T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YIĞMA TAŞ DUVARLARIN İYİLEŞTİRME TEKNİKLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Yasin Murat HOTHOT

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Programı

Danışman

Prof. Dr. Bilge DORAN

Eş Danışman

Prof. Dr. Nabi YÜZER

Mart, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YIĞMA TAŞ DUVARLARIN İYİLEŞTİRME TEKNİKLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Yasin Murat HOTHOT tarafından hazırlanan tez çalışması 12.03.2025 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

Prof. Dr. Nabi YÜZER
Yıldız Teknik Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

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

Prof. Dr. Barış SEVİM, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Konuralp GİRGİN, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

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

Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Bilge DORAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Yığma Taş Duvarların İyileştirme Tekniklerinin Deneysel ve Sayısal Olarak Araştırılması" 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.

Yasin Murat HOTHOT

İmza

Bu çalışma, “Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü’nün FDK-2021-4482” numaralı projesi ve “Yükseköğretim Kurulu Başkanlığının 100/2000 YÖK Doktora Projesi” ile desteklenmiştir.

Eşime

ve

Aileme

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca desteğini ve yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübesi ile bu çalışmanın oluşmasına yardımcı olan danışman hocam Prof. Dr. Bilge Doran'a, eş danışman hocam Prof. Dr. Nabi Yüzer'e teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarda desteklerini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Serhan Ulukaya'ya, Araş. Gör. Dr. Burcu Dinç Şengönül'e, İnş. Yük. Müh. Caner Şengönül'e, İnş. Yük. Müh. Dr. Metin Karslıoğlu'na, laboratuvar teknisyeni Halil Yavaşçı'ya, tezimin gelişme süreci boyunca değerli yorum ve katkılarıyla beni yönlendiren Prof. Dr. Barış Sevim'e ve Prof. Dr. Konuralp Girgin'e, tezimin gelişiminde değerli katkılarıyla bana yol gösteren Doç. Dr. Sema Alacalı'ya ve Doç. Dr. Cüneyt Vatansever'e teşekkür ederim.

Bu çalışmanın yapılmasında, "Yığma Taş Duvarların Düşey ve Yatay Yükler Altındaki Davranışı" adlı FDK-2021-4482 numaralı projeyi destekleyerek katkıda bulunan Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'ne ve Doktora eğitimim süresince 100/2000 YÖK Doktora Projesi kapsamında burs desteği sağlayan, Yükseköğretim Kurulu Başkanlığına teşekkür ederim.

Tez çalışmamda desteğini esirgemeyen değerli arkadaşım İnş. Yük. Müh. Dr. Metin Karslıoğlu'na, ve değerli hocam Doç. Dr. Çağrı Mollamahmutoğlu'na sonsuz şükranlarımı sunarım.

Her zaman ve her koşulda sonsuz sevgileriyle yanımda olan, sevgili ablama, anne ve babama, tüm meşakkatli süreç boyunca sabrı ile bana destek olan, yoğun çalışma dönemlerimde çocuklarımdan ve kendisinden uzak kaldığım zamanlarda, omzumdaki yükümü alan ve manevi desteğini hiç esirgemeyen, sevgili eşim Jeoloji Yük. Müh. Merve Hothot'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmamı, hayatım boyunca beni destekleyen sevgili eşim Merve Hothot'a biricik oğlum Yağız Mert'ime ve biricik kızım Masal'ıma ithaf ediyorum.

Yasin Murat HOTHOT

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii
KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xiii
ÖZET xiv
ABSTRACT xvi
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti....1
1.2 Tezin Amacı....10
1.3 Hipotez....11
2 YIĞMA YAPI ELEMANLARI 13
2.1 Yığma Duvarlar....14
2.1.1 Yığma Birimler 15
2.1.2 Harçlar 16
3 GÜÇLENDİRME YÖNTEMLERİ 17
3.1 Hasarlı Yığma Duvarlarda Güçlendirme Yöntemleri....17
3.2 Çalışma Kapsamında Uygulanan Güçlendirme Yöntemleri....19
4 TAŞ DUVAR DENEYLERİ 21
4.1 Güçlendirme Öncesi Deneysel Çalışmalar....25
4.1.1 Kesme Taş Deneyleri 26
4.1.2 Harç ve Enjeksiyon Deneyleri 27
4.1.3 Diğer Malzeme Deneyleri 29
4.1.4 Duvar Deneyleri 30
4.2 Güçlendirme Sonrası Deneysel Çalışmalar....34
4.2.1 Enjeksiyon ile Güçlendirme 34
4.2.2 Karbon Lif Takviyeli Polimer ile Güçlendirme 35

5 DENEY SONUÇLARI **38**
5.1 Enjeksiyon ile Güçlendirme 38
5.2 Karbon Lif Takviyeli Polimer ile Güçlendirme 48
6 SAYISAL MODELLEME **55**
6.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi 56
6.2 Bünyesel Modelleme 56
6.3 Modelleme Teknikleri 59
6.4 Sayısal Analizler 60
6.4.1 Güçlendirme Öncesi 62
6.4.2 Güçlendirme Sonrası 64
7 DEĞERLENDİRMELER **70**
8 SONUÇ **74**
KAYNAKÇA **78**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **86**

SİMGE LİSTESİ

c	Kohezyon
E_m	Yığma Duvarın Elastisite Modülü
K	Akış Gerilmesi Oranı
MPa	Megapaskal
σ_c	Yığma Duvarın Basınç Dayanımı
σ_t	Lifli Polimer Çekme Dayanımı
ϕ	İçsel Sürtünme Açısı

KISALTMA LİSTESİ

3B	Üç Boyutlu
CFRP	Karbon Lif Takviyeli Polimer
DP	Drucker-Prager Malzeme Modeli
NLFEA	Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Analizi
LP	Lifli Polimer
FRP	Lif Takviyeli Polimer
URM	Donatısız Yığma Duvar
LVDT	Doğrusal Değişken Yer Değiştirme Dönüştürücüleri
POT	Potansiyometrik Konum Dönüştürücüler
G1-S	G1 Enjeksiyonu ile Güçlendirilmiş Duvar
G2-S	G2 Enjeksiyonu ile Güçlendirilmiş Duvar
LP_K-S	Çapraz (Kısmi Sargı) LP ile Güçlendirilmiş Duvar
LP_T-S	Tam Sargı LP ile Güçlendirilmiş Duvar
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
C3D8	Sekiz Noktalı Sonlu Eleman Modeli
MC	Mohr-Coulomb Malzeme Modeli
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
ASCE	American Society of Civil Engineers
EC8	Eurocode 8

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Deney duvarı fotoğrafları [5] **2**
Şekil 1.2 Deney duvarı fotoğrafları [3] **2**
Şekil 1.3 Deney duvarı görünüşleri [6] **3**
Şekil 1.4 Deney duvarı fotoğrafları [7] **3**
Şekil 1.5 Deney duvarı fotoğrafları [8] **4**
Şekil 1.6 Deney duvarı fotoğrafları [9] **5**
Şekil 1.7 Deney duvarı fotoğrafları [10] **6**
Şekil 1.8 Deney duvarı fotoğrafları [11] **6**
Şekil 1.9 Moloz taş duvar geometrisi [12] **7**
Şekil 1.10 Taş duvar geometrisi [13] **7**
Şekil 1.11 Numune fotoğrafları [14] **8**
Şekil 1.12 Sargılı ve sargısız duvar fotoğrafları [15] **8**
Şekil 1.13 Deney duvarı fotoğrafları [16] **9**
Şekil 1.14 Duvar geometrileri [17] **9**
Şekil 2.1 Sultanahmet Camii [26] **13**
Şekil 2.2 Tarihi Sinop Cezaevi [27] **14**
Şekil 2.3 Farklı taş duvar örgü şekilleri [24] a) Moloz taş b)Kesme taş **14**
Şekil 2.4 Farklı tuğla duvar örgü şekilleri [24] a) İngiliz örgüsü - Çapraz Örgü b)Flaman örgüsü **15**
Şekil 2.5 Kesme taş **16**
Şekil 4.1 Göçme modları [55] **23**
Şekil 4.2 Literatürde bulunan farklı sargı konfigürasyonları [56] **24**
Şekil 4.3 Genel olarak uygulanan LP sargı şekilleri [55] **24**
Şekil 4.4 Kompozit yığma duvar kesiti üzerindeki gerilme dağılımı [57] **25**
Şekil 4.5 Çift sıra örülmüş kesme yığma taş duvar geometrisi (cm) **26**
Şekil 4.6 Üç eksenli basınç deneyi test düzeneği ve deneyler için hazırlanan numuneler. **30**
Şekil 4.7 Örülen duvarların üç boyutlu geometrisi. **30**
Şekil 4.8 Duvar örüm aşaması ve sonrasına ait fotoğraflar. **31**

Şekil 4.9 Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....**32**

Şekil 4.10 a) LVDT yerleşimi (ön görünüş) b) LVDT yerleşimi (arka görünüş)..**33**

Şekil 4.11 LP_K-1 ve LP_K-2 duvarlarının yükleme öncesi fotoğrafları. **33**

Şekil 4.12 LP_T-1 ve LP_T-2 duvarlarının yükleme öncesi fotoğrafları. **34**

Şekil 4.13 Enjeksiyon uygulama prosedürü [18].....**35**

Şekil 4.14 CFRP uygulaması ve güçlendirme şeması (a)LP_K (b)LP_T **36**

Şekil 4.15 LP_K-1 ve LP_K-2 duvarlarının güçlendirme sonrası fotoğrafları. **37**

Şekil 4.16 LP_T-1 ve LP_T-2 duvarlarının güçlendirme sonrası fotoğrafları. **37**

Şekil 5.1 G1-1 duvarına ait çatlak oluşumu (enjeksiyon uygulaması öncesi) a) Ön yüzey b) Arka yüzey.....**39**

Şekil 5.2 G1-2 duvarına ait çatlak oluşumu (enjeksiyon uygulaması öncesi) a) Ön yüzey b) Arka yüzey.....**40**

Şekil 5.3 G2-1 duvarına ait çatlak oluşumu (enjeksiyon uygulaması öncesi) a) Ön yüzey b) Arka yüzey.....**41**

Şekil 5.4 G2-2 duvarına ait çatlak oluşumu (enjeksiyon uygulaması öncesi) a) Ön yüzey b) Arka yüzey.....**42**

Şekil 5.5 G1-1 duvarına ait çatlak oluşumu (enjeksiyon uygulaması sonrası) a) Ön yüzey b) Arka yüzey.....**43**

Şekil 5.6 G1-2 duvarına ait çatlak oluşumu (enjeksiyon uygulaması sonrası) a) Ön yüzey b) Arka yüzey.....**44**

Şekil 5.7 G2-1 duvarına ait çatlak oluşumu (enjeksiyon uygulaması sonrası) a) Ön yüzey b) Arka yüzey.....**45**

Şekil 5.8 G2-2 duvarına ait çatlak oluşumu (enjeksiyon uygulaması sonrası) a) Ön yüzey b) Arka yüzey.....**46**

Şekil 5.9 Enjeksiyon öncesi ve sonrası yatay yük-yer değiştirme eğrisi (G1 & G1-S) **47**

Şekil 5.10 Enjeksiyon öncesi ve sonrası yatay yük-yer değiştirme eğrisi (G2 & G2-S) **47**

Şekil 5.11 LP_K-1 duvarına ait çatlak oluşumu (LP uygulaması öncesi) a) Ön yüzey b) Arka yüzey.....**48**

Şekil 5.12 LP_K-2 duvarına ait çatlak oluşumu (LP uygulaması öncesi) a) Ön yüzey b) Arka yüzey.....**49**

Şekil 5.13 LP_T-1 duvarına ait çatlak oluşumu (LP uygulaması öncesi) a) Ön yüzey b) Arka yüzey.....**50**

Şekil 5.14 LP_T-2 duvarına ait çatlak oluşumu (LP uygulaması öncesi) a) Ön yüzey b) Arka yüzey.....**51**

Şekil 5.15 LP ile güçlendirilmiş LP_K-1 duvarının yükleme sonrası fotoğrafları a) Ön yüzey b) Arka yüzey **52**

Şekil 5.16 LP ile güçlendirilmiş LP_K-2 duvarının yükleme sonrası fotoğrafları a) Ön yüzey b) Arka yüzey **52**

Şekil 5.17 LP ile güçlendirilmiş LP_T-1 duvarının yükleme sonrası fotoğrafları a) Ön yüzey b) Arka yüzey **.....53**

Şekil 5.18 LP ile güçlendirilmiş LP_T-2 duvarının yükleme sonrası fotoğrafları a) Ön yüzey b) Arka yüzey **.....53**

Şekil 5.19 LP ile güçlendirilmiş duvarlarda topuk bölgesinde gözlemlenen göçme durumları**.....53**

Şekil 5.20 LP uygulaması öncesi ve sonrası yatay yük-yer değiştirme eğrisi (LP_K & LP_K-S)**.....54**

Şekil 5.21 LP uygulaması öncesi ve sonrası yatay yük-yer değiştirme eğrisi (LP_T & LP_T-S) **.....54**

Şekil 6.1 C3D8 eleman modeli, integrasyon noktaları ve katı model.**.....56**

Şekil 6.2 Kırılma Yüzeyleri [83] **.....57**

Şekil 6.3 DP kriteri:(a) asal gerilme uzayında akma yüzeyi;(b) π düzlemi [74] **...58**

Şekil 6.4 MC kriteri:(a) asal gerilme alanındaki akma yüzeyi;(b) π düzlemi [74] **58**

Şekil 6.5 Farklı modelleme teknikleri.**.....59**

Şekil 6.6 Makro modelleme tekniği**.....60**

Şekil 6.7 Duvarlara ait sonlu elemanlar modeli a)Sonlu eleman ağları ve C3D8 elemanı b)Sınır-Yük koşulları c)LP_K-S sonlu elemanlar modeli d)LP_T-S sonlu elemanlar modeli **.....61**

Şekil 6.8 Yığma taş duvarın güçlendirme öncesi durumuna ait deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması **.....63**

Şekil 6.9 Güçlendirilmemiş duvarlara ait deneysel ve sayısal analiz sonuçları **....64**

Şekil 6.10 Yığma taş duvarın enjeksiyon uygulaması sonrası durumuna ait deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması **.....65**

Şekil 6.11 Enjeksiyon ile güçlendirilmiş duvarlara ait deneysel ve sayısal analiz sonuçları**.....66**

Şekil 6.12Yığma taş duvarın LP uygulaması sonrası durumuna ait deneysel ve sayısal analiz sonuçların karşılaştırılması (LP_K-S) **.....66**

Şekil 6.13Yığma taş duvarın LP uygulaması sonrası durumuna ait deneysel ve sayısal analiz sonuçların karşılaştırılması (LP_T-S)**.....67**

Şekil 6.14 LP_K-S duvarına ait deneysel ve sayısal analiz sonuçları **.....67**

Şekil 6.15 Çapraz Karbon lif takviyeli polimerde oluşan çekme gerilmesi dağılımı **.....68**

Şekil 6.16 LP_T-S duvarına ait deneysel ve sayısal analiz sonuçları**.....68**

Şekil 6.17 Karbon lif takviyeli polimerde oluşan çekme gerilmesi dağılımı**.....69**

Şekil 7.1 Güçlendirilmemiş duvarlar için yatay yük- yer değiştirme ilişkileri ve göreli öteleme sınırları**.....72**

Şekil 7.2 Güçlendirilmiş duvarlar için yatay yük- yer değiştirme ilişkileri ve göreli öteleme sınırları.**.....73**

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1 Gerçekleştirilen Duvar Deneyleri **22**
Tablo 4.2 Traverten taşların mekanik özellikleri [18] **27**
Tablo 4.3 Kireç harcına ait birleşim oranları [18] **27**
Tablo 4.4 Enjeksiyon ve harç malzemesine ait mekanik özellikler [18] **29**
Tablo 4.5 Taş duvar isimlendirmesi **31**
Tablo 4.6 Karbon Lifli Polimer'e (CFRP) ait mekanik özellikler. **36**
Tablo 5.1 Güçlendirme öncesi ve sonrası durumda duvar isimleri **38**
Tablo 6.1 Sonlu Elemanlar analizinde kullanılan malzeme parametreleri **62**
Tablo 7.1 Deney sonuçlarına ait özet tablo **70**
Tablo 7.2 Deney sonuçlarına ait özet tablo **71**

ÖZET

Yığma Taş Duvarların İyileştirme Tekniklerinin Deneysel ve Sayısal Olarak Araştırılması

Yasin Murat HOTHOT

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Programı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Bilge DORAN

Eş-Danışman: Prof. Dr. Nabi YÜZER

Yığma yapılar büyük tarihi öneme sahip olan mimari ve kültürel mirası temsil etmektedir. Bu yapılar, binlerce yıl boyunca hem kamu hem de konut binalarında kullanılmıştır. Günümüzde, iyi korunmuş pek çok yığma yapı halen varlığını sürdürmekte olup, bu durum, söz konusu yapıların yük taşıma ve çevresel etkilere karşı dayanıklı olduğunu kanıtlar niteliktedir. Bu yapılar servis ömürleri boyunca çeşitli yatay, düşey yüklere ve atmosferik etkilere maruz kalmaktadırlar. Yığma yapı elemanlarında, çevresel faktörler veya deprem gibi çeşitli doğal afetler nedeniyle istenmeyen çatlaklar ve süreksizliğe neden olabilecek boşluklar meydana gelebilir ve bu durum yapının esas taşıyıcı sistemin düşey/yatay yük taşıma kapasitesini azaltabilir. Bu durumun da yapı ve/veya yapı elemanlarında güçlendirme gerektireceği aşikardır. Yığma taş duvarlar için istenen amaca bağlı olarak farklı geleneksel güçlendirme teknikleri mevcuttur. Bu çalışma, karbon lif takviyeli polimer (CFRP) ve enjeksiyon malzemesi ile güçlendirilmiş/sağlamlaştırılmış çift sıra olarak örülmüş traverten taş duvarların

yapısal davranışını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, traverten kesme taşlarından ve İngiliz örgüsü ile çift sıra olarak yığma taş duvarlar örülmüş ve bu duvarlar düzlem içi monotonik yatay yük ve sabit eksenel yük altında test edilmiştir. Yatay yük-yer değiştirme ilişkileri ve hasar mekanizmaları incelenmiştir. Ayrıca, taş, harç, enjeksiyon ve taş-harç kompozit malzemelerin yapısal özelliklerini belirlemek amacıyla üç eksenli basınç testleri yapılmıştır. Anılan çalışmalara ilave olarak yalın/güçlendirilmiş deney duvarlarının makro düzeyde sayısal simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda bünye modeli olarak Drucker-Prager (DP) akma kriteri kullanılmış ve taş duvarların üç boyutlu (3B) doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri (NLFEA) gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonuçları, önerilen sayısal modelleme yaklaşımının, düzlem içi eksenel ve yatay yük etkilerine maruz kalan yalın/güçlendirilmiş duvarların deneysel yatay yük-yer değiştirme davranışlarını doğru şekilde tahmin edebileceğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Karbon lif takviyeli polimer, Çift sıra örgülü yığma taş duvar, Enjeksiyon, Tarihi yığma yapılar, Güçlendirme

ABSTRACT

Experimental and Numerical Investigation of Rehabilitation Techniques of Masonry Stone Walls

Yasin Murat HOTHOT

Department of Civil Engineering
Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Bilge DORAN

Co-supervisor: Prof. Dr. Nabi YÜZER

Masonry structures represent the architectural and cultural heritage of great historical importance. They have been used for public and residential buildings for several thousand years. Many well-preserved old masonry structures still exist, proving that this construction can overcome loads and environmental impact. These structures have been exposed to lateral and vertical loads and atmospheric influences throughout their lives. In masonry structures, undesirable damage, cracks, and voids may occur due to environmental factors or various natural disasters, such as earthquakes, which may cause the structure to collapse. Different conventional strengthening techniques are available depending on the purpose required for stone masonry walls. This study aims to evaluate the structural behavior of double-wythe travertine stone masonry walls strengthened by carbon fiber reinforced polymer (CFRP). For this purpose, two masonry stone walls, which are made of saw-cut travertine stones and constructed with English bond, a pattern formed by laying alternate courses of stretchers and headers, were constructed and tested under in-plane monotonic lateral load and constant axial load. Lateral load-

displacement relations and failure mechanisms were discussed. In addition, triaxial compression tests of stone, mortar, grout, and stone-mortar composite materials were performed to determine constitutive relationships. Furthermore, three-dimensional (3D) nonlinear finite element analysis (NLFEA) of stone masonry walls using the Drucker-Prager (DP) yield criterion was performed for unstrengthened stone masonry walls and strengthened ones with grout injection and CFRP. The study findings revealed that the proposed numerical modeling approach can accurately predict the experimental lateral load-displacement behavior of both strengthened and unstrengthened specimens subjected to in-plane combined axial loading and shear. Additionally, the model demonstrated its capability to simulate the experimental load-displacement and cracking patterns effectively.

Keywords: Carbon fiber reinforced polymer, Double-Wythe masonry stone walls, Grout injection, Historical masonry structures, Strengthening.

1
GİRİŞ

Yığma yapılar, ülkemiz de dahil olmak üzere dünyanın birçok ülkesinde uzun yıllar kamusal/konut amaçlı yaygın olarak kullanılmış ve halen kullanılmaya devam etmektedir. Ayrıca, yığma yapılar gelecek nesillere güvenli bir şekilde aktarılması ve korunması gereken mimari ve kültürel mirasın önemli bir bölümünü temsil etmektedir. Yığma yapılar, hizmet ömürleri boyunca deprem gibi yatay yüklere de maruz kalmaktadır. Yığma yapıları oluşturan ana yapısal elemanlar yığma duvarlardır. Bu duvarlar, heterojen katmanlı bir yapıya sahiptir ve yığma duvarları oluşturan malzemeler arasındaki zayıf bağlantılar ve boşluklar nedeniyle özellikle yatay yükler altında hasar görebilir. Bu nedenle hasar gören yapı elemanlarının güçlendirilmeleri gerekir. Literatürde, çalışmaların çoğu, özellikle düzlem içi yükleme altında yığma duvarların güçlendirilmesi tekniklerine odaklanmıştır [1], [2], [3], [4].

1.1 Literatür Özeti

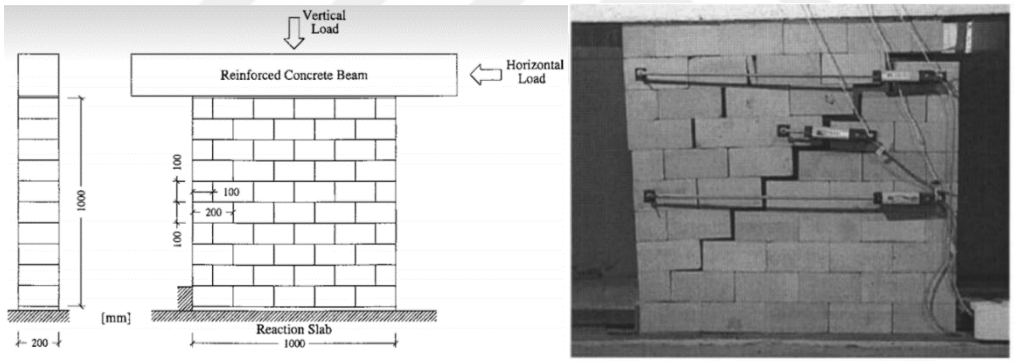
Literatürde yer alan, yığma taş duvarların düzlem içi davranışını inceleyen deneysel ve/veya teorik çalışmalar aşağıdaki paragraflarda verilmiştir.

Valluzzi vd. [5], moloz taş ve harç kullanılarak inşa edilmiş üç katmanlı taş duvar numuneleri üzerinde düşey yük altında basınç deneyleri gerçekleştirmiştir. Yükleme sonrasında hasar gören bölgeler enjeksiyon harcı ve farklı iki güçlendirme teknikleri ile onarılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Enjeksiyon uygulamasının ardından duvarlar yeniden test edilmiş ve maksimum basınç dayanımları belirlenmiştir. Ayrıca, sonuçlar analitik modeller ve formüller ile doğrulanmıştır. Çalışmada test edilen duvarlara ait fotoğraflar Şekil 1.1'de verilmiştir.



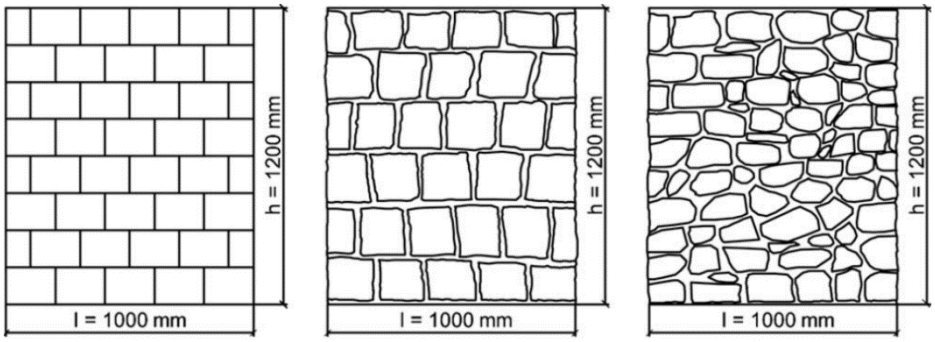
Şekil 1.1 Deney duvarı fotoğrafları [5]

Lourenço vd. [3], tek sıra kesme taş ve harçsız kuru birleşim tekniği ile örülmüş duvar numuneleri üzerinde farklı eksenel yük seviyeleri etkisinde yatay yükleme testleri yapılmıştır. Testler sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Ayrıca, duvarlar sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmada deneyleri yapılan duvarlara ait fotoğraflar Şekil 1.2'de gösterilmiştir.



Şekil 1.2 Deney duvarı fotoğrafları [3]

Vasconcelos vd. [6], tek sıra kesme taş kullanılarak harçsız kuru birleşim ve ayrıca düzensiz şekilli taşlar ile harçlı olarak inşa edilen duvarlar üzerinde düşey ve yatay yükleme testleri gerçekleştirmiştir. Deneylerde farklı düşey yük seviyeleri de incelenmiştir. Deneyler sonucunda farklı yükleme koşulları altında meydana gelen göçme modları verilmiştir. Çalışmada deneyleri yapılan duvarların görünüşleri Şekil 1.3'te gösterilmiştir.



Şekil 1.3 Deney duvarı görünüşleri [6]

Senthivel vd. [7], daha önce yapılan harçsız (kuru birleşim) ve harçlı birleşimlerden oluşan taş duvar numuneleri üzerinde yapılan deney sonuçları kullanılmıştır. Bu numunelere ait sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuştur. Uygun parametreler ile kalibre edilen sonlu eleman modellerinin sonuçları, deney sonucunda oluşan şekil değiştirme ve göçme mekanizmaları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada deneyleri yapılan duvarların fotoğrafları Şekil 1.4.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.4 Deney duvarı fotoğrafları [7]

Magenes vd. [8], çift katmanlı taş duvar üzerinde çevrimsel yatay yükleme deneyi yapılmıştır. Taş duvarın sismik davranışı belirlenmeye çalışılmıştır. Deneyler sonucu, duvarın göçme şekli, mukavemet parametreleri, yer değiştirme kapasitesi ve histeretik enerji özellikleri elde edilmeye çalışılmıştır. Yığma taş duvarın doğrusal olmayan çevrimsel davranışı elde edilmiştir. Çalışmada deneyleri yapılan duvarların fotoğrafları Şekil 1.5.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.5 Deney duvarı fotoğrafları [8]

Mooty ve arkadaşları [9], kireç esaslı harç kullanılarak inşa edilen taş duvarlar üzerinde düşey yük etkisinde deneyler gerçekleştirmiştir. Çalışmada, duvarın göçme anındaki davranışı incelenmiş; dayanımı, sünekliği ve şekil değiştirme kapasitesi belirlenmeye çalışılmıştır. Deneyler, farklı basınç dayanımına sahip kireçtaşları kullanılarak inşa edilen duvarlar üzerinde uygulanmıştır. Ayrıca, harç kalınlığının duvarın şekil değiştirme kapasitesine etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, tek sıra örgülü, çift sıra örgülü ve iki sıra arası dolgulu taş duvar örnekleri test edilmiştir. Deneye tabi tutulan duvarlara ait fotoğraflar Şekil 1.6'da sunulmuştur.

Mooty vd. [9], kireç esaslı harç kullanılarak tek sıra örgülü, çift sıra örgülü ve iki sıra arası dolgulu duvar olarak inşa edilen taş duvarlar üzerinde düşey yük etkisinde deneyler yapılmıştır. Deneyler, farklı basınç dayanımına sahip kireçtaşlarından oluşturulmuş duvarlar üzerinde yapılmıştır. Duvarın göçme mekanizmasına ait davranışı incelenmiş ve duvarın sünekliği, dayanımı ve şekil değiştirme kapasitesi açısından irdelemeler yapılmıştır. Duvarın şekil değiştirme kapasitesine harç kalınlığının etkisi de araştırılmıştır. Çalışmada deneyleri yapılan duvarların fotoğrafları Şekil 1.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 1.6 Deney duvarı fotoğrafları [9]

Oliveira ve arkadaşları [10], taş ve harç kullanılarak inşa edilmiş üç katmanlı duvar numuneleri üzerinde düşey yük etkisinde basınç deneyleri gerçekleştirmiştir. Yükleme sonrası hasar gören bölgeler, GFRP ve enjeksiyon yöntemleri kullanılarak güçlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Duvarlarda oluşan basınç gerilmeleri ve birim şekil değiştirmeler detaylı olarak incelenmiştir. Ayrıca, farklı güçlendirme yöntemleri ile duvarların ilk durumları karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır.

Oliveira vd. [10], taşlar ve harç ve kullanarak üç katmanlı yığma taş duvarlar üzerinde eksenel basınç etkisinde deneyler yapılmıştır. Yükleme sonrası hasar gören bölgeler, GFRP ve enjeksiyon yöntemleri kullanılarak güçlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar basınç gerilmeleri ve birim şekil değiştirmeler açısından irdelenmiştir. Ayrıca, farklı güçlendirme yöntemleri ile duvarların ilk durumları karşılaştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışmada deneyleri yapılan duvarların fotoğrafları Şekil 1.7.'de gösterilmiştir.



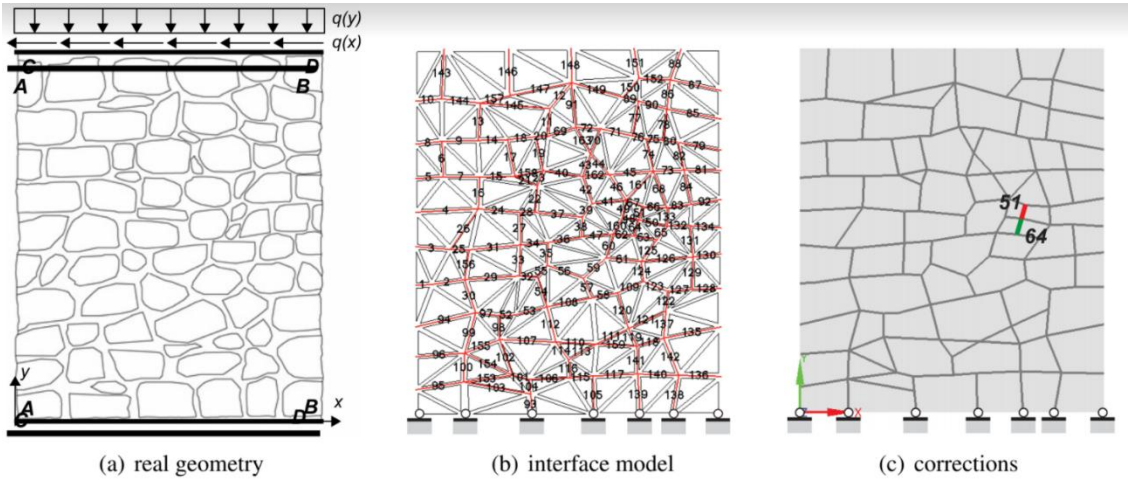
Şekil 1.7 Deney duvarı fotoğrafları [10]

Quelhas vd. [11], düzensiz şekle sahip taş duvarlar üzerinde malzeme ve duvar deneyleri yapılarak yığma duvarın yatay yük davranışı ve göçme mekanizması anlaşılmaya çalışılmıştır. Ayrıca mevcut yığma taş yapıların karakterizasyonu ve nasıl güçlendirilmesi gerektiği ile ilgili yöntem önerisinde bulunulmuştur. Çalışmada deneyleri yapılan duvarların fotoğrafları Şekil 1.8.'de gösterilmiştir.



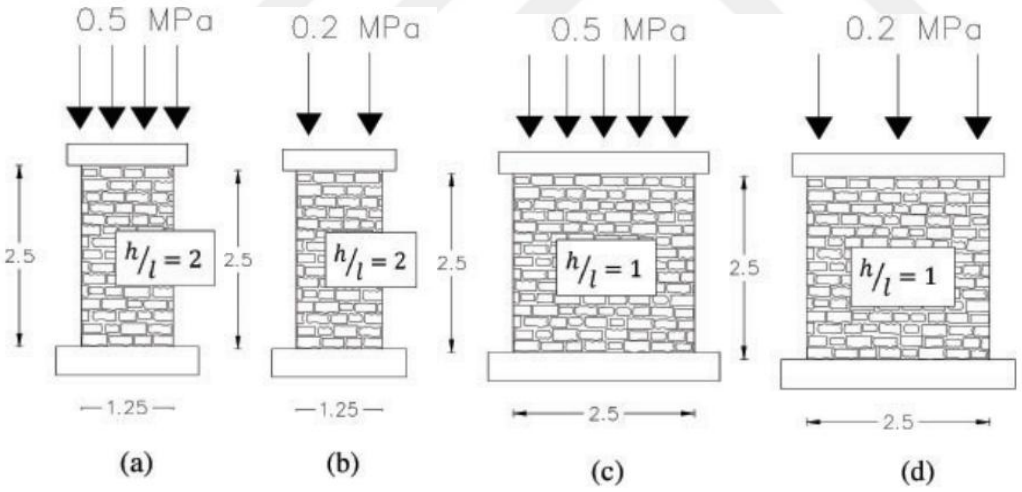
Şekil 1.8 Deney duvarı fotoğrafları [11]

Castellazi vd. [12], düzensiz şekle sahip taş duvarların sayısal olarak modellenmesi ile ilgili basitleştirilmiş mikro modelleme üzerine bir çalışma yapmıştır. Taş ve harç arasındaki sıfır kalınlıklı arayüzün nasıl tanımlanması gerektiği ile ilgili parametrik bir çalışma yapılmıştır. Çalışması yapılan duvarların geometrileri Şekil 1.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 1.9 Moloz taş duvar geometrisi [12]

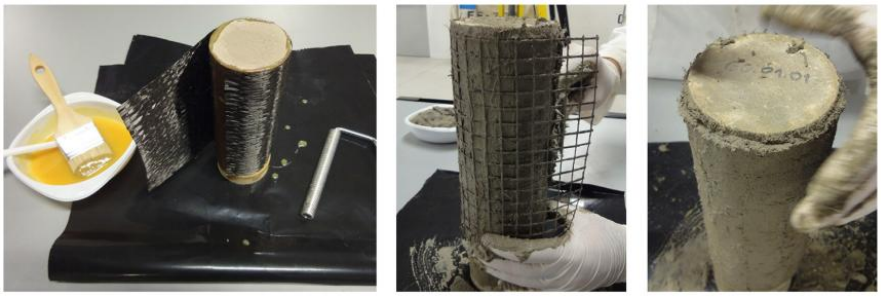
Oliveira vd. [13], farklı narinlik özelliklerine ve boyutlara sahip yığma taş duvarlar üzerinde değişken eksenel yük seviyeleri altında yükleme deneyleri yapılmıştır. Daha sonra, deney sonuçlarına dayalı olarak nümerik modeller oluşturulmuş ve bu modeller kalibre edilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak çeşitli parametrik değerlere ulaşılması amaçlanmıştır. Çalışması yapılan duvarların geometrileri Şekil 1.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 1.10 Taş duvar geometrisi [13]

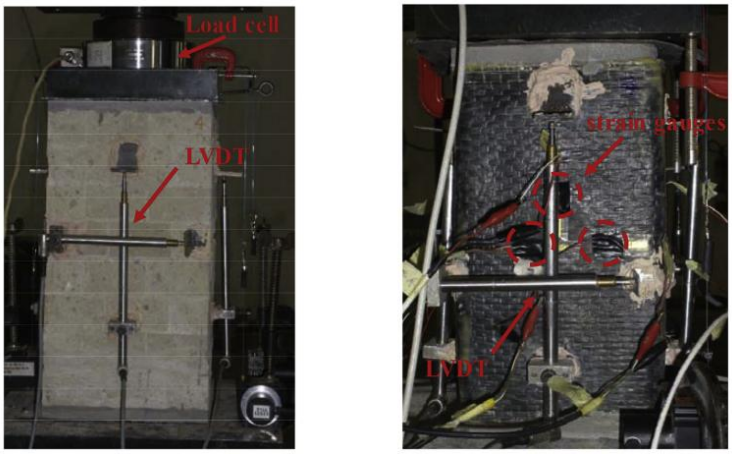
L. Estevan vd. [14], yığma taş duvarların yapı ana malzemesi olan taşların üzerinde birtakım deneyler gerçekleştirmişlerdir. Taşlardan elde edilen silindir numuneler üzerinden deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde, silindir numunelere farklı özellikte lifli polimer (LP) malzeme ile sarılarak (gücendirilerek) basınç deneyleri uygulanmıştır. Deneyler 8 farklı grupta hazırlanan 4'er numune üzerinde olmak üzere toplam 32 numune ile yapılmıştır. Deneyler sonucunda farklı numunelere

ait gerilme-eksenel şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Tek yönlü çalışan lifli polimer malzemeler ile güçlendirilen taş numunelerin basınç dayanımlarının neredeyse iki katına çıktığı gözlemlenmiştir. Çalışması yapılan numuneler Şekil 1.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.11 Numune fotoğrafları [14]

A.Sandoli vd. [15], tüf taşı ile örülmüş düzenli şekilli ve düzensiz şekle sahip duvar örnekleri üzerinde deneyler yapılmıştır. Duvarlar liflli polimer (LP) malzeme ile güçlendirilerek üzerlerinde basınç deneyleri yapılmıştır. Duvarlar prizmatik kolon şeklinde örülmüştür ve 12 adet basın deneyi yapılmıştır. Duvarlar lifli polimer malzeme ile tam tur sarılmıştır. Lifli polimer malzeme ile sarılmış taş duvarların gerilme-eksenel şekil değiştirme ilişkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Deney duvarı fotoğrafları Şekil 1.12.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.12 Sargılı ve sargısız duvar fotoğrafları [15]

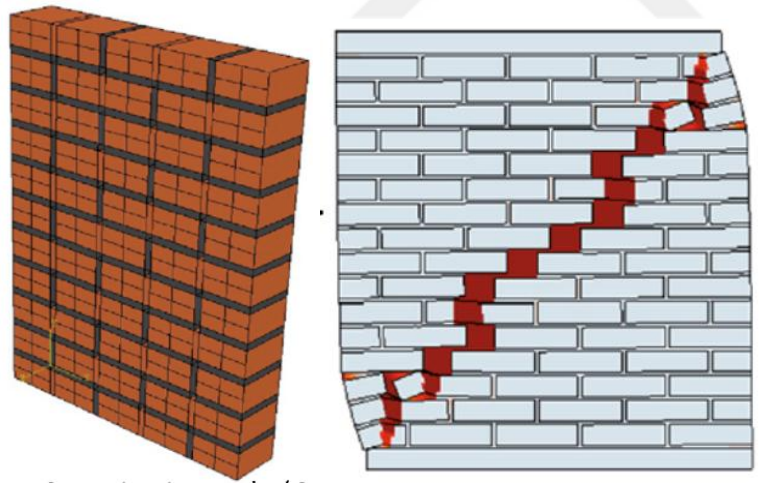
Rezaie vd. [16], moloz taş ile üretilen duvar numuneleri üzerinde yatay ve yükleme deneyleri yapmışlardır. Yapılan yüklemeler sonucunda, duvarlarını yatay yük taşıma kapasitelerini ve tepe yer değiştirmelerini ölçerek bu anlamda duvarların kapasitelerini hesaplamaya çalışmışlardır. Bu hesaplamaları farklı eksenel yük

seviyelerine göre belirlemişlerdir. Çalışmada deneyleri yapılan duvarların fotoğrafları Şekil 1.13.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.13 Deney duvarı fotoğrafları [16]

D'Altri vd. [17], taş ve tuğla gibi kargir birimlerden oluşan harçlı ve harçsız bir şekilde inşa edilen duvar ve/veya yapılara ait nümerik modellemelerin nasıl yapılması gerektiği ile ilgili sayısal modelleme teknikleri araştırılmıştır. Duvar tiplerine göre sınıflandırmalar yapılmıştır. Makro modelleme, mikro modelleme, eşdeğer çubuk modeli gibi modelleme seçeneklerine değinilmiştir. Çalışmada bahsedilen bazı duvar geometrileri Şekil 1.14.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.14 Duvar geometrileri [17]

Dinç-Şengönül vd. [18], yığma traverten taş duvarlarda enjeksiyon uygulamasının performansını araştırmak için iki farklı enjeksiyon malzemesi üretmiştir. Bu konseptte, G1 duvarında yalnızca ticari enjeksiyon malzemesi kullanılırken, G2 duvarında ticari enjeksiyon malzemesinin %30'u oranında karıştırılmış kireçtaşı tozu kullanılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Literatür taramaları sürecinde yığma taş yapıların temel taşıyıcısı olan çift sıra örgü şekli ile örülmüş taş duvarların, deneysel ve sayısal olarak yer değiştirme kapasiteleri veya kuvvet-yer değiştirme ilişkilerini açıklayan yeterli veriye rastlanmamıştır. Araştırmaların genel olarak taş duvar örgü biçimlerinden olan, tek sıra taş duvar (harçlı veya harçsız) veya iki- üç katmanlı (düzensiz şekilli veya moloz taş) üzerinde yoğunlaştığı görülmüştür. Yığma taş duvarların düzlem içi düşey+yatay yükler altında davranışlarını ve göçme mekanizmalarını etkileyen birçok etken bulunmaktadır. Doğal taşın mekanik özellikleri, taşlarda bulunan boşluklar ve kusurlar, duvar üretiminde kullanılan harç özellikleri, duvar üzerinde bulunan düşey yük vs. bu etkenler arasında sıralanabilir.

Bu çalışma kapsamında, literatür taramalarında fazla rastlanmayan çift sıra örgülü yığma taş duvarların düşey ve yatay yükler altıdaki davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenecektir. Literatürde çift sıra örgülü taş duvar geometrisine sahip oldukça az çalışma bulunmaktadır. Yapılan bu çalışmalar incelendiğinde [9], genel olarak sadece düşey yük etkisinde deneyler gerçekleştirildiği görülmektedir. Ancak bu tez kapsamında düzlem içi yatay ve düşey yükler altında deneyler yapılmıştır. Ayrıca bu geometrideki duvar örneği ile yapılan çalışmalar oldukça azdır. Daha önce yapılan sayısal modelleme çalışmalarında genel [19], [20], [21], [22] olarak iki boyutlu analizler yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmada gerek yalın gerekse farklı yöntemlerle güçlendirilmiş/sağlamlaştırılmış çift sıra yığma taş duvarların düzlem içi düşey ve artımsal yatay yükler altında deneysel ve sayısal olarak incelenecek olması, literatürdeki boşluğu dolduracak olması açısından özgün bir çalışma olacaktır.

Ayrıca çalışmada, taş duvarları oluşturan malzemelerin mekanik özelliklerini gerçekçi bir şekilde belirlemek için bir dizi deneyler ve analizlerin gerçekleştirilmesi de planlanmıştır. Bu bağlamda, taş-harç-enjeksiyon arasındaki ilişkiyi doğru modelleyebilmek için bu elemanlardan oluşturulan kompozit yapıya sahip deney numuneleri oluşturulmuş ve üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır.

Yığma duvarların üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen yapısal analizlerde kullanılan malzeme parametrelerinin doğruluğu genellikle, sayısal

çözümlerin literatürde yer alan deneysel çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılması yoluyla belirlenmektedir.

Düzlem içi yüklere maruz yalın ve farklı yöntemlerle güçlendirilmiş/sağlamlaştırılmış çift sıra örgülü kesme taş duvarların yapısal davranışı araştırılmış ve her iki yöntemin duvarın yük taşıma kapasitesine ve şekil değiştirme kapasitesine etkisi incelenmiştir. Bu vesile ile yeni yapılacak ve/veya güçlendirilecek/sağlamlaştırılacak yığma taş duvarların doğrusal olmayan davranışını betimleyen malzeme özellikleri belirlenecek ve bu parametrelerle sayısal analizler farklı modelleme teknikleri-bünye modelleri kullanılarak uygun/etkin tasarım ve modelleme yaklaşımları belirlenmiştir.

1.3 Hipotez

Yığma taş duvarlar ile ilgili günümüze kadar yapılan deneysel ve/veya sayısal çalışmaların çoğunlukla taş duvar örgü biçimlerinden olan, tek sıra taş duvar (harçlı veya harçsız) veya iki- üç katmanlı (düzensiz şekilli veya moloz taş) duvarlar için yapılmış olduğu dikkati çekmektedir [3], [10], [23]. Taş duvarların çift sıra örgü şekli ile örülmüş halinin, deneysel ve/veya analitik olarak yer değiştirme kapasiteleri veya kuvvet-yer değiştirme ilişkilerini açıklayan ve mekanik davranışı ile ilgili literatürde yeterli sayıda çalışma bulunmamaktadır.

Mevcut çalışma ile, düzlem içi yatay ve düşey yüklere maruz çift sıra örgü tekniği ile üretilmiş güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş/sağlamlaştırılmış yığma taş duvarların deneysel ve/veya sayısal olarak yer değiştirme kapasiteleri veya kuvvet-yer değiştirme ilişkilerini inceleyen bir çalışma gerçekleştirilecek olması, bu tip yapıların deprem etkisi altındaki davranışının daha detaylı olarak anlaşılması açısından oldukça faydalı olacaktır. Yeni yapılacak ve/veya güçlendirilecek yığma taş duvarların davranışı açıklanarak anılan yapıların güçlendirme/sağlamlaştırılmasında etkili modelleme yaklaşımı tartışılacaktır.

Bu çalışma ile yığma taş duvarların, düzlem içi yatay yükler etkisi altındaki davranışının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi hedeflenmiş olup olası yatay yükler (deprem vb.) altında hasar görmesi muhtemel yapıların güçlendirilmesinde uygulanacak yöntemlerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Uygulanacak yöntemlerin birbirine göre avantaj ve dezavantajları belirtilmiş olup, hasar almış yığma

duvarların kapasite artışlarının nasıl sağlanacağı üzerine öneride bulunulmuştur. Ayrıca yapılan deneysel ve sayısal analiz çalışmaları ile olası hasarların, yük ve kapasite kayıplarının hasar öncesi ve sonrası durumları için sonuçlar elde edilmiş ve önerilerde bulunulmuştur.

2
YIĞMA YAPI ELEMANLARI

Yığma yapılar, ülkemizde uzun yıllar kamusal amaçlı yaygın olarak kullanılmış ve halen kullanılmaya devam etmektedir (Şekil 2.1-Şekil 2.2). Yığma yapılar, günümüz inşaat endüstrilerinde hala yaygın olarak kullanılan en eski yapılardır. Yığma yapıların en önemli özelliği sadeliğidir. Taş, tuğla veya blok parçalarını harçla veya harçsız olarak üst üste koymak, basit ama yeterli bir tekniktir ve uzak çağlardan beri başarıyla kullanılmıştır. Doğal olarak, zaman içinde sayısız yığma yapı malzemesi, tekniği ve uygulaması çeşidi ortaya çıkmıştır. Yerel kültür, malzeme temini ve yapımda kullanılacak araçlar, malzemenin bulunabilirliği ve mimari nedenlerden etkisi bu çeşitliliğin meydana gelmesine sebep olmuştur [24], [25]. Yığma yapıları oluşturan elemanları, duvar, hatıl, lento, döşeme ve gergi çubukları olarak sıralayabiliriz. Yığma yapıların en önemli elemanları duvarlardır. Bir yığma duvarı oluşturan elemanlar, tuğla, taş vb. kargir birimler ile bu birimlerin birbirine bağlanmasını sağlayan harçlardır. Kargir birim ve harç arasında oluşan yüzeye ise arayüz denir. Aslında yığma duvarlar farklı elemanlardan oluştuklarından dolayı kompozit malzeme özelliği gösterirler.



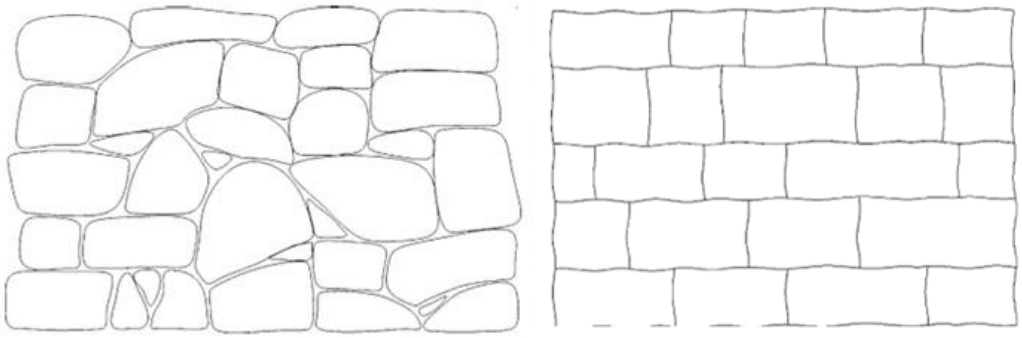
Şekil 2.1 Sultanahmet Camii [26]



Şekil 2.2 Tarihi Sinop Cezaevi [27]

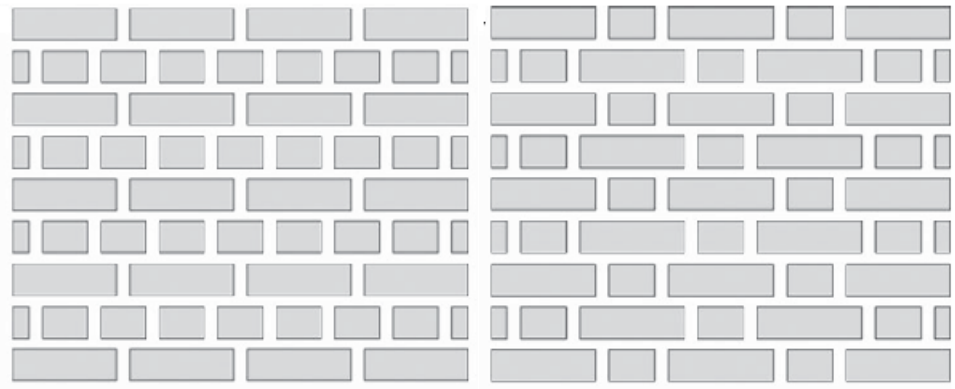
2.1 Yığma Duvarlar

Yığma duvarlar, taş, tuğla gibi birimlerden ve bunları birbirine bağlayan harçlardan oluşan heterojen bir malzemedir. Duvarı oluşturan birimler, tuğlalar, bloklar, kesme taşlar, kerpiçler, düzensiz taşlardan oluşabilir. Bağlayıcı olan harçlar ise, kil, bitüm, tebeşir, kireç/çimento bazlı harç, tutkal gibi malzemelerden meydana gelir. Yığma taş duvarların basit bir sınıflandırması Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Tuğla birimlerden oluşan yığma duvarlar için ise bazı olağan kombinasyonlar Şekil 2.4'te gösterilmiştir [24].



a) b)

Şekil 2.3 Farklı taş duvar örgü şekilleri [24] a) Moloz taş b)Kesme taş



a) b)

Şekil 2.4 Farklı tuğla duvar örgü şekilleri [24] a) İngiliz örgüsü-Çapraz Örgü b)Flaman örgüsü

2.1.1 Yığma Birimler

Yığma duvarları oluşturan birimlerden tuğla ve doğal taşlar geçmişten günümüze sıklıkla kullanılmaktadır. Seramik olarak tanımlanan bir malzeme türü olan yığma duvarlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Tuğlalar yüksek sıcaklıklarda işlem görmüş inorganik özellikte silikatlar ve metal oksitlerdir. Fiziki olarak sert olup sıcaklığa dayanaklıdırlar. Tuğlaların pişirme sıcaklıkları 950-1200 santigrat mertebelerindedir. Tuğla üretimi için yakıt ihtiyacı oldukça yüksektir. Harman tuğlasının pişirilmesi için 800^{o} sıcaklık gerekirken sert tuğlalar için bu değerin 900-1000 derecenin üzerinde olması gerekir [25].

Doğal taşlar Antik çağlardan itibaren kullanılan yığma birimlerdir. Yığma yapı elemanı olarak kullanılacak taşların yeterli bir dayanıma sahip olması gerekir. Donmaya ve atmosfer koşullarına karşı yüksek dayanımlı olmalı ve harç-taş birbirine iyi yapışmalı ayrıca kolayca işlenmelidir. Taşların basınç dayanımları da değişkendir. Taşın cinsine, mineral bileşimine, nasıl oluştuğu ile ilgili oluşum koşullara bağlı olarak değişiklik gösterir. Aynı kimyasal yapıya sahip olan taşların bazıları çok daha dayanıklı olabilirken bazıları daha zayıf olabilir. Volkanik kökenli taşların basınç dayanımları da daha yüksek olup daha sert ve dayanıklıdır. Farklı bir kayaç türü olan Tortul taşlar ise daha düşük dayanıma sahip olabilmektedir. Kum taşları 20-80 MPa, Kalker-Dolomit 50-120 MPa, Granit 80-250 MPa, Bazalt 400-500 MPa dayanımlarında olabilir [25].

Genellikle, traverten taşı gibi doğal malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri önemli ölçüde farklılık gösterir. Çelik ve İbrahimoğlu [28], Türkiye'nin Denizli, Emirdağ-Afyonkarahisar ve Kütahya bölgelerinden elde edilen traverten taşlarının

basınç dayanımını araştırmışlardır. Buna göre, traverten taşlarının basınç dayanımı 41 MPa ile 84 MPa arasında değişmektedir. Ek olarak, Jamshidi vd. [29] farklı traverten taşlarının basınç dayanımının ve gözenekliliğinin sırasıyla 37 MPa ile 66 MPa arasında, %0,54 ve %6,40 olduğunu belirlemiştir.

2.1.2 Harçlar

Duvar harçları, duvarı oluşturan kargir birimlere yataklık ederek ve onları birbirine bağlayarak duvara bir süreklilik vermektir. Harçlar, ince taneli agrega malzemelerinin bir bağlayıcı hamur ile bir araya getirilmesi sonucu elde edilmekte olan, plastik şekil verilebilen elverişli kompozit malzemelerdir. Geçmişte genellikle kum-kireç harçları kullanılmıştır. Bu cins harcın sertleşmesi için karbondioksite gerek vardır ve sertleşme oldukça yavaş gelişmektedir. Daha sonraları çimentonun katılması ile yapılan çimento kireç-kum harçları çok daha hızlı sertleştikleri için yapım hızı artmıştır. Bu arada çimentonun katılması harç dayanımlarını da arttırmıştır [25].

Bu çalışma kapsamında, çift sıra kesme taş ile örülmüş ve kireç harcı ile oluşturulmuş yığma duvarlar incelenecektir. Şekil 2.5'te kesme taş örneği gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Kesme taş

3
GÜÇLENDİRME YÖNTEMLERİ

Yığma yapıların en önemli taşıyıcı elemanları olan duvarları, oluşturan yığma birimler (taş, tuğla vb.) ile harç arasındaki zayıf bağlantılar ve boşluklar nedeniyle özellikle deprem gibi yatay yükler altında duvarlar hasar görebilir. Hasar gören veya görmesi muhtemel duvarlar onarılarak veya güçlendirilerek gelecek nesillere güvenli bir şekilde aktarılabilir. Yığma yapıların güçlendirilmesi hususunda farklı güçlendirme teknikleri söz konusudur. Lif takviyeli polimer (FRP), enjeksiyon uygulaması, kumaş takviyeli çimentolu matris, derz dolgusu, elyaf takviyeli boya gibi birçok geleneksel teknik şu anda duvarları güçlendirmek için kullanılmaktadır [30], [31], [32], [33]. Bu teknikler, duvarların mukavemetini, rijitliğini ve sünekliğini etkili bir şekilde artırır. Ancak, bunların uygulanmasının zaman alıcı olması, kullanılabilir alanı azaltması ve mevcut duvarların estetiğini etkilemesi gibi bazı dezavantajları vardır [33], [34], [35].

3.1 Hasarlı Yığma Duvarlarda Güçlendirme Yöntemleri

Son yıllarda, hasarlı mevcut duvarları güçlendirmek veya yenilemek için lif takviyeli polimer (FRP) kompozitler gibi kompozit malzemelerin kullanımı giderek daha popüler hale gelmiştir ve bu sorunlar bu malzemeler kullanılarak ortadan kaldırılabilir. FRP kompozitlerin hızlı uygulama, hafif yapısı, düşük kurulum maliyeti, korozyona karşı direnç ve değerli alan kaybı olmaması gibi sayısız avantajı vardır. Karbon lif takviyeli polimer (CFRP), Cam FRP (GFRP) ve Aramid FRP (AFRP), en yaygın FRP kompozit türleridir. FRP kompozitler çubuklar, tendonlar, kumaşlar ve lamine (plaka şeklinde) malzeme gibi farklı formlarda mevcuttur ve bu formların tümü, donatısız duvarların (URM) mukavemetini ve sünekliğini artırmak için uygun olarak kabul edilebilir [36], [37], [38].

Bu yöntemlerin yanı sıra, enjeksiyon uygulaması, özellikle taş duvarlar olmak üzere tarihi duvarları güçlendirmek için iyi bilinen ve etkili bir tekniktir [39], [40], [41]. Bu yöntem, mimari değerlerden ödün vermeden mevcut yığma yapıların onarımı ve güçlendirilmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntemin ana fikri, sulu bir ortamda bağlayıcı parçacıklarının süspansiyonu olan bir enjeksiyon malzemesinin, basınç altında yığma duvarların boşluklarına ve çatlaklarına enjekte edilmesini

içerir [42], [43], [44], [45]. Enjeksiyonun, iç boşlukları ve çatlakları doldurarak yığma duvarların yük taşıma kapasitesini ve mekanik özelliklerini artırdığı ve böylece monolitik davranışlarını ve yapısal bütünlüklerini iyileştirdiği bilinmektedir [42], [46]

Yığma duvarlarda lif takviyeli polimer ve enjeksiyonu ile güçlendirmenin etkinliğini değerlendirmek amacıyla farklı deneysel ve sayısal çalışmalar yürütülmüştür.

Bompa ve Elghazouli [47], FRP ile güçlendirilmiş kireç harçlı kil tuğla duvarların kesme davranışı üzerinde deneyler ve sayısal değerlendirmeler yürütmüş ve güçlendirilmemiş muadillerine kıyasla %16,6 ile %185,8 arasında değişen önemli bir mukavemet artışı gözlemlenmiştir.

Rahman ve Ueda [48], CFRP ve polietilen tereftalat (PET)-FRP kullanarak harici olarak güçlendirilmiş kil tuğla duvarların davranışını deneysel olarak araştırdı. Sonuçlar, her iki tip lifli polimerin kullanılmasıyla duvarın düzlem içi kesme kapasitesinin önemli ölçüde arttığını gösterdi.

Milani vd. [49], FRP şeritlerle güçlendirilmiş yığma tuğla panellerinin nihai yük taşıma kapasitesini inceledi. Panelleri farklı yükleme koşulları altında test ettiler. Daha sonra, birleşik homojenizasyon ve limit analiz tekniklerine dayalı sayısal modeller önerildi. Yanal yük-yer değiştirme ilişkisi, göçme türleri ve yük kapasiteleri ile ilgili deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırıldı.

Ghobarah ve Galal [50], duvarların düzlem dışı aşırı yüklenmesine karşı etkili bir güçlendirme tekniği araştırmıştır. Bu amaçla, farklı açıklık tiplerine sahip beş tam ölçekli duvar inşa edilmiştir. Duvarlar, göçme öncesi durumuna gelene kadar eşit şekilde yanal olarak yüklenmiştir. Hasarlı duvarlar FRP ile güçlendirilmiş ve tekrar test edilmiştir. Sonuç olarak, güçlendirilmiş duvarların yanal yük taşıma kapasitesinin önemli ölçüde arttığı ve güçlendirilmemiş olanlara kıyasla daha sünek davranış gösterdiği belirtilmiştir.

Valluzzi vd. [5], üç katmanlı moloz taş duvar örgüsünü basınç yükleri altında test etti. Hasarlı duvarlar, harç enjeksiyonu, derz dolgusu ve travers bağlama teknikleriyle güçlendirildi. Harç enjeksiyonu uygulamasından sonra duvarlar yeniden test edildi ve duvarların maksimum basınç dayanımları belirlendi. Ayrıca, sonuçlar analitik modellerle doğrulandı.

Oliveira vd. [10], Portekiz'in kuzeyinden granit taşlardan yapılmış üç katmanlı yığma duvar örgüsü üzerinde deneysel bir çalışma yürüttüler. Duvarların basınç altındaki mekanik davranışını analiz ettiler ve hasarlı duvarları GFRP ve enjeksiyon malzemeleriyle güçlendirdiler. Ayrıca duvarların basınç gerilmelerini ve birim şekil değiştirmelerini araştırdılar ve güçlendirme yöntemlerini, duvarların ilk durumlarına göre değerlendirdiler.

Literatürde Türk araştırmacılar tarafından yerel taş duvarlar üzerine yapılan çalışmalar da bulunmaktadır. Bozyiğit vd. [51], 2023 Türkiye deprem dizisinin ardından Hatay ve Osmaniye şehirlerinde bulunan 29 tarihi yığma taş bina üzerinde yapılan bir araştırmanın bulgularını bildirdi. Bayraktar vd. [52], 25 ve 28 Mart 2004 Aşkale'deki (Erzurum) depremlerden etkilenen yığma taş binaların performansını inceledi. Demir ve İlki [53], Osmanlı başkenti İstanbul'un (Türkiye) anıtsal yapılarında yaygın olarak kullanılan malzemelerin ve çok katmanlı yığma taş duvarların mekanik özelliklerine ışık tutmayı amaçladı. Bayraktar vd. [54], 2 Temmuz 2004 Doğubayazıt (Ağrı) depremi sırasında yığma taş binaların dinamik tepkisini inceledi.

Dinç-Şengönül vd. [18], traverten taşlarıyla üretilen duvarlarda ticari enjeksiyon malzemesinin performansını incelemiş ve deneysel olarak belirlemiştir.

3.2 Çalışma Kapsamında Uygulanan Güçlendirme Yöntemleri

Bu çalışma, karbon lif takviyeli polimer ve enjeksiyon ile güçlendirilmiş çift sıra olarak örülmüş taş duvarların deneysel ve sayısal olarak yatay yük-yer değiştirme ilişkilerini ve hasar mekanizmalarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Deneysel çalışma iki adıma ayrılmıştır. İlk adımda, yığma taş duvarlar düzlem içi düşey ve yatay yük etkisi altında test edilmiş ve duvarlarda enjeksiyon uygulaması için gerekli çatlak genişliklerine ulaşıldığında deney durdurulmuştur. Sonraki adımda, hasarlı duvarlar farklı konfigürasyonlara sahip çapraz ve tam tur örgü şeklindeki CFRP şeritler kullanılarak güçlendirilmiştir. Ayrıca, diğer duvarlar iki farklı tipte harçla (G1 ve G2) güçlendirilmiştir. Güçlendirilmiş tüm duvarlar ilk adımda uygulanan aynı yükleme protokolleri altında yeniden test edilmiştir. Güçlendirilmiş duvarların yatay yük- yer değiştirme ilişkileri güçlendirilmemiş olanlarla karşılaştırılmıştır. Hem güçlendirilmemiş hem de güçlendirilmiş duvarlar için üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar analiz yöntemi için makro düzeyde

sayısal bir model önerilmiştir. Bu çalışmalara ek olarak çeşitli harç tiplerinin üç eksenli basınç altında malzeme davranışını değerlendirmek için taş, harç, harç ve taş-harç kompozit numuneleri üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Üç eksenli basınç testlerinden elde edilen özellikler, traverten yığma taş duvarların sayısal analizine kullanılmıştır.

4
TAŞ DUVAR DENEYLERİ

Tez kapsamında deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmış olup elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Çalışmanın ilk bölümü deneysel çalışmaları kapsamaktadır. İlk aşamada düzlem içi düşey ve kademeli artan yatay yükler altında deneye tabi tutulan duvar numuneleri, enjeksiyon malzemesi uygulanabilmesi açısından belirli bir çatlak genişliği oluştuğu anda deneye son verilmiş, her bir numune için yatay yük ve yer değiştirmeler belirlenmiştir. Daha sonra hasar verilmiş olan bir grup duvar enjeksiyon yöntemi ve bir grup duvar ise farklı şekillerde lifli polimer (LP) malzemeler ile onarılarak deneyler tekrarlanmıştır. Yığma birim kesme taşlar, kireçtaşından (travertenden) elde edilmiştir. Taşlar üzerinde laboratuvarda üç eksenli basınç deneyleri, tek eksenli basınç deneyleri, birim hacim ağırlık deneyleri vb. deneyler yapılarak mekanik parametreler belirlenmiştir. Ayrıca yapılacak çalışmalar ile taşların boşluk oranları, elastisite modülleri ve poisson oranları belirlenmiştir. Duvarı oluşturan bir diğer eleman olan harçlar, hazırlanarak üzerinde deneyler yapılmıştır. Daha sonra, çalışmanın ikinci bölümünde, yukarıda bahsedilen deney duvarları için, taş, harç ve duvar üzerinde yapılan deney sonuçlarından elde edilen parametreler dikkate alınarak, uygun bünye modelleri yardımıyla üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

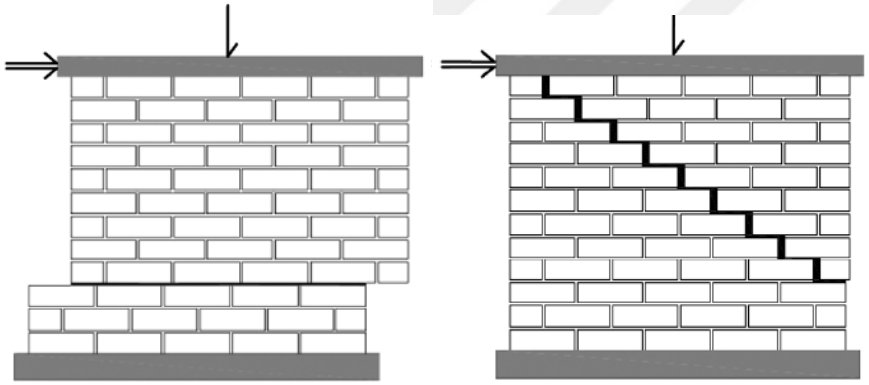
Duvarlar üzerinde, gerekli yükleme deneyleri gerçekleştirildikten sonra hasar alan (çatlayan, kırılan) bölgeler enjeksiyon yöntemi ile onarılmış ve/veya sağlamlaştırılmıştır. Sağlamlaştırma yöntemi için kullanılacak enjeksiyon malzemesi iki farklı türde hazırlanmıştır. Birinci grupta ticari/kimyasal malzeme içerikli bir karışım, ikinci grupta taş tozu içerikli doğal malzemelerden oluşan bir karışım hazırlanmıştır. Bu farklı enjeksiyon malzemeleri ile 2'şer duvar sağlamlaştırılmıştır. Bu şekilde 8 duvarın 4 tanesi enjeksiyon yöntemi ile sağlamlaştırılmıştır [18].

Diğer dört duvar ise LP malzeme ile güçlendirilmiştir. Bu dört duvarın iki tanesi üzerinde kısmi sargı (çapraz) diğer iki tanesi üzerinde tam tur sargı yapılmıştır. Güçlendirilen duvarlar üzerinde sabit düşey yük altında artımsal yatay yük uygulanarak yükleme deneyleri yapılmıştır. Hem duvarların hem de faklı enjeksiyon uygulamalarının ve ayrıca lifli polimer (LP) malzemelerin performansları değerlendirilmiştir. Lifli polimer ile güçlendirilen duvarlar için Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'nün FDK-2021-4482" numaralı projesi kapsamında destek sağlanmıştır. Deneyleri gerçekleştirilen duvarların özeti Tablo 4.1'de verilmiştir.

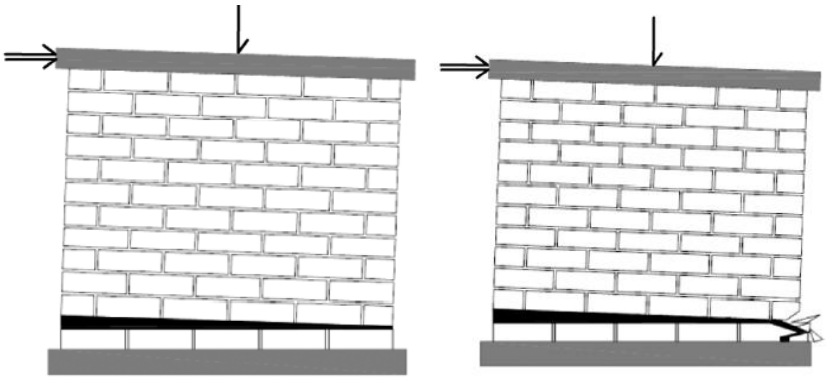
Tablo 4.1 Gerçekleştirilen Duvar Deneyleri

Deney Duvarları	Yükleme Yapılıp Hasar Verilecek	Hasar Sonrası Sağlamlaştırma / Güçlendirme Yöntemi	Araştırma Projesi Kapsamında
G1-1	✓	Enjeksiyon	×
G1-2	✓	Enjeksiyon	×
G2-1	✓	Enjeksiyon (Taş Tozu ile)	×
G2-2	✓	Enjeksiyon (Taş Tozu ile)	×
LP_K-1	✓	Lifli Polimer (Kısmi Sargı-Çapraz Sargı)	✓
LP_K-2	✓	Lifli Polimer (Kısmi Sargı-Çapraz Sargı)	✓
LP_T-1	✓	Lifli Polimer (Tam Sargı)	✓
LP_T-2	✓	Lifli Polimer (Tam Sargı)	✓

Yığma duvarların düzlem içi yükler altında çeşitli göçme mekanizmaları meydana gelmektedir. Yığma yapıların yatay yükler altında devrilme, kesme ve ezilme gibi birbirinden farklı göçme mekanizmalarının mevcut olduğu bilinmektedir (Şekil 4.1). Her bir mekanizma durumu için donatısız yığma duvarların tepe yer değiştirmesi, yapının göçme öncesine kadar performansının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Harç birleşiminde yatay çatlaklar oluşması sebebiyle ve kesme kuvvetinin artması ile yatayda kayma etkisi oluşarak göçme meydana gelir. Harç birleşim bölgesinde ya da duvar boyunca çapraz çatlaklar oluşabilir, diyagonal çekme veya yüksek kayma gerilmesi sonucu göçme meydana gelmektedir (Şekil 4.1a). Yatay yükler etkisi altında, duvarda oluşan basınç gerilmesi etkisi ile ezilme ve çekme çatlakları oluşması sonucu eğilme göçmesi meydana gelmektedir (Şekil 4.1b).



a. Kesme



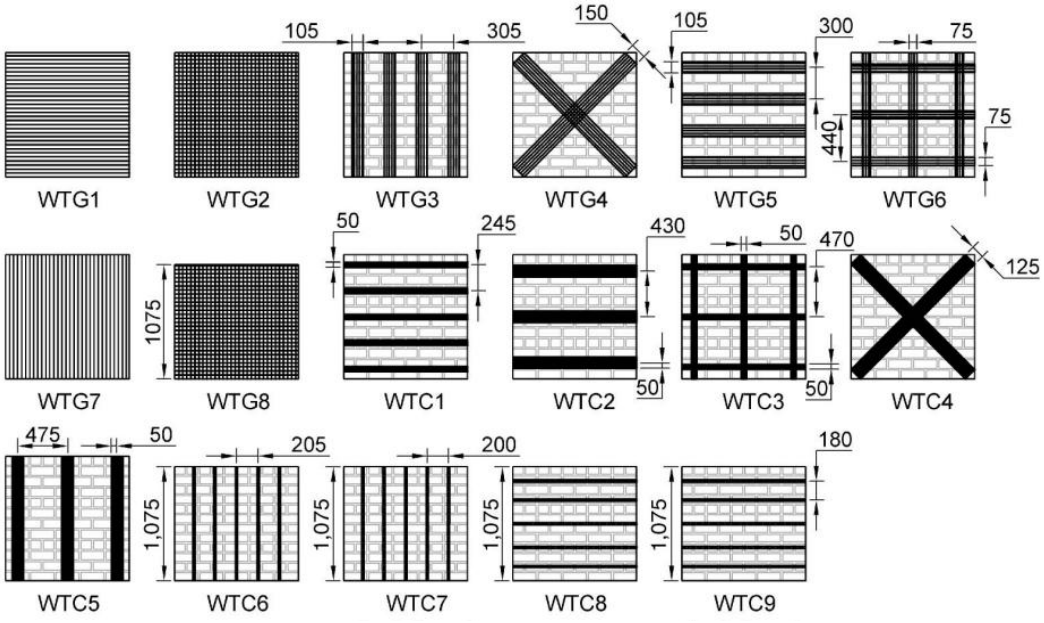
b. Eğilme

Şekil 4.1 Göçme modları [55]

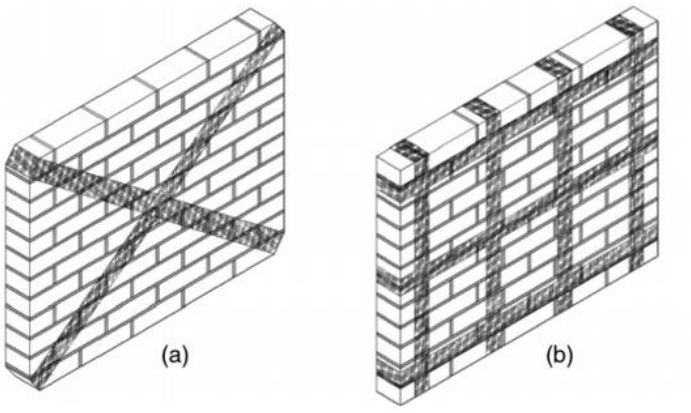
Duvarda meydana gelen göçme durumlarından gevrek olan kesme göçme durumunu engellemek için birçok araştırmada duvarların kesme kapasitesini arttırdığı vurgulanan karbon lif takviyeli polimer (LP) malzemelerden faydalanılacaktır. Teknik literatürde LP ile güçlendirilmiş duvarlarda çoğunlukla

iki farklı göçme mekanizması gözlenmiştir [14], [15], [56]. Bunlardan biri LP malzemesinin duvardan sıyrılması, diğeri de LP malzemesinin kopmasıdır. Bu çalışmada, yatay yük altındaki yığma duvarların taşıma kapasitelerinin artırılması ve düzlem içi yükler altında davranışlarının iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.

LP malzemeler farklı kompozit malzeme içeriklerinde ve farklı sargı şekilleri ile uygulanabilirler. Literatürde LP ile ilgili farklı sargı konfigürasyonları bulunmaktadır (Şekil 4.2). Bunlar genel olarak diyagonal sargı (a), tam sargı (b) olarak sıralanabilir (Şekil 4.3.).

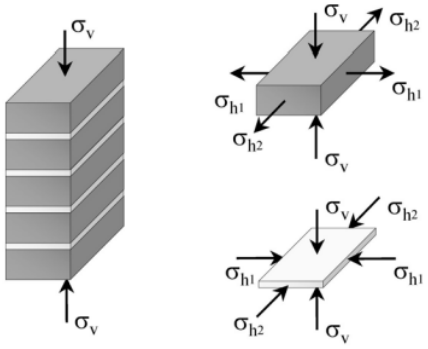


Şekil 4.2 Literatürde bulunan farklı sargı konfigürasyonları [56]



Şekil 4.3 Genel olarak uygulanan LP sargı şekilleri [55]

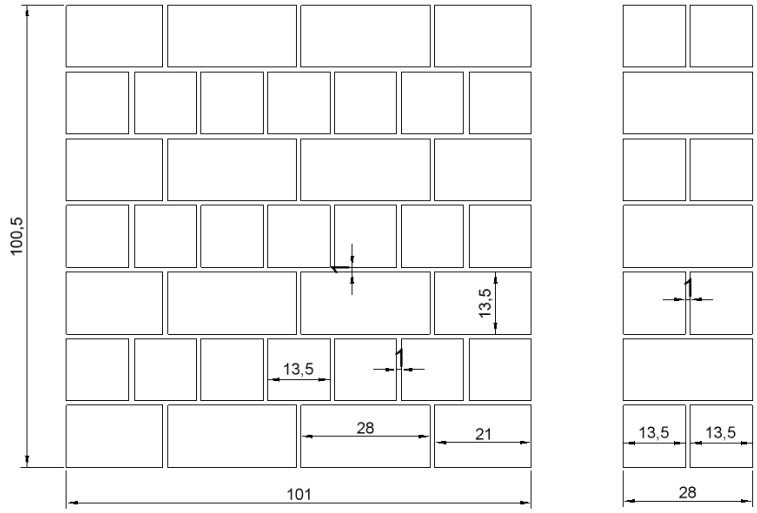
Sayısal modelleme çalışmalarında kullanılacak malzeme parametrelerini belirlemek için duvar deneyleri dışında, ilave deneyler gerçekleştirilmiştir. Taş, harç, enjeksiyon, CFRP arasındaki etkileşimi doğru modelleyebilmek için bu elemanlardan oluşturulan kompozit yapıya sahip deney numuneleri oluşturulmuştur. Şekil 4.4'te görüldüğü üzere harç ve taş birimden oluşan yığma duvarlar kompozit eleman özelliği gösterirler. Bu sebeple hem her bir birimin ayrı ayrı mekanik özellikleri belirlenmeli hem de kompozit kesitin mekanik özellikleri belirlenmelidir.



Şekil 4.4 Kompozit yığma duvar kesiti üzerindeki gerilme dağılımı [57]

4.1 Güçlendirme Öncesi Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar, Yıldız Teknik Üniversitesi (YTÜ) İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, aynı geometriye ve malzemeye sahip çift sıra olarak örülmüş yığma taş duvarlar inşa edilmiş ve düzlem içi sabit eksenel yük ile kademeli artan yatay yük altında test edilmiştir. Yükleme sonrası duvarlara hasar verilmiştir ve hasarlı duvarlar enjeksiyon ve lifli polimer malzemeler ile güçlendirilmiştir. Enjeksiyon ve karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirilen yığma duvarların performansını incelemek için 1010x1005x280 mm (uzunluk × yükseklik × genişlik) boyutlarında yığma taş duvarlar inşa edilmiştir (Şekil 4.5).



Ön görünüş Yan Görünüş

Şekil 4.5 Çift sıra örülmüş kesme yığma taş duvar geometrisi (cm)

4.1.1 Kesme Taş Deneyleri

Çalışma kapsamında inşa edilen yığma duvarların kagir birimleri kesme taşlardan (doğal) oluşmaktadır. Kalsiyum karbonattan ($CaCO_3$) oluşan tortul kayaçlardan oluşan ve 280x135x135 mm (uzunluk × yükseklik × genişlik) boyutlarında olan traverten taşları, deney duvarlarının inşasında kullanılmıştır. Taşların bir arada durmasını sağlayan harç kalınlıkları hem yatay hem de düşey derzler için 1 cm olarak sabit tutulmuştur. Traverten taşlarının mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 4.2'de verilmiştir.

Taşların tek eksenli basınç dayanımı ve eğilme dayanımı sırasıyla TS EN 1926 [58] ve TS EN 12372 [59]'de önerilen yöntemlere göre gerçekleştirilmiştir. Traverten taşlarının tek eksenli basınç dayanımı deneyleri 5×5×5 cm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Traverten taşlarının eğilme dayanımını belirlemek için ise 3×7×18 cm boyutlarındaki plaka şeklindeki numuneler kullanılmıştır. Basınç ve eğilme dayanımı deneylerinde her deney için altı numune test edilmiş ve değerlendirmelerde ortalama değerler kullanılmıştır.

Tablo 4.2 Traverten taşların mekanik özellikleri [18]

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson oranı	5 cm'lik küp numune için basınç dayanımı (MPa)	Eğilme dayanımı (MPa)
Traverten Taş	24 (0.5)	0.26 (0.1)	59.50 (5.0)	9.75 (1.0)

Not: Parantez içerisindeki değerler standart sapma değerlerini göstermektedir.

4.1.2 Harç ve Enjeksiyon Deneyleri

Bu tez çalışmasının temel amacı, aynı taş ve geometriyle oluşturulmuş ve CFRP ile enjeksiyon malzemesi ile güçlendirilen/sağlamlaştırılan taş duvarlarda elde edilen dayanım/şekil değiştirme artışlarının kıyaslanmasıdır. Bu amaç doğrultusunda, harç reçetesi, taş türü ve taş duvar geometrisi, Dinç-Şengönül vd. tarafından yayımlanan çalışmada olduğu gibi kullanılmıştır [18], [60]. Böylece, harç karışımı kullanılarak çift sıra örülmüş taş duvarlar inşa edilerek, enjeksiyon uygulaması yapılarak onarılan duvarlar karşılaştırılmıştır. Kireç harcı birleşiminde kullanılan malzemeler ve karışım oranları [18] Tablo 4.3'te gösterilmiştir.

Tablo 4.3 Kireç harcına ait birleşim oranları [18]

Malzeme	Kireç harcına ait birleşim oranları (Ağırlıkça)				
	Kaymak kireç	Kum	Kireçtaşı tozu	Puzolanik katkı	Su
Harç	1	0.7	1	0.45	0.1

Dinç-Şengönül vd. [18], enjeksiyon uygulamasının performansını belirlemek için iki farklı tipte enjeksiyon kullanmıştır. Birinci tip enjeksiyon (G1), genellikle hasarlı mevcut tarihi binaları güçlendirmek için kullanılan, çimento içermeyen önceden karıştırılmış ticari bir enjeksiyon malzemesidir. Üretici tarafından puzolanik kireç esaslı enjeksiyon malzemesi olarak tanımlanan bu malzeme, tarihi yığma yapıları güçlendirmek için sıklıkla kullanılır. İkinci tip enjeksiyon (G2), ticari enjeksiyon G1'e %30 (ağırlıkça) kireç taşı tozu eklenerek üretilmiştir. G2'de enjekte edilebilirlik özelliklerine ulaştığı için harç üretiminde kullanılmış ve iki harcın performansı karşılaştırılmıştır.

Enjeksiyon malzemelerinin karıştırma prosedürünü belirlemek için literatür verilerinden yararlanılmıştır. Su/bağlayıcı oranı akışkanlık, hacim kararlılığı ve penetrasyon sınır değerlerine göre belirlenmiştir. Buna göre, karıştırma işleminin ilk adımı olarak, toz halindeki harç, topaklanmayı önlemek için kuru olarak karıştırılmıştır. Daha sonra, mikser kullanılarak 30 saniye içinde su eklenmiş ve karışım 8 dakika boyunca karıştırılmıştır. Mekanik yüksek hızlı mikser (2.000 rpm'ye kadar) kullanılmış ve karıştırma işlemi boyunca karıştırma hızı 8½ dakika boyunca 2.000 rpm'de sabit tutulmuştur. Harçlar yalnızca su ile karıştırılarak hazırlanmıştır. Ticari harç zaten bir plastikleştirici içerdiğinden, tatmin edici taze harç özelliklerini karşılamak için hiçbir katkı maddesi kullanılmamıştır.

Harç ve enjeksiyon malzemelerinin basınç ve eğilme dayanımı EN 1015-11 [61]'e göre belirlenmiştir. Eğilme ve basınç testleri enjeksiyon ve harç numunelerinin 28., 56. ve 90. günlerinde gerçekleştirilmiştir. Basınç ve eğilme dayanımı değerleri için tipik test sonuçlarının ortalamaları Tablo 4.4'te verilmiştir. Malzemelerin Elastisite Modülü ve Poisson Oranı gibi elastik parametreler EN 13286-43 [62]'e göre belirlenmiştir. Elastisite modülünü ve Poisson oranını belirlemek için çapı 7 cm ve uzunluğu 14 cm (ϕ7/14 cm) olan silindirik numuneler üretilmiştir. Testten önce numunelerin mala yüzeyleri kapatıldı ve ardından tek eksenli basınç testine tabi tutulmuştur. Numunelere gerinim ölçerler yerleştirildi ve 60 ton kapasiteli bir basınç makinesinde 1 mm/dakika yükleme hızıyla basınç yüküne tabi tutulmuştur. Test sırasında oluşan yük ve yer değiştirmeler bir veri toplayıcı kullanılarak kaydedilmiştir ve numunelerin gerilim-şekil değiştirme eğrileri bu veriler kullanılarak oluşturulmuştur. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinin başlangıç noktasından maksimum gerilmenin %30'una denk gelen noktaya bir çizgi çizilerek ve bu sekant çizgisinin eğimi belirlenerek elastisite modülü hesaplanmıştır [63].

Tablo 4.4 Enjeksiyon ve harç malzemesine ait mekanik özellikler [18]

Gün	Mekanik Özellik	G1	G2	Harç
28. gün	Elastisite Modülü (MPa)	213 (20)	198 (18)	155 (15)
	Poisson oranı	0.24 (0.01)	0.23 (0.01)	0.27(0.01)
28. gün	Basınç dayanımı (MPa)	2.0 (0.2)	1.3 (0.2)	2.5 (0.2)
	Eğilme dayanımı (MPa)	0.7 (0.1)	0.5 (0.1)	0.8 (0.1)
56.gün	Basınç dayanımı (MPa)	2.0 (0.1)	1.4 (0.1)	3.0 (0.2)
	Eğilme dayanımı (MPa)	0.7 (0.1)	0.5 (0.1)	0.8 (0.2)
90.gün	Basınç dayanımı (MPa)	2.1 (0.2)	1.6 (0.1)	3.2 (0.3)
	Eğilme dayanımı (MPa)	0.7 (0.1)	0.5 (0.1)	0.9 (0.1)

Not: Parantez içerisindeki değerler standart sapma değerlerini göstermektedir.

4.1.3 Diğer Malzeme Deneyleri

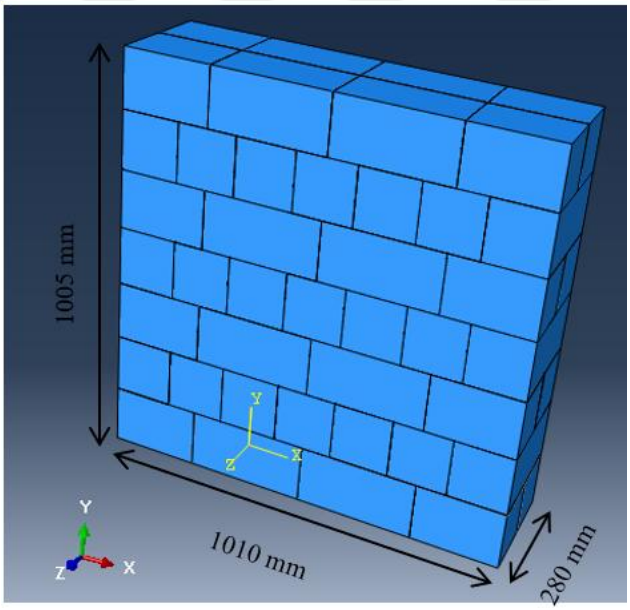
Sayısal analizlerde kullanılan parametrelerden biri olan içsel sürtünme açısı değerini hesaplamak için malzemeler üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Taş, harç, enjeksiyon ve taş-harç kompozit elemanlar üzerinde üç eksenli basınç testleri yapılmıştır. YTÜ Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'ndaki üç eksenli basınç test cihazı ve numuneler Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Bu test, üç eksenli basınca maruz kalan silindirik numunelerin kayma dayanımı parametrelerini belirlemek için yapılır. Yaklaşım, eksenel yüklemeye başlamadan önce sınır basıncı önceden tanımlanmış bir seviyeye kademeli olarak artırılmasını ve sabitlenmesini içerir. Numune pik gerilmeye ulaştıktan sonra, tam bir gerilme-şekil değiştirme eğrisi elde etmek için belirli bir süre yükleme uygulanır. Kompozit elemanlar üzerinde yapılan test sonuçlarında içsel sürtünme açısı 45 derece olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde, taş numuneler üzerinde yapılan test sonuçlarında içsel sürtünme açısının gözenekliliğe bağlı olarak 52 ila 64 derece aralığında olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.6 Üç eksenli basınç deneyi test düzeneği ve deneyler için hazırlanan numuneler.

4.1.4 Duvar Deneyleri

Tez çalışması kapsamında toplam 8 adet yığma taş duvar örümü gerçekleştirilmiş olup bu duvarlar üzerinde yatay ve düşey yükleme deneyleri yapılmıştır. Yükleme sonrası duvarlara hasar verilmiştir ve hasarlı duvarlar (8 adet) enjeksiyon (4 adet) ve lifli polimer malzemeler (4 adet) ile sağlamlaştırılmış/güçlendirilmiştir. Deneyleri gerçekleştirilen duvarların özeti Tablo 4.5'te verilmiştir. Örülen duvarların üç boyutlu geometrileri Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Duvarların örüm aşaması ve sonrasına ait fotoğraflar Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Örülen duvarların üç boyutlu geometrisi.



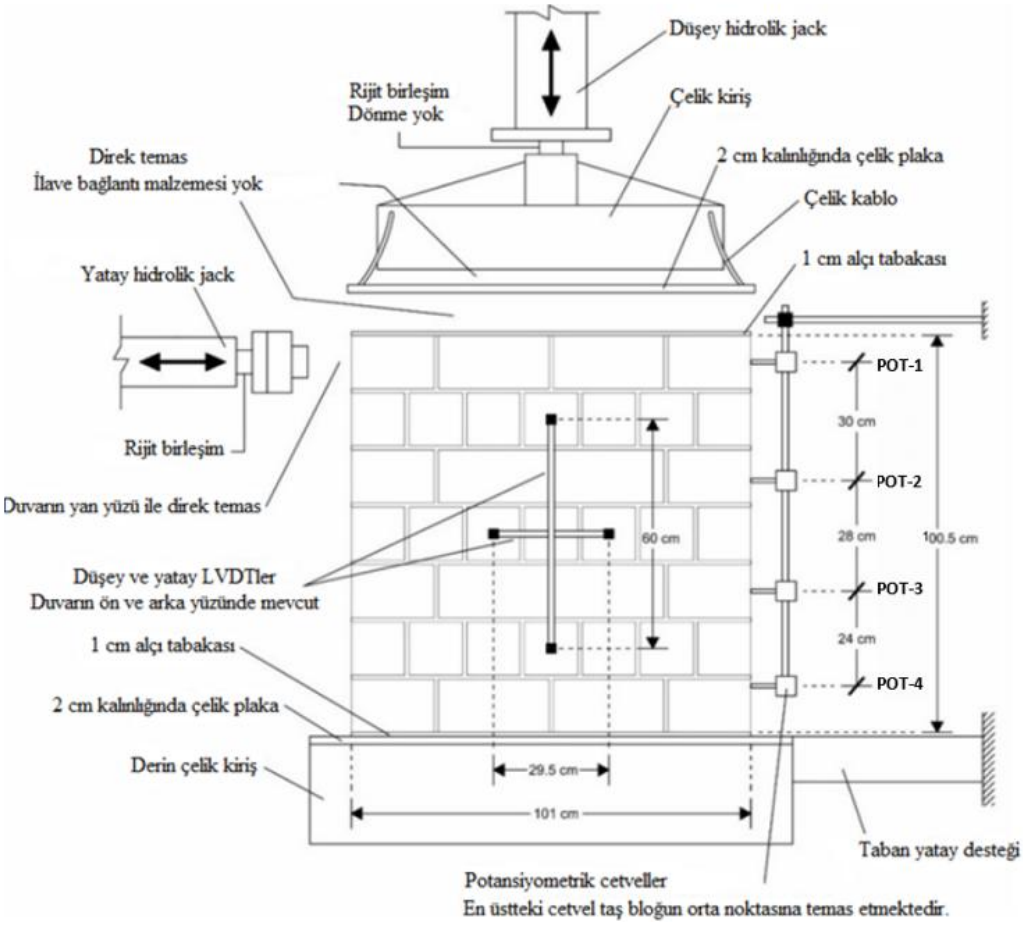
Şekil 4.8 Duvar örüm aşaması ve sonrasına ait fotoğraflar.

Tablo 4.5 Taş duvar isimlendirmesi

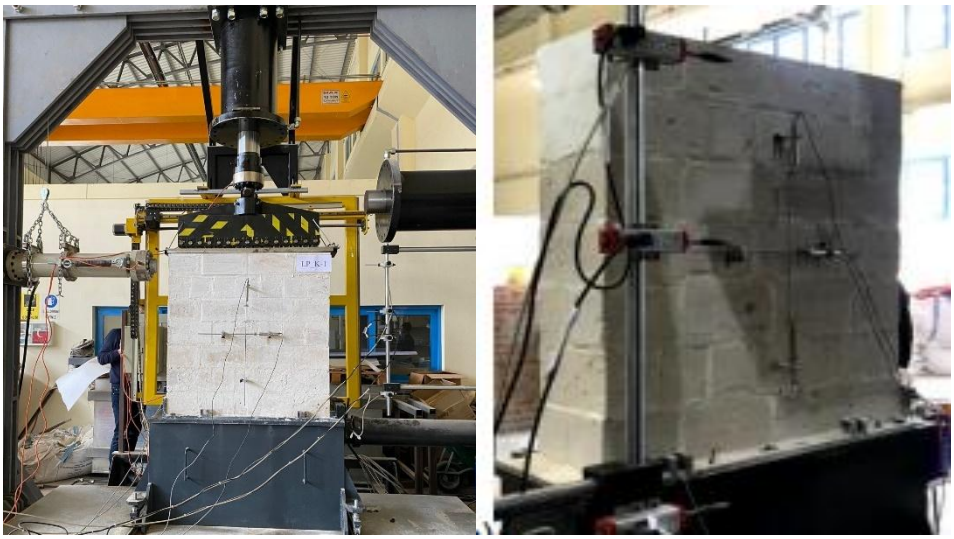
Deney Duvarları	Hasar Sonrası Sağlamlaştırma / Güçlendirme Yöntemi
G1-1	Enjeksiyon
G1-2	Enjeksiyon
G2-1	Enjeksiyon (Taş Tozu ile)
G2-2	Enjeksiyon (Taş Tozu ile)
LP_K-1	Lifli Polimer (Kısmi Sargı)
LP_K-2	Lifli Polimer (Kısmi Sargı)
LP_T-1	Lifli Polimer (Tam Sargı)
LP_T-2	Lifli Polimer (Tam Sargı)

Duvarlar inşa edildikten 28 gün sonra, sabit, düzgün dağılmış düşey yük altında artan yatay yüke tabi tutulmuştur. Yükleme aparatı, sırasıyla düşey ve yatay yükleme için 2000 kN ve 500 kN kapasiteli hidrolik krikolardan oluşmaktadır. Enstrümantasyon iki yük hücresi ve dört yer değiştirme dönüştürücüsü içermektedir (Şekil 4.9). Test boyunca sabit tutulan 1,06 MPa'lık (300 kN düşey yük) düzgün yayılı düşey ön basınç yüklemesi, literatürdeki önceki deneysel çalışmalara dayanarak seçilmiştir [6], [18], [64], [65], [66]. Bu ön basınç yükü ilk önce duvarın tepesinde bulunan 3,5 cm kalınlığındaki çelik plakaya uygulanmıştır. Daha sonra yanal yükleme 0,6±0,1 kN/s hızında uygulanmıştır. Her duvar, yükleme çerçevesindeki çelik sistem üzerine sabitlenmiş rijit bir çelik plaka üzerine inşa edilmiştir. Ölçüm ekipmanı (Şekil 4.10) ayrıca doğrusal değişken yer değiştirme dönüştürücüleri (LVDT) içermektedir. Duvar örgüsünün elastisite modülü (E_m) ve Poisson oranı LVDT ile yapılan ölçümler kullanılarak hesaplanmıştır. Duvarların

üst ve alt sıralarındaki yanal yer değiştirmeler sırasıyla potansiyometrik konum dönüştürücüler POT1, POT2, POT3 ve POT4 ile ölçülmüştür. Bir veri toplama sistemi ile tüm test verileri eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Bu çalışmada, taş duvar örgüsünün elastisite modülü deneysel olarak belirlenmiştir. Güçlendirilmemiş duvar için elastisite modülü 1900 MPa, enjeksiyon ile güçlendirilmiş duvar için ise 2250 MPa olarak bulunmuştur.



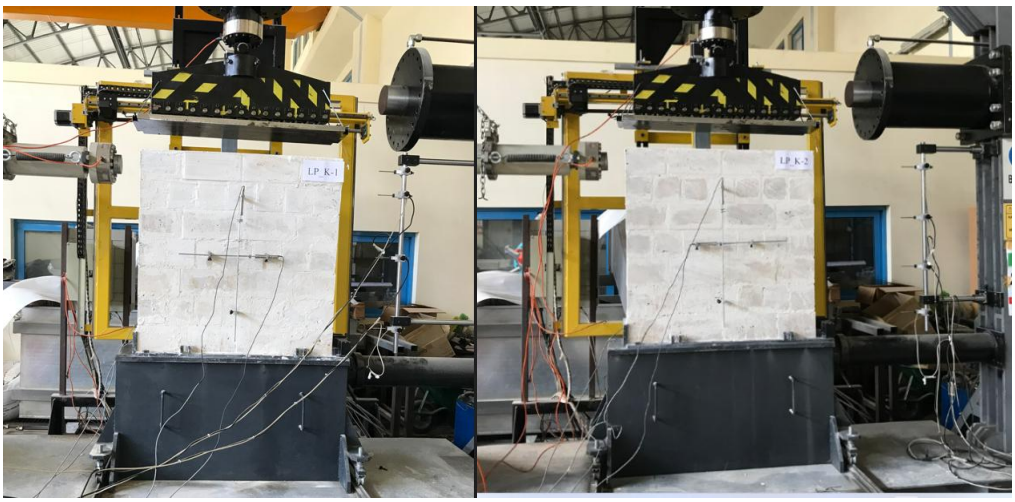
Şekil 4.9 Deney düzeneğinin şematik gösterimi



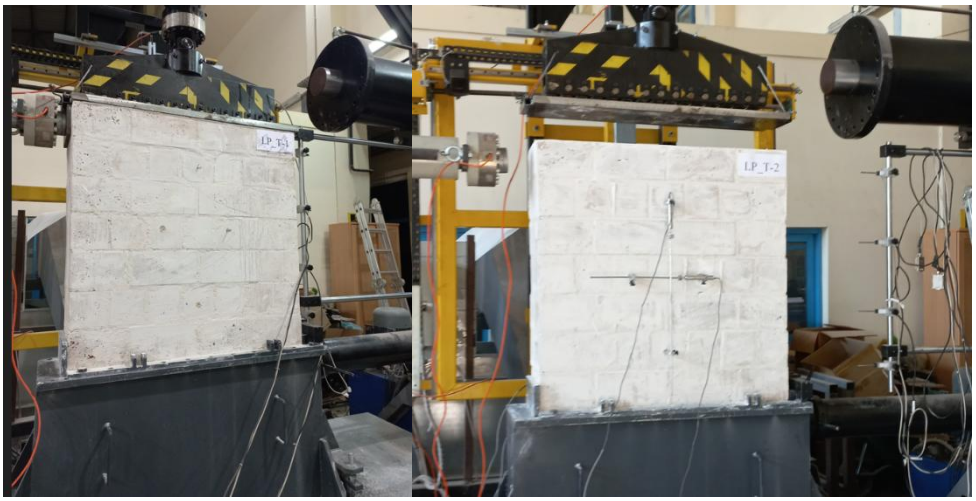
a) b)

Şekil 4.10 a) LVDT yerleşimi (ön görünüş) b) LVDT yerleşimi (arka görünüş)

Duvarlar, yükleme prosedürüne uygun olarak düşey ve yatay yükler altında test edilmiştir ve duvarlara güçlendirme uygulamaları öncesi hasar verilmiştir. Enjeksiyon uygulaması için minimum 4 mm'lik bir çatlak genişliği elde etmek gerekmektedir. Bu çalışmada, duvar testleri boyunca gözlemler yapılmış olup enjeksiyon uygulaması için yeterli çatlak genişliğine ulaşıldığında deney sonlandırılmıştır. Duvarlar, hasar verildikten sonra farklı sargı tipleri ile Lifli polimer malzemeler kullanılarak ve farklı tipteki enjeksiyon malzemesi uygulaması yapılarak güçlendirilmiştir. Yükleme öncesi ait bazı duvarlara ait fotoğraflar Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 LP_K-1 ve LP_K-2 duvarlarının yükleme öncesi fotoğrafları.



Şekil 4.12 LP_T-1 ve LP_T-2 duvarlarının yükleme öncesi fotoğrafları.

4.2 Güçlendirme Sonrası Deneysel Çalışmalar

Hasarlı dört duvar, karbon lif takviyeli polimer şeritleri kullanılarak güçlendirilmiştir. Diğer dört duvar ise farklı tipteki enjeksiyon malzemesi ile güçlendirilmiştir. Traverten taş duvarlarda enjeksiyon uygulamasının performansı, Dinç-Şengönül vd. tarafından deneysel olarak belirlenmiştir [18]. Önceki çalışmada [18] olduğu gibi aynı malzemeler kullanılarak üretilen taş duvarlarda CFRP performansını belirleyerek farklı yöntemler karşılaştırılmıştır.

4.2.1 Enjeksiyon ile Güçlendirme

Enjeksiyon uygulamasında, enjeksiyonun geçirgenliği, uygun akışı sağlayarak, taze hallerinde önemli bir özelliktir. Bu özellik, ilgili standartta belirtilen kum kolon testi kullanılarak değerlendirilebilir [67]. Bu standarda göre, bir pleksiglas tüp, çapı 4 mm'den büyük boşlukları simüle eden 2,0 mm ile 4,0 mm arasında değişen silika kumu ile doldurulur [41], [68], [69], [70], [71], [72]. Bu nedenle, enjeksiyon uygulaması için minimum 4 mm'lik bir çatlak genişliği elde edilmelidir. Bu çalışmada, duvar testleri boyunca gözlemler yapılmıştır ve enjeksiyon uygulaması için yeterli çatlak genişliğine ulaşıldığında deney sonlandırılmıştır. İlk olarak, yatay ve düşey mesafeleri 150–200 mm'yi aşmayan bir ızgarada enjeksiyon delikleri açıldı ve enjeksiyon deliklerine plastik borular yerleştirilmiştir. Daha sonra, çatlaklar sırasıyla hava ve su enjeksiyonları ile temizlenmiştir. Son olarak, harç, duvarların altından başlanarak 1 bar basınçla enjekte edilmiştir (Şekil 4.13). Enjeksiyon noktaları, enjeksiyon sırasında dışarıya sızıntıyı önlemek için çatlaklar boyunca bir sızdırmazlık malzemesi (macun) ile kapatılmıştır. Nispeten daha dar

çatlaklar, bir enjeksiyon şırıngası kullanılarak elle harçla doldurulmuştur. Dört duvar için toplam 5,0 litre enjeksiyon malzemesi kullanılmıştır ve duvar başına ortalama 1,25 litre enjeksiyon malzemesi uygulanmıştır [18].



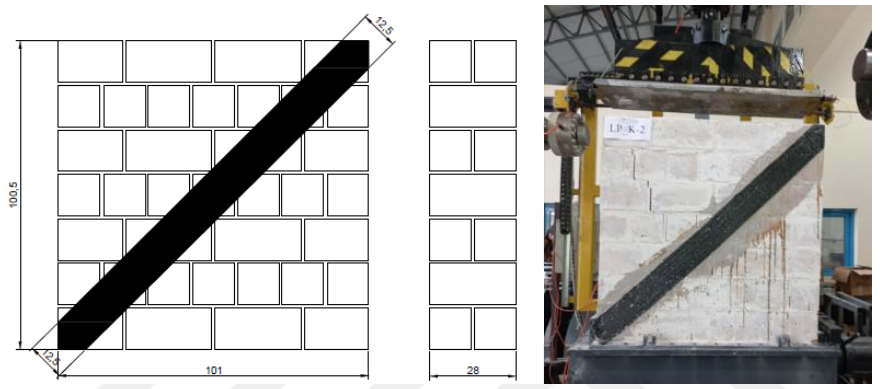
Şekil 4.13 Enjeksiyon uygulama prosedürü [18]

4.2.2 Karbon Lif Takviyeli Polimer ile Güçlendirme

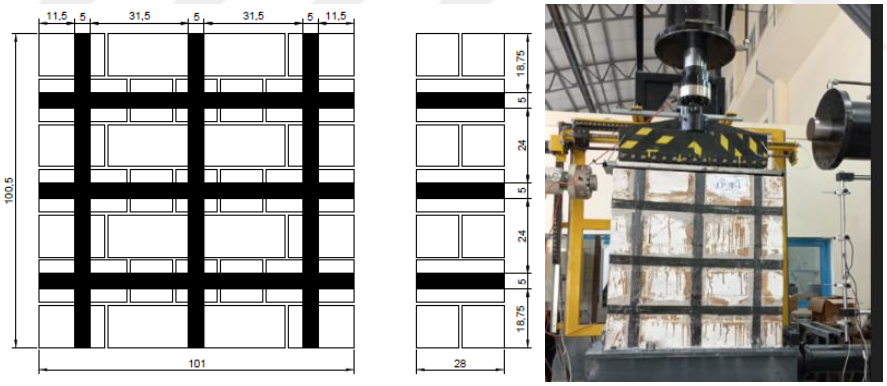
Karbon lif takviyeli polimer ile güçlendirme uygulaması yapılan malzemelerin, üreticiden temin edilen mekanik özellikleri Tablo 4.6'da sunulmuştur. 0.17 mm kalınlığındaki CFRP şeritler üreticinin önerdiği prosedür kullanılarak duvarlara uygulanmıştır. Uygulama öncesi duvar yüzeyleri tel fırça ile temizlenmiştir. Duvar numunelerindeki gözenekler bir astar tabakası ile kapatılmış, ardından CFRP'nin yapıştırılacağı bölümlere epoksi reçine uygulanmıştır. Lif şeritlerin genişlikleri, tam tur yerleşim için 50 mm, çapraz yerleşim için 125 mm olarak sabit tutulmuştur. Lif takviyeli polimer şeritler daha sonra reçine ile tamamen kaplanana kadar uygulanmıştır. CFRP şeritler belirli bölümler halinde duvara yerleştirilmiştir. CFRP uygulanmış duvarlar Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Güçlendirilmiş duvarlar laboratuvarda muhafaza edilmiş ve CFRP uygulandıktan sonraki 28. günde test edilmiştir.

Tablo 4.6 Karbon Lifli Polimer'e (CFRP) ait mekanik özellikler.

Malzeme	Mekanik Özellikler				
	Elastisite Modülü, E (Mpa)	Çekme Dayanımı, σ_t (Mpa)	Kopmada uzama (%)	Kalınlık (mm) 0.17	Birim Ağırlık (g/m^2)
CFRP	≥230,000	≥4900	2.1	0.17	300



a)



b)

Şekil 4.14 CFRP uygulaması ve güçlendirme şeması (a)LP_K (b)LP_T

Lifli polimer malzemeler ile yapılan güçlendirme uygulamalarına ait fotoğraflar, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.15 LP_K-1 ve LP_K-2 duvarlarının güçlendirme sonrası fotoğrafları.



Şekil 4.16 LP_T-1 ve LP_T-2 duvarlarının güçlendirme sonrası fotoğrafları.

5
DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde, taş duvarlar üzerinde gerçekleştirilen ve detayları 4.Bölümde verilen deneylere ait tepe yer değiştirmeleri ve yatay yük kapasitelerine ait sonuçlar irdelenmiştir. Ayrıca davranışa dair bir fikir verebilmesi açısından güçlendirme öncesi ve sonrası durumlar için duvarlarda oluşan çatlak genişlikleri ölçülmüş, duvarların göçme mekanizmaları ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır. Güçlendirme öncesi ve sonrası durumları ifade etmek için kullanılan notasyonlar Tablo 5.1'de verilmiştir.

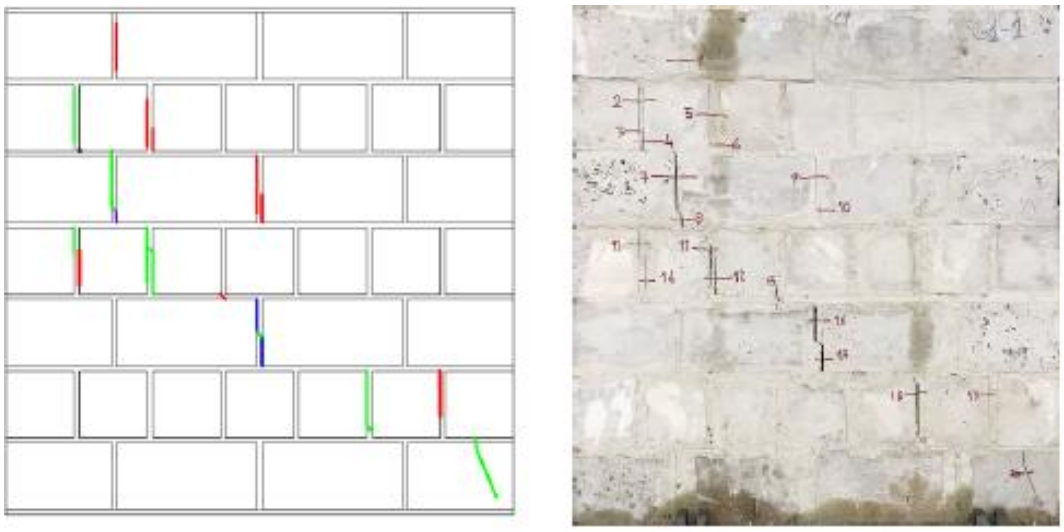
Tablo 5.1 Güçlendirme öncesi ve sonrası durumda duvar isimleri

Güçlendirme Öncesi		Güçlendirme Sonrası	
İsim Kodu	Tanımlama	İsim Kodu	Tanımlama
G1	Güçlendirilmemiş Duvar	G1-S	G1 Enjeksiyonu ile güçlendirilmiş duvar
G2	Güçlendirilmemiş Duvar	G2-S	G2 Enjeksiyonu ile güçlendirilmiş duvar
LP_K	Güçlendirilmemiş Duvar	LP_K-S	Çapraz (Kısmi Sargı) LP ile güçlendirilmiş duvar
LP_T	Güçlendirilmemiş Duvar	LP_T-S	Tam sargı LP ile güçlendirilmiş duvar

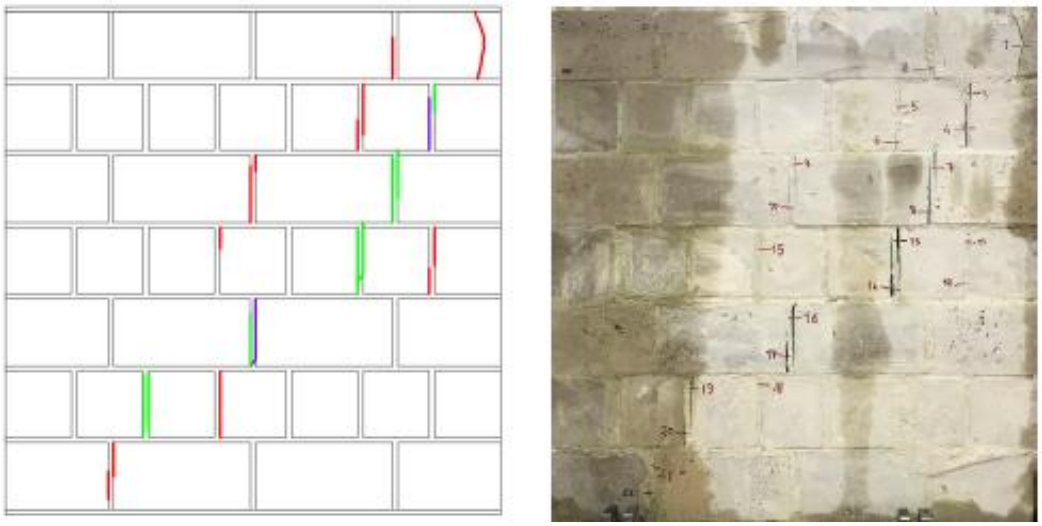
G1, G2: Enjeksiyon tipi; S: Güçlendirilmiş duvar; LP: Lifli polimer; K: Kısmi sargı; T: Tam sargı;

5.1 Enjeksiyon ile Güçlendirme

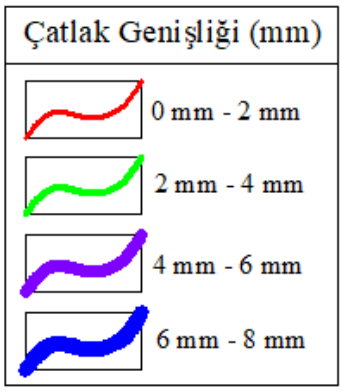
Güçlendirme öncesi duvarlarda yapılan deneylerde, yatay yük arttıkça çatlaklar duvar köşelerine doğru diyagonal yönde belirgin şekilde yayılmıştır. Duvarın sağ topuk bölgesine yakın taş duvar birimlerinde dikey ve diyagonal çatlaklar oluşmuştur. Duvar testleri boyunca gözlemler yapılmış ve enjeksiyon uygulaması için yeterli çatlak genişliğine ulaşıldığında deney sonlandırılmıştır. Güçlendirilme öncesine ait G1 ve G2 duvarlarında elde edilen çatlak desenleri sırasıyla Şekil 5.1-5.4'te gösterilmiştir [18]. Her yük değerine karşılık gelen yer değiştirmeler yatay yük doğrultusuna paralel olarak yerleştirilen potansiyometrik cetveller ile ölçülmüştür. Oluşan hasarlar çatlak haritaları ile çıkartılmıştır. Model duvarların yatay yük – tepe yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir.



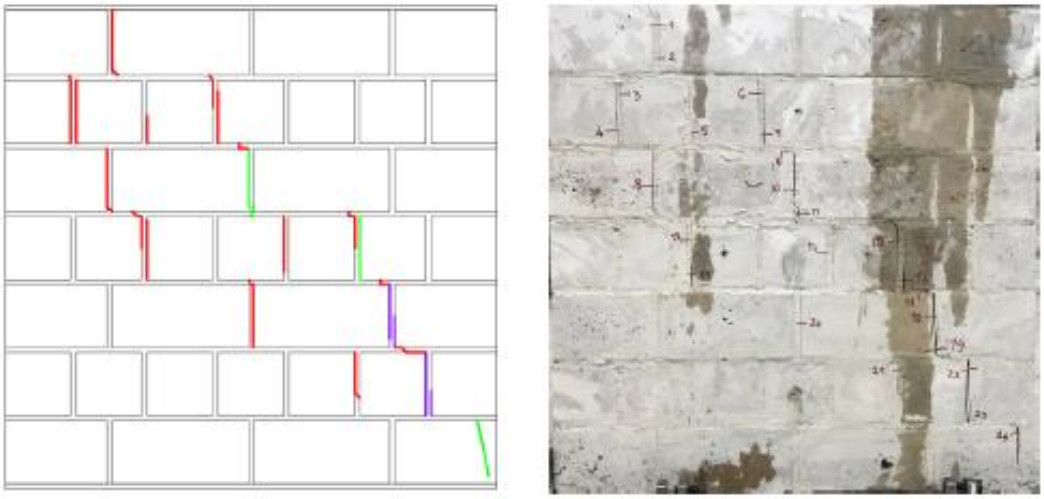
a)



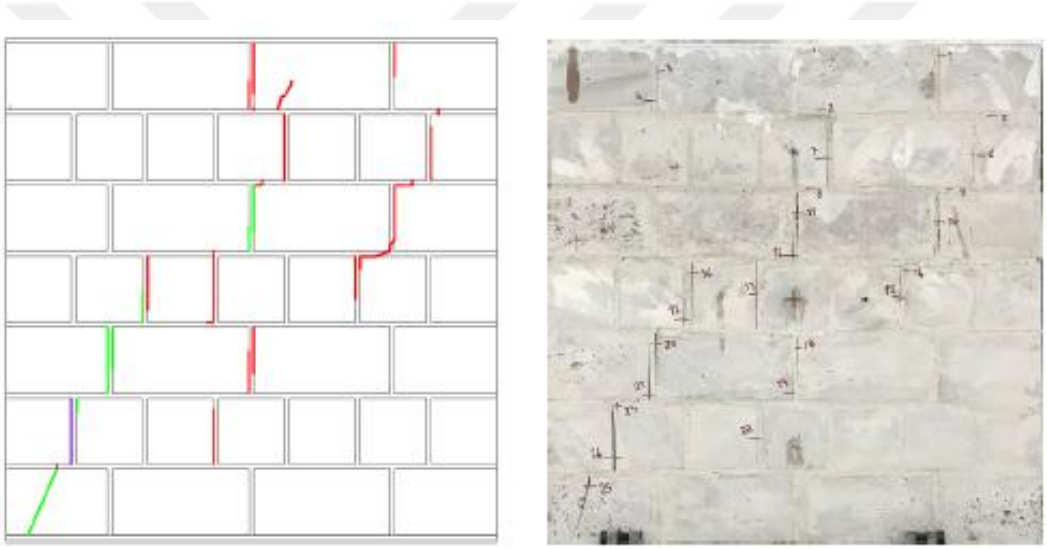
b)



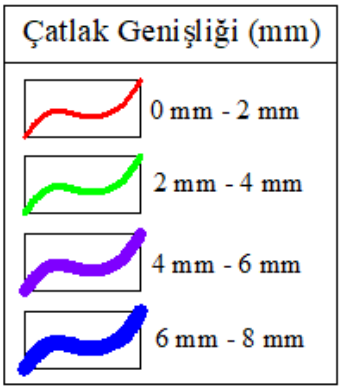
Şekil 5.1 G1-1 duvarına ait çatlak oluşumu (enjeksiyon uygulaması öncesi) a) Ön yüzey b) Arka yüzey



a)



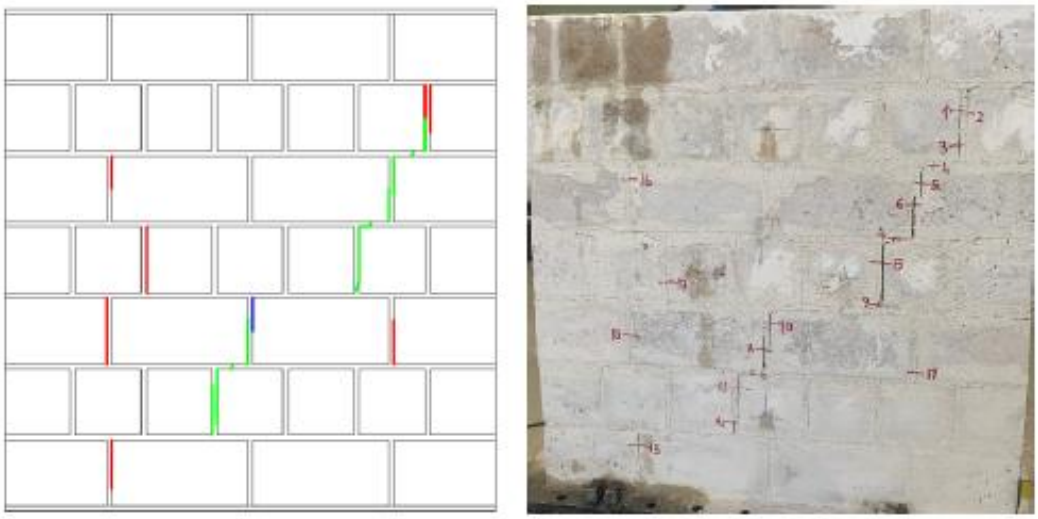
b)



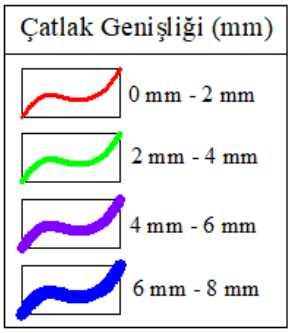
Şekil 5.2 G1-2 duvarına ait çatlak oluşumu (enjeksiyon uygulaması öncesi) a) Ön yüzey b) Arka yüzey



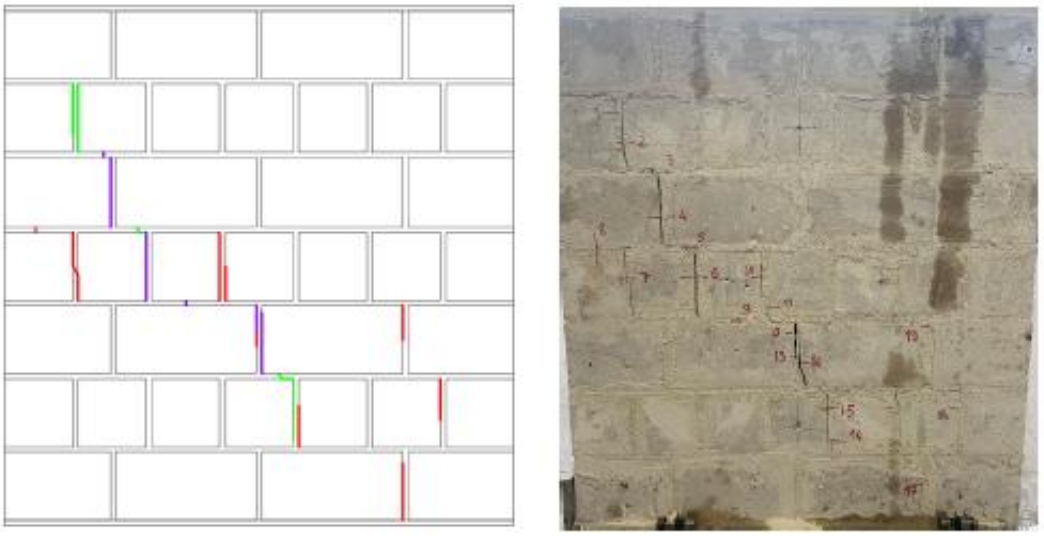
a)



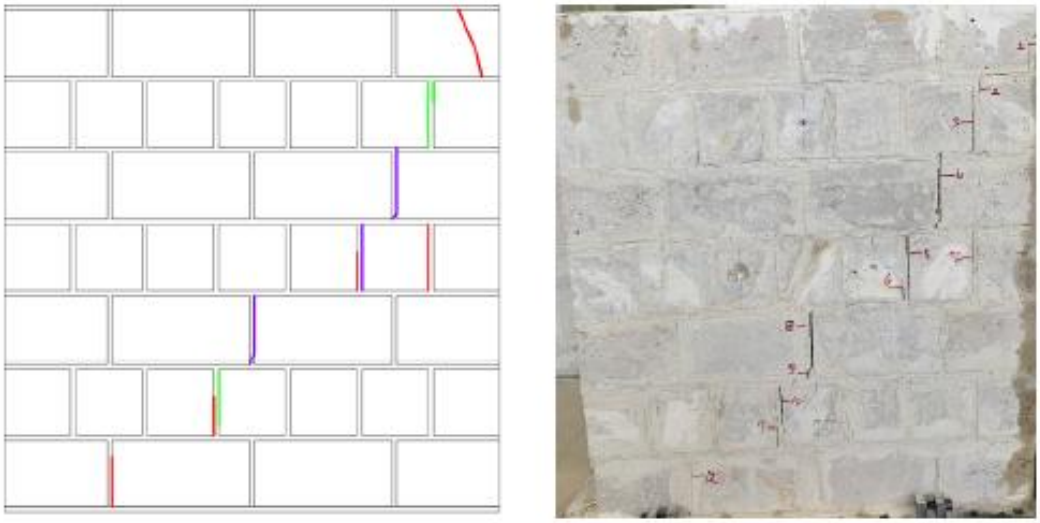
b)



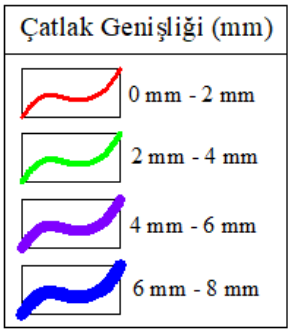
Şekil 5.3 G2-1 duvarına ait çatlak oluşumu (enjeksiyon uygulaması öncesi) a) Ön yüzey b) Arka yüzey



a)



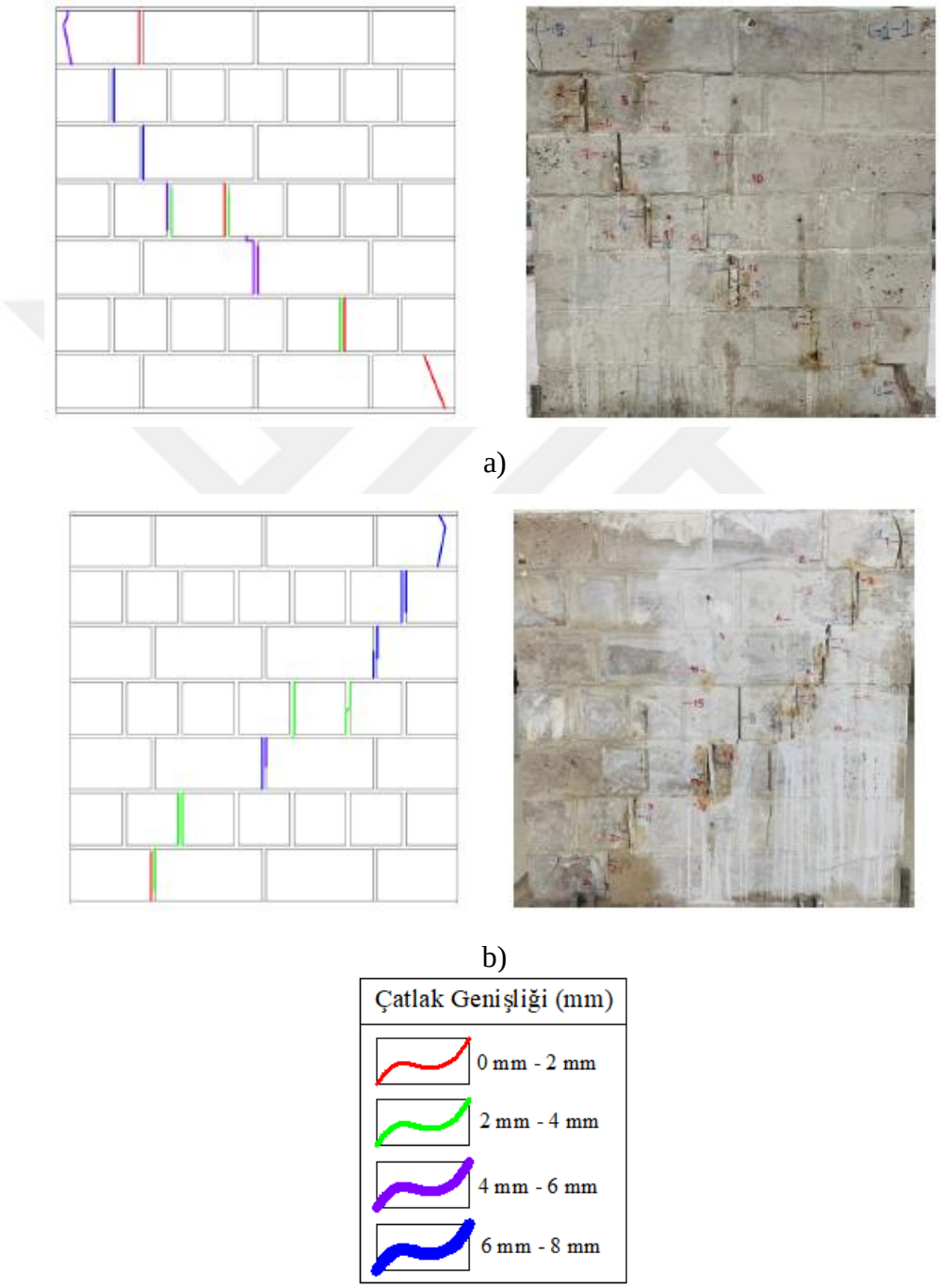
b)



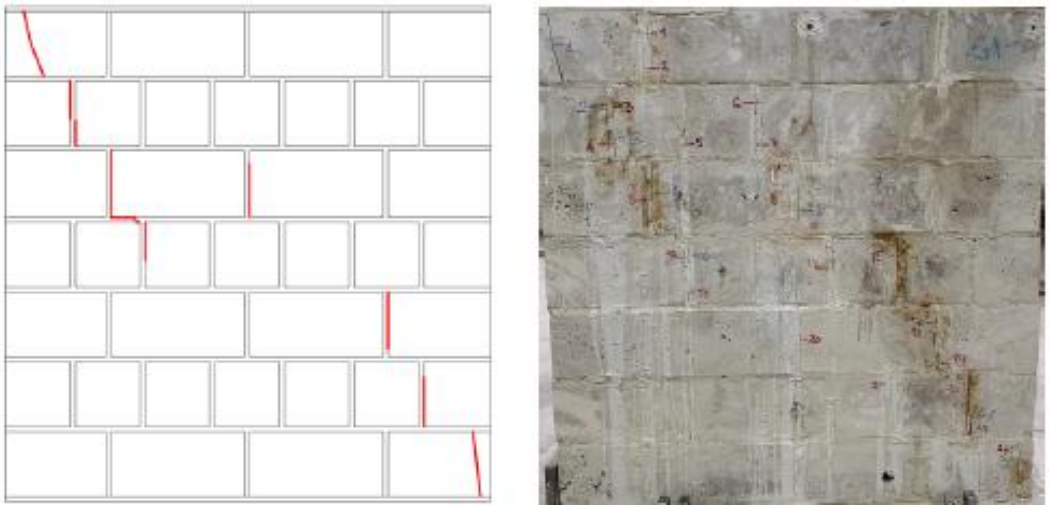
Şekil 5.4 G2-2 duvarına ait çatlak oluşumu (enjeksiyon uygulaması öncesi) a) Ön yüzey b) Arka yüzey

Enjeksiyon ile güçlendirilmiş taş duvarlar (G1-S, G2-S), enjeksiyon uygulamasından 28 gün sonra aynı yükleme koşulları ile tekrar test edilmiştir. Güçlendirme sonrasında yapılan yükleme sonucu, G1-S ve G2-S duvarlarında oluşan çatlaklar sırasıyla Şekil 5.5-5.8'de verilmiştir. Enjeksiyon sonrası çatlak

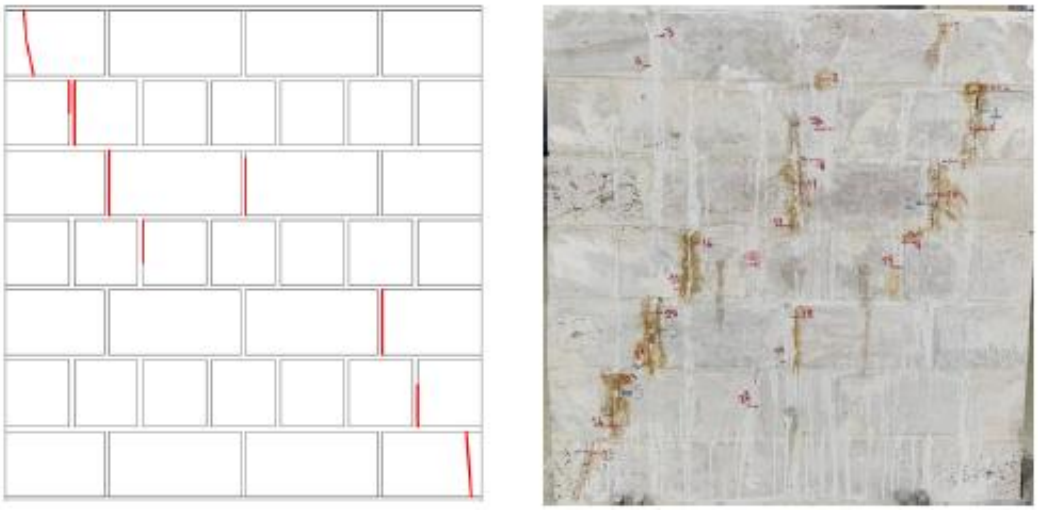
genişliklerinin ve adetlerinin azaldığı, diyagonal merdiven basamağı şeklindeki çatlakların yeniden oluştuğu açıkça görülmektedir. Harç enjeksiyonu uygulamasından sonra çatlak yerlerinin değiştiği, çatlak genişliğinin 1–8 mm'den 1–4 mm'ye düştüğü görülmüştür. Güçlendirme öncesi duruma göre tüm duvarlar için nihai yatay yük değerlerinin arttığı görülmüştür.



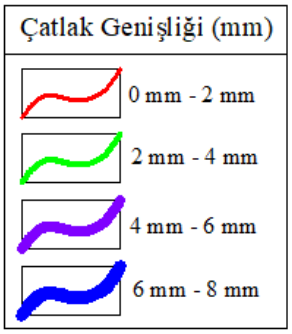
Şekil 5.5 G1-1 duvarına ait çatlak oluşumu (enjeksiyon uygulaması sonrası) a) Ön yüzey b) Arka yüzey



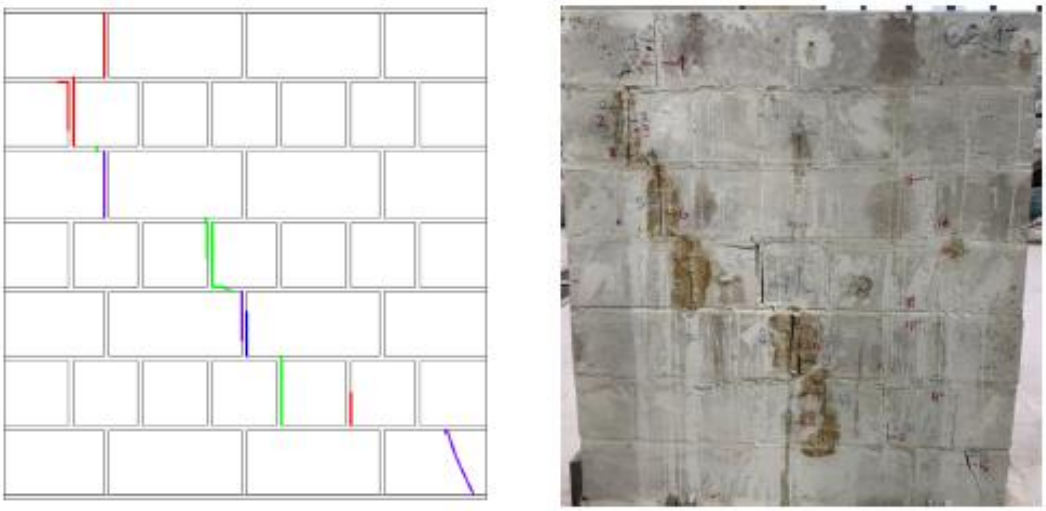
a)



b)



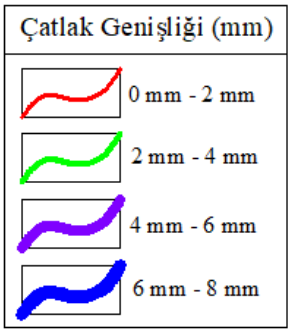
Şekil 5.6 G1-2 duvarına ait çatlak oluşumu (enjeksiyon uygulaması sonrası) a) Ön yüzey b) Arka yüzey



a)



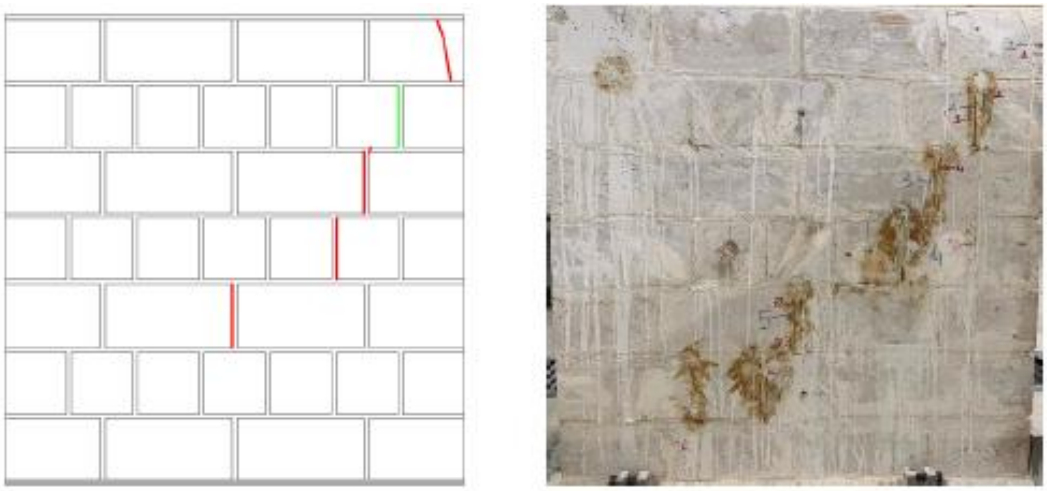
b)



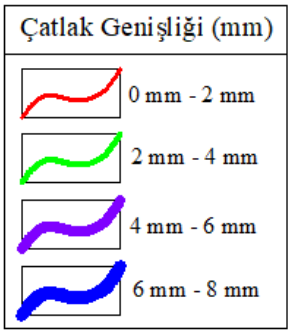
Şekil 5.7 G2-1 duvarına ait çatlak oluşumu (enjeksiyon uygulaması sonrası) a) Ön yüzey b) Arka yüzey



a)

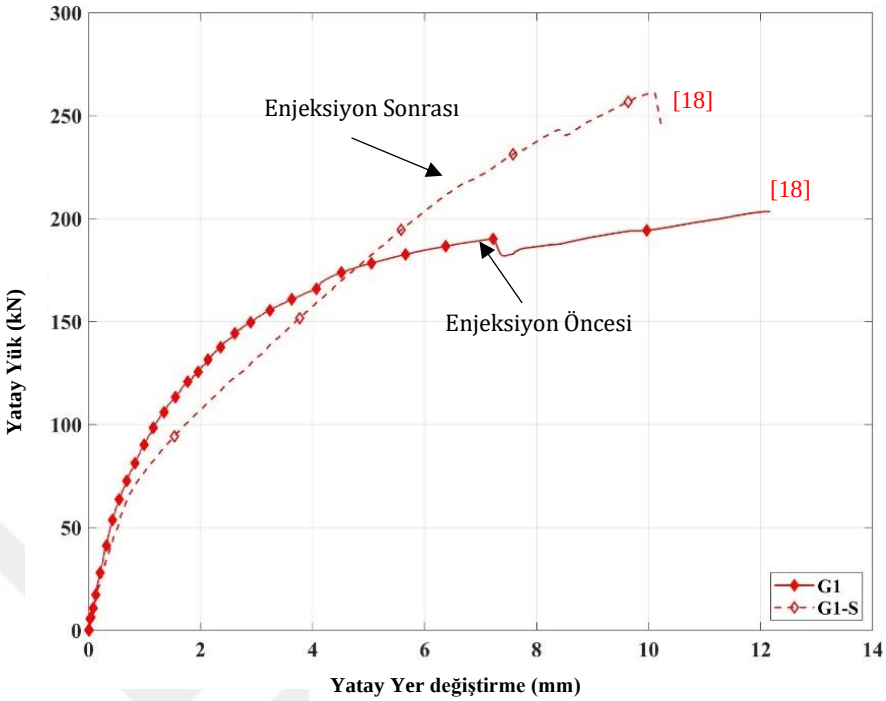


b)

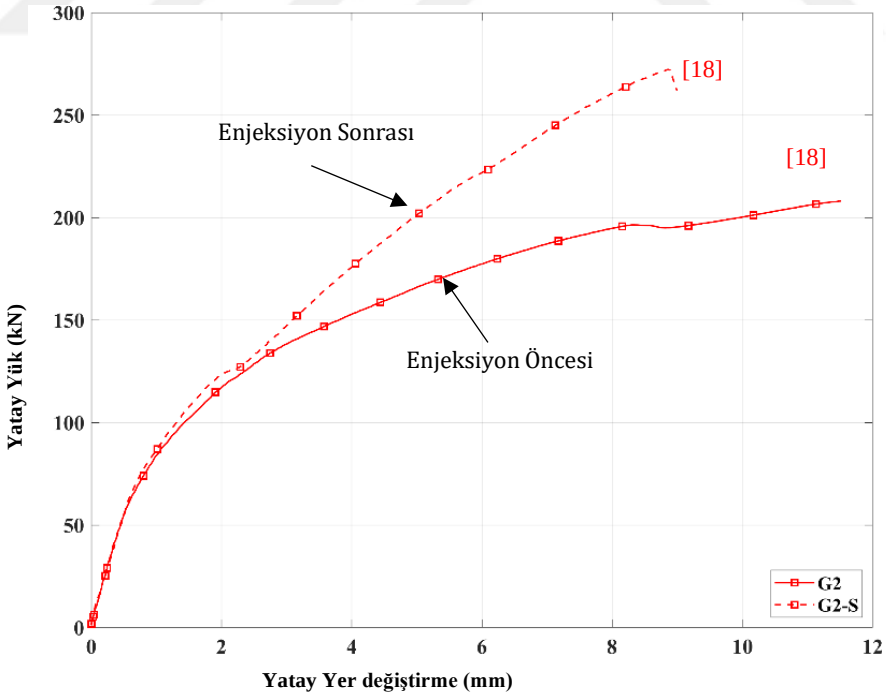


Şekil 5.8 G2-2 duvarına ait çatlak oluşumu (enjeksiyon uygulaması sonrası) a) Ön yüzey b) Arka yüzey

G1 duvarının güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş durumuna ait yatay yük-yatay yer değiştirme eğrisi Şekil 5.9'da, G2 duvarının ise Şekil 5.10'da verilmiştir.



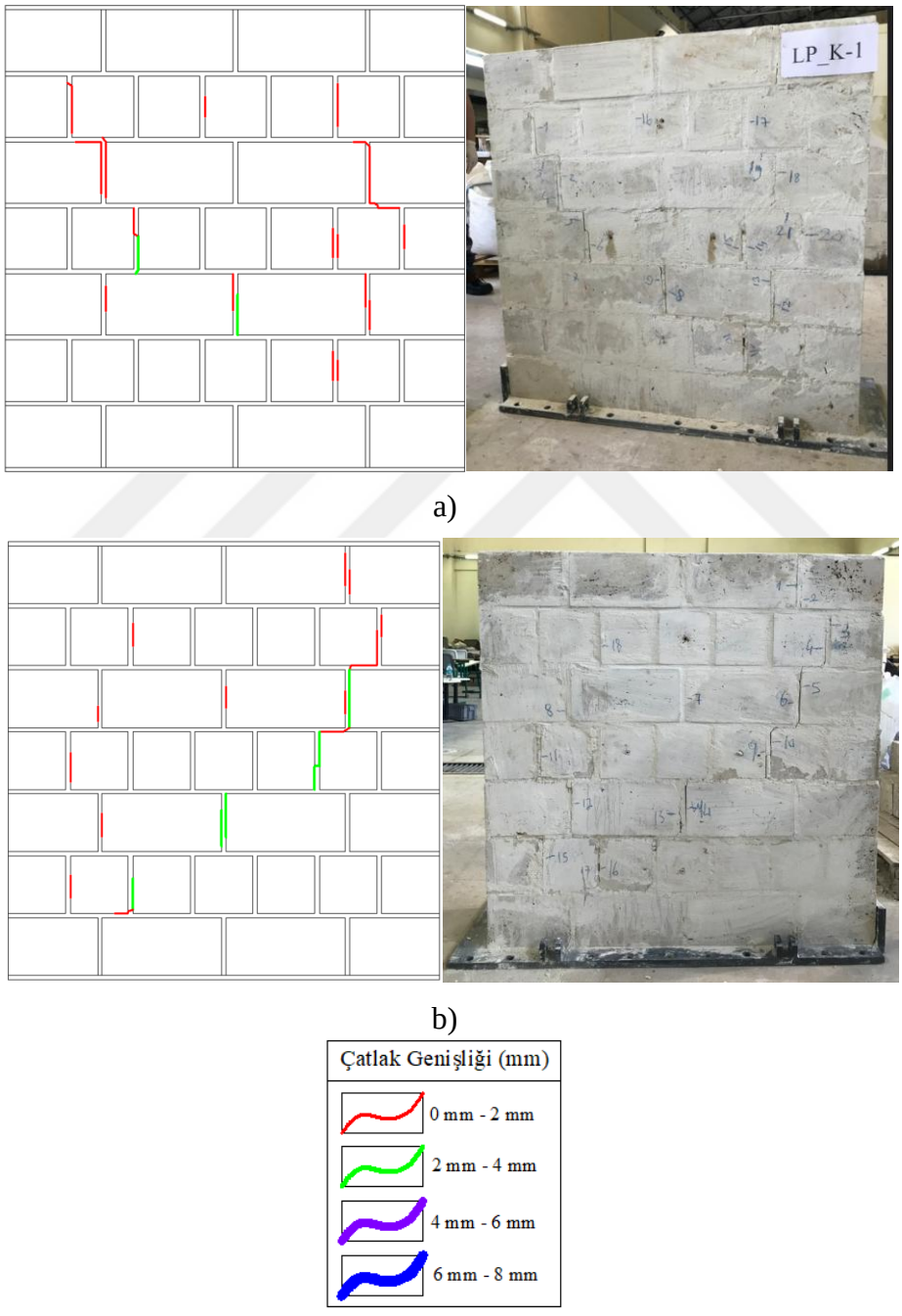
Şekil 5.9 Enjeksiyon öncesi ve sonrası yatay yük-yer değiştirme eğrisi (G1 & G1-S)



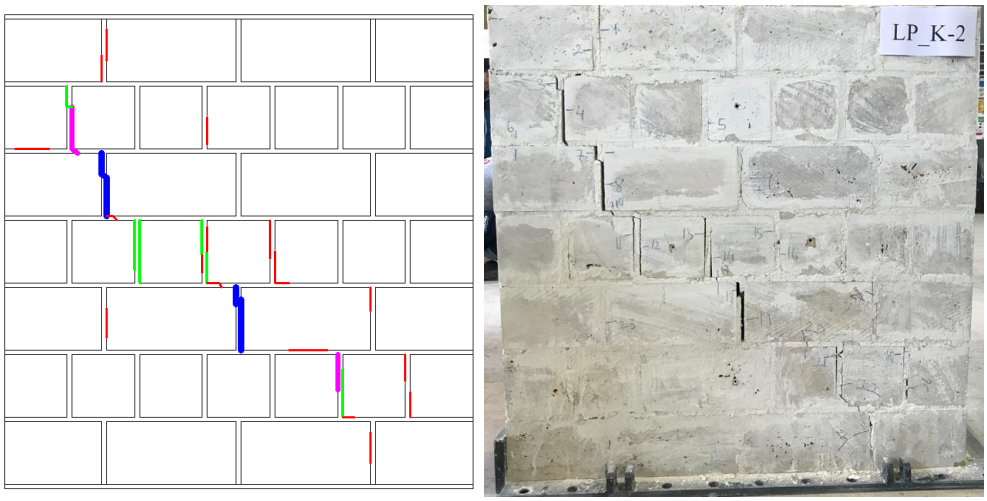
Şekil 5.10 Enjeksiyon öncesi ve sonrası yatay yük-yer değiştirme eğrisi (G2 & G2-S)

5.2 Karbon Lif Takviyeli Polimer ile Güçlendirme

G1 ve G2 duvarlarına uygulanan prosedüre benzer şekilde, LP_K ve LP_T duvarları da ön hasara tabi tutulmuştur. Daha sonra, CFRP ile güçlendirilmiş hasarlı duvarlar (LP_K-S, LP_T-S) yeniden test edilmiştir. Güçlendirilmemiş LP_K ve LP_T duvarlarında elde edilen çatlak desenleri sırasıyla Şekil 5.11-5.14'te gösterilmiştir.



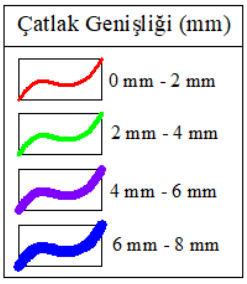
Şekil 5.11 LP_K-1 duvarına ait çatlak oluşumu (LP uygulaması öncesi) a) Ön yüzey b) Arka yüzey



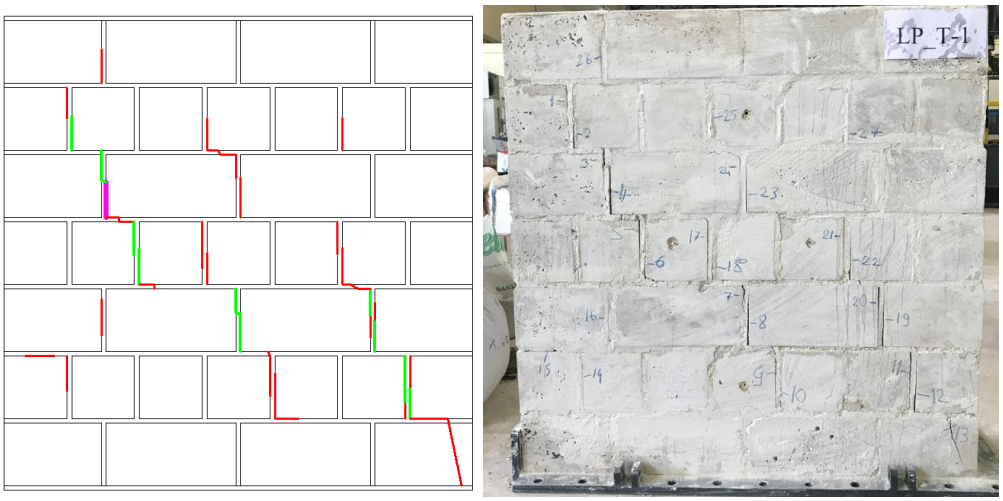
a)



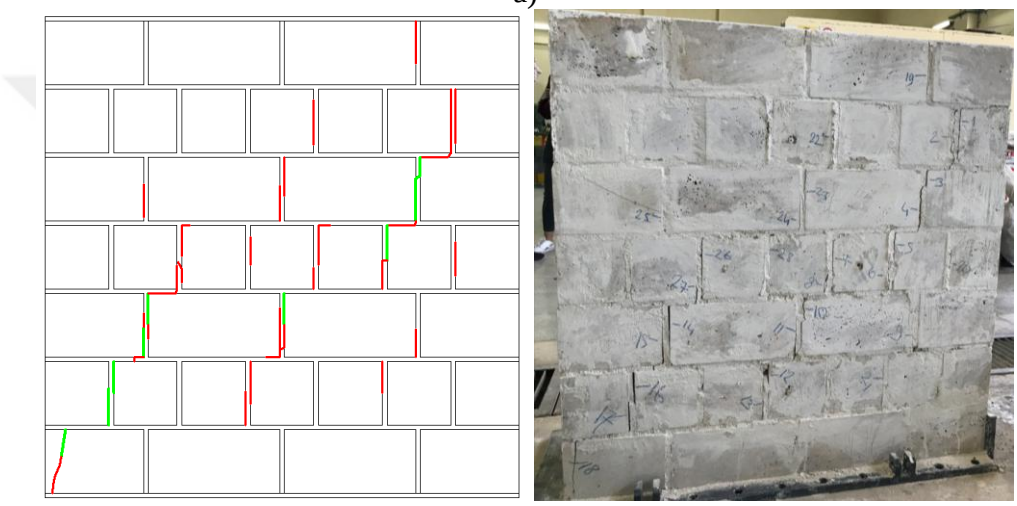
b)



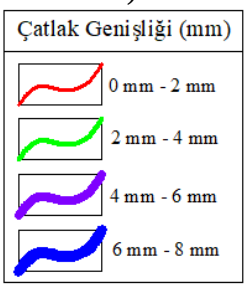
Şekil 5.12 LP_K-2 duvarına ait çatlak oluşumu (LP uygulaması öncesi) a) Ön yüzey b) Arka yüzey



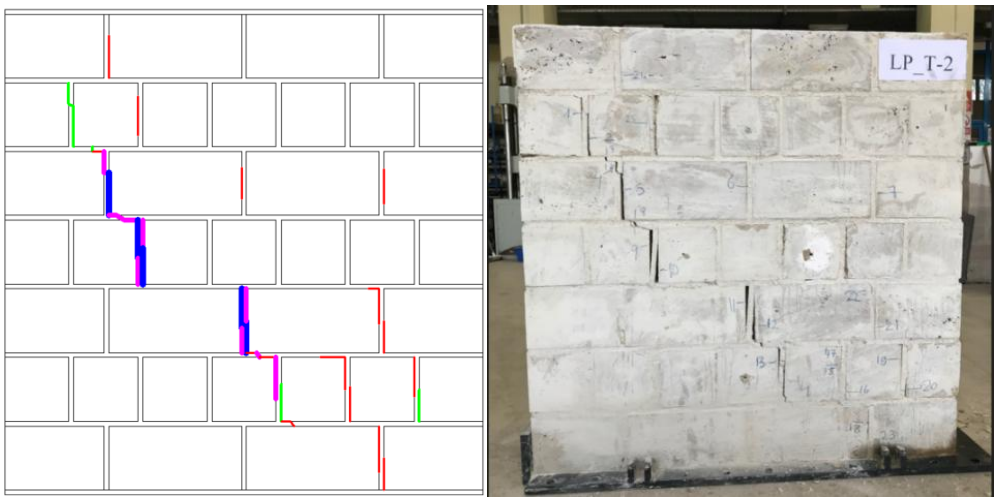
a)



b)



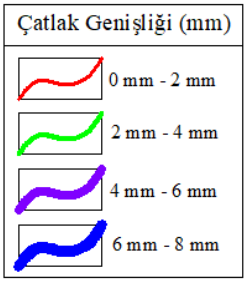
Şekil 5.13 LP_T-1 duvarına ait çatlak oluşumu (LP uygulaması öncesi) a) Ön yüzey b) Arka yüzey



a)



b)



Şekil 5.14 LP_T-2 duvarına ait çatlak oluşumu (LP uygulaması öncesi) a) Ön yüzey b) Arka yüzey

Duvarlar, farklı sargı tipleri ile güçlendirildikten sonra tekrar düşey ve artımsal yatay yüke maruz bırakılmıştır. Karbon lif takviyeli polimerler ile güçlendirilen LP_K-S ve LP_T-S duvarlarında yükleme sonrası gözlenen çatlaklar Şekil 5.15-5.18'de verilmiştir. Şekil 5.15-5.18'de görülebileceği gibi, diyagonal çatlaklar gözlemlenmiştir. Duvarların çatlak yerleşimi incelendiğinde, bu duvarlarda yeni çatlak oluşmadığı görülmüştür. Ancak, duvarların topuk

bölgelerinde aşırı ezilme gözlemlenmiştir (Şekil 5.19). Tüm duvarlar için, kesme kuvveti kapasitesi artmıştır.



a) b)

Şekil 5.15 LP ile güçlendirilmiş LP_K-1 duvarının yükleme sonrası fotoğrafları
a) Ön yüzey b) Arka yüzey



a) b)

Şekil 5.16 LP ile güçlendirilmiş LP_K-2 duvarının yükleme sonrası fotoğrafları
a) Ön yüzey b) Arka yüzey



a) b)

Şekil 5.17 LP ile güçlendirilmiş LP_T-1 duvarının yükleme sonrası fotoğrafları a) Ön yüzey b) Arka yüzey

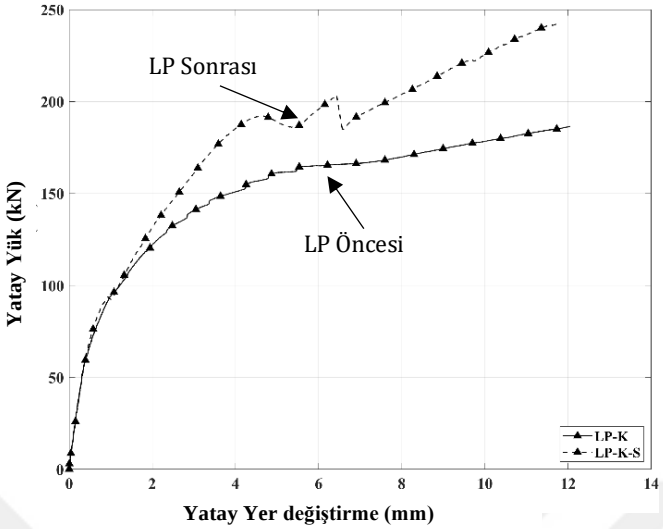


Şekil 5.18 LP ile güçlendirilmiş LP_T-2 duvarının yükleme sonrası fotoğrafları a) Ön yüzey b) Arka yüzey

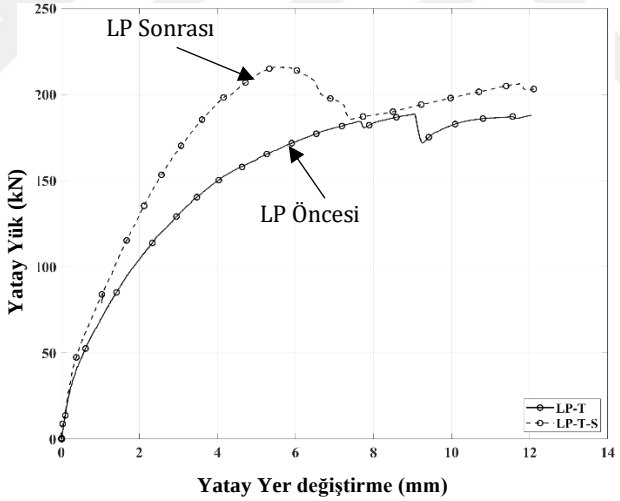


Şekil 5.19 LP ile güçlendirilmiş duvarlarda topuk bölgesinde gözlemlenen göçme durumları

LP_K duvarının güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş durumuna ait yatay yük-yatay yer değiştirme eğrisi Şekil 5.20'de, LP_T duvarının ise Şekil 5.21'de verilmiştir.



Şekil 5.20 LP uygulaması öncesi ve sonrası yatay yük-yer değiştirme eğrisi (LP_K & LP_K-S)



Şekil 5.21 LP uygulaması öncesi ve sonrası yatay yük-yer değiştirme eğrisi (LP_T & LP_T-S)

6
SAYISAL MODELLEME

Bu bölümde, yığma duvarların sabit eksenel yük ve kademeli artan yatay yükler etkisindeki düzlem içi davranışlarını belirlemek üzere doğrusal olmayan üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde, kırılma kriteri olarak Drucker-Prager malzeme modeli benimsenmiş olup ve anılan kriterin ihtiyaç duyduğu malzeme parametreleri Bölüm 4'te anlatıldığı üzere deneysel olarak belirlenmiştir.

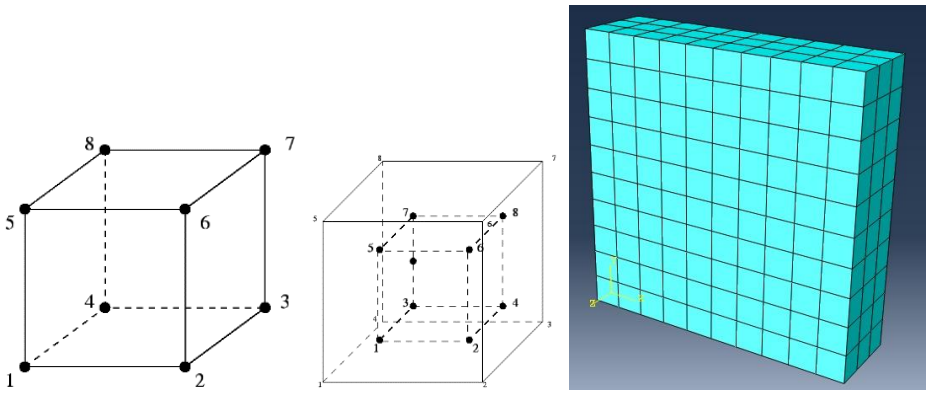
Literatürde, karmaşık bir yapıya sahip olan yığma duvarların bünyesel davranışını kapsamlı bir şekilde anlamak üzere birçok deneysel ve analitik çalışmalar göze çarpmaktadır [2], [3], [73], [74], [75], [76], [77], [78].

Yığma duvarlar için doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi için önerilen teorik modeller genellikle kolayca ve güvenilir bir şekilde ölçülmesi zor olan birçok malzeme parametresinin bilinmesini gerektirmektedir. Anılan çalışmalarda sayısal modelleme tekniği olarak çoğunlukla mikro ve makro modelleme tekniğinin kullanılmış olduğu görülmektedir. Mikro modellemede, yığma birimleri, harç ve birim-harç arayüz davranışı dikkate alınmaktadır. Teknik literatürde, yapılan çalışmalar mikro modellerin küçük yapıları modellemek için daha uygun olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca birçok sayısal çalışma, harç-taş arasındaki etkileşimin önemli olduğunu göstermiştir. Ancak boyut olarak büyük ve taşıyıcı eleman sayısının çok olduğu yapılarda mikro model ile yapılan analizlerin süreleri çok uzun olmakta, yazılımların ve bilgisayarların kapasiteleri yetersiz kalabilmektedir. Bu sebeple tarihi yığma yapılar ve/veya büyük boyutlu yığma yapılar için makro analiz yöntemi ile çalışmalar yapmak daha efektif olabilmektedir [3], [32], [77], [79], [80]. Bu duruma bağlı olarak bu çalışma kapsamında makro modelleme yöntemi tercih edilmiş olup ilgili modelleme yönteminde kullanılacak analiz parametreleri deneysel çalışmalardan elde edilmiştir.

6.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), farklı mühendislik problemleri için kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm aramakta olan sayısal yöntemlerden biridir. Mühendislik alanında karmaşık problemlerin çözümü için oldukça sık kullanılmış olan ve esası enerji prensiplerine dayanan yöntem, özellikle son kırk yılda bilgisayarların hızlı gelişmesine paralel olarak oldukça büyük bir hızla gelişmiş ve popüler bir hale gelmiştir. İlk etkin kullanımı 1950'li yıllarda inşaat mühendisliği alanında olan yöntemin uçak mühendisliği, nükleer mühendislik, elektromanyetik gibi farklı mühendislik alanlarında, katı cisim mekaniği, akışkanlar mekaniği, gaz dinamiği, ısı transferi, titreşim problemleri, elektrik akımları, zemin problemleri gibi çeşitli alanlarda uygulamaları bulunmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde temel mantık, basit bloklardan oluşan karmaşık bir objenin mümkün mertebe küçük ve kolay ifade edilebilir birimlere ayrılması şeklinde tanımlanabilir [81]

Doğrusal olmayan sonlu elemanlar yönteminin uygulanabildiği ANSYS, LUSAS, LS-DYNA, ABAQUS vb. yazımlar mevcut olup bu çalışma kapsamında yapılan sayısal analizler için ABAQUS-2021 [82] yazılımı kullanılmıştır. Modelleme ve analiz prosedürlerinde SI birimleri (kN, m) kullanılmıştır. Üç boyutlu doğrusal olmayan analizlerde 8 noktalı sonlu eleman modeli (C3D8) seçilmiştir. Bu eleman modeline ait şekil ve integrasyon noktaları ile oluşturulan katı model Şekil 6.1'de verilmiştir.

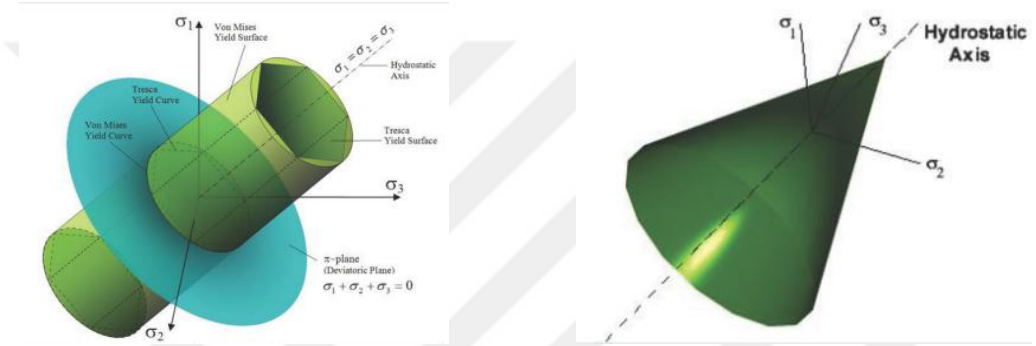


Şekil 6.1 C3D8 eleman modeli, integrasyon noktaları ve katı model.

6.2 Bünyesel Modelleme

Analizlerde dikkate alınacak uygun bünye modeli ve bünye modeline ait kırılma kriteri belirlenmelidir. Genelde tüm kırılma hipotezleri üç boyutlu katı

bir malzeme için üç asal gerilmeye bağlı (σ1, σ2 ve σ3) kırılma yüzeyleri ile tarif edilmektedir. Bilindiği üzere çok sayıda kırılma hipotezi bulunmaktadır. Ancak bu hipotezlerden bir kısmı malzemenin üzerindeki basınca duyarlı iken bir kısmı değildir. Bir başka deyişle, beton ve yığma gibi malzemelerde dayanım çevresel basınç ile artmaktadır ve kırılma hipotezinin de bu gerçeği dikkate alabilmesi gereklidir. Örneğin, von-Mises ve Tresca kırılma yüzeylerinde dayanım çevresel basınç ile artmamaktadır (Şekil 6.2a). Buna karşılık, Drucker-Prager hipotezinde ise bu durum dikkate alınmaktadır (Şekil 6.2b). Ayrıca taş gibi gevrek elemanların modellenmesinde, Mohr – Coulomb kırılma hipotezi de kullanılabilir [78], [80], [83], [84], [85], [86].



a) von Mises – Tresca kırılma yüzeyi b) Drucker-Prager kırılma yüzeyi.

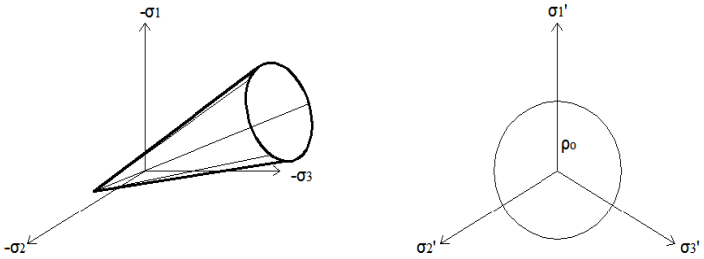
Şekil 6.2 Kırılma Yüzeyleri [83]

Çok eksenli gerilme hali, yığma duvarlar, betonarme perdeler, sargılı kolonlar veya elastik davranışın ötesindeki elemanlar gibi yapıların bünye davranışını tanımlar. Mohr-Coulomb (MC) ve Drucker-Prager (DP) gibi temel elasto-plastik yapısal modeller, beton, zemin ve kaya gibi yapısal modelleme malzemelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [78], [83]. DP akma/kopma kriteri, beton, metal ve taş türü malzemeler için kullanılan von-Mises kriterinin en pratik matematiksel şekli olup, hem hidrostatik basıncı hem de en yüksek dayanımdaki deviator gerilmesi etkilerini hesaba katmaktadır (Şekil 6.3) [74]. DP akma kriterlerine göre akma yüzeyi şu şekilde ifade edilebilir [87]:

$$f(I_1, J_2) = \alpha . I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \qquad (1)$$

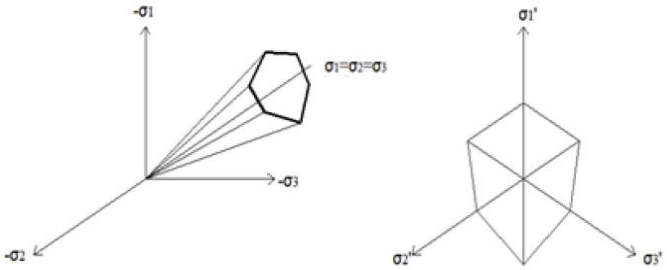
Burada α ve k değerleri malzeme sabitleridir ve bu değerler MC kriterindeki içsel sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon (c) değerlerine bağlıdır. İçsel sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon (c) değerleri şu şekilde ifade edilebilir:

$$\alpha = \frac{2\sin\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)}, \qquad k = \frac{6c\cos\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)} \tag{2}$$



Şekil 6.3 DP kriteri:(a) asal gerilme uzayında akma yüzeyi;(b) π düzlemi [74]

MC kriteri, hidrostatik basıncın etkisini hesaba katar. MC akma yüzeyi, deviatorik gerilme düzleminde altıgen bir koni şeklindedir. Şekil 6.4, asal gerilme alanı ve π düzlemindeki akma yüzeyini göstermektedir [74]:



Şekil 6.4 MC kriteri:(a) asal gerilme alanındaki akma yüzeyi;(b) π düzlemi [74]

MC kriteri, uygulanan normal dayanıma karşı malzemenin kayma dayanımından elde edilen doğrusal zarf eğrisini gösterir [74]. Bu ilişki şu şekilde ifade edilmektedir [87]:

$$\tau = c - \sigma\tan(\phi) \tag{3}$$

Burada τ kayma mukavemetidir, σ basınçta negatif olan normal gerilime karşılık gelir, c kohezyondur ve ϕ içsel sürtünme açısıdır. Mohr çemberi:

$$\tau = s\cos\phi \qquad \sigma = \sigma_m + s\sin\phi \tag{4}$$

τ ve σ yerine koyarak, her iki tarafı cosϕ ile çarparak ve azaltarak Mohr-Coulomb modeli şu şekilde yazılabilir:

$$s = \sigma_m \sin\phi - c\cos\phi = 0 \quad (5)$$

burada τ, maksimum ana gerilme, σ_1 ve minimum ana gerilme, σ_3 arasındaki farkın yarısıdır (ve bu nedenle, maksimum kayma gerilimidir),

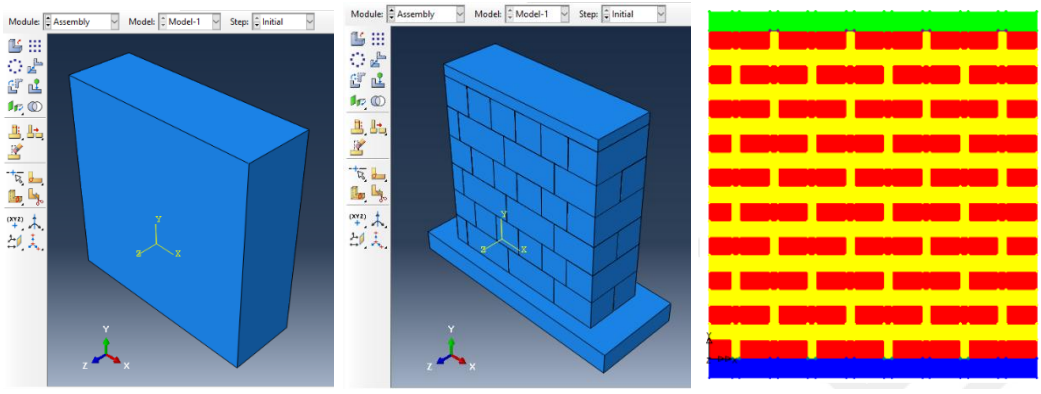
$$s = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (6)$$

ve σ_m, maksimum ve minimum ana gerilimlerin ortalamasıdır [82]:

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (7)$$

6.3 Modelleme Teknikleri

Yığma yapıların sayısal analizinde kullanılan farklı sayısal modelleme teknikleri mevcuttur. Bu teknikler, makro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve mikro modelleme teknikleridir. Makro modelleme tekniğinde taş birim ve harç birim bir kompozit eleman gibi düşünülür ve tek bir homojen eleman olarak modellenir. Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniğinde taş birimler modellenir, harç birim ise sıfır kalınlıklı bir arayüz eleman şeklinde dikkate alınır. Mikro modelleme tekniğinde ise taş ve harç birimler ayrı ayrı birbirinden bağımsız modellenir, birbirleri ile etkileşimini ifade etmek üzere arayüz elemanlar tanımlanır. Farklı modelleme teknikleri Şekil 6.5'te gösterilmiştir.

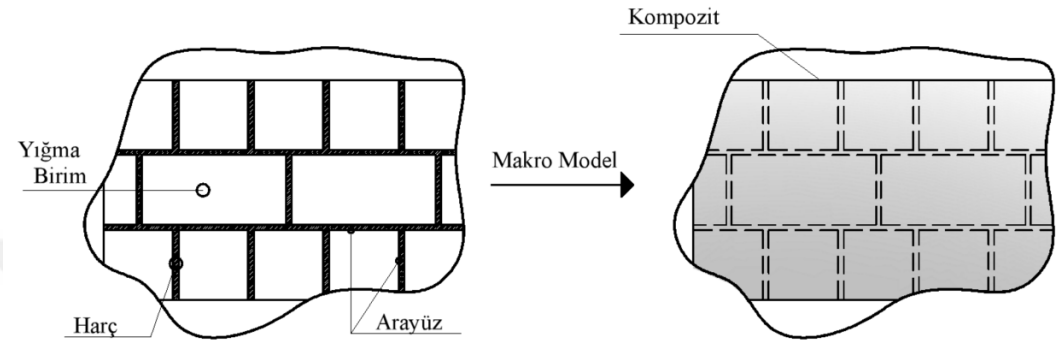


a) Makro b) Basitleştirilmiş Mikro c) Mikro

Şekil 6.5 Farklı modelleme teknikleri.

Bu çalışmada, deneysel mekanik davranış ve yatay yük- yatay yer değiştirme ilişkilerini elde edebilmek için yığma taş duvarların doğrusal olmayan analizlerinde makro modelleme tekniği kullanılmıştır. Makro modelleme tekniğinde (Şekil 6.6),

uygun bir birleştirme tekniği ile taş-harç mekanik parametreleri birleştirilerek yapı elemanları homojen olarak modellenir (tuğla/taş ve harç birlikte modellenir) ve öncelikle bu elemanların gerilme-şekil değiştirme ilişkileri ve kırılma yüzeyleri tanımlanır. Makro modeller, tüm yapının davranışı araştırıldığında daha kullanışlıdır. Bu çalışmada, yığma taş duvarların 3 boyutlu doğrusal olmayan analizi için makro modelleme tekniği benimsenmiştir.



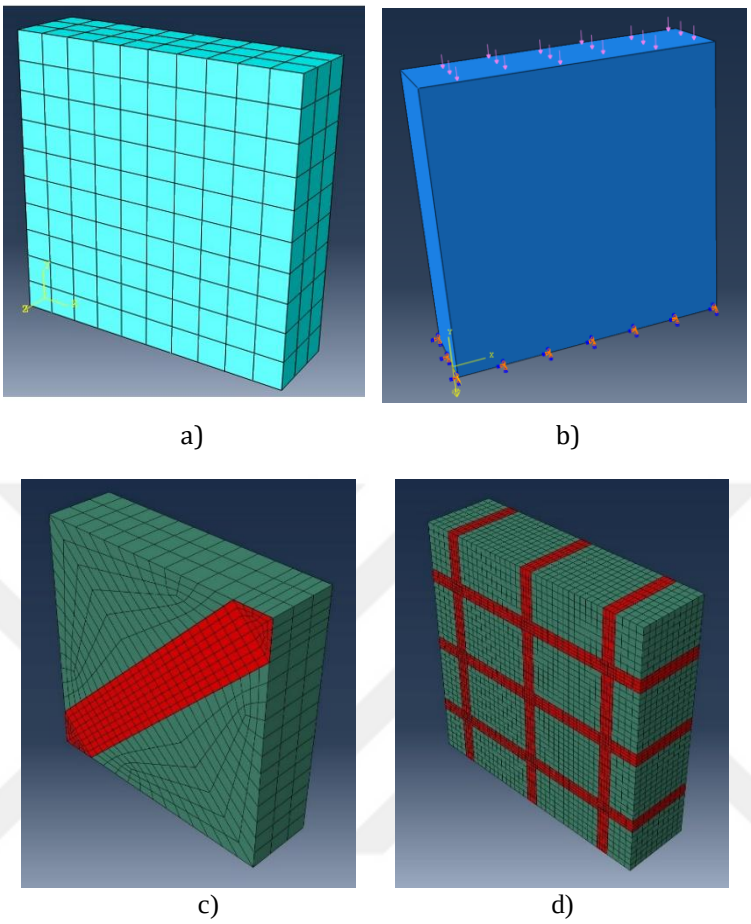
Şekil 6.6 Makro modelleme tekniği

6.4 Sayısal Analizler

Bu çalışmada, yığma taş duvarlar için üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Taş ve harç gibi örgü bileşenlerinin izotropik olduğu varsayılmıştır. ABAQUS-2021 yazılımında [82] C3D20, C3D20R, C3D8, C3D8R, C3D8I gibi farklı katı sonlu eleman tipleri mevcuttur. Sayısal analizlerde, tuğla, taş gibi elemanlar için literatürde sıkça kullanıldığı tespit edilen sekiz düğümlü C3D8 [80], [85], [86] kullanılmıştır. Anılan sonlu eleman tipinin, bu tez çalışmasında bünye modeli olarak benimsenen DP modeli ile uygun sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Güçlendirmede kullanılacak olan CFRP malzemeyi simüle etmek için sadece çekmeye çalışan LAMINA sonlu eleman tipi kullanılmıştır. CFRP malzemeye ait analizlerde kullanılan mekanik parametreler Tablo 6.1'de verilmiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen duvar deneylerinde, yığma duvarlar ile CFRP malzeme arasında herhangi bir ayrışma ve CFRP elamanda kopma gözlemlenmemiştir. Bu sebeple yığma duvar ile CFRP şeritleri arasındaki etkileşim tam bağlı, sürtünmesiz (hard-contact) kabul edilmiştir [82]. Sonlu eleman (SE) tipi, sonlu eleman ağı, mesnet ve yükleme koşulları Şekil 6.7'de gösterilmiştir.

Plastik şekil değiştirme ve akma yüzeyinin ilişkisi, tek eksenli basınç gerilmesi, tek eksenli çekme gerilmesi veya kesme (kohezyon) gerilmesi olarak seçilebilen

eşdeğer gerilme $\bar{\sigma}$, ile tanımlanabilmektedir [82]. Bu çalışmada, pekleşme davranış tipi basınç dayanımı (σ_c) olarak seçilmiştir.



a) b)

c) d)

Şekil 6.7 Duvarlara ait sonlu elemanlar modeli
a)Sonlu eleman ağları ve C3D8 elemanı b)Sınır-Yük koşulları
c)LP_K-S sonlu elemanlar modeli d)LP_T-S sonlu elemanlar modeli

Makro modelleme tekniğinde, yığma duvarlar için malzeme özelliklerini doğru bir şekilde karakterize etmek çok önemlidir. Bu makalede, yığma taş duvar için en kritik parametreler olan elastisite modülü (E_m), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve Poisson Oranı Bölüm 4'te detayları açıklandığı üzere deneysel olarak belirlenmiştir. Ayrıca yığma duvarların basınç dayanımı deneysel olarak elde edilemediğinden, sayısal analiz için gerekli olan basınç dayanımı parametresi literatürde kabul görmüş ampirik ilişkiler kullanılarak belirlenmiştir [88], [89], [90], [91].

Yığma duvarın göçme mekanizması ve yatay yük-yer değiştirme davranışı, birim ve harç arasındaki elastisite modülü farkından büyük ölçüde etkilenir [92], [93]. Bu çalışmada, taş duvar örgüsünün elastisite modülü deneysel olarak belirlenmiştir.

(Şekil 4.9). Sayısal modellemede, duvar örgüsünün basınç dayanımını belirlemek için aşağıdaki denklem (Denklem 8) kullanılmıştır (σ_c) [88], [89], [90], [91].

$$\sigma_c \approx E_m/(550-750) \tag{8}$$

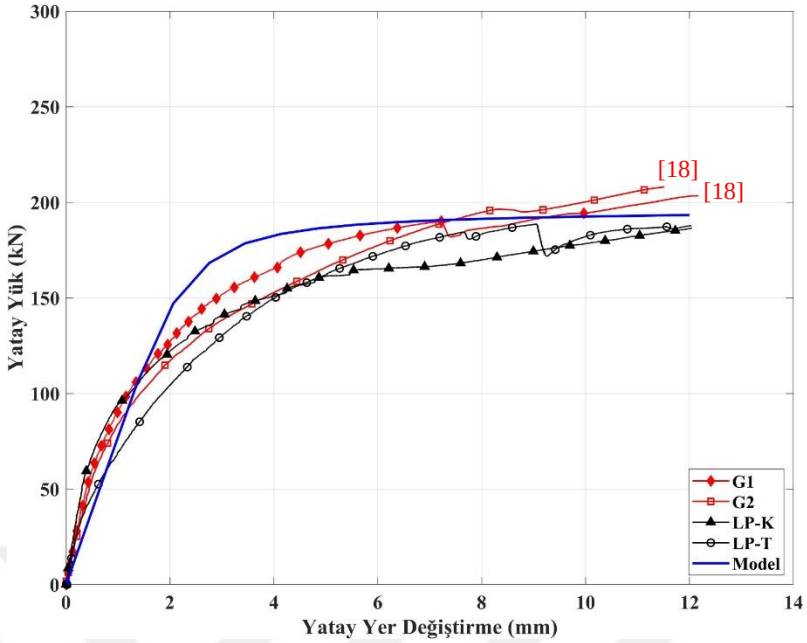
Bünye modelinde kullanılan diğer malzeme parametresi, üç eksenli çekme durumundaki akış gerilmesinin üç eksenli basınçta durumdaki akış gerilmesine oranı olan *K*'dır. 0,778≤K≤1,00. Bu çalışmada, taş duvarların mekanik parametreleri Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1 Sonlu Elemanlar analizinde kullanılan malzeme parametreleri

Yığma Taş Duvar			Karbon Lif Takviyeli Polimer	
DP Model	Güçlendirme Öncesi	Enjeksiyon Sonrası		
E_m (MPa)	1900	2250	E (MPa)	230000
ϕ (°)	45	45	f_t (MPa)	4900
Poisson oranı	0.28	0.28	Kopmada uzama (%)	2.1
σ_c (MPa)	3.25	4.00	Birim ağırlık (g/m^2)	300
K	0.85	0.85		

6.4.1 Güçlendirme Öncesi

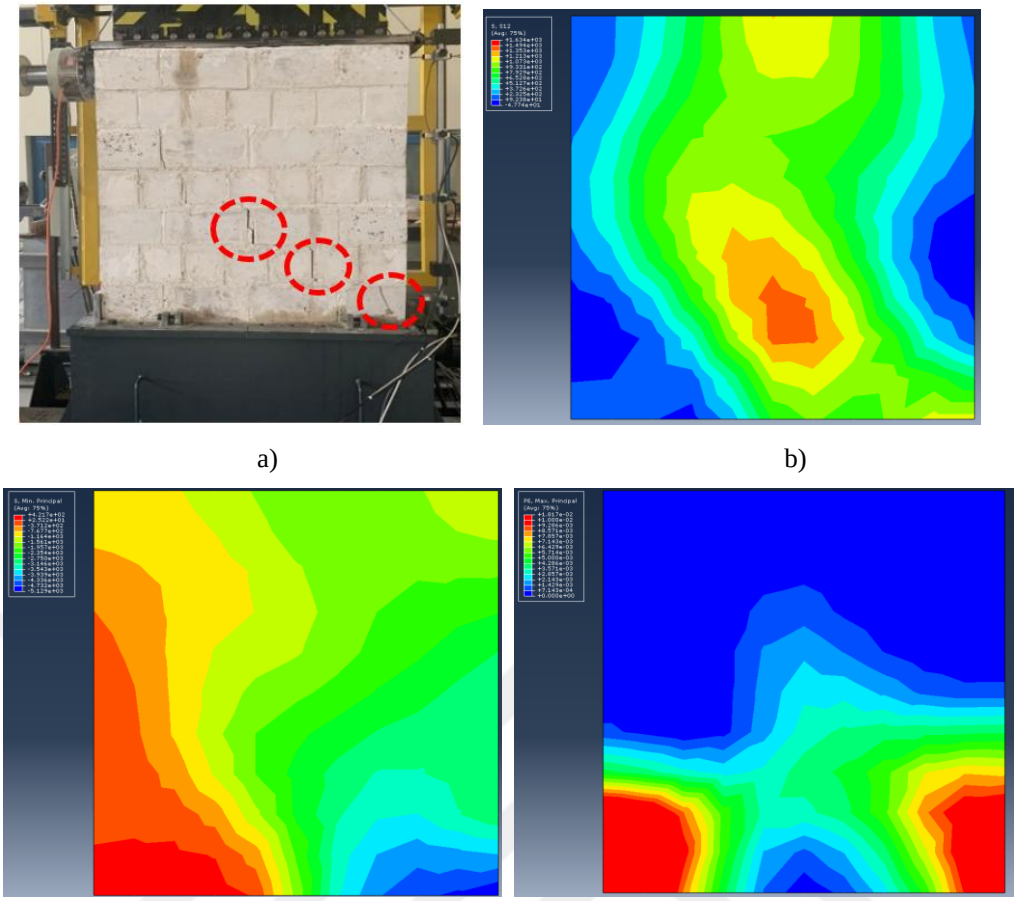
Doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizinden elde edilen yatay yük- yer değiştirme eğrisi, güçlendirme öncesi durum için deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 6.8) Sayısal sonuçların güçlendirme öncesi testlerden elde edilen yatay yük-yer değiştirme eğrisiyle uyumlu olduğu görülmektedir. Yatay yük-yer değiştirme eğrilerinin başlangıç eğimleri ve güçlendirilmemiş duvarların yatay yük-yer değiştirme seviyeleri sayısal sonuçlarla oldukça uyumludur. Ayrıca, nihai yer değiştirme ve yatay yük değerleri test sonuçlarıyla oldukça uyumludur (Şekil 6.8).



Şekil 6.8 Yığma taş duvarın güçlendirme öncesi durumuna ait deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Deneyler sırasında, çatlaklar çoğunlukla harç derzleri boyunca merdiven basamağı şeklinde meydana gelmiştir ve duvarın topuk bölgesinde önemli bir ezilme gözlenmiştir (Şekil 6.9a). Taş duvarda meydana gelen kayma gerilmesi dağılımı Şekil 6.9b'de gösterilmiştir. Deney ve sayısal sonuçlar kayma gerilmesi açısından karşılaştırıldığında, sayısal sonuçlardaki kayma gerilmelerinin yoğun olduğu bölgelerin, deney duvarında çatlak genişliklerinin daha yüksek değerlere sahip olduğu bölgelere karşılık geldiği gözlemlenmiştir.

Deneyler sonucunda oluşan çatlak dağılımının sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılması, Şekil 6.9c ve Şekil 6.9d'deki minimum asal gerilmelerin ve maksimum plastik asal birim şekil değiştirmelerin dağılımı yoluyla değerlendirilmiştir. Birim şekil değiştirme ve gerilme değerlerinin duvarın topuk bölgelerinde yoğunlaştığı görülmektedir.



a) b)

c) d)

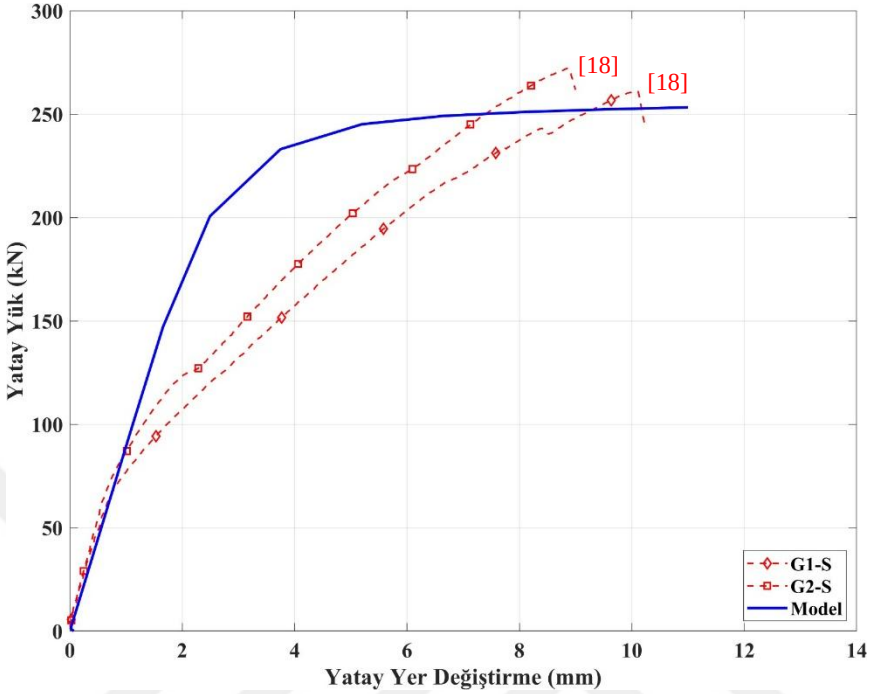
Şekil 6.9 Güçlendirilmemiş duvarlara ait deneysel ve sayısal analiz sonuçları
a) Deney duvarında çatlak dağılımı b) Kayma gerilmesi dağılımı
c) Minimum asal gerilme, d) Maksimum asal şekil değiştirme

6.4.2 Güçlendirme Sonrası

Güçlendirme sonrası deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması iki farklı güçlendirme yöntemi için de yapılmıştır. Enjeksiyon ve LP uygulaması sonrası duvar davranışlarına ait sonuçlar yapılan analizler ile elde edilmiştir. Doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizinden elde edilen yatay yük- yer değiştirme eğrisi, güçlendirme sonrası durumlar için deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca duvarlarda oluşan gerilme dağılımları incelenmiştir.

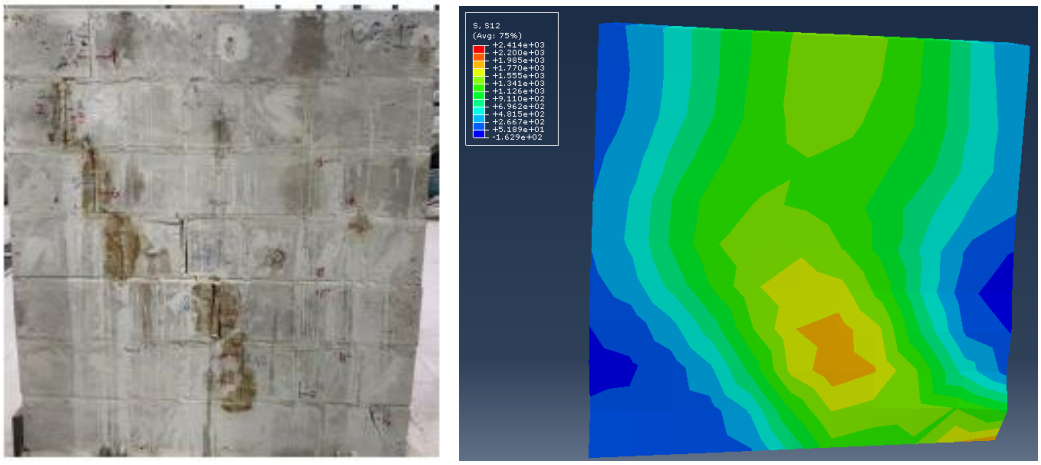
Enjeksiyon ile güçlendirilen G1-S ve G2-S numunelerinin sayısal ve deneysel yatay yük-yer değiştirme tepkilerinin karşılaştırması Şekil 6.10'da verilmiştir. G1-S ve G2-S numuneleri için sayısal sonuçların başlangıç rijitliği, nihai yer değiştirme ve nihai yatay yük açısından deneysel sonuçlarla iyi bir uyumluğu olduğu söylenebilir. Ancak, her iki duvar tipi için de eğrinin başlangıç eğimi sonrası kısmı için

öngörülen değerler ve deneysel sonuçlar arasında uyumsuzluk mevcuttur. Burada, DP modeliyle makro modelleme tekniğinde tanımlanan kademeli olarak gelişen bir hasar olmadığı söylenebilir.



Şekil 6.10 Yığma taş duvarın enjeksiyon uygulaması sonrası durumuna ait deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması

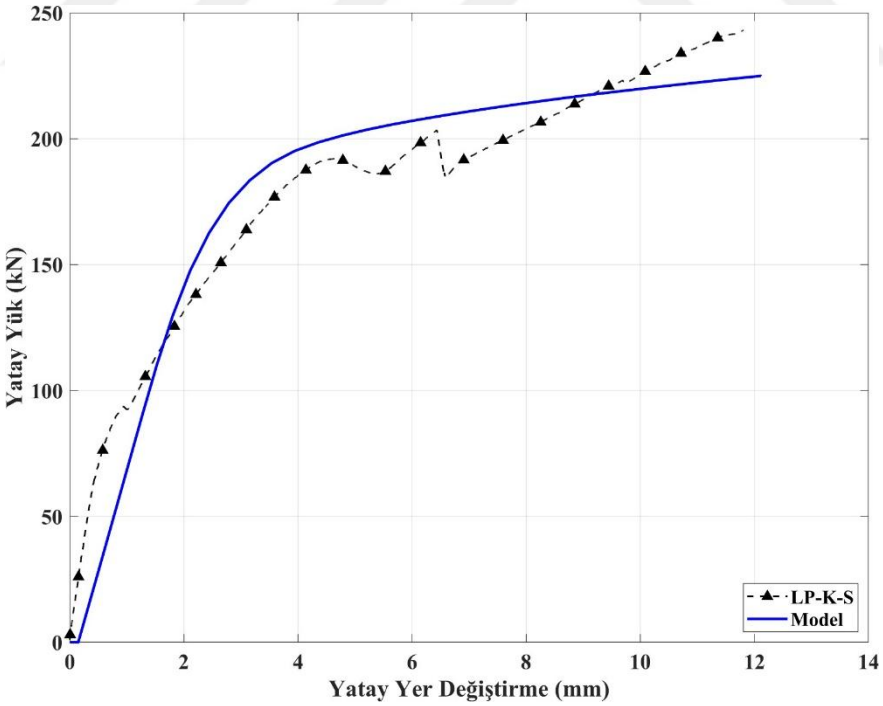
Enjeksiyon ile güçlendirme sonrası, taş duvarda meydana gelen kayma gerilmesi dağılımı güçlendirme öncesi duruma benzer şekilde oluşmuştur. Deneysel ve sayısal sonuçlar kayma gerilmesi açısından karşılaştırıldığında, sayısal sonuçlardaki kayma gerilmelerinin yoğun olduğu bölgelerin, deney duvarında çatlak genişliklerinin daha yüksek değerlere sahip olduğu bölgelere karşılık geldiği gözlemlenmiştir (Şekil 6.11). Deneysel çatlak dağılımının (Şekil 6.11a) ve sayısal sonuçlardan elde edilen kayma gerilmesi dağılımının (Şekil 6.11b) karşılaştırması Şekil 6.11'de sunulmuştur



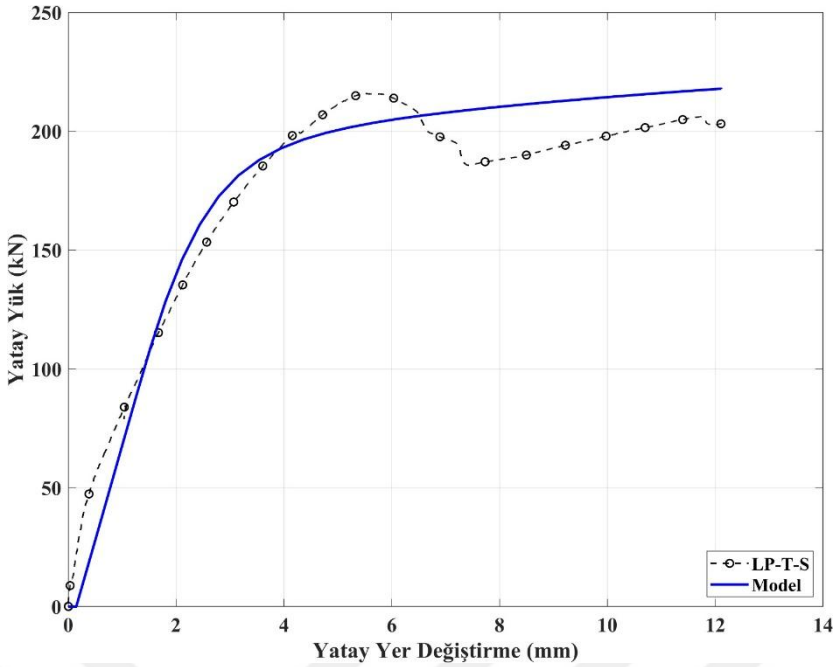
a) b)

Şekil 6.11 Enjeksiyon ile güçlendirilmiş duvarlara ait deneysel ve sayısal analiz sonuçları

Sayısal analizden elde edilen yatay yük-yer değiştirme eğrisi ile deneysel sonuçların karşılaştırması, LP_K-S için Şekil 6.12'de ve LP_T-S için Şekil 6.13'te verilmiştir. Sayısal sonuçlar, deneyden elde edilen yatay yük-yer değiştirme eğrisiyle uyumludur. Deney duvarlarının elastik ötesi davranışı sayısal sonuçlarla uyumludur.

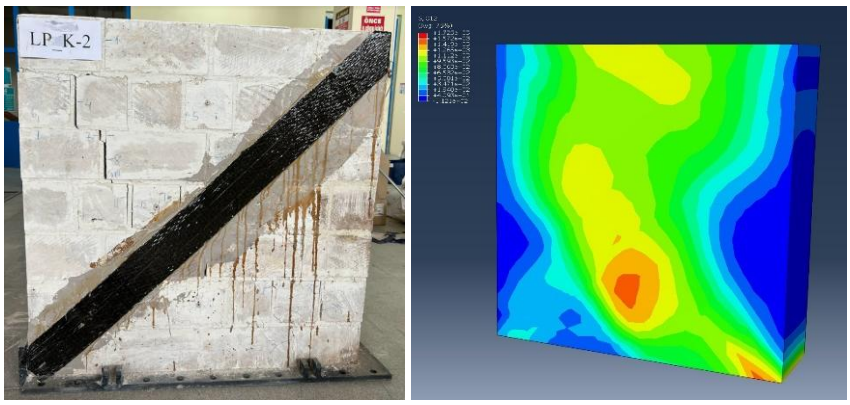


Şekil 6.12 Yığma taş duvarın LP uygulaması sonrası durumuna ait deneysel ve sayısal analiz sonuçların karşılaştırılması (LP_K-S)



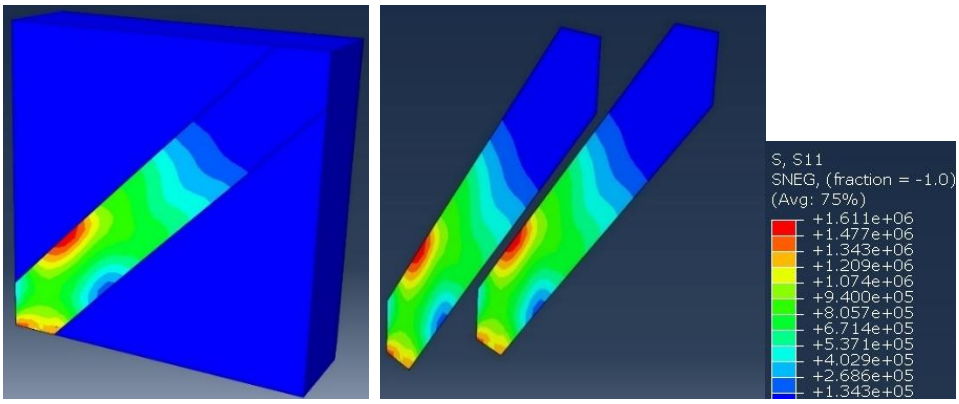
Şekil 6.13 Yığma taş duvarın LP uygulaması sonrası durumuna ait deneysel ve sayısal analiz sonuçların karşılaştırılması (LP_T-S)

LP_K-S duvarı için, deneysel çatlak dağılımının (Şekil 6.14a) ve sayısal sonuçlardan elde edilen kayma gerilmesi dağılımının (Şekil 6.14b) karşılaştırması Şekil 6.14'te sunulmuştur ve ayrıca, karbon lif takviyeli polimer elemanlardaki çekme gerilmesi Şekil 6.15'te verilmiştir. LP uygulamasının duvardaki kayma gerilmesi dağılımını değiştirdiği görülmüştür. Sayısal analiz sonucunda, LP'deki çekme gerilmesinin 1611 MPa'ya ulaştığı sonucu elde edilmiştir. LP'nin çekme dayanımı 4900 MPa ve kopma uzaması %2,1'dir. Ayrıca, deney sırasında karbon lif takviyeli polimerin yığma duvar yüzeyinden ayrılmadığı gözlemlenmiştir. Sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.



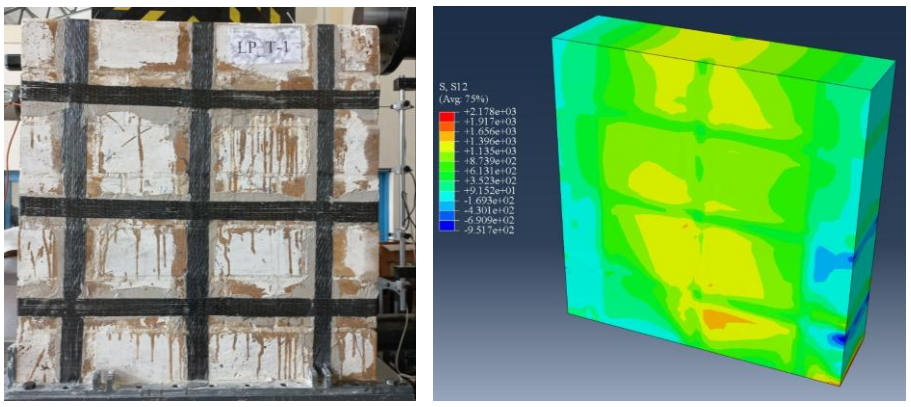
a) b)

Şekil 6.14 LP_K-S duvarına ait deneysel ve sayısal analiz sonuçları



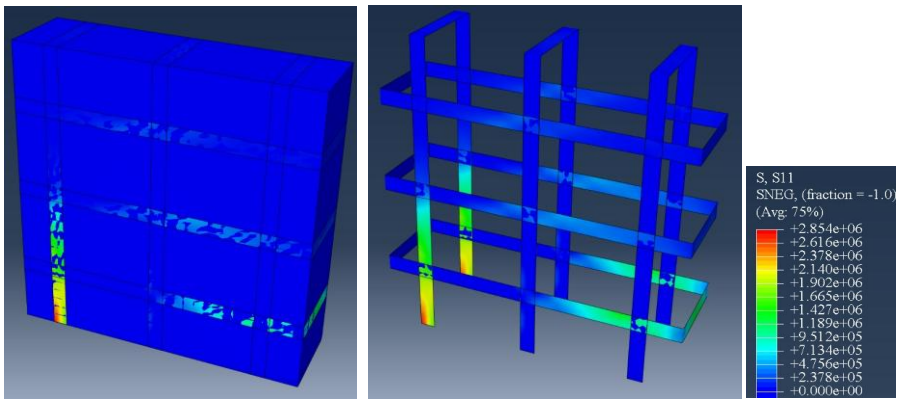
Şekil 6.15 Çapraz Karbon lif takviyeli polimerde oluşan çekme gerilmesi dağılımı

LP_T-S duvarı için, deneysel çatlak dağılımının (Şekil 6.16a) ve sayısal sonuçlardan elde edilen kayma gerilmesi dağılımının (Şekil 6.16b) karşılaştırması Şekil 6.16'da sunulmuştur ve ayrıca, karbon lif takviyeli polimer elemanlardaki çekme gerilmesi Şekil 6.17'de verilmiştir. LP uygulamasının duvardaki kayma gerilmesi dağılımını değiştirdiği görülmüştür. Sayısal analiz sonucunda, LP'deki çekme gerilmesinin 2854 MPa'ya ulaştığı sonucu elde edilmiştir. LP'nin çekme dayanımı 4900 MPa ve kopma uzaması %2,1'dir. Ayrıca, deney sırasında karbon lif takviyeli polimerin yığma duvar yüzeyinden ayrılmadığı gözlemlenmiştir. Sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.



a) b)

Şekil 6.16 LP_T-S duvarına ait deneysel ve sayısal analiz sonuçları



Şekil 6.17 Karbon lif takviyeli polimerde oluşan çekme gerilmesi dağılımı

7
DEĞERLENDİRMELER

Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar bu bölümde özetlenmiştir. Deney duvarlarının güçlendirme öncesi ve sonrası sergilemiş oldukları yapısal davranışlar yatay yük, yatay yer değiştirme ve göreli öteleme oranları açısından değerlendirilmiştir.

Yatay yük ve yatay yer değiştirme değerleri Tablo 7.1'de özetlenmiştir. Güçlendirilmiş numuneler genel olarak karışık göçme mekanizmaları göstermiş olup, esas olarak tüm duvarlar için kesme çatlağı ve topuk kırılması ile karakterize edilmiştir.

Tablo 7.1 Deney sonuçlarına ait özet tablo

Güçlendirme Öncesi Duvarlar	V (kN)	δ (mm)	Nihai Çatlak Durumu	Güçlendirme Sonrası Duvarlar	V_u (kN)	δ_u (mm)	Göçme Mekanizması
G1	203	12.17	DSC, TC	G1-S	250	10.19	DSC, TC
G2	208	11.52	DSC	G2-S	272	8.86	DSC
LP_K	186	12.03	DSC	LP_K-S	242	11.69	DSC, TC
LP_T	188	12.04	DSC, TC	LP_T-S	203	11.90	DSC, TC

δ:Yüklemenin durdurulduğu adımdaki duvar tepe yer değiştirmeleri (POT-1'e karşılık gelen);
V:δ değerine karşılık ölçülen yatay kuvvet, δ_u: Nihai tepe yer değiştirme (POT-1);
V_u: δ_u değerine karşılık ölçülen yatay kuvvet; DSC: Diyagonal kesme çatlağı;
TC: Topuk ezilmesi.

Güçlendirmeden önce, tüm duvarlar ön hasar oluşturmak için düzlem içi yatay ve düşey yükler altında deneye tabi tutulmuştur. Duvar deneyleri boyunca gözlemler yapılmış ve yeterli çatlak genişliğine ulaşıldığında deneyler sonlandırılmıştır. Tablo 7.1'de sunulan, güçlendirmeden önce ve sonra elde edilen deneysel veriler, hasar seviyesi ve yer değiştirme kapasitesi açısından değerlendirilmiştir. Özellikle,

sonuçlar hasar seviyesine göre değerlendirilirken, yığma duvarların göreli öteleme oranları dikkate alınmıştır. Yığma duvarlar için, sismik tasarım kodları farklı deprem performans seviyelerine karşılık gelen göreli öteleme sınırları tanımlamaktadır. Bu bağlamda, Türk Deprem Yönetmeliği-2018 (TDY-2018), ASCE 41-13 ve Eurocode-8'de belirtilen ötelenme sınırları incelenmiştir. Deneysel olarak elde edilen değerler daha sonra bu yönetmeliklerde yığma duvarlar için belirtilen ötelenme sınırları ile karşılaştırılmıştır. Tasarım kodlarının sağladığı ötelenme sınırlarının özeti Tablo 7.2'de sunulmaktadır.

Tablo 7.2 Deney sonuçlarına ait özet tablo

Performans seviyeleri	Donatısız yığma duvarlar için göreli öteleme oranları (%)			
	TDY-2018	Eurocode 8	ASCE 41-13	Ortalama
Hemen Kullanım (IO-HK) / Sınırlı Hasar (DL-SH)	-	-	0.10 (1.01)	0.10 (1.01)
Can Güvenliği (LS-CG) / Kontrollü Hasar (SD-KH)	0.7 (7.04)	0.8 (8.04)	0.75 (7.54)	0.75 (7.54)
Göçmenin Önlenmesi (CP-GÖ) /Göçme Öncesi (NC-GÖ)	-	1.07 (10.75)	1.00 (10.05)	1.035 (10.40)

Parantez içerisindeki değerler göreli öteleme oranına karşılık gelen tepe yer değiştirme (mm) değerleridir. Duvar yüksekliği 1005 mm'dir.

Farklı yönetmeliklerdeki değerlerin ortalamaları alınarak deney duvarları için sınır değerler hesaplanmıştır.

Sınırlı Hasar Performans seviyesi için:

1005mm*0.1%=1.005mm

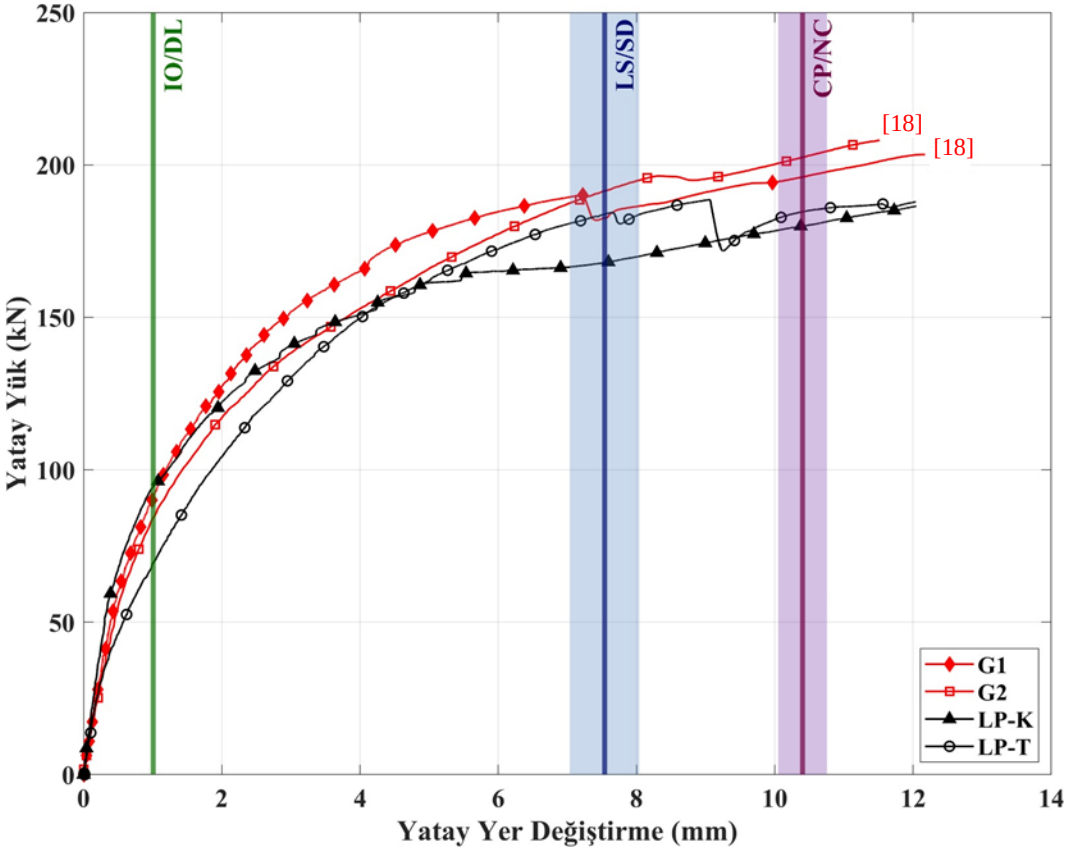
Kontrollü Hasar Performans seviyesi için:

1005mm*0.75%=7.54mm

Göçme Öncesi Performans seviyesi için:

1005mm*1.035%=10.40mm

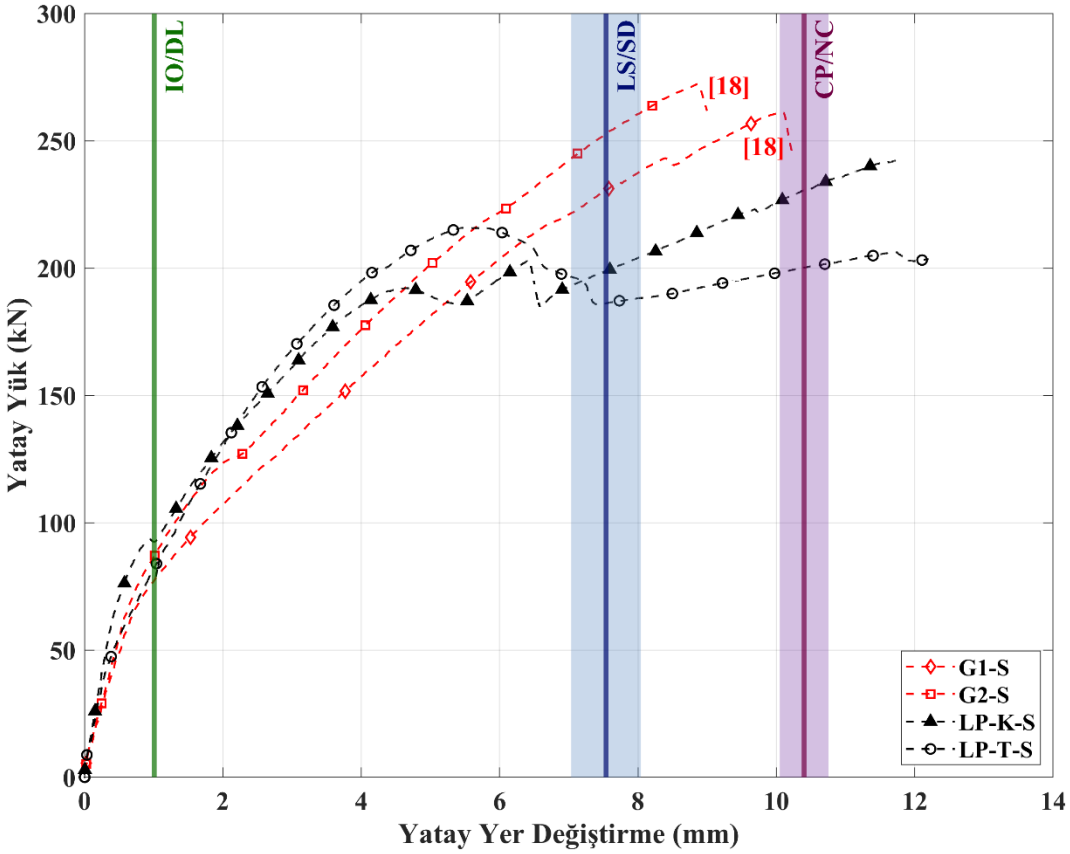
Güçlendirilmemiş duvarlar için deneysel yatay yük- yer değiştirme eğrileri Şekil 7.1'de verilmiştir. Bu eğriler üzerinde ayrıca yönetmeliklere göre belirlenen hasar sınırları gösterilmiştir.



Şekil 7.1 Güçlendirilmemiş duvarlar için yatay yük- yer değiştirme ilişkileri ve göreli öteleme sınırları.

Bu sonuçları değerlendirirken, Hemen Kullanım (IO) performans seviyesine karşılık gelen sınır değerlerin duvarların elastik davranış bölgesi ve/veya ilk çatlamanın meydana geldiği yer değiştirme seviyesi ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Can Güvenliği (LS) performans seviyesi için sınır değerleri, çatlak genişliklerinde artış da dahil olmak üzere önemli hasarın gözlendiği bölgelere karşılık geldiği görülmüştür. Göçme Öncesi (CP) performans seviyesi sınır değerleri, duvarların topuk bölgelerde yoğunlaşan çatlama ve ezilme ile karakterize edilen ve nihayetinde bir göçme mekanizmasının başlamasına yol açan, göçme durumuna yakın davranışıyla ilişkili bölgeleri temsil ettiği görülmüştür.

Güçlendirilmiş duvarlar için deneysel yatay yük- yer değiştirme eğrileri Şekil 7.2'de sunulmuştur. Bu eğriler üzerinde ayrıca yönetmeliklere göre belirlenen hasar sınırları gösterilmiştir.



Şekil 7.2 Güçlendirilmiş duvarlar için yatay yük- yer değiştirme ilişkileri ve göreli öteleme sınırları.

Tablo 7.1 incelendiğinde, karbon lifli polimer ile güçlendirilmiş duvarların enjeksiyonla güçlendirilmiş duvarlardan daha yüksek yer değiştirme kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. G1 ve G2 duvarları için nihai yer değiştirme, göçme öncesi sınır değerinin altında iken, LP_K ve LP_T duvarlarında nihai yer değiştirme bu değerin üzerindedir (Şekil 7.2).

LP_K-S duvarının nihai yer değiştirme değeri, LP_T-S duvarındaki değerden biraz daha düşüktür. Ancak, yer değiştirmedeki küçük farka rağmen, LP_K-S duvarının yanal yük taşıma kapasitesi, LP_T-S duvarınınkinden %19 daha yüksektir.

8
SONUÇ

Bu çalışma, karbon lif takviyeli polimer (LP) ile güçlendirilmiş çift sıra şeklinde örülen taş duvarların düzlem içi sabit eksenel kuvvet ile kademeli artan yatay yükler altındaki yapısal davranışını deneysel olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Ayrıca hem güçlendirilmemiş hem de kireç esaslı enjeksiyon ve LP ile güçlendirilmiş deney duvarlarının üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal simülasyonları gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Güçlendirme uygulanmasından önce, duvarlar üzerinde ön hasarı oluşturmak için düşey ve yatay yükler altında duvar deneyleri yapılmıştır. Duvarlar üzerinde enjeksiyon için gerekli çatlak genişliğine ulaşıldıktan sonra, hasarlı duvarlara LP uygulanmış daha sonra aynı yükleme koşulları altında tekrar test edilmiştir. Deneyler sırasında, güçlendirilmemiş duvarlardaki çatlakların çoğunun ağırlıklı olarak harç derzleri boyunca merdiven şeklinde bir dağılım izlediği tespit edilmiştir. Özellikle, duvarların sağ topuk bölgesine yakın kısımlarında, yatay yükteki artışa bağlı olarak düşey ve çapraz yönlü şekilde çatlakların oluştuğu gözlenmiştir. Güçlendirilmemiş duvarlara kıyasla yeni çatlak oluşmadığı görülmüştür.

2. LP ile güçlendirilen duvarlar, çapraz sargı (LP_K-S) ve tam sargı (LP_T-S) olarak iki farklı şekilde güçlendirilmiştir. Kireç esaslı enjeksiyon yöntemi ile güçlendirilen duvarlar, taş tozu içermeyen (G1-S) ve tozu içeren (G2-S) enjeksiyon malzemesi ile güçlendirilmiştir. LP ile güçlendirilmiş duvarların enjeksiyon yöntemi ile güçlendirilmiş duvarlardan %15-%34 daha yüksek bir yer değiştirme kapasitesine ulaştığı görülmüştür.G1-S ve G2-S duvarları için nihai yer değiştirme göçmenin önlemesi sınırının altında kalırken, LP_K-S ve LP_T-S duvarları bu eşik değerini aştığı tespit edilmiştir. LP_K-S duvarının nihai yer değiştirmesinin LP_T-S duvarından çok az düşük olduğu noktada, LP_K-S duvarının yatay yük taşıma kapasitesinin %19 daha fazla olduğu gözlenmiştir.

3. Göreli öteleme oranları değerlendirildiğinde, yönetmeliklerde belirtilen hasar seviyelerinin duvarlarda gözlenen hasar koşullarıyla tutarlı olduğu görülmüştür. Hemen Kullanım (IO) performans seviyesine karşılık gelen sınır değerlerin duvarların elastik davranış bölgesi ve/veya ilk çatlamanın meydana geldiği yer değiştirme seviyesi ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Can Güvenliği (LS) performans seviyesi için sınır değerleri, çatlak genişliklerinde artış da dahil olmak üzere önemli hasarın gözlendiği bölgelere karşılık geldiği görülmüştür. Göçme Öncesi (CP) performans seviyesi sınır değerleri, duvarların topuk bölgelerde yoğunlaşan çatlak ve ezilme ile karakterize edilen ve nihayetinde bir göçme mekanizmasının başlamasına yol açan, göçme durumuna yakın davranışıyla ilişkili bölgeleri temsil ettiği görülmüştür.

4. Güçlendirme öncesi durumda yatay kuvvet – yatay yer değiştirme grafikleri incelendiğinde LP_T duvarına ait eğrinin başlangıç eğiminin LP_K duvarına ait başlangıç eğiminden nispeten daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu durumun LP_T duvarının güçlendirme öncesi temel göçme modunun topuk ezilmesi şeklinde olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Güçlendirme sonrasında ise sargı şekillerinin farklı olmasına bağlı olarak başlangıç eğimlerinin yakın olduğu gözlenmiştir. Her iki duvar için de güçlendirme sonrası yapılan deneyler sonucunda gözlenen temel göçme modlarının topuk ezilmesi şeklinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca güçlendirme sonrası durum için LP_K-S, LP_T-S, G1-S ve G2-S duvarlarının başlangıç eğimlerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.

5. Güçlendirme sonrası durum için, LP_K duvarının yatay yük – yatay yer değiştirme eğrileri incelendiğinde eğrinin elastik ötesi kısmında bir pekleşme davranışı söz konusu iken, LP_T duvarına ait eğride ise artan yer değiştirmelere karşılık yatay yük değerinde önemli bir artış gözlenmemiştir.

Farklı yöntemler ile güçlendirilen yığma duvarların düzlem içi davranışı, makro modelleme yaklaşımı kullanılarak doğrusal olmayan üç boyutlu sonlu eleman yöntemi ile simüle edilmiştir. Sayısal analizler hem güçlendirme öncesi hem de güçlendirme sonrası durumlar için gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde ABAQUS-2021 yazılımı kullanılmış olup duvarın bünyesel davranışı DP malzeme modeli ile temsil edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. DP bünye modeli kullanılarak güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş taş duvarların doğrusal olmayan davranışını simüle etmek için makro modelleme tekniği ile sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen duvar deneylerinden elde edilen Elastisite Modülü ve Poisson değerleri ve taş, harç, enjeksiyon ve taş-harç kompozit malzemelerin üç eksenli basınç testlerinden elde edilen içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri sayısal analizlerde kullanılmıştır. Duvarın basınç dayanımı ise literatürde kabul görmüş ampirik bağıntılar yardımıyla hesaplanmıştır.
2. Sayısal analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması, önerilen sayısal modelleme yaklaşımın yatay yük- yer değiştirme ilişkisini temsil etmek için uygun olduğunu doğrulamaktadır. Güçlendirme öncesi durumda deney sonucunda oluşan çatlak genişliği dağılımı ile analiz sonuçlarında elde edilen kayma gerilmesi dağılımı ve birim şekil değiştirmelerin yoğun olduğu bölgelerin birbiriyle uyumluğu belirlenmiştir. Benzer durum enjeksiyon ve LP ile güçlendirilen duvarlar için de geçerlidir.
3. Güçlendirme öncesi durum ile güçlendirme sonrası durum arasında gerilme dağılımı ve çatlak yoğunluğu bölgeleri açısından G1-G2 duvarları ile G1-S ve G2-S duvarları arasında büyük bir fark gözlenmemiştir. Bu durum deney sonuçları ile uyumludur. LP ile güçlendirilmiş duvarların, güçlendirme öncesi ve sonrası durumları için gerilme ve çatlak yoğunluğu açısından kayda değer farklar oluştuğu gözlenmiştir. Bu durumun LP yerleşimi ile ilgili olduğu düşünülmektedir.
4. LP elamanlarda, duvarda oluşan yatay yük artışına bağlı olarak çekme gerilmelerinde artış olduğu gözlenmiştir. Çapraz sargı ve tam sargı şekilleri arasında herhangi bir LP elemana tekabül eden eksenel çekme gerilmesi açısından değerlendirme yapıldığında tam sargı şeklinde uygulanan LP

şeritleri üzerinde oluşan çekme gerilmesi değerinin çapraz (kısmi) sargı düzeninden %77 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

5. Makro modelleme tekniği, yığma taş duvarların analizi için özellikle maksimum yük ve buna tekabül eden yer değiştirmenin belirlenmesi için oldukça yeterli bir modelleme yaklaşımıdır. Ancak özellikle maksimum yükten sonra sergilenen davranış (yumuşama aşaması) çoğunlukla deneysel sonuçlardan farklılık göstermektedir. Bunun nedeninin taş ve bağlayıcı arasındaki etkileşimin ifade edilememesinden kaynaklandığı aşikardır. Gelecekteki çalışmalar için, yığma taş duvarların sayısal analizi için mikro veya basitleştirilmiş mikro modelleme teknikleri tercih edilebilir.

KAYNAKÇA

[1] L. G. Baltazar, F. M. A. Henriques, and M. T. Cidade, "Experimental Study and Modeling of Rheological and Mechanical Properties of NHL Grouts," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, no. 12, pp. 1–11, Dec. 2015, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001320.

[2] B. Doran, H. Orhun Koksal, S. Aktan, S. Ulukaya, D. Oktay, and N. Yuzer, "In-Plane Shear Behavior of Traditional Masonry Walls," *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 11, no. 2, pp. 278–291, Feb. 2017, doi: 10.1080/15583058.2016.1207114.

[3] P. B. Lourenço, D. V. Oliveira, P. Roca, and A. Orduña, "Dry Joint Stone Masonry Walls Subjected to In-Plane Combined Loading," *Journal of Structural Engineering*, vol. 131, no. 11, pp. 1665–1673, Nov. 2005, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:11(1665).

[4] P. B. Lourenço, "Computational strategies for masonry structures," Doctoral Thesis, 1996.

[5] M. R. Valluzzi, F. da Porto, and C. Modena, "Behavior and modeling of strengthened three-leaf stone masonry walls," *Mater Struct*, vol. 37, no. 3, pp. 184–192, Apr. 2004, doi: 10.1007/BF02481618.

[6] G. Vasconcelos and P. B. Lourenço, "In-Plane Experimental Behavior of Stone Masonry Walls under Cyclic Loading," *Journal of Structural Engineering*, vol. 135, no. 10, pp. 1269–1277, Oct. 2009, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000053.

[7] R. Senthivel and P. B. Lourenço, "Finite element modelling of deformation characteristics of historical stone masonry shear walls," *Eng Struct*, vol. 31, no. 9, pp. 1930–1943, 2009.

[8] G. Magenes, A. Penna, A. Galasco, and M. da Paré, "In-plane cyclic shear tests of undressed double leaf stone masonry panels," *8th International Masorny Conference*, no. April 2014, pp. 1–10, 2010.

[9] M. Abdel-Mooty, A. Al Attar, and M. El Tahawy, "Experimental evaluation of stone masonry walls with lime based mortar under vertical loads," *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XII*, vol. 118, pp. 401–412, Sep. 2011, doi: 10.2495/STR110331.

[10] D. V. Oliveira, R. A. Silva, E. Garbin, and P. B. Lourenço, "Strengthening of three-leaf stone masonry walls: an experimental research," *Mater Struct*, vol. 45, no. 8, pp. 1259–1276, Aug. 2012, doi: 10.1617/s11527-012-9832-3.

[11] B. Quelhas, L. Cantini, J. M. Guedes, F. da Porto, and C. Almeida, "Characterization and Reinforcement of Stone Masonry Walls BT -

Structural Rehabilitation of Old Buildings," A. Costa, J. M. Guedes, and H. Varum, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 131–155. doi: 10.1007/978-3-642-39686-1_5.

[12] G. Castellazzi, D. Ciancio, and F. Ubertini, "A Simplified Micro-Modeling Approach for Historical Stone Masonry Walls," *Key Eng Mater*, vol. 624, pp. 74–79, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.624.74.

[13] D. V. Oliveira, A. S. Araújo, P. B. Lourenço, G. Magenes, and A. Penna, "Modelling of the in-plane behaviour of stone masonry panels," *Structural Analysis of Historical Constructions: Anamnesis, diagnosis, therapy, controls - Proceedings of the 10th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, SAHC 2016*, pp. 265–271, 2016, doi: 10.1201/9781315616995-34.

[14] L. Estevan, F. J. Baeza, D. Bru, and S. Ivorra, "Stone masonry confinement with FRP and FRCM composites," *Constr Build Mater*, vol. 237, p. 117612, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117612.

[15] A. Sandoli, B. Ferracuti, and B. Calderoni, "FRP-confined tuff masonry columns: regular and irregular stone arrangement," *Compos B Eng*, vol. 162, pp. 621–630, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.01.015.

[16] A. Rezaie, M. Godio, and K. Beyer, "Experimental investigation of strength, stiffness and drift capacity of rubble stone masonry walls," *Constr Build Mater*, vol. 251, p. 118972, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118

[17] A. M. D'Altri *et al.*, *Modeling Strategies for the Computational Analysis of Unreinforced Masonry Structures: Review and Classification*, vol. 27, no. 4. Springer Netherlands, 2020. doi: 10.1007/s11831-019-09351-x.

[18] B. Dinç-Şengönül, N. Yüzer, C. Şengönül, S. Ulukaya, D. Oktay, and Ö. Ündül, "Behavior of grout injected solid stone masonry walls under in-plane loading," *Structures*, vol. 58, p. 105411, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.istruc.202

[19] N. Kumar, R. Amirtham, and M. Pandey, "Plasticity based approach for failure modelling of unreinforced masonry," *Eng Struct*, vol. 80, pp. 40–52, 2014, doi: 10.1016/j.engstruct.2014.08.021.

[20] D. V Oliveira and P. B. Lourenço, "Implementation and validation of a constitutive model for the cyclic behaviour of interface elements," *Comput Struct*, vol. 82, no. 17, pp. 1451–1461, 2004.

[21] P. C. Miglietta, E. C. Bentz, and G. Grasselli, "Finite/discrete element modelling of reversed cyclic tests on unreinforced masonry structures," *Eng Struct*, vol. 138, pp. 159–169, 2017.

[22] A. Prosperi, M. Longo, P. A. Korswagen, M. Korff, and J. G. Rots, "Accurate and Efficient 2D Modelling of Historical Masonry Buildings Subjected to Settlements in Comparison to 3D Approaches BT - Structural Analysis of Historical Constructions," Y. Endo and T. Hanazato, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 232–244.

[23] G. Vasconcelos and P. B. Lourenço, "Experimental characterization of stone masonry in shear and compression," *Constr Build Mater*, vol. 23, no. 11, pp. 3337–3345, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.06.045.

[24] P. B. Lourenço, “Masonry Structures, Overview,” *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, no. July 2014, pp. 1–10, 2014, doi: 10.1007/978-3-642-36197-5.

[25] N. Bayülke, *Yığma Yapılar*. 2005.

[26] “Sultanahmet Camii.” [Online]. Available: https://www.turkgun.com/

[27] “Sinop cezaevi”, [Online]. Available: https://www.aa.com.tr/tr/kultur/tarihi-sinop-cezaevi-ve-muzesi-kismi-olarak-ziyarete-aciliyor/2931553

[28] M. Y. Çelik and A. İbrahimoglu, “Characterization of travertine stones from Turkey and assessment of their durability to salt crystallization,” *Journal of Building Engineering*, vol. 43, p. 102592, 2021.

[29] A. Jamshidi, M. R. Nikudel, and M. Khamehchiyan, “Evaluation of the durability of Gerdoee travertine after freeze–thaw cycles in fresh water and sodium sulfate solution by decay function models,” *Eng Geol*, vol. 202, pp. 36–43, 2016.

[30] M. Ashraf, A. N. Khan, A. Naseer, Q. Ali, and B. Alam, “Seismic Behavior of Unreinforced and Confined Brick Masonry Walls Before and After Ferrocement Overlay Retrofitting,” *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 6, no. 6, pp. 665–688, Nov. 2012, doi: 10.1080/15583058.2011.599916.

[31] A. Borri, G. Castori, and M. Corradi, “Shear behavior of masonry panels strengthened by high strength steel cords,” *Constr Build Mater*, vol. 25, no. 2, pp. 494–503, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.05.014.

[32] B. Doran, N. Yuzer, S. Aktan, D. Oktay, and S. Ulukaya, “Numerical Modeling of Traditional Masonry Walls Strengthened with Grout Injection,” *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 14, no. 10, pp. 1517–1532, Nov. 2020, doi: 10.1080/15583058.2019.1618970.

[33] Z. Multazam, K. Yamamoto, K. Timsina, C. K. Gadagamma, and K. Meguro, “Shaking table tests of a one-quarter scale model of concrete hollow block masonry houses retrofitted with fiber-reinforced paint,” *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 8041, Apr. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-58365-4.

[34] M. A. Elgawady and P. Lestuzzi, “A review of conventional seismic retrofitting techniques for URM,” *13th International Brick and Block Masonry Conference*, no. January, pp. 1–10, 2004.

[35] M. Godio, F. Vanin, S. Zhang, and K. Beyer, “Quasi-static shear-compression tests on stone masonry walls with plaster: Influence of load history and axial load ratio,” *Eng Struct*, vol. 192, pp. 264–278, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.04.041.

[36] M. ElGawady, M., Lestuzzi, P., Badoux, “A Review of Retrofitting of URM Walls Using Composites,” in *4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, Calgary, Alberta, 2004.

[37] M. Elgawady, “Seismic in-plane behavior of URM walls upgraded with composites,” 2004. doi: 10.5075/epfl-thesis-3111.

[38] T. C. Triantafillou, “Composites: a new possibility for the shear strengthening of concrete, masonry and wood,” *Compos Sci Technol*, vol.

58, no. 8, pp. 1285–1295, Aug. 1998, doi: 10.1016/S0266-3538(98)00017-7.

[39] M. Uranjek, V. Bosiljkov, R. Žarnić, and V. Bokan-Bosiljkov, “In situ tests and seismic assessment of a stone-masonry building,” *Mater Struct*, vol. 45, no. 6, pp. 861–879, Jun. 2012, doi: 10.1617/s11527-011-9804-z.

[40] B. Dinç-Şengönül, D. Oktay, and N. Yüzer, “Effect of temperature, resting time and brick dust (Horasan) on the rheological properties of hydraulic lime-based grouts,” *Constr Build Mater*, vol. 265, p. 120644, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120644.

[41] B. Dinç-Şengönül, M. Bayram, D. Oktay, and N. Yüzer, “Valorization of Cappadocia waste earth in the production of sustainable lime-based grouts,” *Sustain Chem Pharm*, vol. 38, p. 101503, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.scp.2024.101503.

[42] L. G. Baltazar and F. M. A. Henriques, “Rheology of Grouts for Masonry Injection,” *Key Eng Mater*, vol. 624, pp. 283–290, Sep. 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.624.283.

[43] L. G. Baltazar, F. M. A. Henriques, D. Rocha, and M. T. Cidade, “Experimental Characterization of Injection Grouts Incorporating Hydrophobic Silica Fume,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, no. 10, Oct. 2017, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002021.

[44] L. G. Baltazar, F. M. A. Henriques, and F. Jorne, “Optimisation of flow behaviour and stability of superplasticized fresh hydraulic lime grouts through design of experiments,” *Constr Build Mater*, vol. 35, pp. 838–845, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.084.

[45] L. G. Baltazar, F. M. A. Henriques, and M. T. Cidade, “Contribution To the Design Of Hydraulic Lime-Based Grouts For Masonry Consolidation,” *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 21, no. 6, pp. 698–709, Jun. 2015, doi: 10.3846/13923730.2014.893918.

[46] E. Luso and P. B. Lourenço, “Experimental laboratory design of lime based grouts for masonry consolidation,” *International Journal of Architectural Heritage*, pp. 1–10, Jul. 2017, doi: 10.1080/15583058.2017.1354095.

[47] D. V. Bompa and A. Y. Elghazouli, “Shear-Compression Failure Envelopes for Clay Brick Lime Mortar Masonry Under Wet and Dry Conditions,” 2022, pp. 175–185. doi: 10.1007/978-3-030-90788-4_17.

[48] A. Rahman and T. Ueda, “Experimental Investigation and Numerical Modeling of Peak Shear Stress of Brick Masonry Mortar Joint under Compression,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 26, no. 9, Sep. 2014, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000958.

[49] G. Milani, T. Rotunno, E.Sacco, and A. Tralli, “Failure load of Frp strengthened masonry walls: Experimental results and numerical models,” *SID Structural Integrity and Durability*, vol. 2, no. 1, pp. 29–50, 2006.

[50] A. Ghobarah and K. El Mandooh Galal, “Out-of-Plane Strengthening of Unreinforced Masonry Walls with Openings,” *Journal of Composites for Construction*, vol. 8, no. 4, pp. 298–305, 2004, doi: 10.1061/(asce)1090-0268(2004)8:4(298).

[51] B. Bozyigit *et al.*, “Damage to monumental masonry buildings in Hatay and Osmaniye following the 2023 Turkey earthquake sequence: The role of wall geometry, construction quality, and material properties,” *Earthquake Spectra*, vol. 40, no. 3, pp. 1870–1904, Aug. 2024, doi: 10.1177/87552930241247031.

[52] A. Bayraktar, N. Coşkun, and A. Yalçin, “Performance of Masonry Stone Buildings during the March 25 and 28, 2004 Aşkale (Erzurum) Earthquakes in Turkey,” *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 21, no. 6, pp. 432–440, Dec. 2007, doi: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2007)21:6(432).

[53] C. Demir and A. Ilki, “Characterization of the materials used in the multi-leaf masonry walls of monumental structures in Istanbul, Turkey,” *Constr Build Mater*, vol. 64, pp. 398–413, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.099.

[54] A. Bayraktar, N. CoŞkun, and A. Yalçin, “Damages of masonry buildings during the July 2, 2004 Doğubayazıt (Ağrı) earthquake in Turkey,” *Eng Fail Anal*, vol. 14, no. 1, pp. 147–157, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.engfailanal.2005.11.011.

[55] R. Ataur and U. Tamon, “In-Plane Shear Performance of Masonry Walls after Strengthening by Two Different FRPs,” *Journal of Composites for Construction*, vol. 20, no. 5, p. 4016019, Oct. 2016, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000661.

[56] M. Hamid and I. J. M., “Diagonal Compression Testing of FRP-Retrofitted Unreinforced Clay Brick Masonry Wallettes,” *Journal of Composites for Construction*, vol. 15, no. 5, pp. 810–820, Oct. 2011, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000209.

[57] R. Hayen, K. Van Balen, and D. Van Gemert, “Triaxial interaction of natural stone, brick and mortar in masonry constructions,” *Building Materials and Building technology to Preserve the Built Heritage, WTA Schriftenreihe*, no. January, pp. 333–352, 2009.

[58] TS EN 1926, *Natural stone test methods- Determination of compressive strength*. 2007.

[59] TS EN 12372, *Natural stone test methods- Determination of flexural strength under concentrated load*. 2007.

[60] General Directorate of Highways B.D.H.B.B., *Historical Bridges, No: 268*. Ankara, 2009.

[61] EN 1015-11, *Methods of test for mortar for masonry - Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. 2019.

[62] EN 13286-43, *Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 43: Test method for the determination of the modulus of elasticity of hydraulically bound mixtures*. 2017.

[63] E. Y. Gökyiğit-Arpaci, D. Oktay, N. Yüzer, S. Ulukaya, and D. Ekşi-Akbulut, “Performance Evaluation of Lime-Based Grout Used for Consolidation of Brick Masonry Walls,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 31, no. 6, Jun. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002692.

[64] N. Mazzon, “Infuence of Grout Injection on the Dynamic Behaviour of Stone Masonry Buildings,” 2010.

[65] M. Ponte, J. Milosevic, and R. Bento, “Parametrical study of rubble stone masonry panels through numerical modelling of the in-plane behaviour,” *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 17, no. 3, pp. 1553–1574, Mar. 2019, doi: 10.1007/s10518-018-0511-9.

[66] B. Silva, M. Dalla Benetta, F. da Porto, and C. Modena, “Experimental assessment of in-plane behaviour of three-leaf stone masonry walls,” *Constr Build Mater*, vol. 53, pp. 149–161, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.084.

[67] BS EN 1771, *Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of injectability and splitting test. British Standards. 3*. 2004.

[68] B. Biçer-şimşir, I. Griffin, B. Palazzo-Bertholon, and L. Rainer, “Lime-based injection grouts for the conservation of architectural surfaces,” *Studies in Conservation*, vol. 54, no. sup1, pp. 3–17, Jun. 2009, doi: 10.1179/sic.2009.54.Supplement-1.3.

[69] V. Pachta, “The Role of Glass Additives in the Properties of Lime-Based Grouts,” *Heritage*, vol. 4, no. 2, pp. 906–916, May 2021, doi: 10.3390/heritage4020049.

[70] V. Pachta, F. Papadopoulos, and M. Stefanidou, “Development and testing of grouts based on perlite by-products and lime,” *Constr Build Mater*, vol. 207, pp. 338–344, May 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.157.

[71] V. Pachta and D. Goulas, “Fresh and hardened state properties of fiber reinforced lime-based grouts,” *Constr Build Mater*, vol. 261, p. 119818, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119818.

[72] M. Stefanidou, V. Pachta, and G. Konstantinidis, “Exploitation of waste perlite products in lime-based mortars and grouts,” *Sustain Chem Pharm*, vol. 32, p. 101024, May 2023, doi: 10.1016/j.scp.2023.101024.

[73] B. Doran, N. Yuzer, S. Aktan, D. Oktay, and S. Ulukaya, “Numerical Modeling of Traditional Masonry Walls Strengthened with Grout Injection,” *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 14, no. 10, pp. 1517–1532, 2020, doi: 10.1080/15583058.2019.1618970.

[74] S. Aktan, “Düzlem İçi Yükler Etkisindeki Yığma Duvarlarda Bünyesel Modelleme,” Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2016.

[75] D. V Oliveira and P. B. Lourenço, “Experimental behaviour of three-leaf stone masonry walls,” 2006.

[76] M. Corradi, C. Tedeschi, L. Binda, and A. Borri, “Experimental evaluation of shear and compression strength of masonry wall before and after reinforcement: Deep repointing,” *Constr Build Mater*, vol. 22, no. 4, pp. 463–472, Apr. 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.11.021.

[77] K. F. Abdulla, L. S. Cunningham, and M. Gillie, “Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach,” *Eng Struct*, vol. 151, pp. 349–365, 2017, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.08.021.

[78] H. O. Koksal, O. Jafarov, B. Doran, S. Aktan, and C. Karakoc, "Computational material modeling of masonry walls strengthened with fiber reinforced polymers," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 48, no. 5, pp. 737–755, Dec. 2013, doi: 10.12989/sem.2013.48.5.737.

[79] B. Doran, M. Karslioglu, Z. Unsal Aslan, and C. Vatansever, "Experimental and Numerical Investigation of Unreinforced Masonry Walls with and without Opening," *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 17, no. 11, pp. 1833–1854, Nov. 2023, doi: 10.1080/15583058.2022.2080611.

[80] B. Dinç-Şengönül, Y. Hothot, B. Doran, N. Yüzer, S. Ulukaya, and D. Oktay, "Nonlinear Behaviour of Two-Whyte Stone Walls," in *12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions SAHC 2020*, Barcelona, 2021, pp. 1–10. doi: 10.23967/sahc.2021.167.

[81] M. Hothot, "Zeminde ve Kayada Kazık Taşıma Gücünün Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Tahmini," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi, İstanbul, 2021.

[82] "ABAQUS 6.14/CAE Analysis User's Manual," *Dassault Systems, Simulia Corporation*: 6.14.

[83] İ. E. Bal, "Yığma yapılarda doğrusal olmayan artımsal analiz için bir yöntem önerisi," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 8, no. 3, pp. 463–474, 2017.

[84] J. Scacco, B. Ghiassi, G. Milani, and P. B. Lourenço, "A Fast Modeling Approach for Numerical Analysis of Unreinforced and FRCM Reinforced Masonry Walls Under Out-Of-Plane Loading," *Composites Part B*, p. 107553, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107553.

[85] Y. M. Hothot, B. Dinç-Şengönül, B. Doran, and N. Yüzer, "Nonlinear Finite Element Analysis of Stone Masonry-Solid Wall," in *6 th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Gebze, Kocaeli, 2021.

[86] Y. M. Hothot, B. D. Şengönül, B. Doran, and N. Yüzer, "Finite Element Applications of Stone Masonry Walls," in *14th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE2020-21)*, İstanbul, 2021, pp. 1–6.

[87] W. F. Chen and D. J. Han, *Plasticity for Structural Engineers*. New York: Springer-Verlag, 1988.

[88] H. B. Kaushik, D. C. Rai, and S. K. Jain, "Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, no. 9, pp. 728–739, 2007, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(728).

[89] H. O. KÖKSAL and H. YILDIRIM, "Eksenel basınç altında beton briket yığma prizmaların sonlu eleman analizi," *Teknik Dergi*, vol. 15, no. 3, pp. 3249–3265, 2004.

[90] T. Paulay and M. J. N. Priestly, *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. 1992.

[91] A. Brencich, C. Corradi, and L. Gambarotta, "Compressive strength of solid clay brick masonry under eccentric loading," *Proceedings British Masonry Society*, pp. 37–46, 2002.

[92] G. Mohamad, P. B. Lourenço, and H. R. Roman, “Mechanical behavior assessment of concrete block masonry prisms under compression,” 2005.

[93] O. Jafarov, “Lifli polimerle güçlendirilmiş yığma duvarların modellenmesi,” 2012.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. B. Dinç-Şengönül, Y. M. Hothot, B. Doran, N. Yüzer, S. Ulukaya, and D. Oktay, "Nonlinear Behaviour of Two-Whyte Stone Walls," in 12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions SAHC 2020, Barcelona, 2021, pp. 1–10. doi: 10.23967/sahc.2021.167.

2. Y. M. Hothot, B. Dinç-Şengönül, B. Doran, and N. Yüzer, "Nonlinear Finite Element Analysis of Stone Masonry-Solid Wall," in 6 th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Gebze, Kocaeli, 2021.

3. Y. M. Hothot, B. Doran, Şengönül, B. Doran, and N. Yüzer, "Finite Element Applications of Stone Masonry Walls," in 14th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE2020-21), İstanbul, 2021, pp. 1–6.

Makaleler

1. B. Doran, Y. M. Hothot, B. Dinç-Şengönül, M. Karslıoğlu, S. Ulukaya, N. Yüzer, "Experimental and Numerical Investigation on Strengthening Techniques for Double-Wythe Stone Masonry Walls", Turkish Journal of Civil Engineering, 2025, doi.org/10.18400/tjce.1517318.

Projeler

1. "Yığma taş Duvarların Düşey ve Yatay Yükler Altındaki Davranışı", Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (YTU BAP), Proje No: FDK-2021-4482, Araştırmacı, 2021-2025.

2. İnşaat Mühendisliği (Yapı; Yapı Malzemeleri) "100/2000 YÖK Doktora Projesi Burs Programı", Yükseköğretim Kurulu Başkanlığı, Araştırmacı-Bursiyer, 2018-2022.