T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BOŞLUKLU DONATISIZ YIĞMA DUVARLARIN LİF TAKVİYELİ POLİMER İLE GÜÇLENDİRME TEKNİKLERİ

Zeynep ÜNSAL ASLAN

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Programı

Danışman

Prof. Dr. Bilge DORAN

Aralık, 2022

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BOŞLUKLU DONATISIZ YIĞMA DUVARLARIN LİF TAKVİYELİ POLİMER İLE GÜÇLENDİRME TEKNİKLERİ

Zeynep ÜNSAL ASLAN tarafından hazırlanan tez çalışması 05.12.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Bilge DORAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

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

Prof. Dr. Yusuf AYVAZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Bülent AKBAŞ, Üye
Gebze Teknik Üniversitesi _____

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

Prof. Dr. Tülay AKSU ÖZKUL, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Bilge DORAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Boşluklu Donatısız Yığma Duvarların Lif Takviyeli Polimer İle Güçlendirme Teknikleri 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.

Zeynep ÜNSAL ASLAN

İmza

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'nün FDK-2019-3674 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Aileme

Değerli eşime

ve

Canım oğlum ÖZGÜR EMRE'ye

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması boyunca tez konusunun belirlenmesinden tezin bitimine kadar fikir, bilgi, öneri ve deneyimleri ile bana destek olan; öğrencisi olmaktan gurur duyduğum, zor zamanlarımda desteğini en içten hissettiğim, çalışma azmimi artıran, sonsuz sabrının ve emeklerinin karşılığını asla ödeyemeyeceğim sayın danışman hocam Prof. Dr. Bilge DORAN'a en derin teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin gelişmesinde değerli yorumlarıyla beni yönlendiren ve katkılarıyla çalışmamın şekillenmesine katkı sağlayan sayın hocalarım Prof. Dr. Yusuf AYVAZ ve Prof. Dr. Bülent AKBAŞ'a; projenin deneysel aşamalarında yardımcı olan Prof. Dr. Nabi YÜZER'e ve Dr. Öğr. Üyesi Serhan ULUKAYA'ya; tezin analitik değerlendirmelerinde desteğini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Sema ALACALI'ya teşekkür ederim.

Bu çalışmanın tamamlanmasında, "Boşluklu Donatısız Yığma Duvarların Lif Takviyeli Polimer İle Güçlendirme Teknikleri" adlı FDK-2019-3674 numaralı projeyi destekleyerek katkıda bulunan Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'ne şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmamın her kısmında yanımda olan çalışma arkadaşım Arş. Gör. Metin KARSLIOĞLU'na sonsuz şükranlarımı sunarım. Ayrıca desteğini hiç esirgemeyen Arş. Gör. Şerife ÖZATA'ya çok teşekkür ederim.

Son olarak tüm yaşamım boyunca bana güç veren ve beni her zaman her konuda destekleyen canım aileme özellikle babam Mehmet Fadıl ÜNSAL'a tüm kalbimle teşekkür ederim. Tezin tüm aşamalarında hiçbir desteğini esirgemeyen sabır, anlayış ve sonsuz sevgiyle her zaman yanımda olan eşim Mahmut'a müteşekkir olduğumu belirtmek isterim. Canım oğlum Özgür Emre'm küçük bedenine büyük anlayışı sığdırdığın için çok teşekkür ederim.

Aralık, 2022

Zeynep ÜNSAL ASLAN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ **x**
KISALTMA LİSTESİ **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ **xiv**
TABLO LİSTESİ **xviii**
ÖZET **xix**
ABSTRACT **xxi**
1 GİRİŞ **1**
1.1 Literatür Özeti ... 4
1.1.1 Donatısız Dolu Yığma Duvarların Güçlendirilmesi ile İlgili Literatür Araştırması ... 4
1.1.2 Donatısız Boşluklu Yığma Duvarların Güçlendirilmesi ile İlgili Literatür Araştırması ... 21
1.2 Tezin Amacı ... 24
1.3 Orjinal Katkı ... 25
2 YIĞMA YAPILAR **28**
2.1 Yığma Yapıların Sınıflandırılması ... 29
2.1.1 Donatısız Yığma Yapılar ... 29
2.1.2 Donatılı Yığma Yapılar ... 29
2.1.3 Kuşatılmış Yığma Yapılar ... 30
2.1.4 Donatılı Panel Sistemli Yığma Yapılar ... 30
2.2 Yığma Yapı Malzemeleri ... 31
2.2.1 Tuğla ... 31
2.2.2 Harç ... 32
2.2.3 Taş ... 33
2.2.4 Malzeme Davranışı ... 33
2.3 Yığma Yapı Elemanları ... 36
2.3.1 Duvarlar ... 36
2.3.2 Kiriş ve Lentolar ... 37
3 YIĞMA DUVARLARDA GÜÇLENDİRME YÖNTEMLERİ **38**
3.1 Yığma Duvarın Mekanik Özellikleri ... 38
3.1.1 Basınç Dayanımı ... 38
3.1.2 Kesme Dayanımı ... 40
3.1.3 Elastisite Modülü ... 41
3.2 Düşey ve Yatay Yük Altında Yığma Duvar Davranışı ... 42

3.3 Donatısız Yığma Duvarlarda Onarım ve Güçlendirme Yöntemleri 43
3.3.1 Geleneksel Yöntemlerle Güçlendirme 44
3.3.2 Lif Takviyeli Polimer ile Yapılan Güçlendirme 46
4 DENEYSEL ÇALIŞMA 49
4.1 Üretilen Harcın Özellikleri 50
4.1.1 Taze Haldeki Harç Deneyleri 50
4.1.2 Sertleşmiş Haldeki Harçların Mekanik Özellikleri 52
4.2 Harman Tuğlasının Mekanik Özellikleri 56
4.3 Deney Duvarların Güçlendirilmesinde Kullanılan Malzemeler..... 58
4.3.1 Karbon Lif Takviyeli Polimer..... 58
4.3.2 Epoksi Esaslı Yapıştırıcı..... 59
4.3.3 Epoksi Macun 60
4.4 Deney Düzeneği 61
4.4.1 Yükleme Düzeneği..... 61
4.4.2 Ölçüm Düzeneği 62
4.5 Deney Duvarlarının Karbon Lif Takviyeli Polimer ile Güçlendirilmesi 63
4.5.1 Yüzey Hazırlığı 63
4.5.2 Epoksi Reçinenin Karıştırılması..... 64
4.5.3 Astar Uygulanması..... 65
4.5.4 Tek Yönlü Karbon Lif Takviyeli Polimer Şerit Uygulaması 65
4.6 Yükleme Deneyleri 66
4.6.1 WR Dolu Duvar 69
4.6.2 WRCS-1 Hasarlı Dolu Duvar 70
4.6.3 WCS-1 Dolu Duvar 70
4.6.4 WOR Boşluklu Duvar..... 71
4.6.5 WOCS-1 Boşluklu Duvar..... 72
4.6.6 WOCD-1 Boşluklu Duvar 73
4.6.7 WOCS-2 Boşluklu Duvar..... 74
4.6.8 WOCD-2 Boşluklu Duvar 75
4.7 Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi 77
4.7.1 Çatlak Şekilleri ve Göçme Modları..... 77
4.7.2 Yük-Yer Değiştirme İlişkileri 81
4.7.3 Güçlendirme Oranı Etkisi..... 83

5 SAYISAL MODELLEME 85
5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ... 85
5.2 Bünye Modelleri ... 87
5.2.1 Maksimum Kayma Gerilmesi Kriteri ... 88
5.2.2 Şekil Değiştirme Enerjisi Kriteri ... 89
5.2.3 Mohr-Coulomb Kriteri ... 91
5.2.4 Drucker-Prager Kriteri ... 92
5.3 Sayısal Modelleme Teknikleri ... 93
5.3.1 Detaylı Mikro Modelleme Tekniği ... 94
5.3.2 Basitleştirilmiş Mikro Modelleme Tekniği ... 95
5.3.3 Makro Modelleme Tekniği ... 97
5.4 Deney Duvarlarının Sayısal Analizi ... 99
5.4.1 Sonlu Eleman Tipi ... 99
5.4.2 Bünyesel Model ... 101
5.4.3 Geometri ve Sınır Koşulları ... 103
5.5 Sayısal Analiz Sonuçları ve Değerlendirilmesi ... 105
5.5.1 WR Dolu Duvar ... 105
5.5.2 WCS-1 Dolu Duvar ... 106
5.5.3 WOR Boşluklu Duvar ... 109
5.5.4 WOCS-1 Boşluklu Duvar ... 111
5.5.5 WOCD-1 Boşluklu Duvar ... 114
5.5.6 WOCS-2 Boşluklu Duvar ... 117
5.5.7 WOCD-2 Boşluklu Duvar ... 120
6 ANALİTİK ÇALIŞMA 124
6.1 Lif Takviyeli Polimer ile Güçlendirilmiş Deney Duvarlarının Kesme Dayanımları ... 124
6.1.1 Yalın Deney Duvarlarının Kesme Dayanımına Katkısı ... 124
6.1.2 Lif Takviyeli Polimer Şeritlerinin Nominal Kesme Dayanımına Katkısı ... 126
6.1.3 Karbon Lif Takviyeli Polimer ile Güçlendirilmiş Deney Duvarlarının Nominal Kesme Dayanımları ... 135
6.2 Karbon Lif Takviyeli Polimer İle Güçlendirilmiş Deney Duvarlarının Deneysel, Sayısal ve Analitik Nominal Kesme Dayanımlarının Karşılaştırılması ... 136
7 SONUÇ VE ÖNERİLER 138

KAYNAKÇA 143
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 154

SİMGE LİSTESİ

$f(\sigma_{ij}, Y)$	Akma Fonksiyonu
τ_Y	Akma Noktasındaki Maksimum Kayma Gerilmesi
$V_m{}^{analitik}$	Analitik İrdeleme Sonucu Elde Edilen Kesme Dayanımı
f'_{dt}	ASCE/SEI 41-17'ye Göre Yığma Duvarların Çekme Dayanımı
Q_{CL}	ASCE/SEI 41-17'ye Göre Yığma Duvarların Kesme Dayanımı
V_{dt}	ASCE/SEI 41-17'ye Göre Yığma Duvarların Kesme Dayanımı
$V_m{}^{deney}$	Deneysel Çalışma Sonucu Elde Edilen Kesme Dayanımı
V_f^{deney}	Deneysel Olarak Elde Edilen Lif Takviyeli Polimer Şeritlerinin Nominal Kesme Dayanımına Katkısı
J_2	Deviotrik Gerilme Tensörü
α	Diyagonal Lif Takviyeli Polimer Şeritlerinin Duvar Yüzeyiyle Yaptığı Açı
L	Duvar Genişliği
t	Duvar Kalınlığı
A_n	Duvarın Net Harçlı Ve/Veya Derz Dolgulu Bölümünün Alanı
n	Duvar Sayısı
d_v	Duvar Yüksekliği
H	Duvar Yüksekliği
ρ_h	Düşey Güçlendirme Oranı
σ_e	Efektif Gerilme
f_{vk0}	Eksenel Gerilmenin Bulunmadığı Durumdaki Karakteristik Kesme Dayanımı
σ_{max}	En Büyük Asal Gerilme
b	Enkesit Genişliği
d	Enkesit Yüksekliği
σ_{min}	En Küçük Asal Gerilme
V_{Rd}	Eurocode 6 (EN 1996-1-1)'ye Göre Yığma Duvarların Kesme Dayanımı
σ_{ij}	Gerilme Durumu
f_{mr}	Harç Basınç Dayanımı
f_t	Harç Çekme Dayanımı
$f_{e,m}$	Harç Eğilme Dayanımı

U_V	Hacimsel Değişime Neden Olan Enerji
K	Hacimsel Modül
ϕ	İçsel Sürtünme Açısı
V_{fcr}	İlk Çatlağın Oluştuğu Yatay Yük
δ_{cr}	İlk Çatlağın Oluştuğu Yatay Yüke Karşılık Gelen Yatay Yer Değiştirme
f_k	Karakteristik Basınç Dayanımı
G	Kayma Modülü
V_u	Kesitteki Maksimum Kesme
M_u	Kesitteki Maksimum Moment
c	Kohezyon
V_m	Lif Takviyeli Polimer ile Güçlendirilmiş Yığma Duvarların Kesme Dayanımı
V_n	Lif Takviyeli Polimer ile Güçlendirilmiş Yığma Duvarların Kesme Dayanımı
Γ_{Fm}	Lif Takviyeli Polimer ile Güçlendirilmiş Yığma Duvarların Ortalama Kırılma Enerjisi
$V_{Rd,f}$	Lif Takviyeli Polimerin Nominal Kesme Dayanımına Katkısı
E_f	Lif Takviyeli Polimerin Elastisite Modülü
f_{FRP}	Lif Takviyeli Polimerin Çekme Dayanımı
t_f	Lif Takviyeli Polimerin Kalınlığı
ε_{fd}	Lif Takviyeli Polimerin Tasarım Şekil Değiştirmesi
w_f	Lif Takviyeli Polimer Şeritlerinin Genişliği
n	Lif Takviyeli Polimer Şerit Kalınlığı
A_{FRP}	Lif Takviyeli Polimer Şeritlerinin Kesit Alanı
s_f	Lif Takviyeli Polimer Şeritlerinin Merkezden Merkeze Olan Uzaklıkları
V_f	Lif Takviyeli Polimer Şeritlerinin Nominal Kesme Dayanımına Katkısı
A_f	Lif Takviyeli Polimer Şeritlerinin Toplam Enkesit Alanı
α	Malzemeye Ait Pozitif Katsayı
k	Malzemeye Ait Pozitif Katsayı
τ_{max}	Maksimum Kayma Gerilmesi
V_{max}	Maksimum Yatay Yük
δ_{max}	Maksimum Yatay Yüke Karşılık Gelen Yatay Yer Değiştirme

P_{max}	Maksimum Yük
V_{nm}	MSJC (ACI 530-13)'ye Göre Yığma Duvarların Kesme Dayanımı
A_{nv}	Net Kesit Alanı
ϕ_f	Plastik Akış Açısı
Δl_p	Plastik (Kalıcı) Şekil Değiştirme
ν	Poisson Oranı
f_a	Sabit Yüklerden Dolayı Meydana Gelen Eksenel Basınç Gerilmesi
$V_n^{sayısal}$	Sayısal Analiz Sonucu Elde Edilen Kesme Dayanımı
Δl	Şekil Değiştirme
U_D	Şekil Değişimine Sebep Olan Enerji
U_0	Toplam Şekil Değiştirme Enerjisi
Y	Tek Eksenli Gerilme Durumu
Δl_v	Viskoz Şekil Değiştirme
ρ_v	Yatay Güçlendirme Oranı
$w_{h,v}$	Yatay ve Düşey Eksenlere Dik Lif Takviyeli Polimer toplam genişliği
f_{bl}	Yığma Birim Basınç dayanımı
f_m'	Yığma Duvar Basınç Dayanımı
E_m	Yığma Duvar Elastisite Modülü
f_{vk}	Yığma Duvar Karakteristik Kesme Dayanımı
σ_d	Yük Katsayıları İle Çarpılmış Düşey Yükler Ve Deprem Yüklerinin Ortak Etkisi Altında Hesaplanan Düşey Basınç Gerilmesi
$\mathcal{K}$	Yük Parametresi
A	Yük Uygulanan Kesitin Alanı
E_x	x Yönündeki Elastisite Modülü
E_y	y Yönündeki Elastisite Modülü
E_z	z Yönündeki Elastisite Modülü
v_{xy}	$x-y$ Düzlemlerindeki Poisson Oranı
v_{yz}	$y-z$ Düzlemlerindeki Poisson Oranı
v_{xz}	$x-z$ Düzlemlerindeki Poisson Oranı
G_{xy}	$x-y$ Düzlemlerindeki Kayma Modülü
G_{yz}	$y-z$ Düzlemlerindeki Kayma Modülü
G_{xz}	$x-z$ Düzlemlerindeki Kayma Modülü

KISALTMA LİSTESİ

ASCE/SEI	Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers (Yapı Mühendisliği Enstitüsü/ Amerikan İnşaat Mühendisleri Derneği)
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
COV	Varyasyon Katsayısı
GEP	Gene Expression Programming
LVDT	Lineer Değişken Diferansiyel Transformatör
m	Metre
M	Ortalama
MAPE	Ortalama Mutlak Yüzde Hatası
PC	Potansiyometrik Cetveller
RMSE	Ortalama Hata Kareleri
SD	Standart Sapma
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TSE	Türk Standartları Enstitüsü

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Avrupa ülkelerindeki donatısız yığma yapı sayısı (milyon olarak) [3]....2

Şekil 1.2 Yığma duvarlarda a) Moloz taş, b) Kesme taş ve c) Tuğla duvar örgüsü 2

Şekil 1.3 Donatısız boşluklu yığma duvarda boşluk etrafında oluşan hasarlar a) 2002 Molise, İtalya depremi b) 1975 Lice, Türkiye depremi [5]....3

Şekil 1.4 Donatısız yığma duvarlarda düzlem içi göçme durumları....26

Şekil 2.1 a)Varda köprüsü [76], b)Lala Mustafa Paşa cami [77] ve c)Diyarbakır surları [78]....28

Şekil 2.2 a) Donatısız yığma yapı örneği [80] b) Donatısız yığma duvar 29

Şekil 2.3 a) Donatılı yığma yapı örneği [80] b) Donatılı yığma duvar....30

Şekil 2.4 a) Kuşatılmış yığma yapı örneği [80] b) Kuşatılmış yığma duvar 30

Şekil 2.5 Donatılı panel sistemli yığma yapı örneği [80]....31

Şekil 2.6 Tuğla örnekleri a) Taşıyıcı b) Taşıyıcı olmayan 32

Şekil 2.7 Katı cisim ve dış kuvvet etkisi....34

Şekil 2.8 Yük parametresi-şekil değiştirme ilişkisi ($\mathcal{K}$-ΔL) 34

Şekil 2.9 a) Doğrusal elastik b) Doğrusal olmayan elastik c) İç sürtünmeli elastik malzeme davranışı....35

Şekil 2.10 a) Plastik şekil değiştirme b) Viskoelastik şekil değiştirme c) Plastik-Viskoelastik şekil değiştirme 35

Şekil 2.11 Elasto-plastik malzeme davranışı 36

Şekil 2.12 Donatısız yığma duvar [85]....37

Şekil 2.13 Kiriş ve lento [85] 37

Şekil 3.1 Düzlem-içi ve düzlem-dışı tipik şekil değiştirme ve hasarlar....42

Şekil 3.2 Taşıyıcı duvarlar düzlem içi göçme durumları a) Kesme göçmesi, b) Kayma göçmesi, c) Eğilme göçmesi 43

Şekil 3.3 Lif takviyeli polimerler için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri....47

Şekil 3.4 Çubuk, şerit ve kumaş lif takviyeli polimer....47

Şekil 4.1 Basınç dayanımının zamanla değişimi....50

Şekil 4.2 Taze haldeki harç deneyleri 51

Şekil 4.3 Standart harç eğilme dayanımı deneyi 52

Şekil 4.4 Standart harç basınç dayanımı deneyi....53

Şekil 4.5 Harcın 90 günlük basınç dayanımı deneyi....54

Şekil 4.6 Harcın gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi 55
Şekil 4.7 Harcın 90 günlük çekme dayanımı deneyi 56
Şekil 4.8 Tuğla basınç deneyi 57
Şekil 4.9 Tuğla eğilme dayanımı deneyi 58
Şekil 4.10 Karbon lif takviyeli polimer 59
Şekil 4.11 Yükleme düzeneği 62
Şekil 4.12 Donatısız dolu duvarlar için a) PC'lerin yerleşimi b) LVDT'lerin yerleşimi ve c) İki boyutlu çizim 63
Şekil 4.13 Donatısız boşluklu duvarlar için a) PC'lerin yerleşimi b) LVDT'lerin yerleşimi ve c) İki boyutlu çizim 63
Şekil 4.14 Karbon lif takviyeli polimer uygulanacak alanın belirlenmesi.....64
Şekil 4.15 Reçinelerin karıştırılması.....64
Şekil 4.16 Karbon lif takviyeli polimer uygulanacak alana astar uygulaması 65
Şekil 4.17 Karbon lif takviyeli polimerin istenilen ölçülerde kesilmesi 65
Şekil 4.18 Karbon lif takviyeli polimer uygulanacak alana tamir harcı uygulaması 66
Şekil 4.19 Karbon lif takviyeli polimer uygulaması 66
Şekil 4.20 a) Dolu duvar ölçüleri b) Güçlendirme şeması 67
Şekil 4.21 a) Donatısız boşluklu duvar ölçüleri b) Güçlendirme Şeması 1, c) Güçlendirme Şeması 2 68
Şekil 4.22 WR duvarı 69
Şekil 4.23 WRCS-1 duvarı 70
Şekil 4.24 WCS-1 duvarı 71
Şekil 4.25 WOR duvarı 72
Şekil 4.26 WOCS-1 duvarı 73
Şekil 4.27 WOCD-1 duvarı.....74
Şekil 4.28 WOCS-2 duvarı 75
Şekil 4.29 WOCD-2 duvarı.....76
Şekil 4.30 Çatlak şekilleri a) WR, b) WRCS-1 c) WCS-1 77
Şekil 4.31 Çatlak şekilleri a) WOR b) WOCS-1, c) WOCD-1, d) WOCS-2, ve e) WOCD-2 79
Şekil 4.32 Karbon lif takviyeli polimer sıyrılması ve topuk ezilmesi göçme modları 80
Şekil 4.33 Donatısız dolu duvarların yatay yük- yatay yer değiştirme eğrileri 82
Şekil 4.34 Boşluklu duvarların yatay yük ve yatay yer değiştirme eğrileri.....83
Şekil 4.35 Boşluklu duvarlarda yatay yük artışı ve güçlendirme oranları 84

Şekil 4.36 Aynı güçlendirme oranına sahip boşluklu duvarlarda yatay yüklerdeki artış 84

Şekil 5.1 Sonlu eleman örnekleri a) Bir boyutlu çubuk eleman, b) İki boyutlu dikdörtgen eleman, c) İki boyutlu üçgen eleman, d) Üç boyutlu dikdörtgen prizma(tuğla) eleman.....86

Şekil 5.2 Düzensiz geometriye sahip bir lehvanın üçgen sonlu elemanlarla idealleştirilmesi 87

Şekil 5.3 Asal gerilme uzayında Tresca ve von Mises kriteri akma yüzeyi 91

Şekil 5.4 Asal gerilme uzayında Mohr-Coulomb ve Drucker-Prager kriteri akma yüzeyi.....93

Şekil 5.5 Modelleme teknikleri a) Detaylı mikro modelleme, b) Basitleştirilmiş mikro modelleme, c) Makro modelleme 94

Şekil 5.6 Basitleştirilmiş mikro model.....95

Şekil 5.7 Makro model.....97

Şekil 5.8 SOLID65 sonlu elemanı.....100

Şekil 5.9 SHELL181 sonlu elemanı 100

Şekil 5.10 Dahili çok noktalı kısıtlama (MPC) kontak.....101

Şekil 5.11 Donatısız dolu duvarlar için sonlu eleman ağı ve sınır koşulları 104

Şekil 5.12 Donatısız boşluklu duvarlar için sonlu eleman ağı ve sınır koşulları 104

Şekil 5.13 WR duvarının sayısal çözümüne ait a) Kayma gerilmeleri dağılımları b) Maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımları.....105

Şekil 5.14 WR duvarına ait yük-yer değiştirme ilişkileri.....106

Şekil 5.15 WCS-1 duvarının sayısal çözümüne ait a) Kayma gerilmeleri dağılımları b) Maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımları 107

Şekil 5.16 WCS-1 duvarının sayısal çözümüne ait karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde oluşan a) Maksimum elastik gerilmeleri dağılımları b) Maksimum elastik birim şekil değiştirme dağılımları.....108

Şekil 5.17 WCS-1 duvarına ait yük-yer değiştirme ilişkileri 109

Şekil 5.18 WOR duvarının sayısal çözümüne ait a) Kayma gerilmeleri dağılımları b) Maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımları 110

Şekil 5.19 WOR duvarına ait yük-yer değiştirme ilişkileri.....111

Şekil 5.20 WOCS-1 duvarının sayısal çözümüne ait a) Kayma gerilmeleri dağılımları b) Maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımları 112

Şekil 5.21 WOCS-1 duvarının sayısal çözümüne ait karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde oluşan a) Maksimum elastik gerilmeleri dağılımları b) Maksimum elastik birim şekil değiştirme dağılımları.....113

Şekil 5.22 WOCS-1 duvarına ait yük-yer değiştirme ilişkileri.....114

Şekil 5.23 WOCD-1 duvarının sayısal çözümüne ait a) Kayma gerilmeleri dağılımları b) Maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımları 115

Şekil 5.24 WOCD-1 duvarının sayısal çözümüne ait karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde oluşan a) Maksimum elastik gerilmeleri dağılımları b) Maksimum elastik birim şekil değiştirme dağılımları 116

Şekil 5.25 WOCD-1 duvarına ait yük-yer değiştirme ilişkileri 117

Şekil 5.26 WOCS-2 duvarının sayısal çözümüne ait a) Kayma gerilmeleri dağılımları b) Maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımları 118

Şekil 5.27 WOCS-2 duvarının sayısal çözümüne ait karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde oluşan a) Maksimum elastik gerilmeleri dağılımları b) Maksimum elastik birim şekil değiştirme dağılımları 119

Şekil 5.28 WOCS-2 duvarına ait yük-yer değiştirme ilişkileri 120

Şekil 5.29 WOCD-2 duvarının sayısal çözümüne ait a) Kayma gerilmeleri dağılımları b) Maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımları 121

Şekil 5.30 WOCD-2 duvarının sayısal çözümüne ait karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde oluşan a) Maksimum elastik gerilmeleri dağılımları b) Maksimum elastik birim şekil değiştirme dağılımları 122

Şekil 5.31 WOCD-2 duvarına ait yük-yer değiştirme ilişkileri 123

Şekil 6.1 Önerilen model ve deney sonuçlarının karşılaştırılması.....129

Şekil 6.2 Önerilen GEP model ile mevcut analitik modellerin karşılaştırılması 132

Şekil 6.3 Her bir deney duvarı için önerilen model ile mevcut analitik modellerin R^2 değerlerinin karşılaştırılması 133

Şekil 6.4 Girdi parametreleri ile V_f^{deney}/ $V_f^{önerilen}$ arasındaki ilişki.....133

Şekil 6.5 Girdi parametrelerinin parametrik analizi 134

Şekil 6.6 Önerilen modele her bir girdi parametresinin katkısı 135

Şekil 6.7 Karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş deney duvarlarının nominal kesme dayanımlarıSnın karşılaştırılması 136

Şekil 6.8 Nominal kesme dayanımlarının R^2 açısından karşılaştırılması 137

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Harcın basınç dayanımına göre sınıfları 33
Tablo 3.1 Yığma taşıyıcı duvarların karakteristik basınç dayanımı 39
Tablo 4.1 Üretilen harcın taze haldeki özellikleri.....51
Tablo 4.2 Üretilen harcın 28 günlük eğilme dayanımları 53
Tablo 4.3 Üretilen harcın 28 günlük basınç dayanımları.....54
Tablo 4.4 Üretilen harcın 90 günlük mekanik özellikleri 55
Tablo 4.5 Üretilen harcın 90 günlük çekme dayanımı.....56
Tablo 4.6 Tuğla mekanik özellikleri.....57
Tablo 4.7 Tuğla eğilme ve çekme dayanımı 58
Tablo 4.8 Karbon lif takviyeli polimerin teknik özellikleri.....59
Tablo 4.9 Epoksi esaslı yapıştırıcı teknik özellikleri 60
Tablo 4.10 Epoksi macun özellikleri 60
Tablo 4.11 Donatısız dolu duvarların tanımı.....67
Tablo 4.12 Donatısız boşluklu duvarların tanımı 68
Tablo 4.13 Dolu duvarlarda deney sonuçları 78
Tablo 4.14 Boşluklu duvarlarda deney sonuçları 81
Tablo 5.1 Yığma kompozit için kullanılan elastik parametreler.....101
Tablo 5.2 Yığma kompozit için kullanılan plastik parametreler 102
Tablo 5.3 Karbon lif takviyeli polimer için kullanılan parametreler 103
Tablo 5.4 Sayısal analiz sonucu elde edilen dolu ve boşluklu donatısız yığma duvarların kesme dayanımları 123
Tablo 6.1 Duvarların deneysel kesme dayanımı ile analitik olarak hesaplanan kesme dayanımlarının karşılaştırılması.....126
Tablo 6.2 Deney duvarlarının özellikleri.....127
Tablo 6.3 Girdi/çıktı parametrelerinin istatistiksel kriterleri.....128
Tablo 6.4 Girdi/çıktı parametrelerinin korelasyon matrisi 128
Tablo 6.5 Önerilen GEP model ile mevcut analitik modellerin karşılaştırılması 132

ÖZET

Boşluklu Donatısız Yığma Duvarların Lif Takviyeli Polimer İle Güçlendirme Teknikleri

Zeynep ÜNSAL ASLAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Bilge DORAN

Yığma yapıların temel taşıyıcısı olan donatısız yığma duvarlar, düşey yükleri güvenle karşılarken, yapımında kullanılan malzemelerin zayıf çekme dayanımı sebebiyle deprem gibi yatay yükler altında gerekli performansı gösteremezler. Yaşanan depremler, gerek mevcut yığma duvarların, gerekse tarihi yığma duvarların yatay yükler açısından çeşitli yöntemlerle güçlendirilmeleri gerekliliğini ortaya koymuştur.

Güçlendirme yönteminde temel amaç, sistemin ya da elemanın yatay/düşey yük taşıma kapasitesini, rijitliğini ve sünekliğini bir önceki durumun üzerine çıkarmaktır. Yük taşıma kapasiteleri açısından büyük önem taşıyan basınç dayanımları yüksek malzemelerden yapılan yığma duvarlar, zayıf çekme dayanımları sebebiyle yatay yükler altında meydana gelen çekme kuvvetlerini karşılayamazlar ve duvarlarda çekme çatlakları meydana gelir. Bu çatlaklar yığma duvarda boşluk (kapı, pencere) varsa genellikle bu boşluklar etrafında meydana gelir. Duvarlar, yığma yapılarda taşıyıcı görevi üstlendikleri için duvarlarda meydana gelen hasar, taşıyıcı sistemi doğrudan etkiler. Bu nedenle yığma duvarların güçlendirilmesi, taşıyıcı sistemin güvenliğinin sağlanması açısından önemlidir ve gereklidir. Donatısız yığma duvarlar için literatürde birçok

güçlendirme tekniği mevcuttur. Uygulamada kolaylık sağlaması, kesit kalınlığının az olmasından dolayı mevcut duvara ek ağırlık getirmemesi, korozyona karşı dayanıklılığı, tuğla ile iyi aderans göstermesi gibi unsurlardan dolayı lifli takviyeli polimer malzemeler ile güçlendirme tekniği diğer tekniklere göre daha çok tercih edilmektedir.

Bu çalışmanın amacı düşey ve kademeli yatay yükler altında meydana gelen çekme kuvvetlerini karşılayamayan donatısız dolu ve boşluklu taşıyıcı yığma duvarların lif takviyeli polimer ile güçlendirilerek, yeterli çekme dayanımı ve rijitliğe sahip olmasını sağlamaktır. Bu kapsamda ilk aşamada donatısız dolu ve boşluklu duvarların karbon lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmesinin düzlem içi davranışları ve kesme dayanımları üzerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Ayrıca, uygulanan güçlendirme yönteminde karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin kalınlık ve yüzey alanları parametrelerinin etkinlikleri de araştırılmıştır. İkinci aşamada deney duvarlarının sayısal modelleri ANSYS 2021-R2 yazılımı kullanılarak oluşturulduktan sonra üç boyutlu doğrusal olmayan analizleri yapılmıştır. Sayısal analizler sonucu elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak, sayısal modellerin doğruluğu teyit edilmiştir. Üçüncü aşamada karbon lif takviyeli polimer şeritlerle güçlendirilmiş deney duvarlarının nominal kesme dayanımları analitik bağıntılar yardımıyla hesaplanmıştır. Elde edilen analitik değerler deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak analitik yöntemin etkinliği belirtilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Donatısız yığma duvar, boşluk, karbon lif takviyeli polimer, sayısal model, analitik model.

ABSTRACT

Strengthening Techniques of Unreinforced Masonry Walls Having Opening with Fiber Reinforced Polymer

Zeynep ÜNSAL ASLAN

Department of Civil Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Bilge DORAN

Unreinforced masonry walls resist primarily gravity with little to no consideration of the forces generated by a seismic events due to weak tensile strength of the materials used in construction. Recent earthquakes show that existing or historical masonry walls are needed to be strengethened.

The main purpose of strengthening is to increase the load carrying capacity, stiffness and ductility of the system or element above the previous state. Masonry walls made of materials with high compressive strength, which are of great importance in terms of load carrying capacities, cannot meet the tensile forces that occur under horizontal loads due to their weak tensile strength. For this reason, tensile cracks occur in these walls. If there are any openings (doors, windows) in these walls, these cracks usually occur around openings. As the walls are the main load carrying elements, any damage to the walls directly affects the carrier system. For this reason, strengthening of masonry walls is important and necessary in terms of ensuring the safety of the load bearing system. There are many strengthening techniques in the literature for unreinforced masonry walls. Strengthening with fiber reinforced polymer materials is preferred more than other techniques due to factors such as ease of application, not adding additional

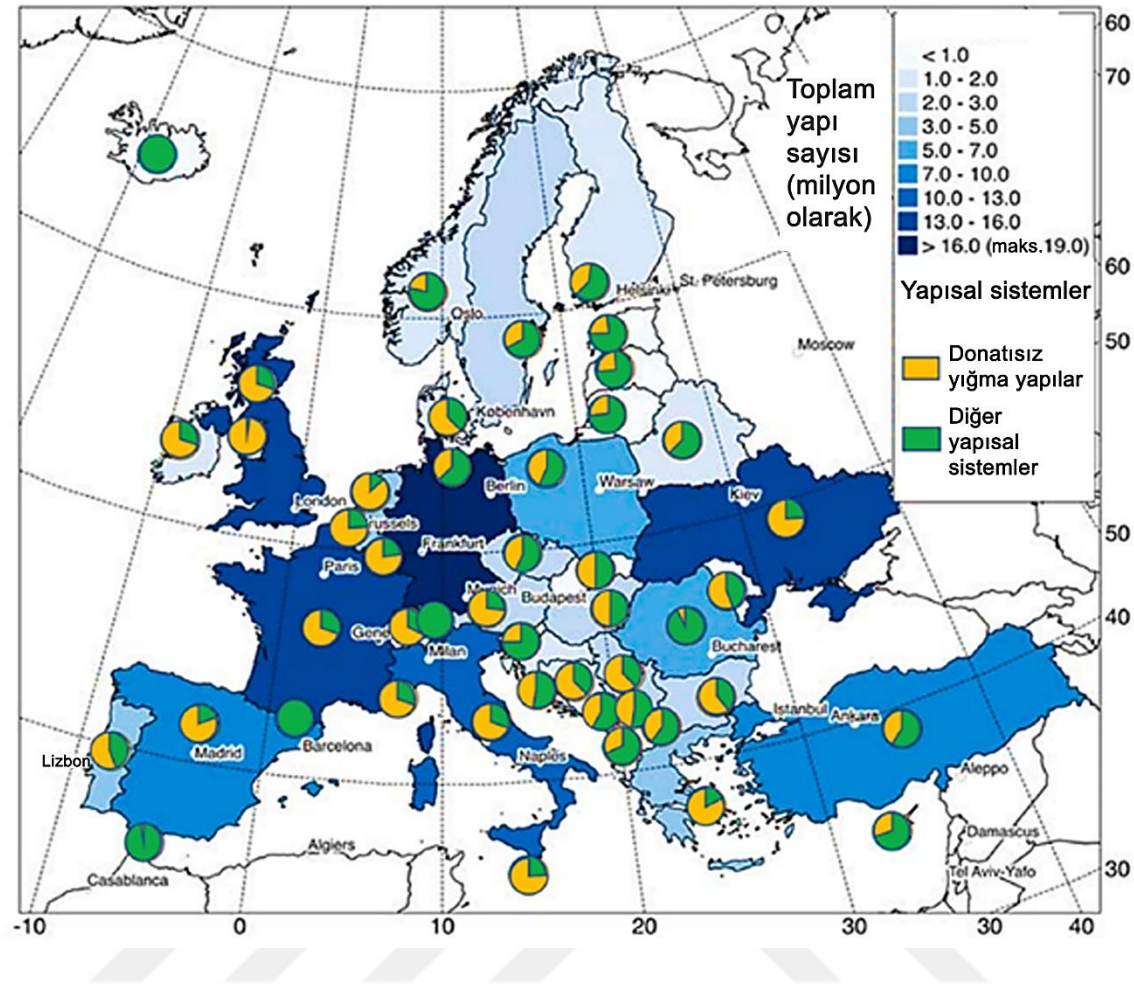
weight to the existing wall due to low section thickness, resistance to corrosion, good adhesion with brick.

The aim of this study is to ensure that the unreinforced loadbearing walls with and without opening, which cannot meet the tensile forces under vertical and incremental horizontal loads, have sufficient tensile strength by strengthening them with fiber reinforced polymer material. For this purpose, firstly, the effect of strengthening of unreinforced masonry walls with carbon fiber reinforced polymer strips on in-plane behavior and shear strength was experimentally investigated. Besides, the effectiveness of the parameters of thickness and surface area of carbon fiber reinforced polymer strips in the applied strengthening method were also investigated. Secondly, after the numerical models of the experimental walls were implemented using ANSYS software, 3-dimensional nonlinear analyses were accomplished. The results obtained from numerical analysis were compared with experimental results, and the accuracy of the numerical models was confirmed. Thirdly, the nominal shear strength capacities of the test walls strengthened with carbon fiber reinforced polymer strips were calculated using analytical models. The analytical results were compared with the experimental results and the efficiency of the analytical method was determined.

Keywords: Unreinforced masonry walls, opening, carbon fiber reinforced polymer, numerical model, analytical model.

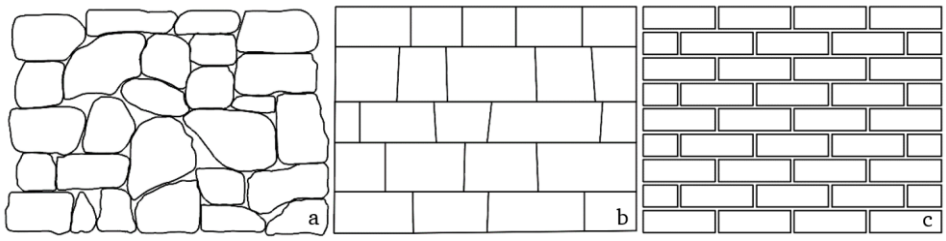
1
GİRİŞ

Yığma; taş, tuğla, kerpiç, beton gibi gevrek özellikler gösteren malzemelerin genellikle kil, kireç, çimento esaslı harç veya başka bağlayıcı malzeme ile birlikte kullanılması sonucu çok eski çağlardan beri başarıyla uygulanan basit bir tekniktir [2]. Modern mimaride, orjinaline göre önemli ölçüde değişmiş olsa da, yığma, dünyada ve Türkiye'de halen kullanılmakta olan en eski yapı malzemelerinden biridir. Döşemeler, hatıllar, duvarlar ve temeller yığma yapıların taşıyıcı sistem elemanlarıdır. Taşıyıcı sistemlerinin basit ve sürekli olması, düşey yükleri taşıyan duvarların yatay yükler altında perde duvarı gibi davranmaları, taşıyıcı sistemlerinde kolon-kiriş birleşimi gibi düğüm noktaları olmadığı için iç kuvvetlerin belirli bölgelerde aşırı değerlere ulaşmaması, yapımının kalifiye işçilik gerektirmemesi ve işçilik hatalarının tolere edilmesi gibi avantajlarıyla betonarme ve çelik çerçeveli sistemlere göre kendini kanıtlamış bir sistemdir. Ancak bu avantajlarına rağmen, özellikle donatısız yığma yapıların tasarımı ve inşası, herhangi bir mühendislik hizmeti almadan geleneksel bir şekilde gerçekleşmiştir ve bazı bölgelerde halen bu şekilde yapılmaktadır. Bu nedenle, geçmiş depremlerdeki fiziksel kayıpların büyük bir yüzdesi, düşük inşaat kalitesine sahip, mühendis eli değmeden yapılan yığma yapıların yetersiz performansından kaynaklanmıştır. Var olan bu durumdan yola çıkarak, yeni form arayışlarının devam etmesi ile, yığma yerini modern zamanlarda çelik ve beton gibi malzemelere bırakmıştır. Ne yazık ki, bu değişim sebebiyle yığma hakkındaki bilgi çok fazla gelişmemiştir ve bu yapı türünün kullanımına karşı olumsuz bir tutum sergilemiştir. Yığma yapıların tasarımı, betonarme ve çelik konstrüksiyonun yaygın kullanımı ile karşılaştırıldığında marjinal görünse de, özellikle Kuzey ve Güney Amerika (Amerika Birleşik Devletleri, Meksika ve Peru dahil), Güney ve Doğu Avrupa (İtalya, Yunanistan ve Türkiye dahil) ve Asya (İran, Ermenistan, Hindistan, Pakistan, Çin ve Japonya dahil) gibi bir yapı stoğunun bulunduğu bir gerçektir. Bu yapı stoğunun büyük bir kısmı, konut amaçlı kullanılan donatısız yığma yapılardan oluşmaktadır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Avrupa ülkelerindeki donatısız yığma yapı sayısı (milyon olarak) [3]

Donatısız yığma yapılar, yığma duvarların donatı kullanılmadan, taşıyıcı birim ve harç kullanılması ile oluşturulan yapılardır. Yığma yapılarda duvarların mimari ve taşıyıcı olmak üzere iki temel görevi mevcuttur. Duvarlar hacimleri oluşturmaları ve ana taşıyıcı eleman olmaları bakımından büyük önem taşımaktadırlar. Farklı birim ve bağlayıcılar ile oluşturulan çok sayıda duvar örgü türleri ile birlikte kuru birleşim duvar örgüleri mevcuttur [4]. Taş ve tuğla kullanılarak oluşturulan kombinasyonlardan birkaçı Şekil 1.2'de gösterilmektedir.



Şekil 1.2 Yığma duvarlarda a) Moloz taş, b) Kesme taş ve c) Tuğla duvar örgüsü

Donatısız yığma duvarlar düşey yükler altında gerekli performansı gösterebilmelerine rağmen, deprem yükleri gibi yatay kuvvetlere maruz kaldıklarında aynı performansı sergileyemezler. Yüksek basınç dayanımına sahip olmalarına karşın çekme dayanımları düşük olduğundan deprem gibi yatay yüklerden meydana gelen çekme gerilmelerini karşılayamamaktadırlar. Bu durumda duvarlarda çekme çatlakları oluşmaktadır. Deprem etkisiyle meydana gelen bu çatlakların doğrultuları ve şekilleri yapının işçiliği, kullanılan malzemelere ve duvarlardaki boşluk alanlarına göre değişiklik göstermektedir (Şekil 1.3). Bu çatlaklar genellikle pencere ve kapı boşlukları çevresinde oluşmaktadırlar. Deprem gibi yatay yükler altında meydana gelen çatlaklar ve diğer hasar durumları güçlendirilme zorunluluğunu da beraberinde getirmektedir.



Şekil 1.3 Donatısız boşluklu yığma duvarda boşluk etrafında oluşan hasarlar a) 2002 Molise, İtalya depremi b) 1975 Lice, Türkiye depremi [5]

Günümüzde donatısız yığma duvarların güçlendirilmesi için birçok geleneksel yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin, donatısız yığma duvarların dayanımını ve sünekliğini artırmada etkili olmalarına rağmen uygulamanın uzun zaman alması, kullanılabilir mevcut alanı azaltması ve estetiği olumsuz yönde etkilemesi gibi dezavantajları mevcuttur. Karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirme, bu tür problemleri ortadan kaldırılabilmektedir. karbon lif takviyeli polimer ürünleri uygulama kolaylığı, montaj kolaylığı, uygulama hızı, yatay yüklere karşı etkinliği, kesit kalınlığının az olmasından dolayı mevcut duvara daha fazla yük getirmemesi, tuğla ile aderansının iyi olması, hafif olması, korozyona karşı direnci, yüksek mukavemeti ve duvarın ilk şeklini koruma kabiliyeti gibi pek çok avantaja sahiptir.

1.1 Literatür Özeti

Bu bölümde, dolu ve boşluklu yığma duvarların güçlendirilmesi ile ilgili teknik literatürde yer alan çalışmalar özetlenmiştir.

1.1.1 Donatısız Dolu Yığma Duvarların Güçlendirilmesi ile İlgili Literatür Araştırması

Alcaino ve Santa-Maria [6], karbon lif takviyeli polimer şeritler ile güçlendirilmiş kil tuğla yığma duvarların tekrarlı düzlem içi yükleme altında davranışlarını incelemişlerdir. Duvarların iki yüzü de yatay ve diyagonal olmak üzere iki farklı şekilde güçlendirilmiştir. Duvarların kesme dayanımındaki değişim, karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin duvar yüzeyinde kapladığı alan bakımından incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, karbon lif takviyeli polimer şerit şekilleri (şemaları) ile güçlendirilen duvarların referans duvara göre kesme dayanımında %13-84 oranında artış gözlenirken, nihai yer değiştirme değerinde %51-146 oranında artış gözlenmiştir. Ayrıca, diyagonal karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilen duvarın kesme dayanımının, yatay karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilen duvarın kesme dayanımından fazla olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, duvar yüzeyinde karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin kapladığı alanın artmasıyla kesme dayanımının da arttığı görülmüştür. Bunlara ek olarak, güçlendirilmiş yığma duvarın kesme dayanımına karbon lif takviyeli polimerin katkısını hesaplayamak için analitik bir bağıntı önerilmiştir.

Alecci vd. [7], karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle onarılan yığma duvarların yük taşıma kapasitelerini analitik olarak incelemişlerdir. Bu amaçla üretilen yığma duvarlar diyagonal basınç yükleme testlerine tabi tutulmuştur. Dikey ve diyagonal karbon lif takviyeli polimer şeritleri ile onarılan duvarların yük taşıma kapasiteleri CNR DT200 İtalyan yönetmeliğinde önerilen analitik bağıntıyla hesaplanmıştır. Analitik bağıntı sonucu elde edilen yük taşıma kapasitesi değerleri deneysel sonuçlarla uyum göstermiştir.

Babatunde [8], kapsamlı literatür araştırmasına dayanarak lif takviyeli polimer ile güçlendirilen yığma elemanları konu alan araştırmaları inceleyip güçlendirme tekniklerini, avantajlarını, dezavantajlarını ve uygulanabilirliliğini araştıran derleme niteliğinde bir çalışma yapmıştır.

Bhattacharya vd. [9], donatısız yığma duvarların güçlendirilmesinde kullanılmış olan geleneksel yöntemler ve lif takviyeli polimerler hakkında bilgiler vermişlerdir. Yapılan araştırma çok kapsamlı bir literatür araştırmasına dayanmıştır. Ayrıca, gelecekteki çalışmalara ışık tutmak amacıyla, yöntemlerin uygunluğunu ortaya koymak açısından bu yöntemler kategorize edilerek ayrı ayrı tartışılmıştır.

Bischof ve Suter [10], yüksek kalite püskürtme harcına gömülü karbon ağ bileşimiyle güçlendirilen yığma duvarların tekrarlı düzlem içi yükler altında davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda söz konusu güçlendirme tekniği ile güçlendirilen yığma duvarların, karbon lif takviyeli polimer levhalar ile güçlendirilen yığma duvarlarla neredeyse aynı kesme dayanımına sahip oldukları ve daha yüksek bir sünekliğe ulaştıkları görülmüştür. Ayrıca, karbon ağın mekanik ankrajının tasarımının deneysel çalışmalarda dikkate alınması gereken hassas bir konu olduğunu ortaya koymuşlardır.

Bischof vd. [11], karbon lif takviyeli polimer şeritler ile güçlendirilmiş yığma duvarların tekrarlı düzlem içi yükleme altında davranışlarını incelemişler, karbon lif takviyeli polimer şeritler için farklı ankraj uygulamalarını değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda özetle, dikey, diyagonal ve dikey+diyagonal şeritlerle güçlendirilmiş duvarların yük taşıma kapasitesilerinin %70, hasar alma kapasitesilerinin %10 oranında arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, dikey karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin duvar düzlem içi eğilme dayanımı kapasitesini artırdığı ve duvarın devrilmesine karşı direnç gösterdiği gözlenirken diyagonal şeritlerin duvar düzlem içi kesme dayanımını önemli oranda artırdığı gözlenmiştir. Uygulanan alternatif mekanik ankraj uygulamaları sonucu, karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin özellikle kenar bölgelerde herhangi bir yapışma düzensizliği ve/veya kusurunun karbon lif takviyeli polimerin erken kopma veya sıyrılmasına sebep olabileceği görülmüştür.

Borri vd. [12], çimento esaslı matrise gömülü yüksek mukavemetli çelik çubukların kullanımına dayalı güçlendirme tekniğinin donatısız yığma duvar güçlendirilmesi için etkinliğini araştırmışlardır. Bu bağlamda, iki farklı tip harç kullanarak üretilen sekiz adet donatısız yığma duvar ve yirmi üç adet farklı şekilde

güçlendirilmiş donatısız yığma duvardan oluşan seri, diyagonal basınç yükleme testlerine tabi tutulmuştur. Deneysel sonuçlar, incelenen güçlendirme tekniğinin uygulanabilirliliğini ve kesme dayanımında artış olduğunu göstermiştir. Bunlara ilave olarak nihai kesme dayanımının belirlenmesi için önerilen analitik bağıntıların deneysel sonuçlar aracılığıyla kullanılabilirlikleri doğrulanmıştır.

Bui vd. [13], karbon lif takviyeli polimer, cam lif takviyeli polimer ve tekstil takviyeli beton şeritleri ile güçlendirilmiş yığma duvarların sabit düşey yük ve düzlem içi yatay yük altında davranışlarını sayısal olarak incelemişlerdir. Bu amaçla söz konusu duvarlar için ANSYS programı kullanılarak sayısal modeller geliştirilmiştir. Sonuç olarak, yapılan sayısal modellemeler sonucu lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş duvarlarda söz konusu yaklaşımın ve kullanılan tekniğin deneysel sonuçları doğru yansıttığı fakat aynı yaklaşım ile tekstil takviyeli beton ile güçlendirilmiş duvarlarda doğru sonuç elde edilmediği görülmüştür.

Capozucca [14], karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmiş donatısız ve donatılı tarihi yığma duvarların tekrarlı düzlem içi yükler altında davranışlarını incelemiştir. Bu amaçla çift T şekli ile karakterize edilen iki adet tarihi yığma duvar üretilmiş olup yatay, dikey ve diyagonal karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmiştir. karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin tam kapasite çalışmasını sağlamak için ankraj sistemi kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, kesme dayanımında artış olduğu ve fakat karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin sıyrılmasının kesme dayanımında çok önemli bir etken olduğu belirtilmiştir. Ayrıca karbon lif takviyeli polimer şeritleri ile dikey, yatay ve diyagonal şekilde gerçekleştirilen güçlendirilme tekniklerinin kesme dayanımında etkin olduğu vurgulanmıştır.

Cheng vd. [15], karbon lif takviyeli polimer ve cam lif takviyeli polimer diyagonal+dikey şeritler, çimento harcına gömülü tekstil takviyeli kompozit ağ ve yatay derzlere döşenmiş çimento esaslı kompozit ağ ile güçlendirilmiş yığma duvarların düzlem içi kesme performanslarını karşılaştırmak için yirmi adet yığma duvar için diyagonal basınç yükleme testleri yapmışlardır. Bu güçlendirme tekniklerinin, göçme modları, kesme dayanımı, süneklik ve enerji kaybı üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Deney sonuçları, güçlendirilmiş duvarların hasar

gördüklerinde farklı derecelerde gevrekliğe sahip olduklarını ve söz konusu güçlendirme tekniklerinin bu durumu iyileştirebileceğini göstermiştir. Yatay derzlere döşenmiş çimento esaslı kompozit ağ ile güçlendirilmiş duvarların diğer duvarlara göre en iyi sünekliğe ve enerji tüketme kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca deneysel veriler ACI 549.4R'te verilen analitik bağıntılar kullanılarak irdelenmiştir.

Crisci vd. [16], diyagonal basınç yükleme testlerine tabi tutulmuş lif takviyeli çimentolu matris ile güçlendirilmiş yığma duvarların yük taşıma kapasitelerini analitik ve sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal modeller DIANA TNO yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Sayısal modeller ve analitik bağıntılar sonucu elde yük taşıma kapasiteleri deneysel sonuçlarla uyum göstermiştir.

D'Ambrisi vd. [17], sıva tabakasına gömülü polimerik ağlarla güçlendirilmiş yığma duvarların tekrarlı düzlem içi ve düzlem dışı yükler altında kesme dayanımını araştırmışlardır. Bu amaçla onsekiz adet yığma duvar, her biri üç adet duvardan oluşan altı set halinde iki farklı polimer ağ türü ile güçlendirilmişlerdir. Sonuç olarak, polimer ağlarla güçlendirilmiş duvarların kesme dayanımında artış olduğu görülmüştür. Ayrıca bu güçlendirme tekniğinin yığma duvarların süneklik ve enerji tüketme kapasitlerinin artışında önemli bir etken olduğu sonucuna varılmıştır.

Dizhur vd. [18], yüklemeden önce ve yüklemeden sonra yüzeye yakın karbon lif takviyeli polimer çubuklarıyla güçlendirilen çok yapraklı yığma duvarların diyagonal basınç yükleme testi altında davranışlarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda söz konusu güçlendirme tekniğinin donatısız yığma duvarların kesme dayanımını ve nihai yer değiştirme değerini önemli ölçüde artıran basit ve uygun bir yöntem olduğu belirtilmiştir.

Doran vd. [19], çalışmalarında Roma ve Bizans dönemlerinde kullanılan dört farklı kireç harcı ile üretilen donatısız yığma duvarların sabit düşey yük ve kademeli artan yatay yük altında gerçekleştirilen bir araştırma projesinin deneysel sonuçlarını sunmaktadırlar. Ayrıca, duvar bileşenleri için Oliver'ın hasar modeli parametrelerini ve değiştirilmiş von-Mises akma kriterini kalibre eden bir elasto-plastik hasar (EDP) yaklaşımı uyarlanmış ve modelleme amacıyla, hem harç hem

de harç-tuğla ara yüzünün yapısal davranışını tanımlamak için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşım, mevcut yığma yapılarda harç ve harç-tuğla arayüzünün davranışını tanımlamak için uygun ve faydalı olduğu belirtilmiştir.

Doran vd. [20], karbon lif takviyeli polimer kullanılarak güçlendirilen yığma duvarların yatay ve düşey yükler etkisinde davranışlarını sayısal olarak incelemişlerdir. Bu amaçla literatürden seçilen karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş yedi yığma duvarın, yığma birim, harç ve karbon lif takviyeli polimerin yapısal davranışları ayrı ayrı dikkate alınarak, sonlu eleman modelleri LUSAS yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Duvarların üç boyutlu doğrusal olmayan analizleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçların deneysel verilerle uyum içerisinde olduğu belirtilmiştir. Ayrıca Doran vd. [19] tarafından önerilen yaklaşım güçlendirilen duvarların sayısal modellemesi için kullanılmış ve elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Doran vd. [21], harç enjeksiyonu ile güçlendirilen donatısız yığma duvarların davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deney sonuçları, uygulanan güçlendirme tekniği ile referans duvara göre çatlak şeklinde neredeyse hiç değişiklik olmadığını göstermektedir. Ayrıca yük taşıma kapasitesinin, söz konusu güçlendirme tekniği ile arttığı belirtilmiştir. Ayrıca Doran vd.'nin [19] daha önce önerdikleri sayısal yaklaşım, güçlendirilen duvarların sayısal modellemesi için kullanılmış ve deney sonuçlarıyla uyumlu sonuçların elde edildiği vurgulanmıştır.

Ehsani vd. [22], yığma duvarların farklı dayanıma ve lif düzenine sahip cam lif takviyeli polimer kumaşlarıyla duvar yüzey alanı boyunca güçlendirilmesinin tekrarlı düzlem içi yükler altında etkinliğini araştırmışlardır. Deney sonuçları, test edilen duvarların hem mukavemetlerinin hem de sünekliklerinin bu güçlendirme tekniğiyle önemli oranda arttığını göstermiştir. Lif düzeninin nihai duvar mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür.

ElGawady vd. [23], farklı şekillerde şerit, çubuk ve kumaş karbon lif takviyeli polimer, cam lif takviyeli polimer ve aramid lif takviyeli polimerler ile sadece tek taraflı güçlendirilmiş duvarların tekrarlı düzlem içi yükler altında davraşılarını

araştırmışlardır. Deney sonuçları, güçlendirme tekniklerinin yatay yer değiştirme kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gösterirken, duvarların tek taraflı güçlendirilmesi sebebiyle deney esnasında tatmin edici sonuçların elde edilmediğini göstermiştir. Yüzey alanı boyunca kumaş lif takviyeli polimer ile güçlendirilmenin olası tüm göçme modları üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Şerit lif takviyeli polimer ile güçlendirilme sonucunda duvarlarda basamak şeklinde kesme çatlakları oluştuğu görülmüştür.

ElGawady vd. [24], yüklemeden önce ve yüklemeden sonra kumaş lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş yığma duvarların düzlem içi tekrarlı yükleri altında davranışlarını incelemişlerdir. Farklı miktarda lif takviyeli polimer ile tek yüzü güçlendirilerek gerçekleştirilen deneysel çalışmanın sonucu, yüksek miktarda lif takviyeli polimer kullanımıyla gevrek kırılmanın meydana geldiğini göstermiştir. Ayrıca, yük taşıma kapasitesindeki artışın lif takviyeli polimer elastisite modülü ve güçlendirme oranı ile doğru orantılı şekilde değiştiği belirtilmiştir. Lif takviyeli polimer ile güçlendirmenin, göçme modu ve çatlak şeklini değiştirdiği de eklenmiştir. Son olarak, literatürde mevcut basit analitik bağıntılarla yük taşıma kapasiteleri hesaplanarak deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

ElGawady vd. [25], yüklemeden sonra lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş yığma duvarların düzlem içi kesme davranışı için analitik bir bağıntı önermişlerdir. Bu bağlamda ElGawady [26]'nin doktora tez çalışmasında deneylerini yaptığı altı adet duvar üzerinde parametrik bir çalışma gerçekleştirilerek söz konusu bağıntıyı önermişlerdir. Önerilen bağıntı literatürde mevcut üç analitik bağıntı ile karşılaştırılmıştır.

Elmalyh vd. [27], her iki yüzü karbon lif takviyeli polimer kumaş, dikey+yatay ve dikey şeritlerle güçlendirilmiş yığma duvarların diyagonal basınç altında davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda, kumaş lif takviyeli polimer ile güçlendirilen duvarın diğer duvarlara göre hem duvar davranışı hem de yük taşıma kapasitesi bakımından daha etkili olduğu görülmüştür. Dikey+yatay ve dikey karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmiş duvarda yük taşıma kapasitesi bakımından referans duvara göre önemli bir değişiklik görülmemiştir.

Faella vd. [28], çimento harcına gömülü karbon lif takviyeli polimer ağ ile güçlendirilmiş yığma duvarların diyagonal basınç altında davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda söz konusu güçlendirme tekniğinin yığma duvarların kesme dayanımını artırdığı görülmüştür. Güçlendirilmiş duvarlarda göçmenin lif takviyeli polimer kopması ve sıyrılması ile meydana geldiği belirtilmiştir. Güçlendirilmiş duvarların kesme dayanımını belirlemek için literatürde önerilen analitik bağıntılar irdelenmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılıp değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirme sonucunda lif takviyeli polimer sıyrılmasının söz konusu bağıntılarda dikkate alınmamasından dolayı deney sonuçları ve analitik sonuçlar arasında önemli bir farkın olduğu belirtilmiştir.

Farooq vd. [29], karbon lif takviyeli polimer ve çelik şeritlerle güçlendirilmiş yığma duvarların tekrarlı düzlem içi yükleme altında davranışlarını araştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre yatay yük taşıma kapasitesinin, karbon lif takviyeli polimer ve çelik şeritlerle güçlendirilmiş duvarlarda kesme dayanımının ve sünekliğin oldukça arttığı gözlenirken karbon lif takviyeli polimer şeritler ile güçlendirilmiş duvarların yatay yer değiştirmelerin daha yüksek olduğu görülmüştür.

Gabor vd. [30], karbon lif takviyeli polimer ve cam lif takviyeli polimer şerit ve kumaş ile güçlendirilmiş donatısız yığma duvarların diyagonal basınç altında davranışlarını, hasar ve gerinim dağılımlarını değerlendirip deneysel sonuçları ve sonlu eleman modellerinin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Duvarların sonlu eleman modelleri için ANSYS yazılımı kullanmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda elde edilen sayısal sonuçların, nihai yük taşıma kapasitesi, göçme modları ve gerinim değerleri bakımından deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Önerilen sayısal modelleme tekniği ile teknik olanakların yetersiz olduğu durumlarda güçlendirme şeklinin belirlenmesinde yararlı olunacağı belirtilmiştir.

Garofano vd. [31], çimento harcına gömülü polmerik ağ ve çimento harcına gömülü çelik ağ kullanılarak güçlendirilen yığma duvarların davranışlarını sabit düşey yük ve kademeli artan yatay yük etkisinde deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmadan sonra, deney duvarlarının sonlu eleman modelleri DIANA

yazılımı kullanılarak geliştirilmiştir. Güçlendirme tekniğinin etkinliği duvar mukavemetini, duvar boyutlarını, güçlendirme ağının eksenel rijitliğini ve harcın mukavemetini içeren analitik bir bağıntı ile incelenmiştir. Deneysel çalışma ve sayısal analizler, çimento harcına gömülü polimerik ağ ile güçlendirme tekniğinin çimento harcına gömülü çelik ağ ile güçlendirme tekniğine göre yapının kütlesinde ve rijitliğinde önemli mitarda değişiklik yapmamak, kurulumun kolay olması ve düşük maliyetli olmak, kimyasal ve fiziksel etkilere karşı dirençli olmakk gibi avantajlara sahip olduğu belirtilmiştir.

Ghiassi vd. [32], cam lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş duvarların doğrusal olmayan davranışına çevresel koşulların etkisini sayısal olarak araştırmışlardır. DIANA yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen sayısal modelleme tekniği literatürde mevcut duvar deney sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Önerilen yaklaşım doğrulandıktan sonra farklı sınır koşulları, farklı güçlendirme şekilleri ve farklı güçlendirme oranları dikkate alınarak modeller üretilmiştir. Çevresel koşulların dikkate alınmasıyla duvarların davranışlarda değişiklik gözlenmiştir. Ayrıca lif takviyeli polimer şerit genişliğinin sonuçlar üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir.

Ismail vd. [33], yüzeye monte edilmiş yüksek mukavemetli paslanmaz çelik çubuklar kullanılarak güçlendirilen yığma duvarların diyagonal basınç altında davranışlarını göçme modu, kesme dayanımı ve nihai yer değiştirme bakımından incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre uygulanan güçlendirme tekniği ile kesme dayanımında ve nihai yer değiştirme değerinde artış görülmüştür. Ayrıca, deney sonuçlarından yola çıkarak güçlendirilmiş duvarların maksimum yük seviyesinden sonra yük boşaltmaya başladığı güçlendirilmemiş duvara göre daha sünek bir davranış sergilediği sonucuna varılmıştır.

Kalali ve Kabir [34], cam lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş yığma duvarların diyagonal basınç yükleme deneyleri altında kesme dayanımlarını ve güçlendirme tekniğinin etkinliğini araştırmışlardır. Bu amaçla İran mimarisinde sıkça kullanılan geleneksel yığma duvarlar simüle edilerek bir dizi yığma duvar üretilmiş olup yatay+dikey (ağ) cam lif takviyeli polimer şeritleri, diyagonal cam lif takviyeli polimer şeritleri ve cam lif takviyeli polimer kumaş ile

güçlendirilmiştir. Deneysel araştırma sonuçları, diyagonal cam lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmiş yığma duvarların kesme dayanımının referans duvarın kesme dayanımının 2.45 ile 4.32 katı kadar olduğunu göstermiştir. Güçlendirme şekilleri bakımından yatay+dikey şerit uygulamasına kıyasla diyagonal şerit uygulamasının daha etkin olduğu görülmüştür. Ayrıca, yığma duvarların çift taraflı güçlendirilmesinin (simetrik uygulama) düzlem içi kesme dayanımı üzerinde önemli bir etken olduğunu göstermiştir.

Konthesingha vd. [35], karbon lif takviyeli polimer şeritlerle güçlendirilmiş yığma duvarların farklı mertebelerde düşey yük ve düzlem içi tekrarlı yükler altında davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Üretilen duvarların bir kısmı yüklemeden sonra, bir kısmı yüklemeden önce farklı şekillerde çift taraflı güçlendirilmiştir. Deneysel çalışmanın sonunda, güçlendirilen duvarların nihai yer değiştirme değerlerinde artış görülmüştür. Hasarlı duvarların güçlendirildikten sonra maksimum yük seviyesinde önemli oranda artış görülmemiştir. İncelenen güçlendirme şekillerinden dikey+yatay şerit uygulamasının sadece dikey ve sadece yatay şerit uygulamasına göre daha etkili olduğu vurgulanmıştır.

Lignola vd. [36], diyagonal ve yatay lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmiş farklı tuğlalardan yapılmış yığma duvarların düzlem içi davraşını sayısal olarak araştırmışlardır; lif takviyeli polimer şeritlerinin genişliğinin, kalınlığının ve aralığının etkisi incelenmiştir. DIANA yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen sayısal çözüm sonuçları literatürden alınan deney duvarlarına ait sonuçlar ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Aynı güçlendirme oranı ve aynı güçlendirme şekline sahip farklı tuğlalardan üretilmiş duvar davranışlarının aynı olmadığı görülmüştür. Yük taşıma kapasitesi daha az olan donatısız yığma duvarlar için lif takviyeli polimer güçlendirilmesi sonucu daha fazla yük artışı olduğu görülmüştür. Şerit genişliğinin, lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş duvarlarda kalınlıktan daha fazla etkiye sahip olduğu görülmüştür. Diyagonal şeritlerle güçlendirilmiş duvarlarda yük taşıma kapasitesi açısından daha yüksek değerler elde edilmiştir. Yatay şeritlerin yük taşıma kapasitesi üzerinde bir etkisi olmadığı sadece göçme modu üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

Luccioni ve Rougier [37], karbon lif takviyeli polimer şerit ve kumaş ile güçlendirilmiş yığma duvarların sadece düşey yük ve sadece diyagonal basınç yüklemesi etkisinde yapısal davranışlarını deneysel olarak araştırmışlardır. İki yükleme durumu için kendi içinde farklı güçlendirme şekilleri (şemaları) kullanılmıştır. Deneysel sonuçlara göre doğru güçlendirme şekli kullanılırsa, karbon lif takviyeli polimerin, sünekliği ve yük taşıma kapasitesini artırarak duvar davranışını iyileştirdiği sonucuna varmışlardır. Sadece düşey yük altında test edilen duvarlarda yatay şeritlerle güçlendirilen duvarların yük taşıma kapasitesinde önemli oranda artış görülmezken, süneklikte artış görülmüştür. Diyagonal basınç yükleme testleri sonucunda, güçlendirilen duvarların kesme dayanımında artış görülmüştür. Diyagonal şeritlerle güçlendirmenin diğer güçlendirme şekillerine kıyasla daha etkili ve ekonomik olduğu görülmüştür.

Luccioni ve Rougier [38], karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş yığma duvarların tekrarlı yükler ve diyagonal basınç yüklemesi altında düzlem içi mekanik davranışlarını incelemek için sayısal bir model sunmuşlardır. Tuğla, harç ve karbon lif takviyeli polimerin davranışını yansıtmak için anizotropik plastik hasar modeli kullanılmıştır. Sayısal çalışma sonucunda, karbon lif takviyeli polimer şeritlerle yapılan güçlendirmenin tekrarlı yükler altında duvar dayanımını ve sünekliğini, diyagonal basınç yüklemesi altında hem dayanımı hem de şekil değiştirme kapasitesini artırtıdığı görülmüştür. Ayrıca yapılan sayısal modelleme ve deney sonuçlarının uyumlu olduğu da görümüştür.

Mahmood ve Ingham [39], karbon lif takviyeli polimer ve cam lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş yığma duvarların diyagonal basınç yükleme testleri altında davranışlarını incelmişlerdir. Deneysel çalışmanın sonucunda, farklı şekillerde dikey, yatay ve diyagonal lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilen duvarların kesme dayanımında %325'e varan büyük bir artışın olduğu görülmüştür. Buna ek olarak, yatay lif takviyeli polimer şeritlerinin göçme modu üzerinde bir etkisi olmadığı fakat dikey ve diyagonal şeritlerin göçme modu üzerinde etkili olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca diyagonal şeritlerin kesme dayanımında ciddi bir artış sağladığı görülmüştür. karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin sıyrılması gözlenirken cam lif takviyeli polimer şeritlerinde sıyrılma gözlenmediği belirtilmiştir. Bu durumda cam lif takviyeli polimerin tuğla yüzeyiyle daha uyumlu

çalıştığı sonucuna varmışlardır. Son olarak, kesme dayanımındaki artış ile lif takviyeli polimer elastisite modülü ve güçlendirme oranı arasında doğrusal bir ilişki olduğu belirtilmiştir.

Marcari vd. [40], cam lif takviyeli polimer ve karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmiş yığma duvarların düşey ve yatay yük altında davranışlarını, kesme dayanımı, nihai yer değiştirme ve süneklik açısından deneysel olarak incelemişlerdir. Söz konusu deneysel çalışmada farklı güçlendirme şekilleri uygulanmıştır. Yapılan deney sonucunda yığma duvarların kesme dayanımlarının lif takviyeli polimer ile önemli oranda artığı görülmüştür. lif takviyeli polimer şeritlerinin duvarların düzlem içi kesme göçme modunu düzlem içi eğilme göçme modu olarak değiştirdiği açıkça görülmüştür. Düşük elastisite modülüne sahip cam lif takviyeli polimer şeritlerinin karbon lif takviyeli polimer şeritlerine göre duvar alt katmanı ile daha uyumlu olmasından dolayı daha büyük kesme dayanımı artışına sebep olduğu görülmüştür.

Martinelli vd. [41], karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş yığma duvarların davranışlarını düzlem içi tekrarlı yükler altında deneysel olarak incelemişlerdir. Güçlendirilen duvarlarda eşit miktarda farklı şemalarda lif takviyeli polimer şerit kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda, güçlendirilmemiş duvarın göçme modu dış köşelerden merkeze doğru gelişen diyagonal çatlaklarla karakterize edilirken karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilen duvarlarda güçlendirme şekline bakmasızın şerit sıyrılmasının göçme modu üzerine önemli etkisi olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, diyagonal şerit şeklinin yatay ve dikey güçlendirme şemalarına göre daha verimli olduğu görülmüştür. Ayrıca yatay, dikey ve diyagonal şeritlerin duvar kesme dayanımına katkısı analitik bağıntılarla irdelenmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Analitik irdeleme sonucunda bulunan diyagonal şerit kesme dayanımı katkısının deneysel sonuçlara göre daha düşük olduğu görülmüştür.

Milani ve Lourenco [42], lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş yığma duvarların düzlem içi davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Mikro modelleme yaklaşımı kullanılarak geliştirilen sayısal modeller ANSYS ve DIANA

yazılımları yardımıyla çözümlenmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile detaylı bir şekilde karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Morbin [43], çeşitli lif takviyeli polimerler ile güçlendirilmiş yığma duvarların düzlem içi ve düzlem dışı davranışlarını araştırmışlardır. Bu amaçla iki seri duvar üretilmiştir. İlk seride yığma duvarlar düzlem dışı yüklemeye maruz bırakılırken ikinci seride düzlem içi yüklemeye maruz bırakılmışlardır. Güçlendirme için şerit, çubuk ve kumaş lif takviyeli polimer kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, lif takviyeli polimer malzemleri kullanılarak uygulanan güçlendirme yönteminin hem düzlem dışı eğilme hem de düzlem içi kesme dayanımını artırdığı görülmüştür. Ayrıca çalışmanın sonucunda, güçlendirilmiş duvar davranışlarının tahmin edilmesi için analitik bağıntılar, lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş duvarların düzlem içi kesme ve düzlem dışı eğilme kapasitelerinin hesaplamasına yönelik geçici kılavuzlar da sunulmuştur.

Nardone vd. [44], donatısız yığma duvarların ve lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş donatısız yığma duvarların yük taşıma kapasitelerini analitik olarak incelemişlerdir. Analitik bağıntılar kullanılarak literatürde mevcut diyagonal lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmiş yığma duvarların yük taşıma kapasiteleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılımıştır.

Papanicolaou vd. [45], karbon lif takviyeli polimer, cam lif takviyeli polimer, bazalt lif takviyeli polimer ve polipropilen veya polyster tekstil takviyeli harç ağlarla güçlendirilmiş yığma duvarların düzlem içi ve düzlem dışı tekrarlı yükler altında davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Güçlendirme, duvarların her iki yüzüne bir veya iki katman olarak uygulanmıştır. Deney sonucuna göre lif takviyeli polimer ile güçlendirmenin polyster tekstil takviyeli harç ile güçlendirmeye göre daha etkili olduğu belirtilmiştir. Ayrıca lif takviyeli polimer ile güçlendirme ile düzlem içi ve düzlem dışı yük taşıma kapasitesinde %400'e varan artış görüldüğü vurgulanmıştır.

Prota vd. [46], düzlem içi tekrarlı yükler altında test edilen yatay ve diyagonal lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmiş yığma duvarların yük taşıma kapasitelerini analitik olarak değerlendirmişlerdir. Analitik bağıntılar kullanılarak elde edilen yük taşıma kapasiteleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak

doğrulanmıştır. Tasarım amaçlı kullanılmak üzere lif takviyeli polimerin göçme durumunda şekil değiştirme değerleri önerilmiştir.

Rahman ve Ueda [47], karbon lif takviyeli polimer ve polietilen tereftalat lif takviyeli polimer şerit ve kumaş ile güçlendirilen yığma duvarların sabit düşey yük ve kademeli artan yatay yük etkisinde düzlem içi kesme performansını araştırmışlardır. On iki adet yığma duvar farklı şemalarla güçlendirilmiştir. Diyagonal polietilen tereftalat lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş duvarlarda yük taşıma kapasitesinde diğer duvarlara göre daha fazla artış olduğu görülmüştür. Referans duvarların bir tanesinde diyagonal çatlaklarla karakterize edilen düzlem içi kesme göçme modu gözlenirken diğer referans duvarda topuk ezilmesi ile karakterize edilen düzlem içi eğilme göçme modu görülmüştür. lif takviyeli polimer ile güçlendiirlmiş duvarlarda ise göçme modu genellikle lif takviyeli polimer sıyrılması ile meydana gelmiştir. Polietilen tereftalat lif takviyeli polimer ile güçlendirilen duvarların karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş duvarlara göre daha sünek davrandıkları belirtilmiştir. Ayrıca deney sonuçlarına göre belirli miktarı lif takviyeli polimer kullanımından sonra duvarların kesme dayanımlarında nerdeyse değişiklik olmadığı vurgulanmıştır.

Roca ve Araiza [48], karbon lif takviyeli polimer, aramid lif takviyeli polimer ve mikrolamine ahşap şeritlerle güçlendirilen yığma prizmaların düzlem içi yatay+düşey yük ve düzlem içi tekrarlı yükler altında davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda güçlendirilmiş prizmaların yatay yük taşıma kapasitesinde güçlendirilmemiş prizmaya göre %160’ lık artış olduğu görülmüştür. Lif takviyeli polimer ile güçlendirmenin, prizmaların yük taşıma kapasitesi üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. Ayrıca lif takviyeli polimer ile güçlendirilen prizmalarda göçme modu lif takviyeli polimer sıyrılması ve bazı durumlarda lif takviyeli polimer kopması ile meydana gelmiştir. Bunlara ilave olarak lif takviyeli polimer şeritlerinin duvar kesme dayanımına katkısı analitik olarak incelenmiş ve analitik iceleme sonucunda elde edilen sonuçların deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Santa-Maria ve Alcaino [49], karbon lif takviyeli polimer ile onarılmış ve güçlendirilmiş yığma duvarların düzlem içi tekrarlı yükler altında davranışlarını

incelmişlerdir. Bir grup duvar maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra yatay ve diyagonal şerit şemaları ile onarılıp göçme yüküne kadar tekrarlı yükler altında test edilmişlerdir. Ayrıca diğer grup duvar hiç hasar almadan üretildikten hemen sonra güçlendirilip deneye tabi tutulmuşlardır. Deney sonucunda güçlendirilen ve onarılan duvarların aynı çatlak şekillerine sahip oldukları görülmüştür. İlaveten güçlendirilen duvarların kesme dayanımını analitik olarak inceledikleri bağıntıları onarılan duvarlar için kullanmışlardır ve yapılan analitik inceleme sonucunun deney sonucu ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Shabdin vd. [50], AR-Glass tekstil takviyeli harç ile güçlendirilmiş yığma duvarların diyagonal basınç altında davranışlarını incelemişlerdir. Deneye tabi tutulan yığma duvarlardan bir kısmı bir yüzde, bir kısmı ise her iki yüzde 15 ve 25 mm kalınlığında harç ile güçlendirilmişlerdir. Deney sonuçları tekstil takviyeli harcın her iki yüze uygulanması durumunda, donatısız yığma duvarlar için etkili bir güçlendirme yöntemi olduğunu göstermiştir. Diğer taraftan, tekstil takviyeli harcın bir yüze uygulanması durumunda düzlem dışı göçme modunun gözlendiği belirtilmiştir. Ayrıca uygulanan tekstil takviyeli harcın kalınlığı artıkça yük taşıma ve şekil değiştirme kapasitesinde artış olduğu vurgulanmıştır.

Simonic vd. [51], karbon lif takviyeli polimer şerit ve çimento harcına gömülü karbon lif takviyeli polimer ağ ile güçlendirilmiş yığma duvarların tekrarlı yükler altında yük taşıma kapasiteleri deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Yatay ve yatay+dikey şeritlerle güçlendirilmiş duvarlarda yük taşıma kapasitesinin karbon lif takviyeli polimer ağ ile güçlendirilmiş duvara göre daha fazla artış göstermiştir. Analitik bağıntılar kullanılarak elde edilen sonuçlar deney sonuçlarıyla uyum göstermiştir.

Stratford vd. [52], cam lif takviyeli polimer kumaş ile güçlendirilen yığma duvarların düşey yük ve düzlem içi yatay yük etkisinde davranışlarını araştırmışlardır. Üretilen tuğla ve beton blok duvarların uygulamada iki yüzü güçlendirmenin mümkün olmayacağını düşünerek sadece bir yüzü güçlendirilmiştir. Sonuçlar, cam lif takviyeli polimer kumaş ile güçlendirilen duvarların düzlem içi kesme dayanımında önemli bir artış elde edildiğini göstermiştir. Güçlendirilmiş duvarlarda göçme modu cam lif takviyeli polimer

sıyrılması ile meydana gelirken, referans duvarlarda diyagonal kesme çatlağı ile oluştuğu görülmüştür. Güçlendirilmiş duvarlardaki söz konusu göçme modunun lif takviyeli polimer ankrajıyla ortadan kaldırılabileceğine değinilmiştir. Ayrıca yığma duvarın ve lif takviyeli polimerin kesme dayanımını analitik bağıntılarla da incelenmiştir.

Triantafillou [53], lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş beton, yığma ve ahşap elemanların kesme dayanımına lif takviyeli polimerin katkısı için analitik modeller önermişlerdir. Beton ve yığma durumunda lif takviyeli polimer şerit veya kumaş ile güçlendirilmiş elemanların tasarımının lif takviyeli polimer elastisite modülü ve alanın etkili olduğu klasik kafes kiriş analojisine dayalı yapılabileceği belirtilmiş ve bir analitik bağıntı önerilmiştir.

Valluzi vd. [54], karbon lif takviyeli polimer, cam lif takviyeli polimer ve polivinilakol lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş yığma prizmaların diyagonal basınç altında davranışlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Söz konusu yığma prizmalar farklı şekilde tek yüz ve iki yüz olacak şekilde güçlendirilmişlerdir. Deney sonuçları iki yüzü güçlendirilen prizmaların daha sünek davrandığını göstermiştir. Ayrıca diyagonal şeritlerle güçlendirilen duvarların diğer güçlendirme şekillerine göre (dikey, yatay ve diyagonal şeritler) yük taşıma kapasitesi ve göçme modu üzerinde daha etkin olduğunu belirtmişlerdir. Daha düşük elastisite modülüne sahip lif takviyeli polimer ile güçlendirilen duvarlarda yük taşıma kapasitesinin daha fazla arttığı da vurgulanmıştır. Bunlara ek olarak, referans ve güçlendirilmiş duvarların kesme dayanımını analitik bağıntılar ile belirleyip deney sonuçlarıyla karşılaştırılmışlardır.

Zhou vd. [55], bazalt lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmiş yığma duvarların düzlem içi davranışını araştırmışlardır. Yapılan çalışmada şerit kalınlığı, şerit genişliği ve farklı seviyelerde düşey yük değeri gibi parametreler göz önünde bulundurulmuştur. Deneysel çalışma, güçlendirilen duvarların referans duvara göre yük taşıma kapasitesinde artış olduğunu göstermiştir. Ayrıca, referans duvarda etkin göçme modu düzlem içi kesme iken lif takviyeli polimer takviyesi ile etkin göçme modunun düzlem içi eğilme olarak değiştiği öne

sürülmüştür. Son olarak lif takviyeli polimer ile güçlendirilen yığma duvarların kesme dayanımını belirlemek için bir analitik bağıntı önermişlerdir.

Zhuge [56], lif takviyeli polimer ile güçlendirilen yığma duvarlar ile ilgili teknik literatürde yapılan çalışmaları geniş bir şekilde ele alıp değerlendirmiştir. Bu alanda mevcut çalışmalarda uygulanan güçlendirme tekniklerinin etkinlikleri değerlendirilmiş olup eksikler de belirtilmiştir. Ayrıca söz konusu çalışmalarda deneysel olarak elde edilen kesme dayanımları analitik olarak irdelenmiştir.

Ediz [57] yüksek lisans tez çalışmasında, tuğla duvarların kendiliğinden yerleşen beton ve standart beton ile güçlendirildikten sonra diyagonal basınç yüklemesi altında davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda, kendiliğinden yerleşen beton ile güçlendirilen duvarlarda standart beton ile güçlendirilen duvarlara oranla yük taşıma kapasitesinde ve yer değiştirme kapasitesinde yüksek oranlarda artış olduğu görülmüştür. Ayrıca, çift yüzü güçlendirilen duvarların ortalama %86 oranında daha fazla yatay yük taşıdığı belirtilmiştir.

Çöğürcü [58] doktora tez çalışmasında, yatay derzleri epoksi reçineli lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş yığma duvarların düzlem dışı tekrarlı yükler altında davranışlarını analitik ve deneysel olarak araştırmıştır. Deney sonuçları uygulanan güçlendirme tekniği ile duvarın sismik dayanım performansının yaklaşık üç kat arttığını göstermiştir.

Özsaraç [59] yüksek lisans tez çalışmasında, cam lif takviyeli polimer şerit ve kumaş ile güçlendirilen model tuğla duvarların diyagonal basınç yüklemesi altında davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Yapılan deneyler sonucunda değerlendirilen verilere göre cam lif takviyeli polimer kumaş ile güçlendirilen duvarların cam lif takviyeli polimer şerit ile güçlendirilen duvarlara oranla daha yüksek oranda yük taşıdığı görülmüştür. İlaveten bütün duvarların sünekliklerinde kayda değer ölçüde artış gözlenmiştir.

Jafarov [60] doktora tez çalışmasında, doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemini kullanarak lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş yığma duvarların düşey ve yatay yükler altında elasto-plastik analizlerini gerçekleştirmiştir. Bu amaçla, literatürde mevcut yalın, boşluklu ve lif takviyeli polimer ile

güçlendirilmiş deneysel çalışmadan alınan toplamda on yedi adet duvar modellenmiştir. Söz konusu tez çalışmasının yapıldığı tarih itibari ile aynı modelleme yaklaşımının üç farklı duvar tipi için geliştirilerek uygulandığı tek örnektir. Yapılan çalışma ile elde edilen sayısal model sonuçlarının deney sonuçlarıyla benzer olduğu görülmüştür.

Çakıroğlu [61] yüksek lisans tez çalışmasında, çelik hasır üzerine polipropilen lifli kuru karışım püskürtme beton uygulaması ile güçlendirilmiş yığma duvarların düzlem dışı tekrarlı yükler altında davranışlarını ve performanslarını deneysel olarak değerlendirmiştir. Sonuç olarak, güçlendirilmiş duvarlarda yük taşıma ve enerji tüketme kapasitesinin söz konusu güçlendirme tekniği ile arttığı görülmüştür.

Güneş [62] yüksek lisans tez çalışmasında, plastik kompozit donatı ile güçlendirilen yığma duvarların diyagonal basınç yüklemesi altında davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Deneysel çalışma ile maksimum yük taşıma kapasitesi, enerji yutma kapasitesi, kırılma anında yer değiştirme ve kayma dayanımlarını değerlendirmiştir. Plastik kompozit donatının yığma yapıları güçlendirmede olumlu sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Samberou [63] doktora tez çalışmasında, tekrarlı yükler altında yığma duvarların davranışlarını ve bu etkilere karşı ne şekilde daha dayanıklı hale getirileceğini incelemiştir. Bu amaçla bir takım deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucu hasar alan duvarların mevcut çatlakları epoksi reçineleriyle doldurulduktan sonra lif takviyeli polimerler ile güçlendirilip tekrar yüklemeye maruz bırakılmışlardır. Deney sonucunda, uygulanan güçlendirme tekniği ile duvarların yük taşıma kapasitelerinde artış olduğu görülmüştür. Bunlara ek olarak, deney duvarlarının sonlu eleman modelleri basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğiyle ABAQUS yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Elde edilen sayısal analiz sonuçları deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

1.1.2 Donatısız Boşluklu Yığma Duvarların Güçlendirilmesi ile İlgili Literatür Araştırması

Corbi [64], dikey, yatay ve dikey+yatay karbon lif takviyeli polimer ve cam lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş boşluklu yığma duvarların düzlem içi tekrarlı yükler altında davranışlarını incelemiştir. Deney sonuçları güçlendirilen duvarlarda referans duvara göre daha az hasar oluştuğunu ve yük taşıma kapasitesinde artış olduğunu göstermiştir.

Drougkas vd. [65], çelik çubuklarla güçlendirilmiş boşluklu yığma duvarların düzlem içi tekrarlı yükler altında davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, uygulanabilirliği kolay olan güçlendirme tekniğinin yük taşıma kapasitesinde çok az bir artış sağladığı görülmüştür. Deneylerde, hem referans hem de güçlendirilmiş duvarlarda çatlakların genellikle boşluk çevresinde yoğunlaştığı görülmüştür. Ancak güçlendirilmiş duvarlarda çatlak genişliklerinin, referans duvarı çatlak genişliklerine oranla çok daha az olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, asimetrik güçlendirmeden dolayı güçlendirilen duvarlarda düzlem dışı davranış da gözlenmiştir. Bunlara ek olarak, deney duvarları DIANA yazılımı kullanılarak sayısal olarak modellenmiş ve sonuçlar deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Foraboschi [66], karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle onarılmış boşluklu yığma duvarların sabit düşey yük ve düzlem içi yatay yük altında davranışlarını incelemiştir. Duvarlarda karbon lif takviyeli polimer şeritleri, yüklemeden sonra oluşan çatlakların yerine göre çatlaklara dik şekilde yerleştirilmiştir. Yükleme lif takviyeli polimer sıyrılıncaya kadar devam etmiştir. Deneylerde, onarılmış duvarlarda yük taşıma kapasitesinde referans duvarına göre artış gözlendiği belirtilmiştir.

Foster vd. [67], cam lif takviyeli polimer ağ ve karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmiş boşluklu yığma duvarların tekrarlı yükler altında davranışlarını araştırmışlardır. Güçlendirilen duvarlarda referans duvara oranla enerji tüketme kapasitesinde %700' e varan artış görülmüştür.

Grande vd. [68], lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş yığma duvarların sayısal modellemeleri üzerinde çalışmışlardır. Özellikle lif takviyeli polimer ve duvar

arasındaki karmaşık mekanizmayı modellere yansıtmışlardır. Sayısal modellemeler DIANA yazılımı kullanılarak yapılmış, güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş yığma duvarlarda modelleme tekniği olarak mikro ve makro yaklaşımları kullanılmıştır. Özellikle mikro modelleme sonucu lif takviyeli polimer ve duvar arasındaki davranışın daha iyi yansıtılabildiği ve lif takviyeli polimer şeritlerinin uç kısmının mekanik olarak duvara ankre edilmesinin yük taşıma kapasitesi üzerinde çok etkili olduğu vurgulanmıştır.

Kamrava vd. [69], çelik lif takviyeli beton kaplama kullanılarak güçlendirilen boşluklu donatısız yığma duvarların düzlem içi davranışını deneysel olarak araştırmışlardır. Bu amaçla, farklı şemalarla güçlendirilen duvarlar düşey yük ve yatay yük altında test edilmişlerdir. Deneysel çalışmanın sonuçları, iki tarafı çelik lif takviyeli beton ile kaplanan duvarların yalnızca düzlem içi yük taşıma kapasitesinde önemli bir artışa yol açmadığını aynı zamanda doğrusal olmayan şekil değiştirme kapasitesinde de ciddi bir artışın olduğunu göstermiştir. Ayrıca çelik lif takviyeli beton kaplamanın duvar yük taşıma kapasitesine katkısı analitik bağıntılarla irdelenip deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Analitik irdeleme sonuçları ve deneysel çalışma sonuçları arasındaki uyum, önerilen bağıntının güvenirliliğini doğrulamıştır.

Li vd. [70], harç derzleri boyunca önceden açılmış oyuklara uygun macun ile yerleştirilen cam lif takviyeli polimer çubuklarıyla güçlendirilen boşluklu yığma duvarların düzlem içi tekrarlı yükler altında davranışlarını incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarda, uygulanan güçlendirme tekniği ile duvar yük taşıma kapasitesinde artış olduğu gözlenmiştir.

Moon vd. [71], cam lif takviyeli polimer kumaş, çubuk ve şeritlerin kullanıldığı farklı şemalarla güçlendirilmiş tam ölçekli boşluklu donatısız yığma yapının düzlem içi tekrarlı yükler altında davranışını incelemişlerdir. Deney sonuçları, uygulanan güçlendirme tekniklerinin duvar yük taşıma kapasitesini artırdığını göstermiştir. Ayrıca diyagonal cam lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmiş duvarda şeritlerin kademeli olarak sıyrılması duvarın daha sünek davranmasını sağlamıştır. Cam lif takviyeli polimer kumaş ile güçlendirilmiş duvarın diğer duvarlara oranla daha fazla yük taşıdığı görülmüştür.

Proença vd. [72], çelik profillerle güçlendirilmiş boşluklu yığma duvarların davranışlarını düzlem içi tekrarlı yükler atında deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar, güçlendirme tekniğinin, yük taşıma kapasitesi ve düzlem içi şekil değiştirme kapasitesi yanı sıra, enerji tüketme kapasitesi açısından önemli bir artış sağladığını göstermiştir. Ayrıca, test edilen duvarların doğrusal olmayan sayısal modellemeleri DIANA 9.2 yazılımı kullanılarak geliştirilmiş ve kalibre edilerek parametrik çalışmaların yapılmasına olanak sağlanmıştır.

Umair Saleem vd. [73], cam lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmiş ¼ ölçekli tek katlı boşluklu yığma binanın düzlemiçi tekrarlı yükler altında davranışını incelemişlerdir. Cam lif takviyeli polimerin etkinliğini araştırmak için farklı miktarlarda karbon lif takviyeli polimer, aramid lif takviyeli polimer ve cam lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirmiş yığma duvarlar diyagonal basınç yüklemesine tabi tutulmuşlardır. Diyagonal basınç yüklemesi ve tekrarlı yükler altında yapılan deney sonuçları, lif takviyeli polimer uygulamasıyla donatısız yığma yapıların yatay yükler altında davranışlarının iyileştiğini ve yük taşıma kapasitelerinin arttığını göstermiştir.

Sun vd. [74], karbon lif takviyeli polimer ve püskürtülmüş cam lif takviyeli polimer şertileriyle güçlendirilmiş boşluklu yığma duvarların düzlem içi tekrarlı yükler altında davranışlarını incelemişlerdir. Deneysel çalışma sonucunda, cam lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmiş duvarın sismik performansının karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmiş duvara göre çok daha iyi olduğunu göstermiştir.

Zhou vd. [75], bazalt lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş boşluklu yığma duvarların düzlem içi tekrarlı yükler altında davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmanın sonuçları bazalt lif takviyeli polimer güçlendirilmesi ile duvarlarda yük taşıma kapasitesinin arttığını göstermiştir. Ayrıca, duvarların göçme modunun bazalt lif takviyeli polimer kullanılmasıyla baskın düzlem içi kesme modundan baskın düzlem içi eğilme moduna doğru kaydığı ve duvarların bazalt lif takviyeli polimer şeritlerinin sıyrılması ve kopmasıyla göçtüğü gözlenmiştir. Ayrıca güçlendirilmiş duvarların nihai yük taşıma kapasitesi için analitik bir bağıntı da önerilmiştir. Önerilen bağıntı ile elde

edilen yük taşıma kapasitelerinin deney sonuçları ile uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş boşluklu donatısız yığma duvarların düşey ve kademeli artan düzlem içi yatay yükler altındaki mekanik davranışını incelemektir. Eskiye nazaran günümüzde daha az tercih edilse de, yerel malzemelerden kolaylıkla yapılabilir ve ekonomik olması sebebiyle, yığma yapıların kullanımı devam edeceğinden, bu yapıların mümkün mertebe deprem yükleri altında sergileyeceği karmaşık davranışlarının bilinmesi önem arz etmektedir. Yığma yapıların ana taşıyıcısı olan yığma duvarlar, yığma birim gibi esas taşıyıcı malzemeler ve bu malzemeler arasında bağlantı ve yük aktarımını sağlayan bağlayıcı malzemeden oluşmaktadır. Genellikle bağlayıcı olarak kullanılan harç ve yığma birimin basınç dayanımları yüksek ve çekme dayanımları düşüktür. Bu nedenle, deprem yüklerinden dolayı meydana gelen çekme gerilmelerine karşı büyük bir zafiyet söz konusudur. Dolayısıyla, çekme gerilmelerini karşılayamayan duvarlarda çekme çatlakları, ayrılmalar ve dağılmalar meydana gelir. Ayrıca kapı ve pencere boşlukları bulunan duvarlarda, söz konusu çatlakların boşluk çevresinde yoğunlaşacağı aşikardır. Yığma yapılarda deprem etkisinde oluşan bu çatlakların giderilmesi için duvarların etkili bir teknik ile güçlendirilmesi gereklidir.

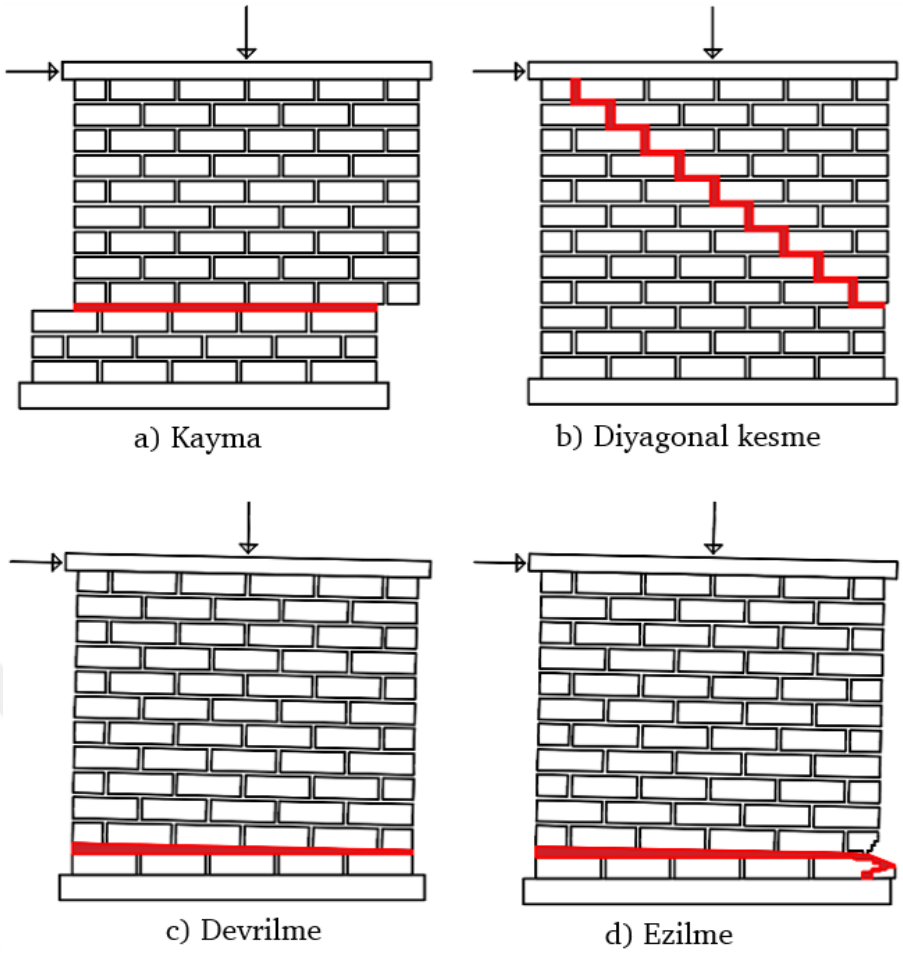
Bu tez çalışmasında, teknik literatürde yer alan güçlendirme yöntemleri göz önünde bulundurularak, uygulama kolaylığı, kesit kalınlığının az olmasından ötürü mevcut duvara ek ağırlık getirmemesi, korozyona karşı direnci, ve tuğla ile aderansının iyi olması gibi unsurlar dikkate alınarak, karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirmenin, boşluklu donatısız yığma duvarların düzlem içi davranışı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Daha sonra, deney duvarlarına ait sayısal modeller, sonlu elemanlar yöntemiyle çalışan ANSYS 2021-R2 [1] yazılımı yardımıyla oluşturulduktan sonra üç boyutlu doğrusal olmayan çözümlemeler yapılmıştır. Uygulanan güçlendirme tekniğinin, duvarın davranışına (yük-yer değiştirme ilişkisi, gerilme yığılmaları ve şekil değiştirmeler vb.) olan katkısı deneysel sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ayrıca,

karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin duvarın toplam kesme dayanımına katkısını belirlemek için yeni bir analitik model önerilmiş ve elde edilen veriler deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak modelin doğruluğu tartışılmıştır.

1.3 Orjinal Katkı

Donatısız yığma yapılar, dünyanın pekçok bölgesinde ve Türkiye'nin daha çok kırsal kesimlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yığma yapılar, düşey yüklere karşı yeterli dayanımı gösterebilmelerine rağmen deprem tipi yatay kuvvetlere maruz kaldıklarında gerekli ve yeterli performansı gösterememektedirler. Türkiye'nin depremselliğinin yüksek bir bölgede yer alması ve ekonomik koşullardan ötürü yığma yapı kullanımı devam edeceğinden, mevcut yığma yapı stoğunun iyileştirilmesi için, bu yapıların olası bir deprem öncesi, uygun ve etkili bir güçlendirme yöntemi kullanılarak güçlendirilmesi önem arz etmektedir. Yığma yapılarda ana taşıyıcıların duvarlar olması, duvarlarda oluşan tüm hasarın doğrudan taşıyıcı sistemi etkileyeceği aşikardır. Literatürde yapılan çalışmaların büyük bir bölümü bu sebepten ötürü, taşıyıcı yığma duvarların onarım ve güçlendirme yöntemlerine odaklanmıştır. Bu araştırmalar doğrultusunda, taşıyıcı yığma duvarların güçlendirme yöntemleri; geleneksel yöntemlerle güçlendirme yöntemi olan harç enjeksiyonu, püskürtme beton, çelik lama ile güçlendirme ve yenilikçi güçlendirme yöntemi olan, lif takviyeli polimer ile güçlendirilme şeklinde özetlenebilir. Lif takviyeli polimer, uygulama kolaylığı, yatay yüklere karşı etkinliği, kesit kalınlığının az olması, korozyona karşı dayanıklılığı, tuğla ile aderansının iyi olması ve çekme gerilmelerini karşılaması gibi unsurlar nedeniyle yığma yapılarda geleneksel güçlendirme yöntemlerine oranla, daha çok tercih edilmektedir.

Yığma duvarlarda uygulanacak güçlendirme yöntemi, duvarın maruz kalacağı yükler altında oluşacak hasar ve göçme şekline ugun olarak seçilmelidir. Donatısız yığma duvarların düzlem içi yükler altında çeşitli göçme durumları söz konusudur; harç birleşiminde yatay çatlaklar nedeniyle yanal kayma (Şekil 1.4a), duvar boyunca diyagonal çatlaklar nedeniyle diyagonal kesme (Şekil 1.4b), yetersiz çekme dayanımı nedeniyle devrilme ve basınç kuvveti nedeniyle ezilme (Şekil 1.4c, 1.4d) göçme durumları meydana gelecektir.



Şekil 1.4 Donatısız yığma duvarlarda düzlem içi göçme durumları

Duvarda düzlem içi yüklemeden dolayı meydana gelen göçme durumlarından kesme ve devrilme/ezilme göçme durumlarını engelemek için lif takviyeli polimer ile güçlendirme şerit, kumaş ve çubuk şeklinde olmak üzere üç farklı şekilde uygulanmaktadır. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmada, deney duvarlarının her iki yüzü de karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmiştir. Söz konusu karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin; kalınlığı ve etkili yüzey alanının bu tür duvarların kesme dayanımına olan etkisi de bu tez konusunun kapsamındadır.

Ayrıca deneysel çalışmaya ek olarak karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmiş duvarların simülasyonu için makro model yaklaşımı ile üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile çözümlemeler de gerçekleştirilmiştir. Günümüzde lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş yığma duvarlar konusunda birçok deneysel çalışma olmasına rağmen, lif takviyeli

polimerin duvarın kesme dayanımına katkısını irdeleyen analitik çalışmalar sınırlı düzeyde kalmıştır. Bu tez çalışması kapsamında, karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin, güçlendirilen yığma duvarların kesme dayanıma katkısını belirlemek için yeni bir analitik model önerilmiştir.

Yığma duvarların güçlendirmesine yönelik hemen hemen tüm güncel araştırmalar ve uygulama örnekleri Bölüm 1.1'de sunulmuştur. Sözü edilen araştırmaların çok azında kapı veya pencere boşluğuna sahip donatısız yığma duvarların lif takviyeli polimer ile güçlendirilmesi konu edilmiştir. Oysaki deprem yüklerinden dolayı açığa çıkan çekme gerilmeleri genellikle pencere ve kapı boşlukları çevresindeki bölümlerde yoğunlaşmaktadır. Özellikle ulusal alanda donatısız boşluklu yığma duvarlar için güçlendirme yöntemleri ile ilgili deneysel çalışmalar çok sınırlı düzeydedir. Ayrıca, teknik literatürde genellikle basınç dayanımları açısından güçlü tuğla-zayıf harç veya zayıf tuğla-güçlü harç durumlarına sahip duvarlar incelenmiş ve davranışları düzlem içi ve düzlem dışı yükler etkisinde araştırılmıştır. Tuğla ve harç dayanımlarının birbirine çok yakın olması durumu üzerine neredeyse yok denecek kadar az çalışma yapılmıştır. Buradan yola çıkılarak bu tez çalışmasında, eksenel basınç ve kesme etkisinde, harç-tuğla dayanımı birbirine çok yakın olan, karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş donatısız boşluklu yığma duvarların düzlem içi davranışları deneysel, sayısal ve analitik olarak incelenmiştir.

Yukarıdaki paragraflarda değinildiği üzere, bu tez çalışmasında özellikle Türkiye'de daha önce yapılmış çalışmaların eksik kalan kısımlarını tamamlayabilmek üzere lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş boşluklu yığma duvarların düzlem içi davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. Bu tez çalışması, Türkiye'de ve dünyada İnşaat Mühendisliği alanında yığma yapıların güçlendirilmesini konu alan çalışmaların genel çerçevesinin görülmesini sağlayacaktır. Ayrıca, tez kapsamında önerilen güçlendirme tekniğinin performansı hakkında bilgi vermek ve literatüre katkı sağlamak açısından yararlı olacağı düşünülmektedir.

2
YIĞMA YAPILAR

Yığma yapılar, çok eski zamanlardan bu yana insanoğlunun, en önemli gereksinimi olan barınma ihtiyacını karşılamak için oluşturdukları yapı türlerindendir. İlk yığma yapı örnekleri, büyük taşların herhangi bir bağlayıcı malzeme kullanılmadan üst üste bindirilmesiyle (kuru birleşim) ortaya çıkmıştır. Ancak bu yapılar yaşanan doğal felaketlerden dolayı ağır hasar almış veya tamamen yıkılmışlardır. Bu nedenle, yapay ya da doğal birimlerin bir bağlayıcı görevi gören harç ile birleşmesiyle oluşturulan, düşey ve yatay yüklere karşı taşıyıcı özellik gösteren donatılı/donatısız yığma yapılar inşa edilmiştir (Şekil 2.1).



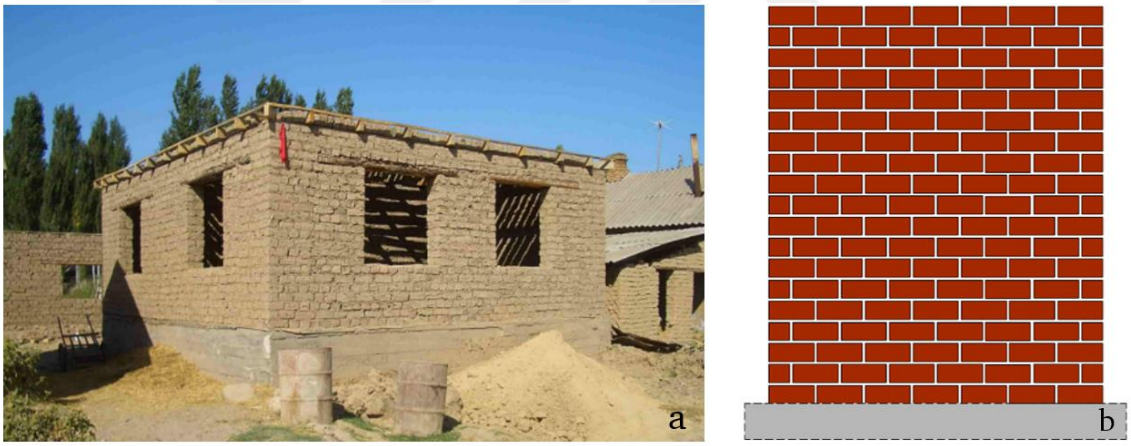
Şekil 2.1 a)Varda köprüsü [76], b)Lala Mustafa Paşa cami [77] ve c)Diyarbakır surları [78]

2.1 Yığma Yapıların Sınıflandırılması

Yığma yapılar yapısal sistem olarak, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018'e göre dörde ayrılmaktadır. Bunlar donatısız, donatılı, kuşatılmış ve donatılı panel sistemli yapılardır [79]. İleriki paragraflarda anılan yığma yapılar ayrı ayrı irdelenmiştir.

2.1.1 Donatısız Yığma Yapılar

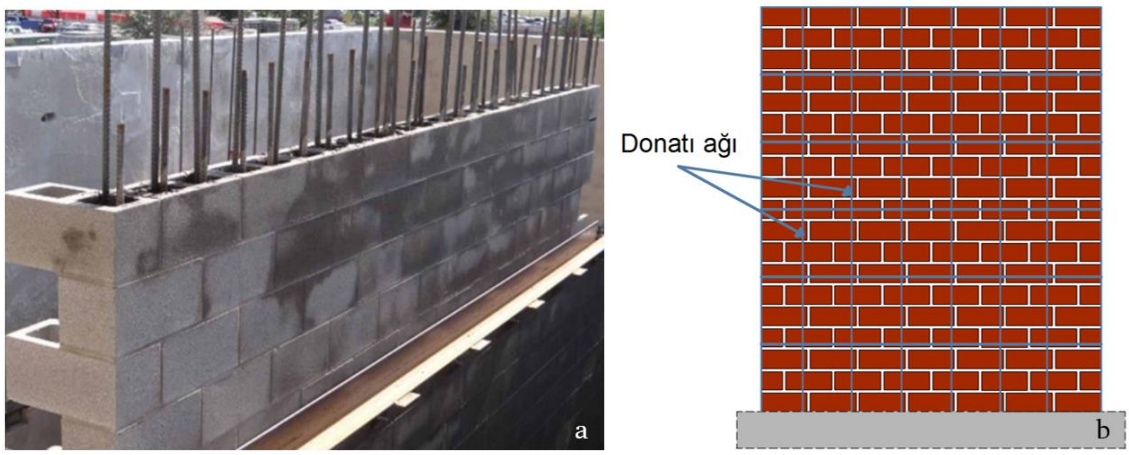
Donatısız yığma yapı, taşıyıcı duvarları donatı kullanılmadan sadece kargir birim ve harç kullanılarak oluşturulan süneklik düzeyi sınırlı yapıları kapsamaktadır (Şekil 2.2) [79]. Bu tip yapıların ülkemizin özellikle kırsal kesimlerinde mühendislik hizmeti görmeden yapıldığı bilinmektedir. Alçak yapıların inşasında kullanılan bir yöntem olarak bugüne kadar kullanılmıştır. Donatısız yığma yapılar çekme kuvvetlerine ve yatay yüklere karşı diğer yığma yapılara nazaran daha dayanıksızdırlar.



Şekil 2.2 a) Donatısız yığma yapı örneği [80] b) Donatısız yığma duvar

2.1.2 Donatılı Yığma Yapılar

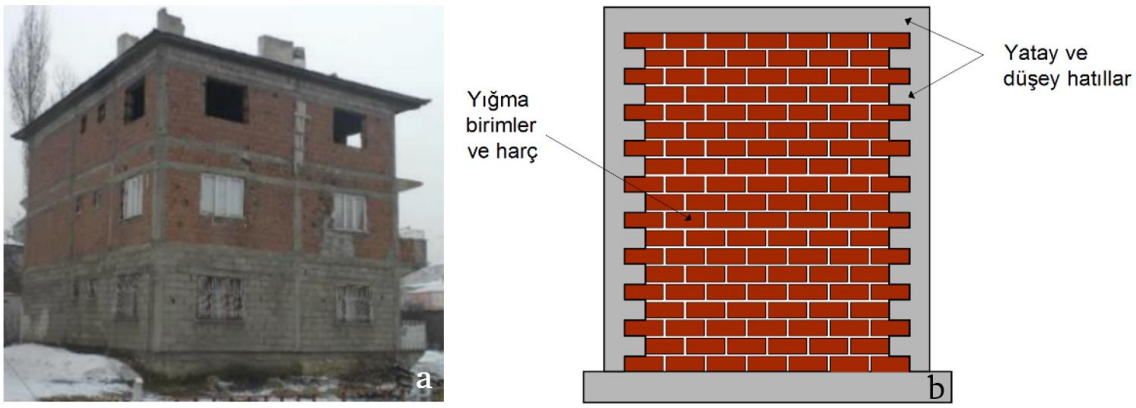
Donatılı yığma yapılar, taşıyıcı duvarlara yönetmeliklerde verilen kurallara uygun olacak şekilde donatı yerleştirilmesi ile elde edilen süneklik düzeyi yüksek yapıları kapsar (Şekil 2.3) [79]. Çerçeveli-donatılı, donatılı-boşluklu blok, donatılı-beton dolgulu, donatılı kenetli gibi farklı uygulama ve yapım teknikleri kullanılarak yapılan donatılı yığma yapılar malzeme ve sistem davranışı açısından diğer yığma yapı türlerine göre daha iyi süneklik ve dayanıma sahiptir.



Şekil 2.3 a) Donatılı yığma yapı örneği [80] b) Donatılı yığma duvar

2.1.3 Kuşatılmış Yığma Yapılar

Kuşatılmış yığma yapı, birbirlerine ve döşemeye betonarme olarak bağlı, taşıyıcı duvarların örülmesinden sonra ve bunları kalıp olarak kullanarak hazırlanan yatay ve düşey hatılların, yine yönetmeliklerde verilen kurallara uygun olacak şekilde teşkil edilmesi ile oluşturulan süneklik düzeyi sınırlı yapıları kapsar (Şekil 2.4) [79]. Kuşatılmış yığma yapılar betonarme düşey ve yatay elemanlarla bağ artması, duvarların dayanımında, sünekliğinde ve deprem kuvvetleri altında dayanımının artması bakımından donatısız yığma yapılara göre daha avantajlıdır.



Şekil 2.4 a) Kuşatılmış yığma yapı örneği [80] b) Kuşatılmış yığma duvar

2.1.4 Donatılı Panel Sistemli Yığma Yapılar

Donatılı panel sistemli yığma yapı, önüretimli donatılı gazbeton paneller arası yivlerde bulunan donatıların temele ve kat seviyelerindeki betonarme hatıllara bağlandığı ve düşey gazbeton panellerin yan yana getirilerek taşıyıcı duvarları teşkil ettiği, yine donatılı gazbeton panellerin betonarme hatıllara bağlanarak

döşemeleri meydana getirdiği süneklik düzeyi yüksek yapıları kapsar (Şekil 2.5) [79].



Şekil 2.5 Donatılı panel sistemli yığma yapı örneği [80]

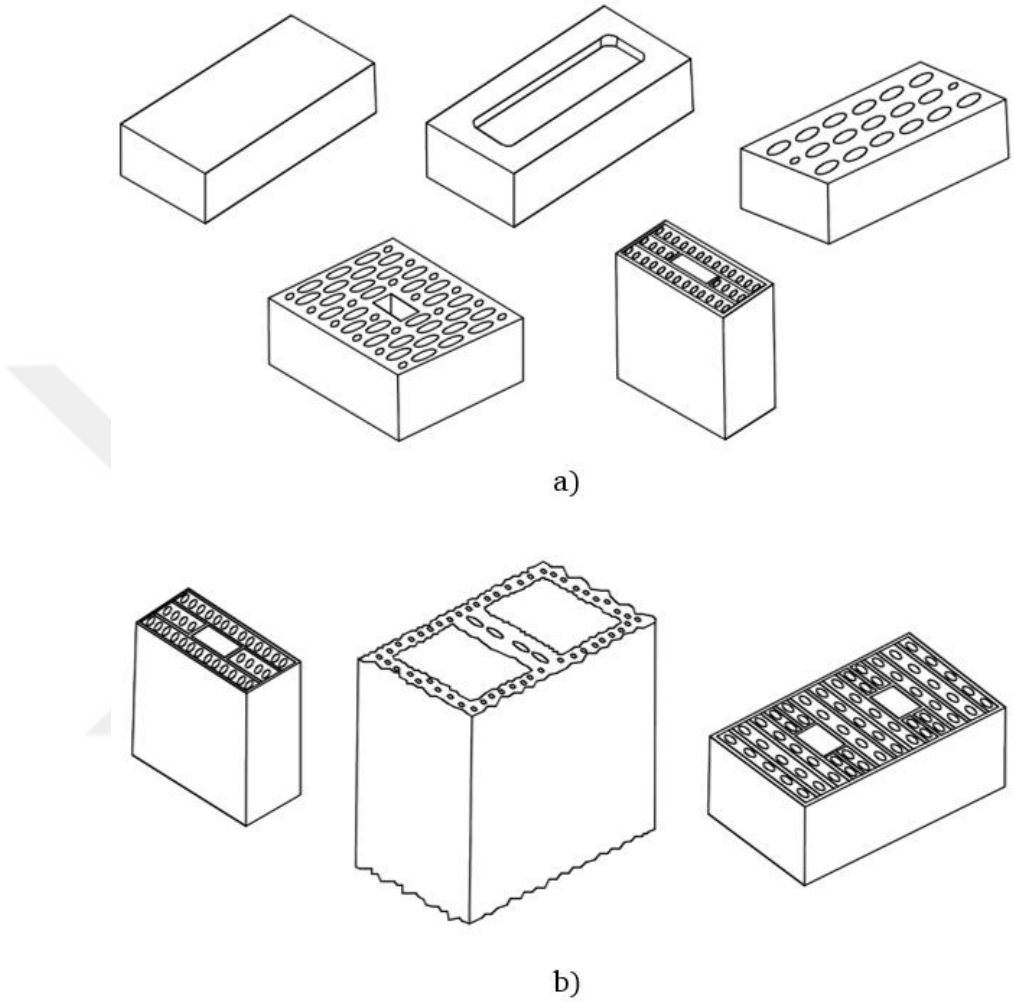
2.2 Yığma Yapı Malzemeleri

Yığma yapıların inşasında yüzlerce yıl öncesinden günümüze kadar pek çok yapı malzemesi kullanılmıştır. Nil ve Mezopotamya vadilerinde ilk medeniyetler kurulduğunda, yapı malzemesi olarak alüvyon birikintilerden oluşmuş tuğlalar; dağların ve kayalıkların çevresinde medeniyetlerin var olduğu yerlerde taşlar; Kuzey Kutbu bölgelerinde ise iglo yapımında buz blokları yapı malzemesi olarak kullanılmıştır [81]. Günümüzde yaygın olarak kullanılan yığma yapı malzemeleri harç, taş, tuğla ve beton bloklardır.

2.2.1 Tuğla

İşlenmiş yapı malzemelerinin en eskisi olan tuğla, genellikle ahşap ve taşın elde edilmesinin zor olduğu alanlarda, sıklıkla kullanılan yapı malzemesidir. Yığma yapılarda kullanılan başlıca iki tür tuğla vardır: harman tuğlası ve fabrika tuğlası. Genellikle kil esaslı toprağın saman veya hayvan gübresiyle iyice harmanlanıp su ile karıştırıldıktan sonra elle kalıplanıp güneşte kurutulduktan sonra harman yerinde ocaklarda pişirilmesi ile harman tuğlası; makinelerle şekillendirildikten sonra kurutulup fırınlarda pişirilmesi ile fabrika tuğlası elde edilir. Tuğlada aranan en önemli özellik genellikle basınç dayanımıdır. Bu özellik tuğlanın yapıldığı toprağın cinsine, porozitesine, pişirilme ısısına, üretim biçimine, delikli tuğla ise

deliklerin miktar ve konumuna, kenarların biçimine ve yükleme doğrultusuna bağlı olarak değişmektedir. TS EN 771-1 [82] standardına göre taşıyıcı (HD) ve taşıyıcı olmayan (LD) tuğlalar olarak sınıflandırılmış tuğlalar sırasıyla Şekil 2.6a ve Şekil 2.6b'de verilmiştir.



Şekil 2.6 Tuğla örnekleri a) Taşıyıcı b) Taşıyıcı olmayan

2.2.2 Harç

Harç, ilk zamanlarda çatlakları doldurmak ve yığma yapıların sıvaları (düzgün bir yüzey sağlamak) için kullanılmış olsa bile zamanla yığma duvar yapımında kullanılan bağlayıcı özelliği olan bir yapı malzemesidir. Çimento, kireç, kum ve suyun belirli oranlarda karıştırılması ile harç karışımı elde edilmektedir. Harcın esas amacı, yığma yapı bloklarını birbirlerine bağlayarak dağılmamasını, dış yüklere karşı bir bütün olarak çalışmasını sağlamaktır. Yığma yapılarda esas taşıyıcı görevi gören yığma duvarların maruz kaldıkları yükler altında davranışı,

kullanılan harcın özelliklerine göre büyük farklılıklar göstermektedir [19]. Harcın özelliği, bileşenlerin özellikleri ve oranlarına göre değişmektedir. TS EN 998-2 [83] standardına göre harcın basınç dayanımına bağlı olarak sınıfları Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Harcın basınç dayanımına göre sınıfları

Sınıf	M1	M2.5	M5	M10	M15	M20	Md
Basınç Dayanımı (N/mm^2)	1	2.5	5	10	15	20	d*

* Üretici tarafından beyan edilen 25 N/mm^2'den daha büyük bir basınç dayanımıdır.

2.2.3 Taş

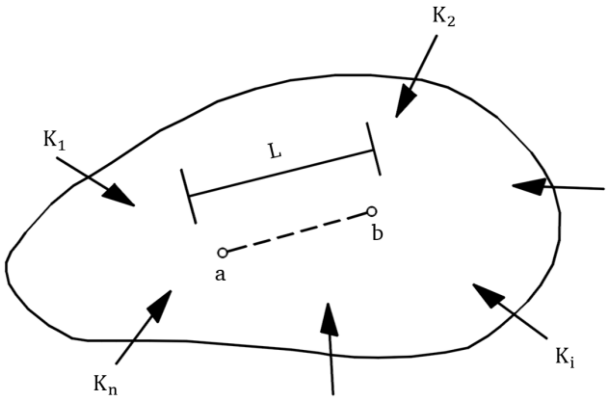
Doğadan hazır olarak temin edilen inorganik esaslı, kütlelerden kopan veya koparılan taşlar, yapıların inşasında kullanılan sert ve dayanımlı yapı malzemesidir. Yığma yapılar doğal taşların harçsız olarak üst üste konulup örülmesi ile kullanılmış olup günümüzde kullanımları hala devam etmektedir. Taş birimlerin basınç dayanımının yüksek ve çekme dayanımının düşük olmasından dolayı zamanla araları toprak veya harçla doldurularak örülmüşlerdir. Yapı taşlarından en iyi şekilde verim sağlanabilmesi için taşların homojen, sert, damarsız, çatlaksız olması gerekmektedir.

2.2.4 Malzeme Davranışı

Şekil 2.7'de görülen katı cisim, üzerine etkiyen $K_1, K_2, \dots, K_i, K_n$ dış kuvvetleri ile dengededir. Bu kuvvetler, yük parametresi adı verilen bir $\mathcal{K}$ parametresi ile orantılı olarak değişmektedir. Her dış kuvvete ait orantı sabitleri sırasıyla k_1,k_2,...k_i,...k_n dir. O halde yük parametresi bilinirse dış kuvvetler;

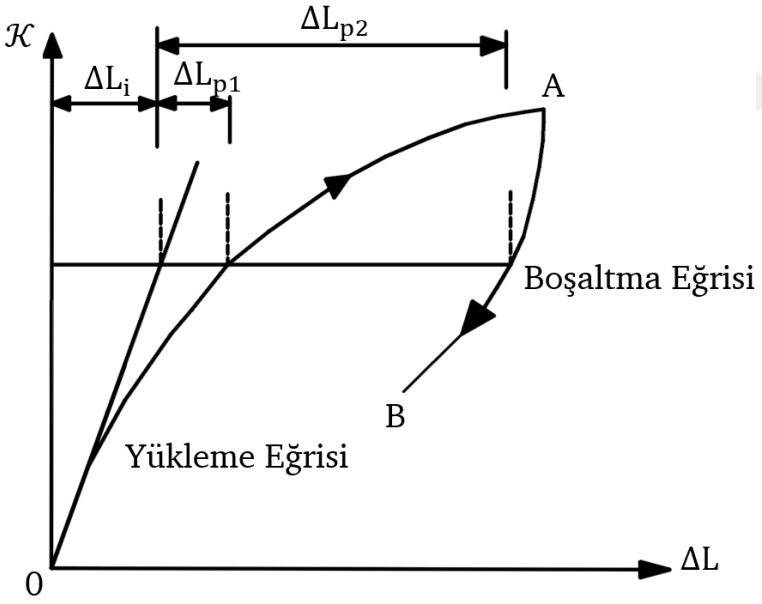
$$K_1 = k_1\mathcal{K},\ K_2 = k_2\mathcal{K}, \dots, K_i = k_i\mathcal{K}, \dots, K_n = k_n\mathcal{K} \tag{2.1}$$

şeklinde belirlenmiş olur [84].



Şekil 2.7 Katı cisim ve dış kuvvet etkisi

Şekil 2.8'de verilen $\mathcal{K} - \Delta l$ diyagramında, OA bölümü artan yük parametresi için elde edilen yükleme eğrisi, AB bölümü ise azalan yük parametresi için elde edilen boşaltma eğrisidir. Diyagramın $O\mathcal{K}$ ekseni ile eğrinin başlangıç teğeti arasında kalan Δl_i şekil değiştirmeleri doğrusal şekil değiştirmeler, başlangıç teğeti ile yükleme ve boşaltma eğrileri arasında kalan $\Delta l_{p1}, \Delta l_{p2}$ şekil değiştirmeleri de doğrusal olmayan şekil değiştirmelerdir [84].

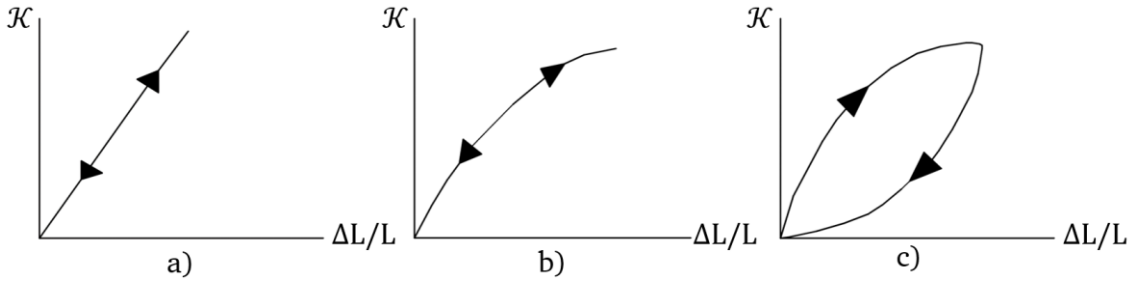


Şekil 2.8 Yük parametresi-şekil değiştirme ilişkisi ($\mathcal{K}$-ΔL)

2.2.4.1 Şekil Değiştirme Türleri

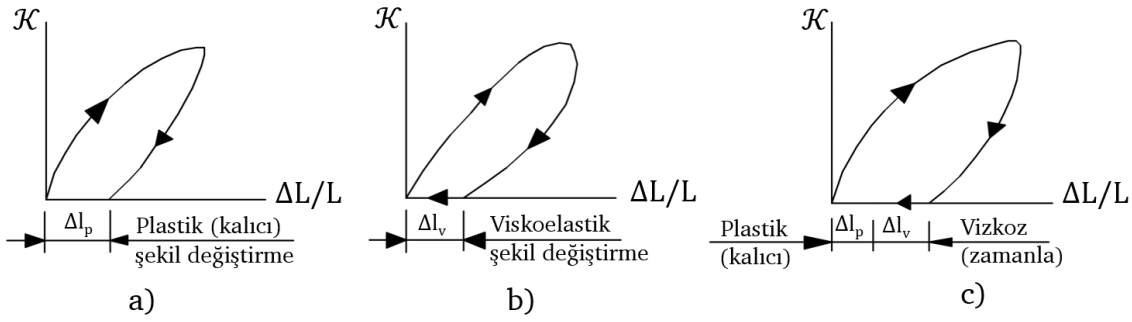
Yükleme ve boşaltma eğrilerinin çakıştığı, bir diğer tabirle yük ile orantılı olarak değişen şekil değiştirmeye elastik şekil değiştirme (Şekil 2.9a), yük-şekil değişimi ($\mathcal{K} - \Delta l$) bağıntısının doğrusal olmadığı elastik şekil değiştirmeye de doğrusal olmayan elastik şekil değiştirme (Şekil 2.9b) denir. Yükleme ve boşaltma farklı

eğriler üzerinde meydana gelir, fakat yükleme eğrisinin başlangıcı ile boşaltma eğrisinin sonu çakışırsa ve ayrıca bu eğriler zamana bağlı olmazsa bu tür şekil değiştirmeye iç sürtünmeli elastik şekil değiştirme adı verilir (Şekil 2.9c) [84].



Şekil 2.9 a) Doğrusal elastik b) Doğrusal olmayan elastik c) İç sürtünmeli elastik malzeme davranışı

Yükleme ve boşaltma eğrileri aynı olmayan, bununla birlikte yükleme eğrisinin ilk noktası ile boşaltma eğrisi son noktası çakışmayan şekil değiştirmelere plastik şekil değiştirmeler denir (Şekil 2.10a). Burada Δl_p, plastik (kalıcı) şekil değiştirmeyi göstermektedir. Boşaltma sonunda kalan şekil değiştirme zamanla sıfıra inerse viskoelastik şekil değiştirme adını alır ve Δl_v ile gösterilir (Şekil 2.10b). Bazı hallerde, boşaltma sonunda kalan şekil değiştirme zamanla azalmakla beraber tamamen sıfıra inmez. Burada Δl_v viskoz şekil değiştirmenin geri dönen kısmını, Δl_p ise kalıcı şekil değiştirmeyi göstermektedir (Şekil 2.10c) [84].

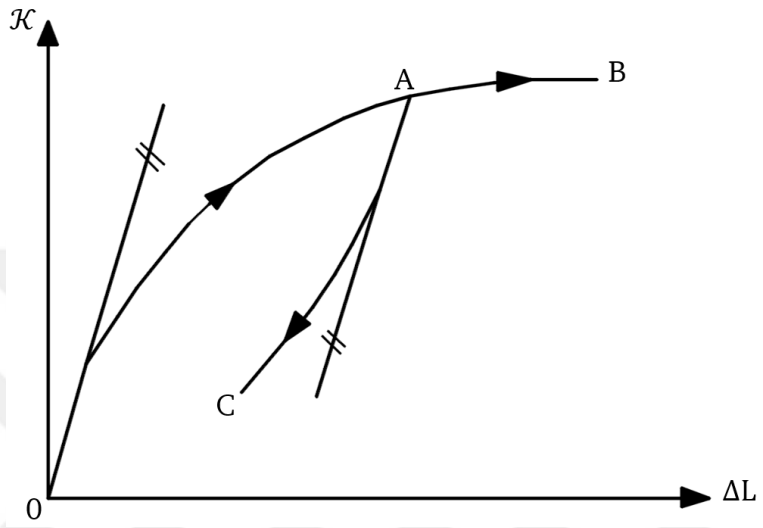


Şekil 2.10 a) Plastik şekil değiştirme b) Viskoelastik şekil değiştirme c) Plastik-Viskoelastik şekil değiştirme

2.2.4.2 İdeal Malzemeler

Yapı sistemlerinde kullanılan gerçek malzemelerin şekil değiştirme özellikleri, $\mathcal{K} - \Delta l$ bağıntısının ancak bir bölgesinde yukarıda açıklanan şekil değiştirmelerden birine yaklaşık olarak benzeyebilir. Bu nedenle, gerçek davranışı anlamak için, idealleştirmeler yaparak ideal malzemelerin tanımlanması

gerekmektedir. Yük parametresinin bütün değerleri için şekil değiştirmeleri doğrusal-elastik olan malzeme doğrusal-elastik malzeme; şekil değiştirmeleri doğrusal olmayan, fakat yükleme ve boşaltma eğrileri çakışan malzeme doğrusal olmayan elastik malzeme; yükleme ve boşaltma eğrileri çakışmayan, fakat boşaltma eğrisi başlangıç teğeti, yükleme eğrisinin başlangıç teğetine paralel olan malzeme elastoplastik malzemedir (Şekil 2.11) [84].



Şekil 2.11 Elasto-plastik malzeme davranışı

2.3 Yığma Yapı Elemanları

Bu bölümde günümüzde yığma yapı elemanlarından yaygın olarak kullanılan duvarlar, kiriş ve lentolar ile bilgiler verilmiştir.

2.3.1 Duvarlar

Yığma yapıların maruz kaldığı yükleri temele ileten, yapı bölümlerini birbirinden ayıran, yapılarda hacimleri oluşturan ve taş, tuğla gibi yığma birimlerin harç kullanılarak veya harçsız örülmesiyle oluşturulan düşey yapı elemanıdır. Yığma duvarlar görevleri bakımından taşıyıcı duvarlar, taşıyıcı olmayan duvarlar ve destek duvarları olmak üzere üç kısma ayrılırlar. Taşıyıcı duvarlar düşey ve yatay yükleri diğer taşıyıcı elemanlara ve zemine ileten düzlemsel elemanlardır. Taşıyıcı duvarlar, ana taşıyıcı yığma yapı elemanları olduklarından, duvarlarda oluşan herhangi bir hasar bütün sistemi doğrudan etkiler. Bundan dolayı düşey yükler ve yatay yükler altında yeterli dayanıklılığa sahip olmaları gerekmektedir. Taşıyıcı olmayan duvarlar sadece kendi ağırlıklarını taşırlar. Destek duvarları taşıyıcı

duvarların devrilmesini engellemek amacıyla duvarlara dik örülen yardımcı elemanlardır.



Şekil 2.12 Donatısız yığma duvar [85]

2.3.2 Kiriş ve Lentolar

Kapı ve pencere boşluklarının üzerine duvarın tekrar örülebilmesini sağlamak ve üzerlerindeki duvar yüklerini aktaran betonarme, beton, ahşap elemanlardır.



Şekil 2.13 Kiriş ve lento [85]

3
YIĞMA DUVARLARDA GÜÇLENDİRME YÖNTEMLERİ

Yığma yapı, doğal veya yapay blokların bağlayıcı bir harç ile birleştirilmesiyle oluşturulan duvarların; hem taşıyıcı duvar, hem de bölme duvar özelliği gösterdiği yapıdır. Yığma yapılar, deprem yükleri karşısında betonarme ve çelik yapılara oranla daha gevrek davranış sergilemektedirler. Özellikle donatısız yığma yapı tarzında inşa edilen yığma yapıların deprem açısından istenilen sünek davranıştan yoksun olmaları, bunlara ek olarak ağır ve rijit olmaları yapının önemli bir plastik şekil değiştirme göstermeden aniden göçmesine neden olur. Yığma yapıların deprem davranışının ve mekanik özelliklerinin (basınç dayanımı, kesme dayanımı, elastisite modülü, vb.) bilinmesi, can ve mal kaybı açısından büyük önem arz etmektedir.

3.1 Yığma Duvarın Mekanik Özellikleri

Farklı geometriler ve malzeme özellikleri nedeniyle, yığma duvar anizotropik kompozit malzeme olarak kabul edilir. Yığma duvarların mekanik özellikleri, bu duvarların düşey ve yatay yükler altındaki davranışını etkileyen çok önemli parametrelerdir. Yığma duvarların mekanik özellikleri, günümüz yapı elemanları olan beton ve çeliğin mekanik özelliklerine göre oldukça karmaşıktır. Duvar basınç dayanımı, kesme dayanımı ve elastisite modülü gibi mekanik özellikler, yığma duvarların çeşitli yükler altındaki davranışını belirleyen en önemli parametrelerdir.

3.1.1 Basınç Dayanımı

Yığma duvarın eksen yönünde maruz kaldığı en büyük basınç kuvvetine karşı göstermiş olduğu direnç, duvarın basınç dayanımı olarak tanımlanır. Yığma duvarların basınç dayanımı, başta duvar malzemesi olarak kullanılan blokların ve bu blokları birbirine bağlayan harç gibi ölçülebilir parametrelerin basınç dayanımına bağlıdır. Fakat, harç kalınlığı, işçilik, duvar boyutları ve düşey delikli taşıyıcı tuğlalardaki boşluk oranı gibi parametrelerin de duvar dayanımı üzerinde

önemli derecede etkisi vardır. Yığma duvarların davranışında ve yük taşıma kapasitesinde basınç dayanımı çok büyük önem taşımaktadır. TBDY 2018'e göre taşıyıcı yığma duvarların karakteristik basınç dayanımı f'_m, iki yolla belirlenebilir: i) duvar numuneleri üzerinde TS EN 1052-1'e göre yapılacak deneyler yolu ile, ii) kargir birim ve harç üzerinde TS EN 772-1 ve TS-EN 1015-11 standartlarına göre yapılacak ayrı deneylerden elde edilen basınç dayanımları kullanılarak (Tablo 3.1) belirlenebilir.

Tablo 3.1 Yığma taşıyıcı duvarların karakteristik basınç dayanımı

Birim-Birim Sınıfı	Harç sınıfı	Harç basınç dayanımı, f_{mr} (MPa)*	Kargir birim basınç dayanımı , f_{bl} (MPa)					
			5	10	15	20	25	30
Grup I	Genel amaçlı harç	M10-M20	3.4-4.2	5.5-6.8	7.3-9.0	8.9-11.0	10.4-12.9	11.9-14.6
		M2.5-M9	2.2-3.3	3.6-5.3	4.8-7.1	5.9-8.7	6.9-10.1	7.8-11.5
		M1-M2	1.7-2.1	2.8-3.4	3.7-4.5	4.5-5.5	5.2-6.4	5.9-7.3
Grup II ve Kesme taş	Genel amaçlı harç	M10-M20	2.8-3.4	4.5-5.5	6.0-7.4	7.3-9.0	8.5-10.5	9.7-12.0
		M2.5-M9	1.8-2.7	3.0-4.4	3.9-5.8	4.8-7.1	5.6-8.3	6.4-9.4
		M1-M2	1.4-1.7	2.3-2.8	3.0-3.7	3.7-4.5	4.3-5.3	4.9-6.0
Tuğla(GrupI)	İnce tabakalı harç**	-	2.9	5.3	7.5	9.6	11.6	13.5
Tuğla(Grup II)	İnce tabakalı harç**	-	2.2	3.5	4.7	5.7	6.7	7.6
Beton(Grup I), Gazbeton	-	-	3.1	5.7	8.0	10.2	12.3	14.4
Beton(Grup II)	-	-	2.6	4.6	6.5	8.3	10.0	11.7

(*) Harçlar M harfini takip eden MPa cinsinden karakteristik basınç dayanımlarını gösterecek şekilde isimlendirilmiştir.
(**) İnce tabakalı harç, birimler arası harç tabakası 0.5 mm ile 3.0 mm olan harç.

Ayrıca pek çok araştırmacı, yığma birim ve harçtan oluşan yığma prizmalar üzerinde farklı türlerde ve özelliklerde deneyler yaparak yığma duvarın basınç dayanımını ifade eden çeşitli analitik bağıntılar önermişlerdir.

Kaushik vd. [86] yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda yığma duvarların basınç dayanımı için Denklem (3.1)'de verilen bağıntıyı önermişlerdir.

$$f'_m = 0.63(f_{bl}^{0.49})(f_{mr}^{0.32}) \tag{3.1}$$

Dayaratnam [87] yığma birim ve harcın basınç dayanımına bağlı olarak yığma duvar basınç dayanımı için Denklem (3.2)'de verilen bağıntıyı önermiştir.

$$f'_m = 0.275(f_{bl}^{0.5})(f_{mr}^{0.5}) \tag{3.2}$$

Eurocode 6 [88]'da yığma birimin normalize edilmiş basınç dayanımı ile harcın basınç dayanımına bağlı olarak yığma duvarın basınç dayanımı için Denklem (3.3)'te verilen bağıntı önerilmiştir.

$$f'_m = 0.5(f_{bl}^{0.7})(f_{mr}^{0.3}) \tag{3.3}$$

MSJC 2013 [89]'te yığma duvarın basınç dayanımı için Denklem (3.4)'te verilen bağıntı önerilmiştir.

$$f'_m = (400 + 0.25f_{bl})/145 \tag{3.4}$$

Bennet vd. [90] yaptıkları çalışmada yığma duvarın basınç dayanımı için Denklem (3.5)'de verilen bağıntıyı önermişlerdir.

$$f'_m = 0.9 + 0.3(f_{bl}) \tag{3.5}$$

Bağıntılarda f'_m yığma duvarın karakteristik basınç dayanımı, f_{bl} yığma birimin basınç dayanımı ve f_{mr} harcın basınç dayanımını ifade etmektedir.

3.1.2 Kesme Dayanımı

Yığma duvarda göçme modları duvardaki yatay derzlere paralel düzlemde etkiyen kuvvet altında kesme kırılması olduğundan dolayı, bu kuvvetler altında oluşan kesme dayanımı önemlidir. Söz konusu kesme dayanımı, öncelikle yığma birim ve bağlayıcı malzeme arasındaki aderansa bağlıdır. Duvar çatlayıp hasar alınca yığma birim ile harç arasındaki yapışma (aderans) yok olur, duvarın kesme dayanımı bu çatlak ara yüzeyindeki yığma birimlerle harç arasındaki sürtünme kuvveti ile oluşmaktadır. Çatlak genişleyip yığma birimler birbiri üzerinde kaydıkça sürtünme

alanı azalacağı için sürtünmeye bağlı kesme dayanımı da giderek azalacaktır. Duvardaki büyük düşey yük, sürtünmeye bağlı kesme dayanımını artırır [91].

Duvarların karakteristik kesme dayanımı (f_{vk}), TBDY 2018'e göre duvar numuneleri üzerinde yapılacak deneylerden veya Denk. (3.6) ile elde edilebilir.

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0.4\sigma_d \leq 0.10 f_b \tag{3.6}$$

Burada f_{vk}, duvar üzerindeki ortalama düşey gerilmeleri kullanarak elde edilen duvar karakteristik kesme dayanımı. f_{vk0}, eksenel gerilmenin bulunmadığı durumdaki karakteristik kesme dayanımı. σ_d, yük katsayıları ile çarpılmış düşey yükler ve deprem yüklerinin ortak etkisi altında hesaplanan düşey basınç gerilmesi. f_b, kargir birimin standartlaştırılmış (boyut etkisinden arındırılmış 100 mm × 100 mm boyutundaki numuneye eşdeğer) ortalama basınç dayanımı.

3.1.3 Elastisite Modülü

Yığma duvarlar için elastisite modülü gerilme-birim şekil değiştirme arasında doğrusal olmayan bir ilişki ile tanımlanır. TBDY 2018'e göre taşıyıcı duvarların elastisite modülü (E_m), TS EN 1052-1'e göre yapılacak deneyler yolu ile belirlenebilmektedir. Bu deneylerin yapılamadığı durumlarda E_m değeri için yapısal çözümlemelerde $750f'_m$ değeri önerilmiştir. Bunlara ek olarak, literatürde bu konuyla ilintili pek çok analitik bağıntı önerilmiştir.

Drysdale vd. [81] yaptıkları çalışmada yığma duvarın elastisite modülü için Denklem (3.7)'de verilen bağıntıyı önermişlerdir.

$$E_m = (210\sim1670)\, f'_m \tag{3.7}$$

Eurocode 6 [88]'da yığma duvarın elastisite modülü için Denklem (3.8)'de verilen bağıntı önerilmiştir.

$$E_m = (750\sim1000)\, f'_m \tag{3.8}$$

MSJC 2013 [89]'te yığma duvarın elastisite modülü yığma duvarın basınç dayanımına bağlı olarak Denklem (3.9)'da verilmiştir.

$$E_m = 700 f'_m \tag{3.9}$$

FEMA 306 [92]'da yığma duvar elastisite modülü için Denklem (3.10)'da verilen bağıntı önerilmiştir.

$$E_m = 550 f'_m \tag{3.10}$$

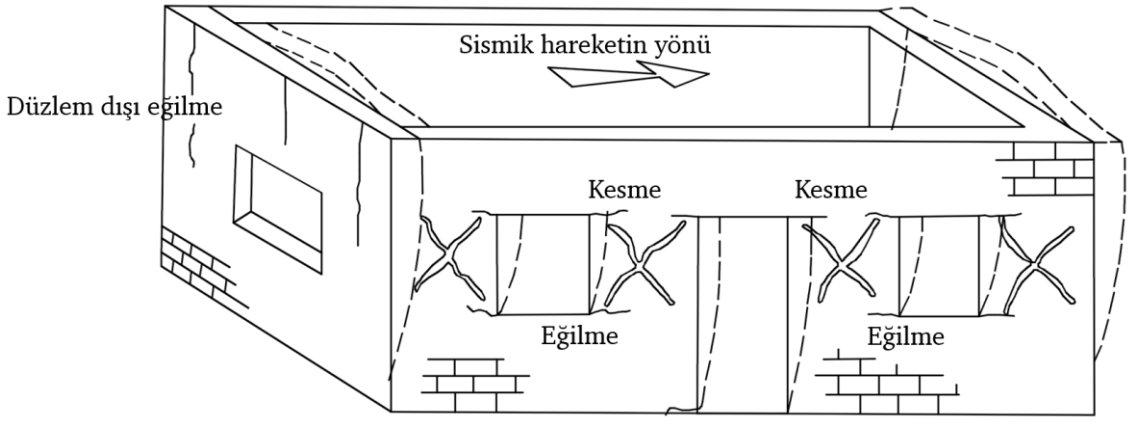
Paulay ve Pristley [93]'da yaptıkları çalışmada yığma duvarın elastisite modülü için Denklem (3.11)'de verilen bağıntıyı önermişlerdir.

$$E_m = (750 \sim 1000)\, f'_m \tag{3.11}$$

Bağıntılarda E_m yığma kompozitin elastisite modülü ve f'_m yığma kompozitin basınç dayanımını ifade etmektedir.

3.2 Düşey ve Yatay Yük Altında Yığma Duvar Davranışı

Daha önce de bahsedildiği gibi yığma, yığma birim ve harçtan oluşan homojen olmayan ve anizotropik kompozit bir yapı malzemesidir. Düşey ve yatay yükler altında davranışı karmaşık olan yığma, küçük şekil değiştirme aralığında bile mükemmel elastik değildir. Yığma duvarlar genelde düşey yüklere göre tasarlanmaktadır. Deprem yüklerini belirlemenin zorluğu nedeniyle, yığma yapıların yatay yüklere göre tasarımı epey zordur. Yığma yapılarda gözlenen deprem hasarlarının nedenlerini düzlem dışı davranış, düzlem içi davranış ve bu iki davranışın birlikte gözlendiği durumlar olarak üç ana grupta incelemek mümkündür. Düzlem dışı davranış yığma duvarlara dik etki eden sismik hareket sonucu oluşurken, düzlem içi davranış yığma duvar doğrultusunda etki eden kuvvetler neticesinde meydana gelecektir (Şekil 3.1).



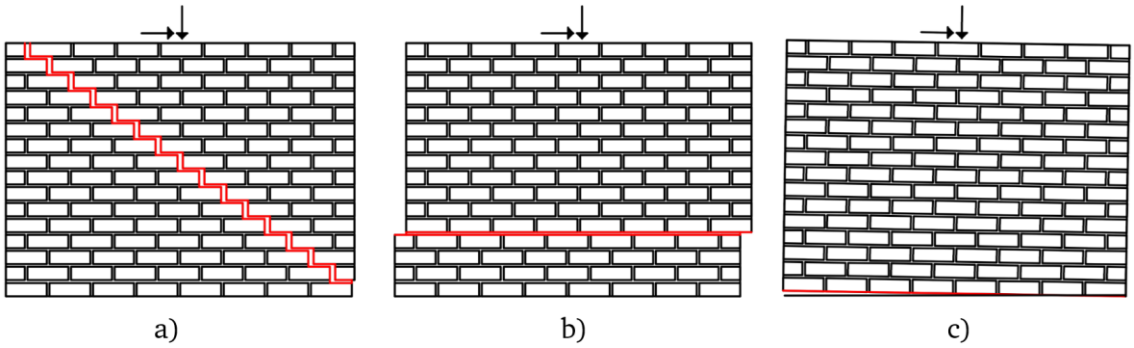
Şekil 3.1 Düzlem-içi ve düzlem-dışı tipik şekil değiştirme ve hasarlar

Yatay yüklere maruz kalan yığma duvarların düzlem içi göçme mekanizmaları şu şekilde özetlenebilir:

Kesme göçme modu: Düşük en-boy oranlarına sahip ve yüksek eksenel yüklere maruz kalan yığma duvarlar, diyagonal bir çatlak gelişimi gösterme eğilimindedirler. Söz konusu göçme modu, yatay ve düşey yüklere maruz kalan duvarda gelişen asal çekme gerilmeleri, duvarın çekme dayanımını aştığında meydana gelir. Maksimum yatay yük taşıma kapasitesine ulaşılmadan önce, duvarda oluşan diyagonal çatlaklar; güçlü tuğla-zayıf harç birleşiminde yatay ve düşey derzleri takip ederek oluşur, zayıf tuğla-güçlü harç birleşiminde yığma birimlerde veya hem yığma birim hem de harçta oluşur. Düşey yük ne kadar yüksek olursa, çatlakların tuğladan geçme olasılığı o kadar yüksektir (Şekil 3.2a).

Kayma göçme modu: Düşük düşey yükler ve/veya düşük sürtünme katsayısı durumunda, ki bu durum düşük kalitede harçtan kaynaklanabilir, yatay derzlerdeki yatay çatlaklar duvar boyunca uzanan bir kayma düzlemi oluşturulabilir (Şekil 3.2b).

Eğilme (devrilme) göçme modu: Yüksek eğilme momenti/kesme oranı veya geliştirilmiş kesme dayanımı durumunda, duvar kenarlarındaki sıkıştırılmış bölgelerin ezilmesi ile kırılma meydana gelir. Bu durum, duvarın devrilmesine sebebiyet verir (Şekil 3.2c).



Şekil 3.2 Taşıyıcı duvarlar düzlem içi göçme durumları a) Kesme göçmesi, b) Kayma göçmesi, c) Eğilme göçmesi

3.3 Donatısız Yığma Duvarlarda Onarım ve Güçlendirme Yöntemleri

Dünya çapındaki yapı stokunun büyük çoğunluğunu yaklaşık %70 oranla yığma yapılar oluşturmaktadır. Türkiye'nin özellikle kırsal alanlarında yaygın olarak kullanılan yığma yapılar, düşey yükler altında yeteri dayanımı gösterebilmelerine

rağmen orta ve şiddetli depremlere maruz kaldıklarında yeterli performansı gösteremezler. Geçmiş depremlerden sonra, konut ve hayvan barınağı olarak kullanılan yığma yapılar ile tarihi yığma yapıların ağır hasar aldığı veya tamamen yıkılmak suretiyle çok sayıda can kaybına sebep oldukları bilinmektedir. Bu tür yığma yapıların hasar şekillerinin incelenmesi ve bu doğrultuda önlemler alınması can ve mal güvenliği açısından önem arz etmektedir. Dolayısıyla, yığma yapılarda deprem sırasında oluşan hasarın sebep olduğu dayanım kaybının giderilmesi, hasarın tekrar oluşmaması için gereken tedbirlerin alınması, hasara sebep olan nedenlerin çok iyi incelenerek sebeplerin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Bu nedenle hasarlı eleman/elemanlara uygulanacak uygun onarım ve/veya güçlendirme tekniğinin belirlenmesi önemlidir. Bilindiği üzere onarım, hasar görmüş yapı elemanında açığa çıkan lokal zaafiyetin ortadan kaldırılması için yapılan işlemdir. Güçlendirme ise bir taşıyıcı elemanın/sistemin, yük taşıma kapasitesini, rijitliğini, sünekliğini ve stabilitesini, mevcut durumun üzerine çıkarmak amacıyla yapılan iyileştirme işlemidir.

Düşey ve yatay yükler, yapı elemanlarındaki kesit azalması, temel oturması gibi faktörler yapıda hasar oluşmasına sebebiyet vermektedir. Hasarlar kendini çatlaklar, ezilme, kırılma, parçalanma, düzlem içi-düzlem dışı şekil değiştirmeler ve malzeme bozulmaları şeklinde gösterir. Yapısal çatlaklar, elemanlara etkiyen yüklerin neden olduğu gerilmelerin yığma yapılar için kritik olan malzeme çekme dayanımını aştığında oluşacaktır. Hasarların meydana geldiği alanlar yapı sisteminde ve/veya yapı malzemesindeki zafiyetler hakkında ipuçları verir. Donatısız yığma yapıların güçlendirilmesinde kullanılan yaygın geleneksel yöntemler ve lif takviyeli polimerlerle güçlendirme yöntemleri bu bölümde detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

3.3.1 Geleneksel Yöntemlerle Güçlendirme

Günümüzde donatısız yığma duvarların dayanımını ve/veya sünekliğini artırmak için sıklıkla tercih edilen pek çok farklı geleneksel güçlendirme yöntemi mevcuttur. Bu bölümde geleneksel güçlendirme yöntemlerine değinilecek, prosedürleri, avantajları, dezavantajları, sınırlamaları ve herbir güçlendirme tekniğinin etkisi gözden geçirilecektir.

3.3.1.1 Püskürtme Beton ile Güçlendirme

Bu yöntem, yığma yapılarda iç ve dış duvarları güçlendirmek için kullanılır. Püskürtme beton, basınçlı hava ile uygulanan betondur. Kalıp yapmanın zor olduğu veya ekonomik olmadığı durumlarda, betonun ince bir tabaka olarak uygulanması gerektiğinde yapılır. Ankraj çubukları epoksi ile taşıyıcı duvara yerleştirilir ve bu ankraj çubuklarına hasır çelik donatılar sabitlenir. Özenli bir şekilde belirlenen yerlere yerleştirilen donatılar temiz olmalı ve yapışmayı zayıflatacak her türlü kirden arındırılmalıdır. Hasır çelikler için bindirme bir veya bir buçuk göz olarak belirlenir ve daha sonra püskürtme beton uygulanır.

3.3.1.2 Çimento Enjeksiyonu ile Güçlendirme

Teknik literatürde, çimento enjeksiyonu ile onarım işlemi çoğunlukla bir güçlendirme tekniği olarak anılmaktadır. Söz konusu onarım işlemi, bu tez içerisinde de zayıf ve dayanımı oldukça düşük olan moloz taş yığma duvarların dayanımını artırmak için uygulanan bir güçlendirme yöntemi olarak tanımlanmıştır. Düşük basınç seviyesinde uygulanan çimento enjeksiyonu, uygulama sırasında yığma duvarın içine kadar uzanan ince borular yardımı ile çimento şerbeti yedirme işlemidir. Erken dayanımlı yüksek portland veya kendiliğinden genleşen çimentodan üretilen çimento şerbeti ile yapılan onarım ve güçlendirme işlemi daha hızlıdır.

3.3.1.3 Çelik Elemanlar ile Güçlendirme

Taşıyıcı yığma duvarların kuşaklanarak veya duvarın her yüzünde çatı veya döşeme plaklarına takılarak kullanılan ilave çelik levhalar ile uygulanan güçlendirme yöntemidir. Yığma duvarlardaki çatlakların genişliğini sınırlandırmak amacı ile çatlakları dikine kesen çelik donatılar yerleştirilir.

3.3.1.4 Normal Dökme Beton ile Güçlendirme

Hasır çeliğin yığma duvarın yüzeyine yerleştirilmesinden sonra projede gereken derinlik kadar kurulan kalıba beton dökülerek uygulanan güçlendirme yöntemidir. Dökülen beton tabakasının kalınlığından kaynaklı yer kaybı, diğer güçlendirme yöntemlerine nazaran daha az tercih edilmesine sebebiyet

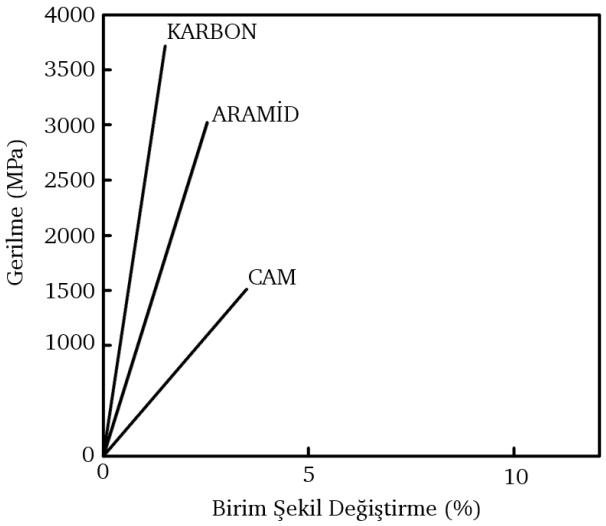
vermektedir. Ayrıca, kalıp kurma, beton dökülmesi ve taşıyıcı sistemin askıya alınması gibi faktörler de bu yöntemin dezavantajlarındandır.

3.3.1.5 Kendiliğinden Yerleşen Beton ile Güçlendirme

Kurulan kalıba kendiliğinden yerleşen betonun homojen bir şekilde dağılarak, vibratör kullanmaksızın dökülmesiyle uygulanan güçlendirme yöntemidir. Çoğunlukla püskürtme betonun uygulama zorluğundan dolayı bu yöntem tercih edilir. Uygulamada normal dökme beton güçlendirme yöntemiyle aynıdır. Söz konusu güçlendirme yöntemini uygulayanların uzman kişiler olmaması ve güçlendirme sırasında yaşanabilecek teknik sorunlar bu yöntemin dezavantajlarındandır.

3.3.2 Lif Takviyeli Polimer ile Yapılan Güçlendirme

Lif takviyeli polimer, epoksi, vinilester veya polyester ısıyla sertleşen plastik gibi bir polimer matrisi içinde yüksek çekme dayanımına sahip liflerden oluşur. Genellikle sert fakat nispeten zayıf olan orijinal plastik polimer matris, istenen malzeme veya mekanik özelliklere yani yüksek mekanik dayanım ve elastisiteye sahip nihai bir ürün elde etmek için, yüksek çekme dayanımı kapasiteli bir takviye malzemesi olan lifler ile karıştırılır. Lifler genellikle karbon, cam, aramid veya nadiren bazalttan yapılır. Ancak geçmişte kağıt veya ahşap gibi diğer lifler de kullanılmıştır. Lif takviyeli polimerlerin özellikleri esas olarak liflerin mekanik özellikleri ile belirlenir. En yaygın lif takviyeli polimer türleri Karbon, Cam, Aramid ve Bazalt lif takviyeli polimerlerdir. İpek görünüş ve inceliğinde olan karbon lifleri gerilmeye karşı çelikten yaklaşık olarak on dört kat dayanımlı olmasına rağmen ağırlığı çeliğin beşte biri civarındaır. karbon lif takviyeli polimerin, aramid lif takviyeli polimer ve cam lif takviyeli polimere göre maliyeti daha fazla olmasına rağmen rijitlik, dayanım, elastisite modülü, çekme gerilmesi, kopma gibi mekanik değerlerinin daha büyük olması kullanımını artırmaktadır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Lif takviyeli polimerler için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri

Son yıllarda lif takviyeli polimeri sadece niş uygulamalarda kullanılan özel malzemeler olmaktan çok çeşitli uygulamalarda kullanılan yaygın mühendislik malzemelerine dönüşmüştür. Yüksek çekme dayanımı ve hafif olması sebebiyle (diğer malzemelere özellikle çeliğe kıyasla), lif takviyeli polimeri inşaat endüstrisinde önemli bir yapısal malzeme haline gelmiştir. Lif takviyeli polimerlerin, çeliğe göre diğer önemli avantajları, taşıma ve uygulama kolaylığı, montajı için gereken minimum işçilik, ayrıca korozyona karşı yüksek dirençleri ve düşük ısı iletkenlikleridir. Ayrıca, kolay şekillendirilebilmeleri nedeniyle, lif takviyeli polimer uygulaması uygulayıcılara esneklik sağlar ve herhangi düz, kavisli veya geometrik olarak düzensiz yüzeylere uygulanabilir. Lif takviyeli polimer kompozitleri çubuk, şerit ve kumaş şeklinde uygulanabilmektedir.



Şekil 3.4 Çubuk, şerit ve kumaş lif takviyeli polimer

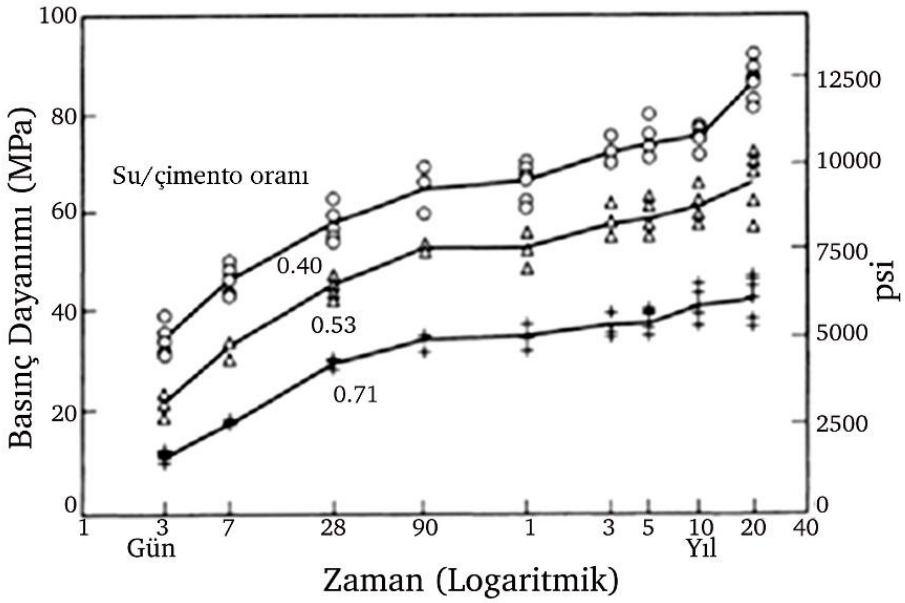
Lif takviyeli polimerlerin inşaat mühendisliğinde kullanımı, kırk yıl önce ilk kez ortaya çıktıktan sonra istikrarlı bir şekilde artmıştır. Lif takviyeli polimerler genellikle binalar, köprüler, deniz yapıları ve tüneller gibi mevcut veya yeni inşa edilen yapıların güçlendirilmesinde ve onarılmasında kullanılmaktadır. Lif takviyeli polimerlerin güçlendirmedeki rolü hızlı uygulama ve yapının işlevselliğine önemli ölçüde zarar vermeden uygulanması nedeniyle son derece hızlı bir şekilde büyümektedir. Lif takviyeli polimer ile güçlendirilen yapıların yatay yükler altında yük taşıma kapasitesinin, dayanımının ve sünekliğinin arttığı pek çok çalışma sonucunda görülmüştür. Lif takviyeli polimer ile uygulandığı yüzey arasındaki bağ kaybı (sıyrılma) veya lif takviyeli polimer liflerinin kopması, bu güçlendirme yönteminin performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca, söz konusu durumlar lif takviyeli polimer ile güçlendirilen yapılarda iki temel göçme mekanizmasıdır.

Lif takviyeli polimerlerin pek çok avantajı olmasına rağmen bazı dezavantajları da mevcuttur. Bunlar, kopmaya kadar doğrusal elastik davranış sergileyip genellikle aniden kopmaları, reçinelerin yüksek sıcaklığa maruz kaldıklarında hızla dayanım kaybettikleri için yangına karşı zayıf direnç göstermeleridir.

4
DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu tez çalışması kapsamındaki tüm deneyler Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nın mevcut olanakları ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma programı, literatürde tuğla duvar örnekleriyle yapılan güçlendirme yöntemlerini konu alan çalışmalarda yapılan deneyler, deney yapılış teknikleri, deney numunesi üretim kriterleri ve standartları referans alınarak geliştirilmiştir. Benzer çalışmalardan yola çıkarak, yapının kendi ağırlığını temsil eden düşey yük ile deprem yükü gibi etkileri temsil eden yatay yükler altındaki dolu ve boşluklu tuğla duvarlarda yapılan güçlendirmenin etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla literatürde yer alan çalışmalarda kullanılan kendiliğinden yerleşen beton, hasır çelik donatılı sıva, epoksi vb. güçlendirme yöntemlerinden farklı olarak, farklı kalınlık ve farklı yüzey alanına sahip diyagonal karbon lif takviyeli polimer şeritleri, güçlendirme yöntemi olarak uygulanmıştır.

Deneysel çalışmalar, ön deneyler ve ana deneyler olmak üzere iki bölümde gerçekleştirilmiştir. Ön deneylerde taze haldeki harç deneyleri, sertleşmiş haldeki harçların mekanik özelikleri ve tuğlanın mekanik özellikleri belirlenmiş olup tuğla duvarların güçlendirilmesinde kullanılacak karbon lif takviyeli polimerin özellikleri verilmiştir. Ana deneyler üç aşamadan oluşacak şekilde yapılmıştır. Birinci aşama için 2 adet dolu ve 5 adet boşluklu olmak üzere toplamda 7 adet duvar üretilmiştir. İkinci aşamada referans numuneleri olarak kullanılacak bir adet dolu ve bir adet boşluklu olmak üzere toplamda 2 adet duvar (FDK 2019-3674 numaralı BAP kapsamında ve FDK 2019-3675 numaralı BAP desteğiyle) güçlendirilmeksizin hasara uğratılmıştır. Üçüncü aşamada bir adet hasar almış dolu duvar, bir adet hasar almamış dolu duvar ve 4 adet hasar almamış boşluklu duvar karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilip (FDK 2019-3674 numaralı BAP kapsamında) hasara uğratılmıştır. Üretilen harcın basınç dayanımında 90 günden sonra önemli ölçüde bir değişim olmadığı için deneysel araştırmada duvar yükleme deneyleri 90 günden sonra yapılmıştır [94] (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Basınç dayanımının zamanla değişimi

4.1 Üretilen Harcın Özellikleri

Deneysel çalışmada üretilecek harçlarda bağlayıcı olarak CEM III B (S) 32.5 sınıfı çimento kullanılırken; tane çapı maksimum 2 mm olan silis esaslı Cendere kumu ince agrega olarak kullanılmıştır. Harçlarda çimento/kum oranı ağırlıkça 1/3 olarak seçilirken, su miktarı yapılan ön deneyler ile belirlenmiştir. Buna göre, detayları aşağıda açıklanan ve ilgili standartlar kullanılarak gerçekleştirilen kıvam ve birim-ağırlık deneyi sonuçlarına göre harçlarda kullanılacak su/çimento oranı ağırlıkça 0.7 olarak belirlenmiştir.

4.1.1 Taze Haldeki Harç Deneyleri

Üretilen çimento harcının taze haldeki kıvamının belirlenmesi için TS EN 1015-3 [95]'te verilen üst çapı, alt çapı ve yüksekliği sırasıyla 70 mm, 100 mm ve 60 mm olan kesik koni şekilli kalıp kullanılmıştır (Şekil 4.2a). Üretilen harç iki katman olacak şekilde ve her bir katmana tokmakla en az 10 kısa vuruş ile yerleştirilmiştir. Kalıba yerleştirilen harç yüzeyi kalıp doldurulduktan sonra düzeltilmiştir. Daha sonra arta kalan kısım atılmış ve kalıp çevresi temizlenmiştir. Kalıp yukarı yönde kaldırılmış ve dairesel plak üzerine dökülen harç, tablanın (saniyede 1 defa olmak üzere) eşit aralıklarla 15 defa düşürülmesiyle, tabla üzerine yayılması sağlanmıştır. Tabla üzerine yayılan harcın çapı, birbirine dik iki doğrultuda ölçülmüş ve sonuçlar Tablo 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.2 Taze haldeki harç deneyleri

Taze harcın boşluklu birim ağırlığının belirlenmesi amacıyla TS EN 1015-6 [96]'da belirtilen 125 mm çapında ve 1 litre hacime sahip silindir şeklinde ölçü kabı kullanılmıştır. Harç, tepeleme olarak ölçü kabına doldurulmuş, sonra çökme olmayıncaya kadar titreşime maruz bırakılmıştır (Şekil 4.2b). Eksilen kısma harç ilave edilerek kap yüzeyi tesviye bıçağı ile düzeltilmiş ve ağırlık ölçümü yapılmıştır. Elde edilen ağırlığın 1 litrelik hacme bölünmesiyle üretilen harcın birim ağırlığı hesaplanmıştır. Taze harç deneylerinin sonuçlarına göre, harçta kullanılan su oranının, yerinde kullanım için TS EN 1015-2 [97]'de tanımlanan limit değerleri sağladığı görülmüştür (Tablo 4.1).

Tablo 4.1 Üretilen harcın taze haldeki özellikleri

Malzeme	Ağırlıkça Oran	Yayılma Çapı (mm) ($d_1 \perp d_2 / d_{ort}$)	Birim Ağırlık (kg/m³)	Yerinde Kullanıma Uygun Harç için Kıvam Aralıkları	
				Birim Ağırlık (kg/m³)	Yayılma Değeri (mm)
Çimento	1.0	175 ⊥ 180 / 177.5	2000	> 1200	175 ± 10
Kum	3.0	175 ⊥ 180 / 177.5		> 300 ≤ 1200	130 – 170
Su	0.7	175 ⊥ 180 / 177.5		≤ 300	120 ± 10

4.1.2 Sertleşmiş Haldeki Harçların Mekanik Özellikleri

4.1.2.1 Standart Harçların Mekanik Özellikleri

Standart Harç Eğilme Dayanımı

Sertleşmiş harçların eğilme dayanımları TS EN 1015-11 [98]'de verilen deneysel işlemler uygulanarak elde edilmiştir. Prizma şeklinde üretilen harç numuneleri, 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve bunu takip eden 28 gün boyunca havada bekletilerek muhafaza edilmiştir.

Hazırlanan numuneler açıklığı 100 mm olan iki mesnet üzerine, yan yüzlerinden biri mesnetlerin üzerine oturacak şekilde yerleştirilmiştir. Eğilme deneyleri için kullanılan basınç makinesi 60 ton kapasiteli ve 1 N hassasiyete sahiptir. Üretilen harç numunesinin orta noktasına, genişliği kadar P yükü uygulanmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Standart harç eğilme dayanımı deneyi

Üretilen harçların eğilme dayanımı ($f_{e,m}$) Denklem (4.1)'e göre hesaplanmış, deney sonuçları Tablo 4.2'de verilmiştir.

$$f_{e,m} = 1.5\frac{P_{max}l}{bd^2}\ (MPa) \tag{4.1}$$

Burada P_{max}, maksimum eğilme yükü (N); l, mesnetler arasındaki mesafe (mm); b, enkesit genişliği (mm); d, enkesit yüksekliğini(mm)'dir.

Tablo 4.2 Üretilen harcın 28 günlük eğilme dayanımları

Numune No.	Eğilme Dayanımı (MPa)
1	3.4
2	3.6
3	3.7
Ortalama ± S. Sapma	3.5 ± 0.2

Standart Harç Basınç Dayanımı

Sertleşmiş harçların basınç dayanımları TS EN 1015-11 [98]'de verilen deneysel işlemler uygulanarak elde edilmiştir. Prizma şeklinde üretilen harç numuneleri, 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve bunu takip eden 28 gün boyunca havada bekletilerek muhafaza edilmiştir.

Eğilme deneyi yapılan üç harç numunesi kırılarak iki parçaya ayrılmış; ayrılan iki parça üzerindede tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Basınç dayanımının belirlenmesi için yapılacak deneyde kullanılacak numunelerin alt ve üst yüzlerine 40 mm'lik küp plakalar konulmuş ve düşey yönde hizalanmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Standart harç basınç dayanımı deneyi

Harçların tek eksenli basınç dayanımı (f_{mr}) Denklem (4.2)'ye göre hesaplanmış, deney sonuçları Tablo 4.3'te verilmiştir.

$$f_{mr} = \frac{P_{max}}{A} \ (MPa) \tag{4.2}$$

Burada, P_{max}, basınç deneyi sonucu ulaşılan maksimum yük (N); A, maksimum yükün uygulandığı kesitin alanı (mm^2)'dır.

Tablo 4.3 Üretilen harcın 28 günlük basınç dayanımları

Numune No.	Basınç Dayanımı (MPa)
1	8.4
	7.8
2	7.7
	7.8
3	8.7
	8.2
Ortalama ± S. Sapma	8.1 ± 0.4

4.1.2.2 Harcın 90 Günlük Mekanik Özellikleri

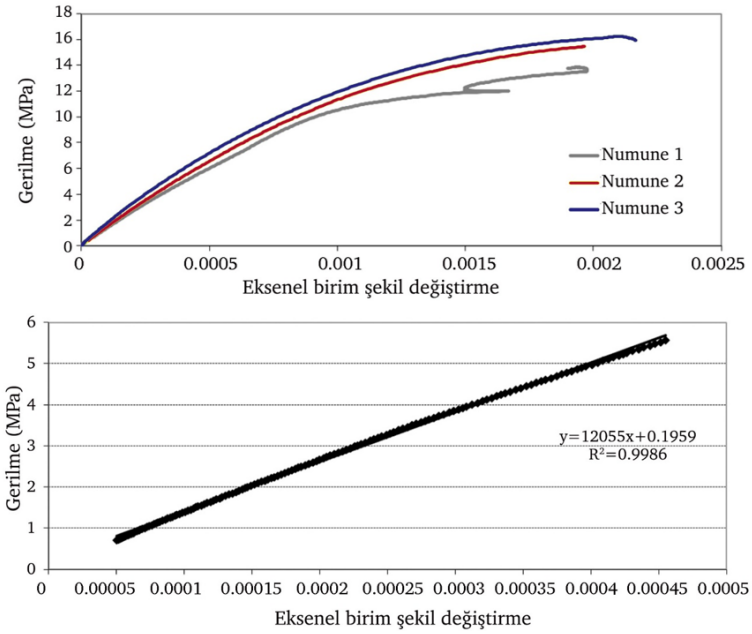
Harcın 90 Günlük Basınç Dayanımı

Harçların 90 günlük basınç dayanımlarını belirlemek için 100 mm çapında 200 mm yüksekliğinde silindirler kullanılmış ve TS EN 13286-43 [99]'ye göre basınç testi uygulanmıştır (Şekil 4.5). Numunelerin üzerine yapıştırılan ve çift doğrultuda ölçüm yapabilen şekil değiştirme pulları (strain gauge) yardımıyla birim şekil değiştirme değerleri okunmuştur. Bu sayede gerilme-şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.5 Harcın 90 günlük basınç dayanımı deneyi

ASTM C469/C469M [100]'a göre harç numunelerinde tek eksenli basınç yükü altında oluşan gerilme-şekil değiştirme eğrisinin 50με değerine karşılık gelen gerilme noktasından, maksimum gerilmenin % 40'ına denk gelen noktaya bir kiriş çizilmiş, kirişin eğimi belirlenerek elastisite modülü hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra harç numunelerin yanal birim şekil değiştirme – eksenel birim şekil değiştirme eğrileri çizilmiş; yukarıda belirtilen gerilme düzeyleri dikkate alınarak ASTM C469/C469M [100]'a göre numunelerin poisson oranı belirlenmiştir. Buna göre harcın 90 günlük mekanik özellikleri Tablo 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.6 Harcın gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi

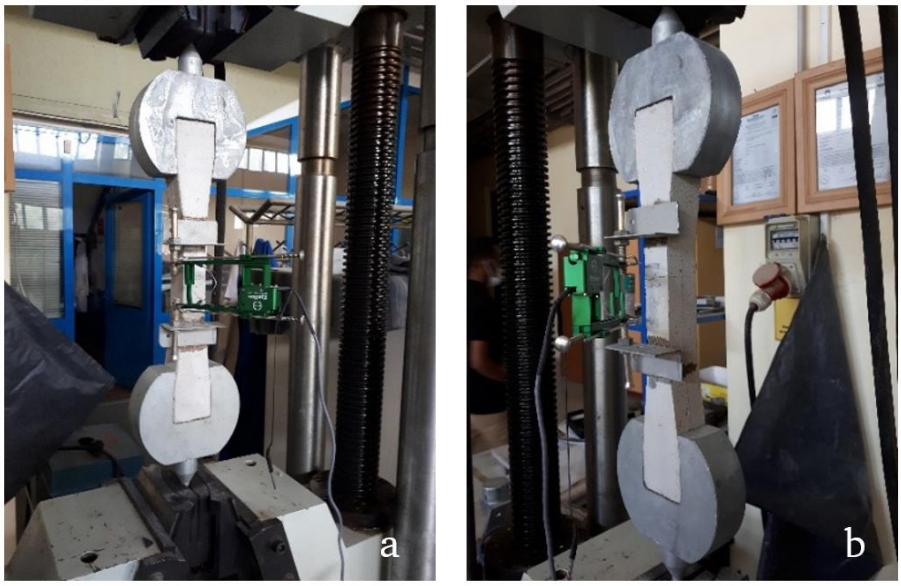
Tablo 4.4 Üretilen harcın 90 günlük mekanik özellikleri

Numune No	Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı
1	13.9	12055	0.19
2	15.6	13064	0.18
3	16.2	14258	0.18
Ortalama ± Standart Sapma	15.2 ± 1.2	13126 ± 1103	0.18 ±0.01

Harcın 90 Günlük Çekme Dayanımı

Direkt çekme deneyi için hazırlanan numuneler Şekil 4.7'de görülen deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Çekme etkisi altındaki birim şekil değiştirme ölçümü

için numenelerin boyun bölgelerinde 50 mm aralığına ekstenstomere yerleştirilmiştir.



Şekil 4.7 Harcın 90 günlük çekme dayanımı deneyi

Deney sonunda, harçların çekme dayanımı ($f_{t,m}$) Denklem (4.3)'e göre hesaplanmış, deney sonuçları Tablo 4.5'te verilmiştir.

$$f_{t,m} = \frac{P_{max}}{A} \ (MPa) \tag{4.3}$$

Burada P_{max}, direkt çekme deneyi sonunda ulaşılan maksimum yük (N); A, kırılmanın meydana geldiği kesit alanını göstermektedir.

Tablo 4.5 Üretilen harcın 90 günlük çekme dayanımı

Numune No.	Çekme Dayanımı (MPa)
1	1.3
2	1.3
3	1.4
Ortalama ± S. Sapma	1.3 ± 0.1

4.2 Harman Tuğlasının Mekanik Özellikleri

Satın alma yoluyla temin edilen ve deneysel çalışmada üretilecek duvarlarda kullanılacak olan 220×100×60 (uzunluk×genişlik×yükseklik) mm

boyutlarındaki harman tuğlasının basınç dayanımı, TS EN 772-1 [101]'ye göre yapılan tek eksenli basınç deneyi ile belirlenmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 Tuğla basınç deneyi

Söz konusu standarda göre hazırlanan ve kürlenen üç numuneden elde edilen test sonuçlarına göre tuğlaların standartlaştırılmış basınç dayanımı ortalama 21.1 MPa olarak hesaplanmıştır. Tuğlaların elastisite modülü ve poisson oranı harçtaki gibi belirlenmiştir (Tablo 4.6).

Tablo 4.6 Tuğla mekanik özellikleri

Numune No.	Basınç Dayanımı (MPa)	Standartlaştırılmış Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı
1	21.3	19.0	12119	0.20
2	21.6	19.8	12005	0.19
3	22.1	19.7	12214	0.19
4	20.9	18.9	11637	0.20
5	20.0	18.3	-	-
6	20.7	19.2	-	-
Ortalama ± Standart Sapma	21.1 ± 0.7	19.1 ± 0.6	11952 ± 292	0.19 ± 0.01

Tuğlaların eğilme dayanımları ASTM C67/C67M [102] standartına göre yapılmış ve sonuçlar Tablo 4.7.'de verilmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 Tuğla eğilme dayanımı deneyi

Tablo 4.7 Tuğla eğilme ve çekme dayanımı

Numune No.	Eğilme Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
1	6.2	4.9
2	6.8	4.6
3	6.1	5.5
4	5.6	4.4
5	6.0	5.2
Ortalama ± Standart Sapma	6.1 ± 0.4	5.0± 0.4

4.3 Deney Duvarların Güçlendirilmesinde Kullanılan Malzemeler

4.3.1 Karbon Lif Takviyeli Polimer

Deneysel çalışma programı çerçevesinde yer alan hasarlı ve hasarsız donatısız yığma duvarların güçlendirilmesinde kullanılan karbon lif takviyeli polimer Tekno Yapı Kimyasalları firması tarafından üretilmiştir (Şekil 4.10). Ürün kodu: Teknowrap 300'dür. Ürün ile ilgili teknik özellikler Tablo 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.10 Karbon lif takviyeli polimer

Tablo 4.8 Karbon lif takviyeli polimerin teknik özellikleri

Genel Bilgiler	
Renk	Siyah
Malzeme Yapısı	Karbon
Birim Ağırlığı	300 g/m^2
Ambalaj	50 cm ×100 m rulo
Raf Ömrü	Kuru Depo Şartlarında Sınırsız
Nominal Et Kalınlığı	0.17 mm
Performans Bilgileri	
Çekme Dayanımı	≥4900 MPa
Elastisite Modülü	≥ 230 000 MPa
Kopmada Uzama	% 2.1

4.3.2 Epoksi Esaslı Yapıştırıcı

Bu malzemeyle karbon lif takviyeli polimer şeritlerin tuğla duvar yüzeyine yapıştırılması sağlanmıştır. Tekno Yapı Kimyasalları firması tarafından üretilen ürün kodu Teknoband 300 Tix' tir. Malzeme teknik özellikleri Tablo 4.9' da verilmiştir.

Tablo 4.9 Epoksi esaslı yapıştırıcı teknik özellikleri

Genel Bilgiler	
Renk (Reçine ve Sertleştirici Karışımı)	Kırık Beyaz
Karışım Yoğunluğu (A+B)	1.27±0.03 kg/lt
Raf Ömrü	Açılmamış orijinal ambalajında 12 Ay
Ambalaj	5 kg set
Uygulama Bilgileri	
Sarfiyat	300 gr/m^2 için 1-1.5 kg/m^2
Uygulanacak Zeminin Sıcaklığı	(-5°C) – (+35°C)
Karışım Oranı (Ağırlıkça)	3.85 birim A : 1.15 birim B
Kap Ömrü	~ 30 dakika
Performans Bilgileri	
Betona Yapışma	≥ 4.0 N/mm^2 (Betonda kopma)
Eğilme Dayanımı	≥ 40 N/mm^2
Basınç Dayanımı	≥ 80 N/mm^2
Çekme Dayanımı	≥ 30 N/mm^2
Tam Mukavemete Ulaşma Süresi	7 gün

4.3.3 Epoksi Macun

Karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin uygulanacağı yüzeyin düzgün, pürüzsüz ve temiz olması için Tekno Yapı Kimyasalları firması tarafından üretilen ve üretim kodu Teknobond 200 olan macunun teknik özellikleri Tablo 4.10'da verilişti r.

Tablo 4.10 Epoksi macun özellikleri

Genel Bilgiler	
Renk (Reçine ve Sertleştirici Karışımı)	Gri (karışım)
Karışım Yoğunluğu (A+B)	~ 1.65 kg/lt
Karışım Oranı (Ağırlıkça)	1 birim A bileşeni : 1 birim B Bileşeni (Ağırlıkça)
Ambalaj	5 kg set
Uygulama Bilgileri	
Sarfiyat	1 m^2 plaka yapıltırmak için 3 – 4 kg
Raf Ömrü	Açılmamış orijinal ambalajında 12 Ay
Kap Ömrü	~ 30 dakika (20°)
Temizlenebilme Süresi	~ 45 dakika (20°)
Yeniden Kaplanabilme Süresi	2-7 gün
Tam Mukavemet	7 gün

Tablo 4.10 Epoksi macun özellikleri (devamı)

Performans Bilgileri	
Yapışma (çeliğe ve betona)	> 4.0 N/mm^2
Eğilmede Çekme Dayanımı (TS EN 196-1)	>25 N/mm^2
Basınç Dayanımı	> 90 N/mm^2

4.4 Deney Düzeneği

Donatısız yığma duvarların yapısal davranışını deneysel olarak araştırmak için, deney numuneleri sabit düşey ve kademeli artan yatay yüke tabi tutularak test edilmişlerdir. Deneysel çalışmada kullanılmak üzere boyutları 220×60×100 (uzunluk×yükseklik×genişlik) mm olan üretici firma tarafından üretilen harman tuğlalar kullanılmıştır. Duvar yükseklik ve uzunluğunun aynı olması için 14 sıra tuğla ve yatayda 15 mm, düşeyde 12.5 mm harç kalınlığı dikkate alınarak, deney duvarları 1040 mm×1040 mm×100 mm boyutlarında seçilmiştir.

4.4.1 Yükleme Düzeneği

Deney duvarları, kolay taşınması ve herhangi bir yerel hasarı önlemek için çelik plaka üzerine inşa edilmişlerdir. Duvarların tabanı üretim esnasında alt başlığa (çelik plakaya) sabitlenmiştir. Yatay yük deneyleri sırasında sabit tutulan 2 N/mm^2'lik düşey yük, çelik çerçeveye sabitlenmiş maksimum 2000 kN yük taşıma kapasiteli düşey hidrolik kriko kullanılarak numunelere uygulanmıştır. Uygulanan düşey yükün üniform olarak dağıtılması için numunelerin üzerine yerleştirilmiş çelik levha kullanılmıştır. Düşey yük uygulandıktan sonra, kademeli artan yatay yük, duvar uygulanan yatay yükü taşıyamayacak duruma gelene kadar, bir hidrolik piston kullanılarak 0.75 kN/s sabit hızda uygulanmıştır. Deneyler sırasında yatay ve düşey yükler, maksimum 500 kN kapasiteli yük hücreleri tarafından sürekli kontrol edilip izlenmiştir. Deney sonuçları bir veri toplama sistemi aracılığıyla otomatik olarak kaydedilmiştir. Yüklemeye düzeneği Şekil 4.11'de verilmiştir.



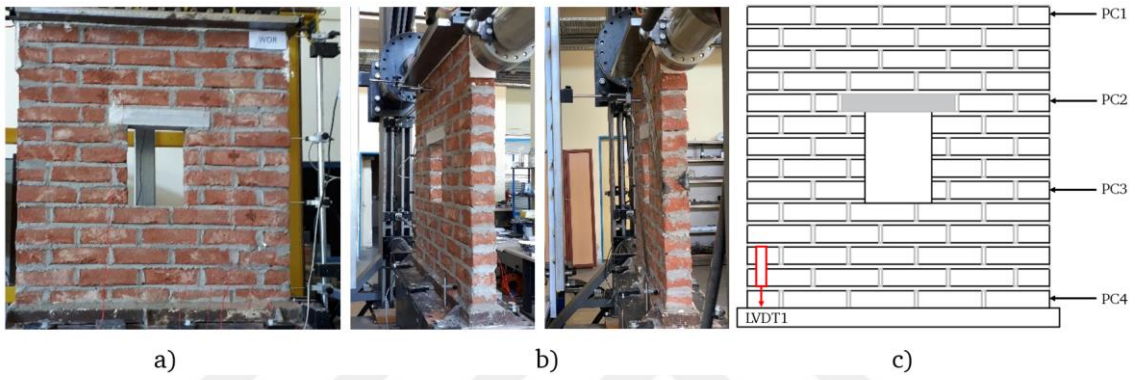
Şekil 4.11 Yükleme düzeneği

4.4.2 Ölçüm Düzeneği

Deney duvarlarının olası düzlem içi ve olası düzlem dışı yer değiştirmelerini ölçmek için Lineer Değişken Diferansiyel Transformatörler (LVDT) kullanılmıştır. Ayrıca, deney duvarlarının yatay yer değiştirmelerini ölçmek için potansiyometrik cetveller (PC1, PC2, PC3 ve PC4) kullanılmıştır. Dolu duvarlarda yatay yük uygulama hizasına yerleştirilen cetvel (PC1) yardımıyla tepe yer değiştirmesi ölçülmüştür. Duvarın mesnetlendiği bölgede yatay bir hareket olup olmadığının gözlenmesi için en alt tuğla sırasına bir cetvel yerleştirilmiştir (PC4) (Şekil 4.12). Boşluklu duvarlarda ise boşluğun üst ve alt tuğla hizasına yerleştirilen cetveller (PC2 ve PC3) yardımıyla boşluk hizasındaki yatay yer değiştirmeler ölçülmüştür (Şekil 4.13). Dolu ve boşluklu deney duvarlarında olası düzlem dışı hareket, yığma duvarların arka tarafına yerleştirilen LVDT ile, duvarların sol alt köşesinde beklenen kalkma miktarı ise söz konusu bölgeye yerleştirilen LVDT ile ölçülmüştür.



Şekil 4.12 Donatısız dolu duvarlar için a) PC'lerin yerleşimi b) LVDT'lerin yerleşimi ve c) İki boyutlu çizim



Şekil 4.13 Donatısız boşluklu duvarlar için a) PC'lerin yerleşimi b) LVDT'lerin yerleşimi ve c) İki boyutlu çizim

4.5 Deney Duvarlarının Karbon Lif Takviyeli Polimer ile Güçlendirilmesi

Karbon lif takviyeli polimer şeritleri, üretici firma tarafından önerilen prosedür kullanılarak üretici firmadan gelen teknik elemanlarla duvarlara uygulanmıştır. Deney duvarlarına karbon lif takviyeli polimer şerit uygulama adımları ileriki bölümlerde detaylıca anlatışmıştır.

4.5.1 Yüzey Hazırlığı

Karbon lif takviyeli polimer uygulamasının yapılabilmesi için şeritlerin uygulanacağı yüzey düzgün olmalıdır. Bu sebeple yüzey problemi varsa iyi kalitede düşük rötreli harç ile yüzey tamiri yapılmalıdır. Uygulama yapılacak yüzeyin temiz, yağsız, boyasız ve bütün gevşek parçacıklardan temizlenmiş olması gerekmektedir. Uygulama adımları başlamadan önce duvarların üzerindeki tozlar ve gevşek parçacıklar tel fırça ile temizlenmiştir. Yüzeyler temizlendikten sonra

duvarlarda karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin uygulanacağı alanların sınırları belirlenmiştir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 Karbon lif takviyeli polimer uygulanacak alanın belirlenmesi

4.5.2 Epoksi Reçinenin Karıştırılması

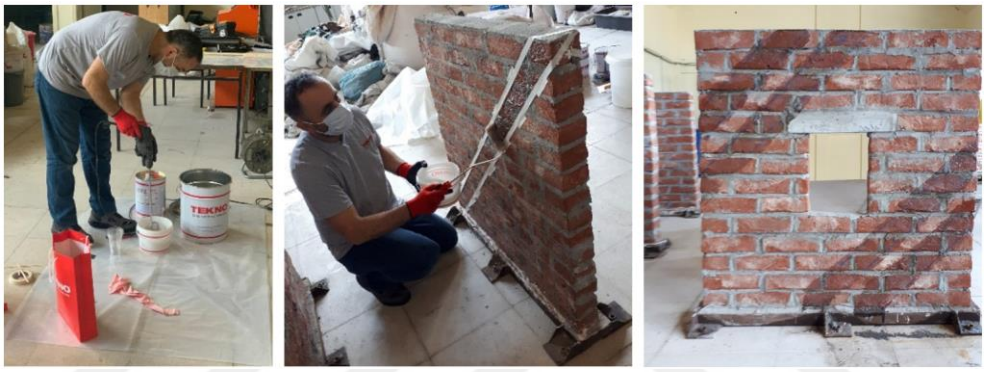
Reçinenin akışkanlığı ve reaksiyon hızı ortam ısısına bağlı olduğundan, karıştırma işlemi sırasında reçinenin sıcaklığı 10 °C -35°C arasında tutulmuştur. Uygulamanın yapılacağı duvar yüzeylerinde rutubet oranının %5'den yüksek olmaması için gerekli tedbirler alınmıştır. Reçineler mümkün olduğu kadar aynı kaplarda karıştırılmıştır. Reçineleri karıştırmak için karıştırma pervanesi ve düşük devirli matkap kullanılmıştır. Kovanın dibinin iyice karıştırıldığına emin oluncaya kadar karıştırma işlemi devam etmiştir. Her duvar için ayrı ayrı miktarda reçine karıştırılıp hazırlanmıştır (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 Reçinelerin karıştırılması

4.5.3 Astar Uygulanması

Uygulamada duvar yüzeylerinde kalmış olabilecek tozu tolere etmek için duvarın karbon lif takviyeli polimer şerit uygulama alanlarına astar uygulanmıştır. Uygulamada kullanılacak astar, bir kova içinde yavaş devirli bir matkap ve karıştırma pervanesi kullanılarak 2 dakika süre ile karıştırılmıştır. Yalnızca bir seferde kullanılabilecek miktarda malzeme karıştırılmasına mümkün olduğunca dikkat edilmiştir. Astar ve sertleştirici belirli oranlarda karıştırılarak homojen karışım elde edilmiştir. Hazırlanan astar rulo ile düzgün bir şekilde güçlendirmenin uygulanacağı alanlara uygulanmıştır (Şekil 4.16).



Şekil 4.16 Karbon lif takviyeli polimer uygulanacak alana astar uygulaması

4.5.4 Tek Yönlü Karbon Lif Takviyeli Polimer Şerit Uygulaması

Karbon lif takviyeli polimer şeritler bir makas yardımıyla istenen ölçülerde kesilmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17 Karbon lif takviyeli polimerin istenilen ölçülerde kesilmesi

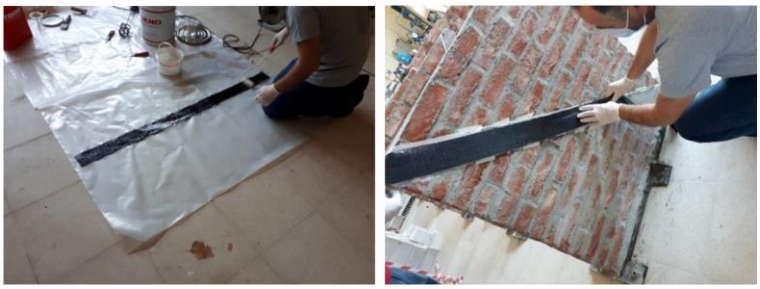
Şeritler kesildikten sonra üretici firma tarafından tedarik edilen Teknobond 300 TIX A bileşeni ile Teknobond 300 TIX B bileşeni belirli oranlarda karıştırılarak homojen tamir harcı elde edilmiştir. Daha önce sürülmüş olan astarın

kurumadığından emin olduktan sonra güçlendirilecek alanları düzgün hale getirmek için mala yardımıyla uygulanmıştır. Kullanılan tamir harcı karbon lif takviyeli polimerin yapışmasını tam olarak sağlayabilmek için belirlenen sınırlardan daha fazla alana uygulanmıştır (Şekil 4.18).



Şekil 4.18 Karbon lif takviyeli polimer uygulanacak alana tamir harcı uygulaması

Makasla istenilen ölçülerde hazırlanan karbon lif takviyeli polimer şeritler epoksi yapıştırıcı ile iyice ıslatıldıktan sonra rulo yardımıyla tamir harcının üzerine uygulanmıştır. Karbon lif takviyeli polimerin içinde kalan hava boşluklarını uzaklaştırmak için ve malzeme içine nüfuzunu artırmak için lastikli dişli rulo ile lifler yönünde üzerinden bastırarak iki üç kez geçilmiştir (Şekil 4.19).

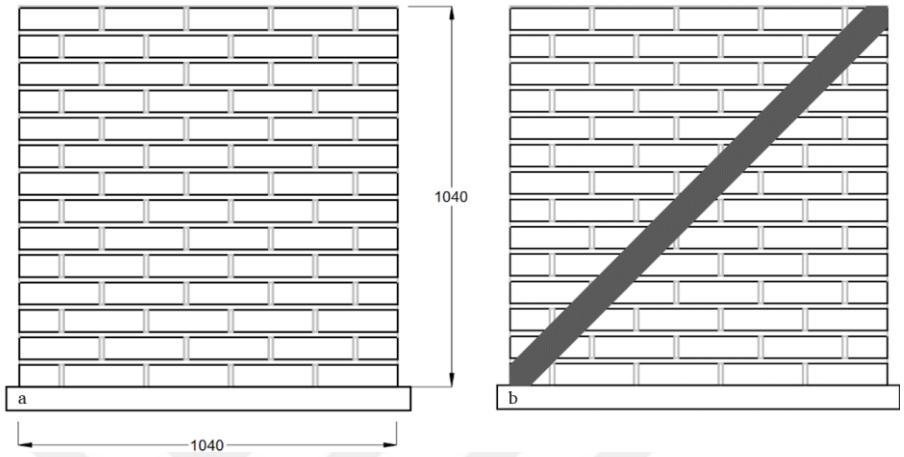


Şekil 4.19 Karbon lif takviyeli polimer uygulaması

4.6 Yükleme Deneyleri

Toplam iki adet donatısız dolu yığma duvar üretilmiştir. Bu duvarlardan biri referans dolu duvar (WR) olarak kabul edilmiştir. Referans dolu duvarı hasar aldıktan sonra her iki yüzü de tek kat tek sıra (WRCS-1) diyagonal karbon lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmiştir. Üretilen diğer dolu duvar ise hasar

almadan önce tek kat tek sıra (WCS-1) diyagonal karbon lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmiştir. Dolu duvar ölçüleri ve güçlendirme şeması sırasıyla Şekil 4.20a ve Şekil 4.20b'de verilmiştir. Burada her siyah şerit bir karbon lif takviyeli polimer şeridini temsil etmektedir. Donatısız dolu duvarlar ile ilgili kısa bir açıklama Tablo 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.20 a) Dolu duvar ölçüleri b) Güçlendirme şeması

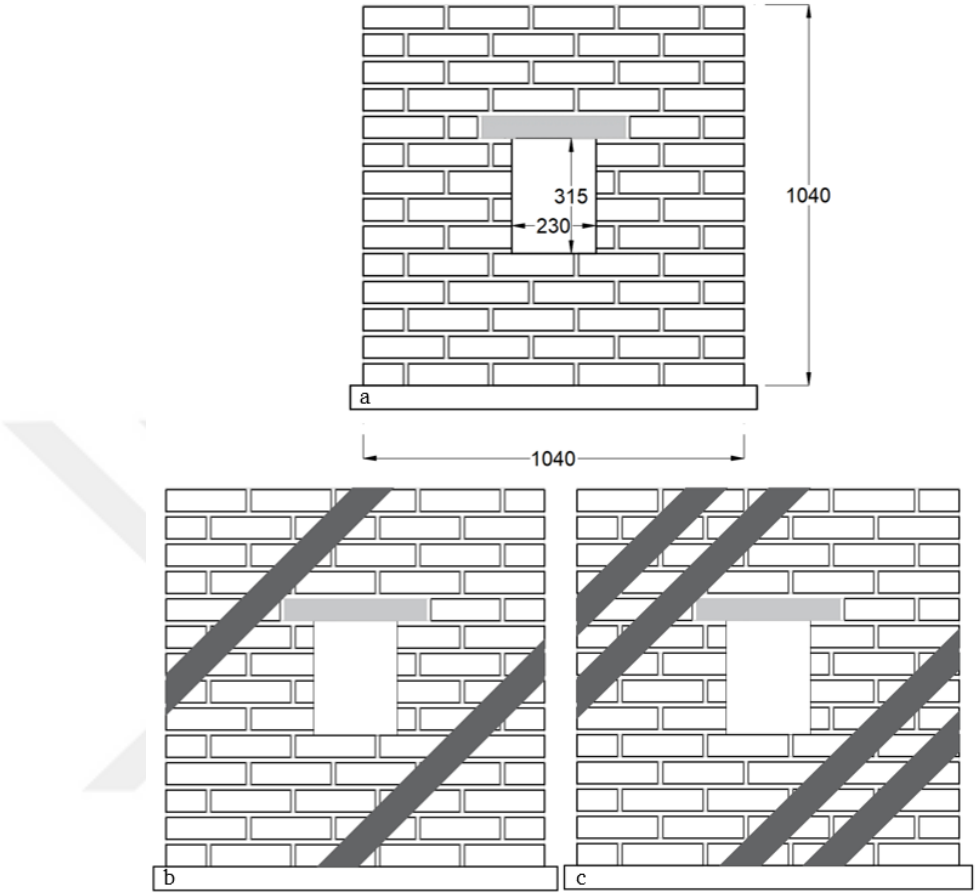
Tablo 4.11 Donatısız dolu duvarların tanımı

	Tanım
WR	Referans dolu duvarı (Şekil 4.20a)
WRCS-1	Hasar aldıktan sonra tek kat tek sıra karbon lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmiş dolu duvar (Şekil 4.20b)
WCS-1	Hasar almadan önce tek kat tek sıra karbon lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmiş dolu duvar (Şekil 4.20b)

Not: W: Duvar; R: Referans; C: Karbon lif takviyeli polimer; S: Tek kat karbon lif takviyeli polimer şerit; 1: Tek sıra karbon lif takviyeli polimer şerit

Toplam beş adet 315×230 mm merkezi boşluğa sahip donatısız boşluklu yığma duvar üretilmiştir. Boşluklu duvarlarda, boşluğun üzerindeki yığma elemanları desteklemek için üretim sırasında boşluğun üzerine (uzunluk×genişlik×yükseklik) 390×100×60 mm ölçülerine sahip beton lento yerleştirilmiştir. Bu duvarlardan biri referans boşluklu duvar (WOR) olarak kabul edilmiştir. Diğer dört duvardan birincisi sırasıyla tek kat tek sıra (WOCS-1), ikincisi çift kat tek sıra (WOCD-1), üçüncüsü tek kat çift sıra (WOCS-2) ve dördüncüsü çift kat çift sıra (WOCD-2) karbon lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmiştir. Boşluklu duvar ölçüleri ve güçlendirme şemaları sırasıyla, Şekil 4.21a, Şekil4.21b ve Şekil 4.21c'de verilmiştir. Burada her siyah şerit bir karbon

lif takviyeli polimer şeridini temsil etmektedir. Tüm duvarlarda her iki yüze de karbon lif takviyeli polimer şerit uygulanmıştır. Donatısız boşluklu duvarlar ile ilgili kısa bir açıklama Tablo 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.21 a) Donatısız boşluklu duvar ölçüleri b) Güçlendirme Şeması 1, c) Güçlendirme Şeması 2

Tablo 4.12 Donatısız boşluklu duvarların tanımı

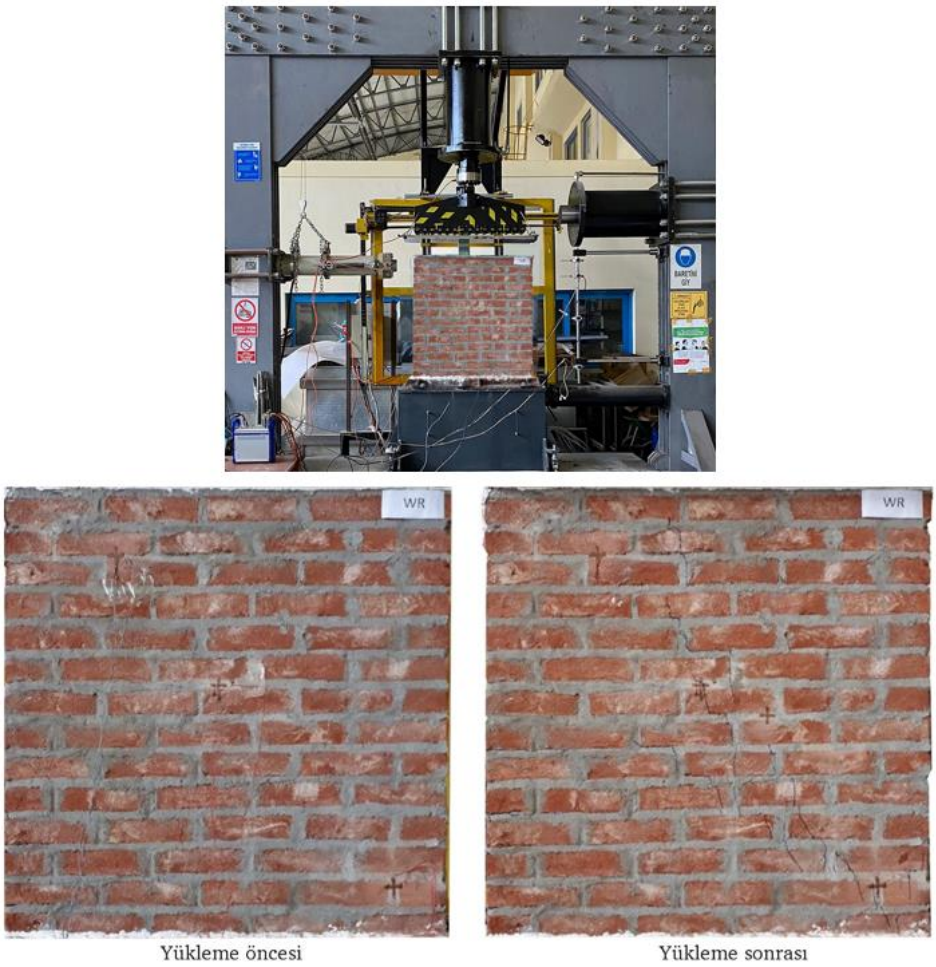
	Tanım
WOR	Referans boşluklu duvarı (Şekil 4.21a)
WOCS-1	Tek kat tek sıra karbon lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmiş boşluklu duvar (Şekil 4.21b)
WOCD-1	Çift kat tek sıra karbon lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmiş boşluklu duvar (Şekil 4.21b)
WOCS-2	Tek kat çift sıra karbon lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmiş boşluklu duvar (Şekil 4.21c)
WOCD-2	Çift kat çift sıra karbon lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmiş boşluklu duvar (Şekil 4.21c)

Not: W: Duvar; O: Boşluk, R: Referans; C: Karbon lif takviyeli polimer; S: Tek kat karbon lif takviyeli polimer şerit; D: Çift kat karbon lif takviyeli polimer şerit; 1: Tek sıra karbon lif takviyeli polimer şerit; 2: Çift sıra karbon lif takviyeli polimer şerit

Karbon lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmiş bütün duvarlarda, şeritlerin başlangıç ve bitiş noktalarına iki kat epoksi kullanılarak basit ankraj sistemi uygulanmıştır. Bu uygulama ankraj görevi gören noktalarda daha güçlü ve dirençli bir bağlantı sağlamıştır.

4.6.1 WR Dolu Duvar

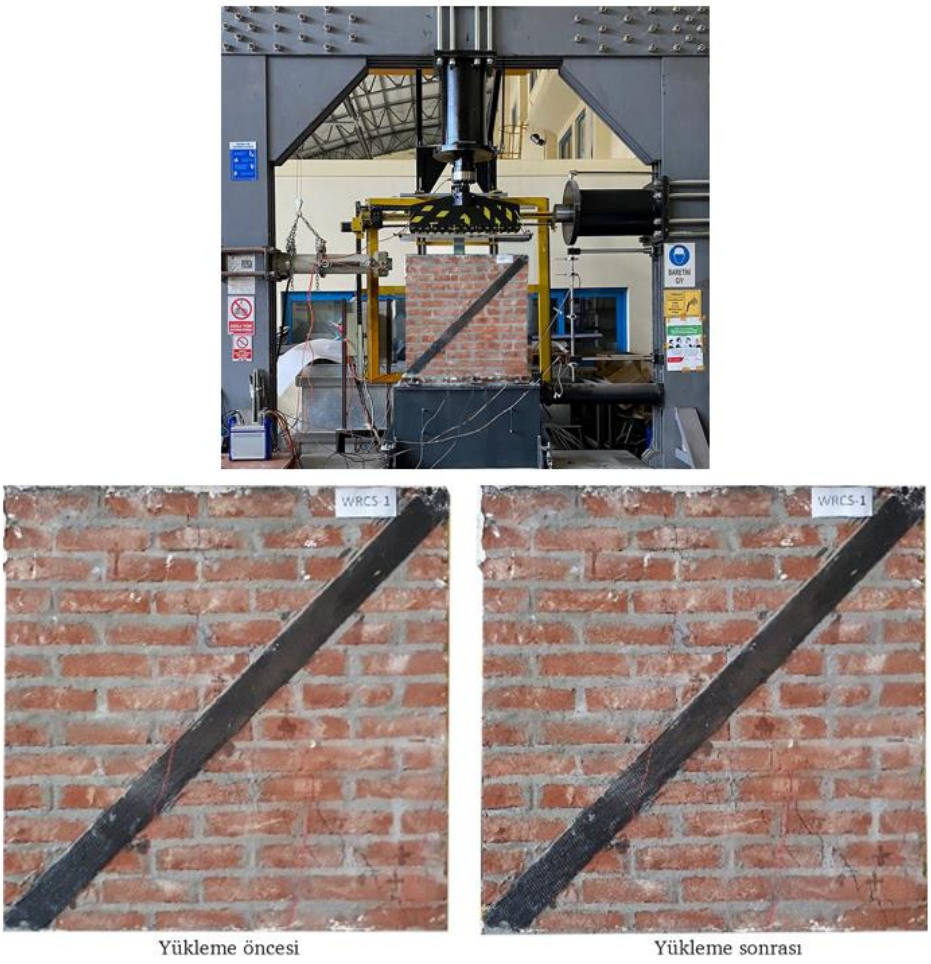
Referans dolu duvarda, yatay yük maksimum yükün yaklaşık olarak %50'sine ulaşana kadar gözle görülür bir çatlak gözlenmemiştir. Ancak yatay yük maksimum değere yaklaştıkça, çatlaklar yatay yük uygulama hizasından başlayıp sağ alt bölgeye doğru diyagonal yönde (45°'lik) belirgin bir şekilde yayılmıştır. Derzlerden başlayan çatlaklar daha sonra tuğlaları da kırarak devam etmiştir. Yatay yük maksimum değere yaklaştıkça çatlaklar genişlemiştir. Yük boşalmaya başladığı andan itibaren deney sonlandırılmıştır (Şekil 4.22).



Şekil 4.22 WR duvarı

4.6.2 WRCS-1 Hasarlı Dolu Duvar

Bu duvar ön ve arka yüzünde, tek kat tek sıra olacak şekilde duvar hasar aldıktan sonra diyagonal olarak 80 mm genişliğinde karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmiştir. Duvarda yeni çatlak gözlenmemiştir. Yatay yük maksimum değere yaklaştıkça çatlaklar en geniş hale ulaşmıştır. Yük boşalmaya başladığı için deney sonlandırılmıştır. Hasar alan duvarın yük taşıma kapasitesinde referans dolu duvara (WR) göre artış gözlenmiştir (Şekil 4.23).

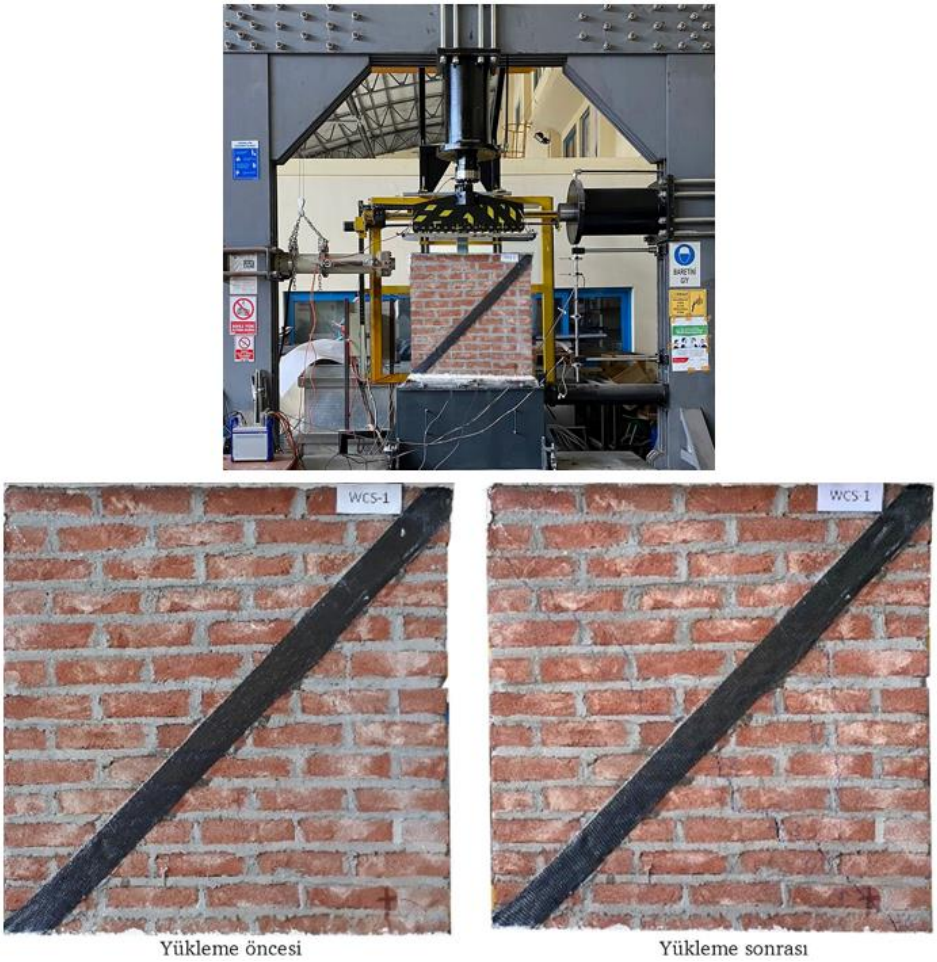


Şekil 4.23 WRCS-1 duvarı

4.6.3 WCS-1 Dolu Duvar

Bu duvar ön ve arka yüzünde, tek kat tek sıra olacak şekilde duvar hasar almadan önce diyagonal olarak 80 mm genişliğinde karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmiştir. Duvarda, yatay yük maksimum yükün yaklaşık olarak %43'üne ulaşana kadar gözle görülür bir çatlak gözlenmemiştir. Ancak yatay yük maksimum değere yaklaştıkça, çatlaklar yatay yük uygulama hizasından başlayıp

sağ alt bölgeye doğru diyagonal yönde (45°'lik) belirgin bir şekilde yayılmıştır. Derzlerden başlayan çatlaklar daha sonra tuğlaları da kırarak devam etmiştir. Yatay yük maksimum değere yaklaştıkça çatlaklar genişlemiştir. Yük boşalmaya başladığı için deney sonlandırılmıştır (Şekil 4.24). Karbon lif takviyeli polimer şertileri, referans dolu duvarına (WR) kıyasla bazı hasarların oluşmasını engellemiştir. WCS-1 duvarının yük taşıma kapasitesinde artış gözlenmiştir.



Şekil 4.24 WCS-1 duvarı

4.6.4 WOR Boşluklu Duvar

Referans boşluklu duvarda, yatay yük maksimum yükün yaklaşık olarak %40'ına ulaşana kadar gözle görülür bir çatlak gözlenmemiştir. Ancak yatay yük maksimum değere yaklaştıkça, çatlaklar boşluğun sol üst köşesinden yatay yükün uygulama noktasına doğru ve boşluğun alt köşesinden duvarın sağ topuk bölgesine doğru diyagonal yönde (45°'lik) belirgin bir şekilde yayılmıştır. Derzlerden başlayan çatlaklar daha sonra tuğlaları da kırarak devam etmiştir.

Yatay yük maksimum değere yaklaştıkça çatlaklar genişlemiştir. Yük boşalmaya başladığı için deney sonlandırılmıştır (Şekil 4.25).



Şekil 4.25 WOR duvarı

4.6.5 WOCS-1 Boşluklu Duvar

Bu duvar ön ve arka yüzünde, tek kat tek sıra olacak şekilde boşluğun sol ve sağ alt köşelerinden duvar yüklenmeden önce diyagonal olarak 80 mm genişliğinde karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmiştir. Duvarda, yatay yük maksimum yükün yaklaşık olarak %46'sına ulaşana kadar gözle görülür bir çatlak gözlenmemiştir. Ancak yatay yük maksimum değere yaklaştıkça, çatlaklar boşluğun alt köşesinden duvarın sağ topuk bölgesine doğru diyagonal yönde (45°'lik) belirgin bir şekilde yayılmıştır. Derzlerden başlayan çatlaklar daha sonra tuğlaları da kırarak devam etmiştir. Yatay yük maksimum değere yaklaştıkça çatlaklar genişlemiştir. Yük boşalmaya başladığı için deney sonlandırılmıştır. Karbon lif takviyeli polimer şeritleri, referans boşluklu duvarına (WOR) kıyasla

bazı hasarların oluşmasını engellemiştir. Ayrıca karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin sıyrılmaya zorlandığı görülmüştür. WOCS-1 duvarının yük taşıma kapasitesinde referans boşluklu duvarına (WOR) kıyasla artış gözlenmiştir (Şekil 4.26).



Şekil 4.26 WOCS-1 duvarı

4.6.6 WOCD-1 Boşluklu Duvar

Bu duvar ön ve arka yüzünde, çift kat tek sıra olacak şekilde boşluğun sol ve sağ alt köşelerinden duvar yüklenmeden önce diyagonal olarak 80 mm genişliğinde karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmiştir. Duvarda, yatay yük maksimum yükün yaklaşık olarak %46'sına ulaşana kadar gözle görülür bir çatlak gözlenmemiştir. Ancak yatay yük maksimum değere yaklaştıkça, çatlaklar boşluğun alt köşesinden duvarın sağ topuk bölgesine doğru diyagonal yönde (45°'lik) belirgin bir şekilde yayılmıştır. Derzlerden başlayan çatlaklar daha sonra tuğlaları da kırarak devam etmiştir. Yatay yük maksimum değere yaklaştıkça

çatlaklar genişlemiştir. Yük boşalmaya başladığı için deney sonlandırılmıştır. Karbon lif takviyeli polimer şeritleri, referans boşluklu duvarına (WOR) kıyasla bazı hasarların oluşmasını engellemiştir. Karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde sıyrılma gözlenmiştir. Karbon lif takviyeli polimer sıyrıldıktan sonra sağ topuk bölgesinde ezilme gözlenmiştir. WOCD-1 duvarının yük taşıma kapasitesinde referans boşluklu duvarına (WOR) kıyasla artış gözlenmiştir. (Şekil 4.27).



Şekil 4.27 WOCD-1 duvarı

4.6.7 WOCS-2 Boşluklu Duvar

Bu duvar ön ve arka yüzünde, tek kat çift sıra olacak şekilde boşluğun sol ve sağ alt köşelerinden duvar yüklenmeden önce diyagonal olarak 80 mm genişliğinde karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmiştir. Duvarda, yatay yük maksimum yükün yaklaşık olarak %45'ine ulaşana kadar gözle görülür bir çatlak gözlenmemiştir. Ancak yatay yük maksimum değere yaklaştıkça, çatlaklar boşluğun alt köşesinden duvarın sağ topuk bölgesine doğru diyagonal yönde

(45°lik) belirgin bir şekilde yayılmıştır. Derzlerden başlayan çatlaklar daha sonra tuğlaları da kırarak devam etmiştir. Yatay yük maksimum değere yaklaştıkça çatlaklar genişlemiştir. Yük boşalmaya başladığı için deney sonlandırılmıştır. Karbon lif takviyeli polimer şeritleri, referans boşluklu duvarına (WOR) kıyasla bazı hasarların oluşmasını engellemiştir. Karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde sıyrılma gözlenmiştir. Karbon lif takviyeli polimer sıyrıldıktan sonra sağ topuk bölgesinde ezilme gözlenmiştir. WOCS-2 duvarının yük taşıma kapasitesinde referans boşluklu duvarına (WOR) kıyasla artış gözlenmiştir (Şekil 4.28).



Şekil 4.28 WOCS-2 duvarı

4.6.8 WOCD-2 Boşluklu Duvar

Bu duvar ön ve arka yüzünde, çift kat çift sıra olacak şekilde boşluğun sol ve sağ alt köşelerinden duvar yüklenmeden önce diyagonal olarak 80 mm genişliğinde karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmiştir. Duvarda, yatay yük maksimum yükün yaklaşık olarak %48'ine ulaşana kadar gözle görülür bir çatlak

gözlenmemiştir. Ancak yatay yük maksimum değere yaklaştıkça, çatlaklar boşluğun alt köşesinden duvarın sağ topuk bölgesine doğru diyagonal yönde (45°'lik) belirgin bir şekilde yayılmıştır. Derzlerden başlayan çatlaklar daha sonra tuğlaları da kırarak devam etmiştir. Yatay yük maksimum değere yaklaştıkça çatlaklar genişlemiştir. Yük boşalmaya başladığı için deney sonlandırılmıştır. Karbon lif takviyeli polimer şeritleri, referans boşluklu duvarına (WOR) kıyasla bazı hasarların oluşmasını engellemiştir. Karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde sıyrılma gözlenmiştir. Karbon lif takviyeli polimer sıyrıldıktan sonra sağ topuk bölgesinde ezilme gözlenmiştir. WOCD-2 duvarının yük taşıma kapasitesinde referans boşluklu duvarına (WOR) kıyasla artış gözlenmiştir (Şekil 4.29).



Şekil 4.29 WOCD-2 duvarı

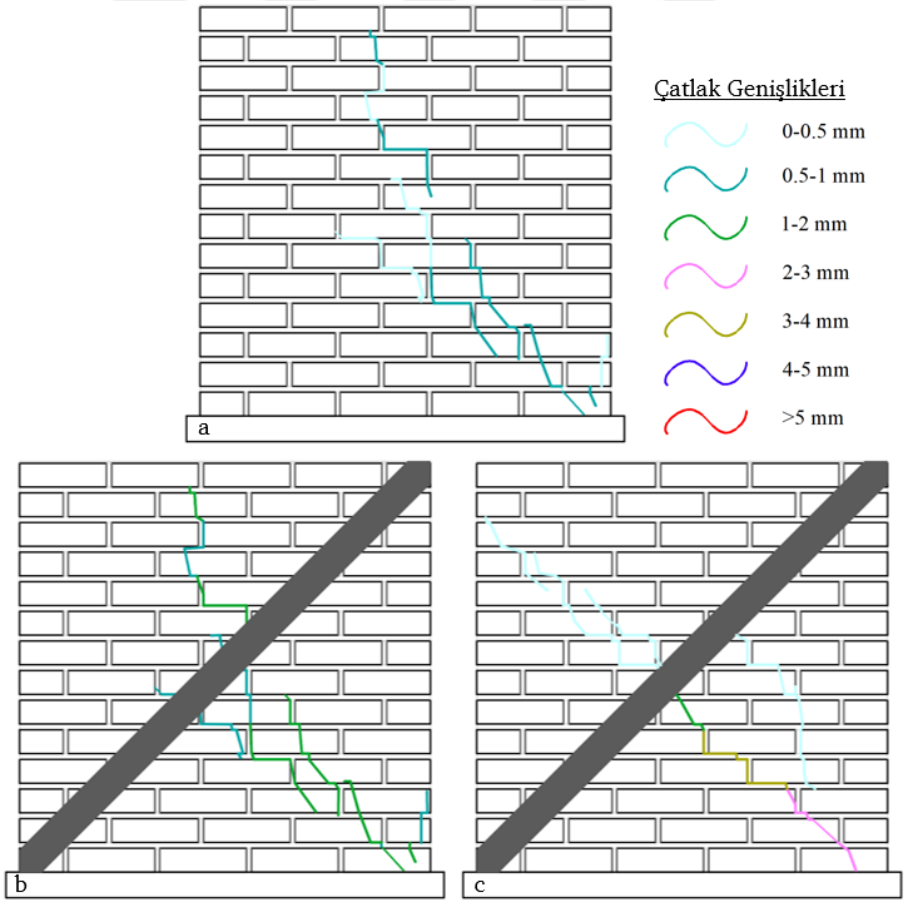
4.7 Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

4.7.1 Çatlak Şekilleri ve Göçme Modları

Düşey ve yatay yük yükleme deneylerinden sonra duvarlarda çatlak genişlikleri ve şekilleri belirlenmiştir. Çatlak genişlikleri kumpas ve çatlak mikroskobu kullanılarak ölçülmüştür.

4.7.1.1 Donatısız Dolu Yığma Duvarlar

Referans deney duvarında (WR), yatay yük yaklaşık olarak 60 kN'a ulaşana kadar gözle görülür bir çatlak gözlenmemiştir. Ancak bu yük aşıldıktan sonra, yatay yük uygulama hizasından başlayıp sağ alt bölgeye doğru 45°'lik gözle görülür çatlaklar (diyagonal çekme çatlakları) oluşmuştur. Yaklaşık merdiven basamağı şeklinde gelişen ve derzden başlayan çatlaklar tuğlaları da kırarak devam etmiştir. Yatay yük maksimum değere yaklaştıkça çatlak genişlikleri de artmıştır (Şekil 4.30a). Yük boşalmaya başladığı andan itibaren deney sonlandırılmıştır.



Şekil 4.30 Çatlak şekilleri a) WR, b) WRCS-1 c) WCS-1

Tek kat tek sıra karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle hasar alıp (WRCS-1) ve hasar almadan (WCS-1) güçlendirilmiş olan dolu deney duvarlarında göçme, diyagonal kesme kırılması ile gerçekleşmiştir. WCS-1 duvarı için yatay yük yaklaşık olarak 80 kN'a ulaşana kadar gözle görülür çatlaklar oluşmamıştır. Ancak bu yük aşıldıktan sonra diyagonal kesme çatlakları oluşmuştur ve derzden başlayan kırılma tuğlaları da çatlatarak ve kırarak devam etmiştir (Şekil 4.30b, Şekil 4.30c).

Topuk bölgesinde basınç gerilmeleri nedeniyle ezilmenin de gözlendiği duvarlar için deney sonuçları özet şeklinde Tablo 4.13'te verilmiştir. Tabloda yer alan V_{fcr} ilk çatlağın oluştuğu yatay yük, δ_{cr} ilk çatlağın oluştuğu yatay yüke karşılık gelen yatay yer değiştirme, V_{max} maksimum yatay yük, δ_{max} maksimum yatay yüke karşılık gelen yatay yer değiştirmedir. Bütün duvarlarda diyagonal kesme göçme modu gözlenmiştir. WRCS-1 duvarında referans dolu duvara göre çatlak figüründe herhangi bir değişiklik gözlenmemiştir. Duvarda yeni çatlak görülmemiştir. Çatlak genişlikleri referans duvara göre tedricen artmıştır.

Tablo 4.13 Dolu duvarlarda deney sonuçları

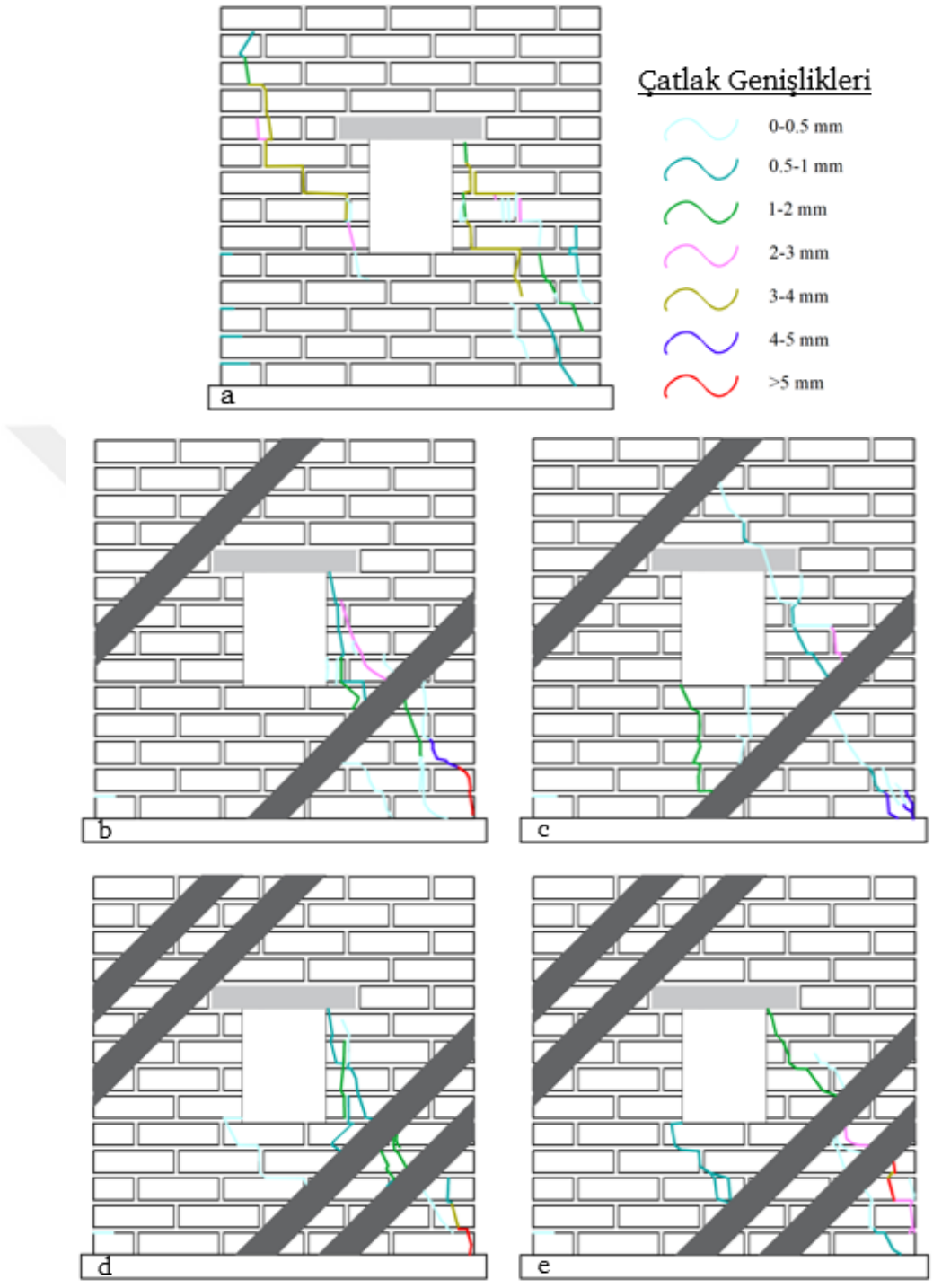
Duvarlar	V_{fcr} (kN)	δ_{cr} (mm)	V_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	δ_{nihai} (mm)	Çatlak Şekli	Göçme Modu[1]
WR	60	1.42	125.00	8.65	8.65	DÇ	DK
WRCS-1	-	-	158.00	12.22	12.22	DÇ	DK, TE
WCS-1	80	2.30	184.00	16.60	16.60	DÇ	DK, TE

Not: [1]DÇ: Diyagonal çatlak; DK: Diyagonal kesme; TE: Topuk ezilmesi

4.7.1.2 Donatısız Boşluklu Yığma Duvarlar

Donatısız boşluklu referans duvarında (WOR) yatay yük 35 kN'a ulaştığında boşluğun sağ alt ve sol üst bölgelerinde çatlakların oluşmaya başladığı gözlenmiştir. Yatay yük artıkça, çatlaklar diyagonal doğrultuda duvarın sağ alt köşesi ve sol üst köşesinde giderek belirgin hale gelmiştir. Uygulanan yatay yük 75-80 kN civarına ulaştığında duvarın sağ alt bölgesine yakın tuğlalarda basınç gerilmeleri nedeniyle dikey yönde çatlakların oluştuğu görülmüştür. Ayrıca,

duvarın sol alt bölgesindeki ilk üç sıradaki yatay harçlarda çekme gerilmeleri nedeniyle yatay çatlaklar oluşmuştur (Şekil 31a).



Şekil 4.31 Çatlak şekilleri a) WOR b) WOCS-1, c) WOCD-1, d) WOCS-2, ve e) WOCD-2

Güçlendirilmiş boşluklu duvarlarda (WOCS-1, WOCD-1, WOCS-2, WOCD-2) karma göçme modu gözlenmiştir. Yatay yük 60-80 kN aralığına ulaşana kadar gözle görülür çatlaklar oluşmamıştır. Ancak bu yük sınırı aşıldığında, diyagonal

kesme çatlakları oluşmaya başlamıştır. Ayrıca güçlendirilmiş duvarlarda duvarın sol alt bölgesindeki ilk sıradaki harçta çekme gerilmeleri nedeniyle yatay çatlaklar gözlenmiştir. Yatay yük kademeli olarak artırıldığından dolayı, diyagonal çatlaklar kılcal düzeyde tuğlalardan ve harçtan geçerek duvarın sağ alt bölgesine doğru yayılmıştır (Şekil 4.31b-e). Bunlara ilave olarak duvarların sağ köşesindeki tuğlaların (topuk bölgesi) basınç gerilmeleri altında ezildiği gözlenmiştir. WOCS-1 duvarında sağ alt bölgede diyagonal kesme kırılması ve topuk ezilmesi olarak karakterize edilen karma göçme modu gözlenirken, WOCD-1, WOCS-2 ve WOCD-2 duvarlarında karbon lif takviyeli polimer sıyrılması ve topuk ezilmesi göçme modları gözlenmiştir (Şekil 4.32).



Şekil 4.32 Karbon lif takviyeli polimer sıyrılması ve topuk ezilmesi göçme modları

Referans boşluklu duvar ile güçlendirilmiş boşluklu duvarlara ait deneysel sonuçlar özet şeklinde Tablo 4.14'te verilmiştir. Güçlendirilmiş duvarlarda referans boşluklu duvara göre çatlak şekilleri ve göçme modunda değişiklikler gözlenmiştir. Deney sonucunda, güçlendirilmiş boşluklu duvarlara ait mekanizma durumu incelendiğinde, referans duvarın sol üst bölgesinde oluşan çatlakların oluşmadığı görülmüştür. Güçlendirilmiş duvarlarda, boşluğun sağ bölgesinde bulunan çatlak genişliklerinin referans duvarında aynı bölgede tespit edilen çatlak

genişliklerinden daha az olduğu olduğu görülmüştür. Anılan çatlakların genişlikleri 1-2 mm aralığındayken, referans duvarda 3-4 mm aralığındadır. Ancak söz konusu duvarlarda topuk bölgesinde bulunan çatlak genişliklerinin referans duvarında aynı bölgede tespit edilen çatlak genişliklerinden daha fazla olduğu görülmüştür. Anılan çatlak genişlikleri 4-5 mm aralığındayken, referans duvarda 0.5-1 mm aralığındadır. Karbon lif takviyeli polimer kalınlığı arttıkça diyagonal kesme çatlaklarının azaldığı görülmüştür. Diğer taraftan boşluğun etrafındaki çatlaklarda çatlak genişlikleri azalma eğilimindedir. Ayrıca, topuk bölgesinde, karbon lif takviyeli polimer kalınlığı arttıkça çatlak genişliğinin de arttığı görülmüştür. Kısmi sargılama yapıldığı için karbon lif takviyeli polimer kalınlığı ve yüzey alanının artması durumunun göçme modları üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı belirlenmiştir. Karbon lif takviyeli polimer yüzey alanının artmasıyla sadece boşluk etrafında bulunan çatlak genişliklerinin azaldığı görülmüştür.

Tablo 4.14 Boşluklu duvarlarda deney sonuçları

Duvarlar	V_{fcr} (kN)	δ_{cr} (mm)	V_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	δ_{nihai} (mm)	Çatlak Şekili	Göçme Modu[1]
WOR	35	1.25	87	11.85	11.85	DÇ	DK
WOCS-1	61	1.33	133	8.05	12.70	DÇ	DK, TE
WOCD-1	69	1.83	151	11.51	15.00	DÇ	FS, TE
WOCS-2	72	2.00	158	14.40	14.40	DÇ	FS, TE
WOCD-2	78	2.00	163	10.50	16.48	DÇ	FS, TE

Not: [1]DÇ: Diyagonal çatlak; DK: Diyagonal kesme; TE: Topuk ezilmesi; FS: lif takviyeli polimer sıyrılması

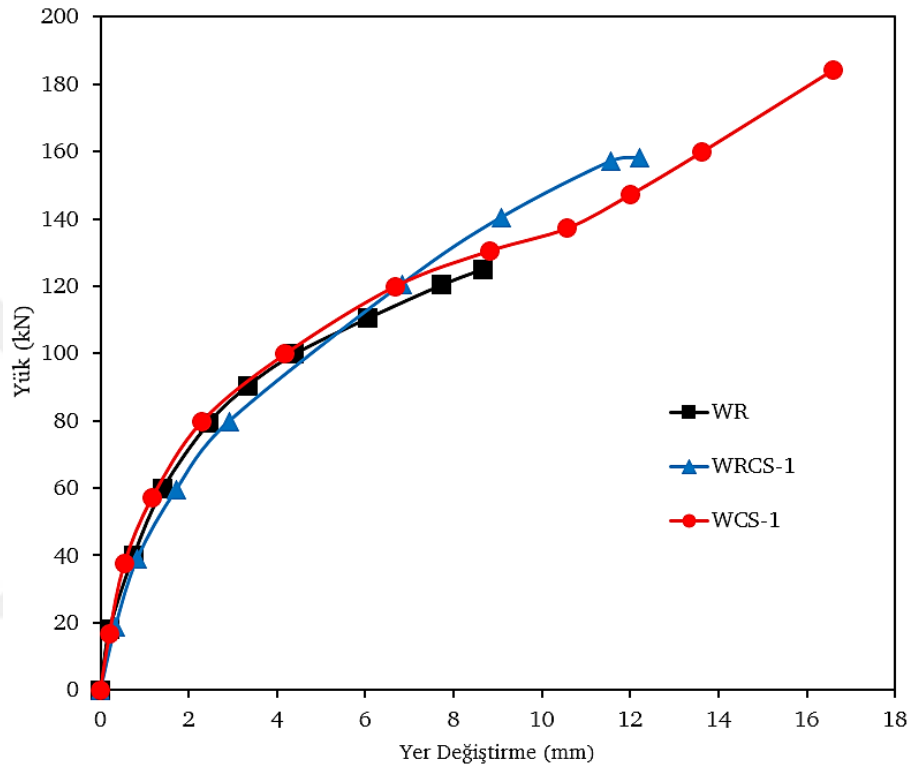
4.7.2 Yük-Yer Değiştirme İlişkileri

Düşey ve yatay yük yükleme deneylerinden sonra elde edilen duvar tepe noktası yer değiştirmeleri ile maksimum yük taşıma kapasiteleri arasındaki ilişki incelenmiştir.

4.7.2.1 Donatısız Dolu Yığma Duvarlar

WCS-1 duvarında ilk çatlağın oluştuğu yatay yük ve bu yüke karşı gelen yatay yer değiştirme değerinde referans duvarına (WR) göre sırasıyla %33 ve %62 oranında artış görülmüştür. WR duvarı için maksimum yatay yük yaklaşık 125 kN'dur;

WRCS-1, WCS-1, duvarlarının yük taşıma kapasitesinde sırasıyla %26, ve %47 artış görülmüştür (Şekil 4.33). WRCS-1 duvarında nihai yer değiştirme referans dolu duvara kıyasla %41 oranında artış gözlenirken, WCS-1 duvarında bu artış oranı yaklaşık %92' dir. Dolu duvarlarda karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirmenin maksimum yatay yük ve bu buna karşı gelen yatay yer değiştirme üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

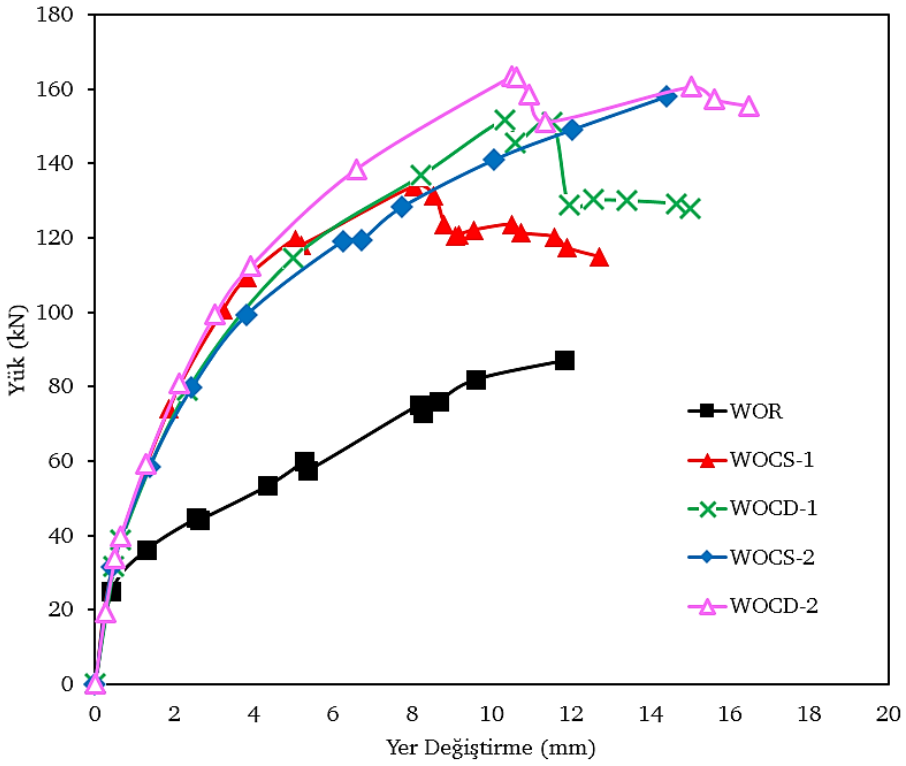


Şekil 4.33 Donatısız dolu duvarların yatay yük- yatay yer değiştirme eğrileri

4.7.2.2 Donatısız Boşluklu Yığma Duvarlar

Karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş duvarlarda ilk çatlağın oluştuğu yatay yük ve bu yüke karşı gelen yatay yer değiştirmelerde refarans duvarına göre önemli oranda artış görülmüştür. Referans duvarla karşılaştırıldığında, güçlendirilen duvarlarda, ilk çatlağın oluştuğu yatay yükün %74-123 oranında ve bu yüke karşı gelen yatay yer değiştirmelerde %6-60 oranında artış olduğu gözlenmiştir. WOR duvarında maksimum yatay yük değeri 87 kN'dur; WOCS-1, WOCD-1, WOCS-2, ve WOCD-2 duvarlarının maksimum yatay yük değerlerinde sırasıyla %53, %74, %82 ve %88 oranlarında artış görülmüştür (Şekil 4.34).

Beklendiği üzere, karbon lif takviyeli polimerin kalınlığı ve yüzey alanı artışının duvar tepe noktası yer değiştirmesini artırdığı görülmüştür (Şekil 4.34). Güçlendirilmiş duvarlarda nihai yer değiştirmelerde WOCS-1 duvarı için %7, WOCD-1 duvarı için %27, WOCS-2 duvarı için %22, ve WOCD-2 duvarı için %39 oranında artış gözlenmiştir. Karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirmenin maksimum yatay yük ve buna karşı gelen yatay yer değiştirme üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.34 Boşluklu duvarların yatay yük ve yatay yer değiştirme eğrileri

4.7.3 Güçlendirme Oranı Etkisi

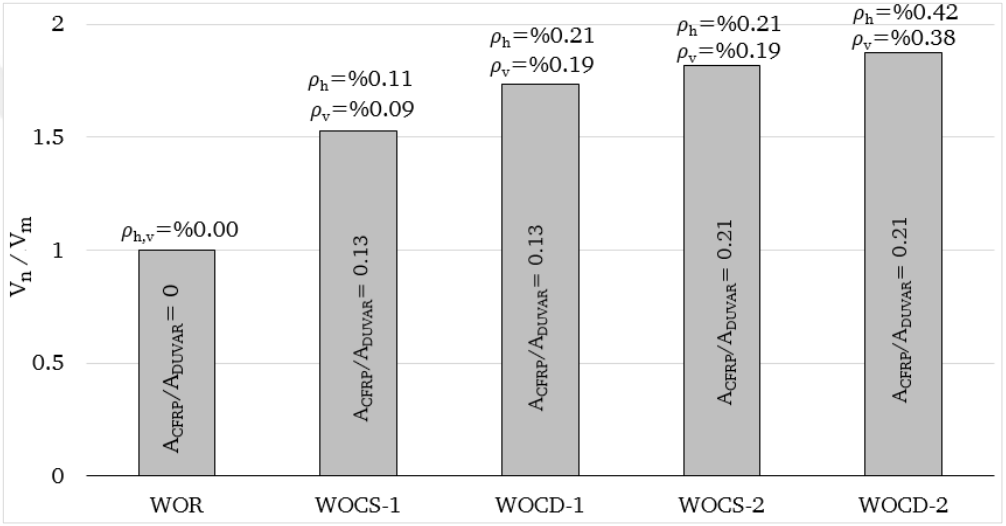
Referans dolu duvarda farklı kalınlık ve farklı yüzey alanlarına sahip karbon lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilen duvarlar mevcut olmadığından güçlendirme oranının etkisi incelenmemiştir.

Referans duvara kıyasla güçlendirilen duvarların yatay yük değerlerindeki artış, güçlendirme oranlarının da verildiği Şekil 4.35'te toplu olarak gösterilmiştir. Güçlendirme oranı, ρ_h ve ρ_v Denklem (4.4) ile tanımlanmaktadır [39].

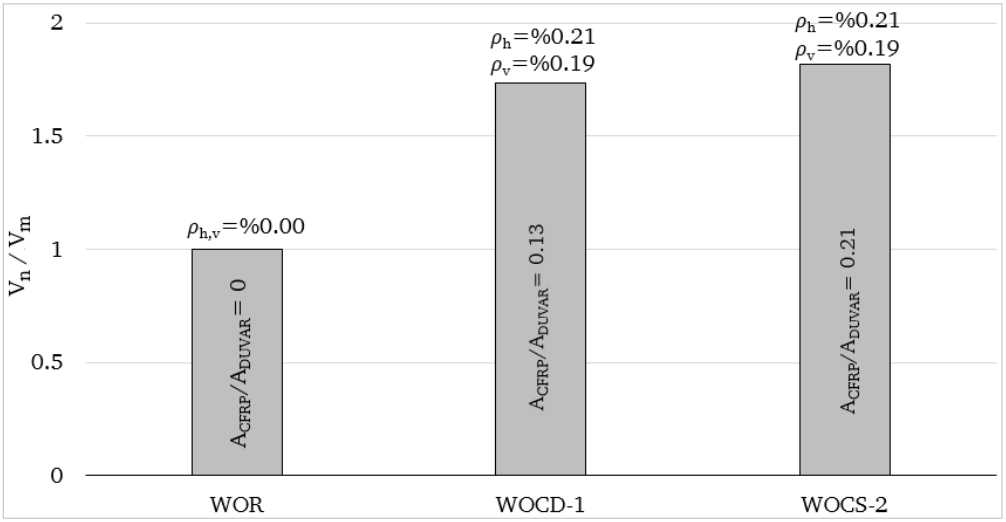
$$\rho_h = \frac{n\, t_f w_h}{Ht} \qquad \rho_v = \frac{n\, t_f w_v}{Lt} \tag{4.4}$$

burada n lif takviyeli polimer şerit sayısını; t_f lif takviyeli polimer kalınlığını; $w_{h,v}$ yatay ve düşey eksenlere dik lif takviyeli polimer şeritlerin toplam genişliğini; H duvar yüksekliğini; L duvar genişliğini; ve t duvar kalınlığını göstermektedir.

Aynı güçlendirilme oranına sahip tek kat dört şerit uygulaması yapılan deney duvarının (WOCS-2) çift kat iki şerit uygulaması yapılmış olan deney duvarına (WOCD-1) kıyasla daha yüksek yatay yük değerlerine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 4.36). Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da V_n, karbon lif takviyeli polimer şeritler ile güçlendirilmiş duvarların nominal kesme dayanımı ve V_m, yalın referans boşluklu duvarın kesme dayanımıdır.



Şekil 4.35 Boşluklu duvarlarda yatay yük artışı ve güçlendirme oranları



Şekil 4.36 Aynı güçlendirme oranına sahip boşluklu duvarlarda yatay yüklerdeki artış

5
SAYISAL MODELLEME

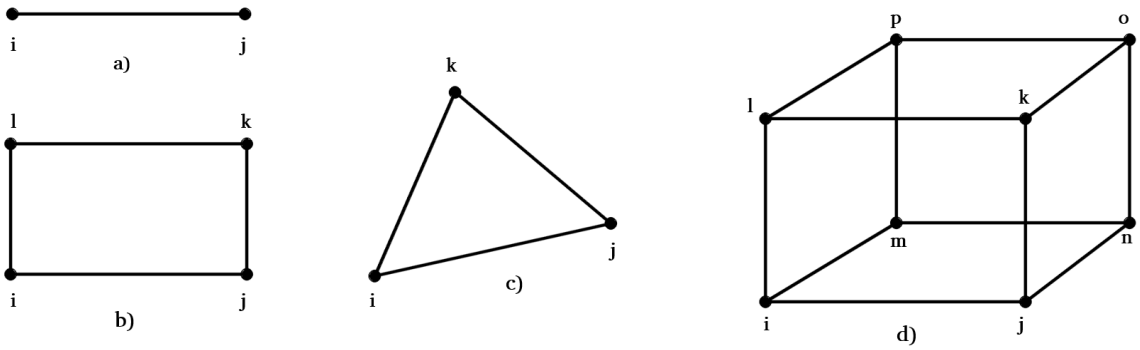
Yapıların ve/veya yapı elemanlarının onarım ve güçlendirmesi ile ilgili gerçekleştirilmiş deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bulguların, konu ile alakalı mühendislik uygulamalarına ışık tutacak olması oldukça önemlidir. Ancak uzun zaman ve yüksek maliyet gerektirmesi gibi zorlukları da mevcuttur. Deneysel çalışmanın mevcut zorluklardan dolayı günümüzde, özellikle yapı elemanlarının tasarımında sayısal modelleme çalışmaları giderek artmaktadır. Sayısal modelleme deneysel çalışmalara göre daha az zaman alıcı, daha az maliyet gerektirmesi, insan gücüne daha az ihtiyaç duyması açısından büyük bir avantaja sahiptir. Diğer taraftan, sayısal modellemede seçilen bünye modellerinin çözümde ihtiyaç duyduğu parametrelerin kalibrasyonu da oldukça önemlidir. Dolayısıyla önerilen sayısal modelin analizlerde ihtiyaç duyacağı malzeme parametrelerinin literatürde mevcut deney sonuçlarından faydalanarak doğrulanması gerekmektedir. Yığma duvarlar, kendisini oluşturan her bir bileşenin homojen olmayan doğası ve farklı mekanik özellikleri nedeniyle, doğrusal olmayan davranış sergilemektedir. Sürekli bir ortam oluşturmazlar ve düşey-yatay yükler altındaki mekanik davranışları oldukça karmaşıktır. Yığma duvarların üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile analizi için doğru ve kapsamlı bir sayısal model geliştirmek, yapı mühendislerini oldukça zorlamaktadır. Yığma duvarların doğrusal olmayan davranışını gerçekçi bir şekilde simüle etmek için geliştirilen sayısal modelleme tekniklerinde son yıllarda önemli gelişmeler olmuştur ve daha da geliştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir.

5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, birçok mühendislik problemini kabul edilebilir bir yaklaşımla çözmeye çalışan bir sayısal çözüm yöntemidir. İlk olarak 1950'li yıllarda İnşaat Mühendisliği alanında etkin bir şekilde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi, düşey ve yatay yüklere maruz yığma duvarları gerçekçi varsayımlar altında çözümleyebilmeyi ve son derece karmaşık olan yapısal davranışını belirli bir doğruluk düzeyinde tahmin edebilmeyi sağlar.

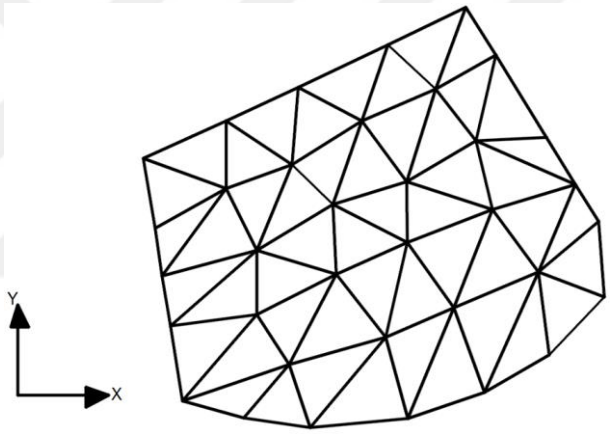
Karmaşık sistemlerin modellenebilmesi, doğrusal ve/veya doğrusal olmayan karmaşık malzeme özelliklerine sahip sistemlere kolaylıkla uygulanabilmesi, her türlü sınır şartının, temel denklemler oluşturulduktan sonra satır sütun işlemleriyle denklem sistemine empoze edilebilmesi açılarından oldukça avantajlı bir yöntemdir. Karşılaşılan mühendislik problemlerinin çok küçük bir kısmına analitik yöntemler kullanılarak çözüm önerilebilir. Analitik çözümler, fizik problemlerinin daha basit ve sade olarak ifade edilmiş matematik modelleri için elde edilebilir. Fakat, karmaşık ve süreksiz sınır koşulları, üniform olmayan yükleme durumları, düzgün olmayan geometri, doğrusal olmayan malzeme davranışı gibi durumlar söz konusu olduğunda problemin çözümü zorlaşmaktatır. Sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla söz konusu durumların mevcut olduğu çoğu mühendislik problemleri çok daha kolay çözülebilir.

Mühendislikte sınır değer problemlerine belirli bir yaklaşıkta çözüm arayan bir hesaplama tekniği olan sonlu elemanlar yönteminin esası, çözümü aranan sürekli veya süreksiz bir ortamı çok sayıda küçük sonlu elemanlara bölerek analiz yapmaktır. Sonlu elemanların oluşturduğu yapıya ağ (mesh) adı verilir. Bu elemanlar bir, iki veya üç boyutlu olabilirler ve birbirine düğüm noktası adı verilen noktalarda bağlanmaktadırlar (Şekil 5.1). İki boyutlu (2D) elemanlar levha, ince plak, ince kabuk hesabında kullanılırlar. Üç boyutlu (3D-solid) elemanlar kalın plak, kalın kabuk, baraj gövdesi, kalın radye gibi üç boyutlu gerilme analizinin gerekli olduğu yapı elemanlarında kullanılırlar.



Şekil 5.1 Sonlu eleman örnekleri a) Bir boyutlu çubuk eleman, b) İki boyutlu dikdörtgen eleman, c) İki boyutlu üçgen eleman, d) Üç boyutlu dikdörtgen prizma(tuğla) eleman

Genellikle çözümü aranan bölgenin doğru ve kabul edilebilir hassassiyetle çözümünün elde edilmesi için birbirinden farklı pek çok sonlu eleman ağının denenmesi gerekebilmektedir. Sonlu elemanlara ayırma işlemi ve çözüm bölgesinin oluşturulması eleman sayısı arttıkça hem hata yapma oranını artırmakta hem de zaman alıcı olmaktadır. Bu sebeple elemanlara bölme işleminin otomatik olarak bazı paket programlar tarafından yapılması için pek çok yöntem geliştirilmiştir. Düzensiz bir geometriye sahip bir levhanın üçgen sonlu elemanlarla ayrıklaştırılması, veya idealleştirilmesi, Şekil 5.2'de verilmiştir. Düzensiz geometriye sahip söz konusu levhanın sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilem çözüm sonucunda aranan x ve y doğrultusundaki yer değiştirmeler gibi büyüklüklerin düğüm noktalarındaki sayısal değerleri elde edilecektir.



Şekil 5.2 Düzensiz geometriye sahip bir lehvanın üçgen sonlu elemanlarla idealleştirilmesi

5.2 Bünye Modelleri

Bir malzemenin hangi yük sınırında plastik hale geçeceği veya hangi gerilme değeri için kırılacağının bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Söz konusu malzemeler için bu sınır (kritik) değerlerin bilinmesi ancak basit çekme ve basit basınç gibi bir eksenli gerilme altında yapılacak deneysel çalışmalarla mümkün olmaktadır. Ancak uygulamada bu malzemeler daha çok iki veya üç eksenli gerilme halinin etkisindedir. Böyle birleşik zorlamanın olduğu durumlarda malzemenin hangi akma ve kırılma değerine kadar dayanacağını belirlemek zordur. Çünkü birleşik gerilme halinin sınırsız çeşidi olup bütün haller için kritik

değerlerin deneysel yolla elde edilmesi mümkün olmayabilir. Bu nedenle bir eksenli gerilme haliyle üç eksenli gerilme halini akma sınırı gibi kritik değerler yönünden karşılaştıran kriterlere ihtiyaç duyulmaktadır [103].

Akma kriteri, akmanın gerçekleşeceği koşulları tanımlayan gerilme ve şekil değiştirme enerjisi gibi belirli nicelikler cinsinden ifade edilebilir. Akma kriteri, genellikle bir akma fonksiyonu $f(\sigma_{ij}, Y)$ aracılığıyla matematiksel bir biçimde ifade edilir. Akma fonksiyonunda yer alan σ_{ij} bir gerilme durumunu tanımlar ve Y tek eksenli gerilme (çekme veya basınç) durumunda akma dayanımıdır. Akma fonksiyonu, $f(\sigma_{ij}, Y) = 0$ olduğunda akma kriteri sağlanacak şekilde tanımlanır. $f(\sigma_{ij}, Y) < 0$ ise gerilme durumu elastiktir, $f(\sigma_{ij}, Y) > 0$ olduğu durum ise tanımsızdır. Akma fonksiyonunu oluşturmak için, çok eksenli gerilme durumunun bileşenleri, efektif gerilme (σ_e) olarak bilinen tek bir nicelikte birleştirilir. Daha sonra efektif gerilme, akma olup olmadığını belirlemek için uygun bir biçimde akma gerilmesi (Y) ile karşılaştırılır [104].

Akma kriteri kavramını açıklamaya yardımcı olmak için akma yüzeyi kavramı kullanılır. Akma yüzeyi, akma fonksiyonunun grafiksel karşılığıdır. Bu sebeple, akma kriterinin sağlandığı ($f = 0$) gerilme durumlarının yerinin karşılığıdır. Üç boyutlu gerilme durumu için, akma yüzeyi asal gerilme uzayında çizilir. Yani, akma yüzeyi, birbirine dik üç eksenin koordinatları olarak sırasız asal gerilmeler $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ kullanılarak çizilir [104]. Aşağıdaki bölümlerde, çeşitli akma kriterleri ve bunlarla ilişkili akma fonksiyonları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

5.2.1 Maksimum Kayma Gerilmesi Kriteri

Tresca kriteri olarak da bilinen maksimum kayma gerilmesi kriteri, bir noktadaki maksimum kayma gerilmesi tek eksenli yükleme (çekme veya basınç) sonucunda elde edilen maksimum kayma gerilmesi değerine eşit olduğunda akmanın başladığını belirtir. Çok eksenli gerilme durumu için maksimum kayma gerilmesi $\tau_{max} = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$'dir; burada σ_{max} ve σ_{min} sırasıyla en büyük ve en küçük asal gerilme bileşenleri göstermektedir. Tek eksenli gerilme durumunda ($\sigma_1 = \sigma$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$), maksimum kayma gerilmesi $\tau_{max} = \sigma/2$'dir. Tek eksenli gerilme durumunda akma $\sigma = Y$ olduğunda başlamak zorunda olduğundan, akma ile

ilişkili kayma gerilmesinin $\tau_Y = Y/2$ olduğu düşünülmektedir. Böylece, maksimum kayma gerilmesi kriteri için akma fonksiyonu şu şekilde tanımlanabilir:

$$f = \sigma_e - \frac{Y}{2} \tag{5.1}$$

burada, σ_e efektif gerilmedir ve Denklem (5.2) ile ifade edilir:

$$\sigma_e = \tau_{max} \tag{5.2}$$

Maksimum kayma gerilmelerinin alabileceği değerler Denklem (5.3)'te verilmiştr.

$$\tau_1 = \frac{|\sigma_2 - \sigma_3|}{2};\ \tau_2 = \frac{|\sigma_3 - \sigma_1|}{2};\tau_3 = \frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{2} \tag{5.3}$$

Maksimum kayma gerilmesi (τ_{max}) τ_1, τ_2 ve τ_3'ten en büyük olanıdır. Asal gerilmeler düzensiz ise, Denklem (5.4)'te verilen koşullardan herhangi biri için çok eksenli gerilme durumunda akma meydana gelebilir:

$$\sigma_2 - \sigma_3 = \pm Y;\ \sigma_3 - \sigma_1 = \pm Y; \sigma_1 - \sigma_2 = \pm Y \tag{5.4}$$

Maksimum kayma gerilmesi kriteri için akma yüzeyi, asal gerilme uzayında düzgün altıgendir (Şekil 5.3). Tresca kriteri, bazı sünek metaller için deneysel sonuçlarla iyi bir uyum sergilemektedir. Ancak, bazı sünek malzemelerin akma noktasındaki maksimum kayma gerilmesinin (τ_Y), Tresca kriteri tarafından belirlenen değerden yaklaşık olarak %15 daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu nedenle, Tresca kriteri bu metaller için konservatiftir. Bununla birlikte, kullanımı oldukça doğru ve hesaplama açısından basit olduğu için, maksimum kayma gerilmesi kriteri, çoğu sünek metal için makul bir seçimdir [104].

5.2.2 Şekil Değiştirme Enerjisi Kriteri

Genellikle von Mises akma kriteri olarak bilinen şekil değiştirme enerjisi kriteri, bir noktaki şekil değiştirme enerjisinin, tek eksenli gerilme durumunda (çekme veya basınç) elde edilen akmada şekil değiştirme enerjisine eşit olduğunda akmanın başladığını ifade eder. Toplam şekil değiştirme enerjisi (U_0), hacimsel değişime neden olan (U_V) enerji ve şekil değişimine sebep olan (U_D) enerjinin toplamıyla oluşur [104].

$$U_0 = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2}{18K} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{12G} \tag{5.5}$$

burada, K hacimsel modül ($K = E/[3(1-2v)]$) ve G kayma modülüdür ($G = E/[2(1+v)]$). Denklem (5.5)'te verilen ifadenin ilk kısmı U_V ve ikinci kısmı U_D'dir. Tek eksenli gerilme durumunda akmada ($\sigma_1 = \sigma, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$), $U_D = U_{DY} = Y^2/6G$'dir. Bu nedenle, çok eksenli gerilme durumu için, şekil değiştirme enerjisi kriteri, Denklem (5.5)'te verilen şekil değişimine sebep olan (U_D) enerjinin $Y^2/6G$ eşit olduğunda akmanın başladığını ifade eder. Ayrıca şekil değişimine sebep olan (U_D) enerji Denklem (5.6)'da verilen deviotrik gerilme tensörü cinsinden ifade edilebilir.

$$U_D = \frac{1}{2G}|J_2| \tag{5.6}$$

$$J_2 = -\frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \tag{5.7}$$

Tek eksenli gerilme durumunda (çekme veya basınç), $\sigma_1 = \pm Y$ ve $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$'dir. Bu durumda, deviotrik gerilme,

$$|J_2| = \tfrac{1}{3}Y^2 \tag{5.8}$$

şeklinde ifade edilir. Bu nedenle, şekil değiştirme enerjisi kriteri için akma fonksiyonu Denklem (5.9) ile ifade edilebilir.

$$f = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] - \frac{1}{3}Y^2 \tag{5.9}$$

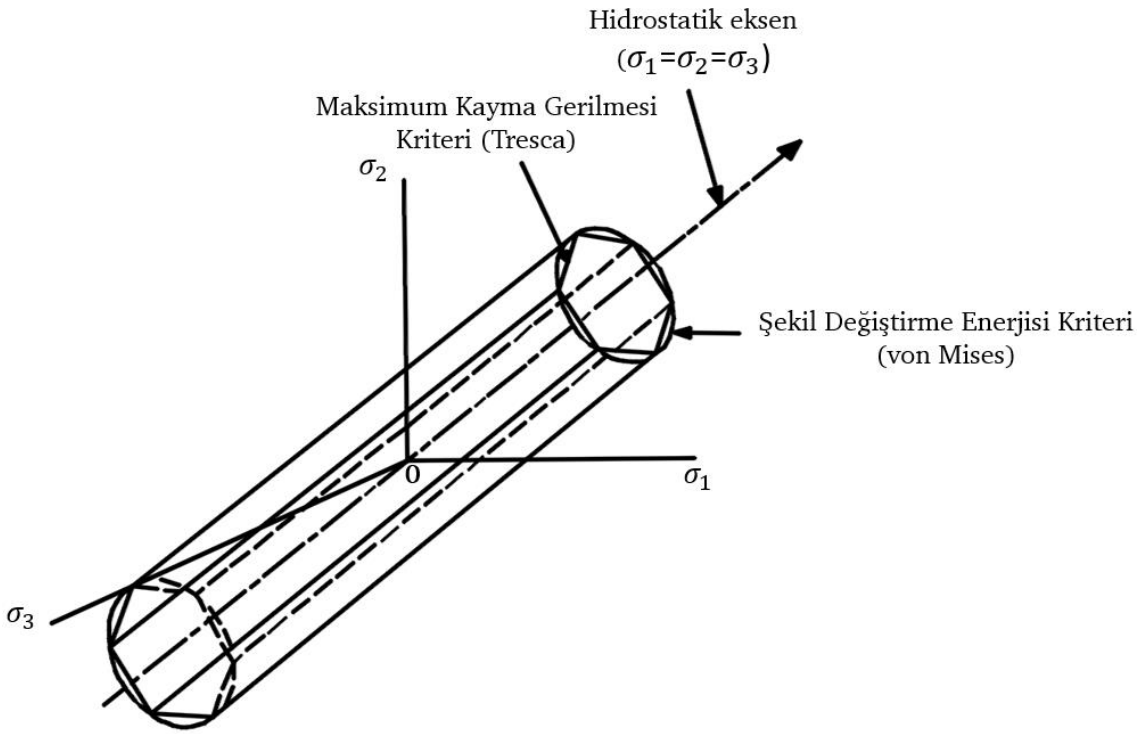
Akma fonksiyonu Denklem (5.10)'da verilen alternatif bir şekilde ifade edilebilir.

$$f = \sigma_e^2 - Y^2 \tag{5.10}$$

burada efektif gerilme Denklem (5.11) ile ifade edilebilir.

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = \sqrt{3|J_2|} \tag{5.11}$$

Denklem (5.9)'da akma fonksiyonu verilen şekil değiştirme enerjisi kriteri için akma yüzeyi, asal gerilme uzayında akma yüzeyi düzgün altıgen olan Tresca kriterinin köşegenlerini çevreleyen silindir şeklindedir (Şekil 5.3) [104].



Şekil 5.3 Asal gerilme uzayında Tresca ve von Mises kriteri akma yüzeyi

5.2.3 Mohr-Coulomb Kriteri

Toprak, kaya ve beton dahil olmak üzere birçok sürtünmeli malzemenin akma davranışının hidrostatik gerilmeye bağlı olduğu gözlenmiştir. Özel olarak, hidrostatik basınç gerilmesindeki bir artış, bazı malzemelerin akmaya direnme kabiliyetinin artmasını sağlar. Ayrıca, bu malzemeler çekmede ve basınçta farklı akma gerilme değerlerine sahip olabilir. Mohr-Coulomb akma kriteri, hidrostatik gerilmenin etkisini açıklayan Tresca kriterinin genelleştirilmesidir [104]. Akma fonksiyonu, gerilmenin kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısına (ϕ) bağlı bir şekilde ifade edilmektedir. Asal gerilmelerin $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ olduğu durum için, Mohr-Coulomb akma yüzeyi Denklem (5.12) ile ifade edilir. Asal gerilmelerin sıralı olmadığı durumda ise Denklem (5.13) ile ifade edilir.

$$f = \sigma_1 - \sigma_3 + (\sigma_1 + \sigma_3)\sin\phi \; - 2c \; \cos\phi \tag{5.12}$$

$$f = \underbrace{max}_{i \neq j} \left[\sigma_i - \sigma_j + \left(\sigma_i + \sigma_j\right) sin\,\phi \right] - 2c \; cos\,\phi \tag{5.13}$$

Akma meydana gelene kadar tek eksenli çekme etkisi altında ($(\sigma_1 = Y_T, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$), Denklem (5.12)'den akma gerilmesi türetilebilir:

$$Y_T = \frac{2c\ \cos\phi}{1+\sin\phi} \tag{5.14}$$

Aynı şekilde akma meydana gelene kadar tek eksenli basınç etkisi altında ($\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 = -Y_C$), akma gerilmesi:

$$Y_C = \frac{2c\ \cos\phi}{1-\sin\phi} \tag{5.15}$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (5.14) ve Denklem (5.15) yardımıyla, c ve ϕ, Y_T ve Y_C cinsinden ifade edilebilir:

$$c = \frac{1}{2}\sqrt{Y_T Y_C} \tag{5.16}$$

$$\phi = \sin\left(\frac{Y_C - Y_T}{Y_C + Y_T}\right) \tag{5.17}$$

Beton gibi bir malzeme inceleniyorsa ve Y_T, Y_C değerleri biliniyorsa, Denklem (5.16) ve Denklem (5.17), c ve ϕ değerlerini bulmak için kullanılabilir. Mohr-Coulomb kriteri için asal gerilme uzayında akma yüzeyi düzgün olmayan altıgen piramit şeklindedir ve ekseni hidrostatik eksendir. Piramidin geometrisi c ve ϕ'ye bağlıdır [104] (Şekil 5.4).

5.2.4 Drucker-Prager Kriteri

Drucker-Prager akma kriteri, hidrostatik gerilme etkisini dikkate alan von Mises kriterinin genelleştirilmiş halidir [104]. Drucker-Prager akma fonksiyonu Denklem (5.18) ile ifade edilir:

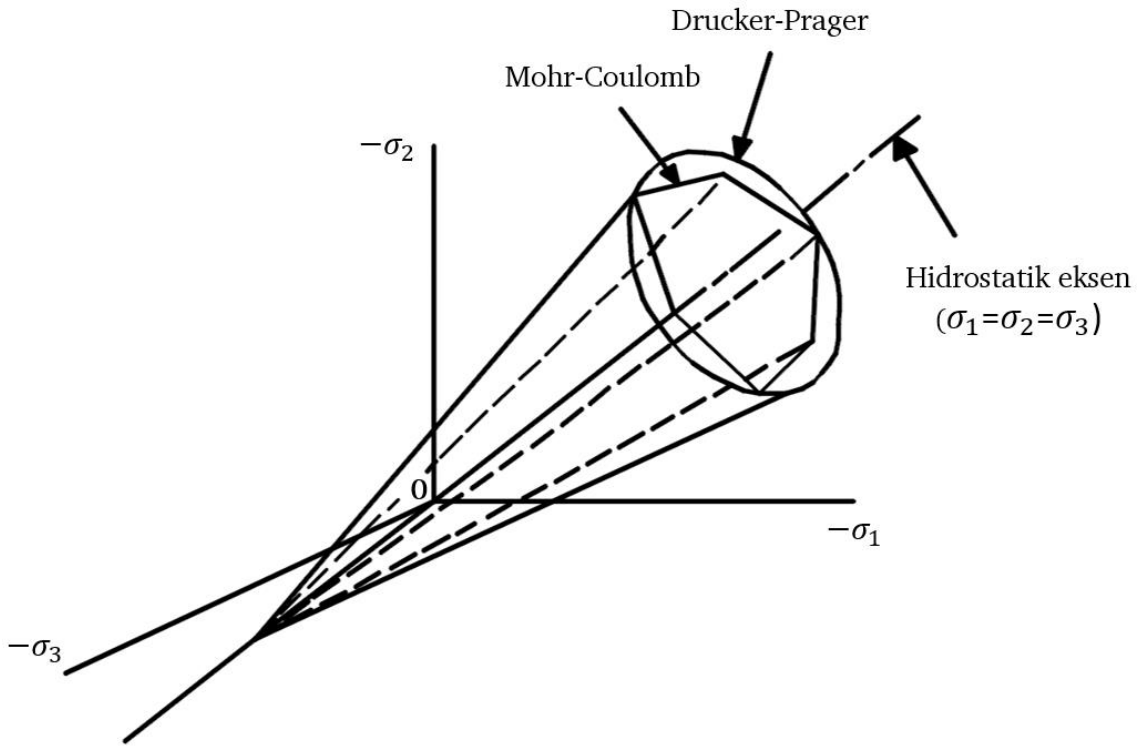
$$f = \alpha I_1 + \sqrt{|J_2|} - K \tag{5.18}$$

burada α ve k malzemeye ait pozitif katsayılardır. α ve k katsayıları, c ve ϕ değerlerine bağlı olarak Denklem (5.19) ve Denklem (5.20) bağıntılarıyla belirlenir.

$$\alpha = \frac{2\sin\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)} \tag{5.19}$$

$$k = \frac{6c\cos\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)} \tag{5.20}$$

Drucker-Prager, kaya ve beton gibi sürtünmeli malzemeler için sıklıkla kullanılan bir elasto-plastik malzeme modelidir. Drucker-Prager kriterinin asal gerilme uzayında akma yüzeyi, akma yüzeyi altıgen olan Mohr-Coulomb kriterinin köşe noktalarından geçerek çevreleyen malzeme parametrelerine sahip bir koni şeklinde temsil edilir (Şekil 5.4). Bu geometrik gösterim, malzemenin çekme ve basınçta aynı şekilde davranmadığını ifade etmektedir [104].

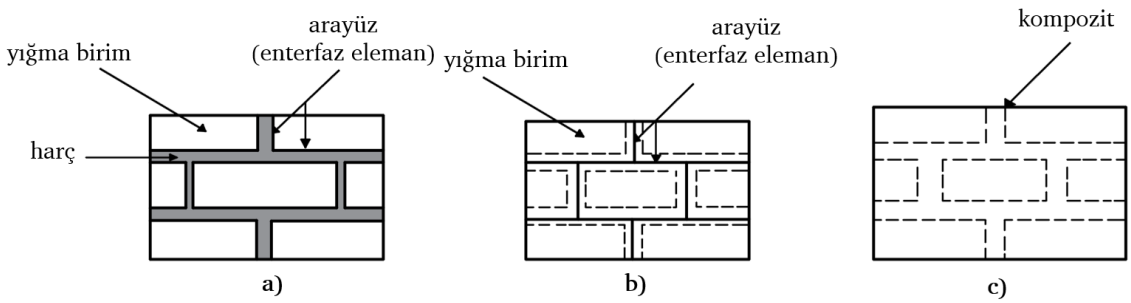


Şekil 5.4 Asal gerilme uzayında Mohr-Coulomb ve Drucker-Prager kriteri akma yüzeyi

5.3 Sayısal Modelleme Teknikleri

Genellikle sünekliği düşük olan taş, tuğla ve harç gibi malzemelerden oluşan yığma duvarlar heterojen ve anizotropik elemanlardır. Betonarme ve çelik gibi diğer yapı malzemelerin aksine, çekmede son derece gevrek ve aşırı karmaşık davranış sergilemeleri sebebiyle yığma için ortak modelleme yaklaşımları benimsenememektedir. Genel olarak, yığma duvarların düzlem içi ve düzlem dışı yükler altında mekanik davranışını gerçeğe yakın bir şekilde belirlemek için detaylı mikro, basitleştirilmiş mikro ve makro modelleme teknikleri kullanılmaktadır (Şekil 5.5). Analizlerde hangi modelleme tekniğinin

kullanılacağının belirlenmesi, simülasyondan istenen doğruluk ve sonuca bağlıdır [105].



Şekil 5.5 Modelleme teknikleri a) Detaylı mikro modelleme, b) Basitleştirilmiş mikro modelleme, c) Makro modelleme

5.3.1 Detaylı Mikro Modelleme Tekniği

Harç, yığma birim ve harç-yığma birim ara yüzünün, her bileşen için uygun bünyesel kuralların kabul edilerek ayrı ayrı modellendiği detaylı mikro model, oluşan hasarın eleman bazında incelenmek istendiği durumlarda tercih edilebilir [106]. Tuğla ve harç sürekli elemanlarla modellenirken, tuğla-harç etkileşimlerini temsil etmek için yatay ve düşey birleşimlerde süreksiz arayüz elemanları kullanılmaktadır. Bu teknik, her malzemenin deneysel olarak bulunması için aşırı hesaplama maliyeti, analiz süresi ve ayrıntılı mekanik özellikleri gerektirdiğinden literatürde çok fazla kullanılmamaktadır. Yığma yapının göçme mekanizmasının ve hasar yayılımının yerel ölçekte en detaylı ve doğru şekilde karakterize edilmesi istendiğinde kullanılır.

Parisi vd. [107], her bir bileşen için basınca bağlı bir kırılma kriteri dikkate alarak tüf taş yığma duvarların mikromekanik modellerini oluşturmuşlardır. Farklı sınır koşullarına ve yük durumlarına maruz kalan tüf taş yığma duvarın doğrusal olmayan tepkisini tahmin etmek için sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Mikromekanik sonlu elemanlar modeli, deneysel davranışı yeniden üretmiştir ve hasar tatmin edici bir şekilde gözlenmiştir.

Drougkas vd. [108] çalışmalarında basınç altında bir tarihi duvar sütununun deneysel sonuçlarını ve ayrıntılı mikro modelleme simülasyonunu sunmuşlardır. Sayısal simülasyondan elde edilen elastik modül, basınç dayanımı ve hasar modu deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, mikro modeller kullanılarak

yığma sıkıştırma etkileri ile ilgili olayların simülasyonu, hasar modelleri ve gelişimi açısından çok daha doğrudur.

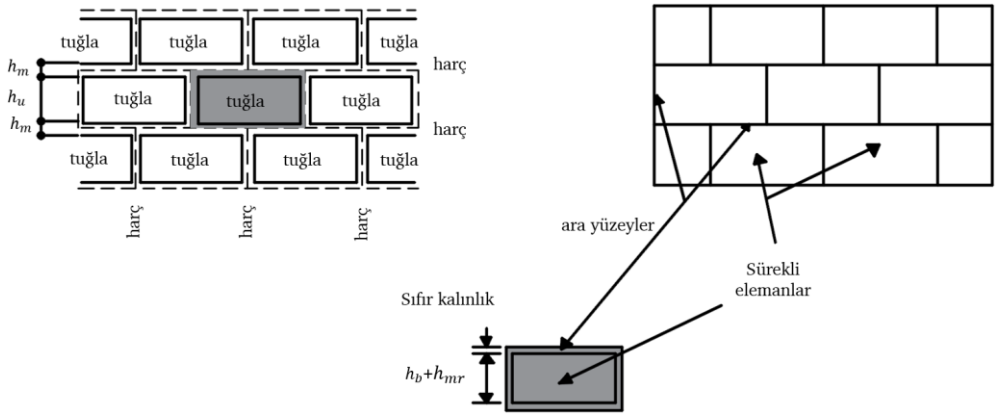
AlGohi vd. [109], farklı eksenel yük seviyelerine maruz kalan donatısız yığma duvarların yatay yükler altındaki davranışlarını sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. ABAQUS yazılımı kullanılarak oluşturulan sayısal simülasyonlarda beton hasar plastisite (CDP) bünye modeli kullanılmıştır. Sonuçlara göre, CDP bünyesel modelin, donatısız yığma duvarları için göçme modunu doğru bir şekilde tahmin ettiği belirtilmiştir.

Petracca vd. [110], hem yığma birimleri hem de harçları sürekli elemanlarla ayrıklaştıran yeni bir hasar mekaniği tabanlı sürekli mikro model önermişlerdir. Önerilen sürekli mikro model, yığma duvarların sayısal simülasyonu için iyi bilinen iki ayrı mikro modelleme stratejisi ile karşılaştırılmıştır.

D'Altri vd. [111], düzlem içi ve düzlem dışı yüklemeye maruz yığma duvarların davranışını temsil etmek için bir tuğla ve harç katmanından oluşan genişletilmiş birimlerle karakterize edilen yeni bir üç boyutlu detaylı mikro model önermiştir.

5.3.2 Basitleştirilmiş Mikro Modelleme Tekniği

Bu modelleme tekniği, yığma birim ebatlarının harç kalınlığı kadar büyütülerek, harç malzemesinin modelden çıkarılması ile oluşturulur. Yığma birim sürekli elemanlarla temsil edilirken, harç birleşimlerinin doğrusal olmayan davranışı ve yığma birim-harç arasındaki etkileşim süreksiz bir ara yüzeyde toplanır [106] (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 Basitleştirilmiş mikro model

Basitleştirilmiş mikro model kullanılarak elde edilen çözümlerde, olası göçme mekanizmalarının tamamının göz önüne alınmaması temel problemlerdendir. Çatlakların ara yüzeylerde sadece açılma ve kayma etkileri için oluştuğu varsayılmaktadır. Öte yandan rijit elemanlarda meydana gelen çatlakların ise sadece eleman orta bölgesinde oluşabileceği düşünülmektedir [112]. Bu modelleme tekniği kullanılarak harç olmadan bir model oluşturulduğu için, mikro modele göre eleman sayısı düşecektir ve çözüme daha hızlı ulaşılabilecektir. Fakat bu modelde ara yüzey elemanı çok sayıda olduğundan, doğrusal olmayan analizlerin gerçekleştirilmesi için çok fazla emek ve süre gerekmektedir. Dolayısıyla bu teknik de eleman bazında incelemelerde daha kullanışlı bir yöntem olmakla birlikte ihtiyaç duyulması ve duvarın karakterinin uygunluğu durumunda bütün yapı modellemesi için de kullanılabilir [113].

Aref ve Dolatshahi [114], düzlem-dışı ve düzlem-içi kademeli artan yükleme altında yapılan deneysel çalışmaların sonucunu ABAQUS yazılımı kullanılarak önerilen üç boyutlu çevrimsel malzeme modeli ile karşılaştırmışlardır.

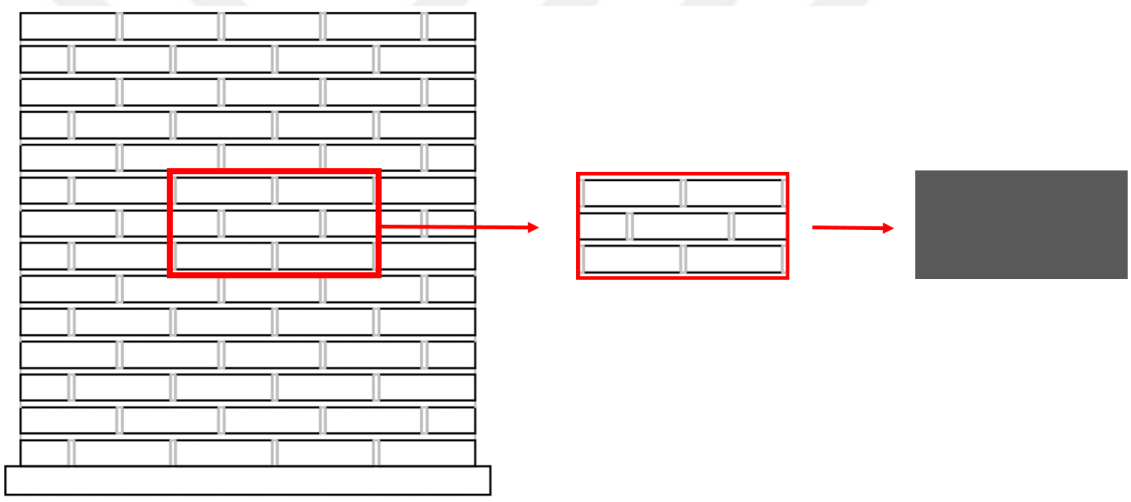
Bolhassani vd. [115], yığma prizmaların basitleştirilmiş mikro modellerini CDP bünye modeli kullanılarak oluşturmuşlardır. Simülasyondan elde edilen sonuçların, deneylerde gözlenen davranışla iyi bir uyum içinde olduğu belirtilmiştir.

Doran vd. [19], dört farklı kireç harcı ile üretilen donatısız yığma duvarların sabit düşey yük ve kademeli artan yatay yük altında gerçekleştirilen bir araştırma projesinin deneysel sonuçlarını sunmaktadırlar. Hem harç hem de harç-tuğla ara yüzünün yapısal davranışını tanımlamak için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşımın, mevcut yığma yapılarda harç ve harç-tuğla arayüzünün davranışını tanımlamak için uygun ve faydalı olduğu belirtilmiştir.

Doran vd. [21], harç enjeksiyonu ile güçlendirilen donatısız yığma duvarların davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. İzotropik hasar modeline dayalı basitleştirilmiş bir mikro modelleme stratejisi önerilmiştir. Önerilen sayısal yaklaşım, güçlendirilen duvarların sayısal modellemesi için kullanılmış ve deney sonuçlarıyla uyumlu sonuçların elde edildiği vurgulanmıştır.

5.3.3 Makro Modelleme Tekniği

Makro modelleme yaklaşımında yığma birim, harç ve yığma birim-harç ara yüzü arasında herhangi bir ayrım olmaksızın homojen kabul edilir. Yığma birim ve harç homojenleştirilerek yığma duvar kompozit malzemeye dönüştürülmektedir (Şekil 5.7). Makro modelleme tekniği, mikro ve basitleştirilmiş mikro modelleme tekniklerine göre hesaplama maliyeti ve analiz süresi açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Bu modelleme tekniğinde kullanılan düğüm noktası ve eleman sayısı diğer tekniklere nazaran oldukça sınırlı kalacağından, genellikle büyük yapı sistemlerinin analizlerinde kullanılmaktadır. Bu avantajlara rağmen, yığma duvarda yerel düzeyde hasar mekanizmasının gelişimi hakkında detaylı bir bilgi elde edilememektedir [105].



Şekil 5.7 Makro model

Berto vd. [116], düz ve şaşırtmalı örgü ile örülen yığma duvarların düzlem-içi davranışlarını parametrik çalışmalar yardımıyla incelemişlerdir. Bu amaçla izotropik hasar modeli ile oluşturulan mikro model ve ortotropik model ile oluşturulan makro model tekniğini kullanmışlardır. Sonuç olarak uygulanan tekniklerden mikro modelleme tekniği ile deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar elde edilirken, makro modelleme tekniği ile yığma duvarların genel davranışının kabul edilebilir ölçüde yansıtıldığı belirtilmiştir.

Asteris ve Tzamtzis [113], donatısız yığma duvarların makro modelleme tekniği kullanılarak oluşturulan sonlu elemanlar modellemesinde iki eksenli gerilme durumları için önerdikleri modelde, kırılma yüzeyini anizotropik olarak

tanımlamışlardır. Önerilen kırılma yüzeyinin, donatısız yığma duvarların doğrusal olmayan davranışlarını yansıtabilme becerisi literatürde mevcut diğer kırılma yüzeyleri sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Lourenço vd. [117], yarı gevrek ortotropik malzemelerin esnek olmayan davranışını tanımlamak için bir düzlem gerilme modeli geliştirmişlerdir. Ortotropik malzeme davranışı, basınçta Hill tipi kriter ve çekmede Rankine tipi kriter olarak tanımlanmıştır. Bu göçme mekanizmalarından kaynaklanan iç hasar, biri çekmedeki hasar ve biri de basınçtaki hasar olmak üzere iki parametre ile temsil edilmiştir. Elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla iyi bir uyum gösterdiği belirtilmiştir.

Lourenço vd. [118], yığma yapıların analizi için malzemenin tüm eksenleri boyunca farklı dayanım sergilediği bir anizotropik süreklilik modeli sunmuş ve çekmede iki farklı kırılma enerjisini ve basınçta iki farklı kırılma enerjisini içeren bir akma kriteri geliştirmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasında yapılan karşılaştırmada önerilen anizotropik modelin, yığma yapıların davranışını göçme modları ve göçme yükü açısından tahmin edebildiği görülmüştür.

Köksal vd. [119], düşey ve yatay yüklere maruz kalan yığma duvarların simülasyonları için yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Önerilen yaklaşımı doğrulamak için kuru ve harç derzli yığma duvarlar üzerinde iki farklı deneysel çalışma kullanılmıştır. Yığma duvarların basınç dayanımlarını hesaplamak için elasto-plastik yaklaşım ve izotropik hasar modelini kullanmışlardır. İlaveten, Drucker-Prager akma kriteri için gerekli olan kohezyon ve sürtünme açısı değerlerini belirleyebilmek için bir bağıntı önermişlerdir.

Genel olarak izotropik malzeme ile doğrusal olmayan yapısal model, basit ve daha az değişken gereksinimleri nedeniyle büyük ölçekli yapıların analizinde tercih edilmiştir [120]–[122]. Yığma duvarların homojen olmayan davranışını temsil etmek için ortotropik malzeme ile doğrusal olmayan yapısal model kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır [123]–[126].

5.4 Deney Duvarlarının Sayısal Analizi

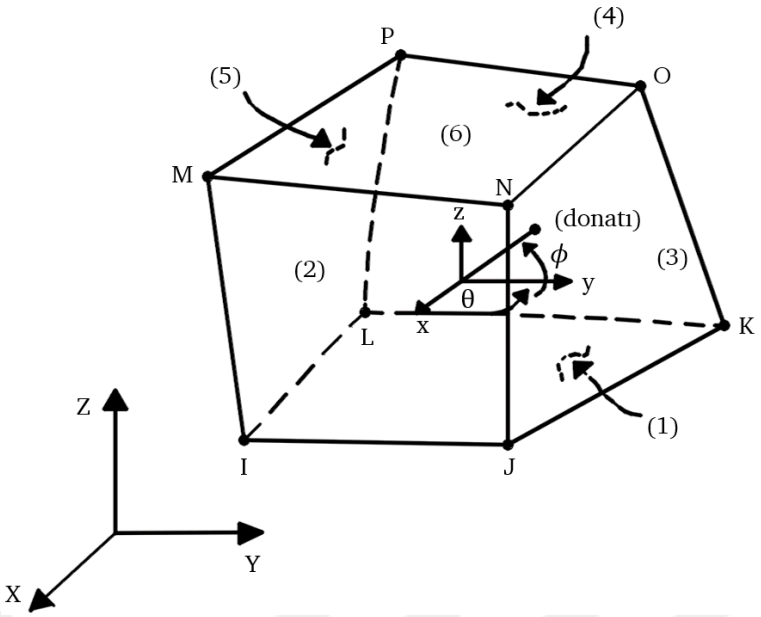
Deney duvarlarının üç boyutlu (3B) sonlu eleman modeli ANSYS 2021-R2 yazılımı [1] kullanılarak oluşturulmuştur. Donatısız yığma duvarların davranışını modellemek için makro modelleme tekniği kullanılmıştır. Yükleme koşulları, deney şartlarını yansıtması için, iki adımda uygulanmıştır. İlk olarak 2 MPa'lık sabit düşey yük uygulanmış, ardından kademeli artan yatay yük uygulanmıştır. Yine aynı şekilde mümkün olduğunca deney sınır şartlarını yansıtmak adına sayısal modellerde mesnet şartı duvarların alt düğüm noktalarında tüm doğrultularda doğrusal hareket kısıtlı olacak şekilde tanımlanmıştır. Tez çalışmasının bu bölümünde, yığma kompozit ve karbon lif takviyeli polimer şeritlerin bünyesel davranışını ifade edebilmek açısından literatürde de yaygın kullanılan sonlu eleman tipleri ile mümkün mertebe akma (kırılma) fonksiyonunu belirlemek üzere parametre sayısı en az olan kriter benimsenmiştir.

5.4.1 Sonlu Eleman Tipi

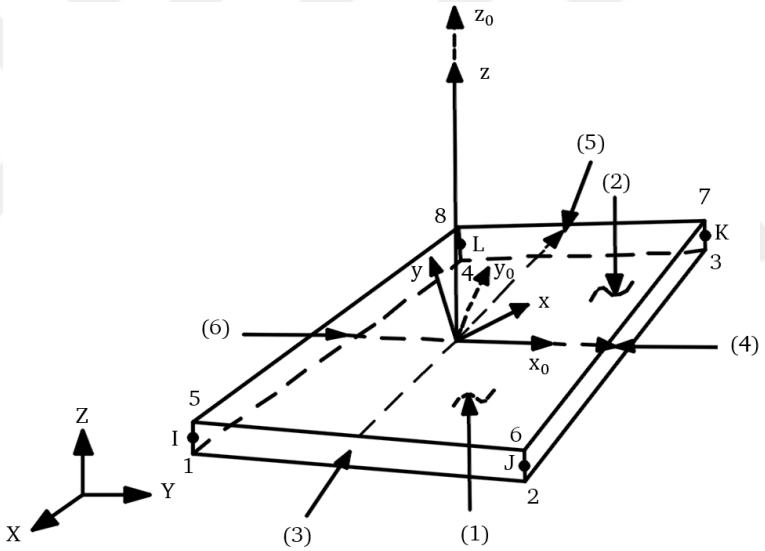
ANSYS 2021-R2 eleman kütüphanesinde tanımlanan SOLID65 hacimsel elemanı donatısız yığma duvarı ve SHELL181 kabuk elemanı ise karbon lif takviyeli polimer şeritleri modellemek için kullanılmıştır. Yığma duvar ile karbon lif takviyeli polimer yüzeyleri arasındaki teması ifade etmek için, ANSYS yazılımında şekil değiştirebilen yüzeyler için tanımlanan CONTA174 ve yalnızca katı cisimler için tanımlanan TARGET170 elemanları kontak eleman olarak seçilmiştir.

SOLID65 elemanı, yığma duvarın üç boyutlu modellenmesinde kullanılan, her düğüm noktasında üç yönde serbestliğe sahip sekiz düğüm noktalı bir elemandır. Doğrusal olmayan malzeme davranışına sahip olan SOLID65 elemanı çekmede çatlama ve basınçta ezilme yapabilmektedir (Şekil 5.8) [1].

SHELL181 elemanı, karbon lif takviyeli polimer şeritlerin modellenmesinde kullanılan, geometri bakımından iki boyutlu ancak yapısal olarak üç boyutlu davranış sergilemektedirler. Elemanların her düğüm noktasında 6 serbestlik derecesi (x,y,z yer değiştirme ve x,y,z dönme) vardır. Kabuk elemanların modellenmesi için uygundurlar (Şekil 5.9) [1].



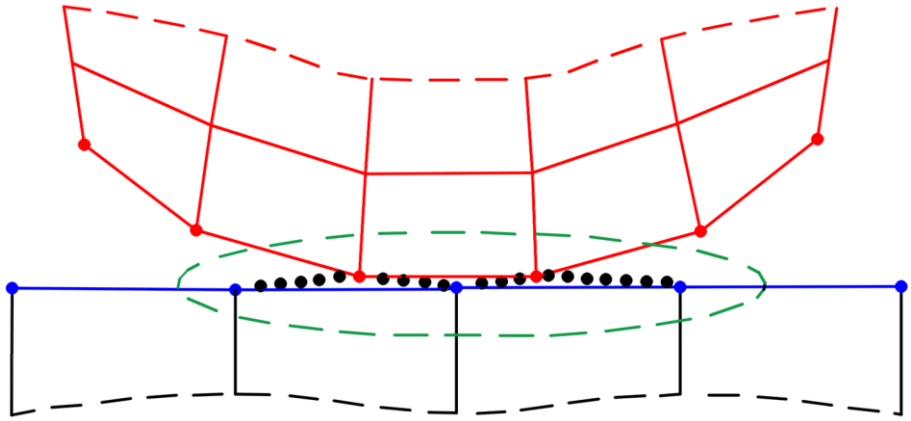
Şekil 5.8 SOLID65 sonlu elemanı



Şekil 5.9 SHELL181 sonlu elemanı

ANSYS 2021-R2 yazılımında SOLID65 ile modeli tanımlanmış yığma kompozit ile SHELL181 ile modellenmiş karbon lif takviyeli polimer şeritlerin temas modeli “Contact Maneger” aracılığla yapılmıştır. “Contact Maneger” aracılığıyla yığma ile karbon lif takviyeli polimer şerit yüzeyleri arasındaki bağlantı CONTA174 ve TARGE170 ile sağlanmıştır. Yüzeyden yüzeye (surface to surface) temas seçeneğiyle yığma yüzey “TARGET”, karbon lif takviyeli polimer yüzey ise “CONTACT” olarak seçilmiştir. Yığma yüzey ile karbon lif takviyeli polimer arasında tam aderans olduğu kabul edilmiştir. ANSYS yazılımında sürtünmenin

olmadığı ve yüzeyler arasındaki etkileşimin her zaman tam bağlı olduğu durumlarda, dahili çok noktalı kısıtlama (MPC) kontak algoritmasının kullanılması iyi bir alternatif olarak kabul edilmektedir [1] (Şekil 5.10).



Şekil 5.10 Dahili çok noktalı kısıtlama (MPC) kontak

5.4.2 Bünyesel Model

Deney duvarları için söz konusu doğrusal olmayan davranışın makro model tekniği kullanılarak karakterize edilmesi için yığma kompozitin elastik ve plastik malzeme parametrelerine ihtiyaç vardır. Bu tez çalışması için bu parametreler deneysel olarak elde edilememiştir. Bu nedenle, bu parametrelerin belirlenmesi için literatürde kabul görmüş olan, Drysdale vd. [81] tarafından yığma duvar elastisite modülü (E_m) için önerilen $E_m = (210\sim1670)\, f'_m$ bağıntısı kullanılmıştır ve Kaushik vd. [86]'nin yığma duvar basınç dayanımı (f'_m) için $f'_m = 0.63(f_{bl}^{0.49})(f_{mr}^{0.32})$ önerdikleri analitik bağıntılar dikkate alınmıştır. Sayısal analizlerde yığma kompozitin modellemesinde kullanılan elastik parametreler Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 Yığma kompozit için kullanılan elastik parametreler

Elastisite Modülü (MPa)	Poisson oranı	Basınç Dayanımı (MPa)
5000	0.2	6.36

Drucker-Prager akma kriteri, hem güçlendirilmiş hem de yalın duvarların doğrusal olmayan davranışını temsil etmek için kullanılmıştır. Sayısal modellerde yığma kompozitin doğrusal olmayan davranışını tanımlayabilmek için Drucker-Prager akma kriterinin tanımlanması için gerekli olan kohezyon (c), sürtünme açısı (ϕ)

ve plastik akış açısına (ϕ_f) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışmasında Köksal vd. [119]'nin kohezyon için (c) $c(MPa) = 0.1225f'_m + 0.22$ önerdikleri analitik bağıntı kullanılmıştır. Aynı şekilde sürtünme açısı (ϕ) için de Köksal vd. [119]'nin önerdikleri $\phi = 50\,(derece)$ kullanılmıştır. Ayrıca genleşme miktarı (akma nedeniyle malzeme hacminde meydana gelen artış) plastik akış açısı ile kontrol edilebilir. Plastik akış açısı sürtünme açısına eşitse, akma kuralı ilişkilidir. Plastik akış açısı sıfırsa (veya sürtünme açısından daha azsa), akma sırasında malzeme hacminde artış meydana gelmez veya az miktarda artış olur, bu durumda akma kuralı ilişkili değildir [1]. Tablo 5.2'de, sayısal analizlerde yığma kompozitin modellemesinde kullanılan plastik parametreler verilmiştir.

Tablo 5.2 Yığma kompozit için kullanılan plastik parametreler

Kohezyon (MPa)	Sürtünme açısı (derece)	Plastik akış açısı (derece)
1	50	50

Ortotropik özellikteki malzemeler herhangi bir noktadaki birbirine dik üç temel eksende (malzeme eksenleri) farklı özellik gösterirler ve özellikleri bu eksenlere göre simetriktir. Lif takviyeli kompozit malzemelerin yüke karşı mekanik davranışları yöne bağımlıdır. Tek yönlü sürekli lif takviyeli ortotropik kompozit tabakaların S_{ij} elastik matrisindeki bileşenleri mühendislik sabitleri cinsinden Denklem (5.21) bağıntısıyla ifade edilir [127]. Bu tez çalışmasında karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde kopma gözlenmediği için ortotropik doğrusal elastik davranış dikkate alınmıştır.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{yx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{zx}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{zy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{yx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \tag{5.21}$$

Burada sırasıyla E_x, E_y ve E_z sırasıyla x, y, ve z yönlerindeki elastisite modülleri; v_{xy}, v_{yz}, ve v_{xz} sırasıyla $x-y$, $y-z$, ve $x-z$ düzlemlerindeki poisson oranı; G_{xy}, G_{yz}, ve G_{xz} ve sırasıyla $x-y$, $y-z$, ve $x-z$ düzlemlerindeki kayma modülleridir [128].

Lif takviyeli polimerlerin sayısal modellemesi için ANSYS yazılımı; katman sayısı, her katmanın kalınlığı, her katman için lif yönünün oryantasyonu, lif takviyeli polimerlerin üç yönde elastisite modülü, üç düzlemde kayma modülü ve üç düzlemde poisson oranına ihtiyaç duymaktadır. Sayısal modellerde kullanılan karbon lif takviyeli polimerin malzeme özellikleri Tablo 5.3'te gösterilmektedir.

Tablo 5.3 Karbon lif takviyeli polimer için kullanılan parametreler

Elastisite modülü (MPa)	Poisson oranı	Kayma modülü (MPa)
$E_x = 230000$[a]	$v_{xy} = 0.3$[b]	$G_{xy} = 88462$[c]
$E_y = 0.1$[b]	$v_{yz} = 0.1$[b]	$G_{yz} = 0.05$[c]
$E_z = 0.1$[b]	$v_{xz} = 0.1$[b]	$G_{xz} = 0.05$[c]

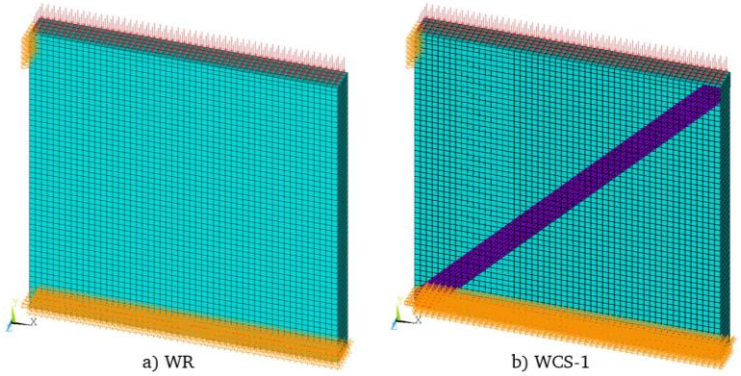
[a] Üreticiden alınan mekanik parametreler

[b] Yapılan parametrik çalışmadan, bu parametrelerin lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş duvarların global davranışlarını etkilemediği not edilmiştir.

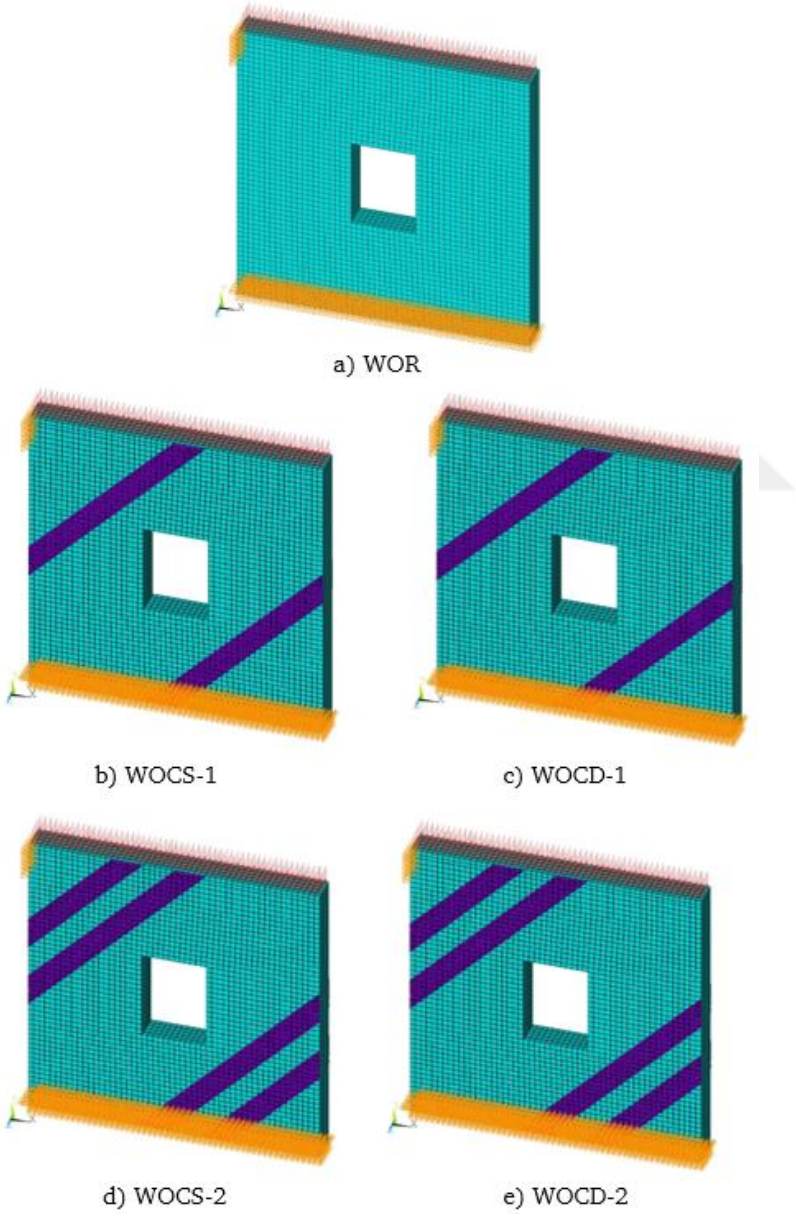
[c] Formül kullanılarak hesaplanır: $G_{xy} = \frac{E_x}{2(1+v_{xy})}$ $G_{yz} = \frac{y}{2(1+v_{yz})}$ $G_{xz} = \frac{E_z}{2(1+v_{xz})}$

5.4.3 Geometri ve Sınır Koşulları

Sonlu elemanlar yönteminde çözümü yapılacak olan yapı elemanları, elemanın geometrisine uygun şekilde daha küçük elemanlara bölünmektedir. Ağ oluşturma işleminde dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri ağ yoğunluğunun belirlenmesidir. Ağ yoğunluğunun yüksek tutulması analiz süresinin gereğinden fazla uzamasına ve bilgisayar kapasitesinin zorlanmasına sebep olmaktadır. Düşük tutulması ise istenilen yük düzeyine ulaşılamamasına neden olabilmektedir. Yığma duvarlar ve karbon lif takviyeli polimer şeritleri için sırasıyla bir yönde ağ boyutu 20 mm ve 10 mm olarak uygulanmıştır. Yığma duvarlarda mesnet koşulları taban kesitindeki düğüm noktalarının X,Y ve Z yönündeki doğrusal hareketleri engellenecek şekilde tanımlanmıştır. Makro modelleme ile sayısal modelleri oluşturulan donatısız dolu ve boşluklu duvarların sonlu eleman ağı ve sınır şartları sırasıyla Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.11 Donatısız dolu duvarlar için sonlu eleman ağı ve sınır koşulları

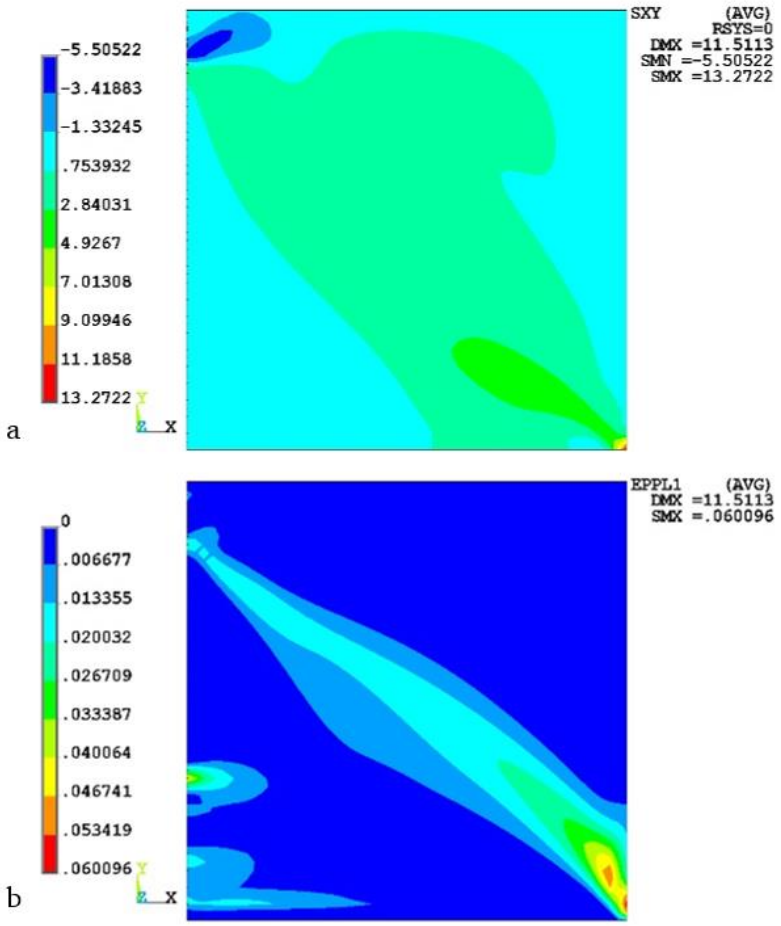


Şekil 5.12 Donatısız boşluklu duvarlar için sonlu eleman ağı ve sınır koşulları

5.5 Sayısal Analiz Sonuçları ve Değerlendirilmesi

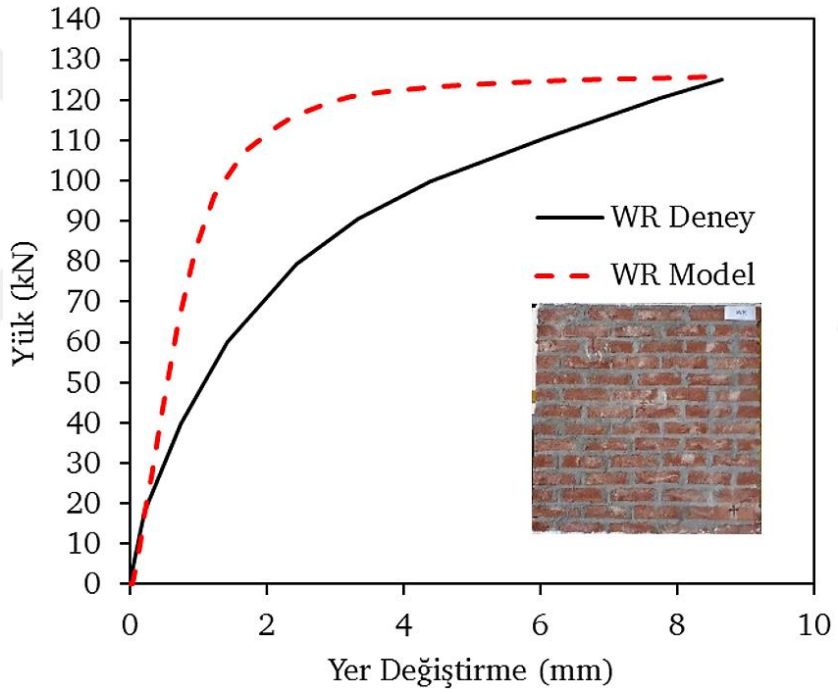
5.5.1 WR Dolu Duvar

Düzlem içi yatay ve sabit düşey yüke maruz donatısız dolu duvarın (WR) üç boyutlu elastoplastik analizleri tamamlandıktan sonra, duvar yüzeyi boyunca kayma gerilmelerin ve maksimum plastik birim şekil değiştirmelerin değişimi Şekil 5.13'te verilmiştir. WR duvarı için elde edilen maksimum kayma gerilmesi değeri 13.27 MPa ve maksimum elastik birim şekil değiştirme değeri 0.060096 olarak elde edilmiştir. Şekil 5.13'te görüldüğü üzere makro modelleme sonucu analizi yapılan WR duvarında, kayma gerilmeleri genel olarak deney sonucunda hasarların oluştuğu bölgelerde kritik değerlere ulaşmıştır. Ayrıca maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımlarının deneysel çatlak şekliyle uyumlu olduğu açıkça görülmüştür.



Şekil 5.13 WR duvarının sayısal çözümüne ait a) Kayma gerilmeleri dağılımları b) Maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımları

Yığma dolu referans duvarın deneysel ve makro modellenmesi sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 5.14'te gösterilmiştir. WR numunesinin sayısal analizinden elde edilen kesme dayanımı 125.80 kN'dur. Şekil 5.14'te verilen yük-yer değiştirme eğrilerinde görüldüğü üzere, yük taşıma kapasitesi ve başlangıç teğeti eğiminin deneysel verilerle uyumunun kabul edilebilir olduğu görülmüştür. Fakat doğrusal olmayan davranışın sergilendiği bölüm değerlendirildiğinde, sayısal sonuçların deneysel sonuçlarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Sayısal ve deneysel veriler arasındaki tutarsızlık, makro modelleme tekniğinin tüm olası göçme modlarını tam olarak temsil edememesi ve/veya deney koşullarının (sınır şartları) sayısal modele tam olarak yansıtılamamasından kaynaklanabilmektedir.

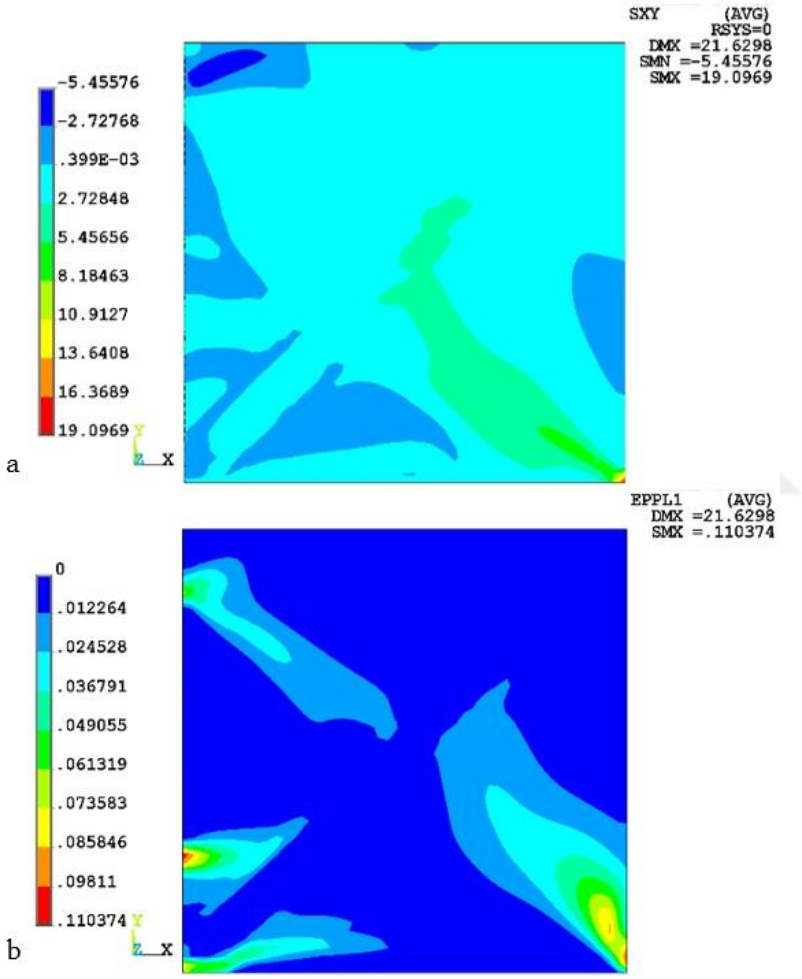


Şekil 5.14 WR duvarına ait yük-yer değiştirme ilişkileri

5.5.2 WCS-1 Dolu Duvar

Düzlem içi yatay ve sabit düşey yüke maruz tek kat tek sıra karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş donatısız dolu yığma duvarın (WCS-1) üç boyutlu elastoplastik analizleri tamamlandıktan sonra, duvar yüzeyi boyunca kayma gerilmelerinin ve maksimum plastik birim şekil değiştirmelerinin değişimi Şekil 5.15'te verilmiştir. WCS-1 duvarı için elde edilen maksimum kayma gerilmesi değeri 19.10 MPa ve maksimum elastik birim şekil değiştirme değeri 0.110374

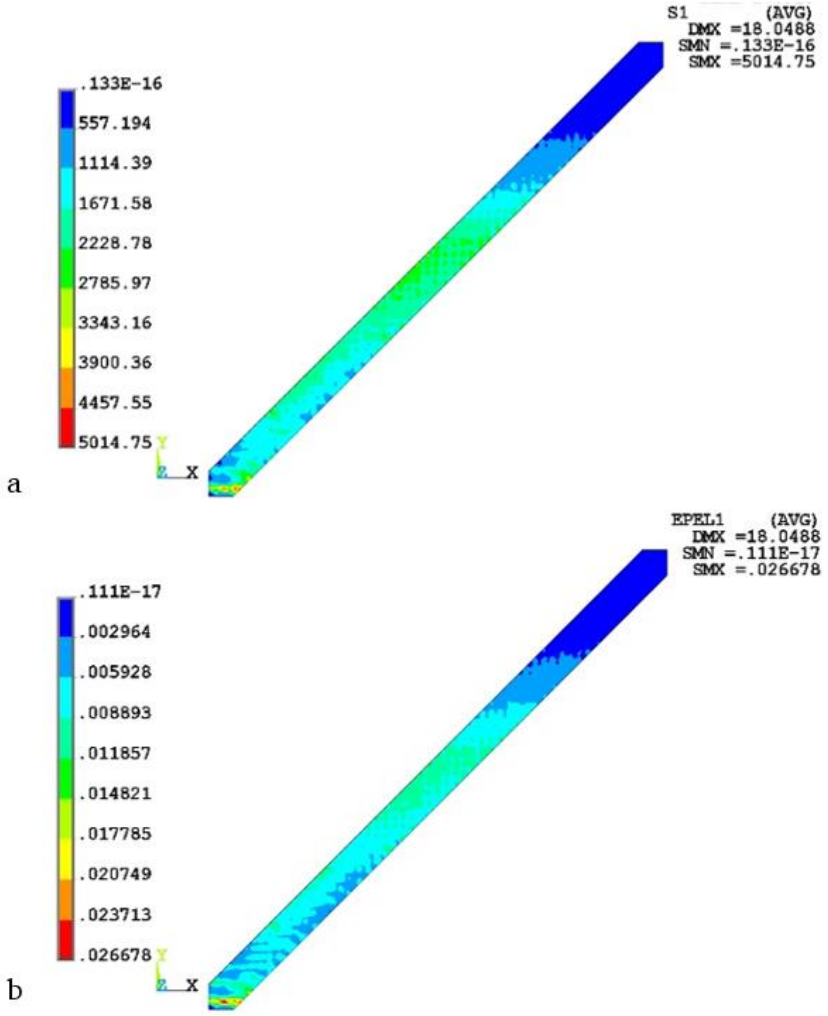
olarak elde edilmiştir. Şekil 5.15'te görüldüğü üzere makro modelleme sonucu analizi yapılan WCS-1 duvarında, kayma gerilmeleri genel olarak deney sonucunda hasarların oluştuğu bölgelerde kritik değerlere ulaşmıştır. Ayrıca referans duvar ile karşılaştırıldığında karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin, çekme gerilmelerinin neden olduğu maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımlarını engellediği ve maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımlarını değiştirdiği, ancak bu dağılımların deneysel çatlak şekliyle uyumlu olduğu açıkça görülmüştür.



Şekil 5.15 WCS-1 duvarının sayısal çözümüne ait a) Kayma gerilmeleri dağılımları b) Maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımları

Karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde meydana gelen maksimum elastik gerilmeleri ve elastik birim şekil değiştirme dağılımları Şekil 5.16'da verilmiştir. WCS-1 duvarına ait karbon lif takviyeli polimer şeritleri için elde edilen maksimum elastik gerilme değeri 5014.75 MPa ve maksimum elastik birim şekil

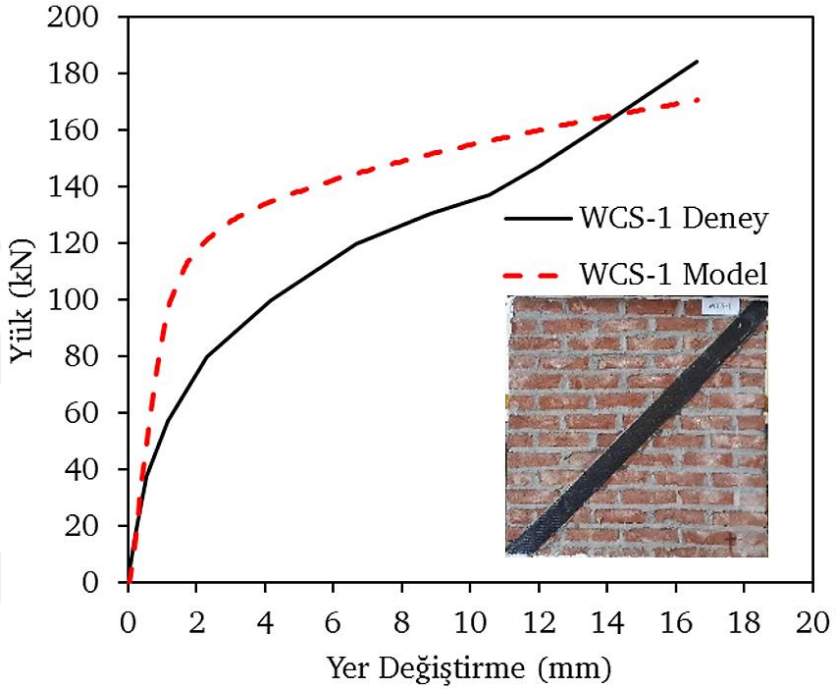
değiştirme değeri 0.0267 olarak elde edilmiştir. Sayısal analiz sonuçları, karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde kayma gerilmelerinin mesnete yakın bölgelerde, diğer bölgelere göre daha yüksek değerlere sahip olduğunu göstermiştir. Çekme dayanımı 4900 MPa olan karbon lif takviyeli polimerin tam kapasite çalıştığı görülmüştür.



Şekil 5.16 WCS-1 duvarının sayısal çözümüne ait karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde oluşan a) Maksimum elastik gerilmeleri dağılımları b) Maksimum elastik birim şekil değiştirme dağılımları

Tek kat tek sıra karbon lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmiş dolu yığma duvarın (WCS-1) deneysel ve makro modellenmesi sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 5.17'de gösterilmiştir. WCS-1 numunesinin sayısal analizinden elde edilen kesme dayanımı 170.44 kN'dur. Şekil 5.17'de verilen yük-yer değiştirme eğrilerinde görüldüğü üzere sayısal modelin başlangıç teğeti eğimi açısından deneysel verilerle uyumlu olduğu ancak yük taşıma kapasitesi açısından

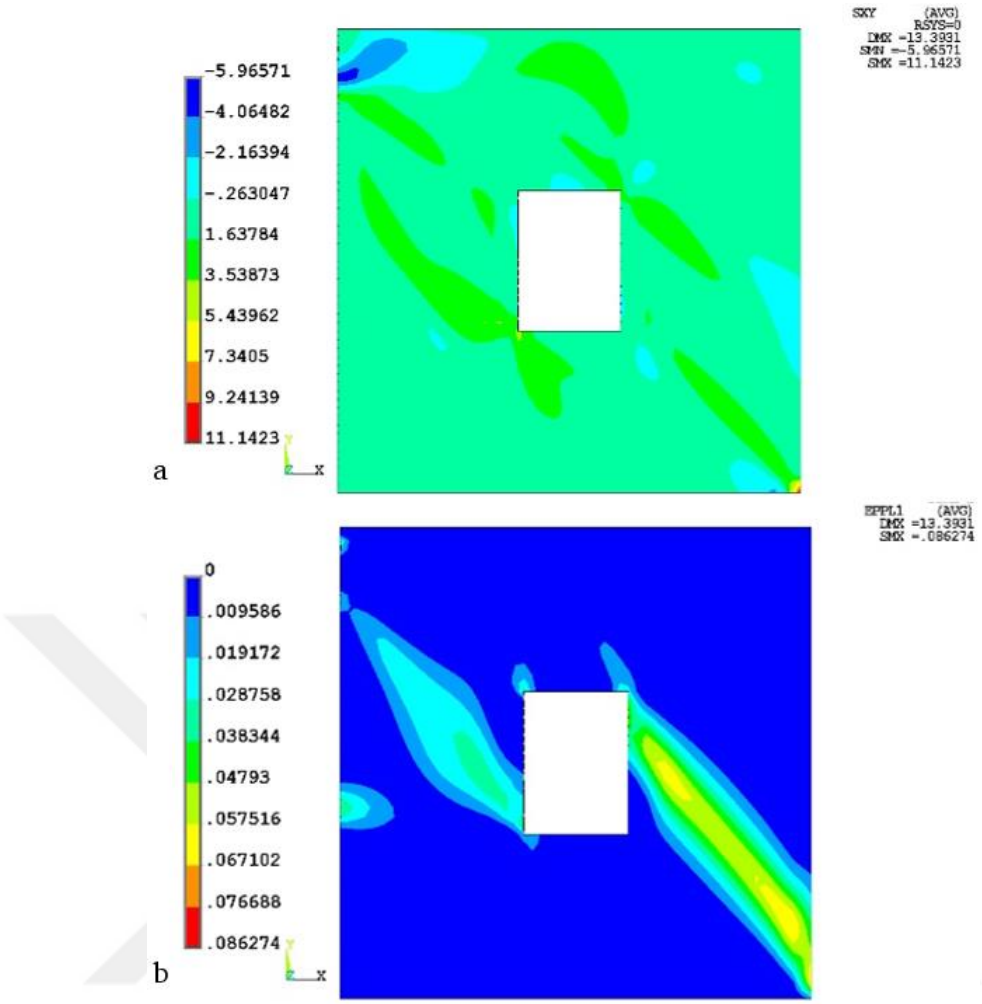
deneysel verilerden daha düşük değere ulaştığı görülmektedir. Ancak doğrusal olmayan davranışın sergilendiği bölüm değerlendirildiğinde, deneysel ve sayısal sonuçlar arasında bazı farklılıklar olduğu görülmüştür. Bu farklılığın, makro model için kullanılan mekanik parametrelerin deneysel olarak elde edilememesi ve/veya deney koşullarının (sınır şartları) sayısal modele tam olarak yansıtılamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.17 WCS-1 duvarına ait yük-yer değiştirme ilişkileri

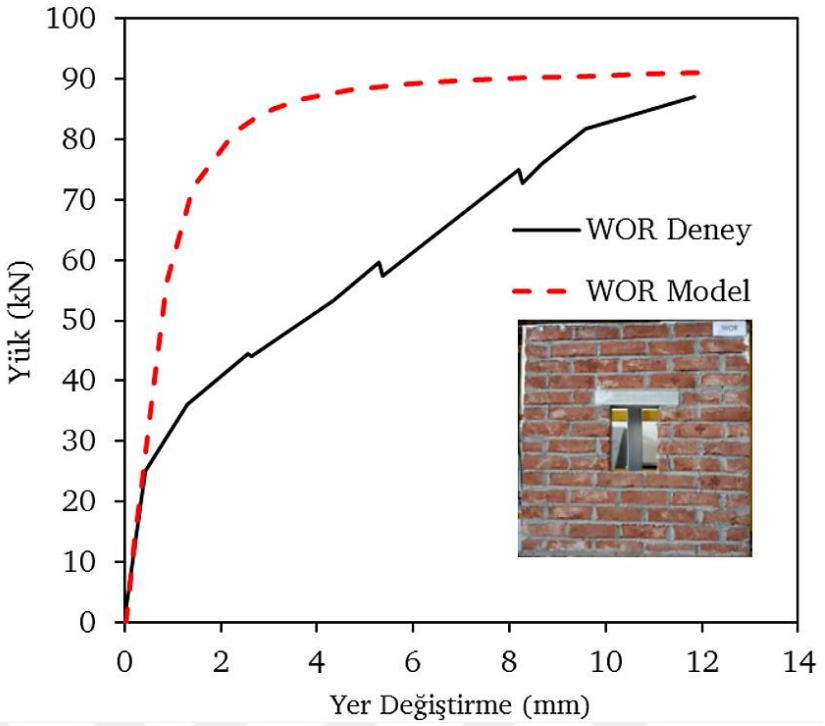
5.5.3 WOR Boşluklu Duvar

Düzlem içi yatay ve sabit düşey yüke maruz donatısız boşluklu duvarın (WOR) üç boyutlu elastoplastik analizleri tamamlandıktan sonra, duvar yüzeyi boyunca kayma gerilmelerin ve maksimum plastik birim şekil değiştirmelerin değişimi Şekil 5.18'de verilmiştir. WOR duvarı için elde edilen maksimum kayma gerilmesi değeri 11.14 MPa ve maksimum elastik birim şekil değiştirme değeri 0.086274 olarak elde edilmiştir. Şekil 5.18'de görüldüğü üzere makro modelleme sonucu analizi yapılan WOR duvarında, kayma gerilmeleri genel olarak deney sonucunda hasarların oluştuğu bölgelerde kritik değerlere ulaşmıştır. Ayrıca maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımlarının deneysel çatlak şekliyle uyumlu olduğu açıkça görülmüştür.



Şekil 5.18 WOR duvarının sayısal çözümüne ait a) Kayma gerilmeleri dağılımları b) Maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımları

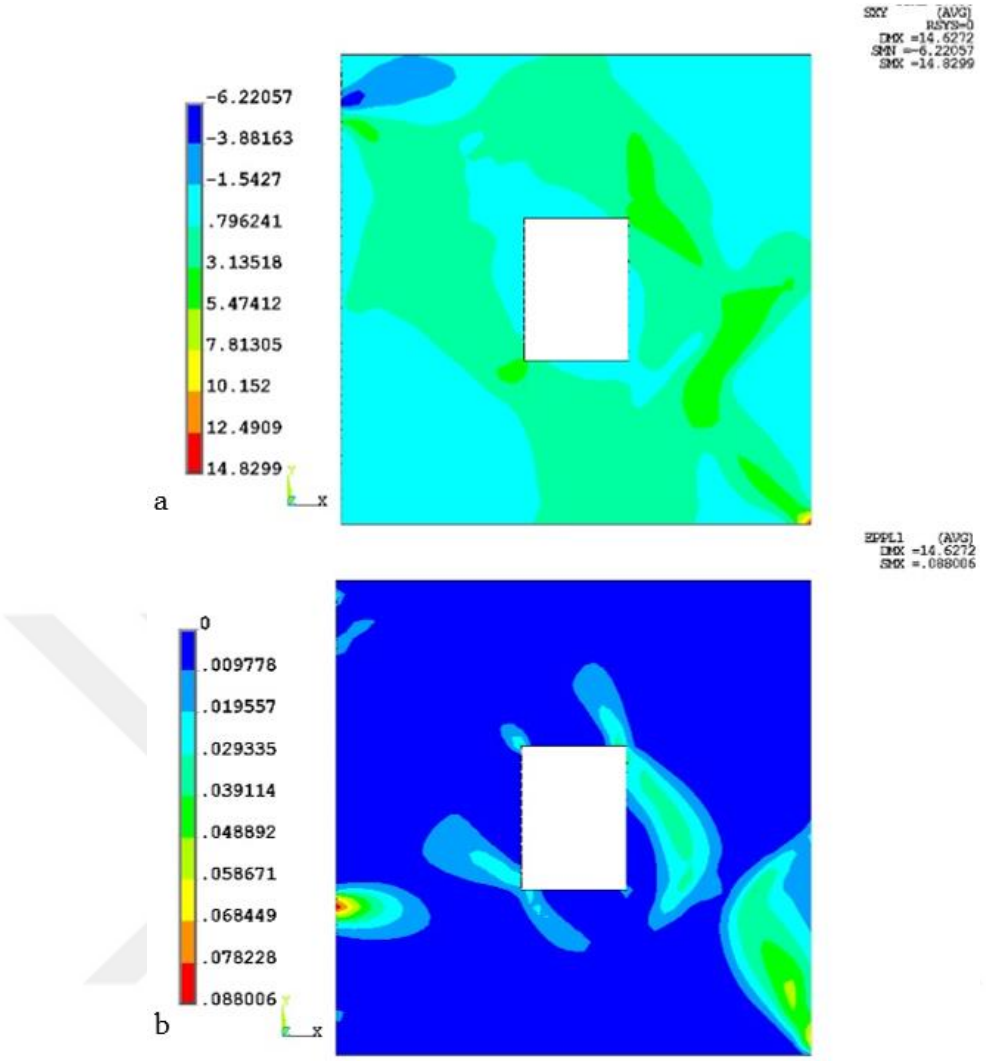
Yığma boşluklu referans duvarın (WOR) deneysel ve makro modellenmesi sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 5.19'da gösterilmiştir. WOR numunesinin sayısal analizinden elde edilen kesme dayanımı 90.98 kN'dur. Şekil 5.19'da verilen yük-yer değiştirme eğrilerinde görüldüğü üzere, yük taşıma kapasitesi ve başlangıç teğeti eğiminin deneysel verilerle uyumunun kabul edilebilir olduğu görülmüştür. Fakat doğrusal olmayan davranışın sergilendiği bölüm değerlendirildiğinde, sayısal sonuçların deneysel sonuçlardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Sayısal ve deneysel veriler arasındaki tutarsızlık, makro modelleme tekniğinin tüm olası göçme modlarını tam olarak temsil edememesi ve/veya deney koşullarının (sınır şartları) sayısal modele tam olarak yansıtılamamasından kaynaklanabilmektedir.



Şekil 5.19 WOR duvarına ait yük-yer değiştirme ilişkileri

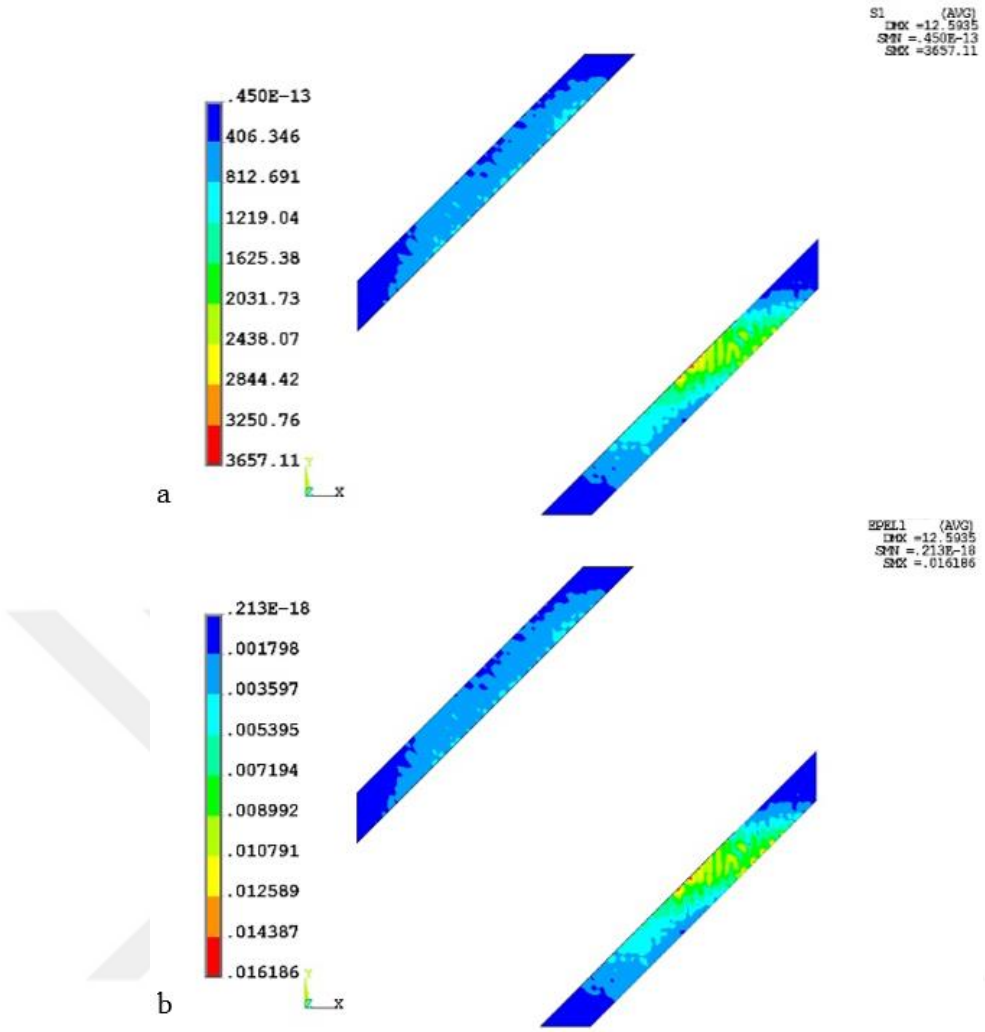
5.5.4 WOCS-1 Boşluklu Duvar

Düzlem içi yatay ve sabit düşey yüke maruz tek kat tek sıra karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş donatısız boşluklu yığma duvarın (WOCS-1) üç boyutlu elastoplastik analizleri tamamlandıktan sonra, duvar yüzeyi boyunca kayma gerilmelerinin ve maksimum plastik birim şekil değiştirmelerinin değişimi Şekil 5.20'de verilmiştir. WOCS-1 duvarı için elde edilen maksimum kayma gerilmesi değeri 14.83 MPa ve maksimum elastik birim şekil değiştirme değeri 0.088006 olarak elde edilmiştir. Şekil 5.20'de görüldüğü üzere makro modelleme sonucu analizi yapılan WOCS-1 duvarında, kayma gerilmeleri genel olarak deney sonucunda hasarların oluştuğu bölgelerde kritik değerlere ulaşmıştır. Ayrıca referans duvar ile karşılaştırıldığında karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin, çekme gerilmelerinin neden olduğu maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımlarını engellediği ve maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımlarını değiştirdiği, ancak bu dağılımların deneysel çatlak şekliyle uyumlu olduğu açıkça görülmüştür.



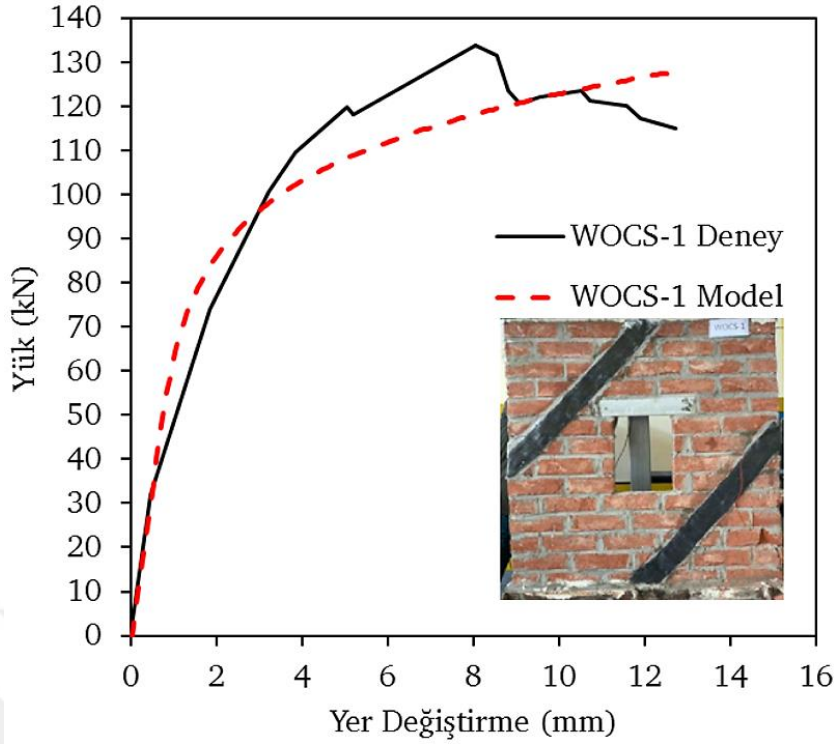
Şekil 5.20 WOCS-1 duvarının sayısal çözümüne ait a) Kayma gerilmeleri dağılımları b) Maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımları

Karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde meydana gelen maksimum elastik gerilmeleri ve elastik birim şekil değiştirme dağılımları Şekil 5.21'de verilmiştir. WOCS-1 duvarına ait karbon lif takviyeli polimer şeritleri için elde edilen maksimum elastik gerilme değeri 3657.11 MPa ve maksimum elastik birim şekil değiştirme değeri 0.0162 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sayısal analiz sonuçlarına göre karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde gerilmelerinin boşluğa yakın bölgelerde, diğer bölgelere göre daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Çekme dayanımı 4900 MPa olan karbon lif takviyeli polimerin neredeyse tam kapasite çalıştığı görülmüştür.



Şekil 5.21 WOCS-1 duvarının sayısal çözümüne ait karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde oluşan a) Maksimum elastik gerilmeleri dağılımları b) Maksimum elastik birim şekil değiştirme dağılımları

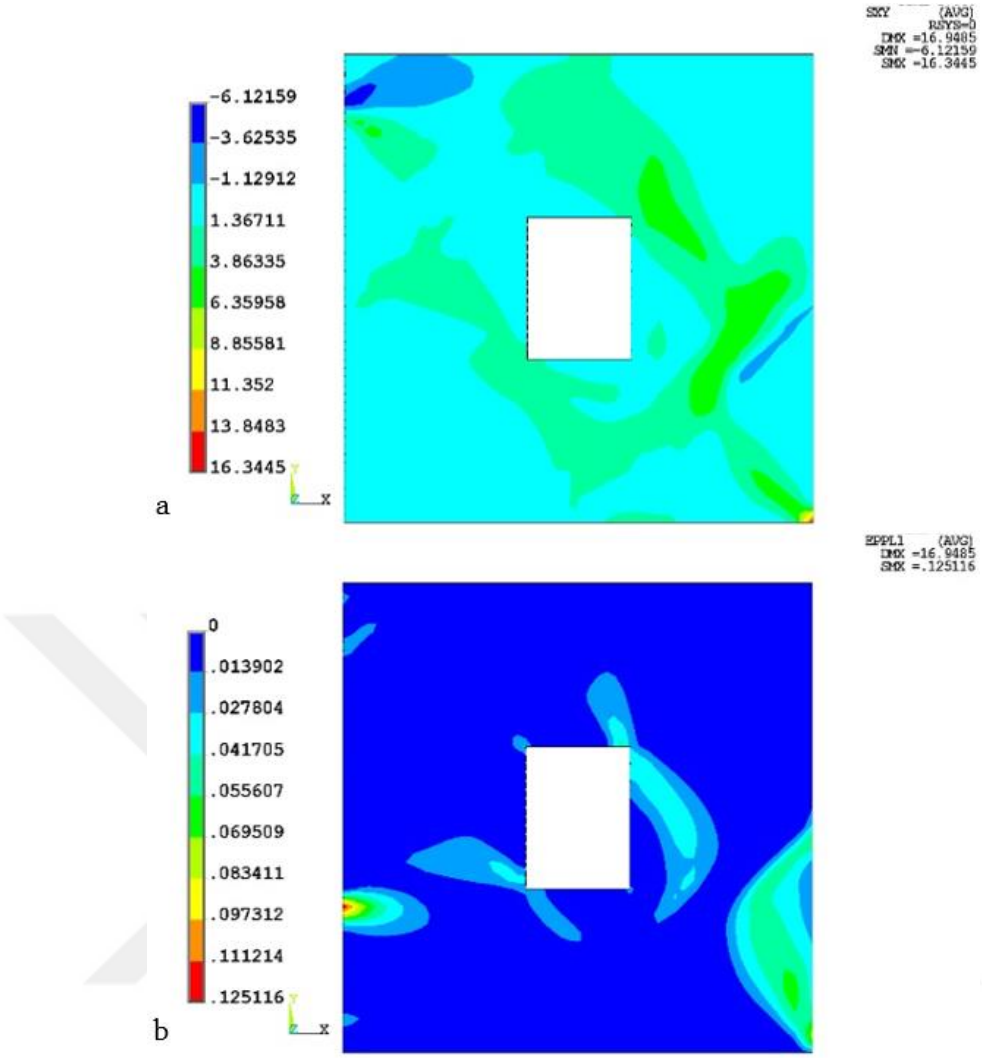
Tek kat tek sıra karbon lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmiş boşluklu yığma duvarın (WOCS-1) deneysel ve makro modellenmesi sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 5.22'de gösterilmiştir. WOCS-1 numunesinin sayısal analizinden elde edilen kesme dayanımı 127.90 kN'dur. Şekil 5.22'de verilen yük-yer değiştirme eğrilerinde görüldüğü üzere, yük taşıma kapasitesi ve başlangıç teğeti eğiminin deneysel verilerle uyumunun kabul edilebilir olduğu görülmüştür. Fakat doğrusal olmayan davranışın sergilendiği bölüm değerlendirildiğinde, deneysel ve sayısal sonuçlar arasında bazı farklılıklar olduğu görülmüştür. Bu farklılığın, makro model için kullanılan mekanik parametrelerin deneysel olarak elde edilememesi ve/veya deney koşullarının (sınır şartları) sayısal modele tam olarak yansıtılamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.22 WOCS-1 duvarına ait yük-yer değiştirme ilişkileri

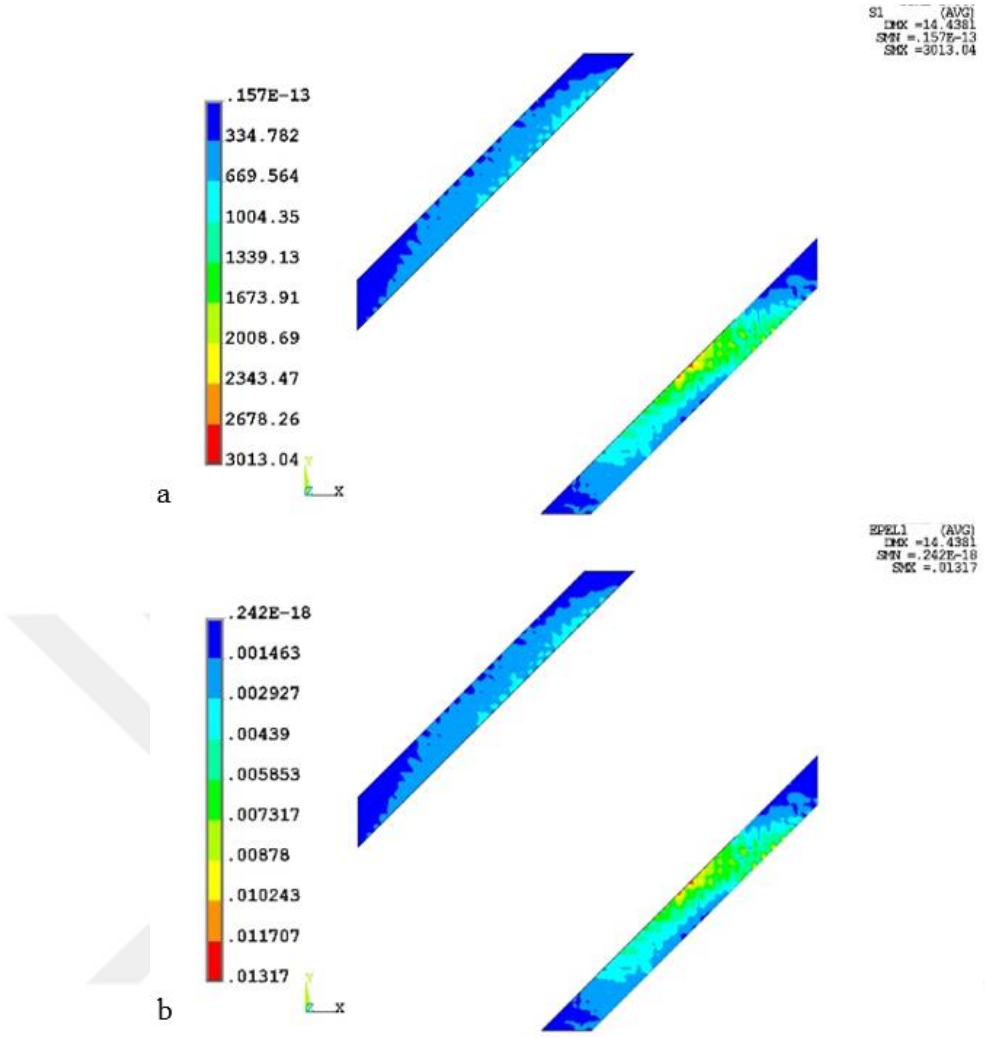
5.5.5 WOCD-1 Boşluklu Duvar

Düzlem içi yatay ve sabit düşey yüke maruz çift kat tek sıra karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş donatısız boşluklu yığma duvarın (WOCD-1) üç boyutlu elastoplastik analizleri tamamlandıktan sonra, duvar yüzeyi boyunca kayma gerilmelerinin ve maksimum plastik birim şekil değiştirmelerinin değişimi Şekil 5.23'te verilmiştir. WOCD-1 duvarı için elde edilen maksimum kayma gerilmesi değeri 16.34 MPa ve maksimum elastik birim şekil değiştirme değeri 0.125116 olarak elde edilmiştir. Şekil 5.23'te görüldüğü üzere makro modelleme sonucu analizi yapılan WOCD-1 duvarında, kayma gerilmeleri genel olarak deney sonucunda hasarların oluştuğu bölgelerde kritik değerlere ulaşmıştır. Ayrıca referans duvar ile karşılaştırıldığında karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin, çekme gerilmelerinin neden olduğu maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımlarını engellediği ve maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımlarını değiştirdiği, ancak bu dağılımların deneysel çatlak şekliyle uyumlu olduğu açıkça görülmüştür.



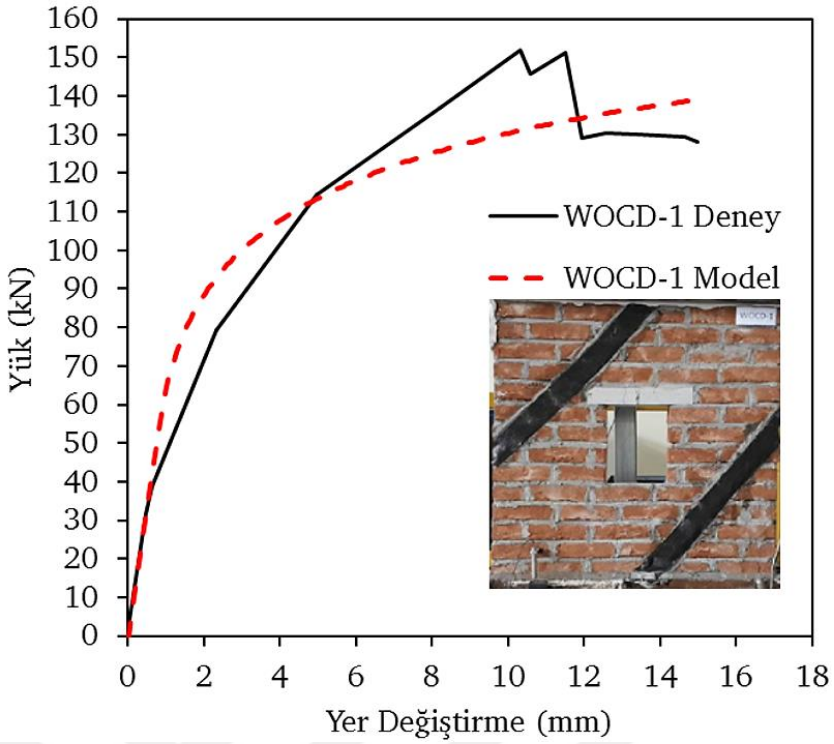
Şekil 5.23 WOCD-1 duvarının sayısal çözümüne ait a) Kayma gerilmeleri dağılımları b) Maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımları

Karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde meydana gelen maksimum elastik gerilmeleri ve elastik birim şekil değiştirme dağılımları Şekil 5.24'te verilmiştir. WOCD-1 duvarına ait karbon lif takviyeli polimer şeritleri için elde edilen maksimum elastik gerilme değeri 3013.04 MPa ve maksimum elastik birim şekil değiştirme değeri 0.0132 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sayısal analiz sonuçlarına göre, karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde gerilmelerinin boşluğa yakın bölgelerde, diğer bölgelere göre daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Çekme dayanımı 4900 MPa olan karbon lif takviyeli polimerin neredeyse tam kapasite çalıştığı görülmüştür.



Şekil 5.24 WOCD-1 duvarının sayısal çözümüne ait karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde oluşan a) Maksimum elastik gerilmeleri dağılımları b) Maksimum elastik birim şekil değiştirme dağılımları

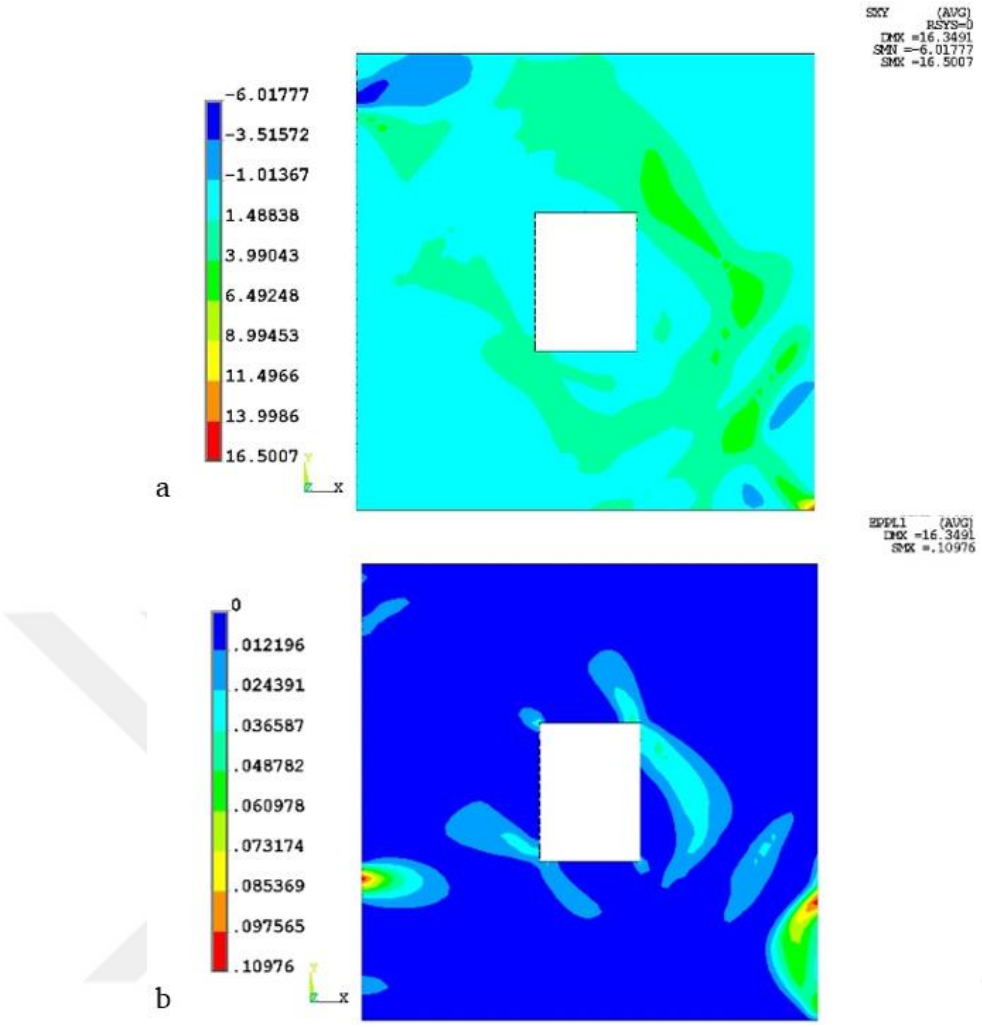
Çift kat tek sıra karbon lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmiş boşluklu yığma duvarın (WOCD-1) deneysel ve makro modellenmesi sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 5.25'te gösterilmiştir. WOCD-1 numunesinin sayısal analizinden elde edilen kesme dayanımı 139.14 kN'dur. Şekil 5.25'te verilen yük-yer değiştirme eğrilerinde görüldüğü üzere, yük taşıma kapasitesi ve başlangıç teğeti eğiminin deneysel verilerle uyumunun kabul edilebilir olduğu görülmüştür. Ancak doğrusal olmayan davranışın sergilendiği bölüm değerlendirildiğinde, deneysel ve sayısal sonuçlar arasında bazı farklılıklar olduğu görülmüştür. Bu farklılığın, makro model için kullanılan mekanik parametrelerin deneysel olarak elde edilememesi ve/veya deney koşullarının (sınır şartları) sayısal modele tam olarak yansıtılamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.25 WOCD-1 duvarına ait yük-yer değiştirme ilişkileri

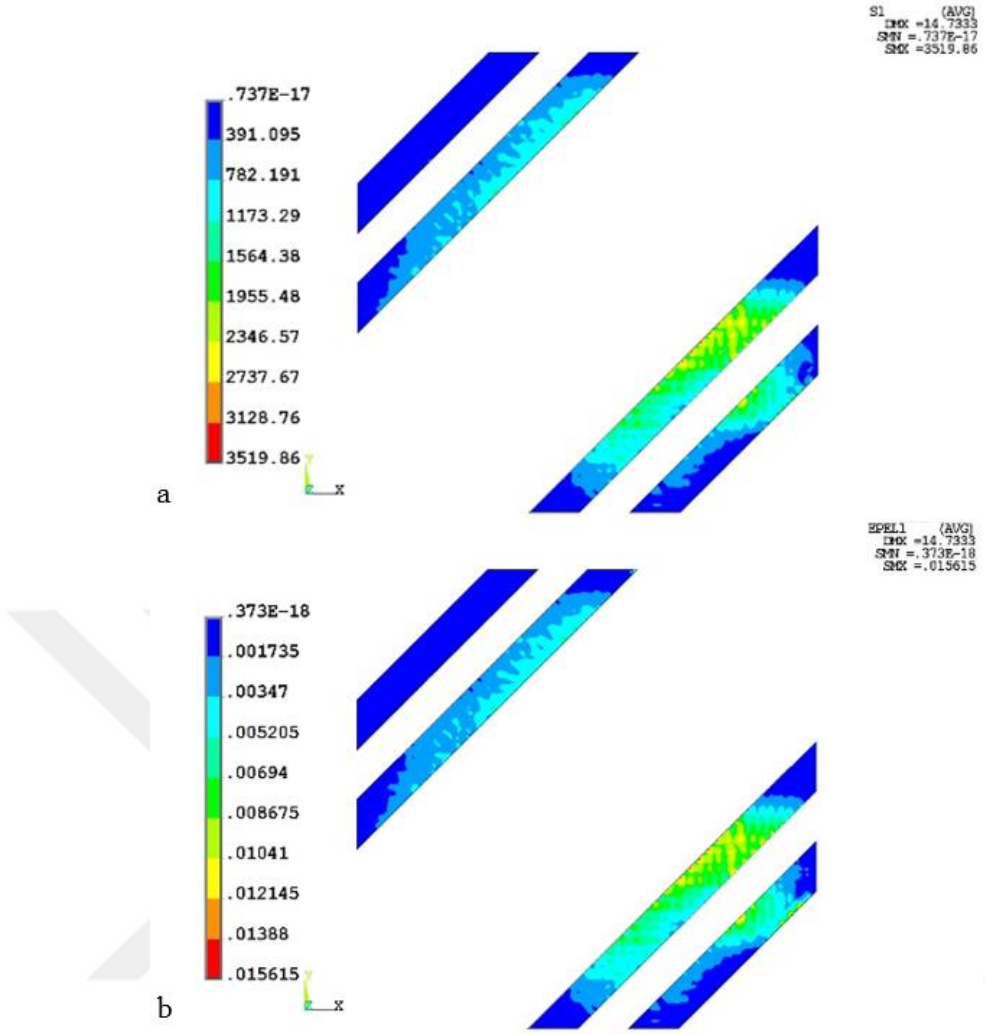
5.5.6 WOCS-2 Boşluklu Duvar

Düzlem içi yatay ve sabit düşey yüke maruz tek kat çift sıra karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş donatısız boşluklu yığma duvarın (WOCS-2) üç boyutlu elastoplastik analizleri tamamlandıktan sonra, duvar yüzeyi boyunca kayma gerilmelerin ve maksimum plastik birim şekil değiştirmelerin değişimi Şekil 5.26'da verilmiştir. WOCS-2 duvarı için elde edilen maksimum kayma gerilmesi değeri 16.50 MPa ve maksimum elastik birim şekil değiştirme değeri 0.10976 olarak elde edilmiştir. Şekil 5.26'da görüldüğü üzere makro modelleme sonucu analizi yapılan WOCS-2 duvarında, kayma gerilmeleri genel olarak deney sonucunda hasarların oluştuğu bölgelerde kritik değerlere ulaşmıştır. Ayrıca referans duvar ile karşılaştırıldığında karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin, çekme gerilmelerinin neden olduğu maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımlarını engellediği ve maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımlarını değiştirdiği, ancak bu dağılımların deneysel çatlak şekliyle uyumlu olduğu açıkça görülmüştür.



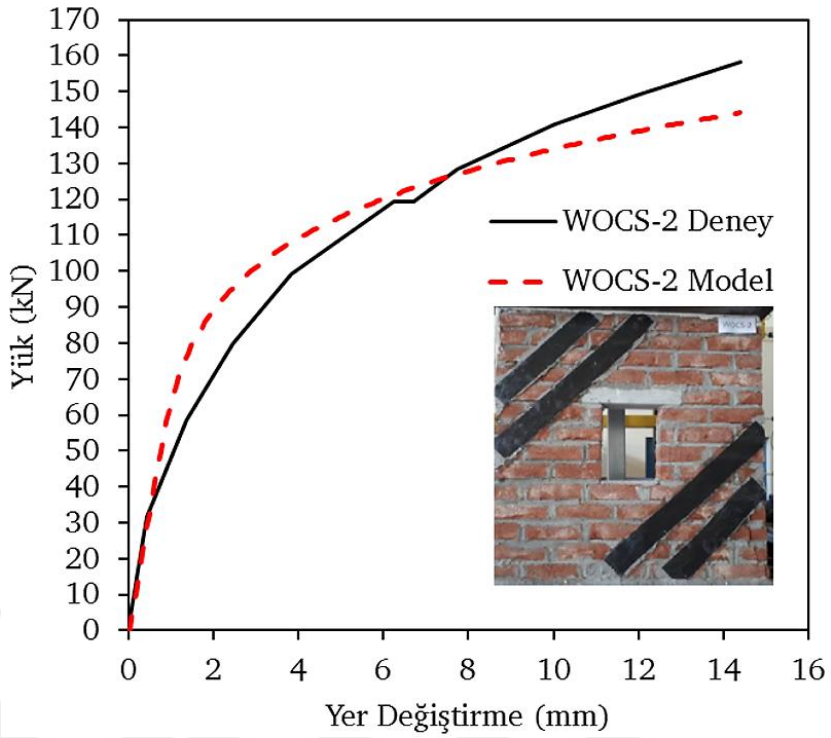
Şekil 5.26 WOCS-2 duvarının sayısal çözümüne ait a) Kayma gerilmeleri dağılımları b) Maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımları

Karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde meydana gelen maksimum elastik gerilmeleri ve elastik birim şekil değiştirme dağılımları Şekil 5.27'de verilmiştir. WOCS-2 duvarına ait karbon lif takviyeli polimer şeritleri için elde edilen maksimum elastik gerilme değeri 3519.86 MPa ve maksimum elastik birim şekil değiştirme değeri 0.0156 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sayısal analiz sonuçlarına göre, karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde gerilmelerinin boşluğa yakın bölgelerde, diğer bölgelere göre daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Çekme dayanımı 4900 MPa olan karbon lif takviyeli polimerin neredeyse tam kapasite çalıştığı görülmüştür.



Şekil 5.27 WOCS-2 duvarının sayısal çözümüne ait karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde oluşan a) Maksimum elastik gerilmeleri dağılımları b) Maksimum elastik birim şekil değiştirme dağılımları

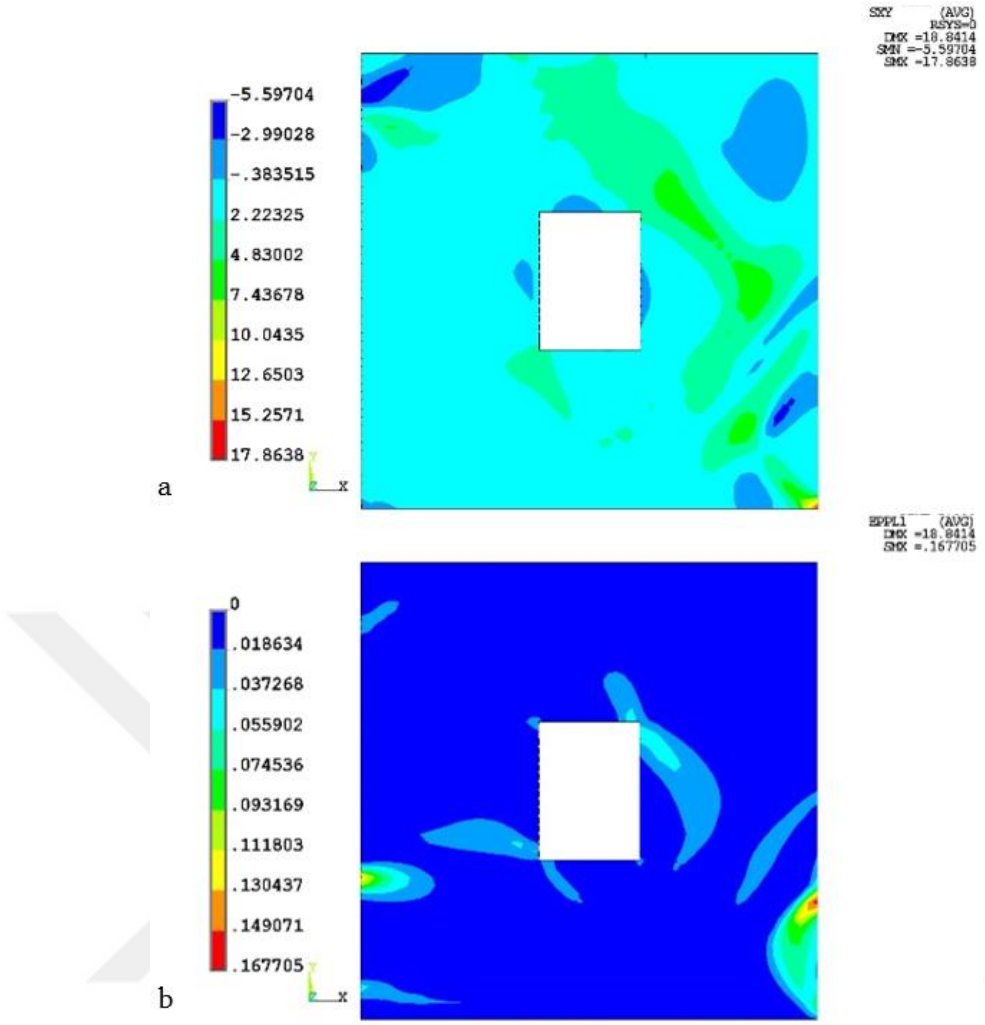
Tek kat çift sıra karbon lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmiş boşluklu yığma duvarın (WOCS-2) deneysel ve makro modellenmesi sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 5.28'de gösterilmiştir. WOCS-2 numunesinin sayısal analizinden elde edilen kesme dayanımı 144.05 kN'dur. Şekil 5.28'de verilen yük-yer değiştirme eğrilerinde görüldüğü üzere, yük taşıma kapasitesi ve başlangıç teğeti eğiminin deneysel verilerle uyumunun kabul edilebilir olduğu görülmüştür. Fakat doğrusal olmayan davranışın sergilendiği bölüm değerlendirildiğinde, deneysel ve sayısal sonuçlar arasında bazı farklılıklar olduğu görülmüştür. Bu farklılığın, makro model için kullanılan mekanik parametrelerin deneysel olarak elde edilememesi ve/veya deney koşullarının (sınır şartları) sayısal modele tam olarak yansıtılamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.28 WOCS-2 duvarına ait yük-yer değiştirme ilişkileri

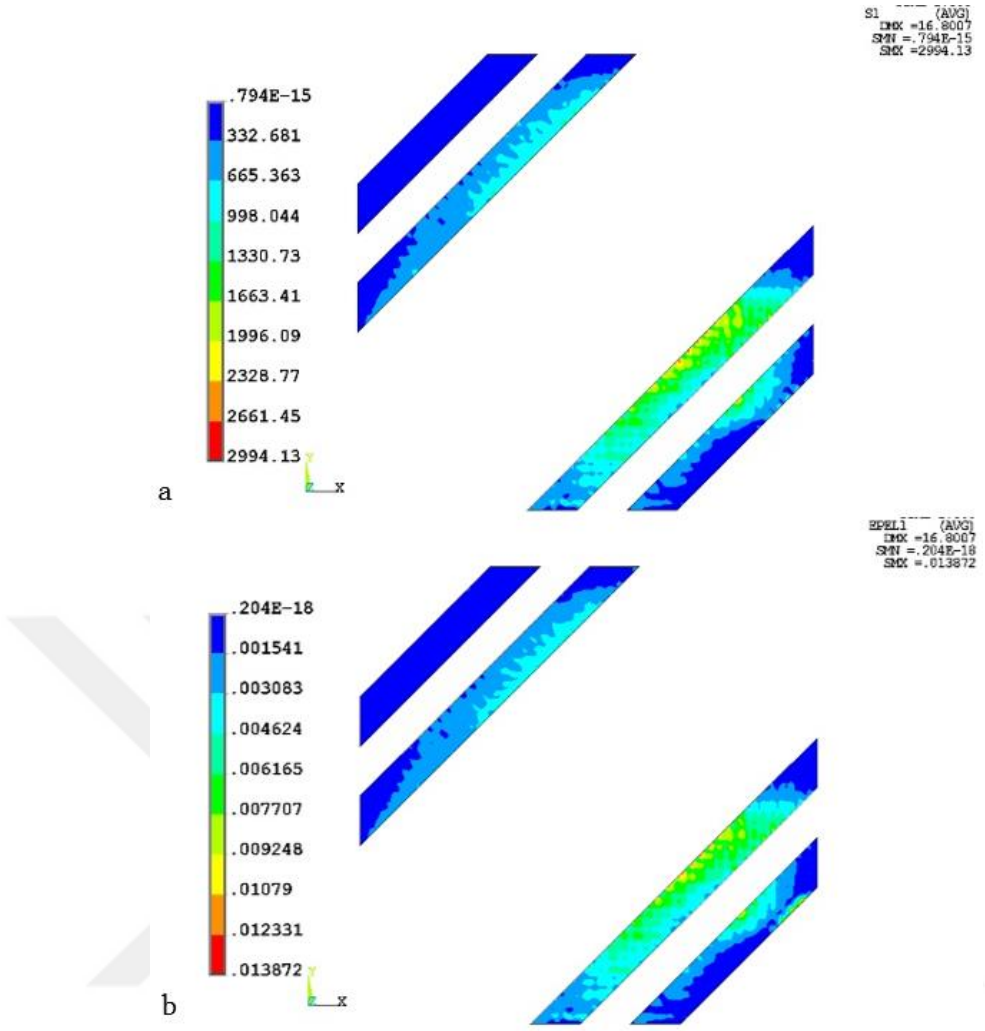
5.5.7 WOCD-2 Boşluklu Duvar

Düzlem içi yatay ve sabit düşey yüke maruz çift kat çift sıra karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş donatısız boşluklu yığma duvarın (WOCD-2) üç boyutlu elastoplastik analizleri tamamlandıktan sonra, duvar yüzeyi boyunca kayma gerilmelerin ve maksimum plastik birim şekil değiştirmelerin değişimi Şekil 5.29'da verilmiştir. WOCD-2 duvarı için elde edilen maksimum kayma gerilmesi değeri 17.86 MPa ve maksimum elastik birim şekil değiştirme değeri 0.167705 olarak elde edilmiştir. Şekil 5.29'da görüldüğü üzere makro modelleme sonucu analizi yapılan WOCD-2 duvarında, kayma gerilmeleri genel olarak deney sonucunda hasarların oluştuğu bölgelerde kritik değerlere ulaşmıştır. Ayrıca referans duvar ile karşılaştırıldığında karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin, çekme gerilmelerinin neden olduğu maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımlarını engellediği ve maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımlarını değiştirdiği, ancak bu dağılımların deneysel çatlak şekliyle uyumlu olduğu açıkça görülmüştür.



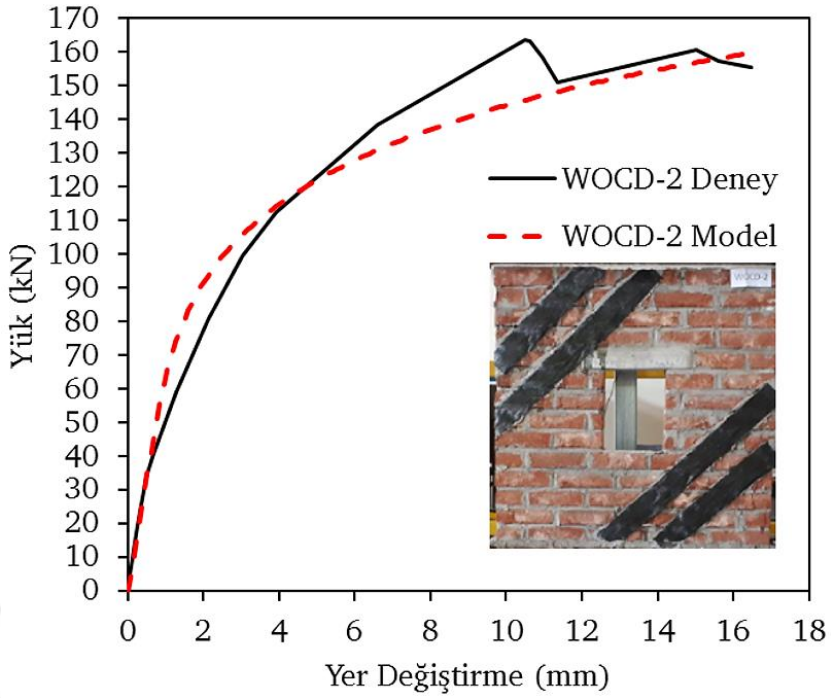
Şekil 5.29 WOCD-2 duvarının sayısal çözümüne ait a) Kayma gerilmeleri dağılımları b) Maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımları

Karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde meydana gelen maksimum elastik gerilmeleri ve elastik birim şekil değiştirme dağılımları Şekil 5.30'da verilmiştir. WOCD-2 duvarına ait karbon lif takviyeli polimer şeritleri için elde edilen maksimum elastik gerilme değeri 2994.13 MPa ve maksimum elastik birim şekil değiştirme değeri 0.0139 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sayısal analiz sonuçlarına göre, karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde gerilmelerinin boşluğa yakın bölgelerde, diğer bölgelere göre daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Çekme dayanımı 4900 MPa olan karbon lif takviyeli polimerin neredeyse tam kapasite çalıştığı görülmüştür.



Şekil 5.30 WOCD-2 duvarının sayısal çözümüne ait karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde oluşan a) Maksimum elastik gerilmeleri dağılımları b) Maksimum elastik birim şekil değiştirme dağılımları

Çift kat çift sıra karbon lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmiş boşluklu yığma duvarın (WOCD-2) deneysel ve makro modellenmesi sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 5.31'de gösterilmiştir. WOCD-2 numunesinin sayısal analizinden elde edilen kesme dayanımı 159.81 kN'dur. Şekil 5.31'de verilen yük-yer değiştirme eğrilerinde görüldüğü üzere, yük taşıma kapasitesi ve başlangıç teğeti eğiminin deneysel verilerle uyumunun kabul edilebilir olduğu görülmüştür. Fakat doğrusal olmayan davranışın sergilendiği bölüm değerlendirildiğinde, deneysel ve sayısal sonuçlar arasında bazı farklılıklar olduğu görülmüştür. Bu farklılığın, makro model için kullanılan mekanik parametrelerin deneysel olarak elde edilememesi ve/veya deney koşullarının (sınır şartları) sayısal modele tam olarak yansıtılamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.31 WOCD-2 duvarına ait yük-yer değiştirme ilişkileri

Sayısal analizler sonucunda dolu donatısız yığma duvarlar ve boşluklu donatısız yığma duvarlar için bulunan kesme dayanımları Tablo 5.4'te gösterilmektedir.

Tablo 5.4 Sayısal analiz sonucu elde edilen dolu ve boşluklu donatısız yığma duvarların kesme dayanımları

	Dolu donatısız yığma duvarlar		Boşluklu donatısız yığma duvarlar				
	WR	WCS-1	WOR	WOCS-1	WOCD-1	WOCS-2	WOCD-2
Kesme dayanımı (kN)	125.80	170.44	90.98	127.90	139.14	144.05	159.81

6
ANALİTİK ÇALIŞMA

Lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş donatısız yığma duvar nominal kesme dayanımı (V_n), çeşitli yönetmelik ve standartlar tarafından önerilen ampirik bağıntılar yardımıyla belirlenebilmektedir. Mevcut ampirik bağıntılar sayesinde yüksek maliyet gerektiren ve uzun zaman alan deney yapma zorunluluğu ortadan kalkmakta, güvenilir ve hızlı sonuçlar elde edilebilmektedir.

Bu bölümde düzlem içi sabit düşey yük ve kademeli artan yatay yük altında karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmiş dolu ve boşluklu yığma duvarların kesme dayanımlarının analitik olarak belirlenmesi amaçlanmaktadır.

6.1 Lif Takviyeli Polimer ile Güçlendirilmiş Deney Duvarlarının Kesme Dayanımları

Lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş yığma duvarların nominal kesme dayanımı (V_n) iki bileşenin toplamı olarak kabul edilir ve Denklem (6.1) ile belirlenmektedir.

$$V_n = V_m + V_f \tag{6.1}$$

Burada V_m yalın donatısız yığma duvarların kesme dayanımını temsil ederken, V_f lif takviyeli polimer şeritlerinin nominal kesme dayanımına katkısını temsil etmektedir.

6.1.1 Yalın Deney Duvarlarının Kesme Dayanımına Katkısı

Yalın deney duvarlarının (WR ve WOR) kesme dayanımlarının analitik bağıntılar kullanılarak belirlenmesinde ASCE/SEI 41-17, Eurocode 6 (EN 1996-1-1), ve MSJC 2013 (ACI 530-13)'de önerilen modeller dikkate alınmıştır.

6.1.1.1 Model I

ASCE/SEI 41-17 [129]'ye göre yığma duvarların düzlem içi kesme dayanımı Denklem (6.2) ile belirlenmektedir.

$$Q_{CL} = V_{dt} = f'_{dt} A_n \beta \sqrt{1 + \frac{f_a}{f'_{dt}}} \quad (6.2)$$

Burada A_n duvarın net harçlı ve/veya derz dolgulu bölümünün alanı, β katsayısı L/h_{eff}'e bağlı bir katsayı (L/h_{eff}<0.67 için β=0.67 değerini, 0.67 ≥L/h_{eff}≤1.0 için $\beta = L/h_{eff}$ ve L/h_{eff}>1.0 olması durumunda β=1.0 değerini alır, h_{eff} yatay kuvvetin uygulama noktasına kadar olan yükseklik, L ise duvarın genişliğidir. f_a sabit yüklerden dolayı meydana gelen eksenel basınç gerilmesi, f'_{dt} duvarın çekme dayanımıdır. Denklem (6.2)'de $A_{n,boşluklu}$=81000 mm^2, $A_{n,dolu}$=104000 mm^2, β=1.0, f_a=2 MPa, f'_{dt}=0.6 MPa' dır. Bu değerler Denklem (6.2)'de yerine yazıldığında, dolu yığma duvarın (WR) kesme dayanımı 129.90 kN ve boşluklu yığma duvarın (WOR) kesme dayanımı 101.16 kN olarak elde edilmiştir.

6.1.1.2 Model II

Eurocode 6 (EN 1996-1-1) [88]'ya göre yığma duvarların düzlem içi karakteristik kesme dayanımı Denklem (6.3) ile belirlenmektedir.

$$V_{Rd} = f_{vd} t l_c \quad (6.3)$$

Burada, t duvar kalınlığı ve l_c duvar genişliğidir. Duvarın tasarım kesme dayanımını ifade eden f_{vd}, karakteristik kesme dayanımı (f_{vk}) ile eşit kabul edilirse, Denklem (6.4) ile belirlenmektedir.

$$f_{vd} = f_{vk} = f_{vko} + 0.4\sigma_d \leq 0.065 f_b \; veya \; f_{vlt} \quad (6.4)$$

Burada, f_{vko} karakteristik başlangıç kesme dayanımı, f_{vlt}, f_{vk} değeri için bir sınır değer, σ_d tasarımı basınç gerilmesi, ve f_b yığma duvarın normalize edilmiş basınç dayanımıdır. Denklem (6.3)'te f_{vd}=1.1 MPa, t=100 mm, $l_{c,dolu} = 1040\,mm$ ve $l_{c,boşluklu} = 810\,mm$, σ_d=2 MPa'dır. Bu değerler Denklem (6.3)'te yerine yazıldığında, dolu yığma duvarın (WR) kesme dayanımı 114.40 kN ve boşluklu yığma duvarın (WOR) kesme dayanımı 89.10 kN olarak elde edilmiştir.

6.1.1.3 Model III

MSJC (ACI 530-13) [89]'ye göre yığma duvarların düzlem içi kesme dayanımı Denklem (6.5) ile belirlenmektedir.

$$V_{nm} = 0.083\left[4 - 1.75\left(\frac{M_u}{V_u d_v}\right)\right] A_{nv}\sqrt{f'_m} + 0.25P_u \qquad (6.5)$$

Burada, M_u ve V_u kesitteki sırasıyla maksimum moment ve kesme kuvveti değeri, d_v duvar yüksekliğidir. A_{nv} net kesit alanı, f'_m yığma duvarın basınç dayanımı, P_u kesite etkiyen eksenel yükün değeridir. Denklem (6.5)'te $\frac{M_u}{V_u d_v}$=1, $A_{nv,dolu}$=104000 mm^2 ve $A_{nv,boşluklu}$=81000 mm^2, f'_m=6.36 MPa ve , P_u is 208000 N'dur. Bu değerler Denklem (6.5)'te yerine yazıldığında, dolu yığma duvarın (WR) kesme dayanımı 100.98 kN ve boşluklu yığma duvarın (WOR) kesme dayanımı 90.15 kN olarak elde edilmiştir.

Dolu ve boşluklu yalın duvarların deneysel olarak bulunan kesme dayanımları ($V_m{}^{deney}$) ile analitik model sonucu hesaplanan kesme dayanımları ($V_m{}^{analitik}$) sonuçları Tablo 6.1'de verilmiştir. Bu üç model arasında, dolu duvar için ASCE/SEI 41-17 (Model I); boşluklu duvarlar için Eurocode 6 (EN 1996-1-1)'nin (Model II) analitik modelinden elde edilen sonuçların, bu deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ile uyum içerisinde olduğunu göstermiştir.

Tablo 6.1 Duvarların deneysel kesme dayanımı ile analitik olarak hesaplanan kesme dayanımlarının karşılaştırılması

	WR			**WOR**		
	$V_m{}^{analitik}$ (kN)	$V_m{}^{deney}$ (kN)	$\frac{V_m{}^{deney}}{V_m{}^{analitik}}$	$V_m{}^{analitik}$ (kN)	$V_m{}^{deney}$ (kN)	$\frac{V_m{}^{deney}}{V_m{}^{analitik}}$
Model I	129.90	125.00	**0.96**	101.16	87.00	0.86
Model II	114.40	125.00	1.09	89.10	87.00	**0.98**
Model III	100.98	125.00	1.24	90.15	87.00	0.97

6.1.2 Lif Takviyeli Polimer Şeritlerinin Nominal Kesme Dayanımına Katkısı

Son yıllarda lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş yığma duvarların tasarımı için farklı analitik yaklaşımları içeren yönetmelik ve çalışmalarda artış görülmüştür [6], [53], [130], [131]. Bu yaklaşımların büyük çoğunluğu yatay ve dikey lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmiş yığma duvarların tasarımı ile ilgilidir [40], [53], [130], [131]. Ayrıca, Alcaino ve Santa-Maria [6], Nardone vd. [44] ve Prota vd. [46] diyagonal lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmiş yığma

duvarların dayanımına lif takviyeli polimer şeritlerinin katkısını içeren bağıntılar da önermişlerdir.

Bu tez çalışmasında, lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş deney duvarlarında lif takviyeli polimer şeritlerinin kesme dayanımına katkısını (V_f) analitik olarak belirlemek için Genetik İfadeli Programlama (GEP) [132] modeli kullanılarak yeni bir analitik bağıntı önerilmiştir. Önerilen modelin doğruluğu ve uygulanabilirliliği istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

6.1.2.1 Deneysel Veritabanı

Önerilen GEP modeli, literatürde mevcut sekiz farklı deney duvarı dikkate alınarak belirlenen girdi parametreleri kullanılarak geliştirilmiştir [41], [133]–[135]. GEP modelini geliştirmek için literatürde mevcut deneysel sonuçlara dayanan beş ana parametre göz önüne alınmıştır. Bu parametreler lif takviyeli polimer şeritlerinin kesit alanı (A_{FRP}), lif takviyeli polimer şeritlerinin çekme dayanımı (f_{FRP}), duvar genişliği (L_{duvar}), duvar yüksekliği (H_{duvar}) ve duvar kalınlığı (t_{duvar})'dır. Seçilen parametrelere ilişkin deney duvarlarının özellikleri Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2 Deney duvarlarının özellikleri

Kaynak	Duvar	Yükleme Türü	A_{FRP} (mm^2)	f_{FRP} (MPa)	L_{duvar} (mm)	H_{duvar} (mm)	t_{duvar} (mm)	V_f^{deney} (kN)
Doran vd. [133]	WOCS-1	M*	54.40	4900	1040	1040	100	46.00
Doran vd. [133]	WOCD-1	M*	108.80	4900	1040	1040	100	64.00
Doran vd. [133]	WOCS-2	M*	108.80	4900	1040	1040	100	71.00
Doran vd. [133]	WOCD-2	M*	217.60	4900	1040	1040	100	76.00
Unsal Aslan vd. [134]	WCS-1	M*	27.20	4900	1040	1040	100	59.00
Santa-Maria vd. [135]	MLC-00-C-A-FX-03	C**	52.00	3450	1975	2000	140	94.30
Santa-Maria vd. [135]	MLC-00-C-A-FX-01	C**	78.00	3450	1975	2000	140	113.50
Martinelli vd. [41]	D-SMW-1	C**	66.40	4830	1160	1160	250	69.55

*M: Monotonik C**: Döngüsel

V_f^{deney}: Lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş duvarların kesme dayanımına lif takviyeli polimerin katkısı

Her bir girdi/çıktı parametresi için ortalama, standart sapma, medyan, çarpıklık, basıklık, maksimum ve minimum gibi istatistiksel kriterlerin açıklamaları Tablo 6.3'te verilmiştir.

Tablo 6.3 Girdi/çıktı parametrelerinin istatistiksel kriterleri

	$A_{FRP}\,(mm^2)$	$f_{FRP}\,(MPa)$	$L_{duvar}\,(mm)$	$H_{duvar}\,(mm)$	$t_{duvar}\,(mm)$	$V_f^{deney}(kN)$
Ortalama	89.15	4528.75	1288.75	1295.00	128.75	74.17
Standart sapma	58.97	666.26	425.58	437.10	52.22	21.09
Medyan	72.20	4900	1040	1040	100	70.28
Çarpıklık	1.66	-1.43	1.40	1.40	2.23	0.85
Basıklık	3.35	-0.01	-0.06	-0.06	5.23	0.73
Maksimum	217.60	4900	1975	2000	250	113.5
Minimum	27.20	3450	1040	1040	100	46.00

Ayrıca Tablo 6.4'te girdi/çıktı parametrelerinin korelasyon matrisi verilmiştir. Mutlak değerleri 0.8 ile 1 arasında olan parametreler arasında güçlü bir korelasyon olduğu, aksi halde zayıf bir korelasyon olduğu görülmektedir.

Tablo 6.4 Girdi/çıktı parametrelerinin korelasyon matrisi

	$A_{FRP}\,(mm^2)$	$f_{FRP}\,(MPa)$	$L_{duvar}\,(mm)$	$H_{duvar}\,(mm)$	$t_{duvar}\,(mm)$	$V_f^{deney}(kN)$
$A_{FRP}(mm^2)$	1.000	0.26	-0.273	-0.272	-0.248	0.093
$f_{FRP}\,(MPa)$	0.26	1.000	-0.998	-0.998	-0.169	-0.873
$L_{duvar}\,(mm)$	-0.273	-0.998	1.000	1.000	0.229	0.876
$H_{duvar}\,(mm)$	-0.272	-0.998	1.000	1.000	0.226	0.876
$t_{duvar}\,(mm)$	-0.248	-0.169	0.229	0.226	1.000	0.219
$V_f^{deney}(kN)$	0.093	-0.873	0.876	0.876	0.219	1.000

6.1.2.2 Önerilen GEP Modelinin Geliştirilmesi ve Performansı

Lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş duvarlarda, lif takviyeli polimerin kesme dayanımına katkısını içeren, GEP modeli kullanılarak üretilen bağıntı Denklem (6.6)'da verilmiştir.

$$V_f = 36.19(t_{duvar} + L_{duvar} + 9.29) + f_{FRP} + 0.2A_{FRP}(H_{duvar} - A_{FRP} - 112.62) \qquad (6.6)$$

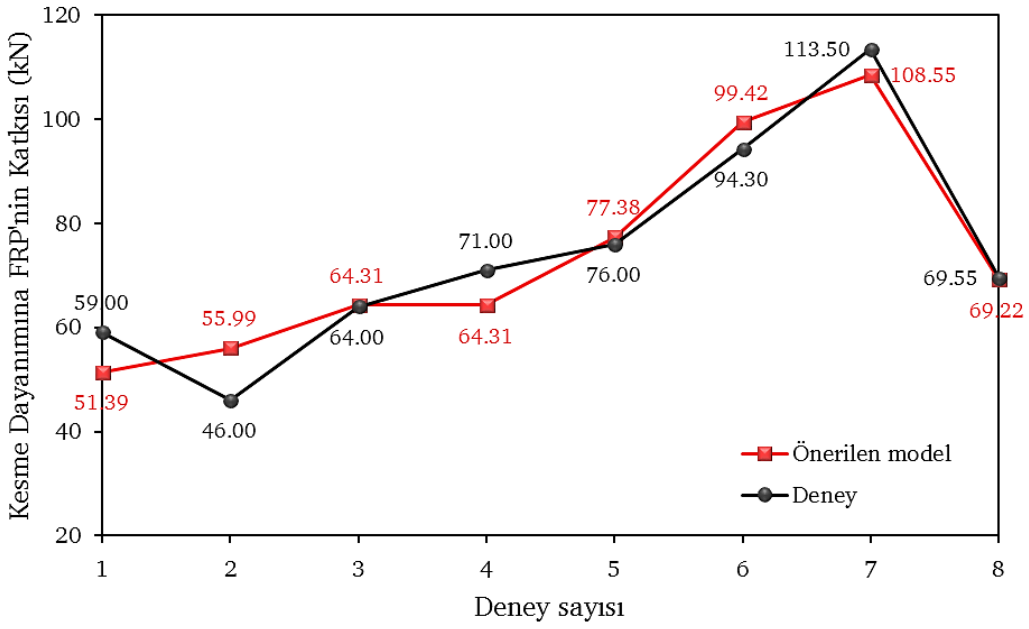
Önerilen GEP modelin performansı, istatistiksel metodolojiye dayalı farklı istatistiksel kriterler kullanılarak değerlendirilebilir. Literatürde önerilen farklı modellerin performansını karşılaştırmak için söz konusu istatiksel kriterler dikkate alınmıştır. Bu kriterler ortalama hata karelerinin karekökü ($RMSE$), ortalama mutlak yüzde hatası ($MAPE$), belirleme katsayısı (R^2). Her bir kriterin açıklaması Denklem (6.7), Denklem (6.8), ve Denklem (6.9) ile tanımlanmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(deney - model)^2}{n}} \tag{6.7}$$

$$MAPE = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{deney - model}{deney}\right| \tag{6.8}$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(deney - \overline{deney})(model - \overline{model})\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}(deney - \overline{deney})^2 \sum_{i=1}^{n}(model - \overline{model})^2} \tag{6.9}$$

Burada, n duvar sayısını, $deney$ ve $\overline{deney}$ sırasıyla deneysel değerler ve deneysel değerlerin ortalamasını göstermektedir. Ayrıca, $model$ ve $\overline{model}$ sırasıyla önerilen model değerlerini ve önerilen model değerlerinin ortalamasını ifade etmektedir.



Şekil 6.1 Önerilen model ve deney sonuçlarının karşılaştırılması

V_f için deney ve önerilen modelin sonuçları Şekil 6.1'de karşılaştırılmıştır. Önerilen modelin sonuçları ile deney sonuçları arasındaki mutlak farkın küçük olduğu görülmektedir.

6.1.2.3 Önerilen GEP Model ile Literatürde Mevcut Analitik Modellerin Karşılaştırılması

Lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş yığma duvarlar için lif takviyeli polimerin nominal kesme dayanımına katkısı, literatürde mevcut iki farklı analitik model kullanılarak belirlenmiş ve önerilen GEP model ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Prota vd. [46] lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş duvarların kesme dayanımını belirlemek için CNR-DT200 [136]'den türetilen bağıntıyı önermişlerdir. Lif takviyeli polimerin kesme dayanımına katkısını, $V_{Rd,f}$, Denklem (6.10) ile belirlemişlerdir:

$$V_{Rd,f} = \varepsilon_{fd} E_f A_{fd} \cos(\alpha) \tag{6.10}$$

burada A_{fd} diyagonal lif takviyeli polimer şeritlerinin alanı, α diyagonal şeritlerin duvar yüzeyiyle yaptığı açı, E_f is lif takviyeli polimerin elastisite modülü, ε_{fd} lif takviyeli polimerin tasarım şekil değiştirmesidir. ε_{fd} Denklem (6.11)'e göre hesaplanır:

$$\varepsilon_{fd} = \sqrt{\frac{2 \times \Gamma_{Fm}}{E_f \times t_f}} \tag{6.11}$$

burada t_f lif takviyeli polimerin kalınlığı ve Γ_{Fm} lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş duvarların ortalama kırılma enerjisidir ve Denklem (6.12) ile hesaplanır:

$$\Gamma_{Fm} = c_1 \times \sqrt{f_{mm} \times f_{mtm}} \tag{6.12}$$

burada f_{mm} yığma duvarın ortalama basınç dayanımı, f_{mtm} yığma duvarın ortalama çekme dayanımı, ve c_1 ampirik olarak belirlenen katsayıyı ifade etmektedir.

Nardone vd. [44] lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş duvarların kesme dayanımını incelemek için ACI 440.7R [130]'den türetilen bağıntı önermişlerdir. lif takviyeli polimerin kesme dayanımına katkısını, V_f, Denklem (6.13) ile belirlemişlerdir:

$$V_f = p_{fv} w_f \frac{d_v}{s_f} \cos(\alpha) \tag{6.13}$$

burada w_f lif takviyeli polimer şeritlerinin genişliğini, d_v duvar genişliği, s_f lif takviyeli polimer şeritlerinin merkezden merkeze olan uzaklıklarını, α lif takviyeli polimerin duvarın yatay ekseniyle yaptığı açıyı temsil eder ve p_{fv} Denklem (6.14) ile belirlenir:

$$p_{fv} = n t_f f_{fe} \tag{6.14}$$

burada n lif takviyeli polimer katman sayısıdır. Denklem (6.13)'te d_v/s_f terimi, diyagonal lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmiş duvarlarda 1 olarak kabul edilmiştir. Etkili gerilme f_{fe} Denklem (6.15) ile hesaplanabilir:

$$f_{fe} = E\varepsilon_{fe} = E_f \kappa_v \varepsilon_{fu} = E_f \kappa_v C_E \varepsilon_{fu}^* \tag{6.15}$$

burada E_f lif takviyeli polimerin elastisite modülü, ε_{fu}^* lif takviyeli polimerin nihai kopma gerinimi ve çevresel şartları dikkate alan için C_E katsayısı 1 olarak kabul edilmiştir. Kesme kontrollü göçme modları için κ_v katsayısı Denklem (6.16)'da verilmiştir [130]:

$$\kappa_v = \begin{cases} 0.40 & \text{için } \omega_f \leq 0.20 \\ 0.64 - 1.2\omega_f & \text{için } 0.20 < \omega_f \leq 0.45 \\ 0.10 & \text{için } \omega_f > 0.45 \end{cases} \tag{6.16}$$

SI birim sisteminde ω_f Denklem (6.17)'ye eşittir:

$$\omega_f = \frac{1}{85} \frac{A_f E_f}{A_n \sqrt{f_m'}} \tag{6.17}$$

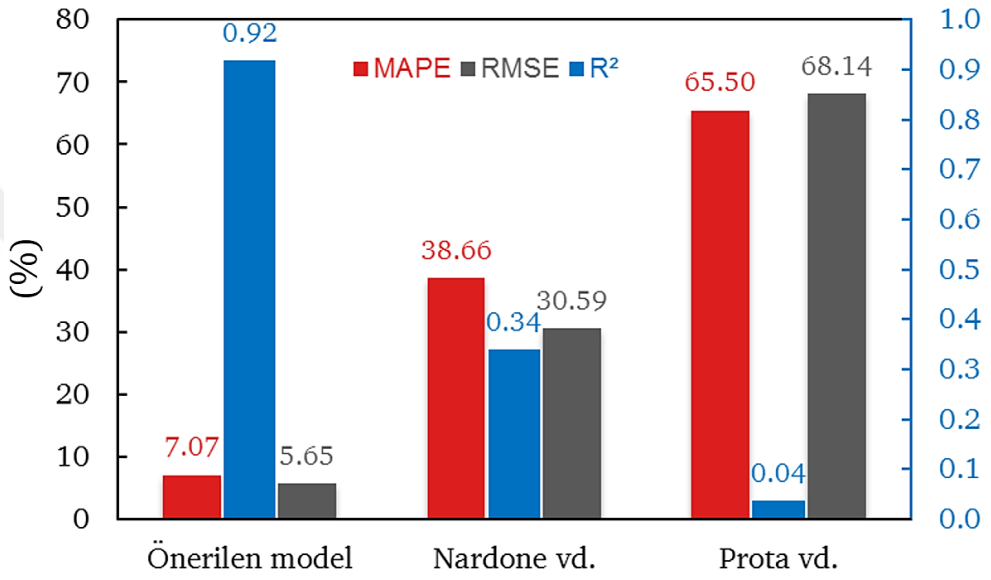
burada A_f lif takviyeli polimer toplam enkesit alanı, A_n duvar enkesit alanı ve f_m' yığma duvar basınç dayanımıdır.

Önerilen GEP modelin $MAPE$, $RMSE$ ve R^2 değerlerinin Nardone vd. [44] ve Prota vd. [46] tarafından önerilen modellerin değerleri ile karşılaştırılması, Tablo 6.5 ve Şekil 6.2'de verilmiştir. Tablo 6.5'te görüldüğü gibi önerilen GEP modelin $MAPE$, $RMSE$ ve R^2 sırasıyla 7.07, 5.65 ve 0.92 değerleri ile mevcut analitik modeller arasında en yüksek doğruluğu sağladığı gözlenmiştir. Öte yandan, Prota vd. [46]

tarafından önerilen modelin $MAPE$, $RMSE$ ve R^2 sırasıyla 65.5, 68.14 ve 0.04 değerleri ile en düşük performansı göstermiştir.

Tablo 6.5 Önerilen GEP model ile mevcut analitik modellerin karşılaştırılması

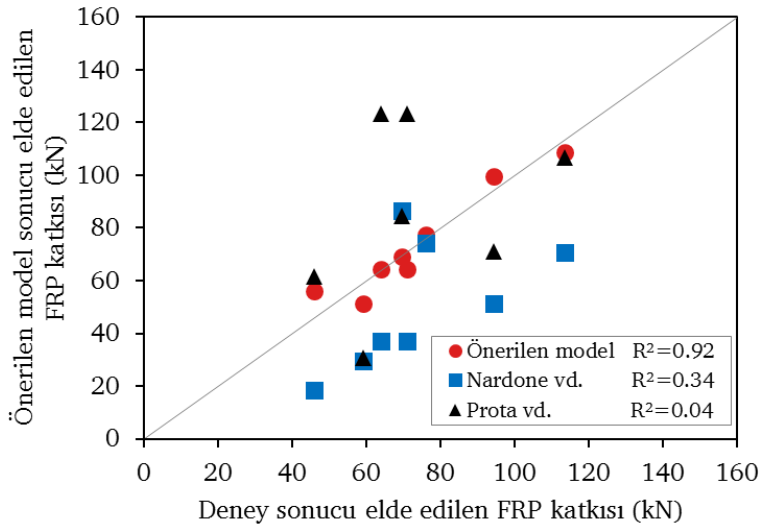
Modeller	$MAPE$	$RMSE$	R^2
Önerilen model	7.07	5.65	0.92
Nardone vd. [44]	38.66	30.59	0.34
Prota vd. [46]	65.50	68.14	0.04



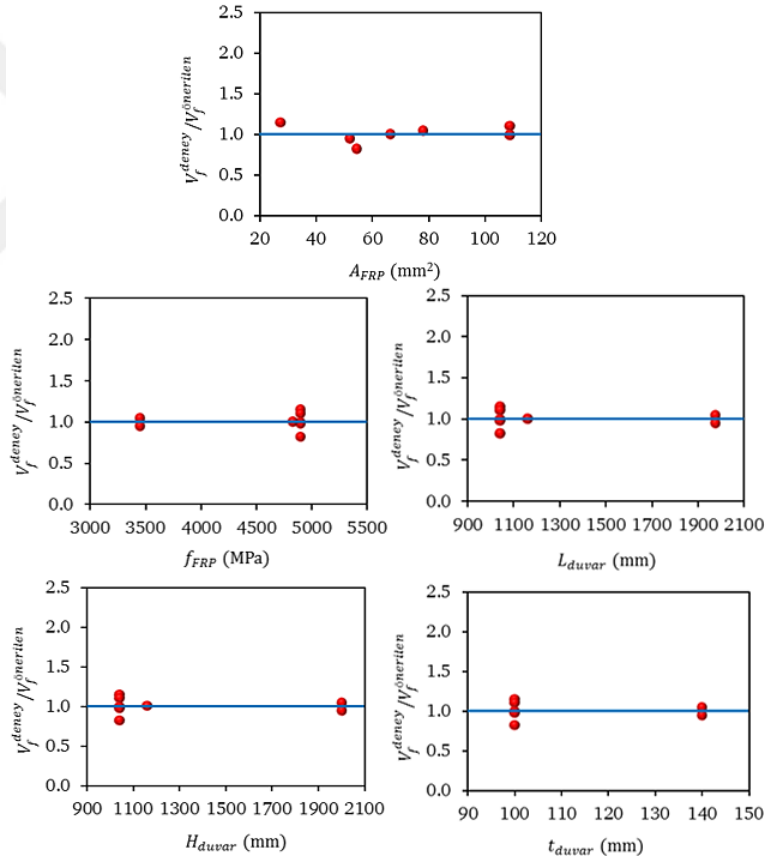
Şekil 6.2 Önerilen GEP model ile mevcut analitik modellerin karşılaştırılması

Önerilen GEP model ve mevcut modeller kullanılarak lif takviyeli polimerin kesme dayanımına katkısı, Şekil 6.3'te verilen R^2 değerleri açısından her bir deney duvarı için karşılaştırılmıştır. Görüldüğü üzere mevcut analitik modellerle karşılaştırıldığında deneysel sonuçlara en yakın sonuçlar önerilen GEP model ile elde edilmiştir.

Ayrıca, önerilen modelin doğruluğu girdi parametrelerinin her birine göre deneysel verilerin önerilen verilere oranı ($V_f^{deney}/V_f^{önerilen}$) çizilerek Şekil 6.4'te değerlendirilmiştir. Önerilen modelin deneysel sonuçlara göre değişimini irdelemek amacıyla 1.0 değeri, mükemmel tahmin olarak kabul edilebilecek normalleştirilmiş bir değer olarak işaretlenmiştir. Buna göre, 0.82 ile 1.15 gibi küçük bir aralıkta yoğunlaşan ($V_f^{deney}/V_f^{önerilen}$) değerleri, önerilen modelin deneysel sonuçlarla yakın bir uyum içinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.3 Her bir deney duvarı için önerilen model ile mevcut analitik modellerin R^2 değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 6.4 Girdi parametreleri ile $V_f^{deney}/ V_f^{önerilen}$ arasındaki ilişki

6.1.2.4 Duyarlılık Analizi

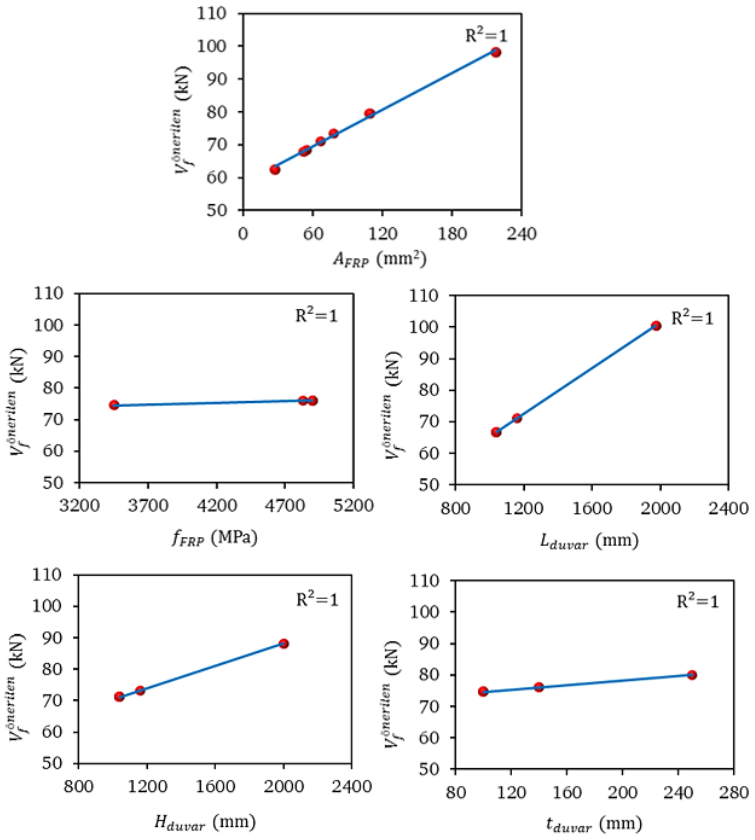
Girdi parametrelerinin önerilen GEP modeli üzerindeki etkisi duyarlılık analizi ile araştırılmıştır. İlk olarak, önerilen GEP modeli ile türetilen kesme dayanımının

tahmin edilen değerleri, parametrik çalışmada her bir girdi parametresinin değişimine karşı çizilmiştir. Her bir parametredeki değişim not edilirken, diğer parametrelerin ortalama değerlerinde sabit tutulduğu varsayılmıştır [137]. Şekil 6.5'te gösterildiği gibi, önerilen GEP modeli oluşturan değişkenlerin (girdi parametreleri) değerleri arttıkça V_f artmaktadır. İkinci olarak, girdi parametrelerinin lif takviyeli polimer şeritlerinin nominal kesme dayanımı üzerindeki göreceli katkısını (V_f) kontrol etmek için Denklem (6.18) ve Denklem (6.19) kullanılarak bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir.

$$N_i = f_{max}(x_i) - f_{min}(x_i) \tag{6.18}$$

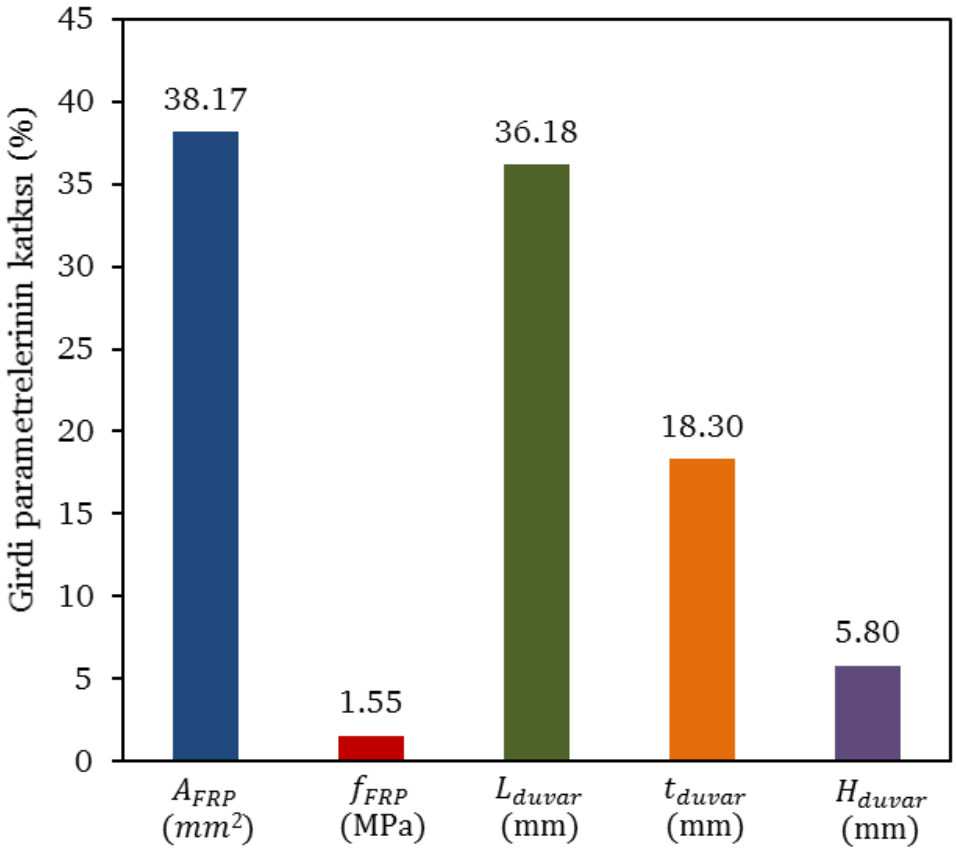
$$SA = \frac{N_i}{\sum_{j=1}^{n} N_j}.100 \tag{6.19}$$

Burada, $f_{max}(x_i)$ ve $f_{min}(x_i)$ *i-inci* girişe göre maksimum ve minimum tahmini çıkışları temsil ederken, diğer giriş parametreleri ortalama değerlerinde sabit tutulmuştur. Duyarlılık analizinin sonuçları Şekil 6.5'te görülmektedir.



Şekil 6.5 Girdi parametrelerinin parametrik analizi

A_{FRP}, L_{duvar}, t_{duvar}, H_{duvar} ve f_{FRP} parametrelerinin V_f'ye göre katkıları sırasıyla %38.17, %36.18, %18.30, %5.8 ve %1.55 olarak elde edilmiştir. Lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş duvarlar için lif takviyeli polimerin kesme dayanımına katkısı üzerinde, önerilen bağıntıya bağlı olarak, A_{FRP}'nin en etkili, f_{FRP}'nin ise en az etkili olduğu Şekil 6.6'da görülmektedir.



Şekil 6.6 Önerilen modele her bir girdi parametresinin katkısı

6.1.3 Karbon Lif Takviyeli Polimer ile Güçlendirilmiş Deney Duvarlarının Nominal Kesme Dayanımları

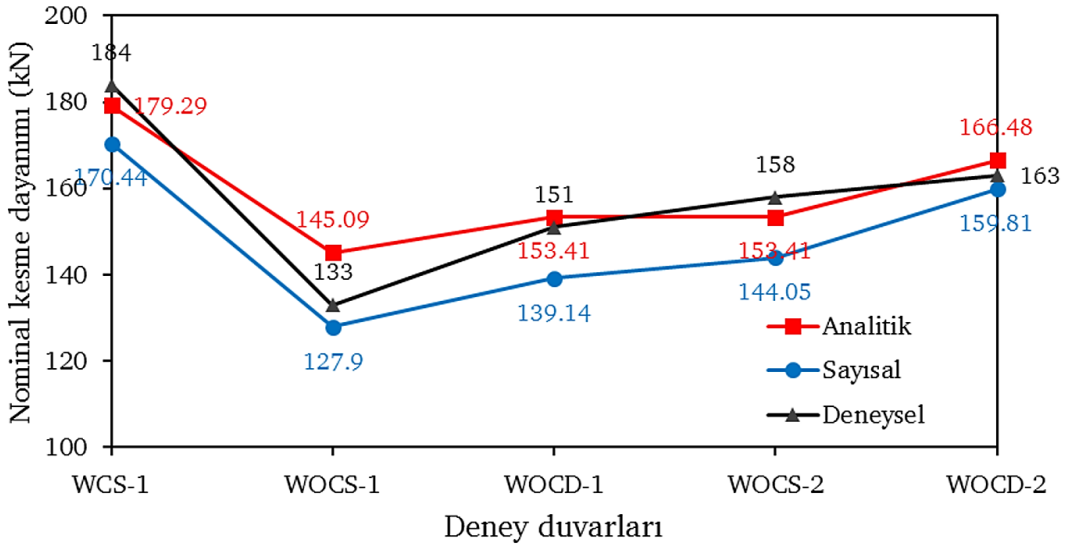
Karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş dolu ve boşluklu yığma duvarların kesme dayanımları ($V_n{}^{analitik}$), dolu duvar (WR) için ASCE/SEI 41-17 (Model I); boşluklu duvar (WOR) için Eurocode 6 (EN 1996-1-1)'nin (Model II) kullanılarak elde edilen yalın deney duvarlarının (WR ve WOR) kesme dayanımı ($V_m{}^{analitik}$) ile önerilen GEP modeli sonucu elde edilen karbon lif takviyeli polimer şeritleri katkılarının ($V_f{}^{önerilen}$) toplamıyla elde edilmiştir (Tablo 6.6).

Tablo 6.6 Karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş dolu ve boşluklu yığma duvarların kesme dayanımları

	$V_m{}^{analitik}$(kN)	$V_f{}^{önerilen}$(kN)	$V_n{}^{analitik}$(kN)
WCS-1	129.90	51.39	179.29
WOCS-1	89.10	55.99	145.09
WOCD-1	89.10	64.31	153.41
WOCS-2	89.10	64.31	153.41
WOCD-2	89.10	77.38	166.48

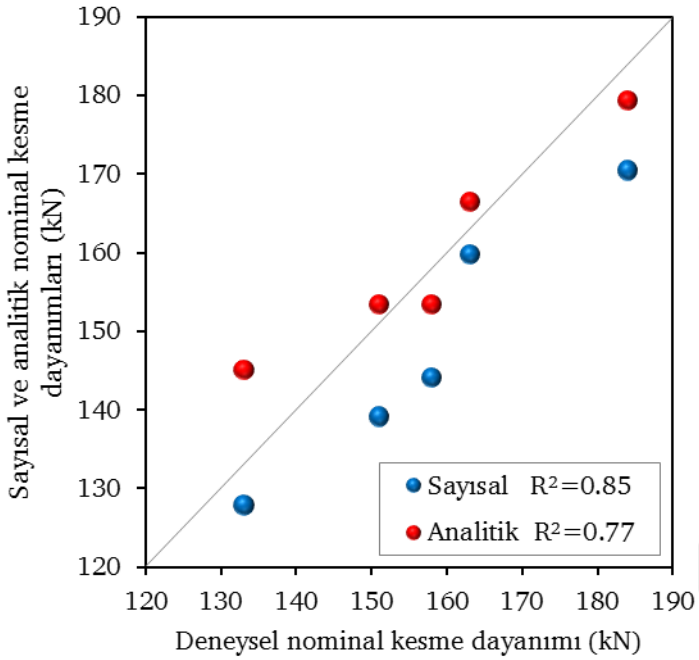
6.2 Karbon Lif Takviyeli Polimer İle Güçlendirilmiş Deney Duvarlarının Deneysel, Sayısal ve Analitik Nominal Kesme Dayanımlarının Karşılaştırılması

Karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş donatısız dolu ve boşluklu yığma duvarların deneysel (V_n^{deney}), sayısal ($V_n^{sayısal}$) ve analitik ($V_n^{analitik}$) nominal kesme dayanımları arasındaki karşılaştırma Şekil 6.7'de gösterilmiştir. Yapılan karşılaştırma sonucunda düzlem içi yüklemeye maruz kalan donatısız yığma duvarların kesme dayanımını belirlemek için sayısal analizin güçlü bir yöntem olduğu görülmüştür. Ayrıca, analitik bağıntıların da kesme dayanımını belirlemede güvenilir bir yöntem olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6.7 Karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş deney duvarlarının nominal kesme dayanımlarının karşılaştırılması

Sayısal ve analitik nominal kesme dayanımlarının R^2 değerleri açısından karşılaştırılmaları Şekil 6.8'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, sayısal analiz sonucu elde edilen ve analitik çalışma sonucu elde edilen nominal kesme dayanımlarının R^2 değerleri sırasıyla 0.85 ve 0.77 olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla uyum içinde olduğu söylenebilir.



Şekil 6.8 Nominal kesme dayanımlarının R^2 açısından karşılaştırılması

Sayısal ve analitik nominal kesme dayanımlarının Ortalama (M), Standart Sapma (SD) ve Varyasyon Katsayısı (COV) değerleri Tablo 6.7'de karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda analitik ve sayısal sonuçların kabul edilebilir doğrulukta olduğu görülmektedir.

Tablo 6.7 Sayısal ve analitik nominal kesme dayanımlarının karşılaştırılması

	M	SD	R^2	COV
$V_n^{analitik}$	1.02	0.05	0.77	0.05
$V_n^{sayısal}$	0.94	0.03	0.85	0.03

7
SONUÇ VE ÖNERİLER

Deprem, çok eski çağlardan beri karşı karşıya kaldığı en büyük doğal afetlerden biridir. Türkiye yanal ve düşey atılımlı fay formasyonlarını içeren Akdeniz Deprem Kuşağı içinde yer almaktadır ve özellikle kırsal bölgelerinde yığma yapı stoku oldukça yüksek düzeydedir. Deprem gibi dinamik yüklere maruz kalan yığma yapıların bu yükleri güvenle karşılayabilmesi için yeterli dayanım ve rijitliğe sahip olmaları gerekmektedir. Deprem sırası ve sonrasında, yığma yapıların esas taşıyıcı elemanları olan duvarlarda meydana gelen hasarlar tüm yapı sisteminin davranışını etkilemektedir. Donatısız yığma duvarlar, deprem kuvvetlerinden dolayı meydana gelen çekme gerilmelerine karşı zayıftırlar ve göçme durumunu/şeklini bu gerilmeler kontrol etmektedir. Deprem yüklerinden dolayı açığa çıkan ilave çekme gerilmelerini karşılayamayan yığma duvarlarda meydana gelen çekme çatlakları genellikle pencere ve/veya kapı gibi boşluklarının çevresinde meydana gelmektedir. Deprem yüklerine karşı oluşan söz konusu ciddi hasarların giderilmesi için yığma duvarların onarım ve güçlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Lif takviyeli polimer ile güçlendirme yöntemi, hızlı uygulama, düşük işçilik maliyetleri, yorulma direnci, korozyon direnci, yüksek elastisite modülü ve yüksek çekme dayanımı gibi avantajları sebebiyle diğer güçlendirme yöntemlerine göre, hasar almış mevcut ve/veya yeni yapılan donatısız yığma duvarları güçlendirmek için son yıllarda oldukça tercih edilmektedir.

Lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş donatısız yığma duvarların düzlem içi davranışı üzerine çok sayıda deneysel ve sayısal çalışma yapılmış olmasına rağmen, donatısız boşluklu yığma duvarlar için bu yöntemin etkinliği yeteri kadar araştırılmamıştır. Deneysel araştırmalar, maliyetli ve zaman alıcı olmalarına rağmen, sayısal analizlerde kullanılacak olan parametrelerin kalibrasyonunda önemli rol oynamaktadır. Teknik literatürde yalın ve/veya güçlendirilmiş yığma duvarın düşey ve yatay yükler altında doğrusal olmayan sayısal analizleri ile ilgili

çalışmalar oldukça fazla olmasına rağmen, lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş donatısız boşluklu yığma duvarlar üzerinde yeterli sayıda çalışma mevcut değildir.

Bu eksiklikler göz önünde bulundurularak, öncelikle karbon lif takviyeli polimer şeritleri ile güçlendirilmiş dolu ve boşluklu donatısız yığma duvarların düzlem içi davranışları deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, iki adet dolu ve beş adet boşluklu yığma duvar üretilmiştir. Bu duvarlardan biri dolu diğeri boşluklu olmak üzere iki adet duvar referans duvar olarak kabul edilirken, diğer duvarlar farklı kalınlık ve yüzey alanına sahip karbon lif takviyeli polimer şeritleriyle güçlendirilmişlerdir. Tüm duvarların, sabit eksenel yük ile düzlem içi kademeli artan yatay yük altında deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalara ait sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1) Dolu ve boşluklu duvarlarda karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirmenin, yatay yük ve buna karşı gelen yatay yer değiştirme üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Dolu duvarlarda, referans duvara kıyasla yatay yük açısından WRCS-1, WCS-1, dolu duvarlarında sırasıyla referans duvara kıyasla yatay yük değerinde %26 ve %47 oranında artış görülmüştür. WRCS-1 duvarında nihai yer değiştirme değerinde referans dolu duvara kıyasla %41 oranında artış gözlenirken, WCS-1 duvarında %92 oranında artış olduğu görülmüştür. Referans duvara kıyasla yatay yük açısından WOCS-1, WOCD-1, WOCS-2 ve WOCD-2 boşluklu duvarlarında sırasıyla %53, %74, %82 ve %88 oranında artış olduğu görülürken, aynı zamanda yatay yer değiştirme bakımından bu duvarlarda sırasıyla %7, %27, %22 ve %39 artış görülmüştür.
2) Karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş dolu ve boşluklu duvarlarda, referans duvarlarla kıyaslandığında ilk çatlağın oluştuğu yatay yük ve bu yüke karşı gelen yatay yer değiştirme değerinde artış görülmüştür.
3) Dolu duvarlarda etkin göçme modu kesme göçmesi olarak ortaya çıkmıştır. Ancak, karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş dolu duvarlarda bu göçme moduna ilave olarak topuk ezilmesi de görülmüştür.
4) Boşluklu duvarlarda karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirildikten sonra, baskın olan kesme göçme modu yerini eğilme göçme moduna bırakmıştır. WOR duvarında etkin göçme modu kesme göçmesi iken güçlendirilmiş

WOCS-1, WOCD-1, WOCS-2 ve WOCD-2 duvarlarında topuk ezilmesi ve karbon lif takviyeli polimer sıyrılması göçme modları da etkin olmuştur.

5) Dolu duvarlarda karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmeden sonra, çatlak genişliklerinde tedricen azalma görülmüştür. Ayrıca karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin referans dolu duvarda oluşan bazı çatlakların oluşumunu engellediği de gözlenmiştir.
6) Boşluklu duvarların karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmesinden sonra boşluk etrafında oluşan çatlakların genişlikleri referans duvara kıyasla azalmıştır. Ancak, duvarın sağ alt topuğuna doğru oluşan çatlak genişliklerinde artış söz konusu olmuştur.
7) Boşluklu duvarlarda, güçlendirme oranı artıkça kesme dayanımında artış olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, aynı güçlendirme oranlarına sahip duvarlarda, WOCD-1 ve WOCS-2, yüzey alanı arttıkça kesme dayanımı değerinde daha belirgin artış olduğu gözlenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalardan sonra deney duvarlarının düzlem içi davranışını simüle etmek üzere makro modelleme yaklaşımı kullanılarak üç boyutlu doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri, ticari ANSYS [1] sonlu eleman yazılımı aracılığıyla, bünye modeli olarak Drucker-Prager malzeme modeli benimsenerek gerçekleştirilmiştir. Sayısal modelden elde eldilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Sayısal çalışmaya ait sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1) Deney duvarlarının deneysel kesme dayanımı ve yük-yerdeğiştirme eğrilerinin başlangıç teğeti eğimleri, makro modelleme ile kabul edilebilir bir şekilde tahmin edilmiştir.
2) Yük-yer değiştirme eğrilerinin doğrusal olmayan kısımlarında deneysel sonuçlarla bazı tutarsızlıklar gözlenmiştir. Bu tutarsızlığın nedeni, makro model için kullanılan mekanik parametrelerin deneysel olarak elde edilememesi ve/veya deney koşullarının (sınır şartları) sayısal modele tam olarak yansıtılamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sayısal analizlerde seçilen bünye modelinin gerektirdiği mekanik parametrelerin deneysel olarak belirlenmesi durumunda, deneysel sonuçlara daha yakın tahminler elde edilebileceği çok açıktır.

3) Makro modelleme sonucu analizi yapılan WR ve WOR duvarlarında, kayma gerilmeleri genel olarak deney sonucunda hasarların oluştuğu bölgelerde kritik değerlere ulaşmıştır. Ayrıca maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımlarının deneysel çatlak şekilleriyle uyumlu olduğu açıkça görülmüştür.
4) Güçlendirilmiş dolu ve boşluklu duvarlarda, referans duvarlarıyla karşılaştırıldığında, karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin çekme gerilmelerinin neden olduğu maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımlarını değiştirdiği ve maksimum plastik birim şekil değiştirme dağılımlarının deneysel çatlak şekliyle uyumlu olduğu görülmüştür.
5) WCS-1 duvarının karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde kayma gerilmelerinin, mesnete yakın bölgelerde, diğer bölgelere göre daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, deney esnasında karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin mesnete yakın bölgelerde sıyrılmaya zorlanması durumu ile örtüşmektedir.
6) WOCS-1, WOCD-1, WOCS-2 ve WOCD-2 duvarlarının karbon lif takviyeli polimer şeritlerinde kayma gerilmelerinin boşluğa yakın bölgelerde, diğer bölgelere göre daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bu durum deney esnasında karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin boşluğa yakın bölgelerde sıyrılmaya zorlanması durumu ile örtüşmektedir.

Karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş deney duvarlarının nominal kesme dayanımı (V_n), donatısız yığma duvarların kesme dayanımına katkısı (V_m) ve karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin kesme dayanıma katkısı (V_f) olmak üzere iki bileşenin toplamı olarak ifade edilmiştir. Donatısız yığma duvarlarının kesme dayanımları kapasiteleri üç farklı yönetmelik dikkate alınarak analitik olarak hesaplanmıştır. Karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin nominal kesme dayanımına katkılarını belirlemek için GEP programı kullanılarak üretilen analitik bağıntı önerilmiştir. Deney duvarlarının nominal kesme dayanımları üzerine yapılan analitik çalışma sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

1) WR referans deney duvarının nominal kesme dayanımına katkısı için ASCE/SEI 41-17 (Model I), WOR referans duvarının nominal kesme dayanımına katkısı için Eurocode 6 (EN 1996-1-1)'da (Model II) önerilen

analitik modellerden elde edilen değerlerin deney sonuçlarına çok yakın olduğu tespit edilmiştir.

2) Güçlendirilmiş yığma duvarlarda karbon lif takviyeli polimer şeritlerinin nominal kesme dayanımına katkısını elde etmek için önerilen analitik bağıntı, mevcut analitik bağıntılarla karşılaştırılmıştır. Önerilen analitik bağıntının deney sonuçlarına oldukça yaklaşmış olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, önerilen analitik bağıntıda en etkili parametrenin A_{FRP} olduğu, en az etkili parametrenin ise f_{FRP} olduğu sonucuna varılmıştır.
3) Analitik bağıntıların, deneysel ve sayısal çalışmaların mümkün olmadığı durumlarda lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş yığma duvarların düzlem içi nominal kesme dayanımını belirlemek için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Tez kapsamında incelenen konular bağlamında ileride yapılacak çalışmalar için öneriler şu şekildedir:

1) Donatısız dolu ve boşluklu yığma duvarların düzlem içi davranışlarını incelemek için, farklı boyut ve farklı boşluk konumlarını dikkate alarak kapsamlı deneysel çalışmaların yapılması gerekmektedir.
2) Lif takviyeli polimer ile güçlendirilmiş donatısız dolu ve boşluklu yığma duvarların düzlem içi davranışlarını incelemek için, çeşitli konfigürasyonlar ve farklı lif takviyeli polimerler kullanarak daha kapsamlı deneysel çalışmaların yapılması gerekmektedir.
3) Sayısal analizde dolu ve/veya boşluklu donatısız yığma duvarların düzlem içi davranışını daha iyi ifade edebilmek için, duvar ve lif takviyeli polimerin mekanik parametrelerinin deneysel çalışmalarla tespit edilmesi gerekmektedir.

KAYNAKÇA

[1] Ansys® *Academic Research Mechanical, Release 21.1, Help System, Coupled Field Analysis Guide*, *ANSYS, Inc.,* Canonsburg, PA, USA, 2021.

[2] P. B. Lourenco, "Masonry Structures, Overview" *Encycl. Earthq. Eng.*, ss. 1–10, 2014, doi: 10.1007/978-3-642-36197-5.

[3] H. Crowley *vd.*, "The European Seismic Risk Model 2020 (ESRM 2020)" *2nd International Conference on Natural Hazards & Infrastructure,* 2019.

[4] P. B. Lourenço, D. V. Oliveira, P. Roca, and A. Orduña, "Dry Joint Stone Masonry Walls Subjected to In-Plane Combined Loading" *J. Struct. Eng.*, cilt. 131, no. 11, ss. 1665–1673, 2005, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(2005)131:11(1665).

[5] N. Bayülke, "Yığma Binaların Deprem Davranışı Ve Güvenliği" *1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı,* 2011.

[6] P. Alcaino ve H. Santa-Maria, "Experimental Response of Externally Retrofitted Masonry Walls Subjected to Shear Loading" *J. Compos. Constr.*, cilt. 12, no. 5, ss. 489–498, 2008, doi: 10.1061/(asce)1090-0268(2008)12:5(489).

[7] V. Alecci *vd.*, "Shear capacity of masonry panels repaired with composite materials: Experimental and analytical investigations" *Compos. Part B Eng.*, cilt. 171, no. March, ss. 61–69, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.04.013.

[8] S. A. Babatunde, "Review of strengthening techniques for masonry using fiber reinforced polymers" *Compos. Struct.*, cilt. 161, ss. 246–255, 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.10.132.

[9] S. Bhattacharya, S. Nayak, and S. C. Dutta, "A critical review of retrofitting methods for unreinforced masonry structures" *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, cilt. 7, ss. 51–67, 2014, doi: 10.1016/j.ijdrr.2013.12.004.

[10] P. Bischof ve R. Suter, "Retrofitting masonry walls with carbon mesh" *Polymers (Basel).*, cilt. 6, ss. 280–299, 2014, doi: 10.3390/polym6020280.

[11] P. Bischof, R. Suter, E. Chatzi, ve P. Lestuzzi, "On the use of CFRP sheets for the seismic retrofitting of masonry walls and the influence of mechanical anchorage" *Polymers (Basel).*, cilt. 6, no. 7, ss. 1972–1998, 2014, doi: 10.3390/polym6071972.

[12] A. Borri, G. Castori, ve M. Corradi, "Shear behavior of masonry panels strengthened by high strength steel cords" *Constr. Build. Mater.*, cilt. 25, no. 2, ss. 494–503, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.05.014.

[13] T. L. Bui, Z. I. Djamai, A. S. Larbi, N. Reboul, ve E. Ferrier, "Numerical study of composite material (FRP/TRC)-reinforced masonry walls under in-plane loading" *J. Compos. Mater.*, cilt. 55, no. 24, ss. 3425–3441, 2021, doi: 10.1177/00219983211015280.

[14] R. Capozucca, “Experimental analysis of historic masonry walls reinforced by CFRP under in-plane cyclic loading” *Compos. Struct.*, cilt. 94, no. 1, ss. 277–289, 2011, doi: 10.1016/j.compstruct.2011.06.007.

[15] S. Cheng, S. Yin, ve L. Jing, “Comparative experimental analysis on the in-plane shear performance of brick masonry walls strengthened with different fiber reinforced materials” *Constr. Build. Mater.*, cilt. 259, s. 120387, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120387.

[16] G. Crisci, F. Ceroni, ve G. P. Lignola, “Comparison between design formulations and numerical results for in-plane FRCM-strengthened masonry walls” *Appl. Sci.*, cilt. 10, no. 14, ss. 1–20, 2020, doi: 10.3390/app10144998.

[17] A. D’Ambrisi, M. Mezzi, ve A. Caporale, “Experimental investigation on polymeric net-RCM reinforced masonry panels” *Compos. Struct.*, cilt. 105, ss. 207–215, 2013, doi: 10.1016/j.compstruct.2013.05.017.

[18] D. Dizhur, M. Griffith, ve J. Ingham, “In-plane shear improvement of unreinforced masonry wall panels using NSM CFRP strips” *J. Compos. Constr.*, cilt. 17, no. 6, s. 04013010, 2013, doi: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000400.

[19] B. Doran, H. Orhun Koksal, S. Aktan, S. Ulukaya, D. Oktay, ve N. Yuzer, “In-Plane Shear Behavior of Traditional Masonry Walls” *Int. J. Archit. Herit.*, cilt. 11, no. 2, ss. 278–291, 2017, doi: 10.1080/15583058.2016.1207114.

[20] B. Doran, H. O. Koksal, S. Aktan, O. Javarov, ve C. Karakoc, “Constitutive modeling of masonry walls strengthened with fiber reinforced polymers” in *New Trends in Structural Engineering*, IntechOpen, 2018, ss. 3–26.

[21] B. Doran, N. Yuzer, S. Aktan, D. Oktay, ve S. Ulukaya, “Numerical Modeling of Traditional Masonry Walls Strengthened with Grout Injection” *Int. J. Archit. Herit.*, cilt. 14, no. 10, ss. 1517–1532, 2020, doi: 10.1080/15583058.2019.1618970.

[22] M. R. Ehsani, H. Saadatmanesh, ve A. Al-Saidy, “Shear Behavior of URM Retrofitted with FRP Overlays” *J. Compos. Constr.*, cilt. 1, no. 1, ss. 17–25, 1997, doi: 10.1061/(asce)1090-0268(1997)1:1(17).

[23] M. A. ElGawady, P. Lestuzzi, ve M. Badoux, “Aseismic retrofitting of unreinforced masonry walls using FRP” *Compos. Part B Eng.*, cilt. 37, no. 2–3, ss. 148–162, 2005, doi: 10.1016/j.compositesb.2005.06.003.

[24] M. A. ElGawady, P. Lestuzzi, ve M. Badoux, “Static cyclic response of masonry walls retrofitted with fiber-reinforced polymers” *J. Compos. Constr.*, cilt. 11, no. 1, ss. 50–61, 2007, doi: 10.1061/(asce)1090-0268(2007)11:1(50).

[25] M. A. ElGawady, P. Lestuzzi, ve M. Badoux, “Analytical model for the in-plane shear behavior of URM walls retrofitted with FRP” *Compos. Sci. Technol.*, cilt. 66, no. 3–4, ss. 459–474, 2006, doi: 10.1016/j.compscitech.2005.06.015.

[26] M. ElGawady, “Seismic in-Plane Behavıor Of URM Walls Upgraded With Composites” Ph.D dissertation, M.Eng in Civil Engineering-Structures, Cairo University, Egypte, 2004.

[27] S. Elmalyh, A. Bouyahyaoui, T. Cherradi, A. Rotaru, and P. Mihai, “Shear strength of unreinforced masonry walls retrofitted with CFRP” *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst.*, cilt. 5, no. 2, ss. 351–359, 2020, doi: 10.25046/AJ050246.

[28] C. Faella, E. Martinelli, E. Nigro, ve S. Paciello, “Shear capacity of masonry walls externally strengthened by a cement-based composite material: An experimental campaign” *Constr. Build. Mater.*, cilt. 24, no. 1, ss. 84–93, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.08.019.

[29] S. H. Farooq, M. Ilyas, ve S. Amir, “Response of masonry walls strengthened with CFRP and steel strips” *Arab. J. Sci. Eng.*, cilt. 37, no. 3, ss. 545–559, 2012, doi: 10.1007/s13369-012-0190-9.

[30] A. Gabor, A. Bennani, E. Jacquelin, ve F. Lebon, “Modelling approaches of the in-plane shear behaviour of unreinforced and FRP strengthened masonry panels” *Compos. Struct.*, cilt. 74, no. 3, ss. 277–288, 2006, doi: 10.1016/j.compstruct.2005.04.012.

[31] A. Garofano, F. Ceroni, ve M. Pecce, “Modelling of the in-plane behaviour of masonry walls strengthened with polymeric grids embedded in cementitious mortar layers” *Compos. Part B Eng.*, cilt. 85, ss. 243–258, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.09.005.

[32] B. Ghiassi, P. B. Lourenço, ve D. V. Oliveira, “Effect of Environmental Aging on the Numerical Response of FRP-Strengthened Masonry Walls” *J. Struct. Eng.*, cilt. 142, no. 1, s. 04015087, 2016, doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001358.

[33] N. Ismail, R. B. Petersen, M. J. Masia, ve J. M. Ingham, “Diagonal shear behaviour of unreinforced masonry wallettes strengthened using twisted steel bars” *Constr. Build. Mater.*, cilt. 25, no. 12, ss. 4386–4393, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.063.

[34] A. Kalali ve M. Z. Kabir, “Experimental response of double-wythe masonry panels strengthened with glass fiber reinforced polymers subjected to diagonal compression tests” *Eng. Struct.*, cilt. 39, no. 1, ss. 24–37, 2012, doi: 10.1016/j.engstruct.2012.01.018.

[35] K. M. C. Konthesingha, M. J. Masia, R. B. Petersen, N. Mojsilovic, G. Simundic, ve A. W. Page, “Static cyclic in-plane shear response of damaged masonry walls retrofitted with NSM FRP strips - An experimental evaluation” *Eng. Struct.*, cilt. 50, ss. 126–136, 2013, doi: 10.1016/j.engstruct.2012.10.026.

[36] G. P. Lignola, A. Prota, ve G. Manfredi, “Numerical Investigation on the Influence of FRP Retrofit Layout and Geometry on the In-Plane Behavior of Masonry Walls” *J. Compos. Constr.*, cilt. 16, no. 6, ss. 712–723, 2012, doi: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000297.

[37] B. Luccioni ve V. C. Rougier, “In-plane retrofitting of masonry panels with fibre reinforced composite materials” *Constr. Build. Mater.*, cilt. 25, no. 4, ss. 1772–1788, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.088.

[38] B. Luccioni ve V. C. Rougier, “Numerical analysis of fibre reinforced polymer retrofitted masonry panels” *Eng. Struct.*, cilt. 49, ss. 360–372, 2013, doi: 10.1016/j.engstruct.2012.10.032.

[39] H. Mahmood ve J. M. Ingham, “Diagonal compression testing of FRP-retrofitted unreinforced clay brick masonry wallettes” *J. Compos. Constr.*, cilt. 15, no. 5, ss. 810–820, 2011, doi: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000209.

[40] G. Marcari, G. Manfredi, A. Prota, ve M. Pecce, “In-plane shear performance of masonry panels strengthened with FRP” *Compos. Part B Eng.*, cilt. 38, no. 7–8, ss. 887–901, 2007, doi: 10.1016/j.compositesb.2006.11.004.

[41] E. Martinelli, F. Perri, C. Sguazzo, ve C. Faella, “Cyclic shear-compression tests on masonry walls strengthened with alternative configurations of CFRP strips” *Bull. Earthq. Eng.*, cilt. 14, no. 6, ss. 1695–1720, 2016, doi: 10.1007/s10518-016-9895-6.

[42] G. Milani ve P. B. Lourenço, “Simple homogenized model for the nonlinear analysis of FRP-strengthened masonry structures. II: Structural Applications” *J. Eng. Mech.*, cilt. 139, no. 1, ss. 77–93, 2013, doi: 10.1061/(asce)em.1943-7889.0000479.

[43] A. Morbin ve V. Scholar, “Strengthening of masonry elements with FRP composites” [Online]. Available: www.cies.umr.edu.

[44] F. Nardone, A. Prota, ve G. Manfredi, “Design criteria for FRP seismic strengthening of masonry walls” *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 2008.

[45] C. Papanicolaou, T. Triantafillou, ve M. Lekka, “Externally bonded grids as strengthening and seismic retrofitting materials of masonry panels” *Constr. Build. Mater.*, cilt. 25, no. 2, ss. 504–514, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.07.018.

[46] A. Prota, G. Manfredi, ve F. Nardone, “Assessment of design formulas for in-plane FRP strengthening of masonry walls” *J. Compos. Constr.*, cilt. 12, no. 6, ss. 643–649, 2008, doi: 10.1061/(asce)1090-0268(2008)12:6(643).

[47] A. Rahman ve T. Ueda, “In-Plane shear performance of masonry walls after strengthening by two different FRPs” *J. Compos. Constr.*, cilt. 20, no. 5, s. 04016019, 2016, doi: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000661.

[48] P. Roca ve G. Araiza, “Shear response of brick masonry small assemblages strengthened with bonded FRP laminates for in-plane reinforcement” *Constr. Build. Mater.*, cilt. 24, no. 8, ss. 1372–1384, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.01.005.

[49] H. Santa-Maria ve P. Alcaino, “Repair of in-plane shear damaged masonry walls with external FRP” *Constr. Build. Mater.*, cilt. 25, no. 3, ss. 1172–1180, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.09.030.

[50] M. Shabdin, M. Zargaran, ve N. K. A. Attari, “Experimental diagonal tension (shear) test of Un-Reinforced Masonry (URM) walls strengthened with textile reinforced mortar (TRM)” *Constr. Build. Mater.*, cilt. 164, ss. 704–715, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.234.

[51] M. J. Simonič, V. Bosiljkov, ve R. Žarnić, “Testing and analysis of walls strengthened with FRP,” *Gradjevinar*, cilt. 66, no. 6, ss. 533–548, 2014, doi: 10.14256/JCE.960.2013.

[52] T. Stratford, G. Pascale, O. Manfroni, ve B. Bonfiglioli, “Shear strengthening masonry panels with sheet Glass-Fiber Reinforced Polymer,” *J. Compos. Constr.*, cilt. 8, no. 5, ss. 434–443, 2004, doi: 10.1061/(asce)1090-0268(2004)8:5(434).

[53] T. C. Triantafillou, “Composites: a new possibility for the shear strengthening of concrete, masonry and wood” *Compos. Sci. Technol.*, cilt. 58, no. 8, ss. 1285–1295, 1998, doi: 10.1016/S0266-3538(98)00017-7.

[54] M. R. Valluzzi, D. Tinazzi, ve C. Modena, “Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates” *Constr. Build. Mater.*, cilt. 16, no. 7, ss. 409–416, 2002, doi: 10.1016/S0950-0618(02)00043-0.

[55] D. Zhou, Z. Lei, ve J. Wang, “In-plane behavior of seismically damaged masonry walls repaired with external BFRP” *Compos. Struct.*, cilt. 102, no. 1, ss. 9–19, 2013, doi: 10.1016/j.compstruct.2013.01.031.

[56] Y. Zhuge, “FRP-retrofitted URM walls under in-plane shear: Review and assessment of available models” *J. Compos. Constr.*, cilt. 14, no. 6, ss. 743–753, 2010, doi: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000135.

[57] İ. Ediz, “Kagir Yapılarda Kullanılan Taşıyıcı Duvarların Hasır Çelik Donatı ve Kendiliğinden Yerleşen Beton ile Güçlendirilmesinin Deneysel İncelenmesi” Yüksek Lisans Tez, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2006.

[58] M. T. Çöğürcü, “Yığma Yapıların Yatay Derz Güçlendirilme Yöntemiyle Güçlendirilmesi” Doktora Tez, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2007.

[59] S. Özsaraç, “Yığma Yapılarda Taşıyıcı Tuğla Duvarların GFRP ile Güçlendirilmesinin Deneysel Olarak İncelenmesi” Yüksek Lisans Tez, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2009.

[60] O. Jafarov, “Lifli Polimerle Güçlendirilmiş Yığma Duvarların Modellenmesi” Doktora Tez, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2012.

[61] M. G. Çakıroğlu, “Yığma Yapıların Güçlendirilmesi” Yüksek Lisans Tezi, Isparta Üniversitesi, Isparta, 2014.

[62] E. R. Güneş, “Yığma Yapıların Güçlendirilmesinde Plastik Kompozit Donatı Kullanımı,” Yüksek Lisans Tez, İskenderun Teknik Üniversitesi, İskenderun, 2020.

[63] A. Marou Seyni Samberou, “Yığma Duvarların Çevrimsel Yükler Altında Davranışlarının Deneysel ve Sonlu Eleman Yöntemiyle Belirlenmesi ve FRP Malzemesiyle Güçlendirilmesi” Doktora Tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2021.

[64] I. Corbi, “FRP reinforcement of masonry panels by means of C-fiber strips” *Compos. Part B Eng.*, cilt. 47, ss. 348–356, 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.11.005.

[65] A. Drougkas, L. Licciardello, J. G. Rots, ve R. Esposito, “In-plane seismic behaviour of retrofitted masonry walls subjected to subsidence-induced damage” *Eng. Struct.*, cilt. 223, s. 111192, 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111192.

[66] P. Foraboschi, “Effectiveness of novel methods to increase the FRP-masonry bond capacity” *Compos. Part B Eng.*, cilt. 107, ss. 214–232, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.09.060.

[67] P. B. Foster, J. Gergely, D. T. Young, W. M. McGinley, ve A. Corzo, “FRP repair methods for unreinforced masonry buildings subject to cyclic loading” *Am. Concr. Institute, ACI Spec. Publ.*, cilt. SP-230, ss. 289–305, 2005.

[68] E. Grande, G. Milani, ve E. Sacco, “Modelling and analysis of FRP-strengthened masonry panels” *Eng. Struct.*, cilt. 30, no. 7, ss. 1842–1860, 2008, doi: 10.1016/j.engstruct.2007.12.007.

[69] A. R. Kamrava, M. A. Najafgholipour, F. Fathi, ve 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” *J. Build. Eng.*, cilt. 36, 2020, s. 102084, 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2020.102084.

[70] T. Li, N. Galati, J. G. Tumialan, ve A. Nanni, “FRP Strengthening of URM Walls With Openings Experimental Results” *Mason. Soc. J.*, cilt. 23, no. 1, ss. 47–58, 2005.

[71] F. L. Moon, T. Yi, R. T. Leon, ve L. F. Kahn, “Testing of a Full-Scale Unreinforced Masonry Building Following Seismic Strengthening” *J. Struct. Eng.*, cilt. 133, no. 9, ss. 1215–1226, 2007, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(2007)133:9(1215).

[72] J. M. Proença, A. S. Gago, ve A. Vilas Boas, “Structural window frame for in-plane seismic strengthening of masonry wall buildings” *Int. J. Archit. Herit.*, cilt. 13, no. 1, ss. 98–113, 2019, doi: 10.1080/15583058.2018.1497234.

[73] M. U. Saleem, M. Numada, M. N. Amin, ve K. Meguro, “Shake table tests on FRP retrofitted masonry building models” *J. Compos. Constr.*, cilt. 20, no. 5, s. 04016031, 2016, doi: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000684.

[74] C. F. Sun, C. M. Chen, ve Q. Gu, “Experimental study on seismic behaviour of masonry walls with window openings strengthened with sprayed GFRP” *Appl. Mech. Mater.*, cilt. 744–746, ss. 113–117, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.744-746.113.

[75] D. Zhou, S. Zhou, ve Z. Lei, “In-plane shear behaviors of constrained masonry walls externally retrofitted with BFRP” *J. Compos. Constr.*, cilt. 20, no. 2, ss. 1–12, 2016, doi: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000629.

[76] A. Savin, “Yükleyenin kendi çalışması, FAL, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=56341569”

[77] V. Vega, “Yükleyenin kendi çalışması, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=122065933”

[78] D. Stanley, “Roman Walls at Diyarbaki, CC BY 2.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24200492.”

[79] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, *TBDY-18, Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar,* Ankara, 2018.

[80] INSAPEDIA, https://insapedia.com/yigma-yapi-nedir-yigma-bina-cesitleri-ve-ozellikleri/

[81] R. G. Drysdale, A. A. Hamid, ve L. R. Baker, *Masonry structures: behavior and design*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1994.

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

[83] Türk Standartları Enstitüsü, *TS EN 998-2:Kâgir harcı - Özellikler - Bölüm 2: Kâgir harcı*, 2007.

[84] A. Çakıroğlu ve E. Özer, *Malzeme ve Geometri Değişimi Bakımından Lineer Olmayan Sistemler*, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul, 1980.

[85] INSAPEDIA, https://insapedia.com/yigma-yapi-nedir-yigma-bina-cesitleri-ve-ozellikleri/

[86] H. B. Kaushik, D. C. Rai, ve S. K. Jain, “Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression” *J. Mater. Civ. Eng.*, cilt. 19, no. 9, ss. 728–739, 2007, doi: 10.1061/(asce)0899-1561(2007)19:9(728).

[87] P. Dayaratnam, *Brick and reinforced brick structures*. 1987.

[88] Eurocode 6, *Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures*, EN 1996-1-1, Brussels: CEN, 2005.

[89] MSJC, *Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures,* ACI 530-13, Masonry Standards Joint Committee, 2013.

[90] R. M. Bennett, K. A. Boyd, ve R. D. Flanagan, “Compressive Properties of Structural Clay Tile Prisms” *J. Struct. Eng.*, cilt. 123, no. 7, ss. 920–926, 1997, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(1997)123:7(920).

[91] N. Bayülke, “Betonarme yapinin dolgu duvari,” *Türkiye Mühendislik Haberleri*, ss. 85–98, 2003.

[92] FEMA 306, *Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings, basic procedures manual,* ATC-43 Applied Technology Council, FEMA 306 Federal Emergency Management Agency, 1998.

[93] T. Pauly ve M. J. N. Priestley, *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. 1992.

[94] A. M. Neville, *Properties of Concrete*. Pearson Basımevi. 2012.

[95] Türk Standartları Enstitüsü, *TS EN 1015-3:Kagir harcı- Deney metotları-Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile)*, 2000.

[96] Türk Standartları Enstitüsü, *TS EN 1015-6:Kâgir harcı - Deney metotları - Bölüm 6: Taze harcın boşluklu birim hacim kütlesinin tayini*, 2000.

[97] Türk Standartları Enstitüsü, *TS EN 1015-2:Kâgir harcı - Deney metotları - Bölüm 2:İmalatta kullanılan harç yığınlarından numune alma ve deney için hazırlama*, 2000.

[98] Türk Standartları Enstitüsü, *TS EN 1015-11:Kagir harcı - Deney metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini*, 2000.

[99] Türk Standartları Enstitüsü, *TS EN 13286-43:Bağlayıcısız ve hidrolik bağlayıcılı karışımlar - Bölüm 43: Deney metodu - Hidrolik bağlayıcılı karışımların elâstiklik modülünün tayini*, 2004.

[100] ASTM C469/C469M-14, *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

[101] Türk Standartları Enstitüsü, *TS EN 772-1:Kâgir birimler - Deney yöntemleri - Bölüm 1: Basınç dayanımının tayini*, 2011.

[102] ASTM C67/C67M-21, *Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile*, 2021.

[103] M. İnan, *Cisimlerin Mukavemeti*. İTÜ Vakfı Yayınları, 2015.

[104] A. P. Boresi ve R. J. Schmidt, *Advanced Mechanics of Materials*, Johny Wiley&Sons, Inc, 2002.

[105] P. B. Lourenço, "Computational strategies for masonry structures" PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 1996.

[106] P. B. Lourenço, "Computations on historic masonry structures" *Univ. Minho, Port. Prog. Struct. Eng. Mater.*, cilt. 4, ss. 301–319, 2002, doi: 10.1002/pse.120.

[107] F. Parisi, C. Balestrieri, ve D. Asprone, "Nonlinear micromechanical model for tuff stone masonry: Experimental validation and performance limit states" *Constr. Build. Mater.*, cilt. 105, ss. 165–175, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.078.

[108] A. Drougkas, P. Roca, ve C. Molins, "Material Characterization and Micro-Modeling of a Historic Brick Masonry Pillar" *Int. J. Archit. Herit.*, cilt. 10, ss. 887–902, 2016, doi: 10.1080/15583058.2016.1157711.

[109] B. H. AlGohi, M. H. Baluch, M. K. Rahman, A. H. Al-Gadhib, ve C. Demir, "Plastic-Damage Modeling of Unreinforced Masonry Walls (URM) Subject to Lateral Loading" *Arab. J. Sci. Eng.*, cilt. 42, no. 9, ss. 4201–4220, 2017, doi: 10.1007/s13369-017-2626-8.

[110] M. Petracca, L. Pelà, R. Rossi, S. Zaghi, G. Camata, ve E. Spacone, "Micro-scale continuous and discrete numerical models for nonlinear analysis of masonry shear walls" *Constr. Build. Mater.*, cilt. 149, ss. 296–314, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.130.

[111] A. M. D'Altri, S. de Miranda, G. Castellazzi, ve V. Sarhosis, "A 3D detailed micro-model for the in-plane and out-of-plane numerical analysis of masonry panels" *Comput. Struct.*, cilt. 206, ss. 18–30, 2018, doi: 10.1016/j.compstruc.2018.06.007.

[112] K. M. Dolatshahi ve A. J. Aref, "Two-dimensional computational framework of meso-scale rigid and line interface elements for masonry structures" *Eng. Struct.*, cilt. 33, ss. 3657–3667, 2011, doi: 10.1016/j.engstruct.2011.07.030.

[113] P.G. Asteris ve A.D. Tzamtzis, "On the Use of a Regular Yield Surface for the Analysis of Unreinforced Masonry Walls" *Electron. J. Struct. Eng.*, cilt. 3, ss. 23–42, 2003, doi: 10.56748/ejse.329.

[114] A. J. Aref ve K. M. Dolatshahi, "A three-dimensional cyclic meso-scale numerical procedure for simulation of unreinforced masonry structures" *Comput. Struct.*, cilt. 120, ss. 9–23, 2013, doi: 10.1016/j.compstruc.2013.01.012.

[115] M. Bolhassani, A. A. Hamid, A. C. W. Lau, ve F. Moon, "Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages" *Constr. Build. Mater.*, cilt. 83, ss. 159–173, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.021.

[116] L. Berto, A. Saetta, R. Scotta, ve R. Vitaliani, "Shear behaviour of masonry panel: Parametric FE analyses" *Int. J. Solids Struct.*, cilt. 41, ss. 4383–4405, 2004, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2004.02.046.

[117] P. B. Lourenço, R. De Borst, ve J. G. Rots, "A plane stress softening plasticity model for orthotropic materials" *Int. J. Numer. Methods Eng.*, cilt. 40, ss. 4033–4057, 1997, doi: 10.1002/(SICI)1097-0207(19971115)40:21<4033::AID-NME248>3.0.CO;2-0.

[118] P. B. Lourenço, J. G. Rots, ve J. Blaauwendraad, "Continuum Model for Masonry: Parameter Estimation and Validation" *J. Struct. Eng.*, cilt. 124, ss. 642–652, 1998, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(1998)124:6(642).

[119] H. O. Koksal, B. Doran, A. O. Kuruscu, ve A. Kocak, "Elastoplastic Finite Element analysis of masonry shear walls" *KSCE J. Civ. Eng.*, cilt. 20, no. 2, ss. 784–791, 2016, doi: 10.1007/s12205-015-0393-1.

[120] G. Castellazzi, A. M. D'Altri, S. de Miranda, A. Chiozzi, ve A. Tralli, "Numerical insights on the seismic behavior of a nonisolated historical masonry tower" *Bull. Earthq. Eng.*, cilt. 16, ss. 933–961, 2018, doi: 10.1007/s10518-017-0231-6.

[121] C. Chácara, N. Mendes, ve P. B. Lourenço, "Simulation of Shake Table Tests on Out-of-Plane Masonry Buildings. Part (IV): Macro and Micro FEM Based Approaches" *Int. J. Archit. Herit.*, cilt. 11, ss. 103–116, 2017, doi: 10.1080/15583058.2016.1238972.

[122] M. Valente ve G. Milani, "Damage assessment and collapse investigation of three historical masonry palaces under seismic actions" *Eng. Fail. Anal.*, cilt. 98, ss. 10–37, 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.01.066.

[123] L. Berto, A. Saetta, R. Scotta, ve R. Vitaliani, “An orthotropic damage model for masonry structures” *Int. J. Numer. Methods Eng.*, cilt. 55, ss. 127–157, 2002, doi: 10.1002/nme.495.

[124] B. Ghiassi, M. Soltani, ve A. A. Tasnimi, “A simplified model for analysis of unreinforced masonry shear walls under combined axial, shear and flexural loading” *Eng. Struct.*, cilt. 42, ss. 396–409, 2012, doi: 10.1016/j.engstruct.2012.05.002.

[125] L. Pelà, M. Cervera, ve P. Roca, “Continuum damage model for orthotropic materials: Application to masonry” *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, cilt. 200, no. 9–12, ss. 917–930, 2011, doi: 10.1016/j.cma.2010.11.010.

[126] L. Pelà, M. Cervera, ve P. Roca, “An orthotropic damage model for the analysis of masonry structures” *Constr. Build. Mater.*, cilt. 41, ss. 957–967, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.014.

[127] Reddy, *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells Theory and Analysis*, 1997.

[128] R. M. Jones, *Mechanics of composite materials*. 1798.

[129] ASCE/SEI 41-17, *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers*, ASCE, Reston, VA, USA, 2017.

[130] ACI 440.7R-10, *Guide for the design and construction of externally bonded FRP system for strengthening unreinforced masonry structures*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2010.

[131] E. Garbin, N. Galati, A. Nanni, C. Modena, ve M. R. Valluzzi, “Provisional design guidelines for the strengthening of masonry structures subject to in-plane loading” in *10th North American Masonry Conference*, 2007, ss. 458–471.

[132] C. Ferreira, “Gene Expression Programming: a New Adaptive Algorithm for Solving Problems” ss. 1–22, 2001.

[133] B. Doran, S. Ulukaya, Z. Unsal Aslan, M. Karslioglu, ve N. Yuzer, “Experimental Investigation of CFRP Strengthened Unreinforced Masonry Walls with Openings” *Int. J. Archit. Herit.*, cilt. 16, no. 12, ss. 1907–1920, 2022, doi: 10.1080/15583058.2021.1918286.

[134] Z. Unsal Aslan, M. Karslıoglu, ve B. Doran, “Experimental Investigation of CFRP Strengthened Unreinforced Masonry Walls” in *6th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 2021, ss. 492–501.

[135] H. Santa-maria, P. Alcaino, ve C. Luders, “Experimental response of masonry walls externally reinforced with carbon fiber fabrics” in *8th US National Conference on Earthquake Engineering*, 2006, ss. 8555–8564.

[136] CNR-DT 200, G*uide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures,* Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Rome, 2004.

[137] A. H. Gandomi, G. J. Yun, ve A. H. Alavi, “An evolutionary approach for modeling of shear strength of RC deep beams” *Mater. Struct. Constr.*, cilt. 46, no. 12, ss. 2109–2119, 2013, doi: 10.1617/s11527-013-0039-z.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Unsal Aslan Z. , Karslıoglu M., Doran B. “Experimental Investigation of CFRP Strengthened Unreinforced Masonry Walls”, *6th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Gebze,Kocaeli / Türkiye, 13-15 Ekim 2021, ss.492-501
2. Unsal Aslan Z. , Karslıoglu M., Doran B. “Numerical Investigation Of CFRP Strengthened Unreinforced Masonry Walls”, *4th International Congress on Engineering Sciences and Multidisciplinary Approaches*, İstanbul / Türkiye, 03-04 Kasım 2022.

Makaleler

1. Doran, B., Ulukaya, S., Unsal Aslan, Z., Karslioglu, M., Yuzer, N. “Experimental Investigation of CFRP Strengthened Unreinforced Masonry Walls with Openings”, *International Journal of Architectural Heritage*, cilt.16, no.12, ss.1907-1920, 2022.

Projeler

1. “Boşluklu Donatısız Yığma Duvarların Lif Takviyeli Polimer İle Güçlendirme Teknikleri”, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (YTU BAP), Proje no: FDK-2019-3674, Araştırmacı, 2019-2022.