T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DONATISIZ YIĞMA DUVARLARIN MAKRO MODELLEME YAKLAŞIMI ILE DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ

Edin NURKOVİC

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Programı

Danışman

Prof. Dr. Bilge DORAN

Şubat, 2022

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DONATISIZ YIĞMA DUVARLARIN MAKRO MODELLEME YAKLAŞIMI İLE DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ

Edin NURKOVİC tarafından hazırlanan tez çalışması 08.02.2022 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

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Bilge DORAN Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr.Öğr.Üye. Sema ALACALI
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Bilge DORAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Donatısız Yığma Duvarların Makro Modelleme Yaklaşımı Ile Doğrusal Olmayan Analizi 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.

Edin NURKOVİC

İmza

Aileme…

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamı tamamlama süresince fikirlerimi ve isteklerimi de gözönünde bulundurup beni bilgi ve deneyimleri ile yönlendiren ve hiçbir zaman önerilerini esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Bilge Doran'a,

Kıymetli vaktini ayıran ve değerli yorumları ile bana yardım eden Araştırma Görevlisi Metin Karslıoğlu ve Araştırma Görevlisi Zeynep Ünsal Aslan'a,

Abaqus/Standard yazılımının lisanslı olarak kullanımına olanak sağladığı için Sayın Doç. Dr. Cüneyt Vatansever'e,

Beni hayatım boyunca her konuda ve her zaman destekleyen sevgili aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Edin NURKOVİC

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ ..... **viii**
KISALTMA LİSTESİ ..... **x**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xi**
TABLO LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xiv**
ABSTRACT ..... **xvi**
1 GİRİŞ **1**
1.1 Literatür Araştırması 1
1.2 Tezin Amacı 4
1.3 Hipotez 5
2 YIĞMA MALZEME ÖZELLİKLERİ **6**
2.1 Yığma Bileşenlerinin Mekanik Özellikleri 6
2.1.1 Tuğla 6
2.1.2 Doğal Taş 8
2.1.3 Harç 8
2.2 Yığma Duvarların Mekanik Özellikleri 10
2.2.1 Basınç Davranışı 10
2.2.2 Çekme Davranışı 13
2.2.3 Yığma Duvarların Elastik Özellikleri 13
3 YIĞMA DUVARLARIN DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ **16**
3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi 16
3.2 Akma/Kırılma Kriterleri 21
3.2.1 Tresca ve von-Mises Kriterleri 21
3.2.2 Mohr-Coulomb ve Drucker-Prager Kriterleri 23
3.3 Beton İçin Elastoplastik Hasar Modeli 25
3.4 Sayısal Modelleme Teknikleri 30
3.4.1 Mikro Modelleme Teknikleri 30
3.4.2 Makro Modelleme Tekniği 32
4 SAYISAL MODELLEME VE DOĞRULAMA **33**
4.1 Önerilen Sayısal Model 33
4.2 Sayısal Modelin Doğrulanması 34

4.2.1 Deney Duvarı No. 1 34
4.2.2 Deney Duvarı No. 2 37
4.2.3 Deney Duvarı No. 3 44
4.2.4 Deney Duvarı No. 4 47
4.2.5 Deney Duvarı No. 5 51
5 PARAMETRİK ÇALIŞMA 56
6 SONUÇ VE ÖNERİLER 69
KAYNAKÇA 71
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 77

SİMGE LİSTESİ

$\Phi(\sigma)$	Akma Fonksiyonu
G	Akma Potansiyeli
q^s	Alansal Yük Yoğunluğu
d_c	Basınç İçin Plastik Hasar Değişkeni
f_{bl}	Beton Blok Basınç Dayanımı
$\bar{\sigma}$	Cauchy Gerilmesi
d_t	Çekme İçin Plastik Hasar Değişkeni
Kc	Çekme Meridyeni Üzerindeki İkinci İnvaryantın, Basınç Meridyeni Üzerindeki İkinci İnvaryantına Oranı
J_2	Deviatorik Gerilmenin İkinci İnvaryantı
s	Deviatorik Gerilme Tansörü
ϵ	Dış Merkezlik
$\bar{F}$	Dış Yükler Vektörü
F_c	Düğüm Noktası Yükler Vektörü
ψ	Genleşme Açısı
F^b	Hacım Kuvvetler Vektörü
q^b	Hacımsal Yük Yoğulnuğu
f_j/f_{mr}	Harcın Basınç Dayanımı
E_m	Harcın Elastisite Modülü
η_m	Harcın Hacım Oranı
v_m	Harcın Poisson Oranı
D^{el}	Hasarlı Malzeme Elastik Rijitlik Tansörü
D_0^{el}	Hasarsız Malzeme Elastik Rijitlik Tansörü
$p(\sigma)$	Hidrostatik Basınç
ϕ	İçsel Sürtünme Açısı
τ_y	Kayma Akma Gerilmesi
τ	Kayma Gerilmesi
σ_{t0}	Kırılma Anındaki Tek Eksenli Çekme Gerilmesi
c	Kohezyon
σ_{max}	Maksimum Asal Gerilme
$\hat{\bar{\sigma}}_{max}$	Maksimum Efektif Asal Gerilmesi
σ_{min}	Minimum Asal Gerilme
σ_n	Normal Gerilme
K	Rijitlik Matrisi
$\sigma^{(m)}$	Sonlu Eleman Gerilme Tansörü
$D^{(m)}$	Sonlu Eleman Malzeme Matrisi
$\bar{\varepsilon}^{(m)}$	Sonlu Eleman Şekil Değiştirme Tansörü
$H^{(m)}$	Sonlu Eleman Şekil Değiştirme – Yer Değiştirme Matrisi
$H^{(m)}$	Sonlu Eleman Yer Değiştirme İnterpolasyon Matrisi
σ_y	Tek Eksenli Akma Gerilmesi
σ	Tek Eksenli Gerilme
f_b	Tuğlanın Basınç Dayanımı
E_b	Tuğla Elastisite Modülü
η_b	Tuğla Hacım Oranı

v_b	Tuğla Poisson oranı
μ	Viskozite
$q(\sigma)$	Von-Mises Gerilmesi
$\bar{U}$	Yer Değiştirme Vektörü
f'_m	Yığma Basınç Dayanımı
E_m	Yığma Elastisite Modülü
F^s	Yüzey Kuvvetler Vektörü

KISALTMA LİSTESİ

CDP	Beton İçin Elastoplastik Hasar Modeli
GFRP	Cam Elyaf Takviyeli Plastik
SFRC	Çelik Lifli Beton
EPD	Elastoplastik Hasar Modeli
IMG	İnorganik Matriks Güçlendirme
PÇK/A	Kompoze Portland Çimentosu
PÇ	Portland Çimentosu
TS	Türk Standardı
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
IS	Uluslararası Standart

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Tuğla basınç dayanımı ve elastisite modülü arasındaki ilişki [35].....7
Şekil 2.2 Harcın basınç dayanımı ve elastisite modülü arasındaki ilişki [35] ...10
Şekil 2.3 Yığma için basınç etkisi altında Gerilme - Şekil Değiştirme İlişkisi [35] 11
Şekil 2.4 Yığma Basınç Dayanımına Bağlı Yığma Elastisite Modülü [35] 13
Şekil 3.1 Sonlu eleman tipleri: a) bir boyutlu, b) ve c) 2 boyutlu, d) 3 boyutlu 17
Şekil 3.2 Üçgen izoparametrik sonlu eleman [73].....17
Şekil 3.3 Dörtgen izoparametrik sonlu eleman [73].....18
Şekil 3.4 Üç boyutlu izoparametrik sonlu eleman [73] 18
Şekil 3.5 Tresca ve von-Mises akma yüzeyleri [76] 23
Şekil 3.6 Mohr-Coulomb akma modeli [76] 24
Şekil 3.7 Mohr-Coulomb akma yüzeyi [76] 24
Şekil 3.8 Drucker – Prager akma yüzeyi [76] 25
Şekil 3.9 Beton için a) tek eksenli çekme altında gerilme - şekil değiştirme eğrisi b) tek eksenli basınç altında gerilme - şekil değiştirme eğrisi [74] 26
Şekil 3.10 Deviatorik düzlemde akma yüzeyleri [74] 28
Şekil 3.11 Düzlem gerilme durumu için akma yüzeyi [74].....28
Şekil 3.12 Drucker – Prager hiperbolik fonksiyonu [74].....29
Şekil 3.13 Genleşme açısı [1].....29
Şekil 3.14 Mikro modelleme [1] 31
Şekil 3.15 Basitleştirilmiş mikro modelleme [1] 32
Şekil 3.16 Makro modelleme [1] 32
Şekil 4.1 Stratford vd. Clay 1 duvarı fiziksel model.....34
Şekil 4.2 Stratford vd. Clay 1 duvarı basınç gerilme – şekil değiştirme eğrisi ..36
Şekil 4.3 Stratford vd. Clay 1 duvarı sonlu elemanlar modeli.....36
Şekil 4.4 Stratford vd. Clay 1 duvarı yatay yük – yer değiştirme diyagramı.....37
Şekil 4.5 Stratford vd. Clay 1 duvarı a) deney sonucu mekanizma durumu [81] b) çözümleme sonunda oluşan plastik şekil değiştirme dağılımı 37
Şekil 4.6 TU Eindhoven duvarı deney düzeni 38
Şekil 4.7 Tu Eindhoven duvarı basınç gerilme – şekil değiştirme eğrisi 39
Şekil 4.8 a) J4D duvarı fiziksel model [1] b) J4D duvarı sonlu elemanlar modeli 40
Şekil 4.9 J4D duvarı yatay yük – yer değiştirme diyagramı 41
Şekil 4.10 TU Eindhoven J4D duvarı a) deney sonucu mekanizma durumu [19] b) çözümleme sonunda oluşan plastik şekil değiştirme dağılımı 41
Şekil 4.11 a) J2G duvarı fiziksel model [1] b) J2G duvarı sonlu elemanlar modeli 42
Şekil 4.12 J2G duvarı yatay yük – yer değiştirme diyagramı.....43
Şekil 4.13 TU Eindhoven J2G duvarı a) deney sonucu mekanizma durumu [19] b) çözümleme sonunda oluşan plastik şekil değiştirme dağılımı 43
Şekil 4.14 Augenti vd. duvarı fiziksel model [23] 44
Şekil 4.15 Augenti vd. duvarı sonlu elemanlar modeli 44

Şekil 4.16 Augenti vd. duvarı basınç gerilme – şekil değiştirme eğrisi.....46
Şekil 4.17 Augenti vd. duvarı a) deney sonucu mekanizma durumu [23] b) çözümleme sonunda oluşan plastik şekil değiştirme dağılımı.....46
Şekil 4.18 Augenti vd. duvarı yatay yük – yer değiştirme diyagramı 47
Şekil 4.19 Kumrava vd. duvarı a) fiziksel model [82] b) sonlu elemanlar modeli 48
Şekil 4.20 Kumrava vd. duvarı basınç gerilme – şekil değiştirme eğrisi.....49
Şekil 4.21 Kumrava vd. duvarı yatay yük – yer değiştirme diyagramı 50
Şekil 4.22 Kumrava vd. duvarı a) deney sonucu mekanizma durumu [82] b) çözümleme sonunda oluşan plastik şekil değiştirme dağılımı.....50
Şekil 4.23 Haider URM W6 duvarı fiziksel model.....51
Şekil 4.24 Haider URM W6 duvarı basınç gerilme – şekil değiştirme eğrisi.....52
Şekil 4.25 Haider URM W6 duvarı sonlu elemanlar modeli 53
Şekil 4.26 Haider URM W6 duvarı yatay yük – yer değiştirme diyagramı 54
Şekil 4.27 Haider URM W6 duvarı deney sonucu mekanizma durumu 54
Şekil 4.28 Çözümleme sonunda oluşan plastik şekil değiştirme dağılımı 55
Şekil 5.1 Normalize edilmiş maksimum yatay yük – boşluk oranı 66
Şekil 5.2 Normalize edilmiş başlangıç rijitliği eğimi – boşluk oranı 66

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Doğal Yapı Taşların Mekanik Özellikleri [65] 8
Tablo 2.2 Harcın Basınç Dayanımı [67] 9
Tablo 2.3 Harcın Basınç Dayanımı [67] 12
Tablo 4.1 Stratford vd. duvarı geometrik özellikler 34
Tablo 4.2 Stratford vd. Clay 1 duvarı bileşenlerin mekanik özellikleri 35
Tablo 4.3 Stratford vd. Clay 1 duvarı malzeme parametreleri 35
Tablo 4.4 TU Eindhoven duvarı geometrik özellikler 38
Tablo 4.5 TU Eindhoven duvarı bileşenlerin mekanik özellikleri 39
Tablo 4.6 TU Eindhoven duvarı malzeme parametreleri 39
Tablo 4.7 Augenti vd. duvarı bileşenlerin mekanik özellikleri 45
Tablo 4.8 Augenti vd. duvarı malzeme parametreleri 45
Tablo 4.9 Kamrava vd. duvarı geometrik özellikler 48
Tablo 4.10 Kumrava vd. duvarı bileşenlerin mekanik özellikleri 48
Tablo 4.11 Kumrava vd. duvarı malzeme parametreleri 49
Tablo 4.12 Haider URM W6 duvarı geometrik özellikler 51
Tablo 4.13 Haider URM W6 duvarı bileşenlerin basınç dayanımları 52
Tablo 4.14 Haider URM W6 duvarı malzeme parametreleri 52
Tablo 5.1 Durum 1: Pencere 56
Tablo 5.2 Durum 2: Kapı 58
Tablo 5.3 Durum 3: Pencere-Pencere 60
Tablo 5.4 Durum 4: Kapı-Pencere 62
Tablo 5.5 Maksimum yatay yük değerleri 65

ÖZET

Donatısız Yığma Duvarların Makro Modelleme Yaklaşımı ile Doğrusal Olmayan Analizi

Edin NURKOVİC

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Bilge DORAN

Basitliği, dayanıklılığı, düşük maliyeti ve diğer özellikleri nedeniyle yığma, eski çağlardan beri en çok kullanılan yapı malzemelerinden biri olmuştur. Türkiye gibi yüksek sismik bölgelerde bile yığma yapılar günümüzde de sıkça inşa edilmektedir. Yığma yapıların düzlem içi yatay yükler altındaki yapısal davranışı çok karmaşık olduğundan, en temel taşıyıcı olan yığma duvarların tasarımı ve sayısal modellemesi oldukça büyük önem kazanmaktadır. Son yıllarda, özellikle doğrusal olmayan problemleri çözebilen bilgisayar programlarının gelişmesiyle birlikte, yığma yapıların davranışı ile ilgili çalışmalarda önemli bir artış olmuştur. Bu amaçla araştırmacılar tarafından çeşitli sayısal modelleme teknikleri geliştirilmiştir. Son depremler donatısız boşluklu yığma duvarların düzlem içi kapasitelerinin zayıf olduğu göstermiştir, ancak boşluk oranı ve konumu ile duvarların düzlem içi kapasitesi arasındaki ilişkiyi kurmak için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

Bu çalışma, boşluksuz ve boşluklu donatısız yığma duvarların doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizinin yanı sıra boşlukların yığma duvarların düzlem içi davranışı üzerindeki etkisine odaklanmıştır. Sayısal çözümlemelerde, yığmanın

homojen kompozit malzeme olduğu kabulüne dayanan makro modelleme yaklaşımı kullanılmıştır. Duvarların doğrusal olmayan davranışını simüle etmek için uygun bünye modellerinin kullanılması gereklidir. Bu çalışmada, beton için elastoplastik hasar modeli yığma birim için uygulanmıştır. Bu bağlamda, yığma duvarların malzeme parametreleri kapsamlı bir literatür taraması ile elde edilmiştir. Önerilen modelin doğruluğu, sayısal çözümlerle elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla yatay yük - yatay yer değiştirme eğrisi ve göçme mekanizmaları açısından karşılaştırılmasıyla gösterilmiştir. Önerilen model kullanılarak, donatısız yığma duvarlarda boşluk oranı ve konumunun düzlem içi davranışı üzerindeki etkilerini belirlemek için farklı boşluk oranlarına ve konumlarına sahip duvarların bir dizi sayısal analizi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Donatısız yığma duvar, doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi, beton için elastoplastik hasar, boşluk oranı, boşluk konumu

ABSTRACT

Nonlinear Analysis of Unreinforced Masonry Walls using Macro Modeling Approach

Edin NURKOVIC

Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Bilge DORAN

Due to its simplicity, durability, low cost, and other features, masonry has been one of the most used building materials since ancient times. Masonry is still in practice even in highly seismic regions such as Turkey. Since the structural behaviour of masonry walls under in-plane lateral loading is very complicated, numerical modelling of masonry wall as a main structural element of masonry is one of the most challenging topics of structural engineering. In the last few decades, especially with the development of computer programs able to solve nonlinear problems, there has been a significant increase in studies related to the behaviour of masonry structures. For this purpose, several numerical modelling techniques have been developed by researchers. Masonry walls containing openings have been shown to have the poor in-plane capacity, but further research is required to establish the relationship between the size and position of openings and the in-plane capacity of the walls.

This study is focused on the nonlinear finite element analysis of unreinforced masonry walls with and without openings as well as the effect of openings on the

in-plane behaviour of masonry walls. Masonry is assumed to be homogeneous composite material and is modelled with the macro-modelling approach. To simulate the nonlinear behavior of the walls, an appropriate constitutive modeling technique is required. Herein, a concrete damaged plasticity model is adopted. In this context, the material parameters of walls are obtained through an extensive literature review. The validity of the proposed model is done by comparing the results obtained by numerical solutions with the experimental ones in terms of lateral force-lateral displacement curve and cracking mechanisms. By using the proposed model, a number of numerical analysis of the walls with different opening sizes and positions under the combination of vertical and lateral loads are done to identify their impact on the in-plane behavior of unreinforced masonry walls.

Keywords: Unreinforced masonry walls, nonlinear finite elements analysis, concrete damaged plasticity, opening percentage, opening position

1
GİRİŞ

Hem Türkiye'de hem de dünyada, yığma yapılar en fazla tercih edilen yapı türlerinden biridir. Düşey ve yatay yükler etkisi altında olan yığma yapıların davranışı çok karmaşık olduğundan, yığma yapıların sayısal modellemesi, yapı mühendisliğinin en zor konularından birini oluşturmaktadır. Diğer yaygın kullanılan yapı malzemelerinin (beton veya çelik) aksine, yığma, zayıf düzlemler olarak davranan harç derzleri nedeniyle ortotropik davranış sergilemektedir.

1.1 Literatür Araştırması

Yığma, yatay ve düşey olarak yerleştirilmiş harç derzleriyle birbirine bağlanan yığma birimlerden (taş, tuğla vb.) oluşan kompozit yapı malzemesidir. Bileşenlerinin farklı mekanik özelliklerine sahip olmasından dolayı, yığma heterojen bir malzeme olarak sınıflandırılmaktadır. Son yıllarda, büyük bir kültürel miras olan tarihi yapıların korunması için, yığma taşıyıcı elemanlarının, özellikle yığma duvarların doğrusal olmayan davranışlarını tahmin edebilen sayısal modellerin geliştirilmesi için önemli araştırmalar yapılmıştır. Anizotropik ve heterojen yapısı nedeniyle, yığma yapıların tasarımı, birçok varsayım ve basitleştirme gerektiren bir süreçtir.

Lourenco [1] doktora çalışmasında, yığma duvarların doğrusal olmayan analizi için çeşitli modelleme teknikleri önermiştir. Yığma bileşenlerde oluşabilecek tüm kırılma mekanizmalarını dikkate alan mikro modelleme tekniğini önermiştir. Mikro modellemede yığma birimi ve harç etkileşimi olan ve potansiyel çatlağı ifade eden enterfaz elemanın doğru olarak modellenmesi oldukça önemli olduğunu vurgulamıştır. Yığma yapıların genel ölçekteki davranışının inceleneceği durumlarda malzemenin kompozit olarak kabul edildiği, makro modelleme olarak adlandırılan farklı bir yaklaşım kullanılmıştır. Detaylı mikro modelleme yaklaşımı yığma duvarların davranışını tahmin etmek için en doğru yöntemdir, ancak gerek modelleme ve çözüm süresinin uzaması gerekse çözüm için gerekli olan parametrelerin belirlenmesi açısından genellikle küçük ölçekli yığma duvarlarda

uygulanabilir olduğunu belirtmiştir. Makro modelleme yaklaşımının ise büyük ölçekli yapıların verimli bir şekilde modellenmesi ve genel davranışının tahmin edilmesi için uygun bir yöntem olduğu, ancak göçme mekanizmaları ile ilgili ayrıntılı bilgi veremediğini belirtmiştir. Lourenco [1] mikro modelden makro modele geçmek için homojenleştirme tekniklerinden faydalanmıştır. Birçok araştırmacı yığma duvarların karmaşık davranışını incelemek için çalışmalarında mikro modelleme yaklaşımını kullanmıştır [1-8]. Chaimoon vd. [2] kesme ve basınç kırılmaları etkisi altındaki yığma duvarlarının modellemesi için Lourenco [1] tarafından önerilen basitleştirilmiş mikro modelleme yaklaşımını kullanmışlardır. Harç kalınlığı ve tuğla harç ara yüzeyleri, sıfır kalınlıklı ara yüzey elemanlarla modellenmiştir. Duvarların geometrisinin değişmemesi için, tuğla birimlerinin boyutları harç kalınlığı kadar genişletilmiştir. Kırılma yüzeyi Mohr-Coulomb kırılma kriteri kullanılarak belirlenmiştir. Önerilen model ETH Zürih duvarlarına uygulanmış ve geçerliğinin doğrulanması için elde edilen sayısal sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Giambanco vd. [3], ara yüzey elemanlarında sadece çekme ve kesme kırılmasının dikkate alındığı bir mikro model kullanmışlardır. Drougkas vd. [4] 2019 yılında yaptıkları çalışmada, dolu ve boşluklu yığma duvarlar üzerinde bir dizi deneysel ve sayısal çalışma yapmışlardır. Duvar geometrisinin ve duvar boşluğunun duvarların göçme mekanizmalarına ve düzlem içi davranışına olan etkilerini incelemişlerdir. Yığma duvarların sayısal modellemesinde her bir duvar birimi, harç derzleri ve enterfaz elemanları ayrı ayrı modellendiği detaylı mikro modelleme yaklaşımı tercih edilmiştir. Doran vd. [5] harç enjeksiyonu ile güçlendirilmiş tarihi yığma duvarların modellemesi için basitleştirilmiş mikro model kullanmışlardır. Bünyesel model olarak elastoplastik hasar modeli (EPD) kullanılmıştır ve önerilen modelin doğruluğunun kanıtlanması için sayısal sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Benzer modeller Doran vd. [6], Abdulla vd. [7] ve Lourenco ve Rots [8] tarafından kullanılmıştır.

Makro modelleme yaklaşımı, analiz sürelerini büyük ölçüde azalttığından mikro modelleme yaklaşımlarına göre daha pratik bir yöntemdir. Bu nedenle makro modelleme, özellikle büyük ölçekli yığma yapıların modellemesinde çok yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır [1,9-16]. Köksal vd. [9] tarafından yapılan

çalışmada yığma duvarların elastoplastik analizi için makro modelleme tekniği seçilmiş ve yük-yer değiştirme eğrisi ve maksimum yatay yük açısından uygun sonuçlar elde edilmiştir. Berto vd. [10] yığma duvarların analizi için yatay ve düşeydeki harç yüzeyleri için farklı elastik ve plastik malzeme parametrelerine sahip olan ortotropik kompozit olarak kabul edildiği bir makro model önermişlerdir. Elde edilen sonuçlar, önerilen modelin genel davranışı temsil etme yeteneğinin yanı sıra düzlem içi yatay yükler altındaki duvar panellerin göçme modlarını da göstermiştir. Kapı veya pencere gibi boşluk içeren yığma duvarlardan inşa edilen donatısız yığma yapılarda, boşlukların sebep olduğu rijitlik azalması nedeniyle, zayıf sismik kapasiteye sahip olduğu bilinmektedir. Ayrıca yığma duvarlarda bulunan boşluklar duvarların göçme mekanizmalarını da önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle boşluklu yığma duvarların düzlem içi yükler altındaki davranışının incelenmesi üzerine araştırmaların yapılması oldukça önemlidir [17-26]. Vermeltfoort ve Raijmakers [17-20] dolu ve boşluklu duvarların düzlem içi kapasitelerini ve göçme mekanizmalarını belirlemek amacıyla bir dizi deneysel çalışma yapmışlardır. Dolu duvarların taşıma kapasitelerinin boşluklu duvarların taşıma kapasitelerinden oldukça fazla olduğu görülmüştür. Dolu duvarlarda ilk çatlaklar en üst ve en alttaki yatay harç yüzeylerinde başlayıp yatay yüklerin artmasıyla diyagonal bir şekilde yayılmıştır. Boşluklu duvarlarda ise, ilk çatlaklar boşluğun etrafındaki köşelerde ortaya çıkıp, duvar köşelerine doğru diyagonal olarak ilerlemiştir. Liu ve Crewe [21] boşluklu yığma duvarlar üzerinde parametrik çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada boşluk oranı ve konumunun değişiminin donatısız yığma duvarların düzlem içi performansına olan etkilerini incelemişlerdir. Sayısal modelleme tekniği olarak basitleştirilmiş mikro model kullanılmıştır. Yığma duvarlardaki göçme genelde harç yüzeylerinde ve tuğla-harç birleşim bölgelerinde oluştuğundan, tuğla elemanların modellemesi için doğrusal elastik izotropik bünyesel model kullanılmıştır. Böylece, tuğla rijit eleman olarak kabul edilmiştir. Enterfaz elemanları Coulomb kayma modeli ile modellenmiştir. Kesme kırılması, çekme kırılması ve harcın genleşmesi dikkate alınmıştır. Bu çalışmanın sonucunda boşluk oranı arttıkça yığma duvarların düzlem içi kapasitesinde azalma meydana geldiği gösterilmiştir. Boşlukların boyutundaki, sayısındaki ve konumundaki değişiklik

yığma duvarın göçme mekanizmasını değiştirdiği ve yumuşak kat tipi göçmeye yol açarak duvar dayanımını önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir. Merkezi boşluğu olan duvarlarda boşluk oranı %10'dan az olduğu durumlarda, dolu duvar kapasitesinin %80'i kadar yük taşıyabildiğini belirtmişlerdir. Boşluk oranı % 50'yi aştığında ise, boşluklu duvar dolu duvarın taşıdığı maksimum yatay yükün % 10'u değerinde yük taşıyabilmektedir.

Yığma duvarların doğrusal olmayan davranışını sayısal olarak ifade etmek için bünyesel modelleme teknikleri kullanılmalıdır. Beton ve yığma gibi gevrek ve yarı gevrek malzemelerde çok yaygın kullanılan bünyesel modellerden biri Lubliner vd. [27] tarafından geliştirilmiş daha sonra Lee ve Fenves [28] tarafından modifiye edilmiş beton için elastoplastik hasar modelidir (CDP). CDP bünye modeli beton için geliştirilmiş olsa da, yığma yapılar için de uygun sonuçlar vermektedir [29-34]. Modelde betonun tek eksenli çekme ve basınç davranışı hasarlı plastisite ile tanımlanmaktadır. Modelin doğru olarak uygulanması için viskozite ve genleşme açısı gibi parametrelerin belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Kompozit malzemenin mekanik özelliklerini bileşenlerin mekanik özelliklerinden faydalanarak araştırmacılar ve yönetmelikler tarafından önerilen ampirik bağıntılar ile elde etmek mümkündür [35-53]. Kaushik vd. [35] tek eksenli basınç etkisi altında olan kil tuğla duvarların gerilme-şekil değiştirme ilişkisini belirlemek amacıyla deneysel çalışma yapmışlardır. Tuğla, harç ve kompozit malzeme için doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiş ve duvarın gerilme-şekil değiştirme eğrileri için altı "kontrol noktası" belirlenmiştir. Ayrıca tuğla, harç ve kompozit malzeme için basınç dayanımı ile elastisite modülü arasındaki ilişki araştırılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının esas amacı, donatısız boşluklu yığma duvarların yük-yer değiştirme davranışı ile göçme mekanizmasını yaklaşık olarak tahmin edebilen bir sayısal model önermek ve bir dizi parametrik çalışma ile boşluk oranı ve konumunun duvarın düzlem içi davranışı üzerindeki etkisini incelemektir. Bölüm 2'de yığma duvarların bileşenlerinin basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite

modulü gibi elastik ve plastik malzeme özellikleri ile ilgili bilgiler verilmiştir. Ayrıca, yığma birimi ve harcın mekanik özelliklerinden faydalanarak yığmanın mekanik özelliklerini belirlemek için araştırmacılar ve yönetmelikler tarafından önerilen teknikler sunulmuştur. Bölüm 3'te yığma duvarların modellemesinde kullanılan doğrusal olmayan sonlu elemanlar, bünyesel ve sayısal modelleme teknikleri hakkında bilgi verilmiştir. Boşluk oranı ve konumunun donatısız yığma duvarlar üzerindeki etkisini parametrik olarak belirlemek için uygun sayısal çözümleme tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple, literatürde deney sonuçları olan bir takım dolu ve boşluklu yığma duvar makro modelleme tekniği ile modellenmiş ve Bölüm 4'te çözümleme sonuçları sunulmuştur. Bünye modeli olarak beton için sıkça kullanılan bir elastoplastik hasar modeli kullanılmıştır. Önerilen modelin geçerliliğini doğruladıktan sonra, boşluk oranı ve konumunun değişimini irdeleyen bir dizi parametrik çalışma yapılmıştır.

1.3 Hipotez

Bu tez çalışmasında, makro modelleme yaklaşımı ve Elastoplastik Hasar modeli kullanılarak literatürde deney sonuçları mevcut olan bir dizi duvarın 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Deneylerde gözlenen yük - yer değiştirme ilişkisinin sayısal sonuçlar ile başarılı bir şekilde örtüşmesi ve mekanizma durumlarının kısmen benzeşiyor olması, kullanılan modelleme yaklaşımı ve seçilen bünye modelinin doğruluğunu destekler niteliktedir. Ayrıca tezin son bölümünde bir dizi parametrik çalışma ile boşluk konumu ve oranı değişiminin duvarların taşıyacağı maksimum yatay yük üzerindeki etkisinin araştırılması, tasarım açısından mühendisler için önemli bir bilgi mahiyetindedir.

2
YIĞMA MALZEME ÖZELLİKLERİ

Yığma yapılar doğal taş veya tuğla, beton briket, gazbeton gibi yapay taşların ve bağlayıcı malzemenin örülmesi ile inşaa edilir. Bağlayıcı malzeme olarak kireç veya çimento harcı veya ikisinin karışımı kullanılabilir [54].

Yığma duvarların mekanik özelliklerini tanımlamak için, bileşenler (harç, yığma birimleri) ve kompozit malzeme üzerinde deneyler yapılabilir. Yığma bileşenlerinin su emme katsayısı, basınç dayanımı, kayma dayanımı, çekme dayanımı gibi mekanik ve kimyasal özellikleri yığma yapıların davranışını yakından etkiler. Bu nedenle, son yıllarda yığma birimlerinin ve harcın mekanik davranışı, ulusal ve uluslararası kodların ve teknik şartnamelerin hazırlanmasını desteklemek adına, deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Dünya çapında yığma ve tarihi yapıların inşasında farklı yığma birimlerinin kullanılması ve çevresel etki nedeniyle farklı kırılma süreçleri, mekanik özelliklerin tahmini için önerilen teknikleri karmaşık hale getirmiştir. Bir binadaki taşıyıcı yığma duvarların mukavemeti kullanılan malzemelere bağlıdır ve bu nedenle tüm duvar malzemelerinin belirli minimum standartlara uyması gerekmektedir. Yapılan deneysel çalışmalara dayanarak [35, 38, 45, 55, 56], yığma yapılar basınç altında yüksek mukavemet gösterirken, çekme altındaki mukavemetinin düşük olduğunu söylemek mümkündür.

Bu çalışma kapsamında kullanılan malzemeler ve yığma duvarların mekanik özellikleri ile ilgili ayrıntılı bilgiler bu bölümde verilmektedir.

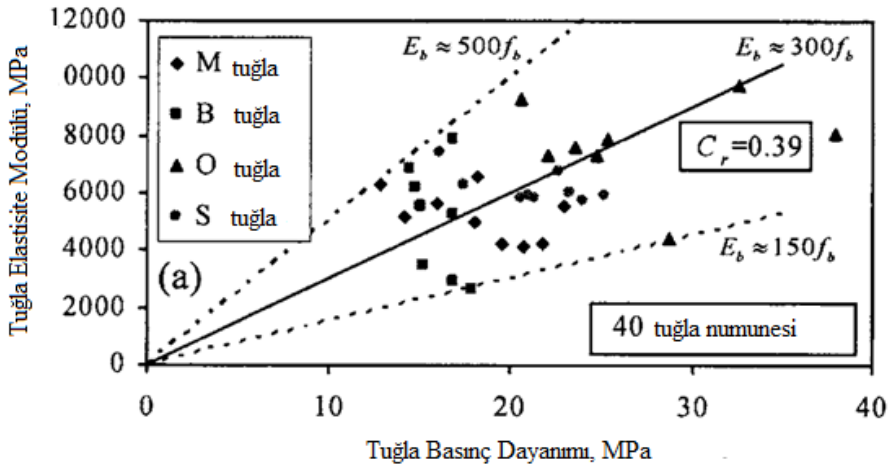
2.1 Yığma Bileşenlerinin Mekanik Özellikleri

2.1.1 Tuğla

Tuğla, kil veya diğer killi toprakların şekillendirilmesi, kurutulması ve pişirilmesi ile üretilir. Tuğlanın kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri, hammaddenin özellikleri ve üretim koşulları ile doğrudan ilişkilidir. Pişirilmiş kil tuğlanın

üretimi, altı aşamaya ayrılabilir. İlk olarak hammaddenin çıkarılması ve depolanması gerçekleşir. Daha sonra malzeme boyut küçültme makinalarında işlenir ve tuğla üretimi için hazırlanır. Hammadde su ile karıştırılarak şekillendirildikten sonra kurutulur, pişirilir ve soğutulur. Son olarak üretilmiş ürünler depolanır.

Kil tuğlaların pişirilmesi sırasında boşluk ve çatlak gibi bir dizi fiziksel değişiklik oluşur. Boşlukların hacmi ile numunenin toplam hacmi arasındaki oran porozite olarak adlandırılır [57]. Porozite, tuğlanın bütün özelliklerini etkileyen bir parametredir. Tuğlanın en önemli özelliği basınç dayanımıdır. Mevcut yığma yapılarda kullanılan tuğlaların mineral bileşimi, çatlak biçimi ve porozite seviyesi gibi özellikleri basınç dayanımı hakkında bir gösterge sağlayabilir, ancak üretimdeki farklı süreçler ve çevresel etkiler eski binalara ait tuğlaların basınç dayanımının belirlenmesini zorlu hale getirmiştir. Bu nedenle, literatürde bulunan değer aralığı oldukça geniştir [58-60]. Buna karşılık, günümüzde üretilen tuğla birimlerin basınç dayanımları, kontrollü üretim prosedürleri nedeniyle genellikle çok daha düşük değer aralığına sahiptir. TS EN 771-1+A1'e [61] göre, düşey delikli tuğlanın basınç dayanımı, tuğlanın birim hacim kütlesine bağlı 6 MPa ile 24 MPa arasında değişir. Kaushik vd. [35] 2007 yılında yaptıkları çalışmada, ASTM C 67-00 [62] ve IS 3495'e [63] göre tuğla numuneler üzerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deney sonucu olarak, tuğlaların basınç dayanımı ile elastisite modülü arasında ampirik bir ilişki önerilmiştir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Tuğla basınç dayanımı ve elastisite modülü arasındaki ilişki [35]

Ghiassi vd. [66] tuğlanın çekme dayanımı için basınç dayanımın %7 ile %10 arasındaki değer aralığını önermişlerdir.

2.1.2 Doğal Taş

Çok eski dönemlerden beri yapı malzemesi olarak kullanılan doğal taş, binalarda, yollarda, köprülerde ve diğer inşaatlarda günümüzde de kullanılmaktadır. Kaleler, saraylar, kiliseler, camiler, Mısır Piramitleri ve diğer korunmuş birçok heybetli tarihi yapı, bu malzemenin dayanıklılığının bir kanıtıdır.

Doğal taş basınç dayanımı ve elastisite modülü yüksek olan bir malzemedir. Diğer gevrek malzemelerde olduğu gibi, doğal taşların da çekme dayanımı düşüktür. İnşaatlarda en yaygın kullanılan doğal taşlar arasında granit, mermer, kireç taşı, kumtaşı, kuvars, ve serpantin bulunur. Bu malzemeler, mekanik özellikler açısından büyük farklılıklar göstermektedir (Tablo 2.1) [65].

Tablo 2.1 Doğal Yapı Taşların Mekanik Özellikleri [65]

Taşın Cinsi	Basınç Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Granit	30-70	14-33	4-7	30000-55000
Mermer	25-65	9-45	1-15	25000-70000
Kireç taşı	18-35	6-20	2-6	10000-55000
Kumtaşı	5-30	2-10	2-4	13000-50000
Kuvars	10-30	3-10	3-4	15000-55000
Serpantin	7-30	2-10	6-11	23000-45000

2.1.3 Harç

Harç, kum ve alçı, kireç veya çimento gibi bağlayıcı malzemelerin su ile karıştırılması ile elde edilen, yığma birimlerin birbirlerine bağlanması için kullanılan bir malzemedir. Harcın özellikleri bileşenlerine bağlıdır. Kireç esaslı harçlar çimento esaslı harçlara göre daha düşük elastisite modülü değerlerine sahiplerdir. Ayrıca, çimento esaslı harçlar daha hızlı sertleşir ve dayanım kazanır [66].

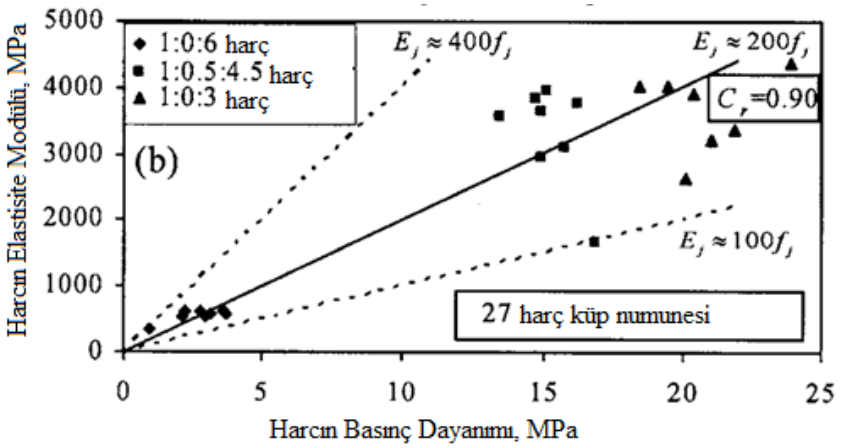
Harcın kullanılması yığma taşıyıcı elemanlarda eşit yük dağılımını sağlar. Harç, yüksek çekme dayanımına sahip olduğu için, yatay yüklere maruz kalan duvarın çekme dayanımını arttırır [64]. Yığma yapılarda en yaygın kullanılan harçlar çimento esaslı harç, kireç esaslı harç veya çimento-kireç karışımı ile elde edilen harç çeşitleridir. Kireç bazlı harçlarda bağlayıcı malzeme olarak hava bağlayıcıları ya da hidrolik bağlayıcıları kullanılır. Hava kireci hava teması ile sertleşirken, hidrolik kireç su ile sertleşir. Çimento esaslı harçlar hem yeni hem de tarihi kâgir yapılarda bulunabilir, ancak kireç esaslı harçlar genellikle tarihi kâgir yapılarda veya tarihi yapıların korunması veya tamiri için yapılan uygulamalarda bulunur.

Günümüzde kullanılan çimento esaslı harçların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için birçok deneysel çalışma yapılmıştır [35, 67, 68]. Okucu ve Değirmenci [67] tarafından TS 24 [69] ve ASTM C 109'a [70] göre hazırlanan harç numuneleri üzerinde, harcın basınç dayanımını belirlemek amacıyla bir dizi deneysel çalışma yapılmıştır. Çalışmada PÇ 42,5 ve PÇK/A 32,5R Portland Çimentoları kullanılmış, ve Tablo 2.2'de verilen sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 2.2 Harcın Basınç Dayanımı [67]

Numune	Basınç Dayanımı, MPa		
	2 Gün	7 Gün	28 Gün
PÇ 42,5 Küp	21.00	26.21	38.16
PÇ 42,5 Prizma	22.20	35.60	58.20
PÇK/A 32,5R Küp	17.30	26.79	33.64
PÇK/A 32,5R Prizma	21.70	33.30	42.60

Kaushik vd. [35] 2007 yılında yaptıkları çalışmada çimento-kireç-kum oranları 1:0:6 (zayıf), 1:0:3 (kuvvetli) ve 1:0.5:4.5 (orta) olmak üzere, üç farklı harç bileşiminden yapılan 50 mm boyutunda harç küpleri üzerinde deneyler yapmışlardır ve basınç gerilme-şekil değiştirme ve basınç dayanımı – elastisite modülü ilişkilerini elde etmişlerdir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Harcın basınç dayanımı ve elastisite modülü arasındaki ilişki [35]

2.2 Yığma Duvarların Mekanik Özellikleri

2.2.1 Basınç Davranışı

Yığma yapıların modellemesi için, malzemenin basınç dayanımı ve basınç gerilme-şekil değiştirme davranışının bilinmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Duvarın basınç dayanımı harç ve yığma birimlerinin farklı şekil değiştirme özelliklerinden etkilenir: duvar tek eksenli basınç yüküne maruz kaldığında, harç yanal olarak yığma birimlerden daha fazla genişleme eğilimindedir [71]. Yığma duvarın basınç dayanımının, bileşenlerinin basınç dayanımlarından faydalanarak belirlenmesine yönelik deneysel çalışmalar yapılmıştır [35-44].

Yığma basınç dayanımı, yığma elemanların tasarımı için en önemli özelliklerden biridir. Ancak, duvar prizmalarının basınç testleri her zaman pratik değildir ve bu nedenle birçok araştırmacı [35-39,41,43,44] Eurocode 6 [72]'de verilen denklemi (2.1) geliştirmeye çalışmıştır.

$$f'_m = K f_b^{\alpha} f_j^{\beta} \tag{2.1}$$

Burada f'_m , f_b ve f_j sırasıyla yığmanın, tuğlanın ve harcın basınç dayanımlarını ifade etmektedir.

Lumantarna vd. [36] yaptıkları çalışmada donatısız yığma duvarların basınç dayanımları ve basınç gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini araştırmışlardır. Sekiz mevcut yığma binadan alınan toplam 45 adet yığma prizma ve eski kil tuğlalardan

laboratuvarda üretilmiş 14 farklı tuğla/harç kombinasyonuna sahip 75 yığma prizma üzerinde deneyler yapmışlardır. Ayrıca, her prizmada kullanılan tuğla birimlerinin ve harcın basınç dayanımları deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, yığma bileşenlerinin basınç dayanımlarına bağlı olarak, yığma duvarın basınç dayanımı için Denklem 2.2'de verilen bağıntıyı önermişlerdir.

$$f'_m = 0.75 f_b^{0.75} f_j^{0.31} \tag{2.2}$$

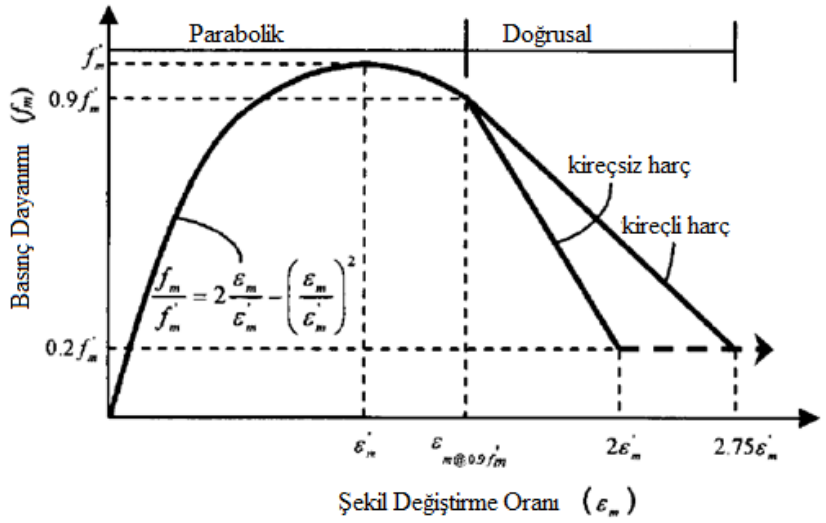
Benzer bir çalışma Gumaste vd. [37] tarafından yapılmış, ve denklem (2.3)'te verilen bağıntı üretilmiştir.

$$f'_m = 0.317 f_b^{0.866} f_j^{0.134} \tag{2.3}$$

Kaushik vd. [35], dört çeşit tuğla ve 3 çeşit harç ile inşa edilen duvar prizmaları üzerinde deneyler yapmışlardır ve duvarın basınç dayanımı için denklem (2.4)'te verilen bağıntıyı önermişlerdir.

$$f'_m = 0.63 f_b^{0.49} f_j^{0.32} \tag{2.4}$$

Kaushik vd. [35] yaptıkları çalışmada yığma duvarların doğrusal olmayan analizlerinde kullanılabilecek gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin elde edilmesi için basit bir analitik model önermişlerdir. Bu çalışmada, gerilme-şekil değiştirme eğrisi üzerinde altı kontrol noktası tanımlanmıştır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Yığma için basınç etkisi altında Gerilme - Şekil Değiştirme İlişkisi [35]

Şekil 2.3'te f'_m basınç dayanımı, $f_m$basınç gerilmesi, ε_m, f_m'e karşılık gelen şekil değiştirme oranı ve ε'_m, f'_m'e karşılık gelen şekil değiştirme oranını temsil etmektedir.

Dayaratnam [38], yığma duvarın basınç dayanımı ile tuğla ve harcın basınç dayanımı arasında bir ilişki araştırmak üzere bir dizi deneysel çalışma yapmıştır. Deney sonucu olarak denklem (2.5)'da verilen bağıntıyı elde etmiştir.

$$f'_m = 0.275 f_b^{0.5} f_j^{0.5} \tag{2.5}$$

Tensing vd. [39] 2013 yılında yaptıkları çalışmada basınç yüküne maruz kalan duvar prizmaları üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Duvar prizmaları, farklı harç kombinasyonları ile kil ve uçucu kül tuğlalardan üretilmiştir. Deneysel sonuçlara dayanarak yığmanın basınç dayanımı için denklem (2.6) üretilmiştir.

$$f'_m = 0.35 f_b^{0.65} f_j^{0.25} \tag{2.6}$$

Beton briket prizma için, Köksal vd. [40] aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir (2.7).

$$f'_m = 1.57 \ln(f_{mr}) + 0.75 f_{bl} \tag{2.7}$$

Bu bağıntıdaki f_{mr} harcın basınç dayanımı ve f_{bl} beton bloğun basınç dayanımıdır.

Yığma basınç dayanımı ile ilgili literatürde bulunan diğer bağıntılar Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3 Harcın Basınç Dayanımı [67]

Basınç Dayanımı f'_m	Kaynak
$f'_m = 0.69 f_b^{0.6} f_j^{0.35}$ (2.8)	Kumavat [41]
$f'_m = 0.9 + 0.3 f_b$ (2.9)	Bennett vd. [42]
$f'_m = 1.57 \ln(f_{mr}) + 0.25 f_{bl}$ (2.10)	Bennett vd. [42]
$f'_m = 0.56 f_b^{0.53} f_j^{0.5}$ (2.11)	Costigan vd. [43]
$f'_m = 0.886 f_b^{0.75} f_j^{0.18}$ (2.12)	Sarhat and Sherwood [44]

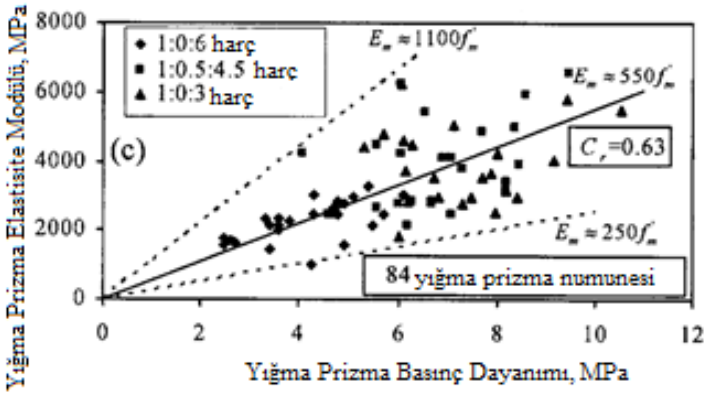
2.2.2 Çekme Davranışı

Gevrek olduğu için, yığma çekmede zayıf davranış sergileyen bir malzemedir. Çekme yüklemesi altında olan yığma duvarlarda, kırılma genellikle tuğla-harç arasındaki zayıf etkileşimden kaynaklanmaktadır [1]. Bu durumda, yığma çekme dayanımı basınç dayanımının %10 ile %20 arasında değer alabilmektedir [45].

2.2.3 Yığma Duvarların Elastik Özellikleri

Yığma duvarların elastisite modülü, duvar prizmaları üzerinde yapılan basınç deneylerinden kolayca elde edilebilir. Deneysel sonuçlar mevcut olmadığında, elastisite modülü, yığma duvarın basınç dayanımından tahmin edilebilir. Literatürde bu amaçla yapılan çok sayıda deneysel çalışma mevcuttur [35,42,46-49], ancak kullanılan malzeme ve deney şartlarına bağlı olarak elastisite modülünün önemli ölçüde değiştiğini belirtmek gerekir. Önerilen faktörlerin aralığı çok geniş olduğu için elastisite modülü dikkatli bir şekilde belirlenmelidir.

Kaushik vd. [35] yaptıkları deneysel çalışmada 84 adet yığma prizma üzerinde basınç deneylerini gerçekleştirmişler ve yığma elastisite modülü ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Yığma elastisite modülünün 250 f'_m ile 1100f'_m arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Yığma Basınç Dayanımına Bağlı Yığma Elastisite Modülü [35]

Elastisite modülünün ortalama değeri denklem 2.13'de verilen bağıntı ile hesaplanabilir.

$$E_m = 550\, f'_m \tag{2.13}$$

Burada E_m ve f'_m sıra ile yığma elastisite modülü ve basınç dayanımını ifade etmektedir.

Drysdale vd. [46] yığma duvarın elastisite modülü için 210-1670 f'_m aralığını önermişlerdir.

Haider [47] doktora çalışmasında elastisite modülünün belirlenmesinde aşağıdaki bağıntıdan faydalanmıştır (2.14):

$$E_m = X\, f'_m \tag{2.14}$$

burada 'X', kullanılan harç ve tuğla tipine bağlı olarak 500 ile 1000 arasında değişen bir faktördür.

Vermeltfoort ve Martens [48] mevcut binalardan elde edilen tarihi ve yeni kil tuğlalardan yapılmış yığma prizmalar üzerinde yapılan basınç deneyleri sonucunda yığma elastisite modülü için aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir (2.15).

$$E_m = 240\, f'_m \tag{2.15}$$

Bennett vd. [42] 1997 yılında yaptıkları deneysel çalışmada, 23 adet 0,6 m genişliğinde, 1,2 m yüksekliğinde ve 200 mm kalınlığında yapısal kil kiremit yığma prizma üzerinde basınç deneylerini yapmışlardır. Çalışmanın sonucu olarak yığma basınç dayanımı ve elastisite modülü arasındaki ilişki için aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir (2.16).

$$E_m = 0.68\, f'_m + 1.5 \tag{2.16}$$

Brencich vd. [49] yığma elastisite modülünü belirlerken farklı bir yol izlemişlerdir. Yığma bileşenlerinin elastik özelliklerini kullanarak yığma elastisite modülü için aşağıdaki bağıntıyı üretmişlerdir (2.17).

$$\frac{1}{E_M} = \frac{\eta_b}{E_b} + \frac{\eta_m}{E_m} + 2\,\eta_b\eta_m \frac{v_b E_m - v_m E_b}{\eta_m(1-v_b)E_m + \eta_b(1-v_m)E_b}\left(\frac{v_m}{E_m^2} - \frac{v_b}{E_b^2}\right) \tag{2.17}$$

Bu bağıntıda E_M yığma elastisite modülü, E_b tuğla elastisite modülü, $E_m$harcın elastisite modülü, v_b tuğla poisson oranı ve v_m harcın poisson oranını ifade etmektedir. η_b ve η_m tuğla ve harcın hacim oranlarını temsil etmektedir ve ilgili bağıntılar (2.18) ve (2.19) ile tanımlanmıştır.

$$\eta_b = \frac{t_b}{t_b + t_m} \tag{2.18}$$

$$\eta_m = \frac{t_m}{t_m + t_b} \tag{2.19}$$

Yığma poisson oranı değeri için literatürde 0,15 [50, 51] ile 0,25 [52, 53] arasında değerlere rastlanmaktadır.

3
YIĞMA DUVARLARIN DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ

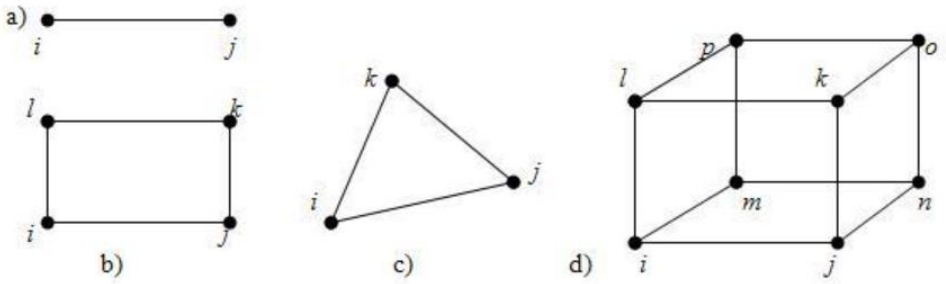
Yatay yük etkisi altında olan dolu ve boşluklu yığma duvarların davranışını basit hesaplarla tahmin etmek mümkün değildir. Bunun sebebi yığma duvarların küçük yer değiştirme değerleri için bile doğrusal olmayan davranış göstermesidir. Bu nedenle, yığma duvarların yük taşıma kapasitesi ve yük-yer değiştirme eğrisi açısından uygun sonuçları elde etmek amacı ile doğrusal olmayan analizler yapılmaktadır.

Bu bölüm kapsamında, yığma duvarların doğrusal olmayan analizleri için sonlu elemanlar yönteminde uygulanan analitik bir model sunulacaktır.

3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Karmaşık statik ve dinamik problemlerin analizi üç aşamadan oluşur: matematiksel bir modelin oluşturulması, modelin analizi ve sonuçların yorumlanması. Sonlu elemanlar yöntemi, mühendislikte çeşitli problemlerin sayısal çözümü için kullanılan en iyi tekniklerden biri olarak kabul edilmektedir. Yapı sistemlerinin doğrusal ve doğrusal olmayan statik ve dinamik problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Mühendislik problemlerinin çözümü için sonlu elemanlar yöntemlerinin geliştirilmesi bilgisayarın ortaya çıkmasıyla başlamıştır. Günümüzde sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan yazılımlar mühendisliğin hemen hemen tüm dallarında kullanılmaktadır. Bu bölümde, doğrusal ve doğrusal olmayan analiz problemlerinin çözümüne sonlu elemanlar yönteminin uygulanması ile ilgili bilgiler sunulmuştur.

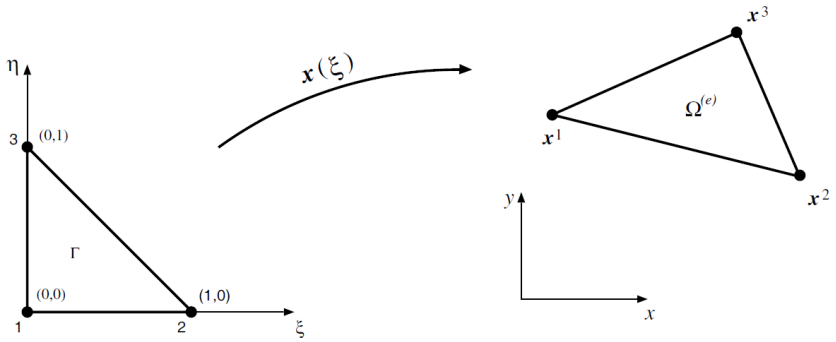
Sonlu elemanlar yönteminin esası çözüm aranan fiziksel sistemi çok sayıda küçük sonlu elemanlara bölerek bir matematiksel model oluşturmaktır. Bu elemanlar bir boyutlu, iki boyutlu veya üç boyutlu elemanlar olabilir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Sonlu eleman tipleri: a) bir boyutlu, b) ve c) 2 boyutlu, d) 3 boyutlu

Bir boyutlu elemanlara çubuk elemanı örnek verilir. Bunlar çelik donatı veya etriyeler olabilir. Plak, membran veya kabuk gibi iki boyutlu elemanlar düzlem gerilme veya düzlem şekil değiştirme problemlerinin çözümünde kullanılır. Üç boyutlu problemler söz konusu olduğunda, katı (solid) eleman kullanılmalıdır. Sonlu elemanların geometrik şekli ve eleman içindeki yer değiştirmelerin tanımlanması için izoparametrik formülasyon kullanılır. İzoparametrik formülasyonda her düğüm noktasının konumu ve yer değiştirmesi aynı mertebeden aynı şekil fonksiyonu ile tanımlanmaktadır. Elastoplastik analizlerinde yaygın olarak kullanılan bazı önemli izoparametrik elemanlar şekil fonksiyonları ile birlikte bu bölümde sunulmuştur [73].

Üçgen izoparametrik eleman Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



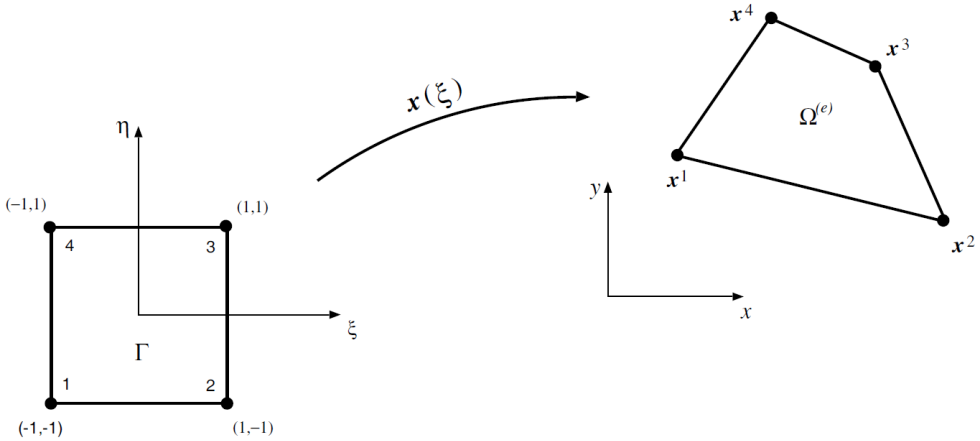
Şekil 3.2 Üçgen izoparametrik sonlu eleman [73]

Elemanın şekil fonksiyonları aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$\begin{aligned} N_1(\xi,\eta) &= 1-\xi-\eta \\ N_2(\xi,\eta) &= \xi \\ N_3(\xi,\eta) &= \eta \end{aligned} \tag{3.1}$$

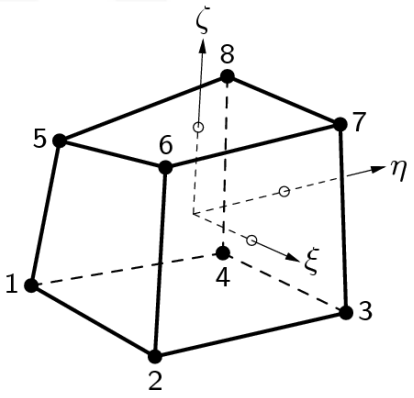
Dörtgen izoparametrik elemanın şekil fonksiyonları denklem 3.2'de verilmiştir.

$$
\begin{aligned}
N_1(\xi,\eta) &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) \\
N_2(\xi,\eta) &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta) \\
N_3(\xi,\eta) &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta) \\
N_4(\xi,\eta) &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)
\end{aligned}
\tag{3.2}
$$



Şekil 3.3 Dörtgen izoparametrik sonlu eleman [73]

Üç boyutlu problemlerin çözümünde altı yüzeyli, sekiz düğüm noktalı izoparametrik eleman kullanılır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Üç boyutlu izoparametrik sonlu eleman [73]

Bu tez çalışması kapsamında sonlu eleman modeli olarak ABAQUS/Standart [74] yazılımında mevcut olan altı yüzeyli sekiz düğüm noktalı C3D8R izoparametrik elemanı kullanılmıştır. Elemanın şekil fonksiyonları denklem 3.3'te verilmiştir:

$$
\begin{aligned}
N_1(\xi,\eta,\zeta) &= \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta)\\
N_2(\xi,\eta,\zeta) &= \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta)(1-\zeta)\\
N_3(\xi,\eta,\zeta) &= \frac{1}{8}(1-\xi)(1+\eta)(1-\zeta)\\
N_4(\xi,\eta,\zeta) &= \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1+\zeta)\\
N_5(\xi,\eta,\zeta) &= \frac{1}{8}(1+\xi)(1+\eta)(1-\zeta)\\
N_6(\xi,\eta,\zeta) &= \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta)(1+\zeta)\\
N_7(\xi,\eta,\zeta) &= \frac{1}{8}(1-\xi)(1+\eta)(1+\zeta)\\
N_8(\xi,\eta,\zeta) &= \frac{1}{8}(1+\xi)(1+\eta)(1+\zeta)
\end{aligned}
\tag{3.3}
$$

Matematiksel model oluşturulduktan sonra, düğüm noktalarında denge denklemleri ve sınır şartları belirlenir. Denge denklemleri aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilir:

$$K\bar{U} = \bar{F} \tag{3.4}$$

Bu denklemdeki K rijitlik matrisi, $\bar{U}$ yer değiştirme vektoru ve $\bar{F}$ dış yüklerden oluşan vektordur.

Sonlu elemanlar yönteminde, genel konumdaki bir cismin hayali sınırlarla sonlu sayıda elemana bölündüğü ve bu elemanların birbirileri ile bağlantılarının hayali sınırların belirlediği düğüm noktaları ile sağlandığı düşünülür. Her eleman içindeki yerel koordinat sisteminde ölçülen yer değiştirmeler, sonlu eleman düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerin fonksiyonu olarak tanımlanabilir:

$$\bar{u}^m(\xi,\eta,\zeta) = H^{(m)}(\xi,\eta,\zeta)\bar{U} \tag{3.5}$$

Buradaki $H^{(m)}$ yer değiştirme interpolasyon matrisi olarak adlandırılır. Üst simge m sonlu elemanı ifade etmektedir.

$\bar{U}$ yer değiştirme vektorüne bağlı olarak denklem 3.6'da verilen bağıntı ile elemanın şekil değiştirmeleri belirlenebilir.

$$\bar{\varepsilon}^{(m)}(\xi,\eta,\zeta) = B^{(m)}(\xi,\eta,\zeta)\bar{U} \tag{3.6}$$

Bu denklemdeki $B^{(m)}$ şekil değiştirmeleri düğüm noktası yer değiştirmelerine bağlayan matristir ve $H^{(m)}$ matrisinin türetilmesi ile elde edilir.

Sonlu elemanın gerilme tansörü elemanın şekil değiştirmelerine bağlı olarak denklem 3.7 ile hesaplanabilir.

$$\sigma^{(m)}(\xi, \eta, \zeta) = D^{(m)} \bar{\varepsilon}^{(m)} \tag{3.7}$$

Buradaki $D^{(m)}$ malzeme matrisini ifade etmektedir.

Rijitlik matrisi K, bağıntı 3.8 ile elde edilebilir.

$$K = \sum_m \int B^{(m)T} D^{(m)} B^{(m)} \, dV^{(m)} \tag{3.8}$$

Üç boyutlu sistemlerde dış yük vektörü F= F^b + F^s + F_c olmak üzere, F^b hacım kuvvetlerinden, F^s yüzey kuvvetlerinden ve F_c düğüm noktası yüklerinden oluşmaktadır.

F^b ve F^s sırayla Denklem 3.9 ve 3.10'de verilen bağlantılar ile tanımlanmıştır.

$$F^b = \sum_m \int H^{(m)T} q^{b(m)} \, dV^{(m)} \tag{3.9}$$

$$F^s = \sum_m \int H^{(m)T} q^{s(m)} \, dS^{(m)} \tag{3.10}$$

Bu denklemdeki q^b hacimsel (birim hacime gelen) ve q^s alansal (birim alana gelen) yük yoğunluğudur.

Fiziksel, geometrik ve sınır şartları açısından malzeme doğrusal ve doğrusal olmayan davranış sergileyebilir. Doğrusal analizlerde, malzemenin doğrusal elastik davranış gösterdiği ve şekil değiştirmelerin sonsuz küçük olduğu varsayılır, ancak malzemelerin birçoğu belli bir gerilme sınırına ulaştığında, elastik ötesi davranış sergilemeye başlar. Bu nedenle, özellikle beton ve yığma gibi kırılgan malzemelerin modellemesinde doğrusal olmayan analiz yöntemleri tercih edilir. Yapı elemanların doğrusal olmayan davranışı malzemenin doğrusal olmaması veya geometriğin doğrusal olmamasından kaynaklanabilir. Doğrusal olmayan bir malzeme davranışının en basit biçimi, gerilmenin şekil değiştirme ile doğrusal orantılı olmamasıdır. Daha genel durumlar, malzemenin yükleme ve boşaltma eğrisinin farklı olduğu durumlardır [75]. Bir malzemede kalıcı deformasyon meydana geldiyse, deforme olmamış geometri üzerine lineer, denge denklemlerini

yazmak artık mümkün değildir. Bu durumda, doğrusal olmayan denge denklemlerinin dikkate alınması gerekir. Doğrusal olmayan problemlerin çözümü, toplam yükün küçük adımlarla uygulandığı artımsal analizler ile elde edilir. Bu tez çalışmasında kullanılan ABAQUS/Standart [74] yazılımı, doğrusal olmayan sistemlerin çözümlerinde Newton-Raphson iterasyon yöntemini kullanır. Newton-Raphson yöntemi gerçek değerli bir f(x)=0 fonksiyonunun kökü için hızlı bir şekilde iyi bir yaklaşım bulmak için kullanılan bir algoritmadır. Algoritma f(x) fonksiyonunun bir kökü için ilk tahmin x_0 ile başlar, ve denklem 3.11'de verilen bağıntı ile bir x_1 değeri bulunur.

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \tag{3.11}$$

Bu işlem, tutarlı bir çözüme ulaşılana kadar tekrarlanır:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \tag{3.12}$$

3.2 Akma/Kırılma Kriterleri

Yığma duvarların elastik olmayan davranışını simüle etmek için uygun bünyesel modelleme tekniğine ihtiyaç vardır. Gerilme durumu akma sınırına ulaştıktan sonra malzeme elastik ötesi davranışı sergilemeye başlar. Bu ilke, sadece elastik deformasyonlar meydana geldiğinde negatif olan ve malzeme aktığında sıfıra ulaşan bir akma fonksiyonu ile ifade edilebilir [76]. Tek eksenli gerilme durumu için akma fonksiyonu denklem 3.13'te verilmiştir.

$$\Phi(\sigma, \sigma_y) = |\sigma| - \sigma_y \leq 0 \tag{3.13}$$

Bu denklemdeki $\Phi(\sigma, \sigma_y)$ akma fonksiyonu, σ tek eksenli gerilme ve σ_y tek eksenli akma gerilmesidir. Üç boyutlu gerilme durumu söz konusu ise, akma kriteri akma yüzeyi ile tanımlanır. Akma yüzeyi, malzemenin elastik kaldığı bir hiperyüzeydir.

3.2.1 Tresca ve von-Mises Kriterleri

Tresca akma kriteri metal malzemeleri için 1868 yılında Tresca tarafından geliştirilmiş bir akma kriteridir. Bu kritere göre, asal kayma gerilmesi kritik değere ulaştığında plastik akma başlar [76]:

$$\Phi(\sigma) = \frac{1}{2}(\sigma_{max} - \sigma_{min}) - \tau_y \tag{3.14}$$

Von-Mises akma kriteri, deviatorik gerilmenin ikinci invaryantının kritik değere ulaştığında plastik akmanın başladığı varsayımına dayanmaktadır. Von-Mises akma fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$\Phi(\sigma) = \sqrt{J_2(s(\sigma))} - \tau_y \tag{3.15}$$

Burada J_2 deviatorik gerilmenin ikinci invaryantı olup denklem (3.16)'da verilen bağıntı ile tanımlanmaktadır.

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \tag{3.16}$$

Denklemdeki σ_1, σ_2 ve σ_3 asal gerilmelerini ifade etmektedir.

Tek eksenli gerilme durumu için gerilme tansörü aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

Bu durumda, deviatorik gerilme tansörünü hacimsel (volümetrik) gerilme tansörünü çıkararak elde edebiliriz:

$$[s] = \begin{bmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\sigma}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sigma}{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2\sigma}{3} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\sigma}{3} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\sigma}{3} \end{bmatrix} \tag{3.18}$$

Ve denklem (3.16)'a göre:

$$J_2 = \frac{1}{3}\sigma^2 \tag{3.19}$$

$$q(\sigma) = \sqrt{3J_2(s(\sigma))} \tag{3.20}$$

Bağıntı (3.20) ile ifade edilen $q(\sigma)$ gerilmesi von-Mises gerilmesi veya eşdeğer gerilme olarak tanımlanmaktadır.

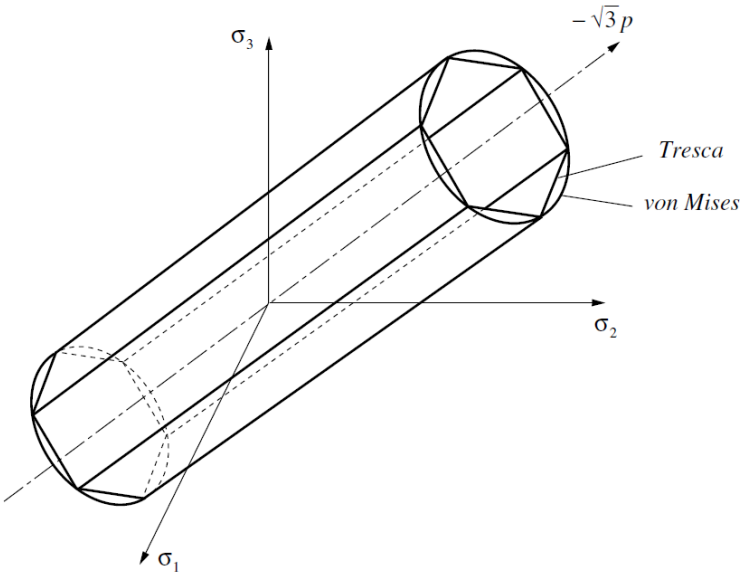
Von-Mises kriterine göre, tek eksenli akma gerilmesi ve kayma gerilmesi aşağıdaki şekilde ilişkilidir:

$$\sigma_y = \sqrt{3}\tau_y \tag{3.21}$$

Tek eksenli çekme durumu için elde edilen bu bağıntılar, denklem (3.15)'te yerine yazıldığında, denklem (3.22)'de verilen bağıntı elde edilir.

$$\Phi(\sigma) = q(\sigma) - \sigma_y \tag{3.22}$$

Tresca ve von-Mises akma yüzeyleri Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5 Tresca ve von-Mises akma yüzeyleri [76]

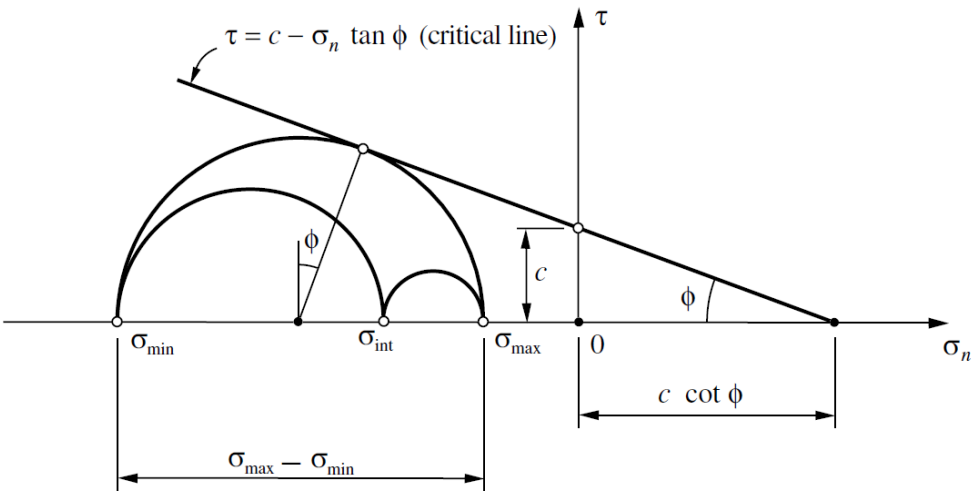
Tresca ve von-Mises akma kriterleri metal ve diğer sünek malzemelerde yaygın olarak kullanılsa da, hidrostatik basınca duyarsız oldukları için, yığma ve diğer gevrek ve yarı gevrek malzemelerde çok tercih edilmemektedir.

3.2.2 Mohr-Coulomb ve Drucker-Prager Kriterleri

Mohr-Coulomb akma kriteri hidrostatik basınç etkisini dikkate alan Tresca kriterinin geliştirilmiş halidir. Mohr-Coulomb kriteri, kayma gerilmesi aynı düzlemdeki normal gerilmeye doğrusal olarak bağlı bir değere ulaştığında, akmanın meydana geldiğini varsayar. Bu ilişki denklem (3.23) ile ifade edilebilir [76].

$$\tau = c - \sigma_n tan\phi \tag{3.23}$$

Bu denklemdeki τ, σ_n, c ve ϕ sıra ile kayma gerilmesi, normal gerilme, kohezyon ve içsel sürtünme açısını temsil etmektedir. Mohr-Coulomb akma modeli Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Mohr-Coulomb akma modeli [76]

Şekil 3.6'a dayanarak, akma kriteri asal gerilmeler açısından aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

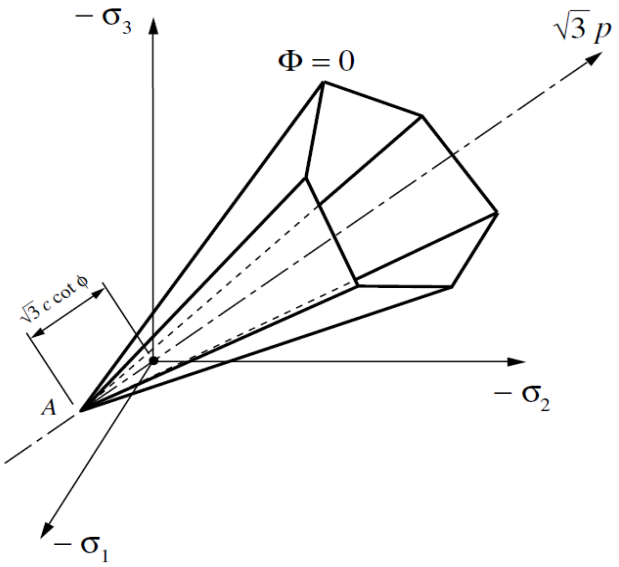
$$(\sigma_{max} - \sigma_{min}) + (\sigma_{max} + \sigma_{min})sin\phi = 2c\ cos\phi \tag{3.24}$$

Akma fonksiyonu ise,

$$\Phi(\sigma, c) = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) + (\sigma_{max} + \sigma_{min})sin\phi - 2c\ cos\phi \tag{3.25}$$

ile tanımlanmıştır.

Akma fonksiyonuna karşılık gelen akma yüzeyi altıgen piramit biçimindedir (Şekil 3.7)



Şekil 3.7 Mohr-Coulomb akma yüzeyi [76]

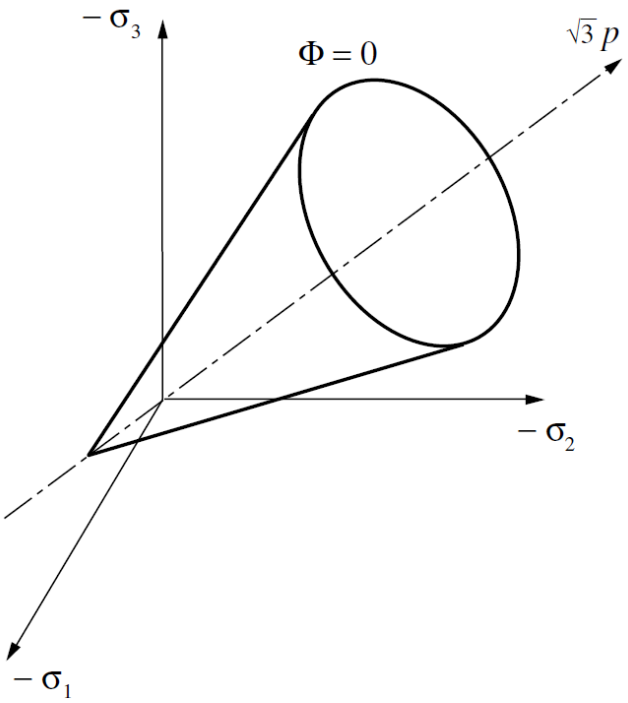
Drucker-Prager akma kriteri [77] hidrostatik basıncı dikkate alan von-Mises kriterinin modifiye edilmiş halidir. Drucker-Prager kriterine göre akma, deviatorik gerilmenin ikinci invaryantı J_2 ve hidrostatik basınç p belirli kritik bir değere ulaştığında başlar. Dolayısıyla, denklem (3.26)'da verilen bağıntı sağlandığında, plastik akma başlamış demektir.

$$\sqrt{J_2(s(\sigma))} + \eta p(\sigma) = \xi\, c \tag{3.26}$$

Buna göre, Drucker-Prager akma fonksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\Phi = \sqrt{J_2(s(\sigma))} - \eta p(\sigma) - \xi\, c \tag{3.27}$$

Buradaki η ve ξ içsel sürtünme açısına bağlı olan malzeme sabitleridir. Drucker-Prager kriterinin akma yüzeyi Şekil 3.8'de verilmiştir.



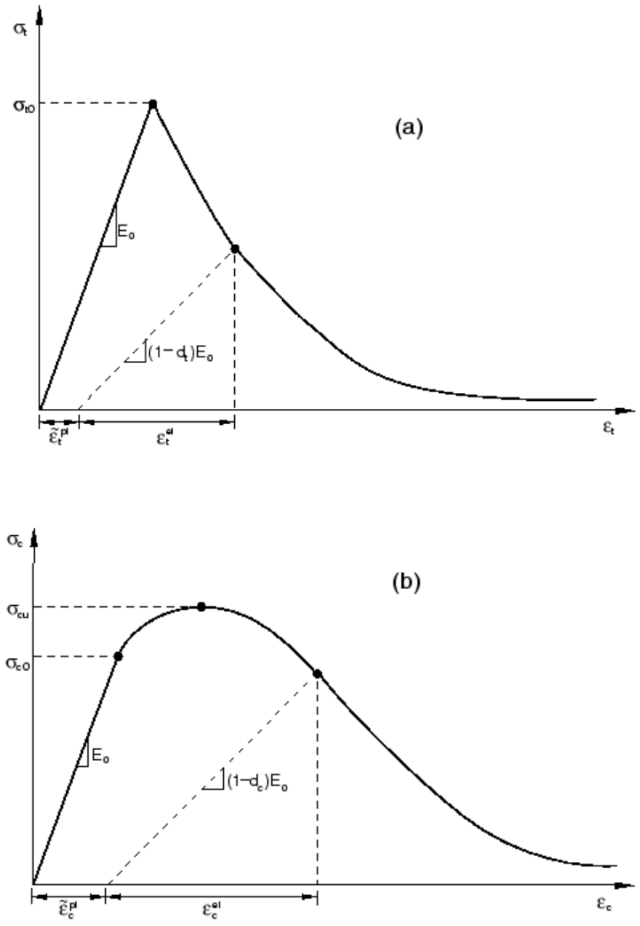
Şekil 3.8 Drucker – Prager akma yüzeyi [76]

3.3 Beton İçin Elastoplastik Hasar Modeli

ABAQUS/Standart [74] yazılımında önerilen ve beton malzeme için sıkça kullanılan bir elastoplastik hasar modeli (CDP) Lubliner (1989) [27] tarafından geliştirilmiş daha sonra Lee ve Fenves (1998) [28] tarafından modifiye edilmiş,

betonun basınç ve çekme için gerilme-şekil değiştirme davranışı plastik hasar değişkenleri ile tanımlandığı plastisite teorisinin bir biçimidir.

Lubliner [27] 1989 yılında yaptığı çalışmada klasik plastisite teorisine dayalı herhangi bir modelin temel unsurları akma kriteri, akma kuralı ve pekleşme kuralı olduğunu vurgulamıştır. CDP modeli, toplam hasarın kohezyonun azalmasından kaynaklandığı, beton ve yığma gibi sürtünme malzemelerine uygulanmak üzere geliştirilmiştir. CDP modeli ile tanımlanan betonun tek eksenli çekme ve basınç davranışı Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Beton için a) tek eksenli çekme altında gerilme - şekil değiştirme eğrisi b) tek eksenli basınç altında gerilme - şekil değiştirme eğrisi [74]

Şekildeki $0 \leq d_t \leq 1$ çekme için plastik hasar değişkeni ve $0 \leq d_c \leq 1$ basınç için plastik hasar değişkenini ifade etmektedir. Hasar değişkeni başlangıç (hasarsız)

malzeme rijitlik tansörü ile hasarlı malzeme rijitlik tansörü arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir (3.28).

$$D^{el} = D_0^{el}(1 - d) \tag{3.28}$$

Çekme ve basınç yüklemesi altındaki gerilme-şekil değiştirme ilişkileri bağıntı (3.29) ve (3.30) ile tanımlanmıştır.

$$\sigma_t = (1 - d_t)D_0^{el} : (\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl}) \tag{3.29}$$

$$\sigma_c = (1 - d_c)D_0^{el} : (\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl}) \tag{3.30}$$

Sürekli ortam mekaniği ilkelerine göre, efektif gerilme (Cauchy gerilmesi) hasarsız malzeme rijitliği ile tanımlıdır, ve aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilir:

$$\bar{\sigma} = D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \tag{3.31}$$

Lubliner [27] tarafından önerilen ve Lee ve Fenves [28] tarafından modifiye edilen CDP akma fonksiyonu denklem 3.32'de verilmiştir.

$$F = \frac{1}{1 - \alpha}(\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\tilde{\varepsilon}^{pl})\langle\hat{\bar{\sigma}}_{max}\rangle - \gamma\langle-\hat{\bar{\sigma}}_{max}\rangle) - \bar{\sigma}_c\left(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}\right) \tag{3.32}$$

Buradaki $\bar{q}$ von-Mises efektif gerilmesi, $\bar{p}$ hidrostatik basınç gerilmesi, $\hat{\bar{\sigma}}_{max}$ maksimum efektif asal gerilmesini temsil etmektedir. α, β ve γ boyutsuz malzeme sabitleridir ve aşağıda verilen bağıntılarla belirlenmktedir.

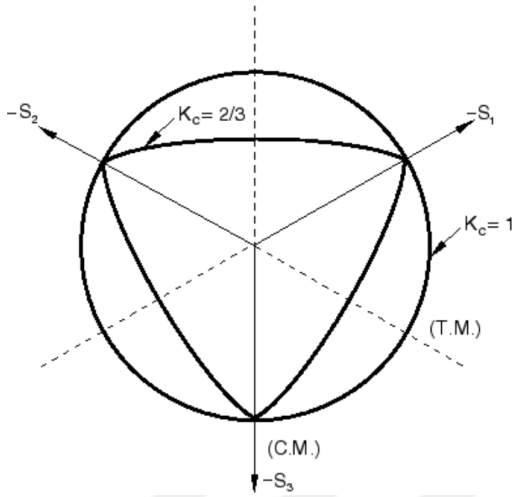
$$\alpha = \frac{(\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1}{2(\sigma_{b0}/\sigma_{c0}) - 1}$$

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_c\left(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}\right)}{\bar{\sigma}_t\left(\tilde{\varepsilon}_t^{pl}\right)}(1 - \alpha) - (1 + \alpha) \tag{3.33}$$

$$\gamma = \frac{3(1 - K_c)}{2K_c - 1}$$

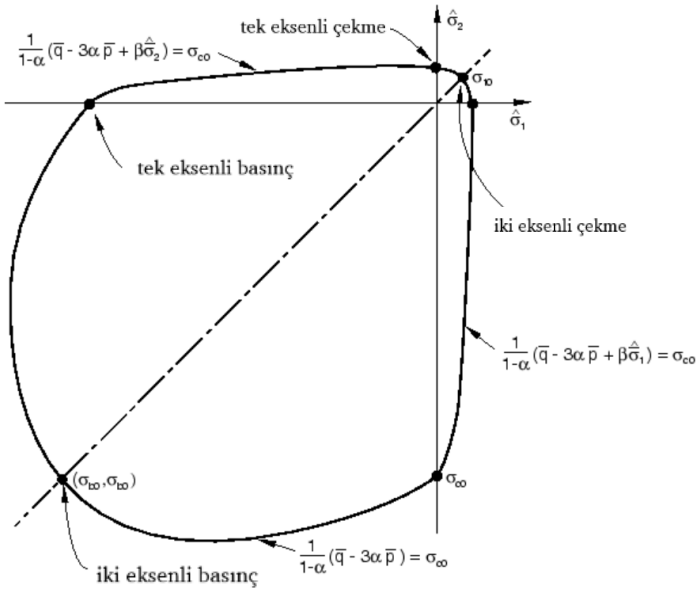
Denklem 3.33'teki σ_{b0}/σ_{c0} ifadesi başlangıç iki eksenli basınç akma gerilmesinin başlangıç tek eksenli basınç akma gerilmesine oranıdır (beton için varsayılan değer 1.16 [33, 74, 78-81]. Başlangıç kohezyonun değeri $c_0 = \sigma_{c0}$ olduğu varsayılır [28]. Kc, çekme meridyeni üzerindeki ikinci invaryantın, basınç meridyeni

üzerindeki ikinci invaryantına oranıdır ve 0.5 ile 1 arasında değer alabilmektedir (Şekil 3.10). Kc=2/3 beton malzemesi için önerilen bir değerdir [33, 74, 78-81].



Şekil 3.10 Deviatorik düzlemde akma yüzeyleri [74]

Beton için elastoplastik hasar modeli için düzlem gerilme durumundaki akma yüzeyi Şekil 3.11'de gösterilmiştir.

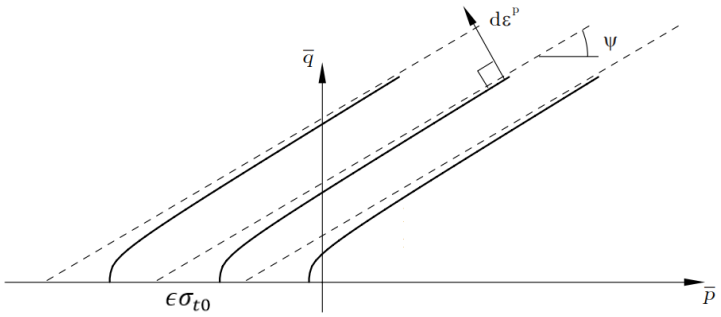


Şekil 3.11 Düzlem gerilme durumu için akma yüzeyi [74]

Metallerin aksine, beton ve yığma gibi gevrek malzemelerin modellenmesinde genleşmeyi dikkate almak için ilişkisiz akma kuralı kullanılmadır [28]. Bünye modellerinde, akma kuralını (ve pekleşme kuralını) bir akma potansiyeli kullanılarak tanımlamak mümkündür [76]. Beton için elastoplastik hasar

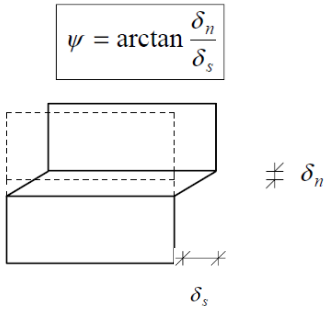
modelinde kullanılan akma potansiyeli G, denklem (3.34)'te ve Şekil 3.12'de verilen Drucker-Prager hiperbolik fonksiyonu ile tanımlıdır.

$$G = \sqrt{(\epsilon\sigma_{t0}tan\psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p}tan\psi \tag{3.34}$$



Şekil 3.12 Drucker – Prager hiperbolik fonksiyonu [74]

Denklem (3.34)'teki σ_{t0} kırılma anındaki tek eksenli çekme gerilmesi, ψ genleşme açısı ve ϵ dış merkezliğini temsil etmektedir. Dış merkezlik değeri için birçok araştırmacı tarafından $\epsilon = 0.1$ değeri önerilmiştir [74, 78-81]. Genleşme açısı, kayma gerilmeleri etkisi altında olan birimin normal yer değiştirme ile yanal yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi vermektedir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 Genleşme açısı [1]

Araştırmacılar [1, 29, 30-33, 78-81] tarafından beton ve duvar için uygun genleşme açısı değerini tahmin etmek için sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Lourenco doktora tezinde [1], genleşme açısının düşük sargılama basıncı değerleri için tanψ=0.2 ile tanψ=0.7 arasındaki değer aralığını alırken, yüksek sargılama basıncı değerleri için sıfıra düştüğünü vurgulamıştır.

Agnihotri vd. [30] yığma duvarların modellemesinde genleşme açısının ψ=30° değerinin uygun olduğunu öne sürmüştür. Wilding vd. [31] yığma duvarların

basitleştirilmiş mikro modelleme yaklaşımı ile modellemesinde, yığma birimi elemanları için $\psi=31°$ değerinde genleşme açısını kullanmışlardır. Aguera vd. [33] yaptıkları sayısal çalışmada genleşme açısı için $\psi=7°$ değeri kullanılmıştır. Sümer vd. [79] yaptıkları çalışmada genleşme açısı için $\psi=30°$ ile $\psi=37°$ arasındaki değerler önerilmiştir. Van Zıjl 2004 [80] yılında yaptığı sayısal çalışmada, genleşme açısını sargılama basıncına bağlı bir fonksiyon olarak tanımlamıştır. Wosatko [81] tarafından gerçekliştirilen parametrik çalışmada genleşme açısı ile birlikte viskozitenin betonarme taşıyıcı elemanlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yatay yük-yer değiştirme eğrisi ve tek eksenli çekme eşdeğer şekil değiştirme (PEEQT) dağılımı açısından genleşme açısı $\psi=25°$ ve viskozite $\mu=0.001$ beton için en uygun değerler olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, genleşme açısının $\psi=35°$ değerini aşmaması gerektiğini belirtmiştir.

CDP malzeme modeli için, malzeme tanımlamasında bir viskozite parametresi μ tanımlanarak viskoplastik düzenleme dikkate alınabilir. Literatürde [29-31, 33, 78-81] viskozite için $\mu=0.0001$ ile $\mu=0.01$ arasındaki değerlere rastlanmaktadır.

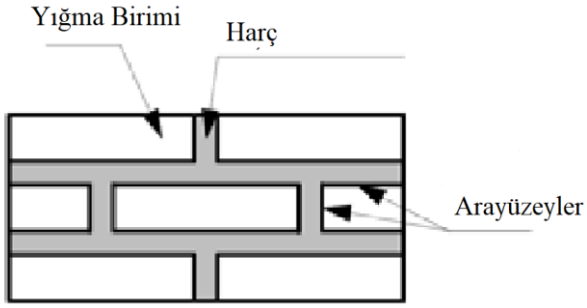
3.4 Sayısal Modelleme Teknikleri

Son yıllarda, yığma yapı elemanlarının davranışını simüle edebilen sayısal modelleri geliştirmek ve uygulamak için araştırmacılar tarafından önemli çaba sarf edilmiştir. Sonlu elemanlar yönteminin geliştirilmesi, mikro modelleme ve makro modelleme olarak bilinen iki temel modelleme stratejisinin geliştirilmesine yol açmıştır. Mikro modelleme tekniklerinde yığmanın heterojen bir malzeme olduğu varsayılır. Yığma birimi, harç ve birim harç etkileşimi ayrı ayrı modellenir. Makro modelleme yöntemi, sürekli ortam mekaniği ilkelerine dayanmaktadır ve yığma homojen malzeme olarak modellenir. Mikro ve makro modeller farklı uygulama alanlarına sahip olduklarından bir modelleme tekniği diğerine tercih edilemez [1].

3.4.1 Mikro Modelleme Teknikleri

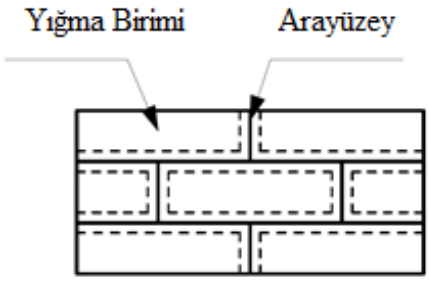
Mikro modelleme yöntemi yığma duvarların davranışının ayrıntılı bir şekilde incelenmesi için Lourenco vd. [8] tarafından önerilen bir modelleme tekniğidir. Süreksiz ortam mekaniği ilkelerine dayanmakta olan bu modelleme yaklaşımı bileşenlerin mekanik özelliklerini ve özellikle birimler ve harç arasındaki arayüz

ayrı ayrı modellenmesini gerektirir [9] (Şekil 3.14). Tuğla ve harç sürekli elemanlar olarak modellenirken, enterfaz elemanı olarak bilinen tuğla-harç etkileşimi ayrık (süreksiz) eleman olarak modellenir. Mikro modellemede kullanılacak malzeme parametreleri yığma bileşenleri üzerinde yapılan deneylerden elde edilir.



Şekil 3.14 Mikro modelleme [1]

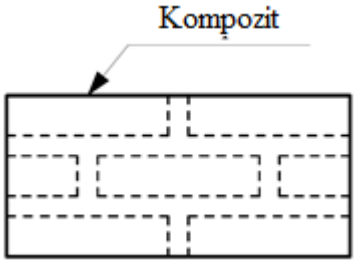
Yığma duvarın yerel davranışının iyi anlaşılması için mikro modelleme yöntemi tercih edilir. Lourenco ve Rots [8] 1994 yılında yaptıkları çalışmada yığma duvarların en temel kırılma mekanizmaları: derzlerin çatlaması, normal gerilmenin düşük değerlerinde yatay veya dikey derzleri boyunca kayma, çekmede yığma biriminin çatlaması ve normal gerilmenin yüksek değerlerindeki harç genleşmesinin sonucu olarak birimlerin ayrılması olduğunu vurgulamışlardır. Bütün bu kırılma mekanizmalarını mikro modelleme tekniği ile yakalamak mümkündür [2]. Mikro model doğru sonuçlar sağlayabiliyor olsa da, bilinmeyenler sayısı ve çözüm süresi oldukça fazla olduğundan küçük ölçekli yığma duvarlara uygulanması ile sınırlıdır. Bu nedenle, Lourenco [1] basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğini geliştirmiştir. Basitleştirilmiş mikro modelleme yaklaşımında, birim-harç etkileşimi harç özelliklerini dikkate alan süreksiz eleman olarak modellenirken, birimler harç kalınlığı kadar genişletilerek sürekli elemanlar olarak modellenir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 Basitleştirilmiş mikro modelleme [1]

3.4.2 Makro Modelleme Tekniği

Makro modelleme yaklaşımı, yığmanın homojen kompozit malzeme olduğu varsayımını içermektedir. Makro modelleme, büyük ve karmaşık yığma yapıların global davranışının incelenmesi gerektiği durumlarda uygun bir yöntemdir. Yığma birimi ve harç tek bir sürekli eleman olarak modellenir (Şekil 3.16). Makro modelleme, azaltılmış çözüm süresi gereksinimlerinin yanı sıra sonlu elemanlar ağının daha kolay oluşturulması nedeniyle mikro modelleme tekniklerinden daha pratik bir yöntemdir. Makro modelde kullanılacak malzeme parametreleri duvar prizma üzerinde gerçekleştirilen deneylerden veya homojenizasyon tekniklerinden faydalanarak elde edilebilir.



Şekil 3.16 Makro modelleme [1]

4
SAYISAL MODELLEME VE DOĞRULAMA

Bu bölümde literatürde bulunan dolu ve boşluklu duvarların sayısal çözümlemesi ve sayısal sonuçların deneysel sonuçları ile karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Yük-yer değiştirme eğrisi ve kırılma modları açısından önerilen modelin uygun olup olmadığı incelenmiştir. Üçü dolu üçü boşluklu olmak üzere toplamda altı deney duvarı ABAQUS/Standart (ABAQUS / CAE 6.14-1 SE) [74] sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Çözüm sonucu olarak elde edilen yük-yer değiştirme diyagramları deneylerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Duvarlarda plastik şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı bölgelerde çatlakların oluşacağı varsayımına dayanarak, sayısal çözümleme sonucunda elde edilen plastik şekil değiştirme dağılımları ile deney sonucunda elde edilen çatlak oluşumları karşılaştırılmıştır.

4.1 Önerilen Sayısal Model

Yığma duvarların genel davranışının incelenmesinde pratik bir modelleme yöntemi olduğu için makro modelleme tekniği kullanılmıştır. Araştırmacılar tarafından önerilen ampirik bağıntılar kullanılarak kompozitin elastik ve plastik malzeme özellikleri elde edilmiştir. Bünyesel modelleme tekniği açısından beton için elastoplastik hasar modeli (CDP) kullanılmıştır. CDP modeli beton malzemesi için geliştirilmiş bir model olmasına rağmen, birçok araştırmacı tarafından yığma duvarların modellemesinde başarılı bir şekilde uygulanmıştır [29-34]. Malzeme gerilme - şekil değiştirme eğrisi için Kaushik [35] tarafından önerilen ilişki kullanılmıştır. Sonlu eleman tipi olarak üç boyutlu 8 düğüm noktalı C3D8R izoparametrik elemanı kullanılmıştır.

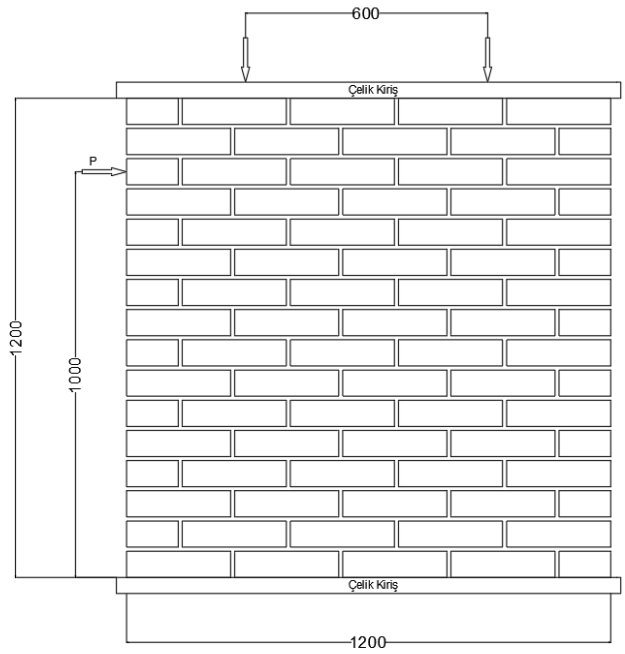
4.2 Sayısal Modelin Doğrulanması

4.2.1 Deney Duvarı No. 1

Stratford vd. [82] tarafından yapılan deneysel çalışmada GFRP (Cam Elyaf Takviyeli Plastik) ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş kil tuğla ve beton briket duvar numuneleri üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Üçü kil tuğlalardan ve üçü beton briketlerden yapılmış toplamda altı adet duvar düşey ve yatay yüklerin kombinasyonuna maruz bırakılmış ve çatlama mekanizmaları ile yatay yük-yer değiştirme eğrileri incelenmiştir. Duvarlara 100 kN değerinde önbasınç yükü uygulandıktan sonra, duvarlar artımsal yanal yüklemeye tabi tutulmuştur. Bu tez çalışmasında Şekil 4.1'de verilen güçlendirilmemiş kil tuğla duvarı (Clay 1) yer değiştirme kontrollü analiz ile simüle edilmiştir. Duvarın geometrik özellikleri ve yığma bileşenlerinin malzeme özellikleri Tablo 4.1 ve 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Stratford vd. duvarı geometrik özellikler

Deney Duvarı	Duvar Boyutları (mm)	Tuğla Boyutları (mm)	Harç Kalınlığı (mm)
Stratford Clay 1	1200×1200×60	258×65×60	10



Şekil 4.1 Stratford vd. Clay 1 duvarı fiziksel model

Tablo 4.2 Stratford vd. Clay 1 duvarı bileşenlerin mekanik özellikleri

Yığma Birim ve Bağlayıcı	Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı
Tuğla	62	8.9	15800	0.13
Harç	11	*	320	*

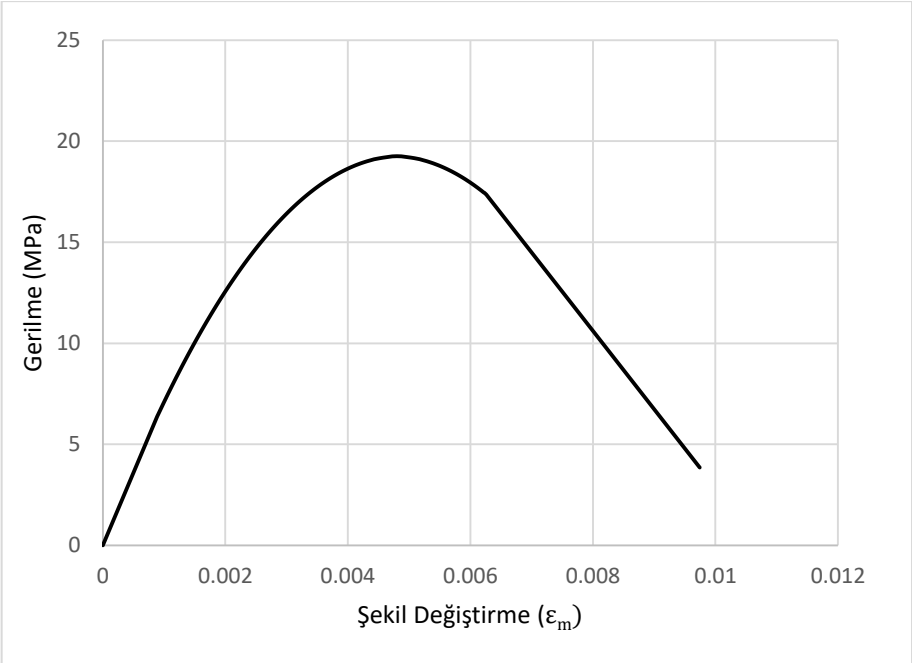
* Girilmeyen parametreler literatürde deney verisi bulunmayan parametrelerdir.

Sayısal modellemede kullanılan kompozit malzeme elastik ve plastik parametreleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

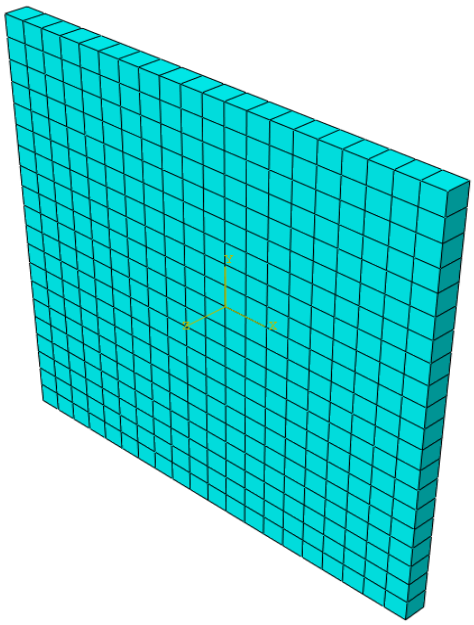
Tablo 4.3 Stratford vd. Clay 1 duvarı malzeme parametreleri

Parametre	Değer	Kaynak
Basınç Dayanımı (MPa)	19.5	Bennett vd. [42]
Çekme Dayanımı (MPa)	2.5	Ghiassi [66]
Elastisite Modülü (MPa)	9000	Kaushik vd. [35]
Poisson Oranı	0.15	[50-53]
Genleşme Açısı	30	[30]
Viskozite	0.001	[78-81]
fb0/fc0	1.16	[74, 78-81]
Dış Merkezlik	0.1	[74, 78-81]

Yığma basınç dayanımı denklem 2.10'da verilen bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır. Çekme dayanımı basınç dayanımının %10 ile %20 arasında değer olduğu kabul edilmiştir [66]. Elastisite Modülü değeri $550f'_m$ olarak alınmıştır [35]. Basınç gerilme-şekil değiştirme eğrisi Kaushik vd. [35] tarafından önerilen altı kontrol noktası belirlenerek elde edilmiştir ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Basınç dayanımı f'_m değerine karşılık gelen şekil değiştirme oranı değeri $\varepsilon'_m = 0.0048$ olarak hesaplanmıştır. Duvarın modellemesinde kullanılan sonlu elemanlar ağı 60x60 mm olarak seçilmiştir (Şekil 4.3).

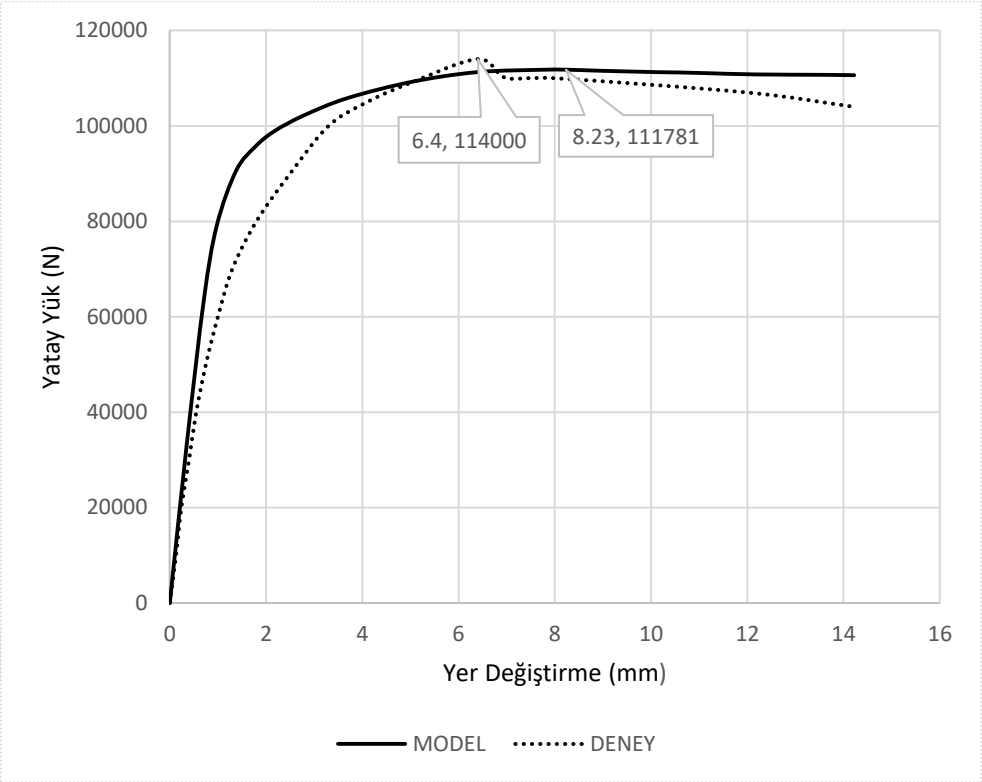


Şekil 4.2 Stratford vd. Clay 1 duvarı basınç gerilme – şekil değiştirme eğrisi

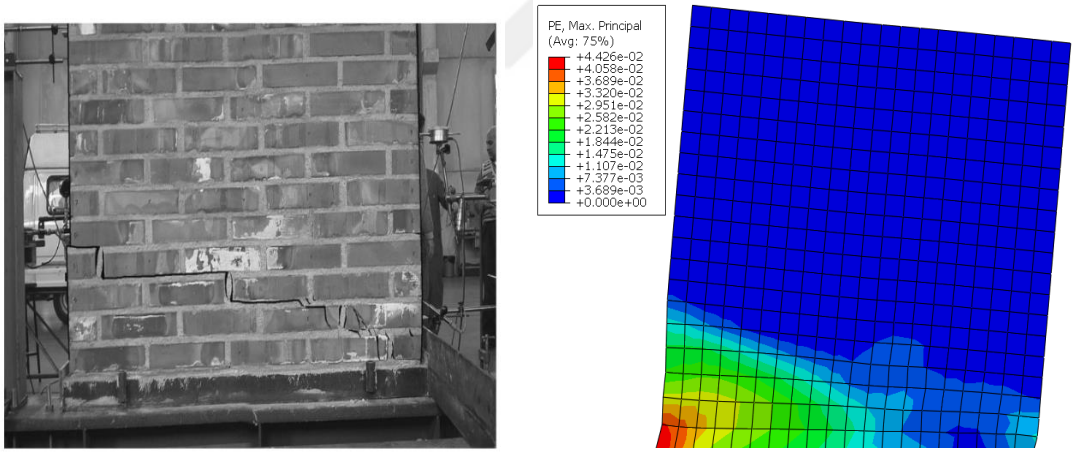


Şekil 4.3 Stratford vd. Clay 1 duvarı sonlu elemanlar modeli

Şekil 4.4'te duvarın deneye ve sayısal modele ait yük-yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Duvarda oluşan çatlak duvarın taban bölgesine yakın kısımlarda tuğla harç ara yüzeylerinde oluşmuştur. Şekil 4.5a ve 4.5b'de duvarın çatlak oluşumu ile sayısal çözümleme sonunda oluşan plastik şekil değiştirme dağılımı verilmiştir.



Şekil 4.4 Stratford vd. Clay 1 duvarı yatay yük – yer değiştirme diyagramı



Şekil 4.5 Stratford vd. Clay 1 duvarı a) deney sonucu mekanizma durumu [81] b) çözümleme sonunda oluşan plastik şekil değiştirme dağılımı

4.2.2 Deney Duvarı No. 2

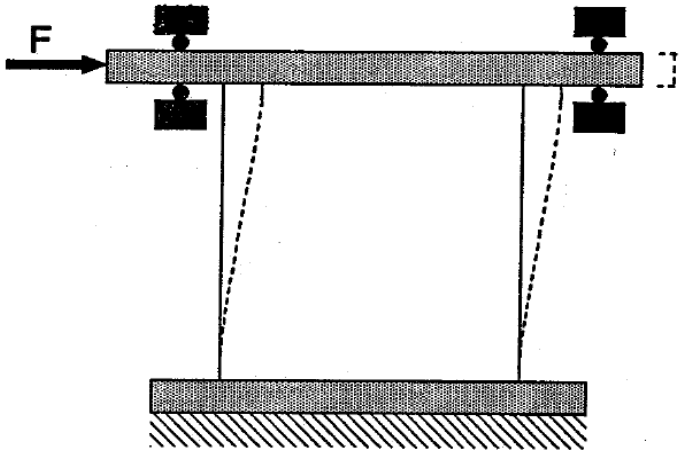
Vermeltfoort vd. [17-20] 1993 yılında Eindhoven Teknik Üniversitesi'nde, 990×1000×100 (uzunluk × yükseklik × genişlik) mm boyutlarında dolu ve boşluklu duvarlar üzerinde on iki deney gerçekleştirmişlerdir. Duvarların göçme

mekanizmaları ve yatay yük-yer değiştirme eğrileri incelenmiştir. Duvarlar VG ve JG adlı iki farklı tuğla tipinden ve çimento:kireç:kum oranı 1:2:9 olan harçtan üretilmişlerdir. Duvarlara yerleştirilen çelik kiriş üzerine 30 kN (0.3 MPa) düşey yük uygulanmıştır. Daha sonra 10 mm/saat şeklinde duvarların üst kenarlarına yatay yer değiştirme verilmiştir. Deney esnasındaki sınır koşulları aşağıdaki gibidir (Şekil 4.6):

- Yatay yük altında duvarların üst kenarları düşey yer değiştirmelere karşı sabit tutulmuştur,

- Duvarların sadece üst kenarları yatay doğrultuda hareket edebilir.

Bu çalışmada sadece J4D dolu duvar ve J2G boşluklu duvar yer değiştirme kontrollü analiz ile sayısal olarak çözülmüştür. Duvarların boyutları ve deney verilerinden alınan yığma bileşenlerinin basınç dayanımları Tablo 4.4 ve 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.6 TU Eindhoven duvarı deney düzeni

Tablo 4.4 TU Eindhoven duvarı geometrik özellikler

Deney Duvarı	Duvar Boyutları (mm)	Tuğla Boyutları (mm)	Harç Kalınlığı (mm)	Boşluk boyutları (mm)
J4D	990×1000×100	210×52×100	10	-
J2G	990×1000×100	210×52×100	10	230×380

Tablo 4.5 TU Eindhoven duvarı bileşenlerin mekanik özellikleri

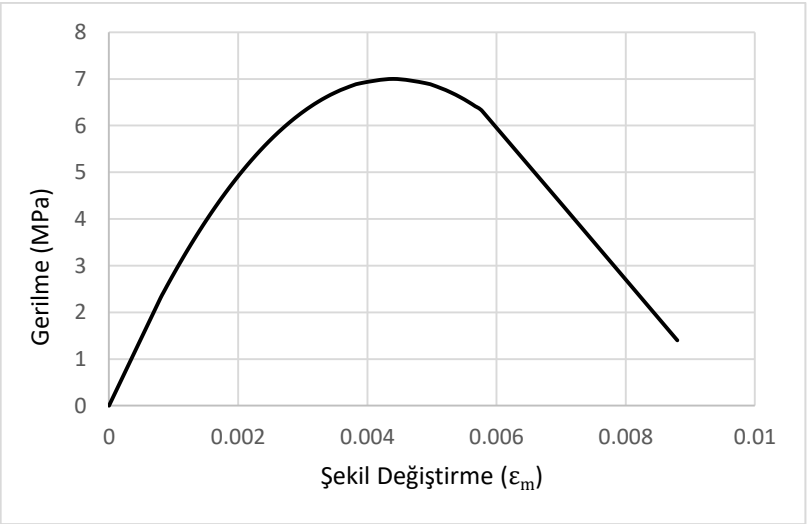
Yığma Birim ve Bağlayıcı	Basınç Dayanımı (MPa)
Tuğla	24
Harç	2.79

Sayısal modellemede kullanılan yığma elastik ve plastik parametreleri Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6 TU Eindhoven duvarı malzeme parametreleri

Parametre	Değer	Kaynak
Basinç Dayanımı (MPa)	7	Bennett vd. [42]
Çekme Dayanımı (MPa)	0.6	Ghiassi [66]
Elastisite Modülü (MPa)	4000	Kaushik vd. [35]
Poisson Oranı	0.15	[50-53]
Genleşme Açısı	30	[30]
Viskozite	0.001	[77-80]
fb0/fc0	1.16	[76-80]
Dış Merkezlik	0.1	[76-80]

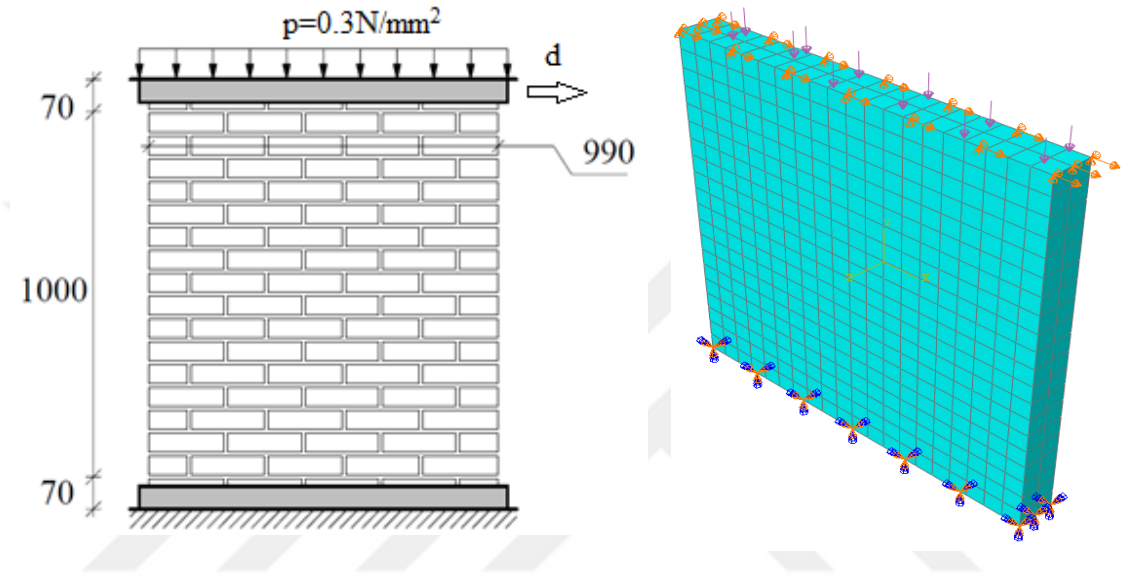
Basınç dayanımı f'_m değerine karşılık gelen şekil değiştirme oranı değeri $\varepsilon'_m = 0.0044$ olarak hesaplanmıştır. Basınç gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Tu Eindhoven duvarı basınç gerilme – şekil değiştirme eğrisi

J4D Dolu Duvar

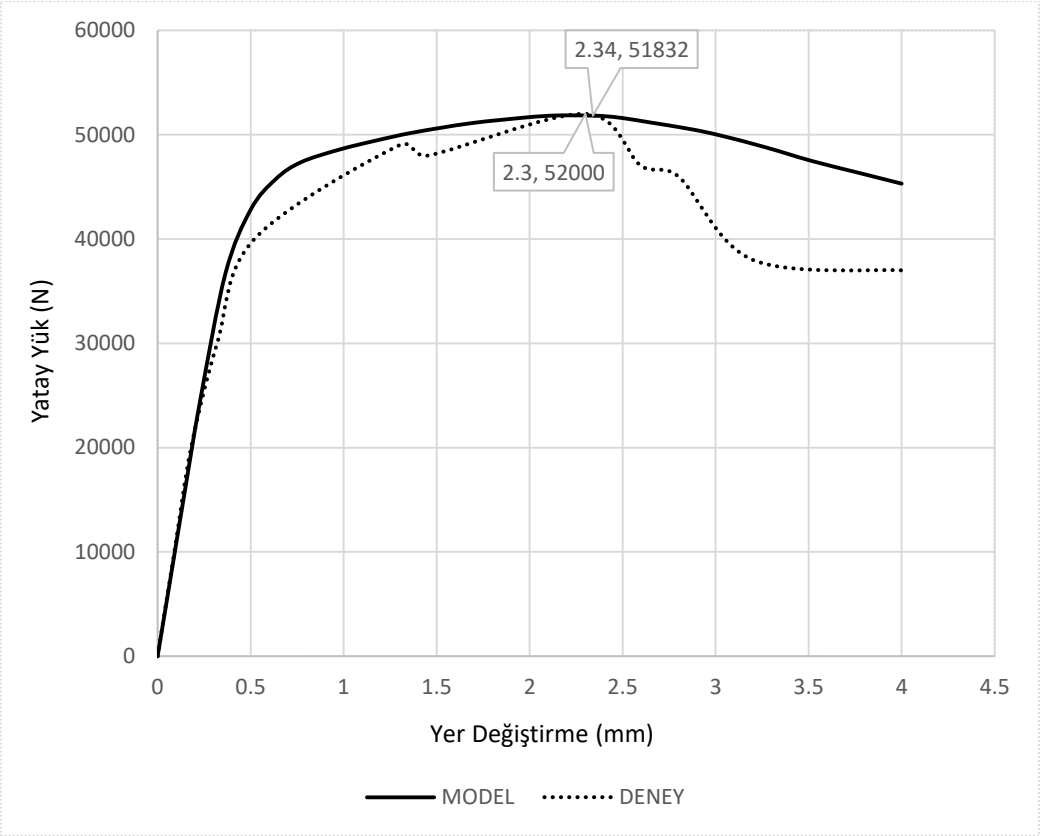
J4D dolu duvarın modellemesinde kullanılan sonlu eleman boyutları 50×50 mm olarak belirlenmiştir. Duvara 0.30 MPa değerinde önbasınç yükü yüklendikten sonra 4 mm'lik yer değiştirme uygulanmıştır. Duvarın fiziksel ve matematiksel modelleri sırayla Şekil 4.8a ve 4.8b'de gösterilmiştir.



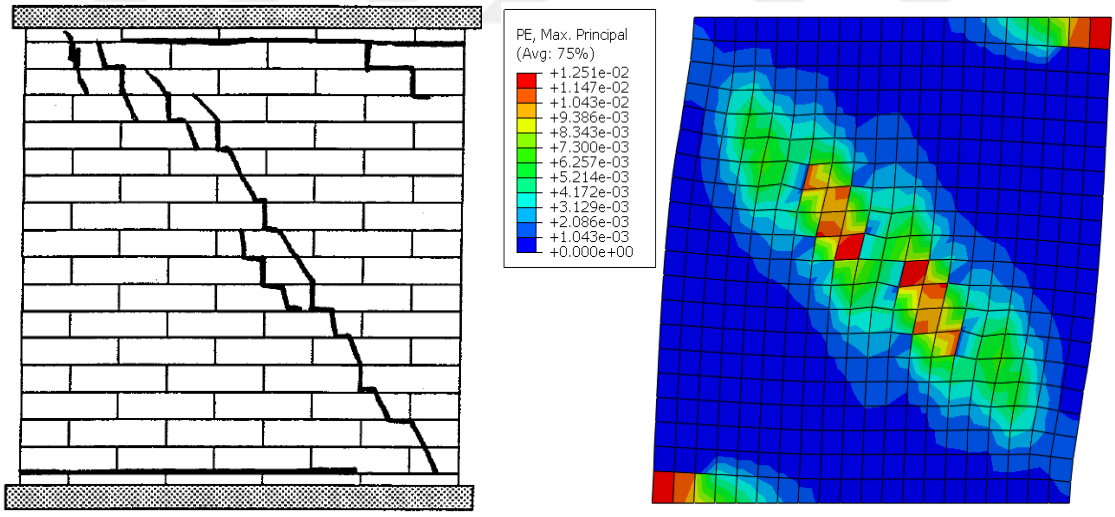
a) b)

Şekil 4.8 a) J4D duvarı fiziksel model [1] b) J4D duvarı sonlu elemanlar modeli

Sayısal ve deneysel yük-yer değiştirme diyagramları Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Hem yük yer değiştirme eğrisi hem de maksimum yatay yük açısından tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, sayısal çözümleme ile elde edilen plastik şekil değiştirme dağılımının deney sonucu olan göçme mekanizması ile uyumlu bir şekilde geliştiği söylenebilir. İlk çatlaklar en üst ve en alt tuğla-harç birleşimlerinde meydana gelişmiştir. Çatlakların tüm duvar boyunca diyagonal bir şekilde yayılmasıyla, duvar aniden mekanizma durumuna gelmiştir. Şekil 4.10a ve 4.10b'de duvarın çatlak oluşumu ile sayısal çözümleme sonucu olan plastik şekil değiştirme dağılımı verilmiştir.



Şekil 4.9 J4D duvarı yatay yük – yer değiştirme diyagramı

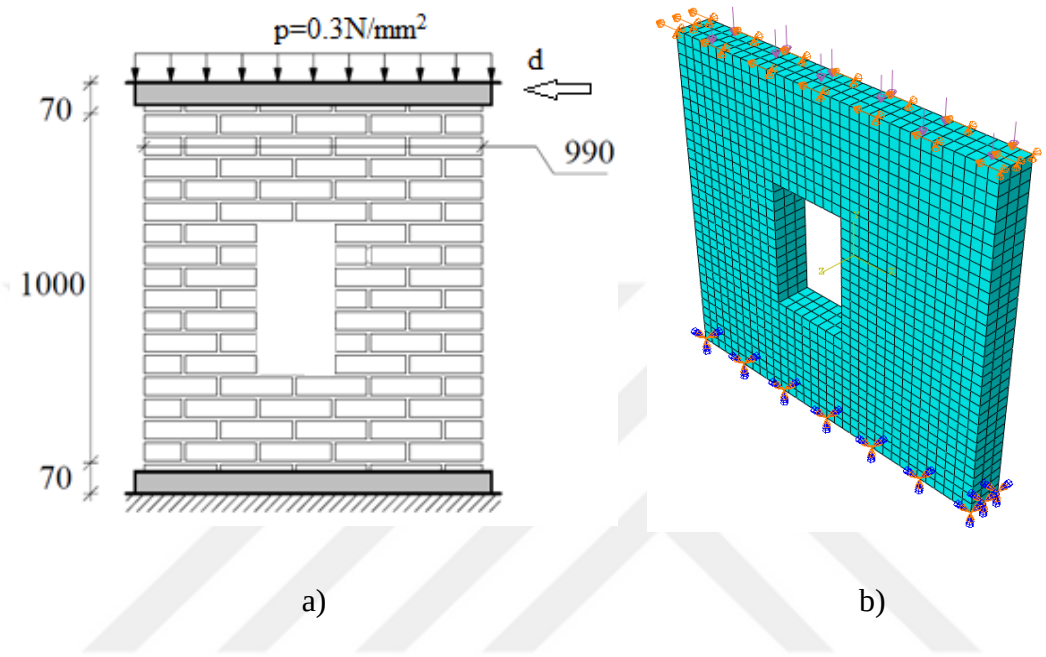


a) b)

Şekil 4.10 TU Eindhoven J4D duvarı a) deney sonucu mekanizma durumu [19] b) çözümleme sonunda oluşan plastik şekil değiştirme dağılımı

J2G Boşluklu Duvar

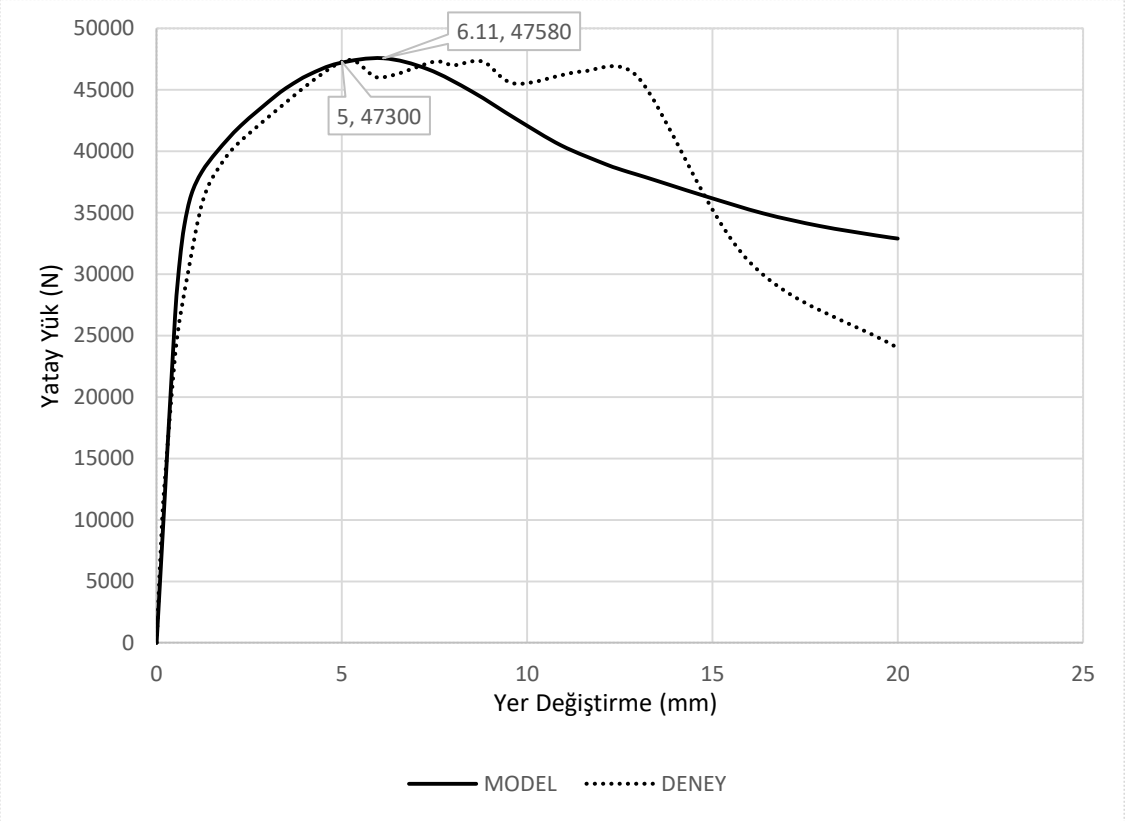
Fiziksel ve sonlu elemanlar modelleri Şekil 4.11a) ve 4.11b)'de verilen J2G boşluklu duvar 30×30 boyutunda üç boyutlu sonlu elemanlarla modellenmiştir. Duvara önce 0.30 MPa değerinde önbasınç yükü yüklenmiş ve ardından artımsal 20 mm yer değiştirme uygulanmıştır.



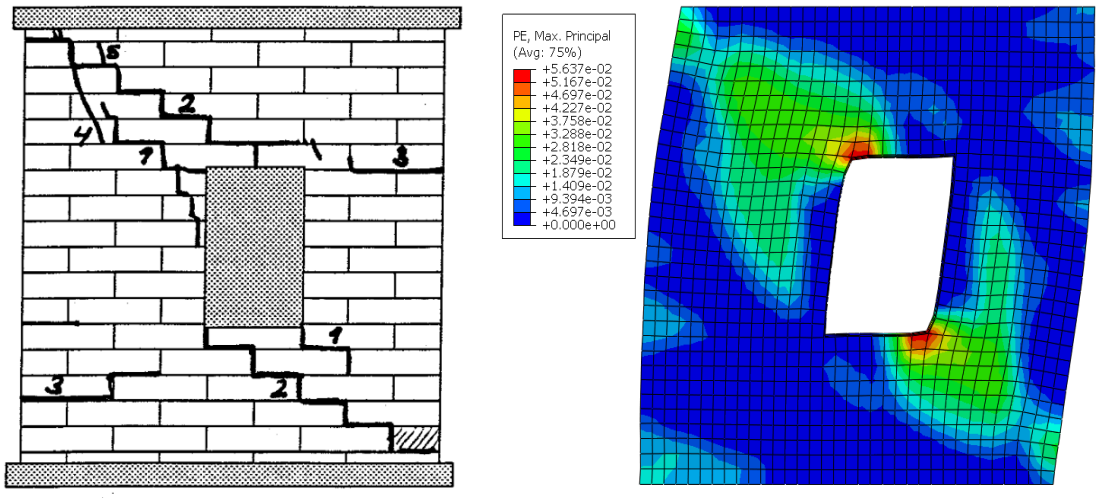
Şekil 4.11 a) J2G duvarı fiziksel model [1] b) J2G duvarı sonlu elemanlar modeli

Sayısal çözümleme ve deney sonucu olarak elde edilen yük-yer değiştirme diyagramları Şekil 4.12'te karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Boşluklu duvarın taşıdığı maksimum yatay yükün dolu duvara göre daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca, her iki duvarda da aynı malzeme kullanılmasına rağmen, boşluklu duvarın başlangıç rijitliği eğiminin dolu duvara göre daha az olduğu görülmektedir.

Boşluklu duvarlarda plastik şekil değiştirmelerin boşluğun etrafında yoğunlaştığı görülmektedir. Bu nedenle, ilk çatlaklar boşluğun köşelerinde meydana gelip, duvarın alt ve üst köşelerine doğru diyagonal bir şekilde ilerlemektedir. J2G boşluklu duvar için deneyden elde edilen çatlak oluşumu ile analizin son adımına ait plastik şekil değiştirme dağılımı Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.12 J2G duvarı yatay yük – yer değiştirme diyagramı

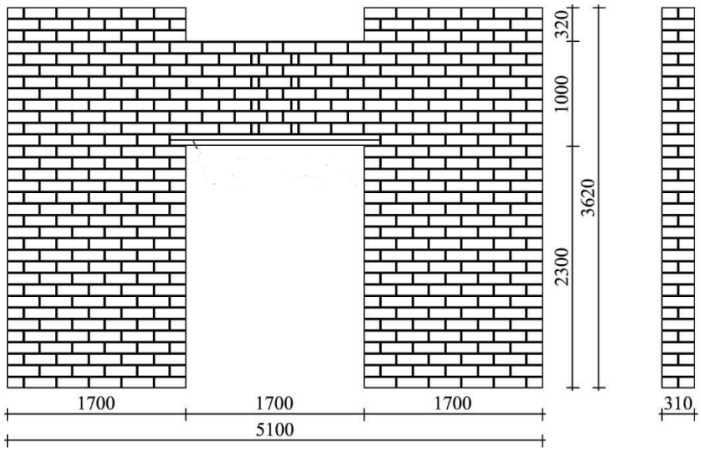


a) b)

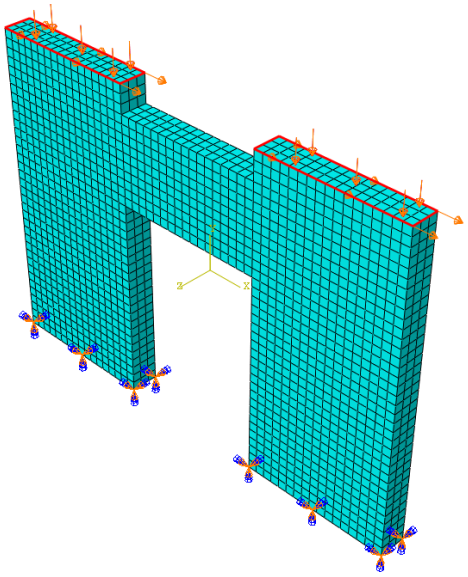
Şekil 4.13 TU Eindhoven J2G duvarı a) deney sonucu mekanizma durumu [19] b) çözümleme sonunda oluşan plastik şekil değiştirme dağılımı

4.2.3 Deney Duvarı No. 3

Şiddetli depremlerden sonra yapılan incelemeler, boşluğu olan donatısız yığma duvarlarda hasarın en büyük kısmının boşluğun etrafındaki bölgelerde oluştuğunu göstermiştir. Augenti vd. [23] tam ölçekli boşluklu donatısız yığma duvarın düzlem içi mukavemetini araştırmak üzere bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Duvarın fiziksel ve sonlu elemanlar modelleri Şekil 4.14 ve 4.15'te verilmiştir. Modellemede 50×50 mm boyutunda sonlu eleman ağı kullanılmıştır.



Şekil 4.14 Augenti vd. duvarı fiziksel model [23]



Şekil 4.15 Augenti vd. duvarı sonlu elemanlar modeli

Hem yığmanın hem de inorganik matriks güçlendirme sisteminin (IMG) bileşenlerinin mekanik özellikleri laboratuvar testleri ile belirlenmiştir. Yığma bileşenlerinin mekanik özellikleri Tablo 4.7'de mevcuttur. Boşluğu olan tam ölçekli yığma duvar inşa edildikten sonra hem gülendirilmemiş hem de IMG ile güçlendirilmiş olarak önce artımsal sonra da döngüsel yanal yüklemeye tabi tutulmuştur. Bu tez çalışmasında sadece güçlendirilmemiş boşluklu yığma duvarın önbasınç ve artımsal yatay yükün altındaki davranışı simüle edilmiştir. Duvar 0.4 MPa değerinde düşey ve artımsal yatay yüklerin kombinasyonuna maruz bırakılmıştır. Sayısal modellemede kullanılan malzeme parametreleri Tablo 4.8'de verilmiştir.

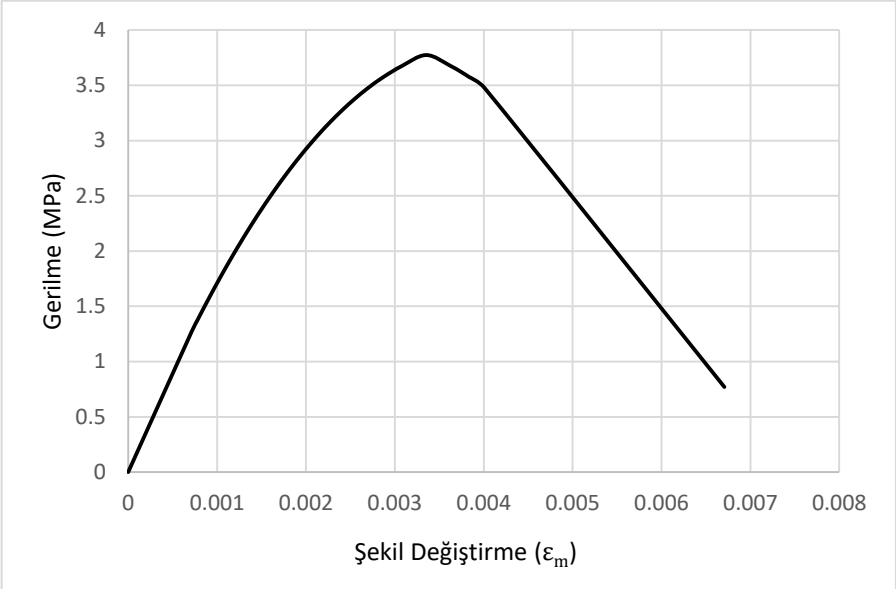
Tablo 4.7 Augenti vd. duvarı bileşenlerin mekanik özellikleri

Yığma Birim ve Bağlayıcı	Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Kayma Modulü (MPa)
Tuğla	4.13	0.23	1540	440
Harç	2.5	0.43	1520	660

Tablo 4.8 Augenti vd. duvarı malzeme parametreleri

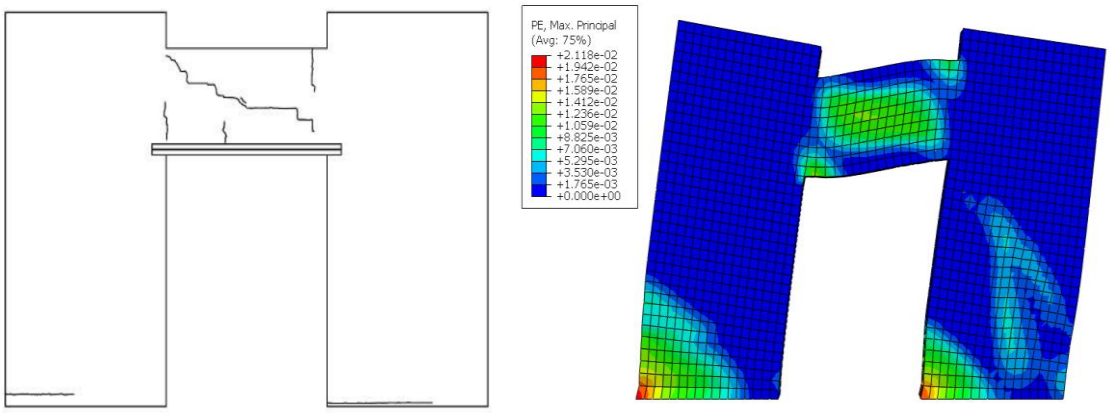
Parametre	Değer	Kaynak
Basınç Dayanımı (MPa)	3.86	Bennett vd. [42]
Çekme Dayanımı (MPa)	0.25	Ghiassi [66]
Elastisite Modülü (MPa)	2080	Kaushik vd. [35]
Poisson Oranı	0.15	[50-53]
Genleşme Açısı	30	[30]
Viskozite	0.001	[77-80]
fb0/fc0	1.16	[76-80]
Dış Merkezlik	0.1	[76-80]

Basınç dayanımı f'_m değerine karşılık gelen şekil değiştirme oranı değeri $\varepsilon'_m = 0.0033$ olarak hesaplanmıştır. Basınç gerilme-şekil değiştirme eğrisi Kaushik vd. [35] tarafından önerilen ilişki kullanılarak elde edilmiştir ve Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



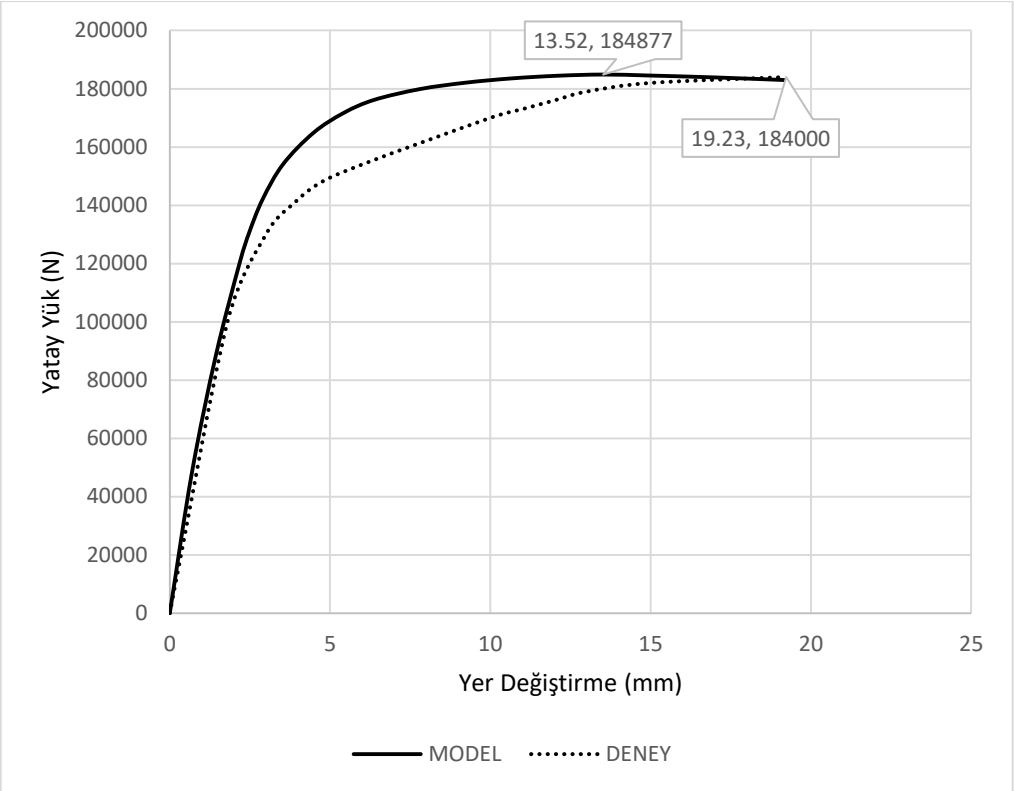
Şekil 4.16 Augenti vd. duvarı basınç gerilme – şekil değiştirme eğrisi

Yer değiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilen çözümün son adımına ait, kiriş olarak davrandığı düşünülen boşluğun üzerindeki bölgede diyagonal bir şekilde yayılmış plastik şekil değiştirme dağılımı ile deney sonucu oluşan çatlak oluşumunun uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 4.17). Ayrıca, yatay yük-yer değiştirme eğrisi açısından da oldukça uygun sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 4.18).



a) b)

Şekil 4.17 Augenti vd. duvarı a) deney sonucu mekanizma durumu [23] b) çözümleme sonunda oluşan plastik şekil değiştirme dağılımı



Şekil 4.18 Augenti vd. duvarı yatay yük – yer değiştirme diyagramı

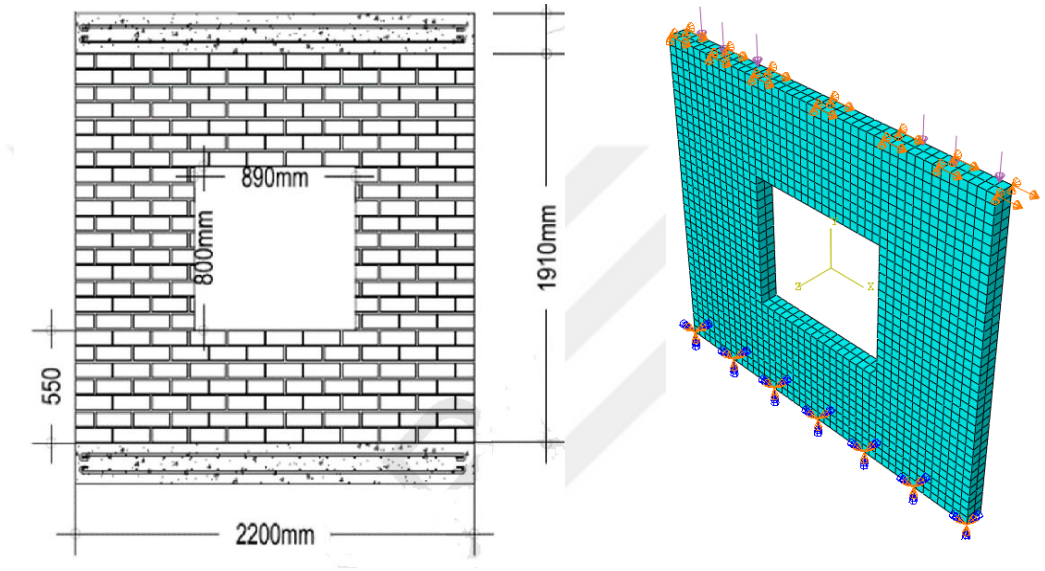
4.2.4 Deney Duvarı No. 4

Kamrava vd. [83] 2020 yılında çelik lifli beton (SFRC) ile güçlendirme sisteminin güçlendirilmemiş boşluklu yığma duvarların düzlem içi davranışı üzerindeki etkisini araştırmak üzere bir deneysel çalışma yapmışlardır. Bu amaçla, farklı güçlendirme şemaları ile güçlendirilen dört büyük ölçekli duvar, düşey ve düzlem içi yatay yükler altında test edilmiştir. Bu tez çalışmasının asıl amacı güçlendirilmemiş boşluklu yığma duvarların davranışı olduğu için, sadece URM B kodlu referans duvar ele alınmıştır. Duvara önce 0.6 MPa değerinde önbasınç yükü uygulanmıştır. Daha sonra duvarın sol üst kenarına artımsal yanal yükleme uygulanmiştir. Duvarın fiziksel modeli Şekil 4.19 a)'da mevcuttur. Matematiksel model ise 50×50 mm boyutlarında sonlu elemanlardan oluşturulmuş ve Şekil 4.19 b)'de verilmiştir. Duvar 210 mm × 100 mm × 70 mm boyutlarında kil tuğlalar ve çimento-kum oranı 1:3 ve kalınlığı 10 mm olan harç kullanılarak inşaa edilmiştir. Duvarın geometrik özellikleri Tablo 4.9'da verilmiştir. Tuğla ve harcın, deneyler

ile belirlenen basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve elastisite modülü gibi mekanik özellikleri Tablo 4.10'da sunulmuştur

Tablo 4.9 Kamrava vd. duvarı geometrik özellikler

Deney Duvarı	Duvar Boyutları (mm)	Tuğla Boyutları (mm)	Harç Kalınlığı (mm)	Boşluk Boyutları (mm)
Kamrava B	2200×1910×70	210×100×70	10	890×800



a) b)

Şekil 4.19 Kumrava vd. duvarı a) fiziksel model [82] b) sonlu elemanlar modeli

Tablo 4.10 Kumrava vd. duvarı bileşenlerin mekanik özellikleri

Yığma Birim ve Bağlayıcı	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Tuğla	11.82	4.02	*
Harç	14.26	0.43	24000

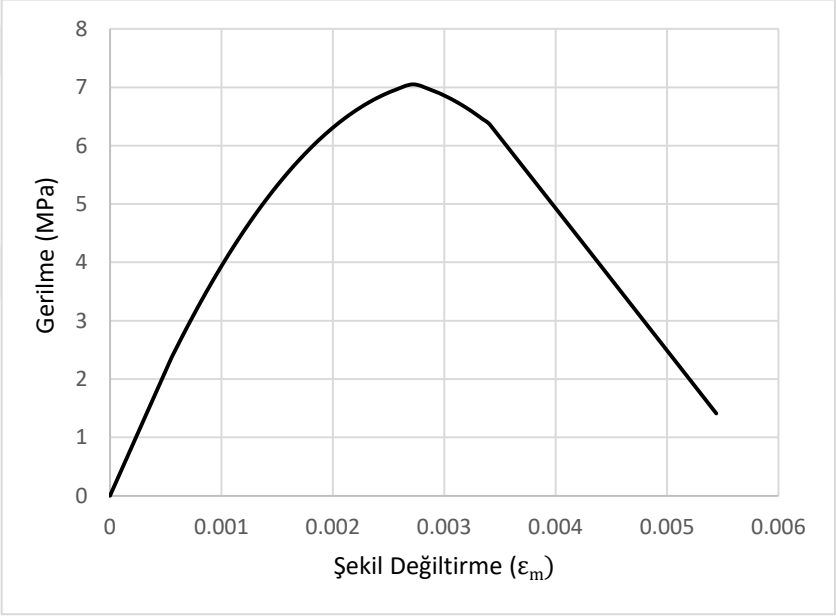
* Girilmeyen parametreler deney verisi bulunmayan parametrelerdir

Sayısal modellemede kullanılan elastik ve plastik malzeme özellikleri Tablo 4.11'de verilmiştir.

Tablo 4.11 Kumrava vd. duvarı malzeme parametreleri

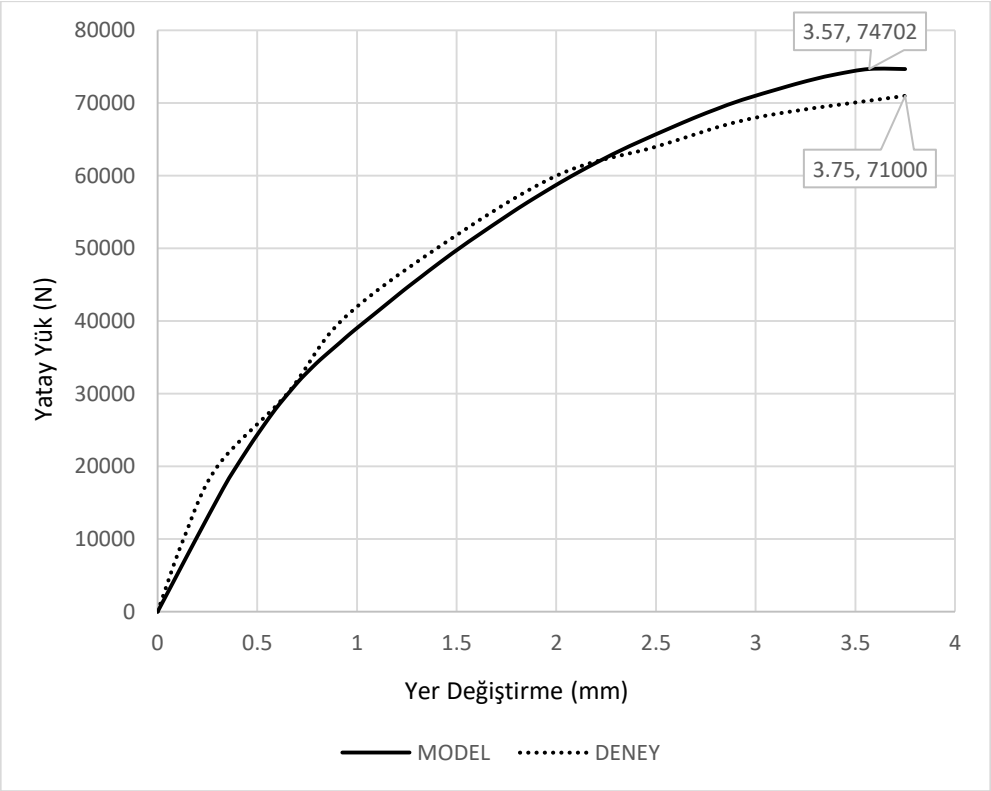
Parametre	Değer	Kaynak
Basınç Dayanımı (MPa)	7.12	Bennett vd. [42]
Çekme Dayanımı (MPa)	0.7	Ghiassi [66]
Elastisite Modülü (MPa)	4000	Kaushik vd. [35]
Poisson Oranı	0.2	[50-53]
Genleşme Açısı	30	[30]
Viskozite	0.001	[77-80]
fb0/fc0	1.16	[76-80]
Dış Merkezlik	0.1	[76-80]

URM B kodlu duvara ilişkin denklem basınç gerilme-şekil değiştirme diyagramı Şekil 4.20'de gösterilmiştir.

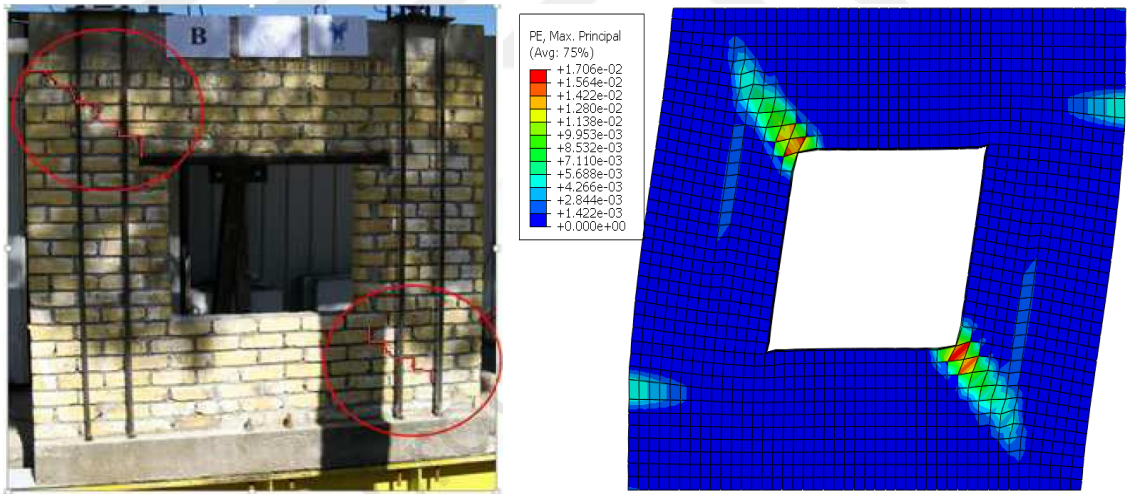


Şekil 4.20 Kumrava vd. duvarı basınç gerilme – şekil değiştirme eğrisi

Sonlu elemanlar modeli, duvarların genel düzlem içi davranışını başarılı bir şekilde tahmin etmiş ve yük-yer değiştirme eğrisi ve maksimum yatay yük açısından da deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 4.21). Sayısal model ile elde edilen plastik şekil değiştirme dağılımı incelendiğinde, deney sonucu gözlenen çatlak oluşumunun ile tam olarak bir uyumun görülmediği, ancak duvarda beklenen çatlak gelişiminin kısmen yakalandığı söylenebilir (Şekil 4.22).



Şekil 4.21 Kumrava vd. duvarı yatay yük – yer değiştirme diyagramı

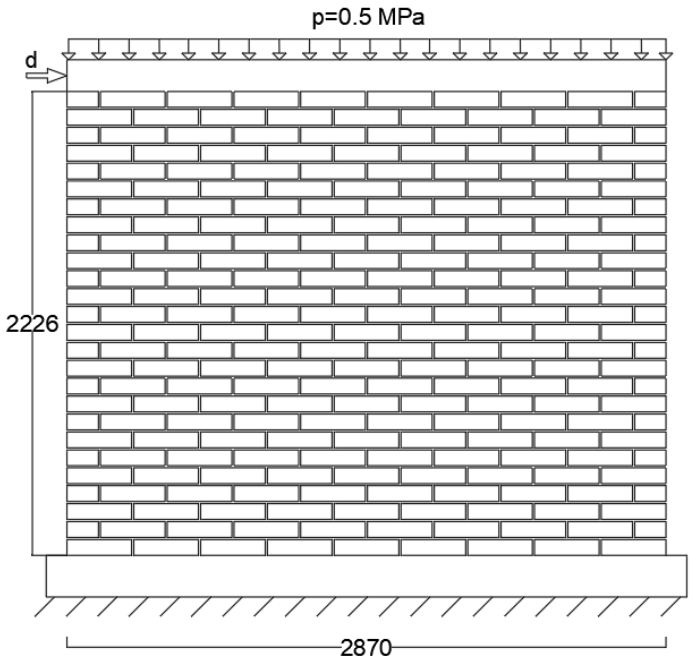


a) b)

Şekil 4.22 Kumrava vd. duvarı a) deney sonucu mekanizma durumu [82] b) çözümleme sonunda oluşan plastik şekil değiştirme dağılımı

4.2.5 Deney Duvarı No. 5

Haider [47] güçlendirilmiş yığma duvarların düzlem içi yük taşıma kapasitelerini araştırmak üzere bir dizi deneysel ve sayısal çalışma gerçekleştirmiştir. Duvarlar 310x76x150 mm boyutlarında kil tuğla ve bağlayıcı malzeme olarak 10 mm kalınlığında harç kullanılarak inşaa edilmiştir. Bu tez çalışmasında sadece yalın duvarın sayısal çözümlemesi yapılmıştır. Şekil 4.23'te fiziksel modeli verilen URM W6 kodlu duvarın ve bileşenlerinin boyutları Tablo 4.12'de sunulmuştur. Duvara 0.5 MPa önbasınç yükü yüklendikten sonra, duvarın sol üst tarafından artımsal yanal yükleme uygulanmıştır.



Şekil 4.23 Haider URM W6 duvarı fiziksel model

Tablo 4.12 Haider URM W6 duvarı geometrik özellikler

Deney Duvarı	Duvar Boyutları (mm)	Tuğla Boyutları (mm)	Harç Kalınlığı (mm)
Haider URM W6	2870×2408×150	310×76×150	10

Yığma bileşenlerinin basınç dayanımlarını belirlemek için kil tuğla ve harç numuneleri üzerinde basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Basınç deneyleri ile belirlenen tuğla ve harcın basınç dayanımları Tablo 4.13'te verilmiştir.

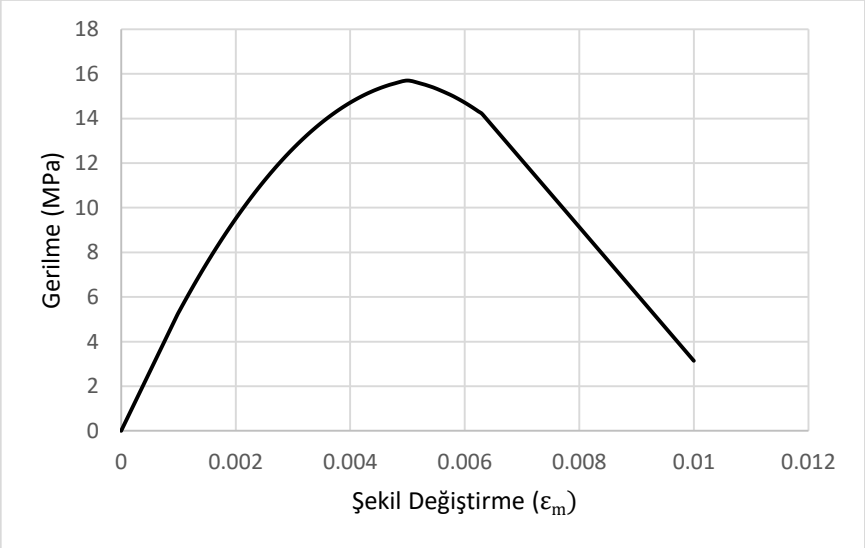
Tablo 4.13 Haider URM W6 duvarı bileşenlerin basınç dayanımları

Yığma Birim ve Bağlayıcı	Basınç Dayanımı (MPa)
Tuğla	40
Harç	5.1

Sayisal modellemede kullanilan URM W6 duvarına ait basınç ve çekme dayanımı ve elastisite modulü tuğla ve harcın basınç dayanımlarına bağlı olarak belirlenmiştir. Yığma elastik ve plastik malzeme özellikleri Tablo 4.14'te verilmiştir. Kaushik vd. [35] tarafından önerilen ilişki kullanılarak belirlenen basınç gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Şekil 4.24'te verilmiştir.

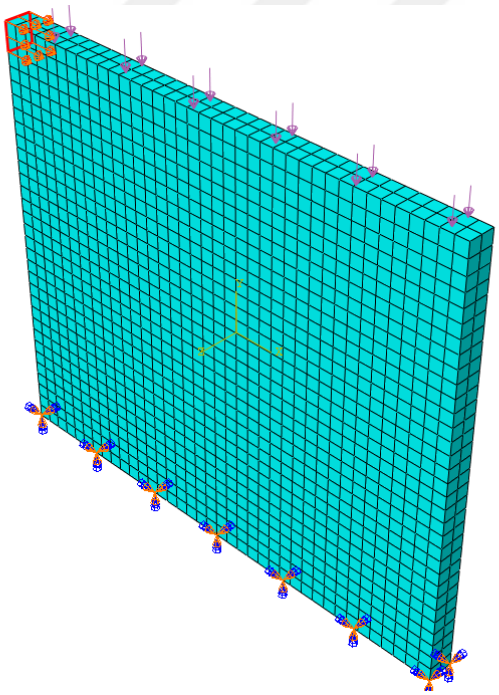
Tablo 4.14 Haider URM W6 duvarı malzeme parametreleri

Parametre	Değer	Kaynak
Basınç Dayanımı (MPa)	15.7	Bennett vd. [42]
Çekme Dayanımı (MPa)	0.9	Ghiassi [66]
Elastisite Modülü (MPa)	7000	Kaushik vd. [35]
Poisson Oranı	0.2	[50-53]
Genleşme Açısı	30	[30]
Viskozite	0.001	[77-80]
fb0/fc0	1.16	[76-80]
Dış Merkezlik	0.1	[76-80]



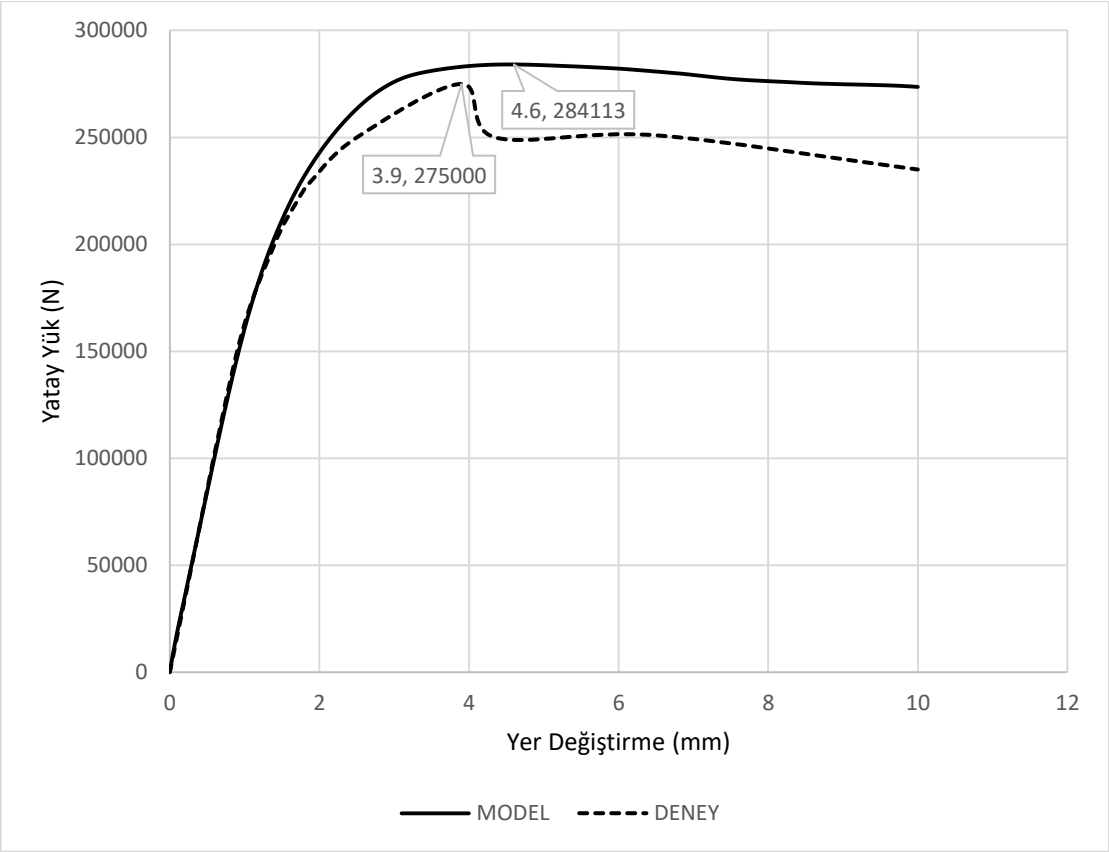
Şekil 4.24 Haider URM W6 duvarı basınç gerilme – şekil değiştirme eğrisi

Söz konusu olan duvar tam ölçekli duvar olduğu için deney esnasındaki sınır koşullarının doğru bir şekilde modellenmesi hem maksimum yatay yük hem de göçme mekanizması açısından sayısal çözümleme sonuçlarını oldukça etkilemektedir. Deneyde duvarın üstüne 4N16 çelik çubuklarla güçlendirilmiş iki kat tuğladan oluşan 2870mm×150mm×172mm boyutlarında bir hatıl yerleştirilmiştir. Bu şekilde yığma duvarın etkin yüksekliği 2408 mm'den 2226 mm'e düşürülmüştür. Hatılın yerleştirilme sebebi yatay yüklemeye maruz kalan duvarda yerel çatlakların engellenmesidir. Deney sonucunda hatılda herhangi bir çatlak bulunmadığı için, bu çalışmada hatılın plastik özellikleri dikkate alınmamıştır. 40×40 mm boyutlarında sonlu elemanlar modeli Şekil 4.25'te verilmiştir.

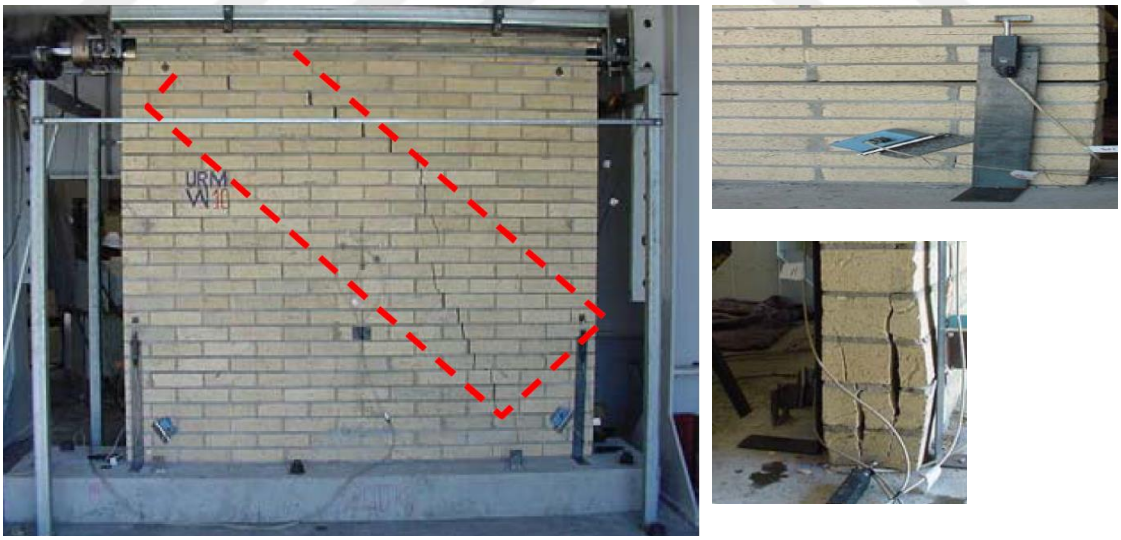


Şekil 4.25 Haider URM W6 duvarı sonlu elemanlar modeli

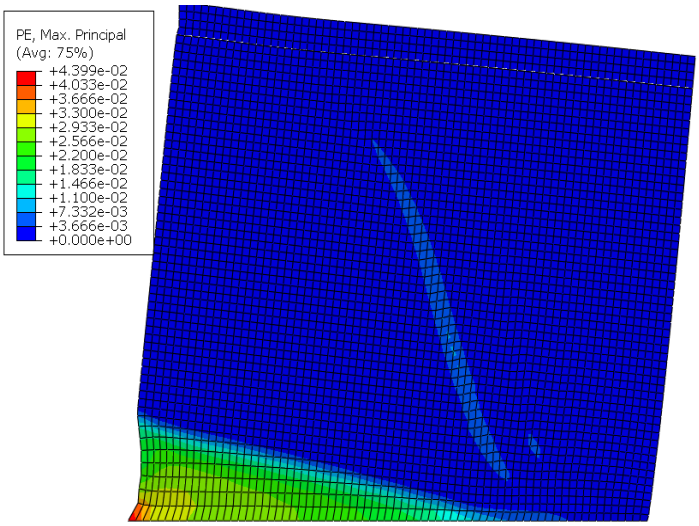
Yer değiştirme kontrollü doğrusal olmayan analiz sonucu elde edilen yük-yer değiştirme eğrisi deneysel yük-yer değiştirme eğrisi ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.26'da verilmiştir. Sayısal çözümleme ile elde edilen plastik şekil değiştirme dağılımı ile deney sonucu oluşan çatlak oluşumu sıra ile Şekil 4.27 ve 4.28'de sunulmuştur.



Şekil 4.26 Haider URM W6 duvarı yatay yük – yer değiştirme diyagramı



Şekil 4.27 Haider URM W6 duvarı deney sonucu mekanizma durumu

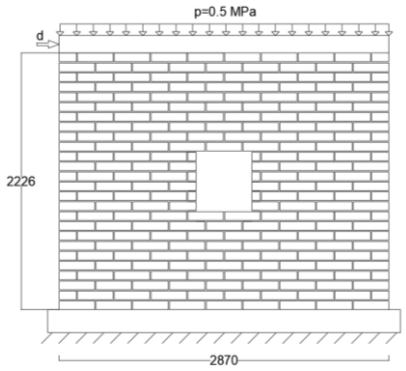


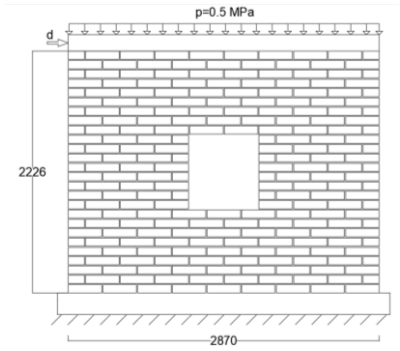
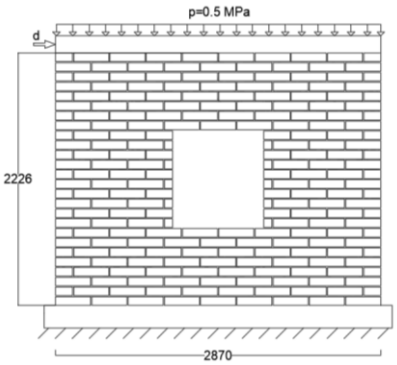
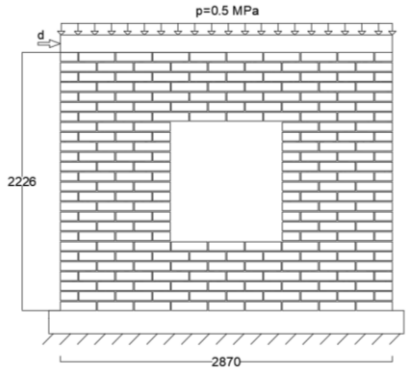
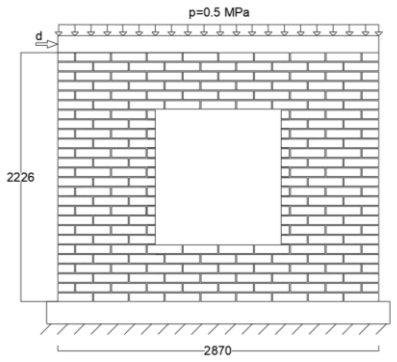
Şekil 4.28 Çözümleme sonunda oluşan plastik şekil değiştirme dağılımı

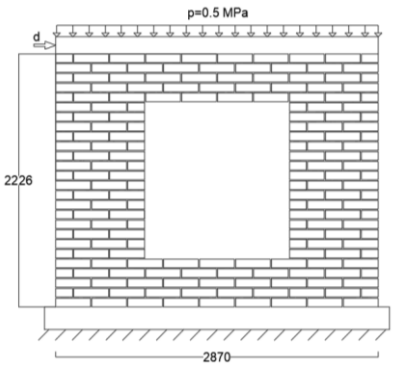
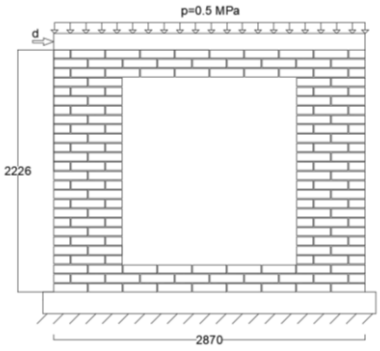
5
PARAMETRİK ÇALIŞMA

Tez çalışmasının bu bölümünde Bolüm 4'de doğrulaması yapılan sayısal/bünyesel model dikkate alınarak donatısız boşluklu yığma duvarlarda boşluk oranı ve konumunun duvarın düzlem içi davranışına olan etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda, Haider [47]'in çalışmasında deneysel olarak incelenen duvar boyutları ile malzeme parametreleri dikkate alınarak çeşitli boşluk oranları ve boşluk konumları (Tablo 5.1-5.4) için maksimum yatay yük değerleri ile ile yük-yer değiştirme eğrilerinin başlangıç rijitliklerinin değişimi irdelenmiştir. Parametrik çalışma için bu duvarın seçilme sebebi, gerçek boyutlu bir duvar olması ve kolaylıkla boşluğun farklı konum ve oranlarda modellenebilmesidir. Toplam 28 duvarın doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemiyle çözümleri ABAQUS / Standart (ABAQUS / CAE 6.14-1 SE) [74] yazılımı ile gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar verilmiştir.

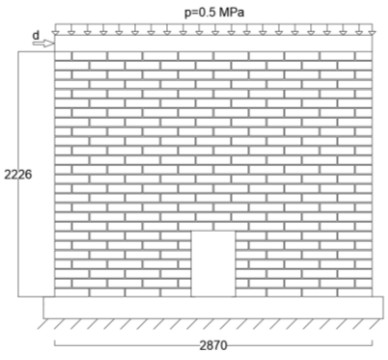
Tablo 5.1 Durum 1: Pencere

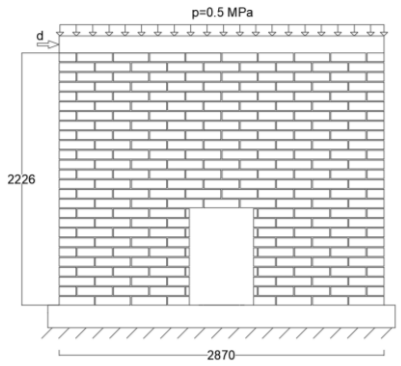
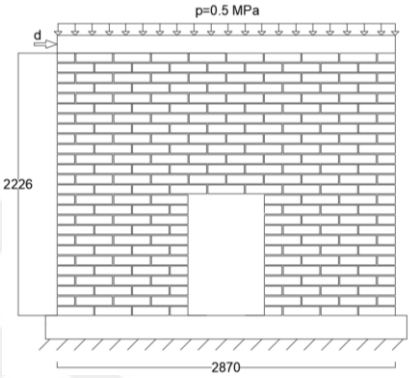
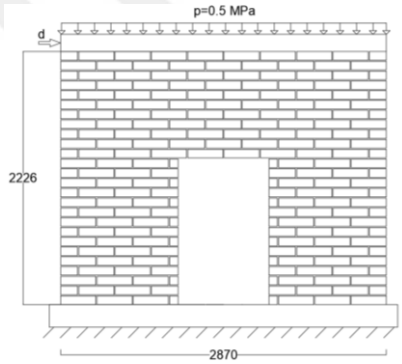
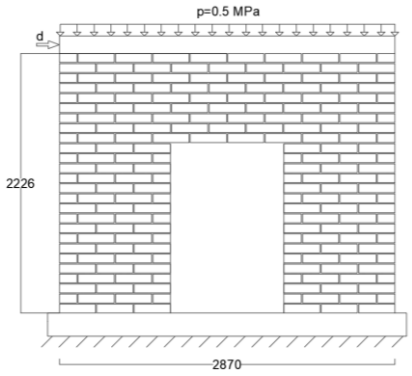
Duvar Boyutları (mm)	Boşluk Boyutları (mm)	Boşluk Oranı	Fiziksel Model
2870×2226×150	485×526	%4	

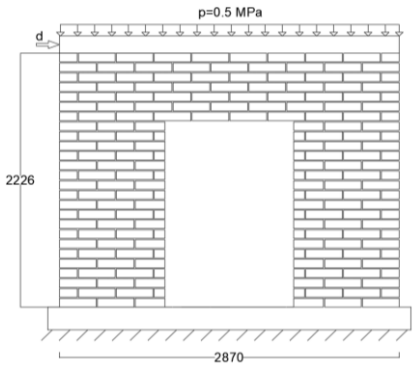
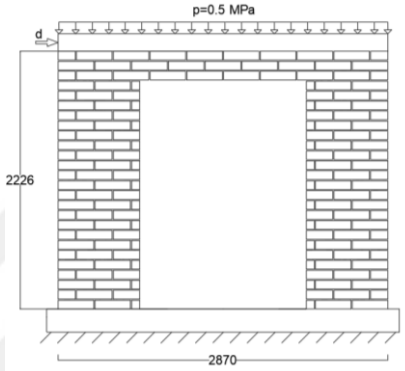
2870×2226×150	650×698	%7.1	
2870×2226×150	805×870	%11	
2870×2226×150	970×1042	%16	
2870×2226×150	1125×1214	%21.4	

2870×2226×150	1290×1386	%28	
2870×2226×150	1670×1730	%45	

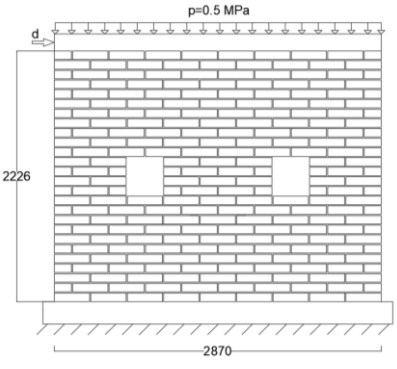
Tablo 5.2 Durum 2: Kapı

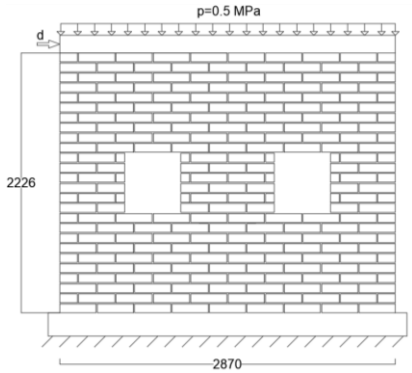
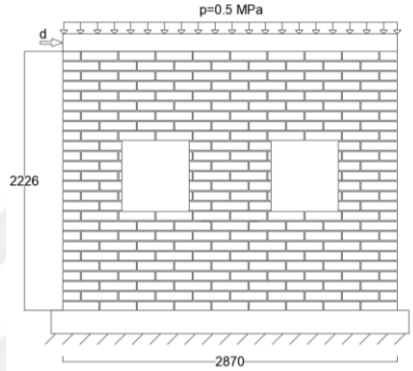
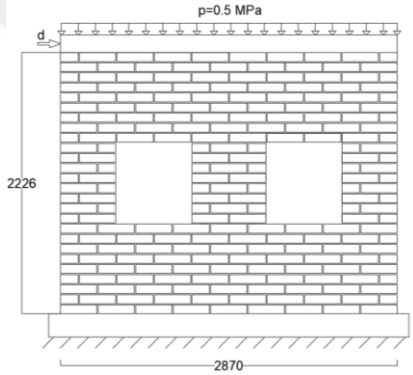
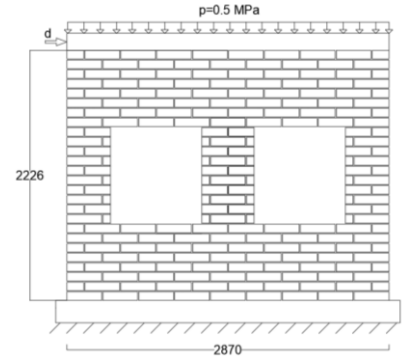
Duvar Boyutları (mm)	Boşluk Boyutları (mm)	Boşluk Oranı	Fiziksel Model
2870×2226×150	402×602	%4	

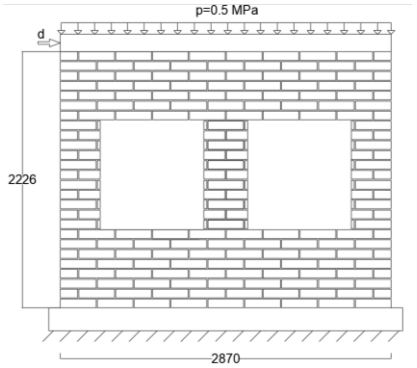
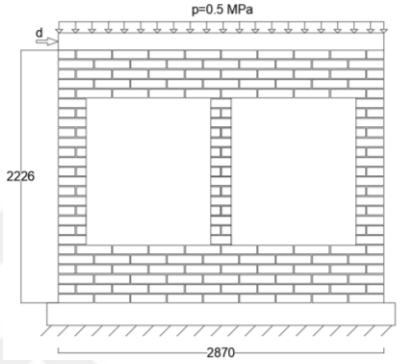
2870×2226×150	568×860	%7.5	
2870×2226×150	650×1030	%11	
2870×2226×150	800×1290	%16	
2870×2226×150	970×1460	%22	

2870×2226×150	1090×1634	%28	
2870×2226×150	1450×1978	%45	

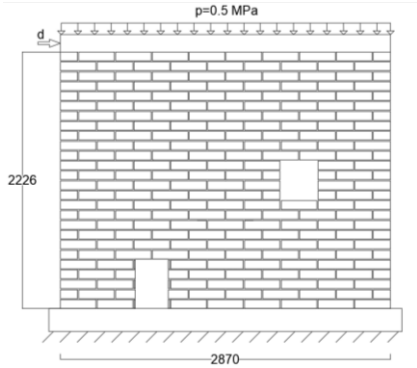
Tablo 5.3 Durum 3: Pencere-Pencere

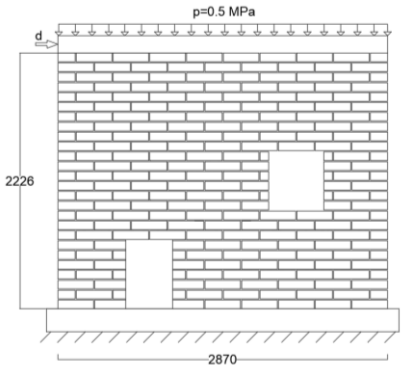
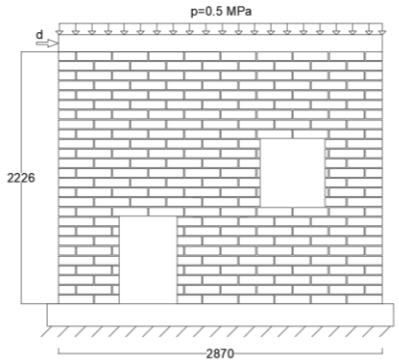
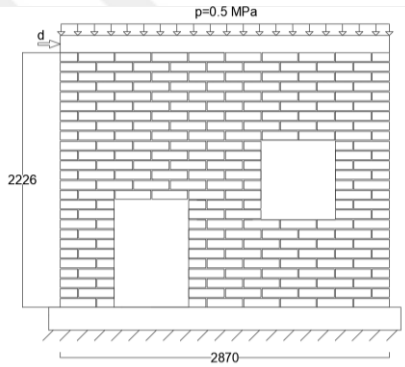
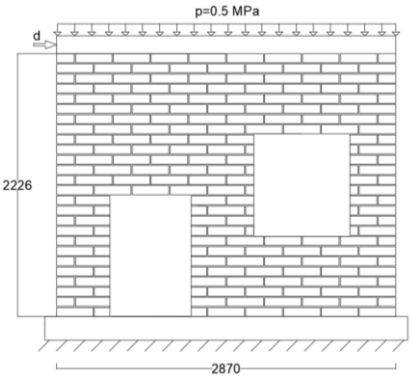
Duvar Boyutları (mm)	Boşluk Boyutları (mm)	Boşluk Oranı	Fiziksel Model
2870×2226×150	330×354	%4	

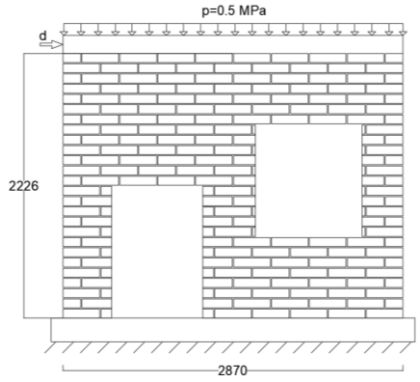
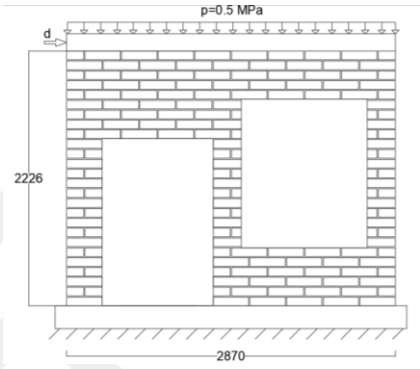
2870×2226×150	480×526	%7.9	
2870×2226×150	576×612	%11	
2870×2226×150	650×698	%14.2	
2870×2226×150	814×870	%22	

2870×2226×150	900×956	%28	
2870×2226×150	1100×1300	%45	

Tablo 5.4 Durum 4: Kapı-Pencere

Duvar Boyutları (mm)	Boşluk Boyutları (mm)	Boşluk Oranı	Fiziksel Model
2870×2226×150	330×354 - Pencere 288×430 - Kapı	%4	

2870×2226×150	480×526 - Pencere 408×602 - Kapı	%7.8	
2870×2226×150	576×612 – Pencere 516×774 - Kapı	%11.7	
2870×2226×150	650×698 – Pencere 650×946- Kapı	%16.7	
2870×2226×150	814×870 – Pencere 688×1032 - Kapı	%22	

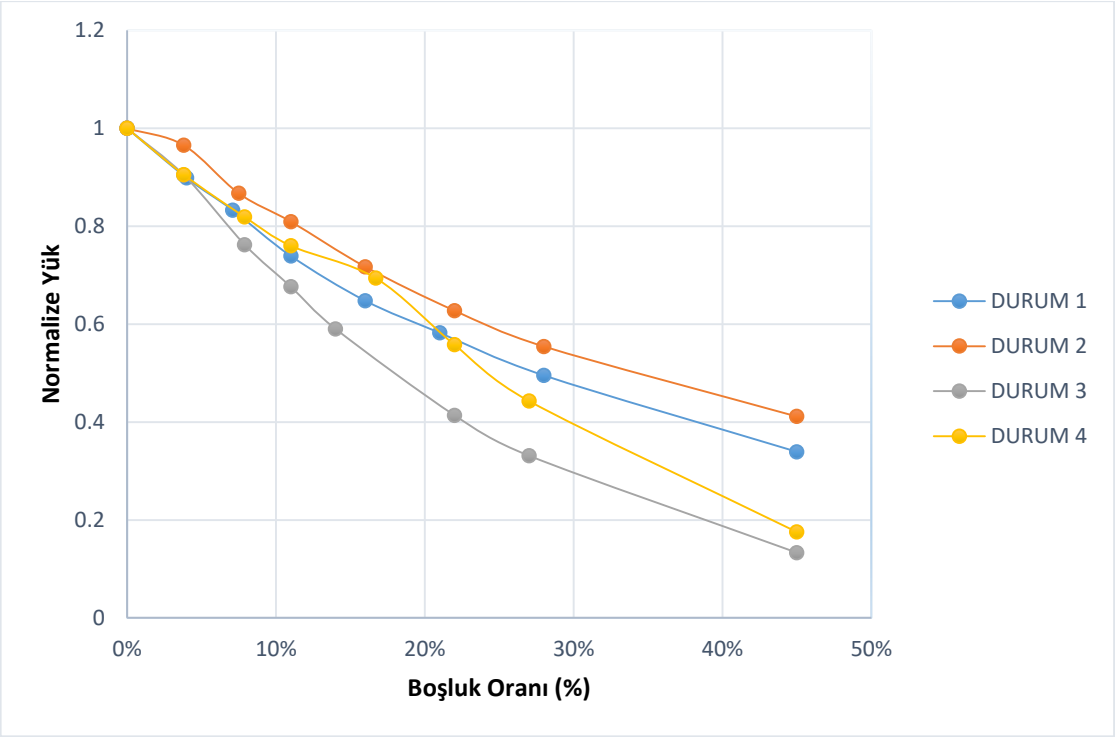
2870×2226×150	900×956 – Pencere 770×1118 - Kapı	%28	
2870×2226×150	1100×1300- Pencere 980×1462 – Kapı	%45	

Bölüm 4.2.2'de görüldüğü gibi, düzlem içi yüklemeye maruz kalan boşluklu duvar, dolu duvardan daha düşük yatay yük taşımaktadır. Ancak duvar, boşluk oranının artmasıyla duvarın rijitliliği azaldığı (sünekliği arttığı) için, daha fazla yatay yer değiştirme yapabilme eğilimindedir. Bu parametrik çalışmanın esas konusu boşluk tipinin (pencere, kapı, pencere-kapı) maksimum yatay yük ve başlangıç rijitliği eğimi üzerindeki etkisi olduğu için, duvarların maksimum yatay yük değerine ulaşmasıyla analizlerin sonlandırılması uygun görülmüştür. Doğrusal olmayan 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen çözümlerden elde edilen maksimum yatay yük değerleri Tablo 5.5'te sunulmuştur.

Tablo 5.5 Maksimum yatay yük değerleri

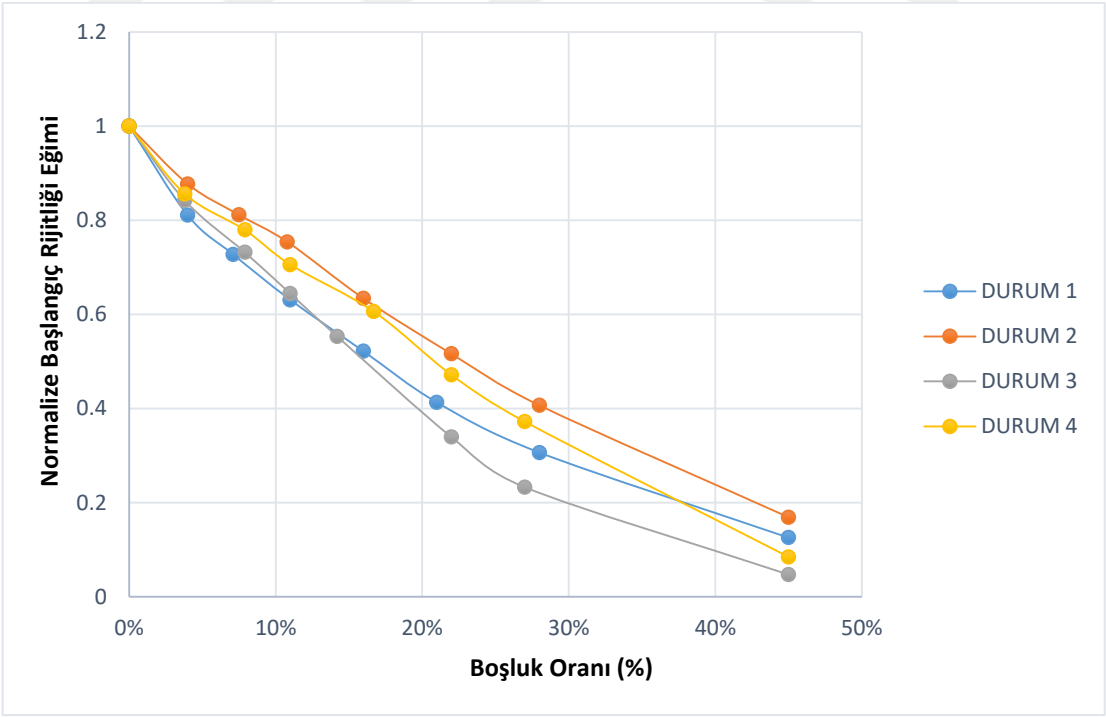
Durum	Boşluk oranı (%)	Maksimum yatay yük (kN)
Durum 1 (Tablo 5.1) Pencere	%4	255.3
	%7	236.6
	%11	210
	%16	184
	%21	165.5
	%28	140.8
	%45	96.4
Durum 2 (Tablo 5.2) Kapı	%4	274.3
	%7	246.4
	%11	230
	%16	203.8
	%21	178.3
	%28	157.5
	%45	116.9
Durum 3 (Tablo 5.3) Pencere-Pencere	%4	257.08
	%7.9	216.62
	%11	192.2
	%14	167.8
	%22	117.5
	%27	94.2
	%45	37.9
Durum 4 (Tablo 5.4) Pencere-Kapı	%4	257.3
	%7.9	232.7
	%11	216
	%17	197.2
	%22	158.5
	%27	125.9
	%45	49.8

Her duruma ait normalize edilmiş maksimum yatay yük – boşluk oranı eğrileri Şekil 5.1'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 5.1 Normalize edilmiş maksimum yatay yük – boşluk oranı

Normalize edilmiş başlangıç rijitliği eğimi – boşluk oranı eğrileri Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2 Normalize edilmiş başlangıç rijitliği eğimi – boşluk oranı

Yığma duvarların düşey ve kademeli artan yatay yükler altında davranışı, boşluğun hem konumuna hem de boyutlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Aşağıdaki paragraflarda farklı durumlar için maksimum yatay yük ve başlangıç rijitliği eğimlerindeki değişim irdelenmiştir:

- Şekil 5.1 ve 5.2'den görüldüğü üzere, boşluk yüzdesi arttıkça, dolu duvara oranla maksimum yatay yük değerleri ve yük-yer değiştirme eğrilerinin başlangıç rijitliklerinin azalma eğiliminde olduğu anlaşılmaktadır. Bu azalmanın, duvarların taşıyacağı maksimum yatay yük açısından Durum 1 için için %10-%66 arasında, Durum 2 için %3.5-%59 arasında, Durum 3 için %10-%87 arasında ve Durum 4 için %10-%82 arasında değiştiği belirlenmiştir. Duvarların yük-yer değiştirme eğrilerinin başlangıç rijitlikleri açısından ise, Durum 1 için %19-%88 arasında, Durum 2 için %12-%83 arasında, Durum 3 için %16-%95 arasında ve Durum 4 için %14-%92 arasında değiştiği belirlenmiştir.
- Aynı boşluk oranına ancak farklı boşluk konumuna ve sayısına sahip duvarlar hem maksimum yatay yük değeri açısından hem de başlangıç rijitliği eğimi açısından farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar birçok sebepten kaynaklanmaktadır:

    a) Boşluğun üstünde kalan bölge kiriş gibi davranış sergilerken, boşluğun sağ ve sol tarafında kalan bölgeler kolon gibi davranmaktadır. Şekil 5.1 ve 5.2'e bakıldığında kapı boşluğu durumundaki duvar, diğer durumlardaki duvarlara göre hem daha fazla yük taşıdığı hem de daha rijit davrandığı görülmektedir. Bunun sebebi de kolon gibi davrandığı düşünülen bölgelerin diğer durumlara göre daha etkin rijitliğe sahip olmaları gibi düşünülebilir. Durum 1, 3 ve 4'teki duvarlarda boşluk oranı arttıkça, yanal rijitlik azalacağından, duvarların yatay yüklere karşı olan dayanımının da önemli ölçüde azalacağı aşikardır.

    b) Donatısız yığma duvardaki boşluk konumunun ve sayısının değiştirilmesi daha fazla yerel çatlağın oluşmasına yol açabilir. Yerel çatlakların oluşması, duvarın bütünlüğünü bozmaktadır. Parametrik çalışmada

çözümler duvarların maksimum yatay yüklere ulaştıkları adımlarda kesildiği için, göçme mekanizmaları hakkında ileri bilgi vermek mümkün değildir. Bu nedenle daha ayrıntılı bir çalışma yapmak gerekmektedir. Ayrıca, makro modelleme yaklaşımı duvarda oluşacak hasar hakkında kabaca bir fikir verse de, daha hassas bir bilgiye ulaşmak için çözümlemeleri mikro modelleme yaklaşımı ile yapmak gerekmektedir.

6
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında düşey ve artımsal yatay yüklere maruz kalan donatısız yığma duvarların doğrusal olmayan analizi için bir sayısal/bünyesel model önerilmiştir. Sayısal çalışmalar iki kısımdan oluşmaktadır: (1) önerilen modelin yük-yer değiştirme eğrisi ve göçme mekanizması açısından deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulanması (2) parametrik çalışma ile boşluk oranı ve boşluk konumunun yığma duvarların düzlem içi davranışına etkisinin irdelenmesi. Yapılan bu çalışmanın, yığma duvarların modellemesinde makro modelleme yaklaşımı ve beton için önerilen elastoplastik hasar modelinin yığma duvarlarda kullanımına ilişkin tartışmalara katkıda bulunması umulmaktadır. Çalışmanın sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır:

1. Önerilen model ile, duvarların genel düzlem içi davranışı başarılı bir şekilde simüle edilmiş ve yük-yer değiştirme eğrisinin başlangıç rijitliği ile maksimum yatay yük açısından deneysel sonuçlara oldukça yaklaşılmıştır. Ancak, yük-yer değiştirme eğrisinin maksimum yatay yük sonrasındaki kısmı açısından sayısal ve deneysel çalışma ile elde edilen sonuçlar arasında bir miktar sapma olduğunu söylemek gerekmektedir. Bu sapmanın, sayısal modelleme tekniğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
2. Sayısal çözümleme ile elde edilen ve Bölüm 4'te sunulan mekanizma durumları deney sonuçlarıyla her ne kadar uyumlu görünse de, önerilen model, beklenen çatlak oluşumunu ve dağılımını bire bir simüle edememiştir. Bunun nedeni yine çözümde kullanılan sayısal modelleme tekniği olarak açıklanabilir.
3. Boşluk oranı ile donatısız yığma duvarın taşıdığı maksimum yatay yük arasındaki ilişki irdelenmiştir. Boşluk oranı arttıkça, duvarın taşıdığı maksimum yük değeri azalır, ancak duvarların yük taşıma kapasitesi ile boşluk oranı arasındaki ilişki, boşluğun konumuna da bağlıdır. Özetle, boşluklu duvarların düzlem içi davranışı boşluğun hem boyutlarına hem de konum ve sayısına bağlıdır. Boşluk konumu ve sayısının değiştirilmesinin çatlak

oluşumunu ve dağılımını önemli ölçüde değiştireceği açıktır. Çatlak şekli ve dağılımının değişmesi ile birlikte, duvarın taşıdığı maksimum yatay yük değeri değişmektedir.

4. İleriki çalışmalara ışık tutması açısından, yük-yer değiştirme eğrilerinin yumuşama kısımları, çatlak oluşumu-dağılımı ve göçme durumları açısından daha hassas sonuçlara ulaşabilmek için, sayısal çözümlemelerinin mikro modelleme yaklaşımı ile yapılması gerektiğini vurgulamak oldukça önemlidir. Ayrıca, Bölüm 5'te görüldüğü üzere, boşluk oranı aynı ancak boşluk konumu ve sayısı farklı olan duvarların taşıdığı maksimum yatay yük değerlerindeki değişimlerin daha iyi açıklanabilmesi için, yine mikro modelleme yaklaşımı tercih edilmelidir.

KAYNAKÇA

[1] P. Lourenco, “Computational strategies for masonry structures,” Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, The Netherlands, 1996.

[2] K. Chaimoon, M. M. Attard, “Modeling of unreinforced masonry walls under shear and compression,” *Engineering Structures*, Cilt 29, Sayı 9, ss. 2056-2068, 2007.

[3] G. Giambanco, S. Rizzo, R. Spallino, Numerical analysis of masonry structures via interface models, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Cilt 190, Sayı 49–50, ss. 6493-6511, 2001.

[4] A. Drougkas, P. Roca, C. Molins, “Experimental analysis and detailed micro-modeling of masonry walls subjected to in-plane shear.” *Engineering failure analysis*, Cilt 95, ss. 1350-6307, 2019.

[5] B. Doran, N. Yuzer, S. Aktan, D. Oktay, S. Ulukaya, “Numerical Modeling of Traditional Masonry Walls Strengthened with Grout Injection,” *International Journal of Architectural Heritage,* ss. 1517-1532, 2019.

[6] B. Doran, H. O. Koksal, S. Aktan, S. Ulukaya, D. Oktay, N. Yuzer, “In-Plane Shear Behavior of Traditional Masonry Walls,” *International Journal of Architectural Heritage*, Cilt 11, Sayı 2, ss. 278-291, 2017.

[7] K. F. Abdulla, L. S. Cunningham, M. Gillie, “Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach”, *Engineering Structures*, Cilt 151, ss. 349-365, 2017.

[8] P.B. Lourenco, J. G. Rots. "Understanding the behaviour of shear walls: A numerical review." *Proceedings of the 10th International Brick/Block Masonry Conference, Alberta, Canada*, 1994.

[9] H. O. Koksal, B. Doran, A. O. Kuruscu, A. Kocak, “Elastoplastic Finite Element Analysis of Masonry Shear Walls”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Cilt 20, Sayı 2, ss. 784-791, 2016.

[10] L. Berto, A. Saett, R. Scotta, R. Vitaliani, "Shear behaviour of masonry panel: parametric FE analyses." *International journal of solids and structures*, Cilt 41.16-17, ss. 4383-4405, 2004.

[11] M. Howlader, M. Masia, M. Griffith, “In-plane shear testing of unreinforced masonry walls and comparison with FEA and NZSEE predictions,” *International Journal of Masonry Research and Innovation*, 2020.

[12] A. Ahmed, K. Shahzada, S. Ali, A. Khan, S. Ali, A. Syed, “Confined and unreinforced masonry structures in seismic areas: Validation of macro models and cost analysis,” *Engineering Structures*, 2019.

[13] W. Haider, M. Dhanasekar “Experimental study of monotonically loaded wide spaced reinforced masonry shear walls,” *Australian Journal of Structural Engineering*, Cilt 5, Sayı 2, ss. 101-118, 2004.

[14] M. Dhanasekar, W. Haider, “Explicit finite element analysis of lightly reinforced masonry shear walls,” *Computers & Structures*, Cilt 86, ss. 15-26, 2008.

[15] P.B. Lourenco, J.G. Rots, J. Blaauwendraad, "Continuum model for masonry: parameter estimation and validation," *Journal of structural engineering*, Cilt 124, Sayı 6, ss. 642-652, 1998.
[16] J.P. Plassiard, M. Eymard, I. Alachek, O. Ple, (2021) "Pushover Tests on Unreinforced Masonry Wallettes Retrofitted with an Innovative Coating: Experimental Study and Finite Element Modelling," *Materials*, Cilt 14, ss. 68-83. 2021.
[17] A.T. Vermeltfoort, T. Raijmakers, H.J.M. Janssen, "Shear tests on masonry walls," In A. A. Hamid, & H. G. Harris, *6th North American Masonry Conference*, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 1993, ss. 1183-1193.
[18] A.T. Vermeltfoort, T.M.J. Raijmakers, "Shear tests on masonry panels of 1x1 m^2," In A. T. Vermeltfoort, *Research on building structures and building physics: proceedings of an interuniverity research seminar*, Eindhoven University of Technology, November 18-20, 1992, ss. 171-177.
[19] A.T. Vermeltfoort, T.M.J. Raijmakers "Vervormingsgestuurde meso-schuifproeven op metselwerk", TNO-raport Centrum Bouwonderzoek TNO-TUE 1993, CUR Commissie B50 - Experimenteel metselwerkonderzoek.
[20] A.T. Vermeltfoort, T.M.J. Raijmakers, "Vervormingsgestuurde meso-schuifproeven op metselwerk: Deel II (meetrapport)", Technische Universiteit Eindhoven 1993, CUR commissie B50, TU Eindhoven. Fac. Bouwkunde, Vakgr. Konstruktie, TUE-BKO-9318.
[21] Z. Liu, A. Crewe, "Effects of size and position of openings on in-plane capacity of unreinforced masonry walls," *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2020.
[22] B. Doran, S. Ulukaya, Z. U. Aslan, M. Karslioglu, N. Yuzer, "Experimental Investigation of CFRP Strengthened Unreinforced Masonry Walls with Openings", *International Journal of Architectural Heritage*, 2021.
[23] N. Augenti, F. Parisi, A. Prota, G. Manfredi, "In-plane lateral response of a full-scale masonry subassemblage with and without an inorganic matrix-grid strengthening system," *Journal of Composites for Construction*, Cilt 15, Sayı 4, 2011.
[24] C. Allen, M. Masia, A. Page, M. Griffith, H. Derakhshan, N. Mojsilovic, "Experimental testing of unreinforced masonry walls with openings subject to cyclic in-plane shear", *Proceedings of the 16th International Brick and Block Masonry Conference*, Padova, Italy, June 26-30 2016.
[25] H. Okail, A. Abdelrahman, A. Abdelkhalik, M. Metwaly, "Experimental and analytical investigation of the lateral load response of confined masonry walls," *HBRC Journal*, Cilt 12, Sayı 1, ss. 33-46, 2016.
[26] M. Oña, G. Metelli, J. Barros, G. Plizzariö, "New openings in unreinforced masonry walls under in-plane loads: a numerical and experimental study," *International Journal of Masonry Research and Innovation*, Cilt 6, Sayı 2, ss. 166-195, 2021.
[27] J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller, E. Onate, "A plastic-damage model for concrete," *International Journal of solids and structures*, Cilt 25, Sayı 3, ss. 299-326, 1989.

[28] J. Lee, G. L. Fenves, "Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures," *Journal of engineering mechanics*, Cilt 124, Sayı 8, ss. 892-900, 1998.
[29] M. Rezapour, M. Ghassemieh, M. Motavalli, M. Shahverdi, "Numerical Modeling of Unreinforced Masonry Walls Strengthened with Fe-Based Shape Memory Alloy Strips," *Materials*, Cilt 14, Sayı 11, 2021.
[30] P. Agnihotri, V. Singhal, D. C. Rai, "Effect of in-plane damage on out-of-plane strength of unreinforced masonry walls," *Engineering Structures*, Cilt 57, ss. 1-11, 2013.
[31] B.V. Wilding, K.M. Dolatshahi, K. Beyer, "Shear-compression tests of URM walls: Various setups and their influence on experimental results," *Engineering structures*, Cilt 156, ss. 472-479, 2018.
[32] D. Rai, V. Singhal, T. Pradhan, A. Tripathi, "Seismic Vulnerability of Monastery Temples of Stone Masonry in Sikkim Himalaya," *Current Science*, Cilt 110, Sayı 10, ss. 1947-1957, 2016.
[33] N. Agüera, M. Tornello, C. Frau, "Structural Response of Unreinforced Masonry Walls," *Journal of Civil Engineering and Architecture* Cilt 10, ss. 219-231, 2016.
[34] M. Annecchiarico, F. Portioli, R. Landolfo, "Micro and macro finite element modeling of brick masonry panels subject to lateral loadings," *COST C26 Action Final Conf* 2010, ss. 315-320.
[35] H.B. Kaushik, D.C. Rai, S.K. Jain, "Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression," *Journal of materials in Civil Engineering*, Cilt 19, Sayi 9, ss. 728-739, 2007.
[36] R. Lumantarna, D. Biggs, J. Ingham, "Uniaxial Compressive Strength and Stiffness of Field-Extracted and Laboratory-Constructed Masonry Prisms" *Journal of Materials in Civil Engineering*, Cilt 26, ss. 567-575, 2014.
[37] K.S. Gumaste, K.S. Nanjunda Rao, B.V. Venkatarama Reddy, vd., "Strength and elasticity of brick masonry prisms and wallettes under compression" *Mater Struct*, Cilt 40, ss. 241–253, 2014.
[38] P. Dayaratnam, "Brick and reinforced brick structures," *Oxford and IBH*, New Delhi, India, 1987.
[39] D. Tensing, "Experimental study on axial compressive strength and elastic modulus of the clay and fly ash brick masonry," *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, Cilt 4, Sayı 4, ss. 134-141, 2013
[40] H.O. Köksal, B. Doran, A.E. Ozsoy, S.N. Alacali, "Nonlinear modeling of concentrically loaded reinforced blockwork masonry columns," *Canadian Journal of Civil Engineering*, Cilt 31, Sayı 6, ss. 1012-1023, 2004.
[41] H.R. Kumavat, "An Experimental Investigation of Mechanical Properties in Clay Brick Masonry by Partial Replacement of Fine Aggregate with Clay Brick" *Waste. J. Inst. Eng.*, Cilt 97, ss. 199–204, 2016.
[42] R.M. Bennett, K.A. Boyd, R.D. Flanagan, "Compressive properties of structural clay tile prisms," *Journal of Structural Engineering*, Cilt 123, Sayı 7, ss. 920-926, 1997.
[43] A. Costigan, S. Pavia, O. Kinnane, "An experimental evaluation of prediction models for the mechanical behavior of unreinforced, lime-mortar masonry

under compression," *Journal of Building Engineering*, Cilt. 4, ss. 283–294, 2015.
[44] S.R. Sarhat, E.G. Sherwood, "The prediction of compressive strength of grouted hollow concrete block masonry based on the contributions of its individual components," *Construction and Building Materials*, Cilt 54, ss. 111-121, 2014.
[45] J.E. Tanner, R.E. Klingner, *Masonry Structural Design*, McGraw-Hill Education, 2017.
[46] R.G. Drysdale, A.A Hamid, L.R Baker*, Masonry Structures, Behaviour and Design*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. 1993.
[47] W. Haider, "In Plane Responce of Wide Spaced Reinforced Masonry Shear Walls," Ph.D. dissertation, Central Queensland University, Emerald, Australia, 2007.
[48] A.T. Vermeltfoort, D.R.W. Martens, "Compression and shear properties of masonry cut from walls, three to ninety-five years old, compared with laboratory made masonry," *16th International Brick and Masonry Confenrece*, Padova, Italy, 2016.
[49] A. Brencich, C. Corradi, L. Gambarotta, G. Mantegazza, E. Sterpi, "Compressive Strength of Solid Clay Brick Masonry under Eccentric Loading" Department of Structural and Geotechnical Engineering, University of Genoa, Italy, RUREDIL s.p.a Milan, Italy, 2005
[50] D.V. Oliveira, "Mechanical characterization of stone and brick masonry," Univ. do Minho, Guimaraes, 2000.
[51] P. Roca, "Simplified methods for assessment of masonry shearwalls," *6th National Congress of Seismology and Earthquake Engineering and International Workshop Masonry Walls and Earthquakes*, SISMICA 2004, ss. 101-118.
[52] G.N. Pande, J. Middleton, B. Kralj, "Computer Methods in Structural Masonry", *Fourth International Symposium CRC Press*, 1998.
[53] J. Bakhteri, A.M. Makhtar, S. Sambasivam, "Finite element modelling of structural clay brick masonry subjected to axial compression," *Jurnal Teknologi*, Cilt 41, Sayı 41, ss. 57-68, 2004.
[54] A.O. Kuruşcu, "Yığma duvar ve temellerde doğrusal olmayan modelleme," Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
[55] C.T. Grimm, "Strength and related properties of brick masonry," *J. Struct. Div.*, Cilt 101, Sayı 1, ss, 217–232, 1975.
[56] W.S. McNary, D.P. Abrams, "Mechanics of masonry in compression," *Journal of Structural Engineering*, Cilt 111, Sayi 4, ss. 857-870, 1985.
[57] M. Boştenaru Dan, R. Pøikryl, A. Török, "Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures", 2010.
[58] L. Barbi, S. Briccoli Bati, G. Ranocchiai, "Mechanical properties of ancient bricks: statistical analysis of data," *7th international seminar on structural masonry for developing countries*, Belo Horizonte, 2002, ss. 27–33.
[59] P.B. Lourenco, G. Vasconcelos, L. Ramos, "Diagnóstico sobre as condições de estabilidade do claustro do séc. XVIII—Mosteiro de Salzedas," LEC 31/2000, University of Minho, Guimarães 2000.

[60] I. Papayianni, M. Stefanidou, "Characteristics of bricks of Byzantine period," *12th international brick/block masonry conference*, Madrid, 2000, ss. 1729–1736.
[61] *Türk Standardı,* TS EN 771-1+A1, 2015.
[62] Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile, ASTM C67 – 00.
[63] *Methods of Tests of Burnt Clay Building Bricks*, IS 3495, 1992.
[64] S. Aktan, (2016). Düzlem İçi Yükler Etkisindeki Yığma Duvarlarda Bünyesel Modelleme, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
[65] Ünay, A. İ., (2002). Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı, ODTÜ Mimarlık Fakültesi Sayı İşbirliği.
[66] B. Ghiassi, A.T. Vermelfoort, P.B. Lourenco, "Masonry mechanical properties," *Numerical modeling of masonry and historical structures*, Woodhead Publishing, 2019, ss. 239-261.
[67] A. Okucu, N. Değirmenci, "Çimentoların Basınç Dayanımlarının Tayininde Prizmatik Numuneler Yerine Küp Numunelerin Kullanılabilirliliğinin Araştırılması," *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 15, Sayı 1, ss. 21-30, 2007.
[68] H. Ün, "Değişik Tip Çimentolarla Hazırlanan Harçların Eğilme Sonrası Basınç Dayanımı ile Doğrudan Basınç Dayanımlarının Karşılaştırılması," *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt 7, Sayı 1, ss. 97-109, 2005.
[69] *Çimentoların fiziki ve mekanik deney metotları*, TS 24, 1972.
[70] *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*, ASTM C 109.
[71] L. Facconi, "Fıber Reınforced Concrete and Mortar for Enhanced Structural Elements and Structural Repair of Masonry Walls," Ph.D. dissertation, Università degli Studi di Brescia – DICATAM Quaderni del Dottorato, 2014.
[72] *Eurocode 6: Design of masonry structures*, EN 1996-1-1, 1996.
[73] K.J., Bathe, "Finite Element Procedures," 2006.
[74] ABAQUS, Theory Manual, Version 6.14, Documentation, Dassault Systemes Simulia Corporation
[75] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, "The Finite Element Method," Cilt. 1: Basic formulation and linear problems, Fourth Edition, McGraw-Hill, Maidenhead, England, 1989.
[76] E.A. De Souza Neto, D. Peric, D.R. Owen, "Computational methods for plasticity: theory and applications," John Wiley & Sons.
[77] D.C. Drucker, W. Prager, "Soil Mechanics and Plastic Analysis on Limit Design," *Journal of applied Mathematics*, Cilt 10, ss. 157-165, 1952.
[78] M. Szczecina, A. Winnicki, "Relaxation time in CDP model used for analyses of RC structures," *Procedia engineering*, Cilt 193, ss. 369-376, 2017.
[79] Y. Sümer, M. Aktaş, "Defining parameters for concrete damage plasticity model," *Challenge Journal of Structural Mechanics,* Cilt 1, Sayı 3, ss. 149-155. 2015.

[80] G.P. van Zijl, “Modeling masonry shear-compression: role of dilatancy highlighted,” *Journal of engineering mechanics*, Cilt 130, Sayı 11, ss. 1289-1296, 2004

[81] A. Wosatko, A. Winnicki, M.A. Polak, J. Pamin, “Role of dilatancy angle in plasticity-based models of concrete,” *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Cilt 19, Sayı 4, ss. 1268-1283, 2019.

[82] T. Stratford, G. Pascale, O. Manfroni, B. Bonfiglioli, “Shear strengthening masonry pnels with sheet glass-fiber reinforced polymer,“ *Journal of Composites for Construction*, Cilt 8, Sayı 5, ss. 434-443, 2004.

[83] A.R. Kamrava, M.A. Najafgholipour, F. Fathi, S.M. Dehghan, “An experimental study on the in-plane behavior of unreinforced masonry walls with an opening strengthened using steel fiber reinforced concrete overlays,” *Journal of Building Engineering*, Cilt 36, 2021.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. E. Nurkovic, M. Karslioglu, Z. Unsal Aslan, Z., B. Doran, " Elastoplastic Analysis of Unreinforced Masonry Walls with Openings," *ISASE 2021 International Symposium On Applied Sciences And Engineering*, Erzurum, Turkey, 2021, ss. 392-395.