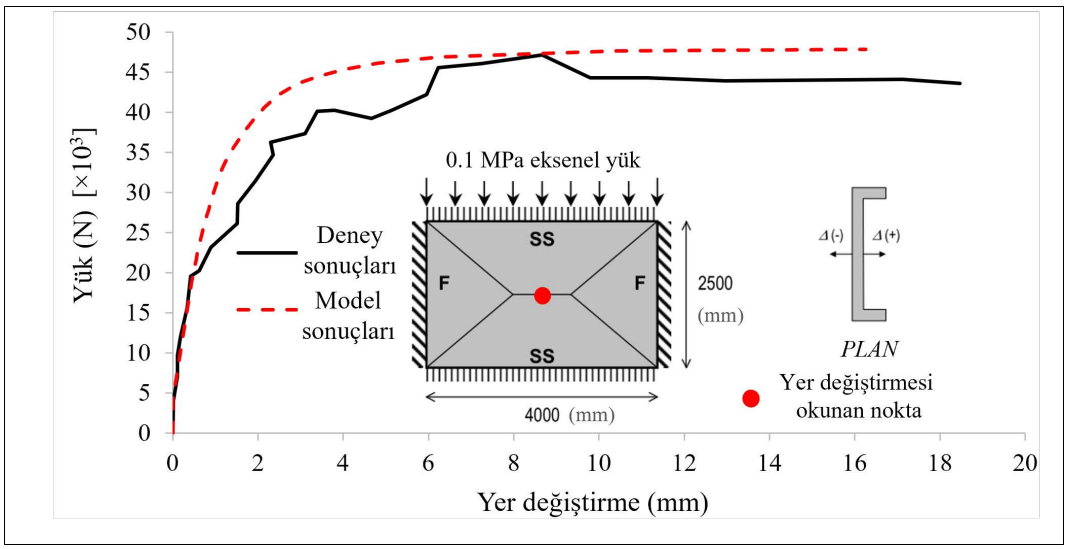
Tablo 3.4 S1 ve S3 duvarlarının model ve deney sonuçlarının karşılaştırılması

		S1 duvarı	S3 duvarı
Yük (x$10^3 N$)	Deney	47.14	44.12
	Model	47.85	43.85
	Fark (%)	1.51	0.61

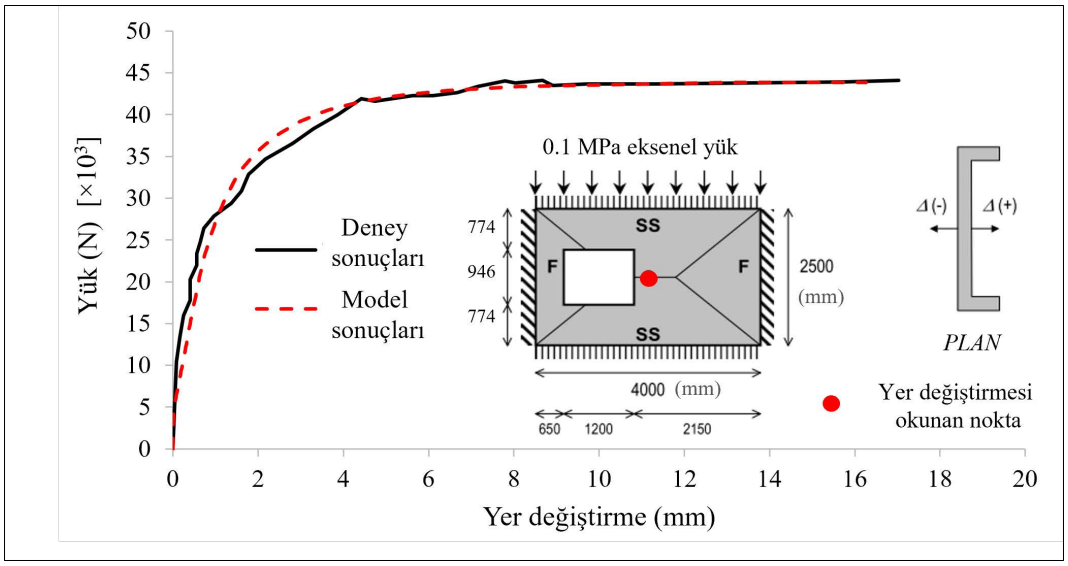
3.6 Analiz ve Değerlendirilme

Gerçekleştirilen 3 boyutlu doğrusal olmayan analizlerde, son yükleme adımı olan mekanizma durumu için tepki kuvvetleri ve buna karşı gelen yer değiştirme değerleri kaydedilmiştir. Deney verileri "uygulanan basınç – yer değiştirme" cinsinden verildiğinden, sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılabilmesi için basınç değerleri duvar gövde alanı olan 4080 mm × 2494 mm ile çarpılarak kuvvete dönüştürülmüştür [6].

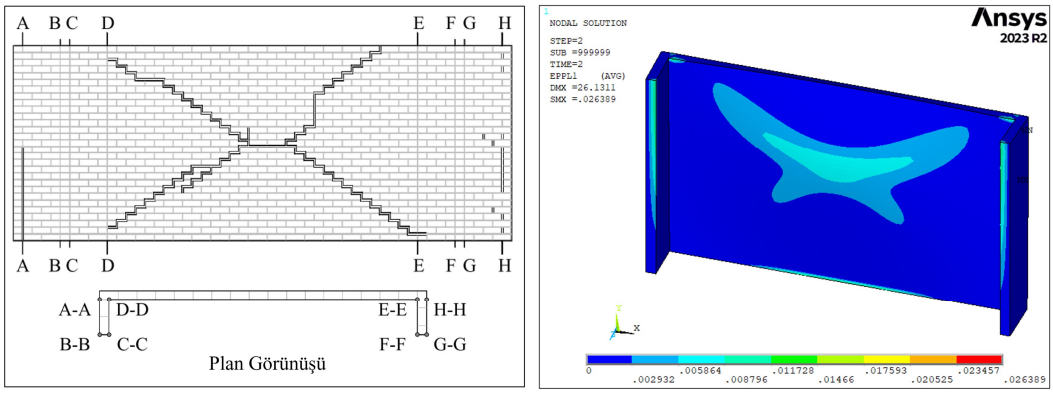
Sonuç olarak, S1 ve S3 duvarlarına ait yük - yer değiştirme ilişkileri sırasıyla Şekil 3.13 ve Şekil 3.14 ile gösterilmiştir. Her iki model, başlangıç rijitlikleri ile düzlem dışı yük değerlerini başarılı bir şekilde tahmin edebilmiştir. Tablo 3.4'te her iki duvar için deneysel ve sayısal düzlem dışı yük değerleri karşılaştırılmıştır. İlgili şekiller ve tablo incelendiğinde model sonuçlarının deney verileriyle yüksek düzeyde uyum sağladığı görülmektedir. Bununla beraber, deneyler sonucunda S1 ve S3 duvarlarına ait mekanizma durumları ile modele ait plastik şekil değiştirme dağılımları sırasıyla Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da verilmiştir. Görüleceği üzere çatlakların dağılımı ile plastik şekil değiştirme dağılımları büyük oranda benzerlik göstermektedir.



Şekil 3.13 S1 duvarının yük - yer değiştirme ilişkisi

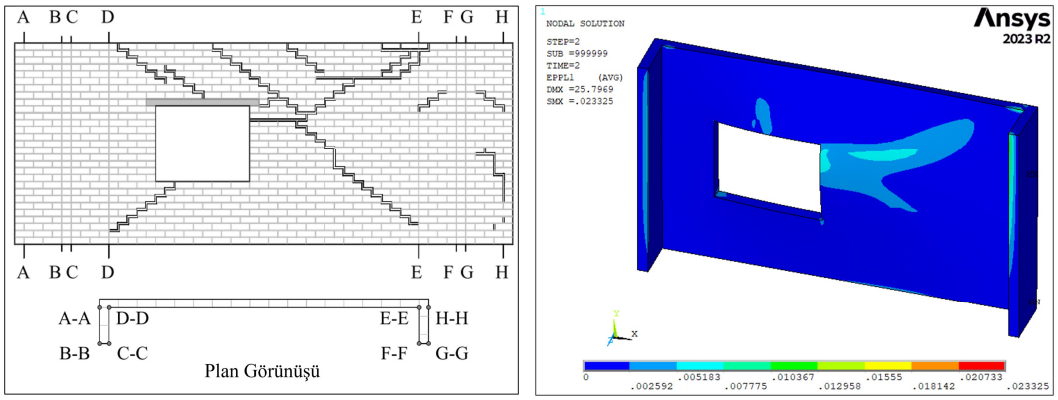


Şekil 3.14 S3 duvarının yük - yer değiştirme ilişkisi



a) **b)**

Şekil 3.15 S1 duvarı a) Deney sonrası mekanizma durumu [6] b) Model sonucu plastik şekil değiştirme dağılımı



a) **b)**

Şekil 3.16 S3 duvarı a) Deney sonrası mekanizma durumu [6] b) Model sonucu plastik şekil değiştirme dağılımı

4
PARAMETRİK ÇALIŞMA

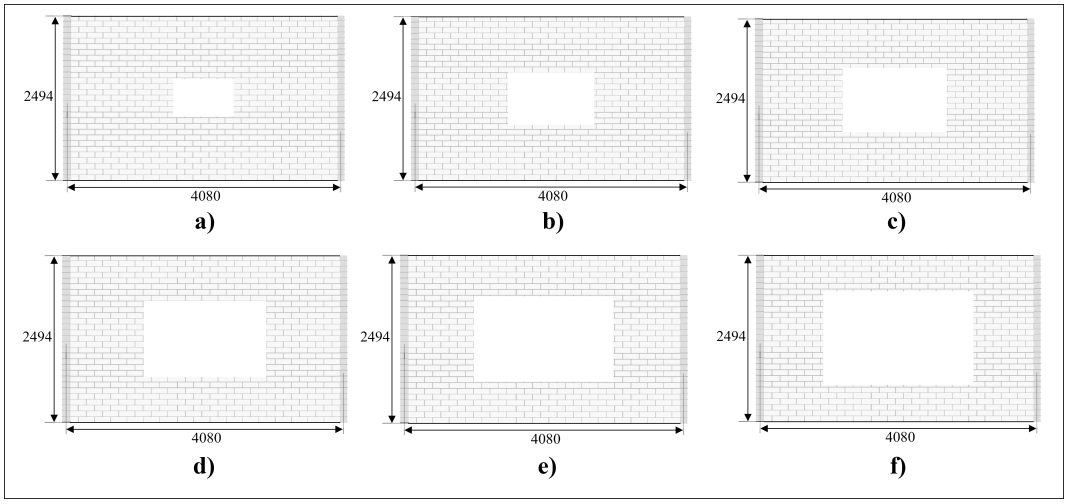
Parametrik bir çalışma gerçekleştirilebilmesi için öncelikle bu amaçla kullanılacak modelin deney verileriyle doğrulanmış olması gerekmektedir. Tez çalışması kapsamında dolu ve boşluklu S1 ve S3 duvarları üzerinden önerilen sayısal modelin doğrulaması yapılmıştır. Bu bölümde, S1 ve S3 duvarları için ortak olarak kullanılmış kompozit malzeme özellikleri esas alınarak (Tablo 3.3) boşluk oranının düzlem dışı davranış üzerindeki etkisini incelemek amacıyla parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Parametrik çalışma kapsamında "boşluk oranı" bağımsız değişkeninin "düzlem dışı davranış" bağımlı değişkeni üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, gövde ve dönüş duvarı boyutları S1 ve S3 duvarıyla aynı olacak şekilde sayısal modeller oluşturulmuştur. Bu modellerin temsili fiziksel karşılıkları Şekil 4.1'de sunulmuştur. Fiziksel modellerin ardından, aynı konfigürasyonlar sayısal ortamda modellenmiştir. Sayısal modellerde, gövde duvarının tam ortasında ve gövde duvarıyla aynı genişlik/yükseklik oranına sahip olacak şekilde boşluklar açılmıştır (Şekil 4.2). Boşlukların alanı gövde duvarının alanına oranlanmış ve "boşluk oranı" bulunmuştur. Boşluk oranı %5'ten %30'a kadar 5'er birim artışlarla düzenlenmiş ve toplam 6 adet sayısal model oluşturulmuştur. Tablo 4.1'de sayısal modeli oluşturulan duvarlara ait boşluk boyutları ve oranları verilmiştir. İlgili boyutlar genişlik × yükseklik şeklinde verilmiştir. Tüm duvarlar için kalınlık sabit tutulmuş ve 110 mm olarak alınmıştır. Sayısal modeller oluşturulduktan sonra, ANSYS [69] yazılımıyla doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir.

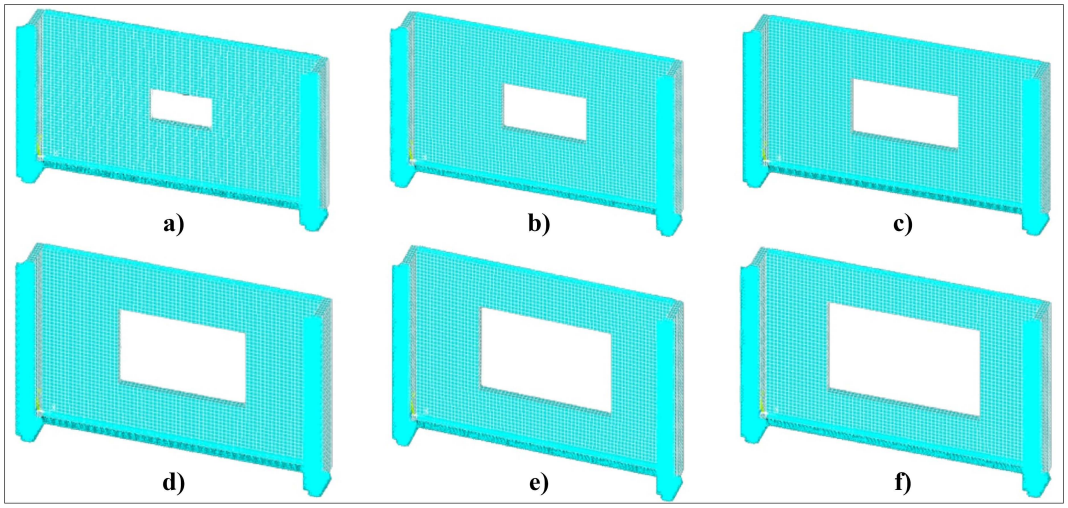
Doğrulaması yapılmış boşluksuz S1 duvarına ait sonuçlar (Şekil 3.13) ile %5'ten %30'a kadar değişen boşluk oranlarına sahip 6 adet sayısal modelin yük - yer değiştirme ilişkileri Şekil 4.4'te sunulmuştur. Boşluk oranı %35 ve üstüne çıktığı durumlarda eksenel yükün uygulandığı ilk adımda duvar göçtüğü gözlemlenmiştir (Şekil 4.3). Boşluklu duvarların yük - yer değiştirme grafiklerinin elde edilmesi aşamasında, yer değiştirme değerleri maksimum değeri veren boşluğun orta üst kısmından okunmuştur. Bu yaklaşım, literatürle uyum sağlamak

Tablo 4.1 Parametrik çalışmada kullanılan modellere ait boşluk özellikleri

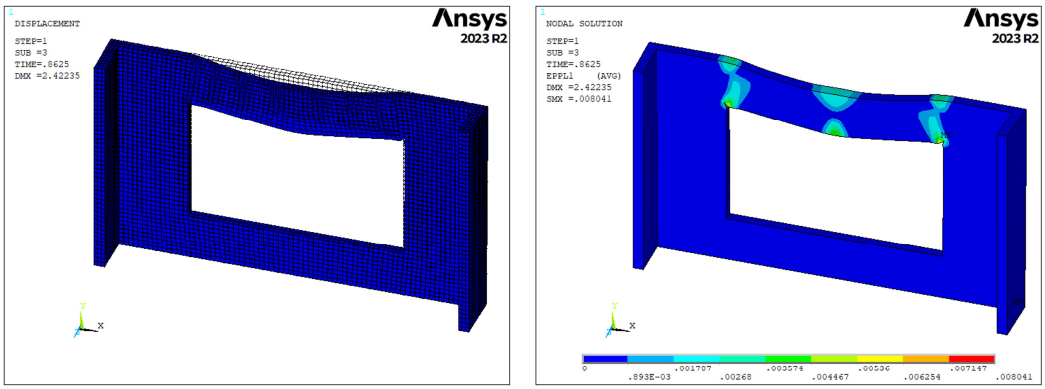
Gövde duvarı boyutları (mm×mm)	Boşluk boyutları (mm×mm)	Boşluk oranı (%)
4080×2494	900×565	5
4080×2494	1300×785	10
4080×2494	1570×975	15
4080×2494	1810×1125	20
4080×2494	2050×1245	25
4080×2494	2220×1375	30



Şekil 4.1 Boşluklu duvarlara ait temsili fiziksel modeller a) % 5 boşluklu b) % 10 boşluklu c) % 15 boşluklu d) % 20 boşluklu e) % 25 boşluklu f) % 30 boşluklu



Şekil 4.2 Boşluklu duvarlara ait sayısal modeller a) % 5 boşluklu b) % 10 boşluklu c) % 15 boşluklu d) % 20 boşluklu e) % 25 boşluklu f) % 30 boşluklu



a) b)

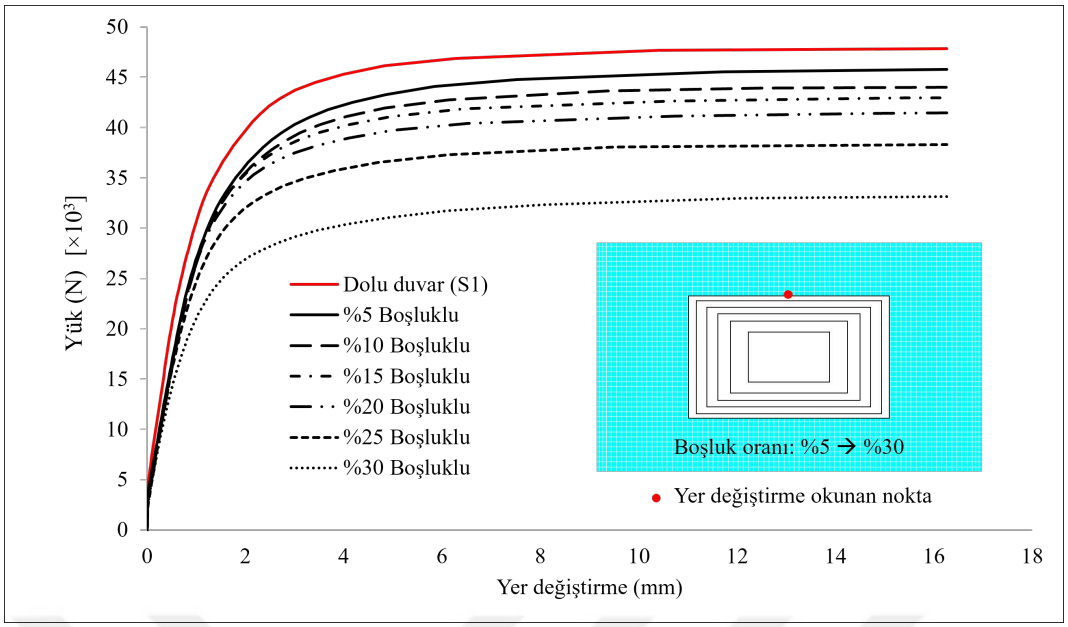
Şekil 4.3 % 35 boşluklu duvar a) Eksenel yük uygulanırken göçme b) Göçme biçimi (plastik şekil değiştirme dağılımı)

amacıyla tercih edilmiştir [16]. Şekil 4.4'ten anlaşılacağı üzere, çok küçük yer değiştirme değerlerinde tüm modellere ait başlangıç rijitlikleri yaklaşık aynıdır. Yaklaşık 0.1 mm yer değiştirme değerinden sonra ise boşluk oranı arttıkça başlangıç rijitliklerinde bir azalma olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin boşluk oranı arttıkça boşluklar etrafındaki plastikleşmenin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, düzlem dışı yük değerleri boşluk oranının artmasıyla azalmıştır. Bu iki değişken birbiriyle ters orantılıdır. Bu sonuç, literatürde yer alan çalışmalarla uyum içindedir [13, 71–73].

Her bir sayısal modele ait boşluk oranları ile düzlem dışı yük değerleri Tablo 4.2'de

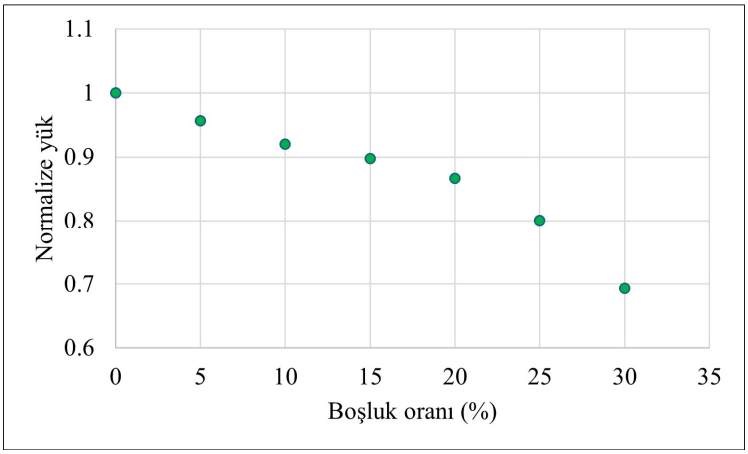
Tablo 4.2 Boşluk oranının düzlem dışı yüke etkisi

Boşluk oranı (%)	Yük ($\times 10^3 N$)
0	47.85
5	45.77
10	44.01
15	42.95
20	41.46
25	38.30
30	33.16



Şekil 4.4 Boşluk oranının düzlem dışı davranışa etkisi

verilmiştir. Burada referans duvarı olan ve %0 boşluk oranıyla gösterilen, S1 duvarıdır. Ayrıca bu sonuçlar grafik olarak da Şekil 4.5'te verilmiştir. Şekil 4.5'te, tüm yük değerleri S1 duvarına ait düzlem dışı maksimum yük değeri ile normalize edilmiştir.



Şekil 4.5 Boşluk oranının normalize edilmiş düzlem dışı yük ile ilişkisi

5
SONUÇ

Ülkemizde ve dünyada kültürel mirasın sembolü yığma yapılar, göz ardı edilemez bir oranda varlığını korumaya devam etmektedir. Bu durum, yapı mühendisliği özelinde yığma yapıların incelenmesini gerekli ve kaçınılmaz kılmaktadır. Yığma yapıların davranışının anlaşılması, kültürel birikimimiz olan bu tür yapıların gelecek nesillere aktarılmasına yardımcı olacaktır. Bu amaç doğrultusunda tez çalışması kapsamında, sabit eksenel yük ve düzlem dışı artımsal yükler etkisi altındaki donatısız yığma duvarların makro modelleme yaklaşımıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak doğrusal olmayan analizleri için bir sayısal model önerilmiştir. Bünye modeli olarak üç parametreli Genişletilmiş Drucker-Prager malzeme modeli ve bu modelin gerektirdiği malzeme parametreleri dikkate alınmıştır. Sayısal irdelemeler ilk olarak, önerilen modelin doğrulanması model sonuçlarının yük – yer değiştirme ilişkisinin ve göçme mekanizmalarının deney verileriyle karşılaştırılması yoluyla yapılmıştır. Çalışmanın son bölümünde, artan boşluk oranıyla düzlem dışı davranışın ilişkisini incelemek adına parametrik çalışma yapılmıştır. Bu kapsamda gövde duvarının ortasında ve duvarla aynı boyut oranlarına sahip boşlukların, duvarın başlangıç rijitliği ve düzlem dışı yük değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sayısal irdelemeler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Önerilen makro model, sabit eksenel yük ve düzlem dışı artımsal yüklemeye maruz donatısız yığma duvarların doğrusal olmayan davranışını yeterli doğrulukla ve seçilen bünye modelinin gerektirdiği düşük sayıda parametre sayesinde pratik bir şekilde simüle edebilmektedir.

2. Parametrik çalışmalar kapsamında, boşluk oranının düzlem dışı davranış üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, boşluk oranı arttıkça düzlem dışı yük değerlerinin önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Yük değerleri, %5 – %20 boşluk oranına sahip duvarlarda %4 ila %14 arasında azalmıştır. %25 ve %30 boşluk oranlarında ise yük değerlerindeki azalma sırasıyla %20 ve %30 olarak

gözlemlenmiştir.

3. Parametrik çalışmalar kapsamında ayrıca, her bir boşluk oranı için elde edilen yük – yer değiştirme grafiklerinden başlangıç rijitlikleri incelenmiştir. Buna göre, %5 – %20 boşluk oranına sahip duvarlarda başlangıç rijitliği yaklaşık olarak benzer düzeyde kalmış ancak dolu duvara kıyasla yaklaşık %20 oranında bir azalma göstermiştir. Boşluk oranı %25 olan duvarda başlangıç rijitliğinde %29'luk bir azalma gözlenirken, %30 boşluk oranına sahip duvarda ise %50'nin üzerinde bir azalma görülmüştür.

4. Ayrıca parametrik çalışmalardan, boşluk oranı arttıkça, nispeten daha küçük yer değiştirme değerlerinde plastikleşmenin başladığı görülmüştür. Dolu duvar için yaklaşık 3 mm yer değiştirme değerinde plastikleşmenin başladığı görülürken, %5 – %20 arasında boşluk oranına sahip duvarlarda bu değer 2 mm'nin biraz üstünde, %25 boşluklu duvarda 2 mm civarında ve boşluk oranı %30 olan duvarda 2 mm'nin altında olduğu gözlemlenmiştir.

İleride yapılacak çalışmalar için, öneriler şu şekilde özetlenebilir:

1. Bünye modelinin, yumuşama ve kırılma gibi davranışları dikkate alacak bir şekilde oluşturulması gerekmektedir. Sayısal modelin doğrulanması aşamasında parametrelerin kalibrasyonu için optimizasyon yöntemleri geliştirilebilir. Ayrıca, göçme mekanizmalarının daha doğru tahmin edilebilmesi için mikro modelleme yaklaşımları tercih edilebilir.

2. Önerilen sayısal modelleme yaklaşımı kullanılarak, sabit eksenel yük ve düzlem dışı yüklemelere maruz donatısız yığma duvarların dayanımlarını elde etmek için abaklar oluşturulabilir.

KAYNAKÇA

[1] Türk Standartları Enstitüsü, *TS 2510: Kargir duvarlar hesap ve yapım kuralları*. 1977.

[2] P. J. B. B. Lourenço, "Computational strategies for masonry structures.," 1997.

[3] T. M. Frankie, "Simulation-based fragility relationships for unreinforced masonry buildings," dok. tezi, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010.

[4] B. Ö. Ay T. E. Azak, "Türkiye'de değişen yapı özelliklerinin karşılaştırmalı incelemesi," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, c. 36, no. 4, ss. 1111–1126, 2021.

[5] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, *Deprem etkisi altında binaların tasarımı için esaslar*. Ankara, 2018.

[6] J. Vaculik, "Unreinforced Masonry Walls Subjected to Out-of-Plane Seismic Actions (Ph. D. Dissertation)," *School of Civil, Environmental & Mining Engineering, University of Adelaide, Australia*, 2012.

[7] S. Noor-E-Khuda, M. Dhanasekar D. P. Thambiratnam, "Out-of-plane deformation and failure of masonry walls with various forms of reinforcement," *Composite Structures*, c. 140, ss. 262–277, 2016.

[8] S. Noor-E-Khuda, M. Dhanasekar D. P. Thambiratnam, "An explicit finite element modelling method for masonry walls under out-of-plane loading," *Engineering Structures*, c. 113, ss. 103–120, 2016.

[9] K. F. Abdulla, L. S. Cunningham M. Gillie, "Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach," *Engineering Structures*, c. 151, ss. 349–365, 2017.

[10] F. Galvez, S. Segatta, M. Giaretton, K. Walsh, I. Giongo, D. Dizhur ve diğ., "FE and DE modelling of out-of-plane two way bending behaviour of unreinforced masonry walls," *Proceedings of the 16th European Conference on Earthquake Engineering, Thessaloniki, Greece*, 2018, ss. 18–21.

[11] S. Noor-E-Khuda M. Dhanasekar, "Three sides supported unreinforced masonry walls under multi-directional loading," *Construction and Building Materials*, c. 188, ss. 1207–1220, 2018.

[12] R. Adhikari D. D'Ayala, "Applied element modelling and pushover analysis of unreinforced masonry buildings with flexible roof diaphragm," *7th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, European Community on Computational Methods in Applied Sciences (ECCOMAS), 2019.

[13] S. B. Singh P. Munjal, “Out-of-plane response of ECC strengthened masonry wallets with openings,” *KSCE Journal of Civil Engineering*, c. 24, no. 7, ss. 2078–2087, 2020.

[14] S. Sharma, L. Silva, F. Graziotti, G. Magenes G. Milani, “Modelling the experimental seismic out-of-plane two-way bending response of unreinforced periodic masonry panels using a non-linear discrete homogenized strategy,” *Engineering Structures*, c. 242, s. 112 524, 2021.

[15] L.-Z. Chang, J. G. Rots R. Esposito, “Influence of aspect ratio and pre-compression on force capacity of unreinforced masonry walls in out-of-plane two-way bending,” *Engineering Structures*, c. 249, s. 113 350, 2021.

[16] L.-Z. Chang, J. G. Rots R. Esposito, “Influence of openings on two-way bending capacity of unreinforced masonry walls,” *Journal of Building Engineering*, c. 51, s. 104 222, 2022.

[17] Y. Li B. Zeng, “Modeling of masonry structures using a new 3D cohesive interface material model considering dilatancy softening,” *Engineering Structures*, c. 277, s. 115 466, 2023.

[18] R. Adhikari, A. Parammal Vatteri D. D’Ayala, *Seismic performance assessment of low-rise unreinforced and confined brick masonry school buildings using the Applied Element Method, Buildings, 13 (2023)*.

[19] D. Chen, H. Wu Q. Fang, “Simplified micro-model for brick masonry walls under out-of-plane quasi-static and blast loadings,” *International Journal of Impact Engineering*, c. 174, s. 104 529, 2023.

[20] P. B. Lourenço, “Experimental and numerical issues in the modelling of the mechanical behaviour of masonry,” 1998.

[21] N. Bayülke, *Yığma yapılar:(taş ve tuğla)*. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 2018.

[22] Z. B. Aydın. “Kil Nedir, Nasıl Oluşur? Kilin Kullanım Alanları ve Özellikleri Nelerdir?” (2022), erişim adresi: https://cimsa.com.tr/formulhane/gri-cimento/kil-nedir-nasil-olusur-kilin-kullanim-alanlari-ve-ozellikleri-nelerdir.

[23] “Kil Nedir? (Kil’in Kullanım Alanları).” (2024), erişim adresi: https://naramica.com/blog/kil-nedir.

[24] “Kırmızı Kil Nedir? Kırmızı Kil Sabunu Nasıl Kullanılmalıdır?” (2024), erişim adresi: https://www.chappal.co/blogs/i%CC%87cerik/kirmizi-kil-nedir-kirmizi-kil-sabunu-nasil-kullanilmalidir.

[25] “The Different Types and Properties of Bricks.” (), erişim adresi: https://www.ultratechcement.com/for-homebuilders/home-building-explained-single/descriptive-articles/types-of-bricks-and-its-properties.

[26] Türk Standartları Enstitüsü, *TS EN 771-1+A1: Kâgir birimler - Özellikler - Bölüm 1: Kil kâgir birimler*. 2015.

[27] "Bir (cephe) Duvar Örme Sırasında Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar." (), erişim adresi: https://www.vandersanden.com/tr-tr/cephe-duvarin-orulmesi.

[28] "Yapı Elemanları Konu-5, Duvarlar." (), erişim adresi: https://www.munzur.edu.tr/birimler/akademik/fakulteler/muhendislik/bolumler/insaat/Pages/file/YAPI%20TEKNOLOJ%C4%B0S%C4%B0%20DERS-5.pdf.

[29] H. Maccarini, G. Vasconcelos, H. Rodrigues, J. Ortega P. B. Lourenço, "Out-of-plane behavior of stone masonry walls: Experimental and numerical analysis," *Construction and Building Materials*, c. 179, ss. 430–452, 2018.

[30] A. O. Kuruşcu, "Yığma yapıların analizi," yük. lis. tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.

[31] Türk Standartları Enstitüsü, *TS EN 998-2: Kâgir harcı — Özellikler — Bölüm 2: Kâgir harcı*. 2017.

[32] "Tuğla Duvar Hesaplama." (2022), erişim adresi: https://insaathesabi.com/hesaplamalar/tugla-duvar-hesaplama/.

[33] N. Bayülke, "Yiğma Yapilarin Deprem Davranişi Ve Güvenliği, 1," *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansõ*, 2011.

[34] C. Beall, *Masonry Design and Detailing: For Architects, Engineers, and Contractors*. McGraw-Hill, 1993.

[35] T. M. Ferreira, A. A. Costa A. Costa, "Analysis of the out-of-plane seismic behavior of unreinforced masonry: A literature review," *International Journal of Architectural Heritage*, c. 9, no. 8, ss. 949–972, 2015.

[36] R. Marques, "Masonry Box Behavior," içinde *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, M. Beer, I. A. Kougioumtzoglou, E. Patelli S.-K. Au, ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, ss. 1379–1396, ısbn: 978-3-642-35344-4. doı: 10.1007/978-3-642-35344-4_155.

[37] *2023 Kahramanmaraş ve Hatay Depremleri Raporu*. T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı - SBB, 2023.

[38] Ö. Mercimek, "Seismic failure modes of masonry structures exposed to Kahramanmaraş earthquakes (Mw 7.7 and 7.6) on February 6, 2023," *Engineering Failure Analysis*, c. 151, s. 107 422, 2023.

[39] V. Kahya ve diğ., "Evaluation of earthquake-related damages on masonry structures due to the 6 February 2023 Kahramanmaraş-Türkiye earthquakes: A case study for Hatay Governorship Building," *Engineering Failure Analysis*, c. 156, s. 107 855, 2024.

[40] G. Brandonisio, E. Mele A. De Luca, "Some considerations on out-of-plane collapse modes of masonry walls," içinde *Structural Analysis of Historic Construction: Preserving Safety and Significance, Two Volume Set*, CRC Press, 2008, ss. 585–594.

[41] A. P. Hrennikoff, "Plane stress and bending of plates by method of articulated framework," dok. tezi, Massachusetts Institute of Technology, 1940.

[42] R. Courant ve diğ., "Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations," *Lecture notes in pure and applied mathematics*, ss. 1–1, 1994.

[43] D. Madier. "History of Finite Element Method." (2021), erişim adresi: https://fea-academy.com/index.php/component/content/article/27-blog/fea-generalities/73-fem-history?Itemid=101.

[44] J. Fish T. Belytschko, *A first course in finite elements*. Wiley New York, 2007, c. 1.

[45] Wikipedia, *Finite element method*, http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Finite%20element%20method&oldid=1292113799.

[46] A. W. Page, "Finite element model for masonry," *Journal of the Structural Division*, c. 104, no. 8, ss. 1267–1285, 1978.

[47] S. S. Ali A. W. Page, "Finite element model for masonry subjected to concentrated loads," *Journal of structural engineering*, c. 114, no. 8, ss. 1761–1784, 1988.

[48] *Ansys® Academic Research Mechanical, Release 25.1, Help System, Theory Reference Guide, ANSYS, Inc.*

[49] B. Doran, M. Karslioglu, Z. Unsal Aslan C. Vatansever, "Experimental and numerical investigation of unreinforced masonry walls with and without opening," *International Journal of Architectural Heritage*, c. 17, no. 11, ss. 1833–1854, 2023.

[50] *Ansys® Academic Research Mechanical, Release 25.1, Help System, Element Reference Guide, ANSYS, Inc.*

[51] Z. Ü. Aslan, "Boşluklu Donatısız Yığma Duvarların Lif Takviyeli Polimer İle Güçlendirme Teknikleri," dok. tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2022.

[52] M. Karslığlu, "Boşluklu Yığma Duvarların Elastik-Plastik Analizi," dok. tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2023.

[53] A. O. Kuruşçu, "Yığma Duvar ve Temellerde Doğrusal Olmayan Modelleme," dok. tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2012.

[54] E. Nurkovic, "Donatısız Yığma Duvarların Makro Modelleme Yaklaşımı ile Doğrusal Olmayan Analizi," yük. lis. tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2022.

[55] O. Jafarov, "Lifli Polimerle Güçlendirilmiş Yığma Duvarların Modellenmesi," yük. lis. tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2012.

[56] Ç. Kaya, "Yığma Duvarların Elastik-Plastik Hesabı," yük. lis. tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2010.

[57] H. O. Koksal, B. Doran, A. O. Kuruscu A. Kocak, "Elastoplastic finite element analysis of masonry shear walls," *KSCE Journal of Civil Engineering*, c. 20, no. 2, ss. 784–791, 2016.

[58] S. Toker A. Ünay, "Mathematical modeling and finite element analysis of masonry arch bridges," *Gazi University Journal of Science*, c. 17, no. 2, ss. 129–139, 2004.

[59] "Constitutive Model." (), erişim adresi: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/constitutive-model.

[60] "Material Model." (), erişim adresi: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/material-model.

[61] E. A. de Souza Neto, D. Peric D. R. Owen, *Computational methods for plasticity: theory and applications*. John Wiley & Sons, 2011.

[62] K. Krabbenhøft, "Basic computational plasticity," *University of Denmark*, 2002.

[63] Wikipedia, *Henri Tresca*, https://en.wikipedia.org/wiki/Henri_Tresca.

[64] A. P. Boresi, R. J. Schmidt O. M. Sidebottom, *Advanced mechanics of materials*. John Wiley & Sons, 1993.

[65] Wikipedia, *Richard von Mises*, https://en.wikipedia.org/wiki/Richard_von_Mises.

[66] D. C. Drucker W. Prager, "Soil mechanics and plastic analysis or limit design," *Quarterly of applied mathematics*, c. 10, no. 2, ss. 157–165, 1952.

[67] L. R. Alejano A. Bobet, "Drucker–Prager Criterion," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, c. 45, no. 6, ss. 995–999, 2012.

[68] *Ansys® Academic Research Mechanical, Release 25.1, Help System, Material Reference Guide, ANSYS, Inc.*

[69] *Ansys® Mechanical APDL Enterprise Academic Research, Release 23.2*.

[70] A. Yıldırım, B. Doran, S. Alacalı Z. Ünsal Aslan, "Numerical investigation on the out-of-plane behavior of unreinforced masonry walls with and without opening," *Proceedings of 4th Civil Engineering & Architecture Conference Volume 1: Civil Engineering, Trabzon, Türkiye*, 2025, ss. 2032–2038.

[71] F. Graziotti, U. Tomassetti, S. Sharma, L. Grottoli G. Magenes, "Experimental response of URM single leaf and cavity walls in out-of-plane two-way bending generated by seismic excitation," *Construction and Building Materials*, c. 195, ss. 650–670, 2019.

[72] F. Messali, G. Ravenshorst, R. Esposito J. Rots, "Large-scale testing program for the seismic characterization of Dutch masonry walls," *Proceedings of 16th world conference on earthquake (WCEE), Santiago, Chile*, 2017.

[73] V. Chong, "The behaviour of laterally loaded masonry panels with openings (PhD Thesis)," *University of Plymouth, Plymouth*, 1993.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirisi

1. Yıldırım A., Doran B., Alacalı S., Unsal Aslan Z. "Numerical investigation on the out-of-plane behavior of unreinforced masonry walls with and without opening" Proceedings of 4th Civil Engineering & Architecture Conference Volume 1: Civil Engineering, Trabzon, Türkiye, 2025. ss. 2032-2038.