

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TEKRARLI YÜKLER ETKİSİNDEKİ BÖLME DUVARLARIN ÇİMENTO
ESASLI TEKSTİL KOMPOZİTLERLE İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Didem DÖNMEZ

Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

NİSAN 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TEKRARLI YÜKLER ETKİSİNDEKİ BÖLME DUVARLARIN ÇİMENTO
ESASLI TEKSTİL KOMPOZİTLERLE İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Didem DÖNMEZ
(802152001)**

Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı

Deprem Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa GENÇOĞLU

NİSAN 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün 802152001 numaralı Doktora Öğrencisi Didem DÖNMEZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “TEKRARLI YÜKLER ETKİSİNDEKİ BÖLME DUVARLARIN ÇİMENTO ESASLI TEKSTİL KOMPOZİTLERLE İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Mustafa GENÇOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Beyza TAŞKIN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Tülay AKSU ÖZKUL
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Nilüfer ÖZYURT ZİHNİOĞLU
Boğaziçi Üniversitesi

Prof. Dr. Fuat DEMİR
Süleyman Demirel Üniversitesi

Teslim Tarihi : **16 Şubat 2021**
Savunma Tarihi : **13 Nisan 2021**





Aileme,



ÖNSÖZ

Doktora eğitimim süresince bilgi ve tecrübesi ile bana destek olan ve aynı zamanda İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (İTÜ-BAP) kapsamında (No. 41132) üretim ve deneylerimi gerçekleştirmeme olanak sağlayan değerli hocam Doç. Dr. Mustafa GENÇOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Doktora sırası araştırma yapmama olanak sunan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 2214/A bursu (Burs No.1059B141700094) ile University of Illinois at Chicago'da (UIC) Yapısal ve Beton Malzemeler Araştırma Laboratuvarında tez çalışmalarımı geliştirmemde katkısı olan Prof. Mohsen ISSA hocama ve laboratuvarında yardımcı olan Mohammad MAHDI'ye, Masoud REZAEI ve Mohammad ABANDAH'a teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca, maddi ve manevi açıdan her türlü desteği gösteren aileme ve özellikle doktora çalışmalarımda desteğini esirgemeyen değerli eşime, tüm kalbimle teşekkür ederim.

Şubat 2021

Didem DÖNMEZ
İnşaat Y. Müh. ve Mimar



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xxi
ÖZET.....	xxvii
SUMMARY	xxxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Konu ile İlgili Literatür Araştırması.....	3
1.3 Tekstil ve/veya Fiber Takviyeli Çimento Bazlı Kompozit Malzemelerin Özellikleri ve Kullanım Alanları.....	9
2. KULLANILAN METODLAR	15
2.1 Tekstil Kompozitlerin Mevcut Hasarlı Bölme Duvarların Onarım/ İyileştirilmesinde Kullanımı.....	15
2.1.1 Genel bilgi.....	15
2.1.2 Bölme duvarlarda hasar tiplerinin tanımlanması	17
2.1.3 Yığma duvar bileşenleri ile bölme duvar hasar modlarının tahmini.....	19
2.1.4 Bölme duvarlarda tekstil ve/veya fiber takviyeli kompozit uygulamalarla güçlendirme ve iyileştirme teknikleri	25
2.1.5 Malzeme seçimi	27
2.2 Tekstil Kompozitlerin Yapısal Birim ve Yeni Bir Sistem Oluşturmada Kullanımı.....	32
2.2.1 Genel bilgi.....	32
2.2.2 TRCC kompozit birimlerin üretim teknikleri	33
2.2.3 Malzeme seçimi	36
3. TEKSTİL VE LİFLİ KOMPOZİTLERİN HASARLI BÖLME DUVARLARIN ONARIM/İYİLEŞTİRİLMESİNDE KULLANIMININ DENEYSEL ARAŞTIRMASI VE ANALİZLERİ.....	39
3.1 Bölme Duvarların Üretiminde Kullanılan Bileşenlerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	40
3.1.1 Bölme duvar üretimlerinde kullanılan birimlerin basınç deneyleri	40
3.1.2 Tuğla-harç arayüz kırılma özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deneysel yöntemler	43
3.1.2.1 Üç sıralı tuğla prizma basınç testleri	43
3.1.2.2 Çekme bağ dayanımı testleri	45
3.1.2.3 Kayma bağ dayanımı testleri	48
3.1.3 Tuğla-harç arayüz kırılma özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan sayısal modelleme yöntemleri.....	50
3.1.3.1 Üç sıralı tuğla prizma basınç testi simülasyonu	54
3.1.3.2 Çekme bağ dayanımı testi simülasyonu	55

3.1.3.3 Kayma bağ dayanımı (mod II) testi simülasyonu	57
3.2 Bölme Duvarların Onarımında/İyileştirilmesinde Kullanılan Malzemelerin Seçimi ve Özellikleri	58
3.2.1 Kullanılan tekstil malzemesi	58
3.2.2 Kullanılan ECC harç	60
3.3 Bölme Duvarların Üretimi.....	64
3.3.1 Kil tuğla bölme duvarların üretimi.....	65
3.3.2 Beton blok bölme duvarların üretimi	66
3.4 Farklı Ön Basınç Yükleme ve Tekrarlı Yatay Yükler Altında Tuğla Bölme Duvarlarda Farklı Hasar Modlarının Oluşturulması.....	66
3.4.1 Deney ve ölçüm düzeneği	67
3.4.2 Yükleme koşulları	68
3.4.3 Eksenel 0.6 MPa ön basınç yüklemesi için tekrarlı yatay yükleme testi ..	69
3.4.4 Eksenel 1.2 MPa ön basınç yüklemesi için tekrarlı yatay yükleme testi ..	72
3.5 Eksenel 0.2 MPa Ön Basınç Yükleme ve Tekrarlı Yatay Yükler Altında Beton Blok Bölme Duvarın Hasar Modunun Belirlenmesi.....	75
3.5.1 Deney ve ölçüm düzeneği	76
3.5.2 Yükleme koşulları	77
3.5.3 Eksenel 0.2 MPa ön basınç yüklemesi için tekrarlı yatay yükleme testi ..	77
3.6 Beton Blok Duvarın Yatay Derzinin Onarımı İçin Kullanılan Yöntem ve Tekrarlı Yatay Yükleme Testi	80
3.6.1 Beton blok duvarın yatay derzinin onarımı için kullanılan yöntem.....	80
3.6.2 Deney ve ölçüm düzeneği	81
3.6.3 Yükleme koşulları	82
3.6.4 Eksenel 0.6 MPa ön basınç yüklemesi için tekrarlı yatay yükleme testi ..	83
3.7 Güçlendirilmemiş Bölme Duvarların Test Sonuçlarının Kodlar Kullanılarak Analitik Karşılaştırmalarının Yapılması.....	86
3.8 Kesme Hasarına Sahip Bölme Duvarların Yüzeyine Uygulanan İyileştirme Yöntemlerinin Geliştirilmesi	90
3.8.1 Hasarlı beton blok bölme duvarlarda iyileştirme yöntemlerinin geliştirilmesi	90
3.8.1.1 Duvar yüzeyine uygulanan iyileştirme/güçlendirme yöntemi	90
3.8.1.2 Duvar BD06YG numunesinin tekrarlı yatay yükleme testi	91
3.8.1.3 Hasarlı duvarın iyileştirilmesinde temele tekstil bazlı ankraj uygulaması	94
3.8.1.4 Duvar BD12YG numunesinin tekrarlı yatay yükleme testi	94
3.8.2 Hasarlı tuğla bölme duvarda iyileştirme yöntemlerinin geliştirilmesi	97
3.8.2.1 Duvar yüzeyine uygulanan iyileştirme/güçlendirme yöntemi	97
3.8.2.2 Hasarlı duvarın iyileştirilmesinde temele tekstil bazlı ankraj uygulaması	99
3.8.2.3 Duvar TD12YG numunesinin tekrarlı yatay yükleme testi	101
3.9 Duvar Numunelerinin Test Sonuçlarının Karşılaştırılması	104
4. DUVARLARIN SONLU ELEMAN ANALİZLERİ	119
4.1 Güçlendirilmemiş Duvarların Mikro Modellerinin Oluşturulması ve Analizleri	119
4.1.1 Malzeme modelleri.....	119
4.1.2 Duvar birimi/harç arayüz modelleri	120
4.1.3 Tuğla duvarın modellenmesi ve analiz sonucu	121
4.1.4 Beton blok duvarın modellenmesi ve analiz sonucu	123

4.2 İyileştirilmiş Hasarlı Duvarların Mikro Modellerinin Oluşturulması ve Analizleri.....	126
4.2.1 Malzeme modelleri	126
4.2.2 Yüzeylerine iyileştirme uygulanmış tuğla duvarın modellenmesi ve analiz sonucu	128
4.2.3 Tek sıra yatay derz güçlendirmesi uygulanmış beton blok duvarın modellenmesi ve analiz sonucu.....	131
4.2.4 Yüzeylerine iyileştirme uygulanmış beton blok duvarın modellenmesi ve analiz sonucu.....	133
5. TRCC BİRİMLERİN VE BİRİMLERDEN OLUŞTURULAN BİR DUVAR FORMUNUN DENEYSEL ARAŞTIRMASI VE ANALİZLERİ	137
5.1 Silindirik Tüp Birimlerin Üretim ve Analiz Aşamaları	137
5.1.1 Kullanılan malzemeler ve özellikleri	137
5.1.2 Kompozit birimlerin PPR metoduyla üretim aşamaları	139
5.1.3 Kompozit birimlere uygulanan test düzenekleri	143
5.1.3.1 Monotonik yanal basınç test düzeneği	143
5.1.3.2 Monotonik yanal çekme test düzeneği.....	144
5.1.3.3 Yarı çevrimsel yanal basınç test düzeneği	145
5.1.4 Kompozit birimlere uygulanan testler.....	146
5.1.4.1 Monotonik yanal basınç testi	147
5.1.4.2 Monotonik yanal çekme testi	151
5.1.4.3 Yarı çevrimsel yanal basınç testi.....	154
5.1.5 Kompozit birimlerin sayısal analizleri	160
5.1.6 Kompozit birimlerin deneysel ve nümerik olarak elde edilen hasar modlarının değerlendirilmesi	165
5.2 Silindirik Kompozit Tüp Birimlerin Duvar Formu İçerisinde Davranışı.....	168
5.2.1 Silindirik kompozit tüp birimlerle duvar formunun oluşturulması.....	168
5.2.2 Yarı çevrimsel diyagonal kayma test düzeneği.....	169
5.2.3 Yarı çevrimsel diyagonal kayma testi	172
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	181
KAYNAKLAR	187
EKLER.....	197
ÖZGEÇMİŞ.....	201



KISALTMALAR

AR-glass	: Alkali Resistant Glass (Alkali dirençli cam)
ASTM	: American Society for Testing and Material (Amerikan Test ve Malzeme Birliği)
BD	: Beton blok duvar
BOP	: Bend over point (Eğilme sınır noktası _ESN)
CFRP	: Carbon Fiber Reinforced Polymer (Karbon elyaf takviyeli polimer)
CMG	: Cement-based Matrix-Grid (Çimento bazlı matris kompozit ızgara sistemi)
CSA	: Canadian Standards Association (Kanada standartlar birliği)
ECC	: Engineered cementitious composite (Tasarlanmış çimento esaslı kompozit)
FRC	: Fiber Reinforced Concrete (Fiber katkılı beton)
FRCC	: Fiber Reinforced Cementitious Composite (Fiber katkılı çimento esaslı kompozit)
FRCM	: Fabric Reinforced Cementitious Matrix (Kumaş takviyeli çimento esaslı matris)
FRP	: Fiber Reinforced Polymer (Fiber donatılı polimer)
GFRP	: Glass Fiber Reinforced Polymer (Cam fiber takviyeli polimer)
GTRC	: Glass Textile Reinforced Concrete (Cam tekstil takviyeli beton)
HPFRCC	: Yüksek performanslı fiber takviyeli çimento esaslı kompozit
LVDT	: Linear variable displacement transducer (Lineer yer değiştirme ölçer)
MSJC	: Masonry Standard Joint Committee (Yığma Duvar Standardı Ortak Komitesi)
PE	: Polietilen
PP	: Polipropilen
PVA	: Polivinil alkol
RYTEİE	: Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar
TD	: Tuğla duvar
TRC	: Textile Reinforced Concrete (Tekstille güçlendirilmiş beton)
TRCC	: Textile Reinforced Cementitious Composite (Tekstil Donatılı Çimento Esaslı Kompozit)
TRM	: Textile Reinforced Mortar (Tekstil takviyeli harç)

UBC : The Uniform Building Code



SEMBOLLER

A_v	: Donatı en kesit alanı
A_w	: Duvar en kesit alanı
b_w	: Duvar kalınlığı
σ_b	: Eğilme gerilmesi
σ_n	: Normal basınç gerilmesi
σ_{cr}	: Maksimum gerilme değeri
σ_t	: Çekme gerilmesi
σ_y	: Akma gerilmesi
ε	: Birim şekil değıştirme
c	: Kohezyon
d	: Hasar parametresi (0 ile 1 arasında bir değerdır)
d_{BOP}	: Eğilme sınır noktasına karşılık gelen yer değıştirme değeri
d_H	: Hasar katsayısı
d_{maks}	: Maksimum yüke denk gelen yer değıştirme değeri
d_u	: Maksimum yer değıştirme
d_y	: Akma durumundaki yer değıştirme
D_e	: Silindir tüp birimi ortalama dış çap
D_1	: Silindir tüp birimin yatay yöndeki yer değıştirme değeri
D_2	: Silindir tüp birimin düşey yöndeki yer değıştirme değeri
E_{sb}	: Tuğla biriminin sekant elastisite modülü
E_{sm}	: Harcın sekant elastisite modülü
E_o	: Elastisite (teğet) modülü
E_M	: Duvar elastisite modülü
E_b	: Duvar biriminin elastisite modülü
E_m	: Harcın elastisite modülü
$f_{dç}, f_t$	: Duvarda diyagonal çekme dayanımı
f_n	: Maksimum normal gerilme
f'_m	: Duvarın ortalama basınç dayanımı
f_s	: Maksimum kayma gerilmesi
f_y	: Donatı akma dayanımı

h_b	: Duvar biriminin yüksekliği
$H_d; h; h_w$	: Duvar yüksekliği
l_b	: Tuğla birimin uzunluğu
l_c	: Beton blok birimin uzunluğu
l_m	: Z-şekilli numunenin tuğla birimleri arasındaki harç derzi uzunluğu
$l_w; d_v$	: Duvar uzunluğu
η	: Ekspansiyel parametre
t	: Kalınlık
t_m	: Harcın kalınlığı
t_{bar}	: Mesnet ve yükleme çelik çubuk kalınlığı
P_{BOP}	: Eğilme sınır noktasına karşılık gelen yük değeri
P_c	: Eksenel düşey yük
P_d	: Düşey yük
$P_f=P_{göçme}$	: Göçme yükü
P_{maks}	: Maksimum yük
P_s	: Yük (Kayma bağ dayanımı testi)
P_z	: Yük (Z-şekilli numune üç nokta eğme testi)
R_1, R_2	: Mesnet reaksiyon kuvvetleri
μ	: Düktilite
μ	: Sürtünme katsayısı
Δ_i	: Göreli yer değiştirme
$\tau_o; f_{vo}$	: Başlangıç kayma gerilmesi
τ_s	: Kayma gerilmesi
φ	: Dilatasyon açısı
ϕ	: İç sürtünme açısı
G_b	: Tuğlanın kayma modülü
G_c'	: Bileşke moda ait kritik enerji
$G_{c,I}$	: Mod I (açılma) kohezif kırılma enerjisi
$G_{c,II}$	: Mod II (kayma) kohezif kırılma enerjisi
G_m	: Harcın kayma modülü
G_I	: Benzeggagh-Kenane mod bileşkesindeki mod I'e ait enerji
G_{II}	: Benzeggagh-Kenane mod bileşkesindeki mod II'ye ait enerji
K_e	: Duvar rijitliği
K_i	: i. çevrime karşılık gelen rijitlik değeri (i=1, 2, ...)
K_{sekant}	: Sekant rijitliği

k_n	: Başlangıç normal rijitliği
k_s	: Başlangıç kayma rijitliği
M	: Moment kapasitesi
r	: Dönme
s_h	: Yatay donatı aralığı (mm)
u_{bko}	: Bileşke modun maksimum gerilmesine karşılık gelen yer değiştirme değeri
u_{bkf}	: Bileşke mod maksimum yer değiştirme değeri
u_c	: Eksenel basınç etkisinde düşey yer değiştirme
u_{no}	: Maksimum normal gerilmeye karşılık gelen yer değiştirme (açılma) değeri
u_{nf}	: Maksimum açılma (mod I) yer değiştirme değeri
u_{so}	: Maksimum kayma gerilmesine karşılık gelen yer değiştirme değeri (triplet kayma testi)
u_{sf}	: Maksimum yer değiştirme değeri (triplet kayma testi)
u_s	: Kayma etkisinde yer değiştirme değeri
ν	: Poisson oranı
ν_m	: Duvarın kayma dayanımı
$\lambda; \lambda_b; \lambda_m$	: Hacim böleni; duvar birimi hacim böleni; harç hacim böleni
V_n	: Kesme kapasitesi
V_{dt}	: Duvarda diyagonal çekme hasarı oluşturacak kesme kapasitesi
V_{ft}	: Duvarda eğilmeden kaynaklı hasar oluşturacak kesme kapasitesi
V_{ss}	: Duvarda kayma hasarı oluşturacak kesme kapasitesi
w_b	: Tuğla biriminin genişliği
w_c	: Beton blok biriminin genişliği
W	: Tuğla biriminin ağırlığı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : ASTM C-270'e göre ağırlıkça duvar harç karışım oranları	16
Çizelge 2.2 : Farklı fiber tiplerin mekanik özellikleri	28
Çizelge 3.1 : S-tip küp harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri.....	42
Çizelge 3.2 : Z-şekilli numune testlerinin sonuçları.....	47
Çizelge 3.3 : Üçlü (triplet) kesme testlerin sonuçları	49
Çizelge 3.4 : Yatay derz (harç) arayüz kohezif rijitlik değerleri	53
Çizelge 3.5 : Fiber katkılı ECC harç üzerine literatür araştırması ve deneysel çalışma	62
Çizelge 3.6 : Bölme duvarların kesme kapasitesi test sonuçlarının literatürdeki farklı kodlardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması	89
Çizelge 3.7 : Deney sonuçlarına göre zarf eğrisi ve idealize edilmiş eğrilerden elde edilen duvarlara ait karakteristik değerler ve hasar tanımları	109
Çizelge 3.8 : Hasarlı duvarların CFRP şeritlerle ve tekstil takviyeli ECC2 harçla iyileştirme yöntemlerinin karşılaştırılması.....	117
Çizelge 4.1 : Duvar derzi (harç) arayüzüne ait kohezif değerler.....	121
Çizelge 4.2 : Hasarlı duvarların mikro modellerinde kullanılan parametreler	127
Çizelge 5.1 : Silindirik tüp birimlerde kullanılan harçlar.....	138
Çizelge 5.2 : TRCC silindirik tüp birimlerin geometrik özellikleri	142
Çizelge 5.3 : Monotonik yanal basınç test sonucu numunelerin yük taşıma kapasiteleri ve düktilitesi	149
Çizelge 5.4 : Monotonik yanal çekme test sonucu numunelerin yük taşıma kapasiteleri ve düktilitesi	153
Çizelge 5.5 : Çevrimsel yanal basınç test sonucu numunelerin yük taşıma kapasiteleri ve düktilitesi	156
Çizelge 5.6 : 100 mm uzunlukta silindirik TRCC tüp nümerik modellerin geometrik özellikleri	162
Çizelge 5.7 : TRCC tüp birimlerin nümerik analiz sonuçları.....	163
Çizelge 5.8 : Duvar formu ve ARG4L birimin çevrimsel basınç yüklemesi altındaki yük taşıma kapasiteleri ve düktilite değerleri.....	178
Çizelge A.1 : ARG4L için kümülatif enerji.....	198
Çizelge A.2 : ARG6L için kümülatif enerji.....	198
Çizelge A.3 : PVA4L için kümülatif enerji.....	199



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Tekstil takviyeli çimento bazlı kompozitler (TRCC) ve kısa fiber katkılı çimento bazlı kompozitler (FRCC).....	9
Şekil 1.2 : Tekstil malzeme türleri, Raoof ve diğ. (2017), Mobasher (2012)'den uyarlanmıştır.	10
Şekil 1.3 : TRCC'yi oluşturan bileşenlerin çekme kuvveti altında çalışma prensibi, Mobasher (2012)'den uyarlanmıştır.	11
Şekil 1.4 : Eğilme veya çekme yükü altında TRCC'lerin tipik doğrusal olmayan davranış modeli, Brameshuber (2006), Kong ve diğ. (2017)'den uyarlanmıştır.	13
Şekil 1.5 : TRCC tabaka sayısı, Mehl (2013)'ten uyarlanmıştır.	14
Şekil 2.1 : Düzlem içi deprem yüküne maruz kalan bir yığma bölme duvardaki tipik hasar modları.....	18
Şekil 2.2 : Bölme duvar hasar modlarının ön basınç (düşey) yüklemesi ile ilişkisi..	18
Şekil 2.3 : Khalaf'ın Z- şekilli numune test prosedürü ve tipik hasar tipleri.....	20
Şekil 2.4 : Bölme duvar mekanik özellikleri ve hasar modunun tahmini için bölme duvar bileşenleri ile oluşturulan test düzenekleri.	23
Şekil 2.5 : Benzeggagh-Kenane (1996) bileşke mod kohezyon kuralı.....	24
Şekil 2.6 : Duvar prizması yüzeyine uygulanan bazalt TRCC güçlendirmesinin kesme bağ testi hasar durumları, Caggegi ve diğ. (2017) ve Ferrara ve diğ. (2019)'dan uyarlanmıştır.	28
Şekil 2.7 : Tekstil- kısa fiber hibrid kompozitlerde kısa fiber uzunluğu ve tekstil ağ aralıkları ilişkisi.	30
Şekil 2.8 : Çekme yükleri altında FRC ve ECC karşılaştırması, Lepech ve diğ. (2010)'dan uyarlanmıştır.	31
Şekil 2.9 : Tekstil takviyeli kompozitlerin üretim yöntemleri, Durgun (2014), Eker (2014)'ten uyarlanmıştır.	35
Şekil 2.10 : Tekstil kompozitlerden oluşturulan yapısal elemanlara örnek çalışmalar.	36
Şekil 2.11 : Tekstil ağ aralığı-harç ilişkisi.	38
Şekil 3.1 : Kil tuğla birimi basınç dayanımı.	41
Şekil 3.2 : Beton blok birimi basınç dayanımı.	41
Şekil 3.3 : S-tip harç malzemesi ve kenar uzunluğu 5 cm olan küp harç numune kalıpları.	42
Şekil 3.4 : S-tip harç basınç dayanımı.	43
Şekil 3.5 : Üç sıralı tuğla prizma numune boyutları.	43
Şekil 3.6 : Üç sıralı tuğla prizma basınç deneyi ve tipik hasar durumu.	44
Şekil 3.7 : Üç sıralı tuğla numunelerin basınç gerilmesi-şekil değiştirme eğrileri....	45
Şekil 3.8 : Z-şekilli numunelerin üretimi.....	45
Şekil 3.9 : Z-şekilli numunelerin test düzeneği.	46
Şekil 3.10 : Z-şekilli numunelerin bağ dayanımı (mod I)- çatlak ucu açıklığı birim şekil değiştirme diyagramı.	47
Şekil 3.11 : Z-şekilli numunelerde hasar tipleri.	48

Şekil 3.12 : Tuğla-harç arayüz kayma bağ dayanımı için üçlü kesme test düzeneği.	49
Şekil 3.13 : Üçlü kesme test sonuçlarından elde edilen yük (kN)-yer değiştirme (mm) eğrileri.	49
Şekil 3.14 : Üçlü kesme test sonuçlarından elde edilen numune hasar modları.	50
Şekil 3.15 : Her bir test kurulumunun simülasyonu için kullanılan sayısal modeller.	52
Şekil 3.16 : Tuğla-harç arayüz modellemesinde kullanılan parametreler.	53
Şekil 3.17 : Üç sıralı tuğla prizma modelin sonlu elemanlar analiz sonucu elde edilen hasar tipi.	54
Şekil 3.18 : Üç sıralı tuğla prizma basınç testi simülasyonunun deneysel verilerle doğrulanması.	55
Şekil 3.19 : Z-şekilli deney numunesinin sonlu elemanlar analiz sonucu elde edilen hasar tipi.	56
Şekil 3.20 : Z-şekilli numune üç nokta eğme testi simülasyonunun deneysel verilerle doğrulanması.	56
Şekil 3.21 : Kayma bağ dayanımı testinin sonlu elemanlar analizi sonucu sayısal modelde elde edilen hasar tipi.	57
Şekil 3.22 : Kayma bağ dayanımı testi simülasyonunun deneysel verilerle doğrulanması.	58
Şekil 3.23 : Bazalt tekstil malzeme (ortogonal doğrultularda ağ aralığı 50 mm).	59
Şekil 3.24 : ECC2 ve ECC3 harçların basınç testi sonuçları.	63
Şekil 3.25 : Basınç yüklemesi altında ECC numunelerinde oluşan hasarlar.	63
Şekil 3.26 : Duvar temellerinin üretimi.	64
Şekil 3.27 : Tuğla bölme duvar yapımı.	65
Şekil 3.28 : Beton blok bölme duvar yapımı.	66
Şekil 3.29 : Tuğla bölme duvarların deney ve ölçüm düzeneği.	67
Şekil 3.30 : Yer değiştirme kontrollü düzlem içi yatay çevrimsel yükleme şeması.	68
Şekil 3.31 : Duvar TD06'nın hasar tipi.	70
Şekil 3.32 : Tekrarlı yatay yük etkisindeki duvar TD06'nın yük (kN)-yer değiştirme (mm) eğrisi.	70
Şekil 3.33 : Zarf eğrisinden idealize edilmiş eğrinin elde edilmesi.	71
Şekil 3.34 : Duvar TD06'ya ait zarf eğrisi ve idealize edilmiş eğri.	72
Şekil 3.35 : Duvar TD12'nin hasar tipi.	73
Şekil 3.36 : Duvar TD12 numunesinin alt köşe birimlerinde basınç ezilmesi.	74
Şekil 3.37 : Tekrarlı yatay yük etkisindeki duvar TD12' nin yük (kN)-yer değiştirme (mm) eğrisi.	74
Şekil 3.38 : Duvar TD12'ye ait zarf eğrisi ve idealize edilmiş eğri.	75
Şekil 3.39 : Beton blok bölme duvarın deney ve ölçüm düzeneği.	76
Şekil 3.40 : Duvar BD02'nin hasar tipi.	78
Şekil 3.41 : Tekrarlı yatay yük etkisindeki duvar BD02'nin yük (kN)-yer değiştirme (mm) eğrisi.	79
Şekil 3.42 : Duvar BD02'ye ait zarf eğrisi ve idealize edilmiş eğri.	79
Şekil 3.43 : Kayma hasarı oluşmuş BD02 duvar numunesinin yatay derzinin onarımı.	81
Şekil 3.44 : BD06 duvar numunesinin deney ve ölçüm düzeneği.	82
Şekil 3.45 : Yer değiştirme kontrollü düzlem içi yatay çevrimsel yükleme şeması.	83
Şekil 3.46 : Duvar BD06'nın hasar tipi.	84
Şekil 3.47 : Tekrarlı yatay yük etkisindeki duvar BD06'nın yük (kN)-yer değiştirme (mm) eğrisi.	85
Şekil 3.48 : Duvar BD06'ya ait zarf eğrisi ve idealize edilmiş eğri.	85

Şekil 3.49 : ECC2 harcın hazırlanması ve bazalt tekstil ile duvara uygulanma aşamaları.	91
Şekil 3.50 : BD06YG duvar numunesinin deney ve ölçüm düzeneği.	91
Şekil 3.51 : Duvar BD06YG'nin hasar tipi.	92
Şekil 3.52 : Tekrarlı yatay yük etkisindeki duvar BD06YG'nin yük (kN)-yer değiştirme (mm) eğrisi.	92
Şekil 3.53 : Duvar BD06YG'ye ait zarf eğrisi ve idealize edilmiş eğri.	93
Şekil 3.54 : Bazalt tekstilin duvar boyunca temele ankrajı.	94
Şekil 3.55 : BD12YG duvar numunesinin deney ve ölçüm düzeneği.	95
Şekil 3.56 : Duvar BD12YG'nin hasar tipi.	96
Şekil 3.57 : Düzlem içi yatay yük etkisindeki duvar BD12YG'nin yük (kN)-yer değiştirme (mm) eğrisi.	96
Şekil 3.58 : Duvar BD12YG'ye ait zarf eğrisi ve idealize edilmiş eğri.	97
Şekil 3.59 : TD12 numunesinin yüzeyine uygulanacak iyileştirme/güçlendirme işleminin planlanması.	98
Şekil 3.60 : TD12 duvar numunesi yüzeyine uygulanan iyileştirme/güçlendirme....	99
Şekil 3.61 : Tekstil bazlı ankrajın temele uygulanma detayı.	99
Şekil 3.62 : Duvarın bazalt tekstil kullanılarak temele ankraj işlemleri.	100
Şekil 3.63 : TD12YG duvar numunesi.	101
Şekil 3.64 : TD12YG duvar numunesinin deney ve ölçüm düzeneği.	102
Şekil 3.65 : Duvar TD12YG'nin hasar tipi.	102
Şekil 3.66 : Tekrarlı yatay yük etkisindeki duvar TD12YG'nin yük (kN)-yer değiştirme (mm) eğrisi.	103
Şekil 3.67 : Duvar TD12YG'ye ait zarf eğrisi ve idealize edilmiş eğri.	104
Şekil 3.68 : Tekrarlı yatay yükleme testi uygulanan beton blok duvarlarda düşey yükün etkisi.	105
Şekil 3.69 : Tekrarlı yatay yükleme testleri sonucunda duvar numunelerinin yük (kN) – yer değiştirme (mm) eğrilerinin karşılaştırılması.	105
Şekil 3.70 : TD12YG ve BD12YG iyileştirilmiş duvar numunelerinin yatay yükleme test sonuçlarının karşılaştırılması.	106
Şekil 3.71 : Duvar numunelerin idealize edilmiş eğrilerinin karşılaştırılması.	107
Şekil 3.72 : Tekrarlı yatay yükleme deneyleri sırasında beton blok duvarların rijitlik azalması (N/mm) – görelî yatay öteleme oranı (%) sonuçlarının karşılaştırılması.	111
Şekil 3.73 : Tekrarlı yatay yükleme deneyleri sırasında tuğla duvarların rijitlik azalması (N/mm) – görelî yatay öteleme oranı (%) sonuçlarının karşılaştırılması.	112
Şekil 3.74 : Duvarların ve güçlendirilmiş hasarlı duvarların farklı ön basınç yüklemeleri altında yatay yük (kN) - diyagonal yer değiştirme (mm) ve yatay yük (kN) - düşey yer değiştirme PI-3 (mm) grafikleri.	114
Şekil 4.1 : Sayısal modellemede kullanılan tuğla duvar ve beton blok duvar birimlerinin ve harcın malzeme özellikleri.	120
Şekil 4.2 : Tuğla duvarın (TD12) mikro modeli.	122
Şekil 4.3 : Sonlu eleman modeli TD12-N'nin deney sonucu ile doğrulaması.	122
Şekil 4.4 : TD12-N gerilme, plastik şekil değiştirme ve arayüz hasar sonuçları.	123
Şekil 4.5 : Beton blok duvarın (BD02) mikro modeli.	124
Şekil 4.6 : Sonlu eleman modeli BD02-N'nin deney sonucu ile doğrulaması.	125
Şekil 4.7 : BD02-N gerilme, plastik şekil değiştirme ve arayüz hasar sonuçları.	125
Şekil 4.8 : Duvarların ilk ve son çevrimdeki rijitlik değerleri.	126
Şekil 4.9 : Bazalt tekstil ipliği çekme dayanımı.	128

Şekil 4.10 : Sayısal modellerde duvar iyileştirmesi için kullanılan harçların malzeme özellikleri.	128
Şekil 4.11 : İyileştirme uygulanan hasarlı tuğla duvarın mikro modeli.....	129
Şekil 4.12 : Sonlu eleman modeli TD12YG-N'nin deney sonucu ile doğrulaması.	129
Şekil 4.13 : TD12YG-N'nin gerilme, plastik şekil değiştirme ve arayüz hasar sonuçları.	130
Şekil 4.14 : Derz güçlendirmesi uygulanmış beton blok duvarın mikro modeli (BD06-N).	131
Şekil 4.15 : Sonlu eleman modeli BD06-N'nin deney sonucu ile doğrulaması.	132
Şekil 4.16 : BD06-N'nin gerilme, plastik şekil değiştirme ve arayüz hasar sonuçları.	133
Şekil 4.17 : İyileştirme uygulanan hasarlı beton blok duvarın mikro modeli.....	134
Şekil 4.18 : Sonlu eleman modeli BD12YG-N'nin deney sonucu ile doğrulaması.	135
Şekil 4.19 : BD12YG-N'nin gerilme, plastik şekil değiştirme ve arayüz hasar sonuçları.	136
Şekil 5.1 : Silindir tüp form AR-glass TRCC üretim aşaması.....	140
Şekil 5.2 : Silindir tüp form PVA TRCC üretim aşaması.....	140
Şekil 5.3 : Üretilen silindir tüp TRCC'lerin kalıplanması.	141
Şekil 5.4 : 100 cm uzunluğunda ARG4L, ARG6L ve PVA4L silindirik tüpler.	141
Şekil 5.5 : 10 cm uzunluğunda silindir tüp birimlerin elde edilmesi.	142
Şekil 5.6 : TRCC silindir tüp numunelerin şekli ve deney kurulum şeması.....	143
Şekil 5.7 : Monotonik yanal basınç testi ve ölçüm düzeneği.....	144
Şekil 5.8 : TRCC silindir tüp numunelerin yanal çekme deneyi kurulum şeması... ..	144
Şekil 5.9 : Monotonik yanal çekme testi ve ölçüm düzeneği.	145
Şekil 5.10 : Yarı çevrimsel yanal basınç testi ve ölçüm düzeneği.....	145
Şekil 5.11 : Elastik bölge (Δd_e) ve inelastik bölge (Δd_p) için öngörülen yer değiştirme adımlarına sahip çevrimsel yük şeması.....	146
Şekil 5.12 : Monotonik yanal basınç yükü altında ARG4L, ARG6L ve PVA4L silindirik tüp birimlerin yük (N)- düşey yer değiştirme (mm) eğrileri.	148
Şekil 5.13 : Düşey yönde yanal basınca maruz TRCC numunelerin hasar modları.....	150
Şekil 5.14 : ARG6L numunelerde AR-glass tekstilin kopması.	151
Şekil 5.15 : Monotonik yanal çekme yükü altında ARG4L, ARG6L ve PVA4L silindirik tüp birimlerin yük (N)- düşey yer değiştirme (mm) eğrileri.	152
Şekil 5.16 : Düşey yönde yanal çekmeye maruz TRCC numunelerin hasar modları.	153
Şekil 5.17 : Düşey ekseninde çevrimsel yanal basınç yükü altında ARG4L, ARG6L ve PVA4L silindirik tüp birimlerin yük (N)- düşey yer değiştirme (mm) eğrileri.	154
Şekil 5.18 : Düşey yönde çevrimsel yanal basınç yüklemesi boyunca TRCC tüp birimlerde normalize edilmiş rijitlik azalması.	157
Şekil 5.19 : Silindirik tüp şeklindeki ARG4L, ARG6L ve PVA4L numuneleri için çevrimsel yüklemenin her bir çevrimi için toplam enerji, geri kazanılan enerji ve yayılan enerji değerleri.....	159
Şekil 5.20 : ARG4L, ARG6L ve PVA4L tüp birimlerin kümülatif toplam enerji, geri kazanılan enerji ve absorbe edilmiş enerji değerleri.	159
Şekil 5.21 : Çimento esaslı harcın mekanik özellikleri.	160
Şekil 5.22 : TRCC tüp birimlerin sayısal modelleme tekniği, mesnet ve yükleme koşulları.....	162

Şekil 5.23 : Yanal çizgisel basınç yüklemesi altında TRCC tüp test numunelerle nümerik modellerin karşılaştırılması.	164
Şekil 5.24 : Düşey yönde yanal basınç yüküne maruz nümerik TRCC tüp modellerin yatay (D_1/D_e) ve düşey (D_2/D_e) yöndeki birim şekil değiştirme değerlerinin karşılaştırılması.....	165
Şekil 5.25 : ARG4L-N'nin harç, tekstil tabakalarının hasar modu ve plastik birim şekil değiştirme değerleri (PEEQ ve PE).....	166
Şekil 5.26 : ARG6L-N'nin harç, tekstil tabakalarının hasar modu ve plastik birim şekil değiştirme değerleri (PEEQ ve PE).....	166
Şekil 5.27 : PVA4L-N'nin harç, tekstil tabakalarının hasar modu ve plastik birim şekil değiştirme değerleri (PEEQ ve PE).....	167
Şekil 5.28 : ARG4L silindirik tüp birimler.....	168
Şekil 5.29 : ARG4L birimlerle duvar formunun oluşturulması.....	169
Şekil 5.30 : Duvar formu diyagonal kayma deney düzeneği şeması.....	170
Şekil 5.31 : Duvar formu üzerindeki yer değiştirme ölçerler (LVDT).....	171
Şekil 5.32 : Diyagonal kayma deneyi yükleme şeması.	171
Şekil 5.33 : Diyagonal düşey yük (N)-düşey yer değiştirme (mm) eğrisi.	172
Şekil 5.34 : Diyagonal düşey yük (N)-yatay yer değiştirme (mm) eğrisi.....	172
Şekil 5.35 : Her çevrim için sekant rijitliklerinin bulunması.....	174
Şekil 5.36 : Duvar formu rijitlik azalması.	174
Şekil 5.37 : Duvar formunu oluşturan ARG4L birimlerin ve genel duvar formunun deformasyon şekilleri.....	175
Şekil 5.38 : Çevrimsel diyagonal düşey yükleme boyunca duvar formunun deformasyon durumları.....	176
Şekil 5.39 : Son çevrimde yükleme-boşaltma esnasında duvar formunun göçme durumu.	176
Şekil 5.40 : Duvar formunu oluşturan birimlerin hasar durumu.	177
Şekil 5.41 : ARG4L birim ve duvar formunun rijitlik oran (K_i/K_{maks})-görelî düşey yer değiştirme (Δ_i) grafiği.	179



TEKRARLI YÜKLER ETKİSİNDEKİ BÖLME DUVARLARIN ÇİMENTO ESASLI TEKSTİL KOMPOZİTLERLE İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Tuğla bölme duvarlar, Amerika, Avrupa ve Türkiye gibi bölgelerde yığma yapılarda ve betonarme yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yığma bölme duvarlar betonarme taşıyıcı elemanlara kıyasla daha düşük dayanıma sahip olup, sismik yüklere ve / veya zemin hareketlerine maruz kaldıklarında genellikle gevrek davranış sergileme eğilimindedirler. Bu özellik, bu tür elemanları şiddetli dinamik yüklere karşı savunmasız hale getirir ve elemanların yükleme yönündeki şekil değiştirmelerini sınırlar. Bu duvarların sergilediği kırılgan davranış için farklı güçlendirme teknikleri geliştirilmiştir.

Güçlendirmenin ve güçlendirme ile ilgili çalışmaların temel amacı, yapıların sünekliği ve yük taşıma kapasitesini artırmaktır. Yapısal elemanların taşıma kapasiteleri, süneklik dereceleri ve hasar durumları bir çok parametreye bağlıdır. Duvarların hasar mekanizmasını etkileyen parametreler ile ilgili olarak da duvar birimler, harcın mekanik özellikleri ve duvar bileşenlerinin geometrileri sayılabilir. Yığma yapılarda kullanılan duvarlar, aynı zamanda yapının taşıyıcı elemanı olarak kullanıldığından, yığma duvarda oluşan herhangi bir hasar tüm yapıdaki hasar modunu etkiler.

Günümüzde duvarların çatlama şekline ve hasar mekanizmalarına göre çeşitli güçlendirme metodları bulunmaktadır. Hasar mekanizmasına bağlı olarak duvarların güçlendirilmesi (veya iyileştirilmesi), yapının yük taşıma kapasitesini artırır. Bu sebeple, sismik yükler altında hasar görmüş bölme duvarların iyileştirilmesi veya hasarsız duvarların güçlendirilmesi önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, çeşitli güçlendirme sistemleri vasıtasıyla yığma ve dolgu duvarların mukavemet ve süneklik seviyesinin artırılmasına ilişkin uygulamada ve literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır.

Güvenli tasarım sınırlarını etkin bir şekilde korumak için dayanıklı, ekonomik ve kolay uygulanabilir duvar güçlendirme sistemleri için yöntemlerin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Dolayısıyla bu çalışma, günümüzdeki iyileştirme yöntemlerine alternatif bir yöntem olarak görülebilir.

Yığma duvar ve dolgu duvarların genel davranışı, akademik toplumlar ve mühendisler arasında hala tartışılmaktadır. Analitik ve sayısal araçlar kullanarak bu tür duvarların doğrusal olmayan davranışını bulmak için çok sayıda araştırma vardır. Tasarım kodlarındaki standart denklemler konunun yeni bulgularına göre değiştirilmektedir. Öte yandan duvar testlerinin zorlukları teknik literatürde yeterli kaynak bulmayı zorlaştırmaktadır. Deneysel çalışmaların eksikliği, çalışmaların ağırlıklı olarak sayısal araçlara odaklanmasına neden olmaktadır.

Hem dolgu hem de yığma duvarlar, tuğla duvar birimler ve yapıştırma bileşeni olarak harçlar ile yapısal kompozit elemanlar olarak kabul edilebilir. Duvarların hasarı, bileşenlerinin mekanik özelliklerine ve tuğla birimler ile harç arasındaki bağlantı parametrelerine bağlıdır. Bu nedenle, duvarın sismik performansını artırmak için

bileşenlerin mekanik özelliklerini ve bağ dayanımını iyileştirmek gerekir. Dolayısıyla, bu iyileştirmeler yapıların güvenli tasarım sınırlarına ulaşmasına yardımcı olur.

Bu çalışma, hasarlı duvarların tekstil takviyeli çimento esaslı kompozit (TRCC) malzemelerle güçlendirme yöntemlerini ele almaktadır. Bu amaçla deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Sayısal ve analitik modelleme tekniklerini geliştirmek için yapılan deneylerden yararlanılmıştır. Bu çalışmalara ek olarak, TRCC kullanılarak yeni bir yapısal form üretme üzerine deneysel çalışmalar da gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak, duvar bileşenlerinin malzeme, mekanik ve arayüz bağ özelliklerinin belirlenmesi için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar duvar birimlerinin basınç dayanımı testlerini, üçlü (triplet) kesme testlerini ve Z-şekilli numune testlerini kapsamaktadır. Yapılan bu testler ile tuğla duvar bileşenlerinin mukavemet ve hasar mekanizmaları belirlenmiştir. Bu kısımdaki deneysel çalışmalar kullanılarak numunelerin ayrıntılı modellemeleri geliştirilmiş olup, duvar birimleri arayüz bağ mekanik özellikleri elde edilmiştir. Elde edilen parametreler duvar mikro modellerinin oluşturulmasında duvar bileşenlerinin arayüz bağ özelliklerini tanımlamada kullanılmıştır.

Yaygın olarak kullanılan tuğla ve beton blok duvar elemanlarının düzlem içi yüklemeler altındaki mekanik davranışları ve hasar modları, duvarların malzeme özellikleri ve arayüz davranışı göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Duvar hasar mekanizması sadece harç ve tuğla malzemelerine bağlı olmayıp, aynı zamanda tuğla ve harç arasındaki bağ mukavemeti ile de ilgilidir. Harcın duvar birimleri ile bağlantılı olduğu yüzeyde kırılma davranışını tanımlamak için kohezif model ve Coulomb yasası kullanılmıştır. Sayısal çalışmalar, mod I (açılma) ve mod II'nin (kayma) kırılma biçimlerinin bileşkesinden oluşan bir arayüz modeline dayanmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi Benzeggagh-Kenane karma mod kohezif metoda dayanır. Bu metod, düzlem içi yükleme altında sadece mod I ve sadece mod II'nin parametrelerine bağlı bileşkeden oluşur ve duvar birimi-harç arayüzünde kohezyona ve sürtünme sonrası hasar davranışına izin verir. Aslında, duvara etkiyen yükler, yatay ve düşey yüklerin birleşimidir ve bu bileşke yükler altında hasar meydana gelir. Bu nedenle, duvar birimi-harç arayüzünde göçme durumunu incelemek için yüksek mukavemetli duvar birimi ve harç türleri seçilmiş; ve Benzeggagh-Kenane karma modu, duvar birimi-harç arayüzü için kullanılmıştır. Sayısal sonuçlar, deneysel sonuçlarla başarıyla doğrulanmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı, tekrarlı yükler altında duvar yapılarının süneklik seviyesini ve yük taşıma kapasitesini arttırmak için duvarların hasar mekanizmasını tespit etmek ve sonunda TRCC kullanarak güçlendirme yöntemi geliştirmektir. Bu bağlamda, güçlendirme malzemesi olarak TRCC'nin, hasar görmüş yığma duvarların iyileştirilmesinde ve onarılmasında kullanımı incelenmiştir. Bu nedenle, seçilen delikli kil tuğla ve delikli beton bloklardan oluşan duvar tipleri, deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Yapılan duvar testleri neticesinde oluşan hasar modlarına göre geliştirilen iyileştirme yöntemlerinin etkinliği incelenmiştir.

İyileştirme teknikleri, test edilen duvarların hasar modlarına göre adım adım geliştirilmiştir. Test sonuçlarından elde edilen duvar davranışlarına göre uygulanan iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir. Yeni bir iyileştirme yöntemi olarak da TRCC içinde bulunan sürekli liflere ek olarak, güçlendirmede kullanılan çimento harcı (ECC) kısa lifler ile güçlendirilmiştir. ECC (Engineering Cementitious Composites)'de kullanılan kısa lifler PVA malzemesinden üretilmiştir. Yeni hibrit kompozit malzeme olarak da adlandırılan bu yöntemin, yatay yükler sebebiyle kesme hasarı oluşan

duvarların iyileştirmesindeki kullanımı araştırılmıştır. Bu yeni hibrit kompozit malzemeyi kullanmanın temel amacı, hasarlı duvarların süneklik seviyesini daha da artırmak ve sismik yatay yüklere karşı duvara yeterli dayanımı sağlamaktır.

Testleri gerçekleştirilen duvar tiplerinin sayısal çalışmalarında, duvar bileşenleri ve duvar deneylerinden elde edilen parametreler kullanıldı. Tuğla duvarın, beton blok duvarın ve iyileştirme uygulanmış duvarların sayısal analizleri mikro modelleme teknikleri ve analitik yaklaşımlarla geliştirildi. Sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlarla, iyileştirme yöntemleri uygulanan duvar davranışları hakkında daha detaylı veriler elde edilmiştir. Test edilen duvar sistemlerinin doğrusal olmayan davranışı, sonlu eleman programı olan ABAQUS yazılımı kullanılarak simüle edilip elde edilen sonuçlar deneysel verilerle doğrulanmıştır.

Son olarak, TRCC'ler kullanılarak geliştirilmeye açık yeni duvar birimleri oluşturulmuştur. Üretilen TRCC birimlerinin davranışları mekanik olarak irdelenmiştir. Üretilen TRCC birimler süreksizlik noktası içermeyen ideal geometrik form olarak silindirik tüp şeklinde tercih edilmiştir. TRCC birimlerin üretimi için farklı malzeme ve örgü şekline sahip tekstil takviyeleri kullanılmıştır. TRCC tüp birimler, çimento esaslı harç malzemesine, farklı katman sayısında gömülü olarak bulunan tekstil malzemesinden oluşmaktadır. Farklı tekstil malzemesi ve farklı tabaka sayılarından oluşan TRCC birimler ayrı ayrı test edilmiştir. Testler, monotonik ve yarı-çevrimsel yükleme şemaları altında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaları yapılan TRCC tüp birimlerin her biri için sayısal analiz geliştirilmiş, gerilme ve hasar dağılımı incelenmiştir. TRCC silindirik tüplerin sonlu elemanlar analizi sonuçlarının deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür. Literatürde TRCC'lerin yapısal form oluşturmada kullanım alanı farklı şekillerde geliştirilmektedir. Bu çalışmada, TRCC tüp birimlerin bir araya getirilmesiyle oluşan yeni duvar formunda yük aktarımı, süneklik, enerji ve hasar durumunun incelenmesi için, duvar formunun yarı çevrimsel diyagonal basınç yüklemesi altında testi gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda yeni formun süneklik seviyesi ve hasar mekanizması incelenmiştir.



IMPROVING RETROFITTING METHODS FOR PARTITION WALLS UNDER LATERAL CYCLIC LOADING USING CEMENT BASED TEXTILE COMPOSITES

SUMMARY

The wall as a structural member may have different forms and materials in the constructional fields. The wall members have mainly been used to separate the areas. These members do not have strengths as high as the main structural elements such as columns, shear walls, etc., and enough toughness against seismic loads. However, the walls in masonry structures should also bear the axial and lateral loads in addition to its separation role. Therefore, retrofitting these types of walls in masonry structures has special concerns and importance to increase its bearing capacity against earthquake loads.

The masonry and infill walls have been widely used in regions like North America, Europe, and Turkey. The brick walls have been being used in reinforced concrete frames and masonry structures. These walls usually display brittle-like behavior and have negligible tensile strengths as they are exposed to seismic loads and/or ground excitations. This feature makes these types of members vulnerable to severe dynamic loads and to exhibit limited deformation capacity on the loading direction.

These walls have a brittle nature regarding their cracking and failures. Different retrofitting techniques have been being used for the brittle behavior exhibited by these walls. The desired behavior expected from the masonry walls is to endure the extreme loading conditions. Therefore, the ductility of these type of members should be increased to a sufficient level.

The main purpose of the studies related to the strengthening and retrofitting is to increase the ductility and the load-bearing capacity of the structures. There are several parameters that affect the damage mechanism of walls. These parameters involve the mechanical properties of the brick units and mortar and the bond performance of the constituents, and the geometry of the mortar joints. Since the masonry walls are being used as the load-bearing member of the structures in masonry structures, any damages would become essential for the entire failure mechanism. On the other hand, in reinforced concrete frames, the infill walls contribute only additional capacity to the overall performance of the structures which might be considered as a secondary factor. Hence increasing the ductility of infill walls, nevertheless, remains an important treatment to enhance the structural performance against severe lateral loads.

There are several strengthening tools according to the cracking shape and mechanisms of the walls. Strengthening (or retrofitting) of the walls, based on the damage mechanism, eventually increase the load-bearing capacity of the structure. Extremely damaged walls or under designed walls should be replaced or retrofitted to meet the performance requirements for the seismic loads. In this context, there are numerous studies in practice and literature, related to increasing the strength and ductility level of masonry and infill walls by means of various retrofitting systems. Therefore, there is a need to improve the methods for strong, affordable, and efficient wall and

strengthening systems in order to keep the safety design margins effectively. Hence this study can be viewed as to compensate for this deficiency.

The overall behavior of the masonry and infill walls has still been being discussed among the engineering communities. There are numerous researches to find out the nonlinear behavior of these types of walls using analytical and numerical tools. The standard equations in the design codes are being modified according to the new findings of the subject. On the other hand, difficulties of the wall tests, make it hard to find enough sources in the technical literature. The deficiency of the experimental works, impose the studies focus mainly on numerical tools.

Both infill and masonry walls can be considered as structural composite elements with their brick wall units and mortars as bonding component. The damage of the walls depends on the mechanical properties of their components and the bonding properties between the interface of brick units and mortar. Therefore, to increase the seismic performance of the wall, one needs to improve the mechanical properties of the components and the bonding performance. So, these improvements may lead to reach the safe design margins of the structures.

This study deals with the retrofitting methods for damaged walls with textile reinforced cementitious composite (TRCC) materials. An experimental campaign was conducted for this purpose. The tools for the numerical and analytical analyses were developed based on the test results. Additionally, a novel structural unit using TRCC was produced to develop new insight into the textile-reinforced composite usages.

Initially, the tests about the individual components of the wall units and their interface properties were conducted based on specific purposes. The experiment of Z-tests presents experimental studies and detailed micro-modeling on test setups to determine the strength and failure mechanism of brick masonry components. These experiments include compressive strength tests of masonry units, Red Clay brick masonry triplet tests, and Z-shaped flexural bond tests. These tests reveal the individual uniaxial strength of the unit types and the frictional behavior of the interfaces. The detailed models were able to construct with the parameters obtained from these tests. These parameters include the quantities related to the elastic, plastic, and fracture properties of the constituents and their interactions. The detailed micro-modeling of the walls was used to further investigate the response of these types of members.

A specific division of the experimental campaign aims to investigate the mechanical behaviors and failure modes of masonry components under the in-plane loadings, by considering the materials and the interface behaviors individually. A contact behavior based on the Cohesive Zone Model and Coulomb's Law was used to describe the fracture response of mortar joints for the numerical modeling. The finite element method is based on Benzeggagh-Kenane mixed-mode cohesive interface, allowing failure modes of masonry mortar joints, cohesion, and the frictional post-failure behavior. This model consists of pure mode I and pure mode II under the in-plane loading. Indeed, loads on the masonry are a combination of lateral and vertical loads, and failure occurs under these mixed loads. For this reason, brick and mortar types with high strengths were used to examine the failure state at the brick-mortar interface; and Benzeggagh-Kenane mixed-mode was used for the brick-mortar interface. The results obtained from the FE simulation showed the reliability of computational modeling methods for masonry bed joint behaviors and corresponding interface modeling. The mechanical response and failure modes of the masonry wall components with the different damage patterns were investigated and analyzed.

The main purpose of this study is to detect the damage mechanism of the walls and eventually develop the retrofitting systems using TRCC in order to enhance the ductility level and load-bearing capacity of masonry wall structures under lateral cyclic loadings. In this context, the TRCC, as retrofitting methods, has been investigated with regard to its usage in strengthening and retrofitting systems of the damaged masonry walls. Therefore, the well-known hollow clay brick and hollow concrete brick walls were selected to be investigated experimentally and numerically with respect to the damage mechanism. The obtained results about the damage and failure modes from the wall tests, were utilized to develop and investigate the retrofitting method.

The retrofitting techniques were developed step-by-step based on the damage modes obtained from the wall tests. The results of the tests were critically analyzed concerning the used retrofitting method. The retrofitting techniques were modified according to the need for retrofitting and the responses of the wall members. The mortar of TRCC was also reinforced with the short synthetic fibers in addition to the continuous long fibers included in the TRCC. The (short) fiber reinforced cementitious material is called engineering cementitious composites (ECC). The short fibers in ECC were produced by PVA material. This new hybrid composite material was analyzed regarding its retrofitting performance for the damaged walls under lateral extreme loadings. The main aim of using this new hybrid TRCC is to further increase the ductility level of the damaged walls as well as to provide sufficient strength to the wall against seismic loads.

The numerical works were conducted to provide further information about the retrofitting systems as well as to verify the experimental results. The numerical analyses of the walls were performed based on the micro-modeling techniques. In the micro-models, the virtual specimens of the walls involve the detailed modeling of each component and their corresponding interface properties. Hence the nonlinear behavior of the tested wall systems was simulated based on the virtual models using the commercial finite element framework, ABAQUS. The properties related to the brick-mortar interface were obtained from the triplet and the z-test results. The parameters of the model are based on the experimental data included in this study. The micro modeling technique of masonry walls is seen to be the best option for this type of member. The numerical results are consistent with the tests.

Lastly, new wall unit forms using TRCC were produced. A novel structural wall unit using the textile reinforced cementitious composites were manufactured and tested. These units can be considered as preliminary works of a novel structure. The TRCC units have cylindrical shapes in order to avoid singularities at the sharp corners. These TRCC units contain different textile materials with different long fiber patterns and various textile layers embedded in the mortar material. The mechanical responses of these units were obtained by experimental works. The tests of these units contain monotonic and cyclic loadings. Finite element analyses of these tests were conducted to obtain the damage mechanisms of each type of specimen. Numerical results of the TRCC cylindrical tubes comply with the experimental results. This newly emerging area of TRCC usage has been being developed in different forms among engineering practices. Then a new wall formation was assembled using these TRCC units. A new wall form consists of the TRCC tube units were formed to investigate the force transfer mechanism between the units. This investigation was performed by means of the diagonal compression test. The half-cyclic loading pattern was applied to this new form of a wall. The obtained test results were analyzed based on the damage mechanism, the ductility, and the energy-absorbing performance.



1. GİRİŞ

Duvar elemanları mimari ve inşaat alanlarında kullanım amacına göre dünyada farklı özelliklerde ve malzemelerle karşımıza çıkmaktadır. Mekanları bölme amaçlı kullanılan duvarların yük taşıma kapasiteleri taşıyıcı sistem elemanlarına göre oldukça düşük olup, deprem etkilerine karşı dayanıksızdır. Özellikle yığma yapılarda kullanılan bölme duvarların aynı zamanda taşıyıcı özellikte olması sebebiyle deprem etkilerine karşı dayanıklı hale getirilmesi ve hasarlı olan duvarların iyileştirilmesi önem taşımaktadır. Kuzey Amerika, Avrupa ve Türkiye’de özellikle yığma yapı duvarları ve tuğla bölme duvarları yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle betonarme çerçevelerde ve yığma yapılarda kullanılan tuğla duvarlar deprem ya da zemin hareketleri sebebiyle meydana gelen çekme gerilmelerini karşılayamazlar. Bu nedenle, yük doğrultusunda yeterli şekil değiştirme gösteremeyip gevrek davranış sergilerler. Bu gevrek davranış sırasında oluşan duvar hasarları için farklı güçlendirme teknikleri kullanılmaktadır.

Güçlendirme ve iyileştirme çalışmalarının temel amacı sünekliği ve dayanımı arttırmaktır. Yığma bölme duvarların yapımında kullanılan tuğla, taş, beton blok vb. malzemelerin özellikleri, harç malzemesinin yapışma kapasitesi, yatay ve düşey derz şekilleri gibi etkenler hasar biçimini oluşturmada oldukça etkilidir. Yığma yapılarda bölme duvarlar aynı zamanda taşıyıcı özellikte olduğu için duvarlarda meydana gelecek her türlü hasar tüm yapıyı etkiler. Betonarme yapılarda kullanılan bölme duvarların ise yapının ana taşıyıcı sistemine destek sağlayabilecek süneklikte ve dayanımda olması önemlidir. Duvarlarda meydana gelen çatlakların genişliğine, oluşum biçimine göre farklı onarım ve güçlendirme yöntemleri uygulanarak performansı artırılabilir. Yeterli deprem güvenliğine sahip olmayan binalarda, yeterli kalitede olmayan veya ağır hasar görmüş duvarların yenilenmesi gerekir. Bu sebeple, literatürde ve uygulamada yeterli deprem enerjisi absorbe ederek sünek davranış gösteren bölme duvarlar ve/veya hasar almış mevcut bölme duvarların iyileştirilmesini sağlayacak sistemler üzerinde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Dolayısıyla depreme dayanıklı, ekonomik, kolay uygulanabilir bölme duvar

sistemlerinin ve mevcut hasarlı duvarların güçlendirilme yöntemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalara sürekli ihtiyaç duyulmaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Yığma yapıların ve yapılardaki bölme duvarların davranışı hala yapı ve deprem mühendisliğinin tartışılan konuları arasındadır. Duvar elemanların doğrusal olmayan davranışını tahmin etmek için analitik ve nümerik bir çok araştırma yapılmaktadır. Bölme duvarların davranışları hakkında tasarım standartlarındaki formüller bu duvarların mekanik parametreleri hakkındaki yeni gelişmelere göre değişiklik göstermektedir. Fakat bölme duvarların deneyleri ile ilgili zorluklar ve bu nedenle literatürlerdeki deneysel çalışmaların eksikliği bölme duvar sistemlerinin analiz araçlarının geliştirilmesini de zorlaştırmaktadır.

Bölme duvarlar ister yığma yapılarda olsun ister betonarme çerçevelerde bulunsun, tuğla birimler ile harç malzemesinden oluşan yapısal kompozit elemanlardır. Duvarda meydana gelen hasarı bölme duvarı oluşturan birimlerin (tuğla, briket, vb.) ve harç malzemesinin mekanik özellikleri ve harç ile duvar birimi arasındaki bağ/yapışma özellikleri belirler. Böylece deprem yüklerine karşı arzu edilen dayanıma ve performansa ulaşmak için duvar elemanını oluşturan bileşenlerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Güvenli tasarım sınırlarına ulaşmak için elemanların mekanik performansları ile birbirleri ile yapışma özellikleri üzerinde durulması gerekmektedir.

Bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan hasarlı duvarların çimento esaslı kompozit malzemelerle iyileştirme teknikleri üzerinde durulmuştur. Bunun için deneysel çalışmalar ve analitik yöntemler kullanılarak sayısal modeller geliştirilmiştir. Ayrıca, tekstille güçlendirilmiş çimento esaslı kompozit malzemelerle (TRCC) yapısal birimler oluşturulmuş ve bu birimlerden duvar formu üzerine araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadaki TRCC yapımında farklı tekstil güçlendirme malzemeleri kullanım alanlarına göre seçilmiştir. TRCC kullanılarak üretilen yapısal elemanların performansları deneysel olarak araştırılmıştır. Bu çalışmanın esas amacı bölme duvarların hasar mekanizmasının belirlenerek, yatay çevrimsel yükler altındaki sünekliğinin artırılması ve yatay yük taşıma kapasitelerinin TRCC ile iyileştirilmesidir. Bu amaçla, ilk olarak, TRCC ile üretilen bölme duvar elemanlarını iyileştirme/güçlendirme alanında kullanım tekniklerinin etkisi araştırıldı. Bu sebeple,

dünyada yaygın kullanılan delikli kil tuğla ve delikli beton blok birimlerden oluşan duvarların hasar mekanizmaları detaylı şekilde deneysel ve nümerik olarak irdelenmiştir. Bölme duvarlarda meydana gelen hasar modlarına göre TRCC ile iyileştirme teknikleri adım adım geliştirilmiştir. Her adımda deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. TRCC, harç malzemesine fiber eklenip geliştirilerek duvar iyileştirilmesinde kullanılmıştır. Fiber ile güçlendirilmiş “hibrit” kompozit elemanlar yeni bir iyileştirme tekniği olarak kullanılmış olup hasarlı duvarların sismik yükler altında gerekli dayanımı geri kazanması amaçlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalara ek olarak sayısal modellemeler oluşturulup deneysel sonuçlar desteklenmiştir. Güçlendirilmemiş ve hibrit TRCC ile iyileştirilmiş duvarların detaylı mikro modelleme tekniği ile lineer olmayan davranışları modellenmiştir. Bahsi geçen duvarların lineer olmayan davranışlarının modellenmesinin geliştirilmesi deneysel veriler ile karşılaştırılarak geliştirilmiştir.

Çalışmanın son kısmında ise farklı TRCC elemanları ile duvar formu birimleri oluşturulmuştur. Bu TRCC birimler farklı tekstil güçlendirme malzemeleri kullanılarak üretilmiştir. Monotonik ve yarı-çevrimsel yüklemeler altında TRCC ile oluşturulan birimler, sayısal ve deneysel çalışmalarla analiz edilmiştir. Bu yapısal birimlerin bir araya gelmesiyle duvar sistemine süneklik kazandıracak bir form oluşturulması denenmiş, ve bu formun deneysel olarak yük aktarımı ve hasar durumunun oluşma şekli araştırılmıştır.

1.2 Konu ile İlgili Literatür Araştırması

Bölme duvar elemanı kullanım alanları olarak farklı malzemelerde ve formlarda sandviç panel bölme duvar oluşturma, yapısal malzeme olarak lifli polimer (FRP), fiber katkılı beton (FRC) ve tekstille güçlendirilmiş beton (TRC) malzemeler kullanılarak duvar güçlendirmeleri ve iyileştirmeleri üzerine literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları ve bu konu üzerinde yapılan son çalışmaların bir kısmından aşağıda bahsedilmiştir.

Schneider ve Bergmann (2008); bu çalışmada TRC ile yapılan farklı yapısal kabuk sistemleri oluşturma üzerinde durulmuştur. Yapıların şekil ve yük taşıma davranışına göre değişebilir formlarda olabileceği üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Örneğin kavisli ya da eğimli formlar gibi. Silindirik kabuk formlarının prefabrike yapısal kabuk (çatı) olarak endüstriyel kullanımları mevcuttur. Bu kabuklara eğilip bükme şeklinde

formlar vererek yüksek yük taşıma kapasitesi elde etmenin mümkün olduğu üzerinde durulmuştur. Tekstil takviyeli beton kullanımı ile esneklik ve dayanım arttırıldığı gözlenmiştir. Aachen Üniversitesi Yapısal Beton Enstitüsünde yapılan altı kat AR (alkali dirençli)-cam takviyesi ile yapılan boyutlandırma süreci takip edilerek yarı silindirik formlu yapısal eleman üretimi gerçekleştirildi. Matris ve tekstilin biçimlenebilirliğinin kullanılması ve üretim tekniğinin araştırılması gerektiği üzerinde durulmuştur.

Al-Saadi ve Al-Mahaidi (2016); betonarme elemanları güçlendirmek için karbon elyaf takviyeli polimerin (CFRP) beton içerisinde kullanımı üzerinde durulmuştur. Beton yüzeyi ve CFRP şeritleri arasındaki bağ davranışını sonlu elemanlar ile modelleyerek, deneysel çekme testi ile öngöründe bulunulmuştur. Alüminyum plaka üç boyutlu elastik izotropik olarak modellenip, CFRP şeridi tek yönlü izotropik malzeme olan çimento esaslı yapıştırıcı içine gömülü olarak modellenmiş ve çekme uygulanmıştır. Tahmini nihai yükler, hasar modelleri, gerilme dağılımları, arayüzdeki bağ gerilme-kayma ilişkileri sonlu model ve deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu ve CFRP ile güçlendirilmiş betonarme elemanlar için geliştirilmiş nümerik modelin kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir.

Colombo ve diğ. (2013); bu araştırmada çimento esaslı tekstil takviyeli betonarme elemanları geliştirirken daha küçük kesitlerle daha yüksek kuvvetlerde dayanım elde edildiği gösterilmiştir. Farklı parametreler kullanılarak çekme testleri yapılmıştır. Bu parametreler takviye oranı, tekstil geometrisi, kür koşulları, yer değiştirme hızı ve numune boyutudur. Bu çalışmada kür koşulları kompoziti oluşturan matrisin büzülmesini etkilediğinden bağ mukavemetinde etkilediği tespit edilmiştir. Büzülme ne kadar fazla ise bağ mukavemeti de büyük olmaktadır. İlk çatlamanın oluşumu ve dayanımda artış elde edilmiştir. Çalışmada şekil değiştirme hızı ile olan ilişkisine de değinilmiştir. Diğer çimento esaslı malzemelerdeki gibi yer değiştirme hızının azalması ile meydana gelen dayanım ve süneklik kaybının büyük çatlak model dağılımı ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Kayma etkisi sebebiyle (creep effect) rijitlikte artış gözlenmiştir. Bu konunun daha araştırılması gerektiğini belirtmişlerdir. İncelenen boyut etkisinde ise dayanımda etkin bir değişikliğin olmadığı, boyutun artması ile sünekliğin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Martins ve diğ. (2015); bu çalışmada dolgu duvarların deprem etkileri altında düzlem dışı hareketi ve oluşan hasar üzerinde durulmuştur. Uygulanacak yenilikçi

güçlendirme çözümü üzerinde durularak yük altında tekstil takvyeli harç (TRM) ile güçlendirilmiş duvarda düzlem dışı direncin ve sünekliğin artırılması üzerine çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Bu şekilde sismik hareketler sonucunda tuğla duvarın dağılması önlenmiş olmaktadır. Karbon fiber ile güçlendirilmiş duvar, güçlendirilmemiş duvara göre 5 kat daha güçlü iken, cam elyaf kullanıldığında güçlendirilmemiş duvara göre 3 kat daha güçlü olduğu tespit edilmiştir. Süneklik parametresinin ise cam elyaf kullanılığında daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Cam elyaf ile güçlendirilmiş duvara çevrimsel olarak yük uygulandığında dayanımı eksponansiyel olarak hızlı bir şekilde azalırken, karbon elyaf örgüler kullanılarak güçlendirilmiş duvarda dayanım doğrusal olarak azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Fan, Yang ve Zhou (2011); çok katmanlı paneller, ince tek katmanlı dokuma sandviç panellerden oluşturularak enerji emme kapasitesi yüksek elemanların oluşturulması üzerine araştırma yapılmıştır. Gerilme-uzama ve enerji emme kapasitelerini ortaya çıkarmak için quasi-statik basma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çok katmanlı panelin, aynı kalınlıkta üretim paneline göre enerji emilimi ve yük dayanım kapasitesi çok daha yüksek bulunmuştur.

Wadley, Fleck ve Evans (2003); metal tekstil sandviç paneller sonlu elemanlarla çeşitli formlarda oluşturularak denemeler yapılmıştır. Bunlardan bal peteği formunun düşük bağıl yoğunluğu, yüksek dayanımı ve yüksek burkulma direncine sahip olduğu tespit edilmiştir. Belirli yükler için farklı form ve geometrilere bağlı kırılma mekanizmaları ve performansları incelenmiştir. Yüzeylerde meydana gelen pekleşmeden sonra, tekrar yük dağılımı oluşmakta ve bir miktar yük kapasitesinin arttığı görülmektedir. Bununla ilgili çalışmaların sürdüğü belirtilmiştir. Uzunluğun kalınlığa oranı (L/H) 8'den büyük ise gerilme ve geniş plakalardaki dayanımın asimptot olarak ilerlediği sonucuna ulaşılmıştır.

Brameshuber (2006); çimento esaslı tekstil kompozit malzemelerin yapı elemanı olarak kullanılması üzerine RILEM (The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures) raporu hazırlanmıştır. Geliştirilen çok katmanlı kompozit plakalar ve tüpler ile dayanımın artırılması sağlanmıştır. Çok katmanlı kompozitlerde kullanılan çimento esaslı tekstil ile hareketli yük ve deprem yüklerine karşı dayanımın artırılmasının sağlanabileceği üzerinde durulmuştur. Daha ince kesit kullanılarak oluşturulan duvarlarda yüksek dayanım ve düktilite sağlanırken, korozyona karşı yüksek direnç elde edilmiştir. Benzer şekilde, çimento esaslı tekstil

kompozit malzemelerle oluşturulan daha ince çeperli boru elemanlarda dayanım yüksek olup, hidrolik basınç ile oluşan iç basınçlara dayanıklı alt yapı elemanları üretilebileceği gibi, kolon veya kiriş elemanları gibi üstyapı taşıyıcı elemanlarında üretilebileceği tespit edilmiştir.

Lignola, Prota ve Manfredi (2009); yenilikçi çimento bazlı matris kompozit ızgara sistemi (CMG) ile güçlendirilmiş tuf taş duvarlarının düzlemsel tepkisi üzerine yapılan deneysel çalışmaları kapsamaktadır. Tuf taş duvar ile güçlendirilen malzeme arasında bağ özellikleri başarılı şekilde sağlanmıştır. CMG sisteminin farklı düzende uygulamaları ile dayanım ve pik sonrası davranışta iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Güçlendirmenin duvarın başlangıç rijitliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir. Bu durum, güçlendirmenin mevcut yapının davranışı üzerinde daha az etkisi olduğunu göstermiştir.

Shabdin, Zargaran ve Attari (2018); bu çalışmada taş duvarların tekstil takviyeli harç ile güçlendirilmesine ilişkin deneyler yapılmıştır. 10 adet duvara diagonal (kesme) çekme testi yapılarak, güçlendirme sisteminin tuğla duvar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bir düz duvar referans olarak test edildi. Daha sonra 2 duvar 1.5, 2.5cm kalınlığında yüksek dayanımlı harç ile herhangi bir yüzüne tekstil tabakası uygulanmaksızın test edilmiştir. Diğer 7 duvar 1.5, 2.5 cm kalınlığında Ar-Glass tekstil takviyeli harçla (TRM) bir yüzeyi ve iki yüzeyi güçlendirilerek kesme testi uygulanmıştır. Tek yüzey güçlendirildiğinde düzlem dışı hareket ve kırılmanın meydana geldiği saptanmıştır. Tekstil takviyeli harç ile diagonal yük taşıma kapasitesi ve yer değiştirme kapasitesinin arttığı gözlenmiş olup sistem sünek davranmıştır. Tuğla ya da taş duvarların bu sistem ile güçlendirilmesinde farklı dayanım elde etmedeki parametreler tekstil malzemesinin tipi, örgüsü, harcın tipi ve tekstil takviyeli harcın miktarı-kalınlığı olduğu tespit edilmiştir.

Reboul, Larbi ve Ferrier (2018), duvarların düzlem dışı davranışını incelemek ve güçlendirmek için keten lif takviyeli polimer (keten FRP) ve cam elyaf takviyeli çimento esaslı kompozit (GTRC) kullanmışlardır. Beş tuğla duvara iki yönlü monotonik eğilme testi uygulamışlardır. Takviye uygulanmış üç duvar ve bir tamir edilmiş duvar test edilmiştir. Her bir güçlendirilen duvarın performansı, düzlem dışı yük kapasitesi, süneklik, enerji yayılımı ve çatlak düzeni incelenmiştir. Düzlem dışı yük kapasitesinde, süneklik ve yer değiştirme kapasitesinde %20-%30 artış görülmüştür. Yük kapasitesi ile ilgili analitik bir çalışma ile deneysel verilerin

desteklendiği görülmüştür. GTRC daha geniş bir gerilme yayılımına tekrardan olanak verirken, daha yüksek deformasyon kapasitesi ve daha yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu tespit ile sismik güçlendirme çözümlerine de olanak sunulmuştur.

Reboul ve diğ. (2018), bu araştırmada bir referans duvar ile birlikte TRC ve FRP kompozitlerle güçlendirilmiş dört duvarı ele almıştır. TRC ve FRP kompozit malzemelerin duvarların dış yüzeyine yapıştırılarak duvarların güçlendirilmesi sağlanmıştır. Çalışmada güçlendirici malzemeler tüm duvar yüzeyine uygulanmamış olup, dikey olarak takviye edildi. Düşey yük ve döngüsel tersinir yatay yer değiştirmeler altında her bir duvar göçme olana kadar test edilmiştir. Yük yer değiştirme sonuçlarına bakılarak hasarın analizi yapılmıştır. Reboul ve diğ. (2018), farklı duvarların hasar modları ve performans parametrelerini temel alan karşılaştırmalı bir çalışma sağlarken, farklı malzeme kullanılarak yapılan güçlendirme ile yük kapasitesi, süneklik, rijitlik degradasyonu, absorbe edilen enerji gibi avantajlarını vurgulamışlardır. Düşey yükte TRC ile güçlendirilmiş duvar, FRP ile güçlendirilmiş görece daha sünek davrandığı gözlenmiştir. FRP ile güçlendirilen duvarlarda ise başlangıç hasarının (çatlak), TRC ile güçlendirilen duvara göre daha geç olduğu tespit edilmiştir.

Koutas ve diğ. (2019) çalışmalarında, tekstil takviyeli beton (TRC) veya fiber takviyeli çimento bazlı matris (FRCM) veya tekstil takviyeli harç (TRM) olarak da literatürde bilinen malzemenin kırılma davranışının, enerji emiliminin, hasar mekanizmasının ve hasar modunun etkisini incelemişlerdir. Betonarme elemanlarının TRC ile güçlendirilmesinin, fiber takviyeli polimer (FRP) malzemelerle güçlendirilmesine iyi bir alternatif olabileceği gösterilmiştir. TRC'nin güçlendirme malzemesi olarak farklı tekniklerde ele alınması ve farklı yapı elemanları ile kullanılması üzerine oluşturduğu avantaj ortaya konmuştur.

Kouris ve Triantafillou (2018), depremlere karşı en savunmasız olan yığma duvar yapıları için yeni geliştirilen tekstil takviyeli harçlar (TRM) ile duvarların bir yüzüne veya her iki yüzüne farklı teknikler kullanarak güçlendirme çalışmaları yapmışlardır. Lif takviyeli polimerlerin (FRP) aksine, TRM'de yüksek mukavemetli lifler inorganik bir matrise gömülüdür. Genellikle çimentolu bir harç olan matris ile geçirgenlik artırılırken, daha düşük maliyetler ve yüksek sıcaklıklarda daha iyi performans elde edilmiştir.

Bernat-Maso ve diğ. (2014), tuğla-harç sıra birimlerden meydana gelen yığma duvar numuneleri için farklı tip tekstil takviye malzemeleri kullanarak püskürtmeli harç güçlendirme sistemlerini araştırmışlardır.

Papanicolaou, Triantafillou ve Lekka (2011), çevrimsel yüke maruz kalan yığma duvarlarının yük taşıma ve yer değiştirme kapasitesini arttırmada duvar yüzeylerine uygulanan çimento esaslı tekstil malzemenin etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada FRP'ye karşı TRM (tekstille güçlendirilmiş harç) ile güçlendirmenin avantajlarına da değinilmiştir.

Triantafillou, Karlos, Kapsalis ve Georgiou (2018), TRM ile güçlendirilen duvarlara ısı yalıtım malzemelerinin de entegre edilmesi ile oluşturulan yeni sistemin yapısal davranışını (sismik dahil) ve enerji yutma kapasitesini deneysel olarak incelemişlerdir. Deney sonuçları, TRM ve yalıtım malzemesinin duvar yüzeyinde farklı konumlandırılmasının, farklı katmanlar arasında yeterli bağlanma/yapışma sağlandığı sürece, güçlendirilmiş duvarın düzlem içi tepkisinde önemli bir rol oynamadığını kanıtlamıştır.

Arslan ve Celebi (2019), tekstil takviyesi ile güçlendirilmiş gaz beton blok duvarların yanal çevrimsel yük altındaki davranışını incelemişlerdir. İncelenen güçlendirme malzemesi alkaliye dayanıklı cam polipropilen elyaftan yapılmış çok eksenli hibrit tekstil ve hidrolik-kireçli beyaz çimento esaslı harçtan oluşmuştur. Özellikle duvarın iki yüzeyinin güçlendirilmesi sonucunda mukavemet ve süneklik kapasitesinin önemli ölçüde arttığı sonucuna varılmıştır.

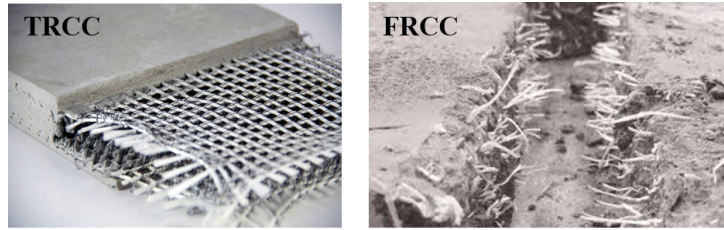
Mustafaraj ve Yardim (2019); bu çalışmada kesme hasarına sahip duvarların, polipropilen fiber takviyeli harç, galvanizli çelik hasır ve karbon fiber takviyeli polimer sargılar kullanılarak farklı tekniklerle güçlendirilmeleri araştırılmıştır.

Deng ve diğ. (2019); bu çalışma 3 fazdan oluşmuştur. İlk olarak, güçlendirilmemiş duvarın göçme öncesi hasar durumuna kadar sarsma masasında testleri yapılmıştır. İkinci fazda yatay ve düşey doğrultularda kaynaklı tel kullanılarak ızgara sistem oluşturulup, iyileştirilen duvarların testleri gerçekleştirilmiştir. Üçüncü fazda polivinil alkol (PVA) fiber takviyeli çimento esaslı kompozit malzeme ile iyileştirme yapılmış ve test edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, üçüncü faz çalışmalarının sonuçlarının, ikinci faz çalışmalarından elde edilene göre daha etkili bir sismik dayanım (kesme kapasitesi ve hasar toleransı) gösterdiği ortaya konmuştur.

Yacila ve diğ. (2019), yanal çevrimsel yükler altında çelik takviyeli (çelik tellerden oluşan ızgara sistem) harç ile iyileştirilen hasarlı tuğla duvarların değerlendirilmesi üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bunun sonucunda, yatay yer değiştirme kapasitesi, enerji yutma kapasitesi ve rijitlik azalması üzerinde olumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

1.3 Tekstil ve/veya Fiber Takviyeli Çimento Bazlı Kompozit Malzemelerin Özellikleri ve Kullanım Alanları

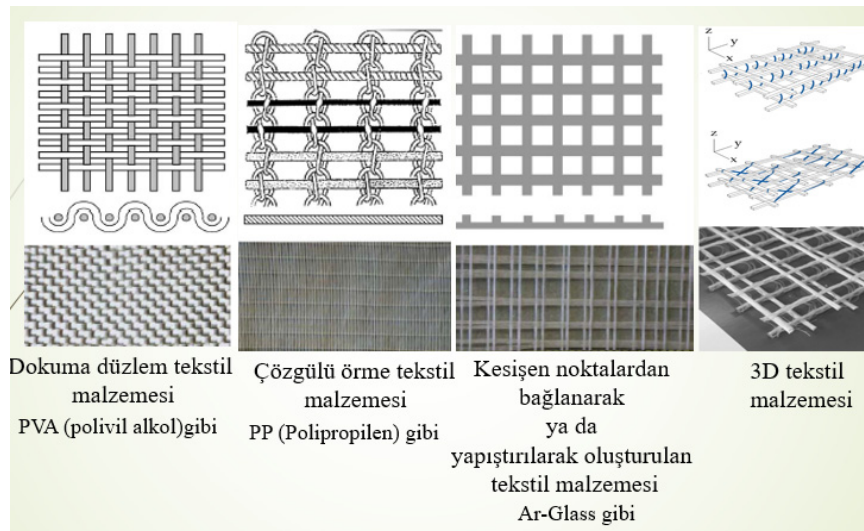
Tekstil ve/veya fiber takviyeli çimento bazlı kompozit malzemeler günümüzde birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Bu kompozit malzemeler üretim kolaylığı sağlaması, hafif olması, yüksek dayanım ve süneklik özellikleri göstermesi, korozyona karşı dayanıklı olması sebebiyle sadece yapı sektöründe değil, uçak ve otomobil endüstrisinde de tercih edilmekte ve araştırma konusu olmaktadır. Üreticiler veya form ve fonksiyonu birleştirmek arayışında olan tasarımcılar için bu kompozit malzeme birçok avantaj sunmaktadır. Şekil 1.1 ile gösterilen tekstil takviyeli çimento bazlı kompozitler (TRCC) veya fiber katkılı çimento bazlı kompozitler (FRCC); metaller, plastikler ve polimer matrisli kompozitlere göre, yanma dayanımı, donma dayanımı ve hafifliği gibi özellikleriyle avantajlı ve alternatif olabilecek, kolay şekil verilebilen malzemelerdir.



Şekil 1.1 : Tekstil takviyeli çimento bazlı kompozitler (TRCC) ve kısa fiber katkılı çimento bazlı kompozitler (FRCC).

Yapısal uygulamalarda TRCC ve FRCC'ler yük taşıma elemanlarının yapımında veya güçlendirme/iyileştirme malzemeleri olarak kullanılabilir. Matris ve takviye malzemesinden oluşan bu kompozitlerde çimento bazlı matrisin ve uygun tekstil veya fiber malzemesinin seçimi oldukça önemlidir. Genel olarak, çimento esaslı tekstil kompozitler ince daneli matrise gömülü çok eksenli (2 boyutlu veya 3 boyutlu) uzun sürekli fiberlerden veya kısa fiberlerden oluşur (Hegger ve Voss, 2008; Brameshuber, RILEM rapor 36, 2006). Bu yönüyle, basıç, çekme ve eğilme dayanımları yüksek, ince

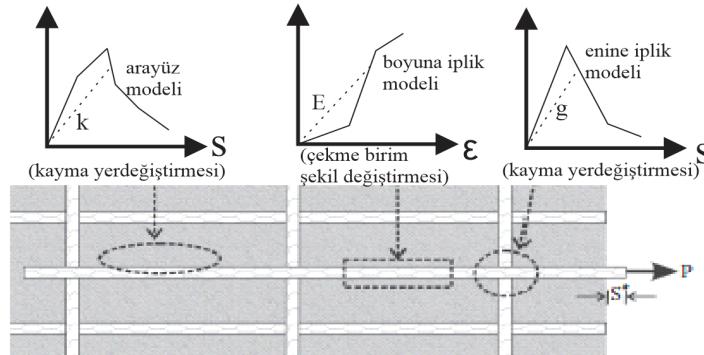
yapısal elemanlar üretilir. Hasar toleransını arttırmak için amaca göre farklı fiber veya tekstil tipleri kullanılabilir. Bu yaklaşım genel olarak bölme veya yığma duvar dizaynında, güçlendirilmiş beton yapılarda ve yüzey güçlendirme durumlarında kullanıldığı görülmektedir (Paulay ve Priestley, 1992; ACI 440.2R-02 teknik raporu, 2002). TRCC ve FRCC'ler için kullanılan çimento esaslı matris kompozite şeklini veren yapıdır. Bu sebeple, çimento esaslı matrisin yüksek mukavemet, yüksek elastik uzama, yüksek kayma mukavemeti, darbe dayanımı, düşük ısı iletkenlik, takviye malzemesi tekstil veya kısa fiberle iyi bağ oluşturma, kimyasallara ve çözücülere dayanım gibi özellikleri dikkate alınır. Seçilecek çimento esaslı matrisin tekstil veya fiber tipleriyle uyumlu olması, fiber malzemeleri birarada tutması ve yükün lifler arasında homojen olarak dağılarak lifler arası gerilimi sağlaması önemlidir. Fiberler içerisine nüfuz eden uygun çimento harçlarıyla güçlü kenetlenme gösterir ve yüksek derecede aderans oluşturur (Mobasher, 2012; Peled ve diğ., 2006; Triantafillou, 2016). Tekstiller çift doğrultuda, çok sayıda filamentin enine ve boyuna ızgara sistem ya da birbirlerinin altından ve üstünden geçirilmesiyle dokuma sistem olarak meydana gelir. Bu enine ve boyuna filamentler çözgü ve atkı olarak isimlendirilir. FRP'ler uygulandığında tek doğrultuda güçlendirme sağlarken, TRCC'ler her iki doğrultuda da güçlendirme sağlar. Tekstillerin çekme dayanımı ve mekanik özellikleri kullanılan fiber özellikleriyle, kalınlıklarıyla, fiber sıklığıyla ve sayısı ile ilişkilidir.



Şekil 1.2 : Tekstil malzeme türleri (Raoof ve diğ., 2017; Mobasher, 2012).

Tekstil malzeme tipleri ve örnekleri Şekil 1.2'de verilmektedir. Dokuma düzlem tekstil malzeme sık örgülerden oluşur. Bu sebeple, dokuma tipi tekstil malzemesi ile

kullanılacak matrisin daha akışkan seçilerek fiberlerin arasına ve tüm yüzeylerine ulaşması ve temas etmesi sağlanmalıdır. Oluşumlarına göre farklı tekstil tipleri ve tekstil fiber türleri (PVA, PP, PE, AR-glass, karbon, bazalt, aramid gibi) farklı mekanik özelliklere sahiptir. Tekstil türleri kullanılacak yer ve amaca göre farklı alternatifler sunabilmektedir (Gencoglu, 2009). Karbon ve kevlar (aramid) çekme dayanımları sırasıyla 3950 MPa ve 2542 MPa olup, oldukça yüksek çekme dayanımlarına sahip tekstil malzemelerdir. (Taşkın, 2015). AR-glass fiberlerin çekme dayanımı 1276 ile 2448 MPa arasında değişirken, PVA fiberlerin çekme dayanımı 920 MPa'dır (Peled ve diğ., 2006). AR-glass tekstilin rijitlik ve çekme dayanımı PP ve PE'ye göre yüksekken, PP'nin enerji emme kapasitesi AR-glass ve PE'ye göre yüksektir. Tekstil tiplerinin çimento esaslı matrisle olan bağ gücü karşılaştırıldığında, en yüksekten düşüğe doğru sıralandığında, AR-glass, PVA, PP ve PE'dir (Sueki ve diğ., 2007; Mobasher, 2012). Bağlayıcı çimento ile tekstil malzemesinin aderansın yüksek olması kompozit malzemenin tam kapasiteye yakın çalışabileceği anlamına gelmektedir. Yapılan çalışmalarda çekme kuvveti uygulandığında Şekil 1.3 ile gösterilen kompozit malzemede ilk olarak dayanımın daha düşük olduğu bağlayıcı kısımda çatlakların oluşup, maksimum aderans kuvveti aşıldığında tekstil matris arayüzde hasar meydana geldiği gözlemlenmiştir (Soranakom ve Mobasher, 2009; Mobasher, 2012).



Şekil 1.3 : TRCC'yi oluşturan bileşenlerin çekme kuvveti altında çalışma prensibi (Mobasher, 2012).

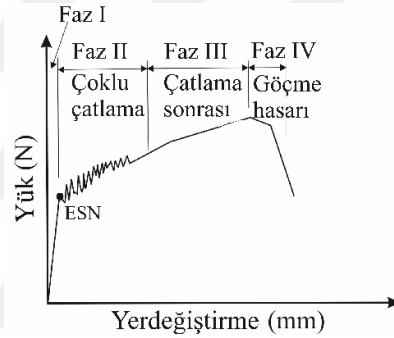
FRCC'ler çimento bazlı matrise kısa fiberlerin eklenip homojen dağılması ile üretilir. Fiberler metal veya polimer esaslı olabilir. Fiberler plastik büzülme ve çatlamaya daha fazla direnç sağlamaya katkıda bulunur. Bu kısa fiberler çimento esaslı harç üretilme sırasında ilave edilir. Kısa fiberler donatı demiri gerektirmeyecek kalınlıkta betonda ve çimento bazlı harçlarda, püskürtme betonda veya ince kaplamalarda kullanışlıdır.

Darbelere, titreşimlere ve patlamalara karşı iyi direnç gösterir (Fowler, 2009). FRCC'ler rastgele şekilde homojen olarak dağılmış kısa fiberlerden oluşması sebebiyle, hasar şekli dağınık ve yayılmış şekilde çatlaklardan oluşur. Bu sebeple, özellikle yapısal elemanlarla kullanıldığında kesme davranışına olumlu katkılar sağlar, sünek davranışın ve haberli göçme şeklinin oluşmasına olanak sunar. Kısa fiberlerde fiber uzunluğun ve fiberlerin matris içerisindeki hacimsel oranı kompozitin mukavemetini etkileyen parametrelerdir. Yapılan çalışmalar fiberin çimento esaslı harcın içerisinde maksimum % 2 oranında bulunması kompozitin etkili çalışmasında etkili olduğunu göstermektedir. Fiberlerin uzun kullanılması ya da matris içerisinde hacimsel oranının artması çimento esaslı kompozitin çekme dayanımını bir miktar arttırmasına rağmen, basınç dayanımının bir miktar azalmasına sebep olmaktadır (Özel ve Öz, 2016).

Tekstil ve kısa fiber malzemelerle kullanılacak harcın mekanik özellikleri, kompozitlerin basınç dayanımını etkileyen en önemli parametredir. Bunun için çeşitli çimento bazlı harçlar geliştirilmektedir. Polimer modifiyeli çimento esaslı harçlar veya kısa fiber katkılı tasarlanmış çimento esaslı harçlar (FRCC ya da ECC) olarak kullanılabilen, çimento, silika kum, uçucu kül, silis dumanı gibi ince daneli malzemelerin istenilen dayanıma göre belirli oranlarda karıştırılıp, polimer katkısı ya da fiber ilavesi ile düktilitede, hasar mekanizmasında, çekme ve kesme dayanımında avantajlı özellikler elde edilebilen, geliştirilmeye açık harçlardır. Polimer modifiyeli çimento esaslı harçlar sünekliği arttırmada oldukça etkilidir. Toz halindeki polimer katkı (parçacık çap boyutu 100~200 nm), çimento harcı prize başlamadan önce filamentler arasındaki boşluklara nüfuz edebilir. Aynı zamanda, polimer katkı matris ve tekstil arasında güçlü yapışma sağlar. Oluşan polimer katkılı çimento esaslı harçlar ayrıca kimyasal dayanım da sağlayabilmektedir. Kürleme işlemi ise beton ve çimento esaslı diğer harçlardan farklılık gösterir. Polimer modifiyeli çimento esaslı harçlar kuru kürlemeye ihtiyaç duyar, ve su ile kürleme süresi standart kürleme süresine (28 gün) göre oldukça kısadır. Harç akışkanlığı, viskozitesi ve işlenebilirliği yüksektir. (Pascal ve diğ., 2004; Pacheco-Torgal ve Jalali, 2009; Daskiran ve diğ., 2016; Daşkiran, 2018).

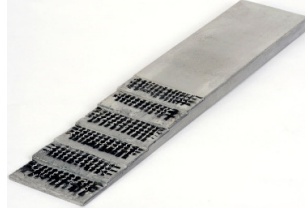
Fiber katkılı çimento esaslı harçlarda işlenebilirlik, polimer modifiyeli harçlara göre daha düşüktür. Fiber katkısının çimento esaslı matrise sağladığı süneklik, şekil değiştirme kapasitesi, çekme ve eğilme dayanımlarındaki artış ve kırılma mekanizması

özelliklerinde sağladığı avantajlı durum, özellikle güçlendirme ve iyileştirme malzemesi olarak kullanımlarda avantaj sağlayacağı görülmektedir. Çimento esaslı harç içerisindeki fiberler, harç içerisinde kullanılacak başka bir güçlendirme malzemesi ya da elemanı ile harç arasında bağ kurmayı zorlaştırabilir ve aderansı azaltabilir. Bu sebeple, belirli oranlarda kullanılması çok önemlidir. Örneğin tekstil malzemesi FRCC'ler ile kullanıldığında harcın tekstil ile bağını azaltabilir ve harç içerisindeki tekstil etkili çalışmayabilir. Minimize edilmiş kısa liflerden oluşturulan çimento esaslı kompozitlerin hasar modu, birbirini izleyen dağınık çoklu mikro çatlaklar şeklindedir. Ayrıca, FRCC veya fiber katkılı ECC yüksek çekme sünekliliği sergileyen kompozitlerdir (Li, 2003; Li, 1993).



Şekil 1.4 : Eğilme veya çekme yükü altında TRCC'lerin tipik doğrusal olmayan davranış modeli (Brameshuber, 2006; Kong ve diğ., 2017).

Şekil 1.4 ile gösterilen, eğilme etkisi veya çekme etkisindeki TRCC'lerin tipik yük-yer değiştirme eğrileri 4 faz ile tanımlanmıştır. Faz I doğrusal bir elastik davranış gösterir. Bu aşamada herhangi bir çatlak gözlenmez. Eğri eğilme sınır noktasına ("ESN", bend over point "BOP") ulaştığında çimentolu matris maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşır, ve çatlama başlar. Bu aşama faz II olarak tanımlanır. Bu aşamada, Şekil 1.4'de gösterildiği gibi çoklu çatlama meydana gelir ve tekstil elyafları matristen ayrışır. Gerilme ve şekil değiştirmelerin yeniden dağılımı yeni çatlaklara neden olur, ve yük-yer değiştirme eğrisinde çok sayıda "sıçrama" gözlenir. Yükün sadece lifler tarafından taşınması ve eğride pekleşmenin başlaması faz III olarak tanımlanır. Bu aşamada artık daha fazla çatlak oluşmaz ve liflerde kopma olana kadar TRCC'ler yük taşımaya devam eder. Ayrıca, fiber hacim fraksiyonu kritik bir değerin üzerinde olmadığı sürece faz III oluşmaz, ve kompozitte direk kırılma (göçme durumu) meydana gelir (Brameshuber, 2006; Tysmans, 2010; Peled ve Bentur, 2003).



Şekil 1.5 : TRCC tabaka sayısı (Mehl, 2013).

TRCC’lerde birden fazla tekstil tabakası kullanılabilir. Şekil 1.5 ile gösterilen örnekte çimento esaslı harç içerisine bir kaç tekstil tabaka ile güçlendirildiği görülmektedir. Kullanım amacına göre TRCC’de seçilen tekstil tipi ve matris özelliklerinin yanında tekstil tabakasının artması ya da azalması, TRCC’nin dayanım, süneklik, rijitlik gibi özelliklerinde önemli rol oynamaktadır. TRCC’lerde tekstil kullanımı kompozitte plastik şekil değiştirmeye geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemesini önleyerek malzemenin kopma sürecini geciktirmektedir. Ayrıca, TRCC’lerde kullanılan çimento esaslı matrise kısa fiber eklendiğinde süneklikte, çekme ve eğilme dayanımlarında, ilk çatlamanın olduğu gerilme değerinde, şekil değiştirme kapasitesinde artma görülürken, hasar modu olarak çoklu, kısa ve ilerleyemeyen dağınık çatlakların olduğu gözlenir (Du ve diğ., 2017).

2. KULLANILAN METODLAR

2.1 Tekstil Kompozitlerin Mevcut Hasarlı Bölme Duvarların Onarım/İyileştirilmesinde Kullanımı

2.1.1 Genel bilgi

Yığma yapı duvarları ve bölme duvarlarda çeşitli düşey yük ve yatay deprem yükleri altında düzlem içi ve düzlem dışı çeşitli hasarlar meydana gelmektedir. Bu hasarlar gevrek tipte olup yapının taşıyıcı sistemine de zarar vererek ciddi hasar ve hatta göçmelere sebep olabilir. Bunun en büyük sebeplerinden biri duvar malzemesinin gevrek malzeme birimlerinden üretiliyor olmasıdır. Bunun yanında, malzeme karakteristik özellikleri, duvarı oluşturan birim ve harç arayüzündeki mekanik özellikler ve işçiliğin oldukça etkili olduğu görülmektedir.

Dünyada çeşitli bölme duvar birimleri kullanılmaktadır. En yaygın kullanılanları kil tuğla ve daha hafif olan beton blok duvar birimleridir. Delikli tuğla duvar birimleri bölme duvar yapımında sıkça tercih edilmektedir. Delikli tuğla birimlerle üretilen duvarlar, dolu birimlerle üretilen duvarlara göre harç ile daha iyi bir etkileşim göstermekte ve deliklerin bir miktarını dolduran harç sebebiyle kaymaya karşı daha dirençli olabilmektedir. Duvarı oluşturan birimleri birbirine bağlayan harç ise çeşitli dayanımlarda üretilmektedir. Duvar harcı; uygun kum, doymuş kireç hamuru, bağlayıcı olarak çimento ve yeteri kadar su karışımından elde edilir. Amerikan standartlarına göre ASTM (American Society for Testing and Materials) C-270’de yer alan 5 adet harç malzemesi kullanım alanlarına göre Çizelge 2.1’de gösterildiği gibi sınıflandırılmıştır.

Çizelge 2.1’de gösterilen M ve S tipi harçlar taşıyıcı özelliği olan basınç dayanımları yüksek harçlardır. Bu sebeple, duvar elemanlarında harç malzemesi olarak M veya S tipi harçlar yaygın olarak kullanılmaktadır. N tipi harçlar taşıyıcı özelliği orta seviyede olan, yapıda dış duvar ve bölme duvar elemanları için kullanılabilen bir harç tipidir. O ve K tipi harçlar ise yük taşıma kabiliyeti olmayan, yaygın olarak mevcut yığma yapı ve tarihi yapıları restore etmek için tercih edilen harç tipleridir.

Çizelge 2.1 : ASTM C-270'e göre ağırlıkça duvar harç karışım oranları.

Harç Tipi	Minimum Basınç Dayanımı (MPa)	Ağırlıkça Karışım Oranları		
		Portland Çimento	Doymuş Kireç Hamuru	Kum
M	17.2	3	1	12
S	12.4	2	1	9
N	5.2	2	2	12
O	2.4	1	2	9
K	0.5	1	3	10

Ülkemizde de benzer karışım oranlarına sahip birçok ticari hazır karışım harçları mevcuttur. Bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan bölme duvar harç oranlarına sahip S tipi harç seçilmiş ve tuğla duvar üretimlerinde kullanılmıştır. Duvar üretimlerinde bir torba S-tipi hazır harç karışımına (36.2 kg) 5:1 oranında, yaklaşık 7 kg su eklenerek duvar harçları üretilmiştir.

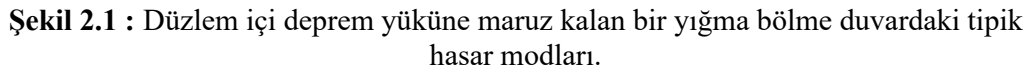
Bölme duvarlarda düşey ve yatay yüklerin bileşkesi altında, harç, tuğla birimi veya tuğla-harç ara yüzünde oluşan çeşitli hasarlar sebebiyle duvarların taşıma gücü düşmekte ve gevrek kırılmalar meydana gelebilmektedir. Özellikle, deprem yükleri altında duvarda oluşan kesme hasarları ani duvar göçmelerine sebep olabilmektedir. Duvarlarda sünek davranış elde etmek, çatlak ve hasarı kontrol etmek için çeşitli duvar oarım ve güçlendirme yöntemleri geliştirilmektedir. Bunlardan en yaygın kullanılanları çelik hasır donatı ve püskürtme beton uygulaması ile etkin duvar kalınlığının artırılmasının sağlanması, CFRP (karbon lifli polimer) ile basınç ve kesme dayanımlarının artırılmasının sağlanması, büyük açıklıklı çatlaklarda bağlayıcı malzeme özelliklerini iyileştirmek amacıyla enjeksiyon ve dikiş yapılması uygulamalarıdır. Günümüzde cam lifli polimer (GFRP) veya karbon lifli polimerlere (CFRP) alternatif olarak TRCC ile iyileştirme metodları geliştirilmektedir. İnorganik matris ve duvar harç derzleri arasındaki rijitlik ve buhar geçirgenliği gibi özelliklerinin uyumu sebebiyle TRCC'lerin güçlendirme ve sismik yüklerin neden olduğu çekme ve kesme gerilmelerine dayanma kapasitesini artırmak için uygun olduğu görülmektedir. Ferrara ve diğ. (2019), tuğla-harç sıralı numune yüzeyine TRCC uygulaması ile güçlendirmiş olup, kesme bağ testi sonucunda tekstil ve matris arasında ayrışma meydana geldiğini gözlemlemiştir. Bu sebeple, çekme dayanımını yükseltmek için matrsi bileşiminin geliştirilmeye ihtiyacı olduğunu tespit etmişlerdir. Çekme ve eğilme

dayanımını arttırmaya yönelik tekstillerle uyumlu biçimde kullanılmak üzere ECC harçlar üzerinde çalışmalar geliştirmiştir.

Deprem yükleri altında ilk bölme duvarlarda gevrek hasarlar meydana geldiği için onararak güçlendirilen ve sünekliği artırılan duvarların yapı sistemi içerisinde kullanıldığında diğer taşıyıcı elemanlara da ciddi katkıda bulunacağı ön görülmektedir. TRCC'lerin duvar yüzeyine tek yüz, çift yüz, tüm yüzey ya da parçalı yüzey uygulamaları şeklinde incelenmesi, ve duvar hasar modlarında, sünekliklerinde meydana getirdiği değişikliklerin incelenmesi önemli olmaktadır. Özellikle, hasar görmüş duvarların TRCC ile sarılması ve onarımı, bölme duvarların tekrar eski dayanımına ulaşip, sünek davranış sergilemesini sağlayabilir (Mustafaraj ve Yardim, 2019; Lignola ve diğ., 2017; Niasar ve diğ., 2020). Bunun için onarım ve iyileştirme metodu ve uygun TRCC malzeme seçimi önemlidir. Bölme duvarı oluşturan birimlerin mekanik özellikleri, farklı düşey yükler altında yatay yüke maruz kalan bölme duvarların hasar modu, onarım ve iyileştirme yöntemini belirleyen diğer önemli etkenlerdir.

2.1.2 Bölme duvarlarda hasar tiplerinin tanımlanması

Yığma duvarlarda veya bölme tuğla duvarlarda deprem yükleri altında düzlem içi veya düzlem dışı sismik zorlanmalar sebebiyle hasarlar meydana gelebilmektedir. Burkulma veya düzlem dışı eğilme hasarları narin duvarlarda işçilik hataları, yatay ve düşey yükler altında oluşan eksantrisine sebebiyle meydana gelebilmektedir. Bunun yanı sıra, genelde çatı katına yakın düzlem dışı deprem yüküne maruz duvarlara etkiyen ivme, duvarın mesnetlendiği döşemenin doğal periyotlarına göre bir büyüme gösterir. Böylece, düzlem dışı yüke maruz çatı katına yakın duvarların ivmesi, düzlem içi yüklenen duvarların ivmesinden daha büyük olur ve duvarda düzlem dışı kırılma görülür. Yapıda genellikle zemin kat duvarları düzlem içi zorlanmalara en fazla maruz kalmaktadır. Bu duvarlarda yatayda deprem kuvvetlerinin yanında düşey kuvvetler de oldukça etkili olmaktadır. Bu çalışmada düzlem dışı duvar davranışı ihmal edilmiş olup, sadece düzlem içi duvar davranışı irdelenmiştir. Düzlem içi duvar hasarlarına aşırı eğilme ya da kesme kuvveti sebep olmaktadır.



18

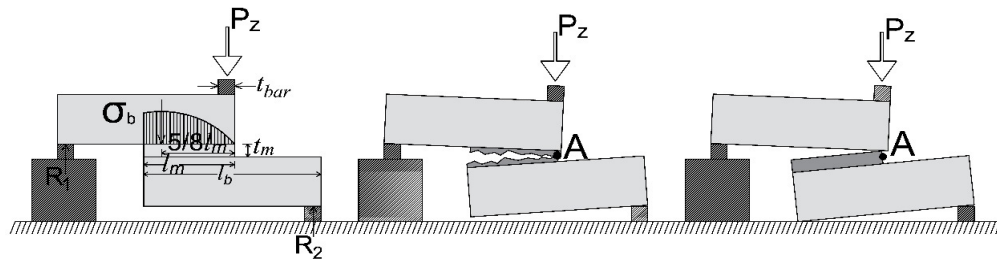
Şekil 2.2’de sunulduğu gibi duvara etkiyen düşey yüklerde hasar mekanizmasını belirlemede oldukça etkilidir. Düşey yüklemenin büyüklüğü duvarda topuk ezilmesi veya diyagonal kesme hasarı meydana gelmesine sebep olur. Düşük düşey yük altındaki duvarda topuk ezilmesi meydana gelmeden önce duvar dengesinin kaybı sebebiyle devrilme oluşur. Güçlendirilmemiş yığma ve bölme duvarların dayanım, yer değiştirme kapasiteleri ve hasar modunu duvarın en/boy boyut oranları, duvar sınır koşulları, yatay yüklemeye ek olarak ön basınç yüklemesi değerleri ve duvar birimleri malzeme özellikleri bakımından değerlendirmek üzere birçok çalışma mevcuttur. Salmanpour ve diğ. (2015) ön basınç yüklemenin arttırılmasıyla duvarın yatay yük taşıma kapasitesinin arttığının, yer değiştirme kabiliyetinin ise azaldığını göstermiştir. Aynı zamanda, duvar yüksekliğinin veya yükseklik/uzunluk oranının azalmasının duvarın yer değiştirme kapasitesinin artmasına sebep olduğunu ortaya koymuşlardır. Petry ve Beyer (2015) çalışmalarında duvar hasar modlarında duvar mesnet ve sınır koşullarının yer değiştirme kapasitesi üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bunun için 6 yığma duvara çevrimsel yük uygulamıştır. Ayrıca, Petry ve Beyer duvar yüksekliğinin artmasının duvar yatay yer değiştirme kapasitesini azalttığını göstermişlerdir. Ayrıca, Gabor ve diğ. (2006) araştırmalarında içi boş tuğla duvar panellerinin düzlem içi kesme davranışının sayısal ve deneysel bir analizini sunmuşlardır. Duvarın doğrusal olmayan davranışı, harç derzinin elastik-tam plastik davranışı dikkate alınarak modellenmiştir. Deneysel çalışmaları ise yığma duvarların diyagonal sıkıştırılmasından oluşmuştur. Duvarın temsili hasar modunu tahmin etmek için modellemenin etkinliğini araştırmışlardır ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

2.1.3 Yığma duvar bileşenleri ile bölme duvar hasar modlarının tahmini

Düzlemsel yüklemeler altında bölme yığma duvarlarda genellikle kesme, eğilme veya bu iki hasar modu birlikte görülebilmektedir [European Standard EN 1052-3 (European Committee for Standardization 2002)]. Tuğla birimi ve harç tipinin bölme yığma duvarlarının dayanım ve hasar modunda oldukça etkili olduğundan yukarıda bahsedilmişti. Harcın gerilme ve basınç dayanımı harç ile tuğla birimi arasındaki bağ kuvvetini aştığında, daha düşük gerilme ve kayma gerilmesi değerlerinde harç-tuğla birimi arayüz hasarları oluşur. İyileştirme yöntemlerini uygulamadan önce, bölme duvarlardaki çevrimsel yükler altında zayıf noktaları tespit etmek amaçlı duvarın mekanik özelliklerini tanımlamak ve hasar modunu tahmin etmek önemlidir. Ayrıca bölme duvarların sayısal bir modelini geliştirmek için harç-tuğla birimi arayüzü

mekanik parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple, öncelikle tuğla duvarlarının basınç dayanımını belirlemek için 3 sıralı prizma testleri kullanılmıştır. Singh ve Munjal (2017), 120 duvar prizma örneğinin basınç dayanımı davranışını araştırmıştır. Bunun için 3 farklı harç-yanmış kil tuğlası ve beton blok prizmanın basınç dayanımının kullanıldığı yığma basınç prizma deneyleri sonuçlarının bölme duvar bileşenlerinin basınç dayanımındaki artışla birlikte arttığı görülmüştür. Benzer şekilde Ravula ve diğ. (2017), Barbosa ve diğ. (2010), Sarangapani ve diğ. (2005), Vermeltfoort ve diğ. (2007), Gumaste ve diğ. (2007) çalışmalarında prizma numuneleri basınç testleri kullanılarak yığma duvarların basınç dayanımlarını tahmin etmişlerdir. McNary ve Abrams (1985), Mohamad ve diğ. (2007), Vyas ve Reddy (2010), Perez ve diğ. (2020) malzeme parametresindeki etkilerin değerlendirilmesi için sayısal çalışmalar yaparak doğrusal olmayan sonlu eleman modelleri sunmuşlardır.

Sinha (1983), tuğla birim ve harç arasındaki bağlanma dayanımını bulmak için doğrudan çekme testlerini incelemiştir. Riddington ve Jukes (1994) ise direk çekme testi, sıralı prizma numunelerde eğilme testi ve bağ anahtar test (bond wrench test) yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Bu test yöntemlerini yığma bölme duvarlarda yatay harç derzinde çekme açıklığı (Mod I) hasar tipi ve harç-tuğla birimi bağ dayanımını belirlemek için kullanmışlardır. Buna ek olarak, Khalaf (2005), eğilme bağ dayanımını elde etmek için yeni bir z-şekilli numune ve test prosedürü önermiştir. Yığma duvarlarda tuğla-harç ara yüzeyi hasarı doğrudan çekme gerilmelerinden ziyade eğilme etkisinden kaynaklı oluşan çekme gerilmelerinden oluşur. Bu durumda, Khalaf'ın test prosedürünün yığma duvarlarda mod I hasarının tespitinde kullanılmasının daha uygun olduğu görülmektedir. Singhal ve Rai (2014), çalışmalarında tuğla gruplarının mod I bağ dayanımını elde etmek için Khalaf'ın test prosedürünü uygulamışlardır. Bu tez çalışmasında da bölme duvar mod I hasar tahmini için Khalaf'ın test prosedürlerinden yararlanıldı (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 : Khalaf'ın Z-şekilli numune test prosedürü ve tipik hasar tipleri.

Çekme bağ mukavemeti için önerilen bir yöntem olarak, Şekil 2.3 ile gösterilen Khalaf (2005) test prosedürü duvarlarda mod I (çekme) kırılmasını tanımlamada alternatif bir yöntemdir. Harç derzlerinde oluşan gerilme yığılmaları bağ dayanımına ulaştığında çatlak açıklığının oluşmaya başladığı görülür. Bu bağ dayanımını tanımlamak için Khalaf'ın z-şekilli numune testinden faydalanılarak harç derzindeki gerilme dağılımı doğrusal ve parabolik olarak tanımlanabilmektedir. Khalaf (2005)'e göre parabolik gerilme dağılımı, doğrusal gerilme dağılımına göre daha doğru sonuç vermektedir. Bölme duvarlar yatay yükler altında düzlemsel eğilmeye maruz kalırlar. Eğilme etkisindeki duvar harç derzlerinde çekme gerilmeleri oluşur. Harç-tuğla arayüz bağ dayanımı harç çekme dayanımından düşük değerlerdeyse, harç-tuğla arayüzünde çatlak ve hasar oluşumu gözlenir. Arayüz bağ dayanımı harç çekme dayanımından yüksek ise harçta çatlak oluşumu ve hasar gözlemlenmesi beklenir. Z-şekilli numunelerde Şekil 2.3'te tanımlanan P_z kuvveti altında A noktasında mafsallaşma oluşur, ve harç derzinin diğer ucunda gerilme yığılması oluşup çatlak açılmaya başlar. Buradaki oluşan çatlak büyümesi Şekil 2.4'te gösterilen yer değiştirme ölçer (LVDT_PI-5-100) ile tespit edilebilirken, σ_b gerilme hesabı Denklem (2.1), R_1 mesnet reaksiyon kuvveti Denklem (2.2) ile hesaplanır.

$$\sigma_b = \frac{(0.5l_b^2 - l_b t_{bar} + 0.5t_{bar}^2)P_z + (0.75l_b^2 - 1.25l_b + 0.5t_{bar}^2)W}{(0.42l_m^2 w_b)(1.5l_b - t_{bar})} \quad (2.1)$$

$$R_1 = \frac{0.5l_b P_z + (1.5l_b - t_{bar})W}{1.5l_b - t_{bar}} \quad (2.2)$$

Bu denklemlerde geçen l_b tuğla biriminin uzunluğu, l_m tuğla birimleri arasındaki harç derzi uzunluğu, t_{bar} mesnet ve yükleme çelik çubuk kalınlığı, w_b tuğla biriminin genişliği, W tuğla biriminin ağırlığıdır.

Bölme duvarların kayma davranışını tahmin etmek için bazı araştırmalarda çeşitli test düzenekleri geliştirilmiştir. Van der Pluijm (1993), Lourenço ve diğ. (2004), Riddington ve Ghazali (1988), ve Meli (1973) çalışmalarında bölme duvar harçlarının yatay ve düşey derzlerinde çeşitli testler yaptı. Farklı tip tuğla birimlerde derzlerin bağ ve sürtünme parametrelerini belirlemek için çeşitli test konfigürasyonları geliştirilmiştir. Armaanidis (1998) direkt kesme deneyi kullanarak dilatasyon açısını buldu. Ayrıca, duvar biriminin (tuğla, beton blok birimler gibi) süreksizlik

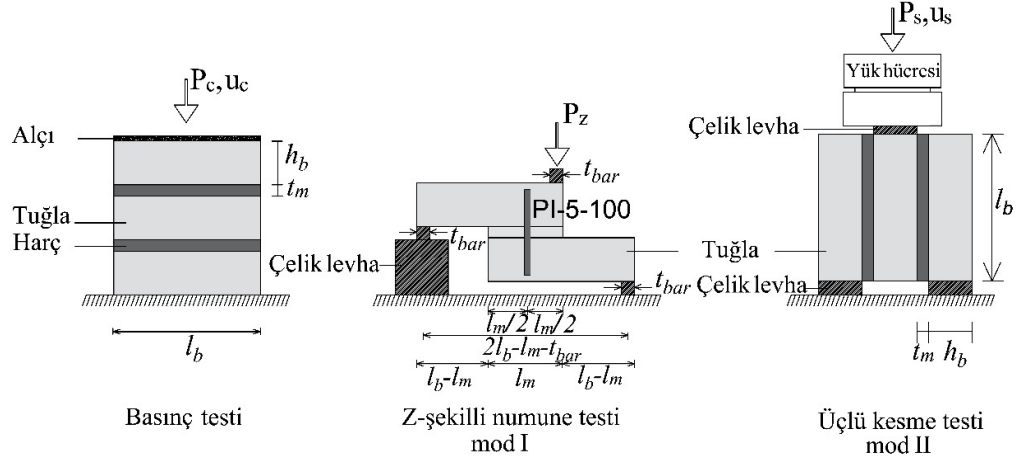
noktalarındaki kesme dayanımının τ_s tuğla-harç arayüzündeki kohezyona c , normal basınç gerilmesine σ_n , iç sürtünme açısına (ϕ) ve dilatasyon açısına (φ) bağlı olduğunu gösterdi. Tuğla-harç arayüzündeki maksimum kesme dayanımı Mohr-Coulomb kriteri kullanılarak Denklem (2.3)'de verilmiştir.

$$\tau_s = c + \sigma_n \tan(\phi + \varphi) \quad (2.3)$$

Zhang ve diğ. (2018), Andreotti ve diğ. (2018), Jafari ve diğ. (2020) tuğla birim-harç arayüzlerinin doğrusal olmayan kayma (mod II ve mod III) parametrelerini farklı kesme testi konfigürasyonları kullanarak araştırmışlardır. Luccioni ve Rougier (2010), tuğla duvarların sabit düşey kuvvet ve deprem yükleri altında tuğla-harç arayüzündeki kesme davranışını tanımlamak amacıyla üçlü kesme testleri ve nümerik çalışmalarını yapmışlardır. CFRP ile iyileştirdikleri üç tuğla ve iki harç derzi kısımlarından oluşan numunelere sabit basınç altında kesme testleri uygulamıştır. Elde edilen sonuçlarla dayanım, süneklik ve rijitlik artışları değerlendirilmiştir, ve nümerik sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında tuğla birimi-harç ara yüzeyinin kayma davranışını belirlemek için üçlü (triplet) test yöntemi uygulanmıştır. Üçlü kesme test yöntemi Avrupa Standardı EN 1052-4 [European Committee for Standardization (CEN) 2000] tarafından önerilmiş olup, Lourenço ve diğ. (2004) tarafından kabul edilerek tuğla-harç ara yüzeyi kesme parametrelerini belirlemek için kullanılmıştır. Mohr-Coulomb kriterinde kohezif veya yapışma değeri bu test kullanılarak doğrulanmıştır.

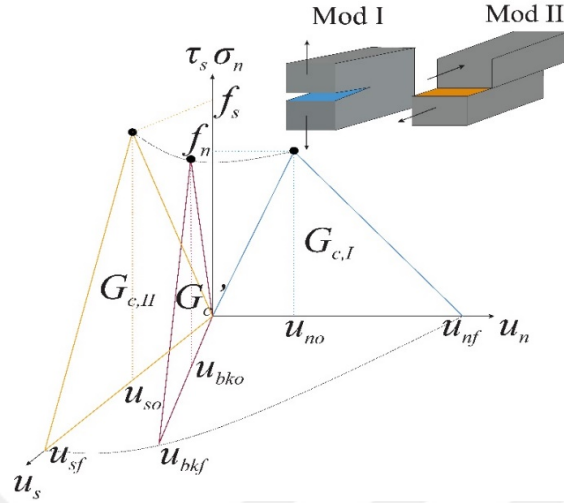
Bölme duvarlarda hasar modunun irdelenmesi için ve sayısal modellemede parametrelerin bulunmasında etkili olacak basitleştirilmiş testler ortalama basınç dayanımına sahip, dünyada yaygın kullanılan tuğla birimlerle (25 MPa'dan az) ve harçla gerçekleştirilmiştir. Tuğla birimi-harç arayüzünün yapışma dayanımı düşey basınç altındaki duvar prizmasının hasar modunu etkileyebilir. Tuğla birimi-harç arayüzündeki yapışma dayanımı düşük olduğunda duvar prizmasının tüm yüzeylerinde düşey yarıma çatlakları meydana gelir (Sarangapani ve diğ., 2005). Ayrıca, Khalaf'ın z-şekilli numune test düzenekleri ve üçlü kesme testi düzenekleri, sırasıyla mod I (çekme) ve mod II (kesme) kırılma enerjisini belirlemek için kullanılır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 : Bölme duvar mekanik özellikleri ve hasar modunun tahmini için bölme duvar bileşenleri ile oluşturulan test düzenekleri.

Şekil 2.4 ile gösterilen testlerin sonuçlarından elde edilen parametrelerle test düzenekleri sayısal modelleme ABAQUS versiyon 6.14 sayısal analiz programı yardımıyla modellenmiş olup, deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu aşamada tuğla birimi-harç arayüzünde mod I ve mod II'nin her ikisini de ele alan karışık kohesif mod ele alınmıştır. Modellemede tuğla birimi-harç arayüzü için uygulanan karışık mod, malzemeye bağlı olarak kullanılan Benzeggagh-Kenane (B-K) kırılma kriteridir (1996). Sayısal analizler duvar mekanik özelliklerini tanımlada kullanılan test sonuçları ile uyumluluk göstermesinden sonra, elde edilen parametreler duvar modellemesinde kullanılarak hasar modlarını ve yük taşıma kapasitesini deney öncesi hızlı bir ön tahminde bulunma olanağı sunar. Böylece, bölme ve yığma duvarlarda yatay kuvvet etkisinde düzlem içi hasar modlarının tahmininde kolaylık sağlanmasının yanında, karışık mod modelleme tekniği ile duvarların sayısal modellenmesinde düzlem içi hasarları belirlemeyi kolaylaştırmış olur.

Bölme ve yığma duvarlarda hasar durumunun olduğu en kritik yerlerden biri tuğla-harç arayüzüdür. Bu arayüz bir süreksizlik noktası olup, buradaki bağ mukavemetini tanımlamak önemlidir. Arayüzdeki bağ mukavemeti mod I ve mod II'nin kohesif bileşke modu olarak tanımlanabilir (Şekil 2.5). Şekil 2.4'te gösterilen Z-şekilli numune testi ve üçlü kesme testi sonucunda mod I ve mod II gerilme-yer değiştirme eğrileri elde edilebilir. Bu gerilme-yer değiştirme eğrilerinin altında kalan alan mod I ve mod II'ye ait kırılma enerjilerini ($G_{c,I}$, $G_{c,II}$) verir.



Şekil 2.5 : Benzeggagh-Kenane (1996) bileşke mod kohezyon kuralı.

Harç ve duvar derzlerinin mekanik özellikleri kohezyon, sürtünme katsayısı μ , yatay (kesme) ve düşey (normal) başlangıç rijitliği (k_s , k_n), ve kohezif kırılma enerjileriyle ($G_{c,I}$, $G_{c,II}$) tanımlanabilir. Tuğla-harç ara yüzeyin kesme ve normal başlangıç rijitlikleri deneysel yöntemlerle elde edilebildiği gibi, Nazir ve Dhanasekar (2013)'e göre tuğla ve harcın mekanik özelliklerinin fonksiyonu olarak Denklem (2.4) ile de tanımlanabilmektedir.

$$k_n = \frac{E_b E_m (h_b + t_m)}{t_m (E_b t_m + E_m h_b)}; k_s = \frac{G_b G_m (h_b + t_m)}{t_m (G_b t_m + G_m h_b)} \quad (2.4)$$

Burada G_b ve G_m sırasıyla tuğla ve harcın kayma modülünü, E_b ve E_m sırasıyla tuğla ve harcın elastik modülünü, t_m ve h_b sırasıyla harcın kalınlığı ve tuğla biriminin yüksekliğini ifade eder.

Benzeggagh-Kenane bileşke mod kuralı iki temel kriter ile açıklanmaktadır. Bunlardan biri Denklem (2.5) ile tanımlanan kuadratik gerilme kriteridir. Bu kriter mod I ve mod II için elde edilen maksimum gerilmelerin bir fonksiyonudur.

$$\left(\frac{\sigma_n}{f_n} \right)^2 + \left(\frac{\tau_s}{f_s} \right)^2 = 1 \quad (2.5)$$

Denklem (2.5)'de σ_n ve τ_s sırasıyla mod I için elde edilen normal gerilme değerleri ve mod II için elde edilen kayma gerilmesi değerlerini, f_n ve f_s sırasıyla mod I için

elde edilen maksimum normal gerilme değerini ve mod II için elde edilen maksimum kayma gerilmesini ifade eder.

Benzeggagh-Kenane bileşke mod kuralının ikinci kriteri tuğla-harç arayüz kırılması (göçmesi) ile ilişkilendirilir. Bu durum, Şekil 2.5'te gösterilen mod I ($G_{c,I}$) ve mod II ($G_{c,II}$) kırılma enerjileriyle bağlantılı olan Denklem (2.6) ile tanımlanır.

$$G_c' = G_{c,I} + (G_{c,II} - G_{c,I}) \left(\frac{G_{II}}{G_I + G_{II}} \right)^\eta \quad (2.6)$$

Denklem (2.6)'da geçen η eksponansiyel tahmini bir parametredir. G_I ve G_{II} mod bileşkesindeki sırasıyla mod I ve mod II'ye ait enerji değerleridir. G_c' bileşke moda ait kritik enerji değerini verir (Şekil 2.5).

Bölme duvar deneylerinden önce duvar bileşenleri ile yukarıda anlatılan testlerin gerçekleştirilmesi ve tuğla-harç arayüzünün sayısal olarak tanımlanması hasar modu ve iyileştirme yönteminin geliştirilmesi ve doğruluğunun kontrolü açısından yardımcı olacaktır.

2.1.4 Bölme duvarlarda tekstil ve/veya fiber takviyeli kompozit uygulamalarla güçlendirme ve iyileştirme teknikleri

Bölme duvarlar ve yığma duvarlar deprem etkilerine karşı oldukça dayanıksız ve gevrek davranış sergilediği görölmektedir. Özellikle, tarihi yapılarda hasar gören duvarların onarımı tarihi yapının bütünlüğünün bozulmaması için oldukça önemlidir. Bölme duvarlar betonarme yapılarla da birlikte dolgu duvar olarak kullanılabilmektedir. Gevrek davranışları sebebiyle ilk hasarları bu dolgu duvarların alıp göçmesi ve betonarme çerçevelere deprem etkilerini taşımada ve iletmede yeterli desteği sağlayamadığı görülür. Bu sebeple hasarlı bölme duvarların sünekliğini arttırmak, göçme öncesi taşıma gücünü geri kazandırmak ve enerji yutma kapasitesini arttırarak deprem etkilerini karşılamada etkili hale getirilmesi oldukça önemlidir.

Bölme duvarların tekstil ve fiber takviyeli kompozit malzemelerle güçlendirilmesi son zamanlarda yaygın araştırma konuları arasındadır. Burada üzerinde durulan konu ise hasar görmüş tuğla ve beton blok bölme duvarların iyileştirilmesi ve onarılması alanında tekstil ve fiber takviyeli malzemelerin deprem yükleri altında etkilerini belirlemek ve teknik geliştirilmesi adına çalışmalara katkıda bulunmaktır.

Bui ve diğ. (2017), düzlemsel sismik yüklere maruz kalarak hasar görmüş kil tuğla duvarın ilk olarak hasar modu tanımlanmış ve daha sonra TRC şeritler ile duvarın her iki yüzeyini kısmi olarak sağ ve sol kısımlarından düşey olarak onarılması sağlanmıştır. Ayrıca, tek yönlü karbon fiber şeritler ve epoksi resin kullanarak ankraj uygulaması yapılmıştır. İyileştirilmiş duvara tekrar çevrimsel yatay yük uygulanarak hasar modundaki, rijitlikteki ve yer değiştirme kapasitesindeki değişim gözlemlenmiştir. Benzer bir çalışma olarak, Reboul ve diğ. (2018), Bui ve diğ. (2015), çalışmalarında hasar görmüş tuğla duvarları TRC veya polimer esaslı malzemeler ile güçlendirmede malzeme miktarını azaltmak için duvarın tüm yüzeyine uygulamayıp, düşey şeritler halinde çeşitli formasyonlarda uygulayarak çevrimsel yük altında testlerini gerçekleştirmişlerdir. Farklı tip tekstil veya fiber kompozit malzeme ile iyileştirme ve duvar yüzeyine farklı uygulama formlarından elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Özellikle, yük taşıma kapasitesi, süneklik, enerji yutma ve rijitlik değişimleri sonuçlarında başarılı ve avantajlı sonuçlar elde etmişlerdir. Konthesingha ve diğ. (2013), farklı ön basınç yüklemeleri altındaki güçlendirilmemiş duvarlara çevrimsel yatay yük uygulayarak duvarlarda çeşitli hasar tipleri oluşturmuşlardır. Hasarlı duvarlar karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) şeritlerle iyileştirilmiştir. İyileştirilen her bir duvar, birbirinden farklı sabit ön basınç gerilmeleri altında yeniden test edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda iyileştirilmiş duvarlarda yüksek duktilite ve yer değiştirme kapasitesinde artış görülmüştür. Takviye iyileştirme elemanının etkisiyle hasarsız duvarın yük taşıma kapasitesine tekrar ulaşılmıştır. Bu durum, takviye elemanının duvarlarda enerji yayma kapasitesini arttırmada etkili olduğunu göstermiştir.

Duvar iyileştirmesinde kullanılan tekstilin özellikleri, harcın özellikleri, iyileştirme harcının tekstille uyumu ve harcın duvar elemanı ile aderansının yüksek olması iyileştirme için kullanılan tekstil takviyeli kompozit harcın tam kapasite çalışmasında etkili olacaktır. Duvar yüzeylerine uygulanan tekstil veya fiber takviyeli kompozit malzemelerin kullanılması duvarda sargı etkisi oluşturup, duvar rijitliğinde artışa sebep olabilir. Bu sebeple, yatay yükler altında iyileştirilmiş duvar bir bütün halinde yüzeyinde herhangi bir hasar meydana gelmeden duvarın oturduğu temel kısmındaki derz sırasında hasarın oluşması, sallanması ve devrilme meydana gelmesi gözlemlenebilir. Bu sebeple bazı ankraj çalışmaları üzerinde durulmuştur. Tetta ve diğ. (2016), tekstil takviyeli kompozitlerle güçlendirilen yapı elemanları için aynı zamanda

tekstillerle oluşturulan ankraj sistemi geliştirerek TRC'nin daha efektif çalışmasını sağlamıştır. Tekstil takviyeli duvar iyileştirme metodlarıyla hasarlı duvarı tekrar işlevsel hale getirilebilirken, duvar iyileştirmesinde kullanılacak tekstil ve harcın seçimi de oldukça önemlidir. Tekstil malzeme duvara gelen çevrimsel yatay yüklerde çekme gerilmelerini alırken, harcında gevrek olmaması, tekstil ve güçlendirilen elemanla uyumlu çalışması beklenir. Sismik yüklere karşı daha sünek bir bölme duvar elemanı elde etmek için, çimento esaslı harçların gevrekliğinin azaltılması, çekme ve eğilme dayanımının daha yüksek olduğu harç tiplerinin seçilmesi avantajlı olacaktır. Özellikle, deprem yükleri altında bölme duvarlarda meydana gelebilecek diyagonal geniş ve derin kesme çatlakları gevrek kırılmalara yol açar. Güçlendirilmemiş duvarlarda deprem yükleri altında meydana gelen çatlakların ilerlemesinin durdurulması, çatlak ilerleme yönüne dik şekilde yerleştirilen fiberlerin etkili çalışması ile mümkün olabilmektedir.

2.1.5 Malzeme seçimi

TRCC, FRCC veya fiber katkılı ECC malzemelerin duvar onarım/iyileştirme alanında kullanımı günümüzde yaygın araştırma konuları arasındadır. Deprem yükleri altında hasar görmüş duvar yüzeylerinin bu iyileştirme malzemeleri ile kaplanarak, hasar görmüş duvarın hasar görmemiş haline geri çevirip, daha düktil davranması sağlanabilmektedir. Bu sebeple tekstil takviyeli harcın seçilmesi ve tekstil tipinin iyileştirme malzemesine uygun olarak seçilmesi önemlidir.

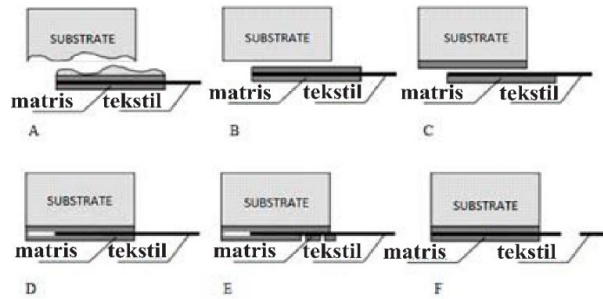
Tekstil malzemesinin seçiminde Bölüm 2.2.3'te bahsedilen TRCC'lerin yapısal form üretiminde direkt kullanımında ağ örgüsünün daha sık olarak kullanıldığı tekstil tipleri üzerinde durulmuştur. Direk yapısal form üretiminde önemli olan, harcın içinde gömülü olan tekstil malzemesi ile harcın aderansı ve birlikte çalışmasıdır. Tekstil malzemesinin iyileştirme alanında takviye elemanı olarak kullanılmasında ise dikkat edilecek hususlardan biri tekstili oluşturan sürekli fiberler arası boşluğun daha fazla olarak tercih edilmesidir. Tekstil malzemesi iyileştirme harcının içinde gömülü olarak bulunurken, iyileştirme harcının da iyileştirilecek duvar elemanına teması ve bağ gücünün yüksek olması önemli olacaktır. Bu sebeple, iyileştirme harcının duvar elemanına temasının kesintiye uğramasının önlenmesi, kullanılacak tekstil veya fiber malzeme oranlarının dikkate alınmasının önemi anlaşılmaktadır.

TRCC’lerde kullanılan tekstil takviyesi iyileştirme uygulanacak duvardaki çekme gerilmelerini almada yardımcı olacaktır. Tekstil malzemesi karbon, cam, bazalt, PVA gibi farklı çekme dayanımları ve elastisite modüllerine sahip fiberlerden oluşmaktadır (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2 : Farklı fiber tiplerin mekanik özellikleri (Peled ve diğ., 2006; Yao ve diğ., 2016).

İplik (fiber) tipi	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Kopmadaki uzama (%)
Karbon	4000	260	0.5~1.5
Aramid	3600	131	2.40~3.60
Bazalt	3100~4840	85~95	3.1~6
AR-glass	1276~2448	78.60	0~4
PVA	920	34~36	6~10

Tekstil malzemesini oluşturan fiberlerin Çizelge 2.2’de gösterildiği gibi farklı tiplerde seçilmesi TRCC’nin çekme dayanımı, kopma uzaması ve elastisite modülü gibi mekanik özellikleri belirlemede etkili olacaktır. Burada önemli olan nokta, bu sürekli fiberlerle oluşturulan tekstil ağ aralıklarının geniş olmasıdır. Böylece, iyileştirme harcının tekstille aderansının sağlanması ile birlikte ağ aralıklarından geçen harcın duvar elemanı ile de teması sağlanmış olacaktır. Ferrara ve diğ. (2019), beş sıra tuğla ve dört sıra 10 mm’lik harçtan oluşan duvar prizmasının yüzeyine uyguladığı farklı yoğunluklarda ve ağ boyutlarındaki bazalt TRCC güçlendirmelerini tekstil kısmından çekme uygulayarak bazalt TRCC ve kil tuğla duvar arasındaki bağ dayanımını test etmişlerdir. Bazalt tekstilin kullanım yoğunluğu ve tekstil ağ aralığına göre Şekil 2.6’da gösterilen hasar modları incelenmiştir. Bazalt tekstilin TRCC sistemlerde takviye elemanı olarak kullanılmasının avantajları ortaya konmuştur.

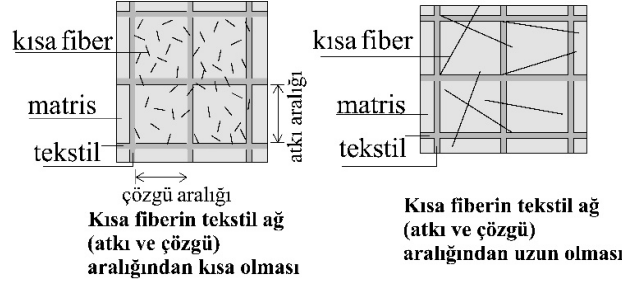


Şekil 2.6 : Duvar prizması yüzeyine uygulanan bazalt TRCC güçlendirmesinin kesme bağ testi hasar durumları (Caggegi ve diğ., 2017; Ferrara ve diğ., 2019).

Şekil 2.6 ile gösterilen hasar modlarından “A”, TRCC ve duvar prizması elemanı arayüz kohesif hasarı; “B”, TRCC ve duvar prizması arayüz bağ kırılması; “C”, tekstil ve matris bağ kırılması; “D”, tekstilin matristen sıyrılması, “E”, matrisin çatlayarak tekstilin sıyrılması; “F”, tekstilin direkt kopması olarak tanımlanmıştır. Bu sebeple, tekstilin şekli, dokusu ve harç birleşimi de TRCC’nin iyileştirme elemanı olarak mekanik davranışında etkili olmaktadır.

Tekstil veya fiberlerle kullanılacak iyileştirme ve onarım harçları genel olarak çimento esaslı, ince daneli malzemelerin karışımından oluşmaktadır. Burada önemli olan konu, iyileştirme harcının tekstille uyumunun yanında iyileştirme/güçlendirme uygulanacak yapı ile de uyumlu çalışması olmalıdır. Bunun için geliştirilen bir çok ECC harç bulunmaktadır. ECC harç bileşenlerinin farklı oranlarla belirlenmesi, harcın mekanik özelliklerini ve işlenebilirliği değiştirilebilir. ECC harçlara fiber katkısı kullanılarak çekme dayanımını arttırmanın yanında, gevrek kırılmanın da önlenmesi sağlanabilmektedir. Çimento esaslı endüstriyel hazır onarım harçlarının kullanımında yükleme altında tek çatlak oluşumu ve ani göçme görülür. Tekstil ve fiber katkısı kırılma ve çatlak ilerlemesi durumunda kompozitin yük taşıma ve aktarımının devam etmesini sağlar. Harca fiber veya tekstil takviyesi ile şekil değiştirme sertleşmesi sağlanıp, normal betonda veya tamir harçlarında ilk çatlamadan sonra çatlağın genişlemesi ve şekil değiştirme yumuşaması giderilmeye çalışılmaktadır. Duvar güçlendirilmesinde, özellikle hasarlı duvar iyileştirilmesinde tekstil malzemesinin harçla kullanımında geniş ağ aralıklarına sahip tekstil malzemesi seçilir. Harcın tekstili ve tekstil ağ aralıklarından rahatça geçerek duvar elemanı ile teması sağlanır. Tekstil malzemesinin hasarlı duvarların yüzeylerini çevreleyerek kullanımı hasarlı duvarın bütünlüğünü koruması açısından oldukça önemlidir.

Bu tez çalışmasında olduğu gibi, tekstil malzemesinin fiber katkılı ECC harçla kullanımı tekstil-fiber hibrid çimento esaslı malzemenin hasarlı yapısal birimin iyileştirilmesinde etkin çalışması sağlanmaktadır. Şekil 2.7’de gösterildiği gibi tekstilde çözgü ve atkı aralıklarının artması, hazır bir tamir harcı kullanımında hasarlı duvar yüzeyin tümünde homojen bir süneklik sağlamayacaktır. Harcın çekme ve eğilme dayanımının düşük olması, harcın erken kırılmasına ve tekstille harcın bağ davranışını olumsuz etkilemiş olacaktır. Bu sebeple, tekstille kullanılacak iyileştirme harcının da sünekliği ve çekme dayanımı arttırılması avantajlı olacaktır (Jiang ve diğ., 2019).



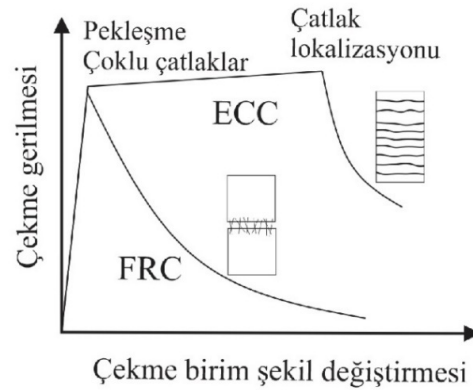
Şekil 2.7 : Tekstil- kısa fiber hibrid kompozitlerde kısa fiber uzunluğu ve tekstil ağ aralıkları ilişkisi.

Jiang ve diğ. (2019) çalışmalarında farklı ağ aralıklarına sahip bazalt tekstil ve fiber katkılı ultra yüksek duktiliteye sahip çimento esaslı harç kullanarak kayma-bağ dayanımları için çekme testleri yapmışlardır. Tekstil aralığının ve harç içerisindeki kısa fiber uzunluğunun etkilerini araştırmışlardır. Harç içerisinde kullanılan kısa fiberlerin uzunluklarının tekstil ağ aralığından küçük değerlerde olması harç içerisindeki tekstil düzleminde yer alan ağ aralıklarındaki harçlarda da kısa fiberlerin etkin çalışması sağlanmış olacaktır (Şekil 2.7).

Kısa fiber katkılı ECC harçlarda sünek ve çoklu, dağınık mikro çatlamlar halinde hasar modu hakimdir. Harçta rastgele dağılmış lifler, çatlakları köprüleyip, çekme gerilmesi taşıyarak enerji yutabilen üç boyutta birleştirici ağ oluşturur. Çatlaklar, süreksiz, yayılı mikro çatlakların gelişip, birleşerek daha büyük çatlakların oluşmasıyla oluşur. Lifler, mikro çatlakların oluşmasını ve mikro çatlakların birbiri ile bağlantı kurma sürecini mikro çatlak oluşan bölgede köprüleme sayesinde artan gerilmeyi liflere aktararak erteleyerek, kırılmanın gelişimini önemli ölçüde etkiler. Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise fiberin harç içerisinde bulunma oranıdır. Ünal ve Şimşek (2020), aynı ECC karışımlara %1, %2 ve %3 oranında PVA lif ilave ederek harcın işlenebilirliğini, basınç, eğilme ve rötire özelliklerini incelemişlerdir. Buna göre, PVA liflerinin hidrofilik (suyu seven) özelliğinin, harcın yayılmasını ve işlenebilirliğini azalttığı ve karışıma %1 PVA lif ilave edildiğinde basınç dayanımında artış görülürken, karışıma %2 ve %3 lif ilave edildiğinde ise basınç dayanımında azalmaya sebep olduğu tespit edilmiştir. Lif oranındaki artışın karışımdaki eğilme dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir. Bu sebeple, harç içerisindeki lif oranı ideal olarak %1~%2 oranında olması uygun görülmüştür. Ayrıca, uçucu kül katkısı harçta işlenebilirliği, akıcılığını arttırmakta, çimento harçlarının mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirdiği ortaya konmuştur. Wang ve diğ. (2019), yüksek hacim uçucu kül içerikli ECC karışımına bazalt, PVA, çelik fiberlerin ve hibrid şekilde

kullanımının harcın mekanik özelliklerine etkilerini incelemiştir. Özellikle, PVA fiber katkısının ECC'lerin çekme, basınç ve eğilme dayanımlarını geliştirdiği ortaya konulmuştur.

Çimento yerine daha uygun maliyetli olan uçucu külün kullanılmaya başlaması da çeşitli avantajlar sunmaktadır. Uçucu kül çimentodan daha az su gerektirir ve soğuk havalarda kullanımı daha kolay olmaktadır. Uçucu kül eklenmesi harçta çatlama riski ve kuruma rötre çatlaklarını azalttığı ortaya konmuştur. Uçucu külün hidratasyon derecesi zamanla artar. Uçucu küldeki hidratasyon derecesindeki artışa bağlı olarak otojen büzülmenin de arttığı gözlemlenmiştir (Termkhajornkit ve diğ., 2005). Yang ve diğ. (2019), çevresel sürdürülebilirliği dikkate alarak yüksek performanslı elyaf takviyeli çimento esaslı kompozitlerin (HPFRCC) geliştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Uçucu kül, çimento yerine ağırlıkça %85 oranında kullanılarak ECC harçlar oluşturulmuş ve yüksek çekme sünekliği elde edilmiştir. Uçucu kül miktarındaki artışla hem çatlak genişliği hem de serbest kuruma büzülmesi önemli ölçüde azaltılır. Böylece, bu harcın güçlendirme/iyileştirmede kullanılması uzun vadede dayanıklılık elde edilmesini sağlar. ECC harçlarda uçucu kül oranının yüksek kullanılması fiber-harç kimyasal bağ arayüzü arasındaki etkileşimi geliştirir (Yang ve diğ., 2007; Zhang ve diğ., 2014). PVA fiber katkısının harçtaki işlenebilirliği azaltmasına karşın, uçucu kül oranı belirli miktarda artırılarak harçtaki işlenebilirlik sağlanır. Şahmaran ve diğ. (2011) çalışmalarında yüksek hacimli uçucu kül ve PVA lifler kullanılarak oluşturulan ECC'lerde yangına dayanıklılık ve mikro yapısı üzerinde durmuşlardır. ECC matrisine PVA fiber eklemenin yangın direncini önemli ölçüde iyileştirdiğini ve ECC matrisinin patlayıcı dökülme davranışlarını ortadan kaldırdığını göstermişlerdir.



Şekil 2.8 : Çekme yükleri altında FRC ve ECC karşılaştırması (Lepech ve diğ., 2010).

Şekil 2.8’de görüldüğü gibi ECC’lerin pekleşme davranışı onu oldukça sünek hale getirmektedir. ECC’nin içerikleri aslında fiber takviyeli betona benzerdir. Çimento esaslı kompozitin sünek yapısını etkiledikleri için iri agregalar hariç tutulmuştur. Normal beton ve FRC’lerde (fiber takviyeli beton) gevrek davranış ve şekil değiştirme yumuşaması görülürken, ECC’de çoklu mikro çatlaklar ile şekil değiştirme sertleşmesi görülür. FRC’lerde hasar oluşumu harcın kırılması ve fiberin harçtan sıyrılması şeklinde olurken, tekstille takviye edilmiş ECC’lerde tekstil kopması ile sonuçlanır. Bu sebeple, güçlendirme/iyileştirme malzemesi olarak tekstille güçlendirilmiş ECC’ler iyi bir seçenek olmaktadır.

2.2 Tekstil Kompozitlerin Yapısal Birim ve Yeni Bir Sistem Oluşturmada Kullanımı

2.2.1 Genel bilgi

Literatürde bir çok amaç için araştırılmış ve araştırılmaya devam eden sandviç panel sistemler mevcuttur. Sandviç panel sistemler yapı sisteminde daha çok duvar ve döşeme elemanları olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle, yüksek enerji absorbe etmesi ve yüksek yer değiştirme değerlerine olanak vermesi sebebiyle silindir tüp, bal peteği gibi formlar oldukça sık kullanıldığı görülmektedir. Dharmasena ve diğ. (2008) paslanmaz çelik alaşımdan yapılmış kare petek çekirdekli sandviç panellerin dinamik mekanik tepkisini patlayıcı testler yaparak incelemişlerdir. Kirişlerde patlama esnasında eğilme etkisini bal peteği formuyla irdelemişlerdir. Mazloomi ve diğ. (2018) iki boyutlu altıgen peteklerden yapılmış yeni bir çekirdek topolojiye sahip sandviç panellerin titreşimsel davranışı üzerine çalışmışlardır. Fajuyitan ve diğ. (2018) eğilme etkisi altında farklı uzunluklara sahip, ince cidarlı, elastik silindirik kabuklarda stabilite davranışlarını irdelemişlerdir. Silindirlerin uzunlukları arttıkça kesitlerinde meydana gelen ovalleşme ve burkulma problemlerinin de arttığı görülmüştür. Bu sebeple, eğilme altındaki kısa silindirlerin doğrusal olmayan davranışları farklı sınır koşulları, farklı yarıçap/kalınlık oranlarını da kapsayan ayrıntılı bir araştırma yapmışlardır. Tüm bu araştırmalarda kare, altıgen ya da silindir tüp birim formlardan oluşan peteklerin yüksek yer değiştirmelerinin ve enerji yutma kapasitelerinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bir başka çalışma olarak Al-Gemeel ve diğ. (2019), yığma duvar veya betonarme yapıların tekstil ile güçlendirilmiş geleneksel harçlar ile tamiri/iyileştirmesinde geleneksel harçlardaki erken kırılma gibi sebeplerle, yeni,

tasarlanmış çimento bazlı harçlar (ECC) üzerine çalışmalara yönelmişlerdir. ECC'lerin yüksek çekme şekil değiştirmesi, pekleşme özelliği ve yüksek darbe dayanımı gibi özellikleriyle oldukça avantajlı oldukları görülmüştür. Bazalt tekstil ile güçlendirilmiş ECC'lerin tekstille güçlendirilmiş geleneksel harç tekniğine göre kıyaslaması yüzük şeklindeki numuneler üzerinden yapılmıştır. Yüzük şeklindeki bu kompozit birimlere uygulanan çekme yüklerinden elde edilen sonuçlara göre, geleneksel harç yerine kullanılan ECC'lerin, numunelerdeki pik çekme yükünü % 241 yükselttiği görülmüştür.

Sünek davranış elde etme veya yüksek enerji yutma kapasitelerine ulaşmada form dışında bir diğer etken özellik, formu oluşturan malzeme özellikleridir. Yukarıda da bahsedilen çalışmalarda da metal alaşım, TRCC gibi süneklik özelliği yüksek malzemeler tercih edilmiştir.

Bu tez çalışmasında ise tekstil takviyeli çimento esaslı kompozit malzemeler kullanılarak yapısal birimlerin üretilmesi ve yüksek sünek davranışlı duvar sistemi oluşturulması üzerine çalışılmıştır. Tekstil takviyeli kompozit malzemelerin yapısal bir form oluşturulması alanında kullanımı irdelenmiştir.

2.2.2 TRCC kompozit birimlerin üretim teknikleri

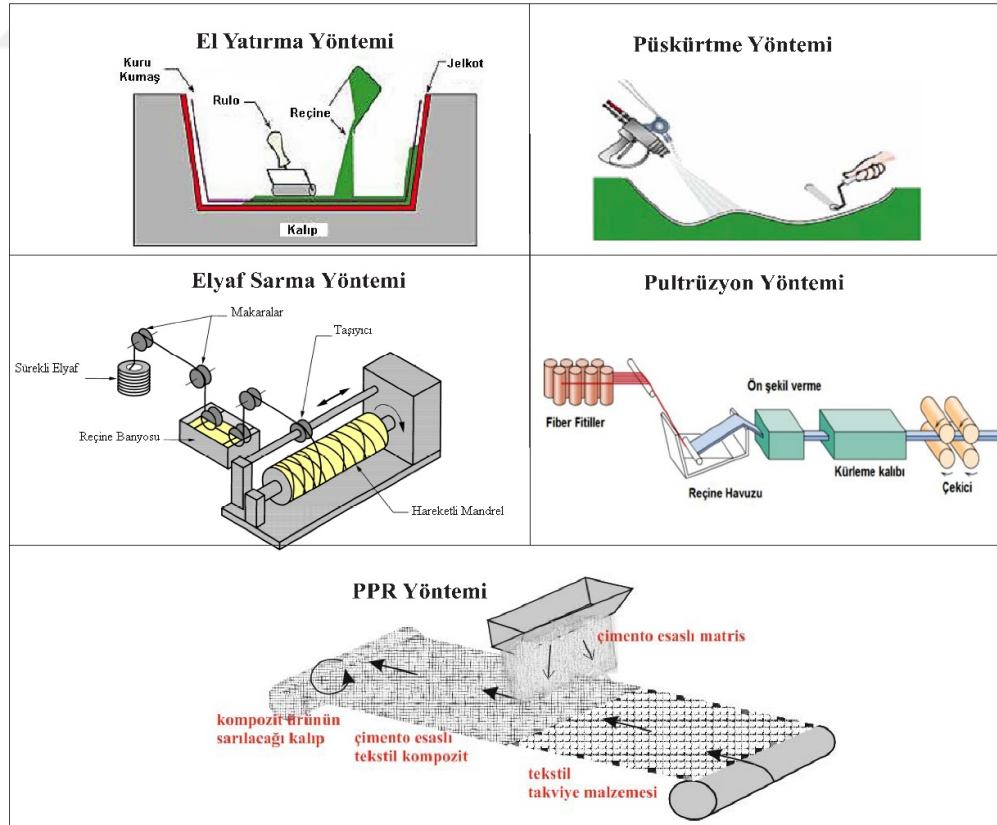
TRCC kompozit birimlerin üretiminde kullanılan birkaç yöntem mevcuttur. Bunlardan en yaygın ve en basit olanlardan biri el yatırma yöntemidir (Şekil 2.9). Tekstil daha önceden hazırlanan kalıp içerisine yerleştirilerek, matriksi oluşturan malzeme fırça gibi aletlerle tekstilin üzerine istenilen kalınlık elde edilinceye kadar sürülür. El yatırma yönteminin makinalaşmış hali püskürtme yöntemidir (Şekil 2.9). Püskürtme yönteminden sonra yüzeyi düzgünleştirmek için rulolama uygulanır. Diğer bir yöntem elyaf sarma yöntemidir (Şekil 2.9). Sürekli lifler, tekstiller tasarlanmış veya seçilmiş kalıp üzerine düzlemsel veya helisel sarılabilirler. Üretim bir mandrel üzerinde olduğundan iç yüzey pürüzsüz, yüksek mukavemet ve kalitede parçalar üretilir. Boru, silo ve silindirik formların imalatında santrifüj kalıplama kullanılır. Santrifüj kalıplamada daha çok kırılmış lif ve matris karışımı silindirik kalıba doldurulur ve kalıp döndürülür. Daha çok otomotiv endüstrisinde kullanılan pres kalıplama yönteminde genel olarak termoset ve termoplastik reçineler sıcak pres kalıplarında

preslenip yumuşayarak akma kıvamına gelirler. Daha sonra, kürlenip sertleşmesi sağlanıp, soğuması beklenir (Sarıkaya, 2019).

Bu yöntemlere ek olarak pultrüzyon metodu kompozit malzeme üretim teknikleri içerisinde önemli bir yere sahiptir (Şekil 2.9). Bu yöntemle istenilen geometri, malzeme ve boyutlarda kompozit üretimi yapılabilmektedir. Pultrüzyon prosesi, takviye fiberlerinin organize bir şekilde bir araya getirilerek matris bölümüne sokulması ve akışkan matris ile doymuş hale gelmesi ile başlamaktadır. Fiber takviyelerin emprenyelenip doymuş hale getirilmesinin ardından kompozit malzeme istenilen form ve boyutlara getirilir. Bu ön şekil verme adımından sonra malzeme pultrüzyon kalıbından geçirilerek nihai boyuta getirilir (Mallick, 1997; Sarıkaya, 2019). Bauchmoyer ve diğ. (2017) çalışmalarında genel yapı malzemelerine alternatif olarak TRC'nin maliyet açısından, sürdürülebilirlik ve yapısal uzun ömürlü olması gibi avantajları üzerinde durmuşlardır. TRC üretimlerinde standart endüstriyel tekniklere dayalı süreç geliştirilmiş, ve plaka, L, T ve C gibi yapısal kesitlerin üretilmesi ve test edilmesi sağlanmıştır. Bu kesitlere sahip 1.2 m uzunluğunda yapısal formların tam ölçekli direk çekme ve basınç testleri yapılarak mekanik özellikleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçları kupon testleri ile karşılaştırarak, geometri ve bağlantı tiplerindeki değişiklikler sebebiyle kesitlerdeki dayanım azalmaları tespit edilmiştir. Benzer olarak, pultrüzyon üretim tekniği ile Mobasher ve diğ. (2006) düşük modüllü dokuma polietilen tekstil ve AR-glass ızgara sistem kullanılarak TRC üretimleri yapmışlardır. Pultrüzyon işleminden sonra uygulanan basınç, tekstil tipi, matris modifikasyonu ve kütleme gibi etmenlerin etkilerini çekme dayanımı ve birim şekil değiştirme sonuçlarından araştırmışlardır. Çatlak aralığı ve hasar tiplerinin belirlenmesi için görüntü analizi, rijitlik bozulması ve mikro yapısal gözlemler yaparak tespit etmişlerdir. Yüksek uçucu kül içerikli (fly ash) AR-glass TRC'lerde (alkali dayanımlı cam tekstil takviyeli çimento esaslı kompozitler) en yüksek çekme performansı elde edilmiştir.

Yeni, yapısal TRCC üretim tekniği olarak Şekil 2.9'da gösterilen PPR Pull-Pour-Roll (Çek-Dök-Sar) metodu kullanılan bir diğer yöntemdir (Daşkiran, 2018; Gür, 2017). Bu yöntem için İstanbul Teknik Üniversitesi Kompozit Yapı Elemanları Laboratuvarında bulunan ve 2016 19016 tescil numaralı makine kullanılmaktadır. Bu makine ile tekstillere ön germe verilerek, istenilen formda bir kalıba sarılarak basınç uygulama işlemleri yapılabilmektedir. Bu yöntem ve makine kullanılarak üç boyutlu

farklı kesit formlarında ince cidarlı tüpler seri ve hızlı şekilde üretilebilir. İnce kesitli ve tekstil tabakasının fazla olabilmesine olanak vermesi sayesinde çimento esaslı kompozitlerde tekstil oranını oldukça arttırabilmektedir. Harç ile tekstiller arasında yüksek aderans sağlaması ile mekanik performansı yüksek elemanların üretimi sağlanabilmektedir. Bu yöntem ile üretimde ilk olarak matris hazırlanır. Bu matris makinede harç üretim haznesine konur. Tekstil makine bandında ilerlerken tekstile istenilen ayarda ön germe uygulanabilir. Tekstil gergin hale getirilip üretim bandından ilerlerken harç hazneden bantta ilerleyen tekstile yayılarak dökülmüş olur. Bantta ilerleyen çimento bazlı harç ve tekstil karışımı dönen kalıbın üzerine sarılarak istenilen katman sayısında kompozit eleman üretilmiş olur. Üretilen kalıba sarılı halde bulunan numune arada boşluk kalmayacak şekilde naylon ile sarılır ve üzeri kelepçeli kalıp ile kapatılır. Naylon sayesinde eleman kalıba yapışmamış olur. Bir gün kalıpta bekletilen numuneler, kalıptan sökülür ve dayanım kazanması için kür havuzuna alınır. Matris özelliğine göre kür havuzunda bekletilir. Katkısız çimento esaslı harçlar için genel olarak kürleme süresi 28 gündür.

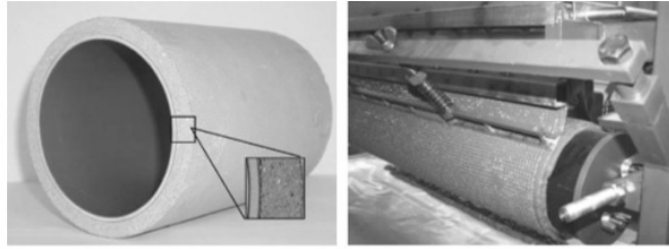


Şekil 2.9 : Tekstil takviyeli kompozitlerin üretim yöntemleri (Durgun, 2014; Eker, 2014; URL-1).

PPR yöntemi özellikle çimento esaslı tekstil kompozit elemanların üretimi için oldukça uygun bir yöntemdir. Kompozit ürünün sarılacağı kalıbın kesitinin kare, dikdörtgen, daire gibi farklı formlarda seçilmesi ile istenilen tekstil tabaka sayısı ve kalınlıkta tüp formlarda yapısal taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanlar (kolon, kiriş, boru vb.) üretilebilir (Şekil 2.10).



Kolon-tipi numune üretimi (Papanicolaou ve Papantoniou, 2010)



TRCC boru numunesi
(Lieboldt ve diğ., 2006)

TRCC boru numunesi üretim
aşaması (Lieboldt ve diğ., 2006)

Şekil 2.10 : Tekstil kompozitlerden oluşturulan yapısal elemanlara örnek çalışmalar.

Şekil 2.10’da görüldüğü gibi farklı kalıplar kullanılarak kolon, kiriş veya drenaj boru sistemleri TRCC ile üretilebilir. Daha küçük boyutlarda çeşitli formlarda TRCC birimlerin bir araya getirilmesiyle duvar gibi sistemlerin oluşturulması mümkündür.

2.2.3 Malzeme seçimi

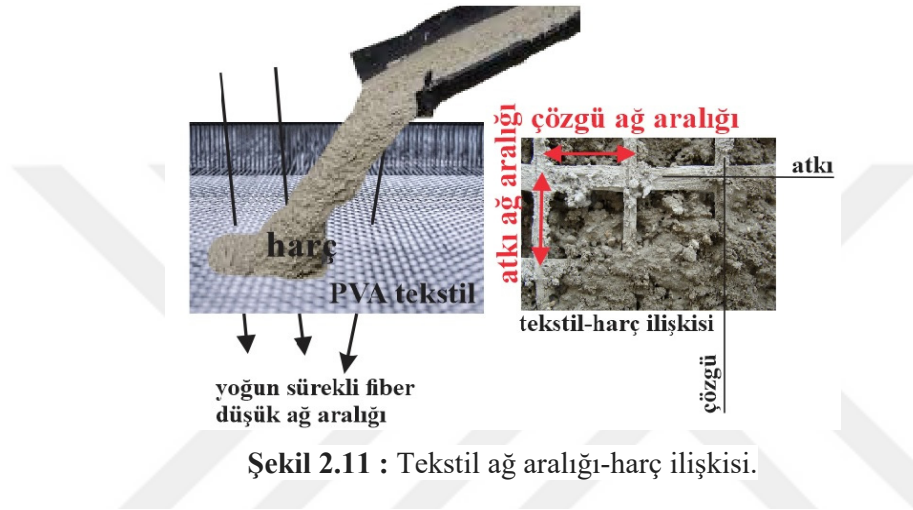
TRCC’ler ile yapısal veya yapısal olmayan formlar üretilmesinde malzeme seçimi TRCC’lerin kullanım alanına göre dayanım, süneklik gibi özelliklerinde farklılık göstereceğinden oldukça önemlidir. TRCC’ler tekstil malzemesi ve matristen oluşmaktadır. Tekstil malzemesi seçiminde tekstili oluşturan sürekli fiberlerin bir araya gelerek oluşturduğu form ve buna uygun seçilen matrisin geliştirilmesi önemlidir. Matrisin tekstille aderansının sağlanması, üretilen TRCC’nin etkili bir şekilde çalışmasına olanak verir. Matrisin çimento esaslı seçilmesi ve fiberle aderansının iyi olması fiberleri bir arada tutarak fiberlere yük aktarımında köprü görevi

görmesini sağlar. Yapıya rijitlik ve şekil verir. Ayrıca, fiberleri birbirinden izole ederek fiberlerin birbirinden bağımsız çalışmasını sağlayarak çatlak ilerlemesini azaltır. Seçilen çimento esaslı matris kompozitin süneklik, darbe direnci gibi performans özelliklerini de etkilenir. Daha sünek bir matris, kompozit yapının kırılma tokluğunu arttırabilir. Seçilen çimento esaslı matrisin özellikleri ve tekstille uygunluğu, meydana gelen hasar mekanizmalarını büyük ölçüde etkiler.

Farklı örgü tipli tekstil malzemeleri seçildiğinde tekstili oluşturan sürekli fiberler arası açıklık değişkenlik göstermektedir. Örneğin, AR-glass tekstiller gibi ızgara sistem bir tekstil malzeme ile PVA tekstiller gibi dokuma örgü tipi tekstil malzemeler farklı fiber aralıklarına sahiptir. PVA tekstiller oldukça sık ve sürekli fiberlerin birbiri içerisinde geçerek oluşmuştur. Bu sebeple, kullanılacak harcın fiber aralarından geçerek bir alt tabakaya ulaşması ve fiberlerin tüm yüzeyini çevrelemesi zorlaşacaktır. Burada çimento esaslı harcın dokuma örgü tipli bir tekstil malzemesi ile kullanılmasında harcın daha akışkan bir harç olarak tercih edilmesi önemli olacaktır. Daşkiran (2018), tezinde yapısal TRCC üretiminde kullanılmak üzere çeşitli polimer katkılı çimento esaslı harçlar üzerine çalışma yapılmıştır. Günümüzde onarım harcı olarak da kullanılan polimer ile modifiye edilmiş çimento esaslı harçlar, katkı kullanılmamış çimento bağlayıcılı harçlara göre yük transferinde daha başarılıdır. Polimer ile modifiye edilmiş lifli harçlar da yük transferinin çok daha yüksek olabileceği tespit edilmiştir. Harcın elastisite modülünün yüksek olmasının harcın yük transferinde daha başarılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Özkul ve Taşdemir, 2003). Ayrıca, harçların rötresinin büyük olmasının hem harç tabakasında çatlak oluşumuna hem de harç ve harcın uygulandığı yüzey arasındaki bağın zayıflamasına ve çatlamasına, geçirimsizliğin artmasına sebep olur. Özkul ve Taşdemir (2003), çimento esaslı harçlarda yük transferinin başarılı şekilde gerçekleşmesinde harcın elastisite modülünün yüksek olması gerektiğini ortaya koyarken, harçta çatlakların oluşmaması için daha düşük elastisite modülü, yüksek çekme dayanımı ve düşük kuruma rötresine ihtiyaç olduğunu belirtmektedirler.

Yapısal TRCC üretimi için seçilecek harçta yük aktarımı önemlidir. Bu sebeple yüksek elastisite modülüne sahip harç kullanımına ihtiyaç varken, harçta oluşabilecek çatlaklar harcın tekstil malzemesi ile güçlendirilmesiyle azaltılmış olacaktır. Daskiran ve diğ. (2016) çalışmalarında TRCC üretiminde kullanılan bazı hazır tamir harçlarının alkali silika reaksiyonu sebebiyle potansiyel reaktiviteye sahip olduğunu ve bazılarının

yeterli eğilme performansı göstermediğini elde etmişlerdir. Polimer modifiyeli çimento esaslı matrislerin yüksek eğilme mukavemetine ulaştığı, özellikle yeniden dağılabilir toz polimerler ile hazırlanan karışımların yüksek mukavemet gösterdiği gözlenmiştir. Polimer, matrisin iç yapısını değiştirir ve film oluşumu yaptıkça matrisin basınç dayanımı azalırken, eğilme dayanımı artar. Polimer katkısı karışımın akışkanlığını ve işlenebilirliğini de etkilediği gözlenmiştir (Daskiran ve diğ., 2016).



TRCC'nin tam kapasite ile çalışması için harcın fiberlerin tüm yüzeyine etki etmesi önemlidir. Tekstili oluşturan atkı ve çözgü fiberler arası mesafe küçüldükçe harcın fiberler arası boşluklara girmesi zorlaşabilir (Şekil 2.11). Harcın tekstil fiberleri ile temassız kaldığı bölgelerde aderans kayıpları yaşanacağından bu kısımlardan ayrışma gözlenebilir. Bu sebeple dokuma örgü tekstil tiplerinde daha akışkan bir harç kullanılması uygun olur. Polimer katkılı çimento esaslı harçların yapısal kompozit birim üretimi açısından kullanımı akışkanlığın ayarlanması, geçirimsizliğin iyileştirilmesi ve böylece TRCC'deki dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin önemli ölçüde açısından avantajlıdır.

3. TEKSTİL VE LİFLİ KOMPOZİTLERİN HASARLI BÖLME DUVARLARIN ONARIM/İYİLEŞTİRİLMESİNDE KULLANIMININ DENEYSEL ARAŞTIRMASI VE ANALİZLERİ

Tekstil kompozitlerin, deprem etkilerinden zarar görmüş mevcut bölme duvarlarda kesme çatlaklarının iyileştirmesiyle duvarın kaybettiği yük taşıma kapasitesini tekrar kazandırarak sünek davranış elde etmede etkilerini incelemek olmuştur. Böylece, dünyada ve özellikle ülkemizde yaygın olarak kullanılan bölme duvarların gevrek kesme hasarları iyileştirilerek gevrek göçme önlenip, sünek bir davranış kazandırılmasına alternatif bir yöntem araştırılmıştır. Bunun için, dünyada sıklıkla kullanımına rastlanan iki farklı duvar örneği olan kil tuğla duvarlar ve delikli beton blok duvarlar ele alınmıştır. Yığma yapılarda, betonarme çerçevelerde veya ahşap yapılarda dolgu duvar olarak da kullanılan bu duvar tiplerinde, deprem etkilerinde çeşitli hasar tipleri oluşabilmektedir. Ayrıca, farklı düşey yüklere maruz kalan duvarlarda deprem gibi yatay yüklerin etkisiyle farklı hasar tipleri meydana gelebilmektedir. Hasar görmüş bu duvarların onarılması ve iyileştirilerek eski dayanımlarına kavuşturulması, sünek davranış kazandırılması oldukça önemli olmaktadır. Deprem etkilerinde, özellikle kesme hasarları oluşmuş duvarlarda gevrek göçme engellenerek, enerji yutma kapasitesi artırılarak duvarlar kullanılabilir hale getirilebilmektedir.

Çalışmanın bu bölümünde, aynı boyutlara sahip iki farklı duvar tipinde gevrek kırılmanın görüldüğü kesme hasar tipi elde edilerek, tekstil kompozitlerin hasar görmüş duvar yüzeylerine uygulanması ile iyileştirme yöntemi araştırılmıştır. Bu sebeple, ilk olarak duvarlar farklı düşey ön basınç yüklemeleri altında çevrimsel yatay yüklemelere maruz bırakılarak kesme hasar tipinin elde edilmesi sağlanmıştır. Kullanılan duvar elemanı bileşenleri olan tuğla, harç ve tuğla-harç arayüzünün mekanik özellikleri, duvarın çalışma şekli deneysel, numerik ve analitik olarak irdelenerek hasar tanımlamaları yapılmıştır. Daha sonra, kesme çatlaklarının görüldüğü tuğla ve beton blok duvarlarda kullanılmak üzere seçilen tekstil malzemesinin kısa fiberlerle takviye edilmiş çimento esaslı hibrit kullanımı ile onarım ve iyileştirme yöntemleri deneysel olarak araştırılmış ve karşılaştırmaları yapılmıştır.

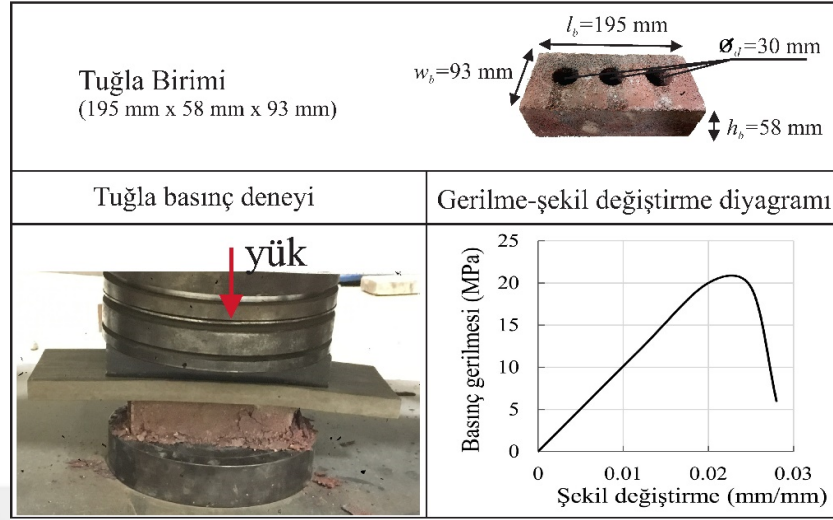
Seçilen tekstil-fiber imento esaslı (hibrit) kompozitin, mevcut hasarlı bölme duvarların iyileştirmesinde/glendirmesinde kullanımının etkileri irdelenmiştir.

3.1 Bölme Duvarların retiminde Kullanılan Bileşenlerin Mekanik zelliklerinin Belirlenmesi

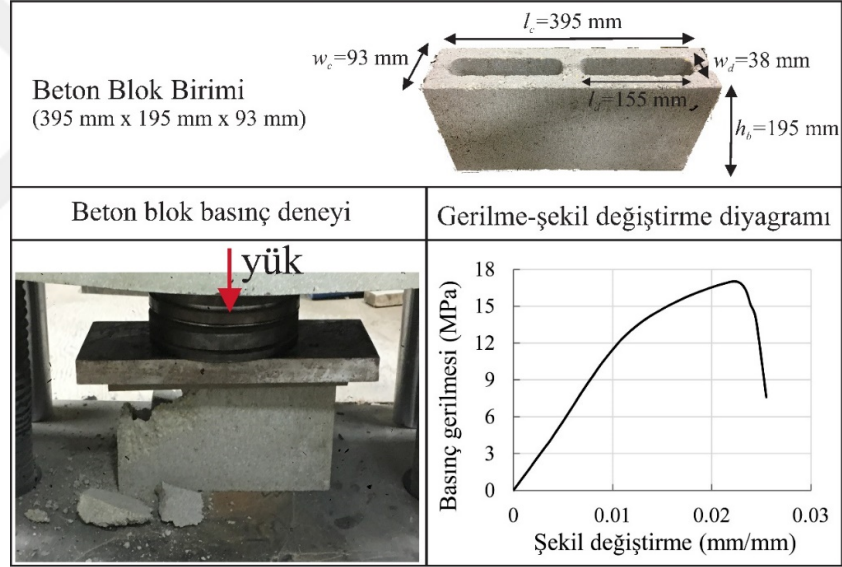
Bölme duvarlar yaygın olarak tuğla veya beton blokların bir harçla yan yana ve alt alta, derzlerin şaşırtmalı olarak denk getirilmesiyle oluşturulmuş sistemlerdir. Çalışmada yaklaşık aynı boyutlara sahip (1220 mm x 1000 mm x 98 mm) beton blok duvar ve kil tuğla duvar üretimleri yapılması planlanmıştır. Öncelikle, bu duvarları oluşturan bileşenlerden tuğla, beton blok ve harç malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri tanımlanmış olup, tuğla-harç arayüz mekanik davranışı üzerinde çalışmalar ve deneyler yapılarak harcın açılma (mod I), kayma (mod II) davranışları tanımlanmıştır. Bu şekilde bölme duvarların mekanik özellikleri elde edilmiş olup, oluşabilecek hasar durumları hakkında ön bilgi edinilmiştir.

3.1.1 Bölme duvar üretimlerinde kullanılan birimlerin basınç deneyleri

Deneylerde, yaygın olarak kullanılan iki tip bölme duvar ele alınmıştır. Bunlardan biri delikli kil tuğladan oluşan duvar tipi, diğeri ise delikli beton blok birimlerden oluşan duvar tipidir. Her iki bölme duvar için kullanılan harç malzemesi aynı olup, izelge 2.1’de belirtilen S-tipi harçtır. Duvarlarda kullanılan birimlerin boyutları ve basınç dayanımlarını bulmak üzere yapılan basınç deneyi sonuçları şekil 3.1, şekil 3.2 ve şekil 3.4’te verilmiştir. Birimlerin basınç deneyleri için 489.30 kN yük uygulama kapasitesine sahip Instron 8500R test makinesi kullanılmıştır. Birimler için yükleme hızı yer değiştirme kontrollü olup, 0.15 mm/dak. olarak uygulanmıştır. Bölme duvar üretiminde kullanılan kil tuğla boyutları şekil 3.1’de verilmiştir. Kırmızı kil tuğlasının birim hacim ağırlığı 1900 kg/m³’dr. ASTM C67-13 ve IS-3495’e (BIS 1992b) göre yapılan tuğla birimi basınç testinden elde edilen basınç dayanımı 20 MPa’dır. şekil 3.2’de geometrik özellikleri ve basınç dayanımı verilen delikli (hafif) beton bloğun birim hacim ağırlığı 1600 kg/m³’dr. ASTM C140’a göre yapılan beton blok birimi basınç testinden elde edilen basınç dayanımı ise 17 MPa bulunmuştur (şekil 3.2). Yaklaşık benzer basınç dayanımlarına sahip iki farklı duvar birimi, duvar üretimlerinde kullanılmıştır.



Şekil 3.1 : Kil tuğla birimi basınç dayanımı.



Şekil 3.2 : Beton blok birimi basınç dayanımı.

Tuğla duvar ve beton blok duvarlar için aynı tip harç kullanılmıştır. Kullanılan harç, Şekil 3.3'te gösterilen çimento, kireç ve kumdan oluşan, yaygın kullanılan endüstriyel bir hazır harç karışımıdır. S-tipi harcın birim hacim ağırlığı 2180 kg/m³'dür. Çizelge 2.1'de gösterilen karışım oranına sahip S-tipi harç, 36.2 kg'lık hazır harç karışımına 7 kg suyun azar azar eklenip mikserde karıştırılmasıyla elde edilir. Elde edilen karışım Şekil 3.3'te gösterildiği gibi 5x5x5 cm'lik küp kalıplara dökülerek 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımların tespiti için kür odasında bekletilir.



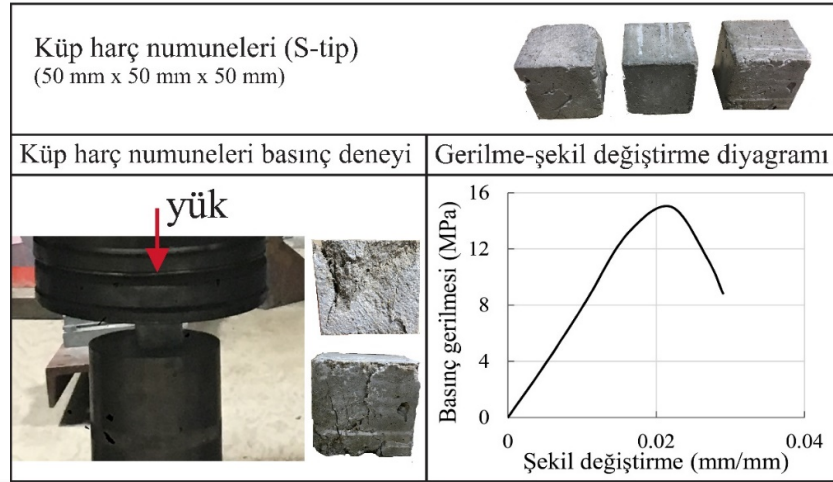
Şekil 3.3 : S-tip harç malzemesi ve kenar uzunluğu 5 cm olan küp harç numune kalıpları.

Şekil 3.3'te üretilen S-tip duvar harç malzemesinin 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanım testleri ASTM C109 ve IS 2250'ye göre yapılmıştır. Çizelge 3.1'de kenar uzunluğu 5 cm olan küp harç numunelerin test sonucu elde edilen 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımları yer almaktadır.

Çizelge 3.1 : S-tip küp harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri.

Numune	Deney günü	Basınç dayanımı (MPa)	Ortalama basınç dayanımı (MPa)
S7-1	7. gün	8.97	11.01
S7-2	7. gün	10.72	
S7-3	7. gün	13.35	
S28-1	28. gün	12.80	14.84
S28-2	28. gün	15.03	
S28-3	28. gün	16.69	

Çizelge 3.1'de kenar uzunluğu 5 cm olan S-tip küp harç numunelerden 3 adedinin 7 günlük ortalama basınç dayanımı 11.01 MPa, diğer 3 adedinin 28 günlük ortalama basınç dayanımı 14.84 MPa olarak bulunmuştur. Harcın, basınç dayanımının % 75'ini 7 günde kazandığı görülmektedir. Harcın 28. gün basınç dayanımı testi sonucunda kırılma şekli ve gerilme-şekil değiştirme diyagramı Şekil 3.4'te elde edilmiştir. S-tip küp harç numunelerde basınç deneyi sırasında düşey çatlaklar meydana gelerek kırılma oluşmuştur.



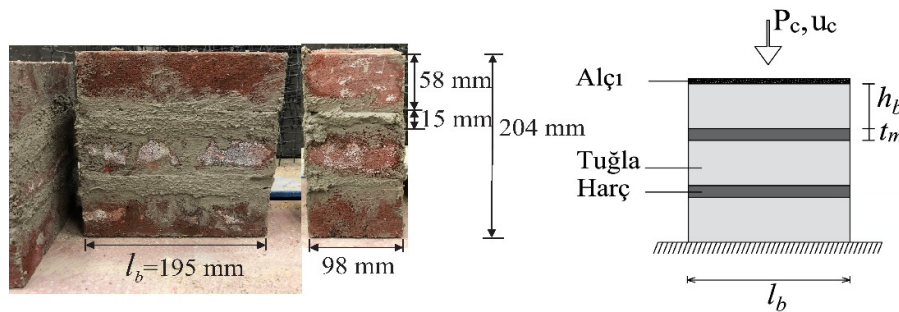
Şekil 3.4 : S-tip harç basınç dayanımı.

3.1.2 Tuğla-harç arayüz kırılma özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deneysel yöntemler

Bölme duvar basınç dayanımının, tuğla-harç arayüz dayanımının ve hasar mekanizmasının tayini için duvar bileşenleri ile yapılan üç sıralı prizma basınç testi, z-şekilli numune testi ve üçlü kayma testi (triplet test) uygulanmıştır. Bölme duvar hasar mekanizması sadece tuğla ve harç malzeme özelliklerine değil, aynı zamanda tuğla-harç arayüz bağ mukavemeti ile de ilişkilidir.

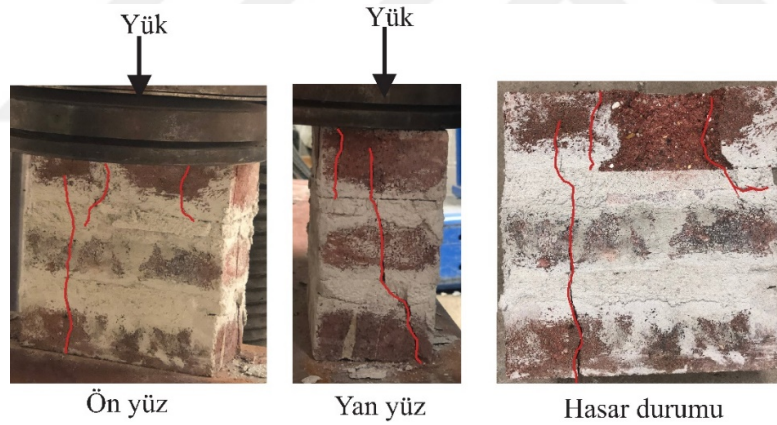
3.1.2.1 Üç sıralı tuğla prizma basınç testleri

Üç sıralı pres tuğla deneyleri gerçekleştirilerek tuğla birimi ve harçtan oluşan bölme duvarların düşey yük etkisindeki dayanım, gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ve hasar biçimi hakkında bilgi edinilmiştir. 3 adet numune üretilmiştir. Her bir numune, Şekil 3.1’de gösterilen üç adet pres tuğlanın 15 mm kalınlıkta derz oluşturarak üst üste konulmasıyla üretilmiştir (Şekil 3.5).



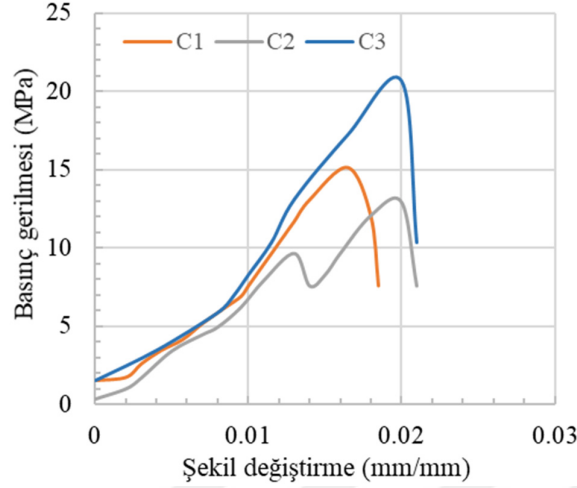
Şekil 3.5 : Üç sıralı tuğla prizma numune boyutları.

Şekil 3.6'da üç sıralı tuğla numunelere uygulanan basınç testi ve numunelerdeki tipik hasar durumu gösterilmiştir. Basınç deneyleri için 489.30 kN yük uygulama kapasitesine sahip Instron 8500R test makinesi kullanılmıştır. "C1", "C2" ve "C3" olarak isimlendirilen her bir üç sıralı tuğla numunelere yer değiştirme kontrollü ve yükleme hızı 0.127 mm/dak olacak şekilde basınç yüklemesi uygulanmıştır. Şekil 3.6'da hasar durumunda görüldüğü gibi, maksimum yüke ulaşana kadar önce harç ve tuğla ünitelerinde düşey çatlaklar başlamış olup, yükün maksimum değere ulaşmasıyla numunelerde oluşan çatlaklar ilerlemiş ve açılarak göçme oluşmuştur. S- tipi harcın rijitliği tuğla birimlerden daha düşüktür. Bu sebeple harç, tuğla birimlerden daha fazla deforme olma eğilimindedir. Bu deformasyon, tuğla ile harç arasındaki aderans ile önlenemez. Sonuç olarak, tuğla birimlerin enine yöndeki çekme gerilmeleri düşey ekseninde yükselir ve göçme meydana gelir. Göçme, harçta çekme çatlağı oluşmasına başlayıp, tuğla birimlere ilerlemiştir. Numunelerde gözlenen ana göçme modları diyagonal kesme çatlağı ve düşey yarılmadır.



Şekil 3.6 : Üç sıralı tuğla prizma basınç deneyi ve tipik hasar durumu.

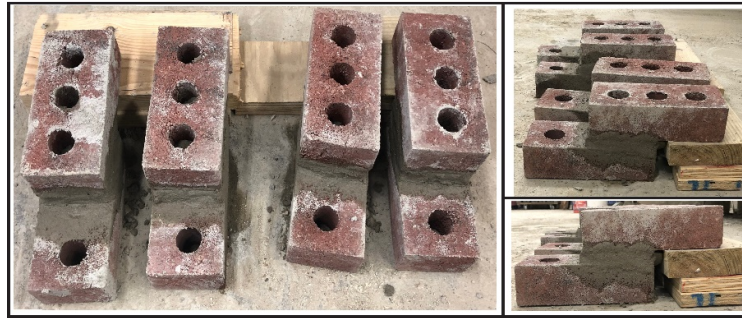
Şekil 3.7'de üç sıralı tuğla numunelerin basınç deneyi sonuçlarına göre basınç dayanımının 15~20 MPa aralığında olduğu görülmektedir. Elde edilen bu veriler, Şekil 3.1 ve Çizelge 3.1'de belirtilen malzemelerle oluşturulan tuğla duvarlara uygulanacak düşey yük etkisinde duvarın davranış ve taşıma gücü hakkında ön bilgi vermesini sağlar. Farklı sabit ön basınç yüklemeler altındaki tuğla duvar elemanlara yatay yük etkidiğinde, duvarlarda farklı hasar modları oluşabilmektedir. Bu sebeple, düşey yüke maruz duvarlarda düşey yüklemenin değeri oldukça önemlidir. Duvara düşey ön basınç yüklemesi yapılmadan önce, duvarın taşıyabileceği maksimum düşey yük kapasitesini dikkate almak gerekir.



Şekil 3.7 : Üç sıralı tuğla numunelerin basmaç gerilmesi-şekil değıştirme eğrileri.

3.1.2.2 Çekme bağ dayanımı testleri

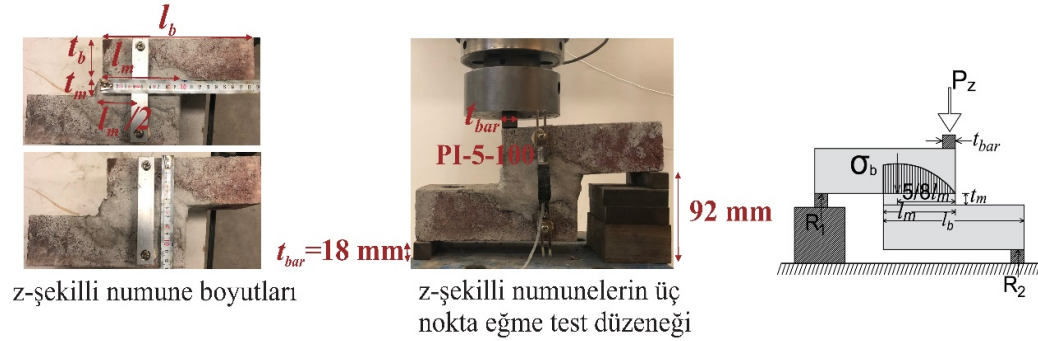
Yatay kuvvetlere maruz kalan bölme ve yığma duvarlarda eğilme etkisiyle duvar birimi-harç arayüzünde özellikle meydana gelen çekme gerilmelerini belirlemek için Khalaf (2005)'in z-şekilli test prosedürü uygulanmıştır. Numuneler, z-şekilli bir konfigürasyonda iki tuğla biriminden yapılmıştır (Şekil 3.8). Numunelere üç noktalı yükleme testi uygulanarak elde edilen yük değerlerinden Denklem (2.1) kullanılarak eğilme etkisiyle arayüzde meydana gelen çekme bağ dayanımı elde edilmiştir (Şekil 2.3). Bölüm 2'de detaylı bahsedilen z-şekilli numune testi test düzeneği ve ölçüm aletlerinin yerleşim şeması Şekil 2.4 ile gösterilmiştir. Eğilme etkisinden meydana gelen çekme (mod I) gerilmesi ve arayüzde açılma (mod I) hasarının oluşumu test sonuçları ile irdelenmiştir.



Şekil 3.8 : Z-şekilli numunelerin üretimi.

Şekil 3.8'de gösterildiği gibi 4 adet z-şekilli numune üretilmiştir. Üretilen numunelere üç nokta eğme testi uygulanarak eğilme etkisiyle tuğla-harç arayüzde oluşan çekme gerilmeleri ve şekil değıştirme değerleri hesaplanmıştır. Şekil 3.9'da belirtilen TML

PI-5-100 adlı yer değiştirme ölçer, tuğla-harç bölgesinin orta kısmına düşey olarak yerleştirilerek yükleme esnasında yer değiştirme değerleri ölçülmüştür. Harç uzunluğunun (l_m) ortasından alınan yer değiştirme değerlerinin iki katı alınarak harcin uç kısmında meydana gelen açıklık değerleri hesaplanır. Yer değiştirme değerlerinden birim şekil değiştirme değerlerine geçmek için TML PI-5-100 yer değiştirme ölçerden okunan değerler gösterge değeri (gauge length) 100 mm'e bölünür. Şekil 3.9'da z-şekilli numunelere uygulanan üç nokta eğme test düzeneği gösterilmiştir. Tuğla genişliğine eşit uzunlukta 2 adet 18 mm kenar uzunluğuna sahip çelik kare prizma çubuk üzerine numuneler yerleştirilmiştir. Numune, bir kenarından 18 mm yükseltilirken, diğer kenarından çelik levhalarla desteklenerek 92 mm yükseltilmiştir. Z-şekilli numunenin üst orta kısmında tuğla biriminin uç kenarına yerleştirilen çelik kare prizma çubuk üzerinden yük, yer değiştirme kontrollü olarak 489.30 kN yük kapasitesine sahip Instron 8500R test makinesinde yükleme hızı 0.05 mm/dak olarak uygulanmıştır.



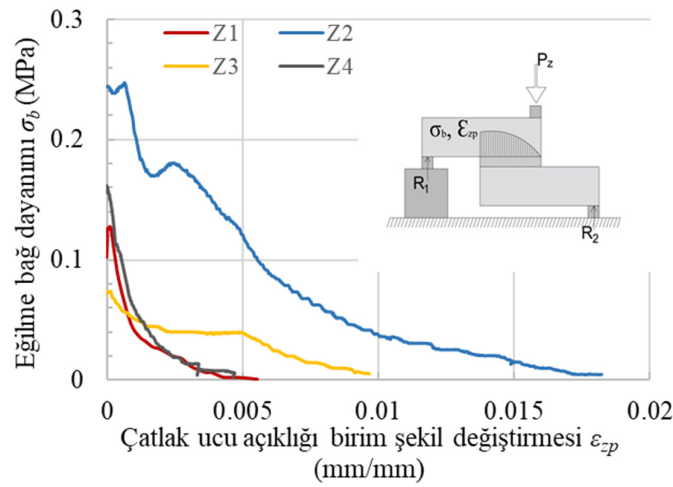
Şekil 3.9 : Z-şekilli numunelerin test düzeneği.

Dört adet z-şekilli numunelere ait numune boyutları ve test sonuçları Çizelge 3.2 ve Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Test sonuçlarından elde edilen yük değerlerinden Denklem (2.1) ve (2.2) kullanılarak mod I bağ dayanımı (f_n) ve maksimum tepki kuvveti (R_1) hesaplanmıştır (Çizelge 3.2). Tuğla-harç arayüz bağ dayanımı değeri ortalama olarak 0.154 MPa bulunmuştur. Şekil 3.10'da numune derzlerinde meydana gelen mod I bağ dayanımının çatlak ucu açıklığının birim şekil değiştirme değeri ile değişimi gösterilmektedir. Yük etkisindeki z-şekilli numunelerde eğilme etkisiyle dönme, harç derzindeki yükün uygulama yönünde oluşan mafsallık noktasında meydana gelir. Eğilmenin neden olduğu çekme gerilmesi bu noktada sıfır iken, çekme gerilmesi derzin diğer ucunda maksimum değere ulaşır. Bu nedenle, açılma çatlakları, çekme gerilmesi değerinin bağ dayanımını aşmasıyla meydana gelir. Maksimum yük sonrası,

çatlak ucu açılma davranışı dik yumuşama gösterir ve ardından orta derecede yumuşama devam edip uzun kuyruk şeklini alır. Z1 ve Z4 numunelerin tepkisi ise tipik üstel (eksponensiyel) bozulmaya benzemektedir (Şekil 3.10).

Çizelge 3.2 : Z-şekilli numune testlerinin sonuçları.

Numune	Tuğla birimi				Harç (S-tip)		Çelik kare prizma çubuk-kalınlık t_{bar} (mm)	Maksimum yük P_{max} (kN)	Maksimum tepki kuvveti R_I (kN)	Bağ dayanımı (mod I) f_n (MPa)
	Ağırlık W (N)	Uzunluk l_b (mm)	Genişlik w_b (mm)	Kalınlık t_b (mm)	Uzunluk l_m (mm)	Kalınlık t_m (mm)				
Z1	17.276	195	92	58	105	20	18	0.92	0.33	0.130
Z2	17.276	195	92	58	95	15	18	1.48	0.55	0.250
Z3	17.276	195	92	58	97	15	18	0.44	0.18	0.075
Z4	17.276	195	92	58	90	17	18	0.85	0.34	0.160



Şekil 3.10 : Z-şekilli numunelerin bağ dayanımı (mod I)- çatlak ucu açıklığı birim şekil değiştirme diyagramı.

Z şeklindeki numunelerin hasar tipi, tuğla deliklerinin varlığından dolayı harca bağlanma alanının kaybolması ile meydana gelmiştir. Hasar oluşumu, Şekil 3.11’de gösterildiği gibi harç üst ve alt yüzeylerinde meydana geldiği görülmüştür.

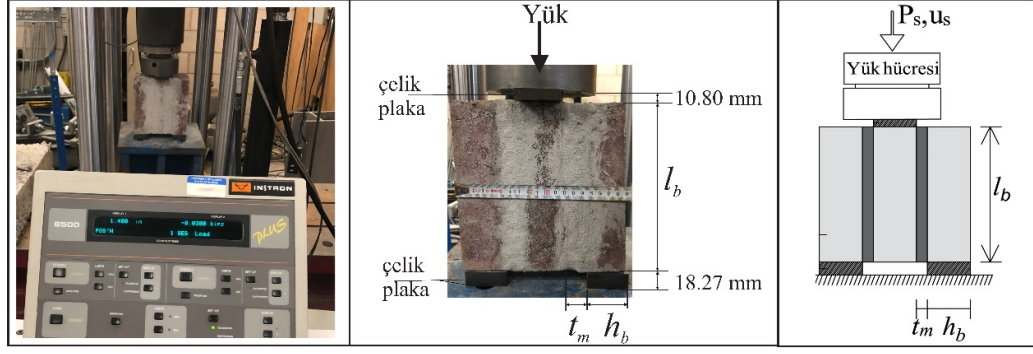


Şekil 3.11 : Z-şekilli numunelerde hasar tipleri.

Şekil 3.11’de tuğla birimlerin yüzeylerinde herhangi bir hasar gözlenmezken, bazı küçük harç parçalarının tuğla yüzeylerine yapışık kaldığı tespit edilmiştir. Test sonucunda 4 z-şekilli numunede de benzer şekilde harç üst ve alt yüzeylerinden tuğladan ayrışma ile hasar gözlemlenmiş olup, harcın orta yatay kesitinde ve harç içerisinde hasar meydana gelmemiştir. Bu durum, harcın çekme bağ dayanımının harcın çekme dayanımından daha düşük değerde olduğunu göstermiştir. S-tip harç kullanılarak yapılan bölme duvarlarda hasarın ilk olarak derz arayüzünde başlayacağına işaret etmektedir.

3.1.2.3 Kayma bağ dayanımı testleri

Bölme duvar veya yığma duvar yatay derzlerinde yatay yükler altında meydana gelen kesme kuvveti etkisiyle oluşan kayma göçme modununu incelemek için 4 adet üç sıralı tuğla numunelerine üçlü kesme testleri uygulanmıştır (Şekil 3.12). Üçlü kesme testi ile tuğla-harç arayüzünde meydana gelen kayma (mod II) davranışı irdelenmiştir. Üç sıralı tuğla numuneler, Şekil 3.12’de gösterildiği gibi sağ ve sol kenarda yer alan tuğlaların genişlik ve kalınlığı boyutlarında 18.27 mm kalınlıkta çelik plakalar üzerine yerleştirilmiştir. Üç sıralı tuğla numunelerin ortasında yer alan tuğla birimi üzerine ise aynı boyutlarda 10.80 mm kalınlığa sahip çelik plaka yerleştirilmiş olup, yükleme bu plaka üzerinden yer değiştirme kontrollü olarak yapılmıştır. Deney, 489.30 kN yük kapasitesine sahip Instron 8500R test makinesinde yükleme hızı 0.2 mm/dak olarak gerçekleştirilmiştir.

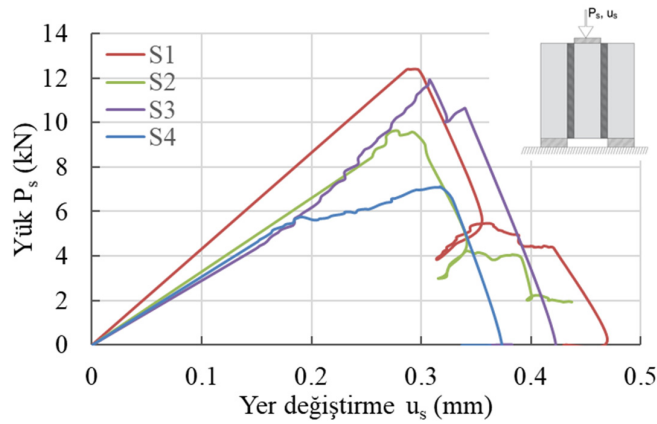


Şekil 3.12 : Tuğla-harç arayüz kayma bağ dayanımı için üçlü kesme test düzeneği.

Deney, “S1”, “S2”, “S3” ve “S4” olarak adlandırılmış 4 adet numune için gerçekleştirilmiştir. Bu numunelerde Şekil 3.1’de belirtilen tuğla birimi ve S-tip harç kullanılmıştır. Numuneler arasındaki fark, üretim esnasında oluşan harç kalınlıklarındaki bir miktar değişimden kaynaklanmaktadır (Çizelge 3.3). Test sonuçları Çizelge 3.3’de ve elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 3.13’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Üçlü (triplet) kesme testlerin sonuçları.

Numune	Tuğla/harç arayüz uzunluğu (mm)	Kesme alanı (mm ²)	Harç kalınlığı t_m (mm)	Ortalama maksimum yük, P_{smaks} (kN)	Kayma bağ dayanımı f_s (MPa)	P_{smaks} 'daki yer değiştirme değeri u_{so} (mm)	Maksimum yer değiştirme değeri u_{sf} (mm)
S1	195	17940	9	12.42	0.35	0.29	0.46
S2	195	17940	9	9.62	0.27	0.28	0.40
S3	195	17940	11	12.00	0.33	0.31	0.42
S4	195	17940	15	7.14	0.20	0.31	0.38



Şekil 3.13 : Üçlü kesme test sonuçlarından elde edilen yük (kN)-yer değiştirme (mm) eğrileri.

Kullanılan S-tip harcın kayma bağ dayanımını (f_s) elde etmek için, test sonucunda elde edilen yük değerleri 2 adet derz kesit alanına (kesme alanına) bölünüp maksimum değer hesaplanarak elde edilmiştir (Çizelge 3.3). Kayma (mod II) bağ dayanımı değeri yaklaşık 0.30 MPa olarak bulunmuştur.

Yükleme esnasında maksimum yük değerine ulaşılan kadar yükün uygulandığı ortadaki tuğla birimi, yan tuğla birimlerine ve harca basınç uygulamıştır. Tuğla-harç arayüzdeki kayma dayanımı ve sürtünme direnci aşıldığında kayma çatlağı oluşarak gevrek kesme kırılması Şekil 3.14’de görüldüğü gibi meydana gelmiştir.



Şekil 3.14 : Üçlü kesme test sonuçlarından elde edilen numune hasar modları.

Şekil 3.14’de görüldüğü gibi kullanılan tuğla birimlerinde herhangi bir hasar (ezilme çatlakları gibi) meydana gelmemiş olup; tüm hasarın, uygulanan düşey yük esnasında oluşan kayma gerilmelerinin kullanılan S-tip harcın kayma bağ dayanımını aşmasından kaynaklanmıştır. Bu durum, S-tip harcın kendisinden daha yüksek dayanımlara sahip duvar birimleri ile kullanılmasıyla üretilmiş bölme duvarların derzlerinde yatay yükleme etkisinde kayma davranışı gözlenebileceğine işaret etmektedir.

3.1.3 Tuğla-harç arayüz kırılma özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan sayısal modelleme yöntemleri

Bu bölümde tuğla-harç arayüz kırılma özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deneysel yöntemlerden elde edilen sonuçlar dikkate alınarak Bölüm 2.1.3’te açıklanan nümerik modellemeler yapılmıştır. Nümerik modellemelerde Benzeggagh Kenane (B-K) kırılma kriteri kullanılmıştır (1996). Deneysel testler Abaqus ver. 6.14/Explicit çözücüsünde modellenmiştir. Abaqus programında tuğla birimi ve S-tipi harcın elastik olmayan malzeme özellikleri, beton hasar plastisite modelinde tanımlanmıştır. Nümerik analizlerde kullanılan malzemeler, deneylerde kullanılan malzemelerden oluşmaktadır. Hasar tanımı ise rijitlik azalmasıyla ifade edilir (Lubliner ve diğ., 1989).

Bu çalışmada kullanılan tuğla birimi ve harç yüksek mukavemete sahiptir. Ayrıca, yaygın olarak kullanılan bir uygulama olduğu için, kullanılan duvar biriminin mukavemetinin harcın mukavemetinden biraz daha yüksek bir değerde olması tercih edilmiştir. Duvar bileşenleri kullanılarak yapılan sonlu eleman analizleri ile duvarın doğrusal olmayan davranışı, hasar dağılımı gibi parametreler numune üzerinde gösterilmesi sağlanmıştır. Bu durum aslında yatay ve düşey yüklemelere maruz kalan bölme duvar sisteminde hasarın meydana gelebileceği bölgelerdeki davranışı tanımlamada bir ön tahmin oluşturmaktadır. Elde edilen nümerik veriler deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır.

Sonlu eleman modellerinde mikro modelleme yaklaşımı benimsenerek, tuğla ve harç malzeme özellikleri doğrusal ve doğrusal olmayan davranış modelleri olarak tanımlanmıştır. Malzeme modelleri iki temel hasar mekanizması olan çekme çatlağı ve basınç kırılması ile tanımlanır. Malzemelerin doğrusal davranış modeli tanımlanırken elastisite modülü ve poisson oranı kullanılmıştır. Tuğla ve harcın elastisite modülleri, basınç testlerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisinin başlangıç noktası ve maksimum gerilme değerine denk gelen noktalar arasındaki farkların oranından (sekant değeri) hesaplanmıştır. Tuğla ve harcın poisson oranları sırasıyla 0.25 ve 0.20 olarak kabul edilerek kayma modülleri elde edilmiştir (Çizelge 3.4). Duvar malzemelerinin basınç gerilme-birim şekil değiştirme diyagramları Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.4 ile tanımlanmıştır. Çalışmada duvar malzemesi olarak seçilen tuğla birimi ve S-tip harcın çekme dayanımları sırasıyla 3.0 MPa ve 2.2 MPa olarak kabul edilmiştir (Churilov ve Jovanoska, 2011; Singh ve Munjal, 2017). Malzeme özelliklerinde beton hasar modeli kullanılmış olup, tuğla ve harcın Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.4'te gösterilen gerilme-birim şekil değiştirme diyagramlarından pekleşme bölgesine ait basınç ve çekme gerilmeleri ile plastik birim şekil değiştirme değerleri Abaqus programında tanımlanmıştır.

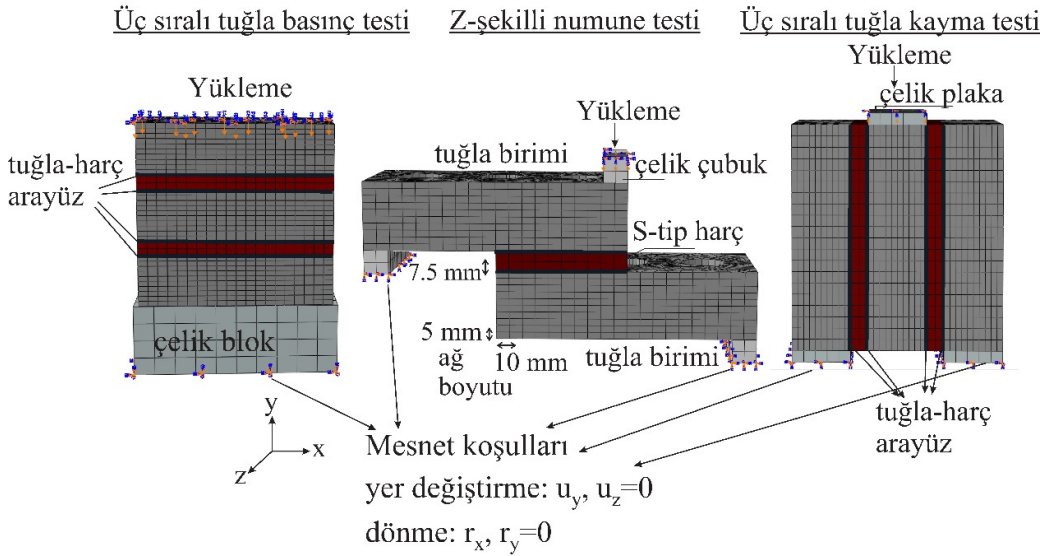
Nümerik analizde tanımlanması gereken bir diğer önemli parametre ise hasar modelidir. Bunun için hasar parametresi (d) ve çatlama birim şekil değiştirme (ε_c) değerleri Denklemler (3.1) ve (3.2) ile elde edilip, nümerik analiz için kullanıldı.

$$\varepsilon_c = \varepsilon - \frac{\sigma}{E_o} \quad (3.1)$$

$$d = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_{cr}} \quad (3.2)$$

Denklemler (3.1) ve (3.2)'de kullanılan ε , toplam birim şekil değiştirmeyi; σ , toplam birim şekil değiştirmeye karşılık gelen gerilme değerlerini; σ_{cr} , maksimum gerilme değerini; E_o , elastisite modülünü ifade eder.

Üç boyutlu deforme olabilen katı modeller olarak sekiz kontak düğüm noktası ile (C3D8R) Abaqus programında oluşturuldu (Şekil 3.15). Şekil 3.15'te her bir test kurulumunun simülasyonu için kullanılan sayısal modeller gösterilmiştir. Her bir modelde kullanılan tuğla biriminde ağ (mesh) boyutu 5x5x10-mm'lik kare prizma elemanlardan, harç ise ağ (mesh) boyutu 10x10x7.5-mm olan kare prizma elemanlardan oluşmaktadır. Ağ boyutu analizin hassaslığı için önemlidir. Mesnet koşulları ise Şekil 3.15'te belirtildiği gibi y ve z doğrultularında yer değiştirmeler, x ve y doğrultularında dönmeler sınırlandırılmıştır. Yüklemler deneylerde yapıldığı gibi yer değiştirme kontrollü olarak uygulanmıştır.



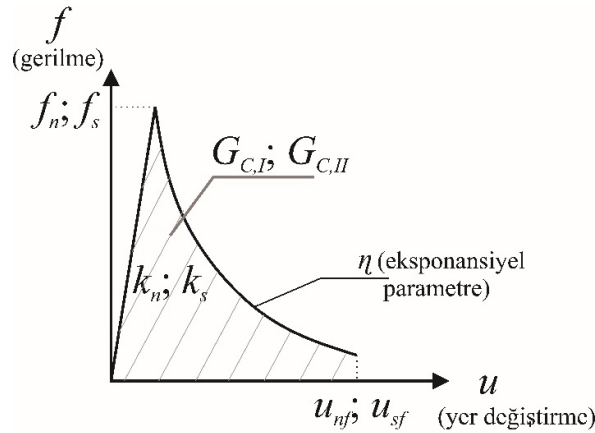
Şekil 3.15 : Her bir test kurulumunun simülasyonu için kullanılan sayısal modeller.

Nümerik olarak oluşturulan ve malzeme özellikleri tanımlanan duvar birimi ve harç malzemeleri için arayüz plastik mekanik özellikleri ise B-K kırılma kriteri kullanılarak tanımlanmıştır. Duvar birimi-harç arayüz modeli tanımlanırken arayüz rijitlik değerleri Denklem (2.4) kullanılarak harcın ve tuğlanın geometrik ve elastik bölgedeki mekanik özelliklerine bağlı olarak mod I ve mod II için elde edilmiştir (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4 : Yatay derz (harç) arayüz kohezif rijitlik değerleri.

Model	Tuğla birimi			Harç (S-tip)			Tuğla-harç arayüz kohezif rijitlik değerleri	
	Yükseklik h_b (mm)	Sekant elastisite modülü E_{sb} (N/mm ²)	Kayma modülü $G_b = E_{sb}/(2(1+\nu_b))$ (N/mm ²)	Kalınlık t_m (mm)	Sekant elastisite modülü E_{sm} (N/mm ²)	Kayma modülü $G_m = E_{sm}/(2(1+\nu_m))$ (N/mm ²)	Mod I rijitlik, k_n (N/mm ³)	Mod II rijitlik, k_s (N/mm ³)
Nümerik model "N"	58	1010	336.67	15	750	312.5	63	22

Sonlu eleman modellemeleri için tuğla-harç arayüz hasar başlangıç gerilme değerleri mod I (açılma) değeri (f_n) Çizelge 3.2'den 0.2 MPa, mod II (kayma) değeri (f_s) ise Çizelge 3.3'ten 0.3 MPa olarak alınmıştır. Arayüz için gerekli olan diğer parametreler ise Benzeggagh-Kenane (1996) bileşke mod kohezyon kuralında tanımlanan kohezif kırılma enerjileridir ($G_{c,I}$, $G_{c,II}$). Mod I ve mod II kırılma enerjileri z-şekilli numune testlerinden ve üç sıralı tuğla kayma testlerinden elde edilen gerilme (N/mm²)-yer değiştirme (mm) eğrilerinin altında kalan alan hesaplanarak elde edilmiştir (Şekil 3.16).

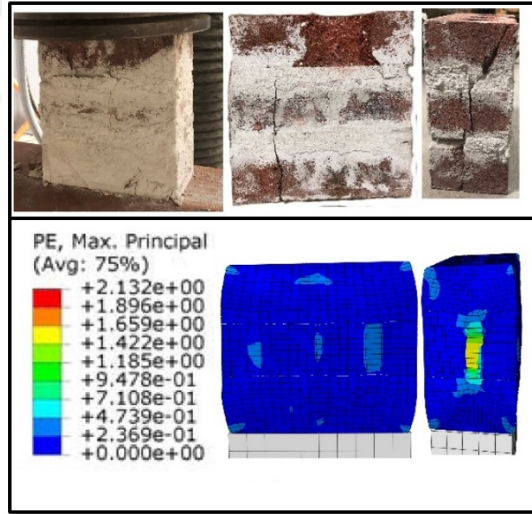


Şekil 3.16 : Tuğla-harç arayüz modellemesinde kullanılan parametreler.

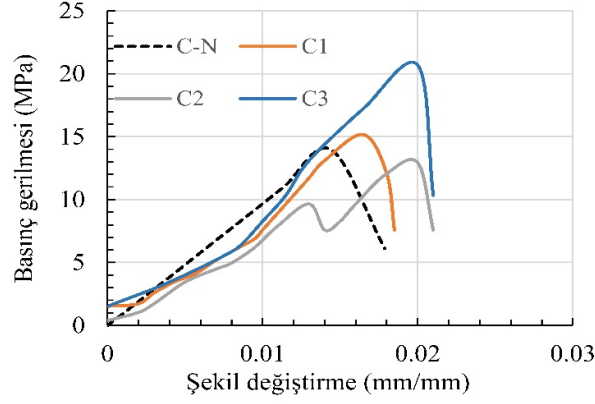
Z-şekilli numune testleri ve üç sıralı tuğla kayma testlerinden elde edilen sonuçlara göre maksimum yer değiştirme değerlerini, pik gerilme değerleri sonrası exponansiyel azalma ile oluşan kuyruk kısmı belirler (Şekil 3.10 ve Şekil 3.13). Arayüz modellemesinde kullanılan parametrelerden kırılma enerjileri $G_{c,I}$ ve $G_{c,II}$ sırasıyla, ortalama 0.01~0.06 N/mm ve 0.04~0.07 N/mm değerleri arasında değişir. Sürtünme katsayısı (μ) 0.75 olarak alınmıştır. Şekil 3.16'da belirtilen exponansiyel parametre değeri ise 2 olarak kabul edilmiştir.

3.1.3.1 Üç sıralı tuğla prizma basınç testi simülasyonu

Üç sıralı tuğla prizma model Şekil 3.15’te gösterildiği gibi detaylı olarak modellenmiştir. Analiz sonucunda elde edilen kırılma şeklinin deney sonucu ile benzer olduğu Şekil 3.17’de görülmektedir. Modele uygulanan düşey yükleme ile tuğlalar arasındaki harcın sıkışıp enine yönlerde genişleyerek şekil değiştirmesi, tuğla-harç arayüzündeki sürtünme etkileri sebebiyle sınırlıdır. Bu sebeple, düşey yük aktarımı sürtünme etkisiyle artar. Tuğla-harç arayüzde hasar oluşumu ile harcın yük aktarımı azalır. Nümerik modelin yan kısımlarında orta bölgesinde başlayan düşey çatlaklar köşelerde diyagonal çatlaklar olarak görülmüştür. Şekil 3.17’de gösterilen “PE” plastik şekil değiştirmeyi ifade etmektedir. Ayrıca, nümerik analiz sonucunda elde edilen ve “C-N” olarak tanımlanan basınç gerilme-şekil değiştirme eğrisinin, deney sonucu elde edilen eğrilerle uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 3.18). Şekil 3.18’e göre, ortalama basınç dayanımının 15 MPa ile 20 MPa arasında bir değerde olduğu anlaşılmaktadır.



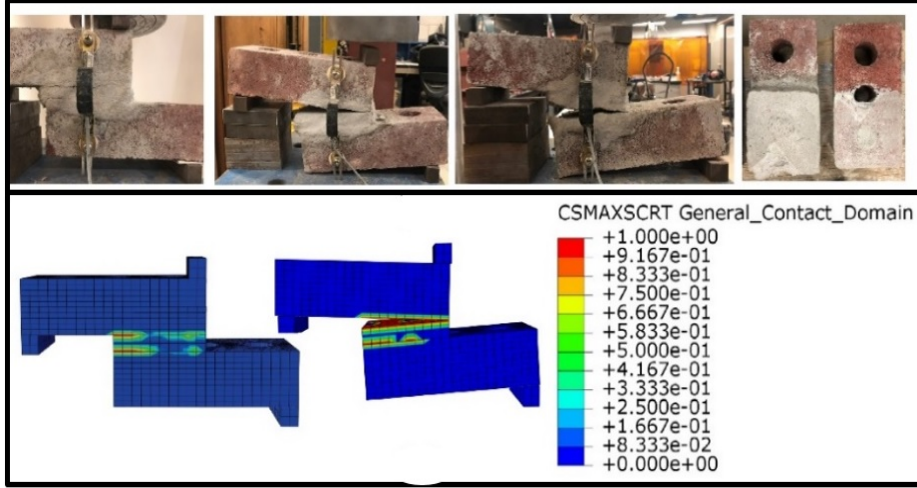
Şekil 3.17 : Üç sıralı tuğla prizma modelin sonlu elemanlar analiz sonucu elde edilen hasar tipi.



Şekil 3.18 : Üç sıralı tuğla prizma basınç testi simülasyonunun deneysel verilerle doğrulanması.

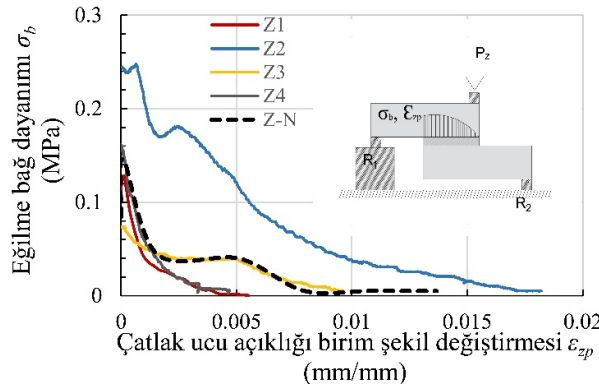
3.1.3.2 Çekme bağ dayanımı testi simülasyonu

Duvar birimi-harç arayüz çekme bağ dayanımını belirlemek için kullanılan z-şekilli numune üç nokta eğme testinin sayısal modellemesi Şekil 3.15'te gösterilmiştir. Modellemede mesnet koşulları ve yükleme durumu, z-şekilli numune deney düzeneğinde olduğu gibi tasarlanmıştır. Çizelge 3.4'teki malzeme özellikleri ve derz arayüz mekanik özellikleri Abaqus programında tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen hasar tipinin deneysel sonuçlarla benzer olduğu görülmektedir. Nümerik analiz sonucunda z-şekilli modelde hasar, tuğla biriminde görülmeyip, tuğla-harç arayüzünde meydana gelmiştir (Şekil 3.19). Şekil 3.19'da tanımlanan "CSMAXSCRT", arayüzde maksimum etkileşim gerilme oranını ifade etmektedir. Modelde oluşturulan kohezif arayüzünde maksimum gerilmeye dayalı hasar, 0 ile 1 arasındaki değerlerle tanımlanır. CSMAXSCRT bir değerine ulaştığında kırılma başlar. Renklerle ifade edilen hasar durumu için kırmızı renk hasarın başladığı yerleri göstermektedir. Burada kırılmanın başladığı yerin tuğla-harç arayüzünde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.19 : Z-şekilli deney numunesinin sonlu elemanlar analiz sonucu elde edilen hasar tipi.

Nümerik analiz sonucunda elde edilen ve “Z-N” olarak tanımlanan eğilme bağ dayanımı-çatlak ucu birim şekil değiştirme eğrisi deney sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Şekil 3.20’de gösterilmiştir. Nümerik analiz sonucunda elde edilen verilerin deney sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir. Eğilme etkisiyle arayüzde oluşan maksimum çekme gerilmesi bağ dayanımını vermektedir. Nümerik analiz sonucuna göre de mod I bağ dayanımı, deneysel sonuçlarla uyumlu olarak 0.18 MPa civarında bulunmuştur. Maksimum dayanım sonrası davranış ise üstel (eksponansiyel) azalma şeklindedir.

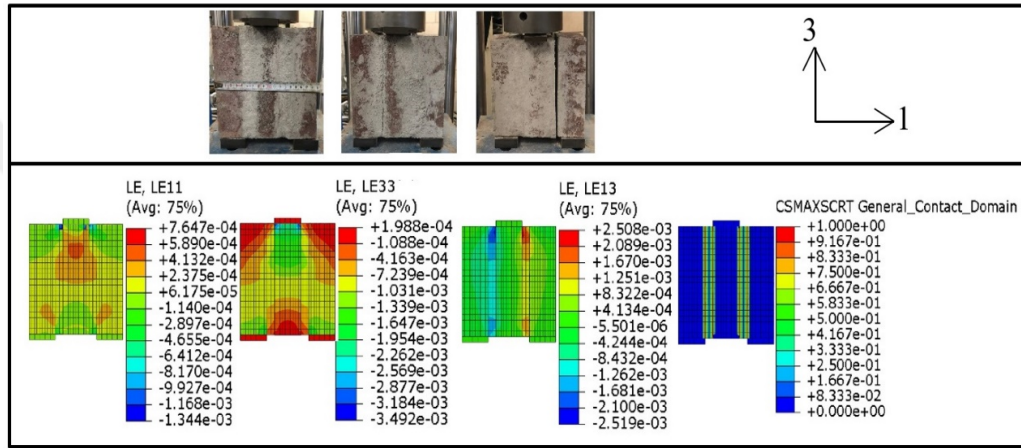


Şekil 3.20 : Z-şekilli numune üç nokta eğme testi simülasyonunun deneysel verilerle doğrulanması.

Bu deneysel ve nümerik çalışmalardan elde edilen veriler, S-tip harç kullanılarak üretilen duvarların düşey ve yatay yükler altındaki davranışlarında arayüz bağ dayanımı ve oluşabilecek hasar tipi hakkında ön bilgi verir.

3.1.3.3 Kayma bağ dayanımı (mod II) testi simülasyonu

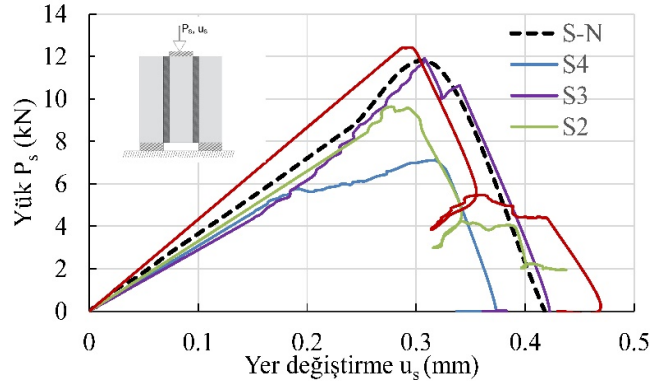
Duvarlardaki kayma bağ dayanımını belirlemek için kullanılan üçlü (triplet) kesme testinin sayısal modellemesi ve mekanik özellikleri Şekil 3.15 ve Çizelge 3.4 ile verilmiştir. Sayısal analiz sonucunda elde edilen hasar tipinin deney sonuçları ile aynı olduğu görülmektedir (Şekil 3.21). Analiz sonucuna göre kullanılan tuğla biriminde herhangi bir hasar görülmeyip, tuğla-harç arayüzünde bağ dayanımının ve sürtünme etkilerinin aşılması sonucu kayma göçmesi görülmüştür.



Şekil 3.21 : Kayma bağ dayanımı testinin sonlu elemanlar analizi sonucu sayısal modelde elde edilen hasar tipi.

Şekil 3.21’de LE11, LE33 ve LE13 olarak tanımlanan, sırasıyla 1, 3 ve diyagonal yönlerdeki logaritmik birim şekil değiştirme değerlerini ifade eden sayısal sonuçlar yer almaktadır. Sayısal modele deneyde olduğu gibi herhangi bir yanal ön basınç uygulanmadan, göçme meydana gelene kadar kesme yükü uygulanmıştır. Kesme yükünün maksimum değere ulaşması veya CSMAXSCRT hasar değerinin 1 olmasıyla Şekil 3.21’de görülen logaritmik birim şekil değiştirme değerlerine ulaşılmıştır. Sayısal analiz sonucunda da modelde, deney sonuçlarında görülen tuğla-harç arayüzlerindeki gevrek kayma kırılması oluşmuştur.

Kayma bağ dayanımı testinin Abaqus programı kullanılarak yapılan sayısal analiz sonucunun, deney sonuçları ile doğrulandığı grafik Şekil 3.22’de verilmiştir. Bağ dayanımı, elde edilen kuvvetin derz sayısına (2 adet) ve tuğla-harç arayüz alanına bölünmesiyle elde edilir. Sayısal analiz sonucunda elde edilen bağ dayanımı 0.325 MPa olup, Çizelge 3.3’te deney sonuçlarından elde edilen bağ dayanımları ile örtüşmektedir.



Şekil 3.22 : Kayma bağ dayanımı testi simülasyonunun deneysel verilerle doğrulanması.

Kayma bağ dayanımı testi ve doğrusal olmayan analiz ile duvar yatay derzlerinde kayma davranışı ve kesme kırılma modu değerlendirilebilir. Sayısal modelin deney sonuçlarıyla doğrulanması, sayısal modelleme tekniğinin duvar birimi-harç arayüz davranışının tahmininde kullanımının güvenilirliğini sunar.

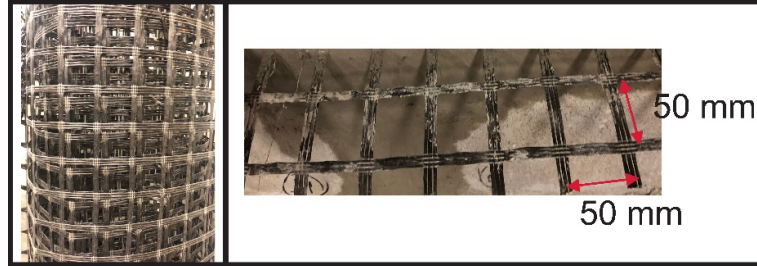
3.2 Bölme Duvarların Onarımında/İyileştirilmesinde Kullanılan Malzemelerin Seçimi ve Özellikleri

Hasarlı bölme duvarların onarımında/iyileştirilmesinde tekstil takviyeli kompozitlerin kullanılmasının, deprem etkilerinden hasar gören duvarların kaybettiği yük taşıma kapasitesini geri kazandırması ve sünek davranış elde edilmesi bakımından etkileri araştırılmıştır. Onarım/iyileştirme için kullanılacak malzemeler, takviye malzemesi olarak tekstil ve matris olarak ECC'den oluşmaktadır.

3.2.1 Kullanılan tekstil malzemesi

Deprem etkileri sebebiyle hasar gören bölme duvarlarda iyileştirme için takviye malzemesi olarak tekstil malzemesinin kullanımının etkileri araştırılmıştır. Duvar iyileştirmesi için seçilen tekstil malzemesi ECC harçla duvar yüzeyine uygulanacağından harcın tekstil ağ aralıklarından geçerek duvar yüzeyi ile etkileşimde olması gerekir. ECC harcın hem tekstil hem de duvar yüzeyi ile olan etkileşimini sağlamak amacıyla birbirine dik her iki yönde ağ aralıkları 50 mm olan bazalt tekstil tercih edilmiştir. Bazalt tekstil malzemesi Jiangsu GMV New Material Science Ltd. firması tarafından üretilmiştir. Kullanılan bazalt lifli tekstilin ortalama ağırlığı 210 gr/m², çekme dayanımı 1166.2 N/mm² ve elastisite modülü 80~100 GPa'dır. Bazalt

tekstil iki yönde bazalt sürekli fiberlerin belirli aralıklarla biraraya gelmesiyle oluşur. Bu çalışmada ele alınan bazalt tekstil malzeme her iki yönde 50 mm ızgara aralıklı her ağda 3 şerit içerir (Şekil 3.23). Her tekstil şeridi bir dizi bazalt ipliğinden ve dik yöndeki ipliklerden oluşur.



Şekil 3.23 : Bazalt tekstil malzeme (ortogonal doğrultularda ağ aralığı 50 mm).

Burada tekstil malzemesi olarak seçilen bazalt doğal (kayaç) malzeme olmasının yanında korozyona karşı dirençli, karbon ve sentetik lifli tekstillere alternatif olarak kullanılabilir. Bazalt liflerin ısı ve ses yalıtımlarının yüksek olması, diğer liflere göre daha ucuz olması ve çekme dayanımlarının E-sınıfı cam liflerinden, kopma uzamalarının ise karbon liflerden fazla olması gibi avantajlı özellikleri sebebiyle bu çalışmada duvar güçlendirmesi için tercih edilmiştir.

Çimento veya uçucu kül esaslı ECC matrisle bazalt tekstilin kullanımında tekstil malzemesinin ağ aralıklarına göre dayanımda farklılıklar oluşmaktadır. Al-Gemeel ve Zhuge (2018)'in çalışmasında ECC matrisle farklı ağ aralıklarına sahip (10 mm, 25 mm, 50 mm) bazalt tekstil kullanılarak boru numuneler üretilmiş ve basınç yüklemesi altında test edilmiştir. Bazalt tekstilin farklı ağ aralıklarına bağlı olarak enerji yutma kapasitelerindeki ve yük taşıma kapasitelerindeki farklılıkları ortaya koymuşlardır. Matrisle fiber oranının artmasının eksenel yük değerlerinde azalmaya sebep olduğunu gözlemlemişlerdir. Ağ aralığı 50 mm olan bazalt tekstil malzemesinin ECC matrisle kullanımında elde edilen kompozitin eksenel yük taşıma kapasitesindeki azalma (%16), daha düşük ağ aralığına sahip (10 mm ve 25 mm) tekstillerle üretilen kompozitlerdeki eksenel yük taşıma kapasitesi değerindeki (%18.7 ve %29.3) azalmaya göre daha düşük olduğu gözlenmiştir. Enerji yutma kapasiteleri karşılaştırıldığında ise bazalt tekstil ağ aralığı 10 mm olan kompozitin enerji yutma kapasitesinin, ağ aralığı 25 mm ve 50 mm olarak üretilen kompozitlere göre biraz daha yüksek olduğu görülmektedir. Fakat, üç bazalt tekstili arasındaki fark önemsiz sayılabilecek düzeydedir (Al-Gemeel ve Zhuge, 2018).

Hasarlı bölme duvarlara yapılacak yüzey güçlendirilmesinde kullanılacak ECC harcın duvar yüzeyine etkili şekilde nüfuz etmesinin (yapışmasının) önemli olması sebebiyle ağ aralığı yüksek bazalt tekstil malzemesi tercih edilmiştir. Bu şekilde, ağ aralığı yüksek tekstil fiberleri ECC harçla çevrelenmiş olup, aynı zamanda ECC harcın tekstil ağ boşluklarından rahat bir şekilde geçmesi ile duvar yüzeyi ile olan ilişkisi de kesintiye uğramamış olacaktır. Hasarlı olmayan bölme duvarların güçlendirilmesinde de önemli olan bu konu, hasar görmüş bölme duvarların iyileştirilmesinde daha yüksek hassasiyet istemektedir.

3.2.2 Kullanılan ECC harç

Hasarlı bölme duvarların güçlendirilmesinde tekstil malzeme ile kullanılacak matrisin seçiminde geleneksel beton ve tamir harçları yerine ECC (tasarlanmış çimento esaslı kompozit) harç malzemesi tercih edilmiştir. ECC harç, geleneksel beton ve tamir harçlarıyla karşılaştırıldığında daha duktıl ve çoklu çatlak davranışı göstererek kırılma ve çatlak ilerlemesi aşamalarında yük taşımaya devam eder. Eğilme ve çekme yükleri altında geleneksel tamir harçları ilk çatlağın oluşmasından sonra çatlamış kesitteki zorlanmalar nedeniyle tüm kütleyi kullanma olanağı olmadan yük taşıma kapasitesini kaybetmektedir. Bu tip eksikliklerin giderilmesi amacıyla tekstil malzemeleri ile kullanımda uyumlu olabilecek polimerik lif içeren ECC harçlar kullanılabilir. Polimerik lif içerikli ECC'ler özellikle çekme ve eğilme gerilmeleri altında şekil değiştirme kapasiteleri oldukça yüksektir. Polimerik lif içerikli ECC'lerin bu özelliği sebebiyle, gevrek davranış gösteren bölme duvarların güçlendirilmesinde/iyileştirilmesinde tekstil malzeme ile birlikte kullanımında uyum ve avantaj sağlayacağı öngörülmüştür. İyileştirme harcı için seçilen malzeme PVA kısa fiber katkılı ECC'dir. Burada önemli olan bir diğer parametre ise PVA fiberin ECC harcın içerisinde optimum bulunma oranıdır. Bununla ilgili literatürde birçok çalışma mevcut olup, 50x50x50 mm'lik küp numuneler kullanılarak basınç testleri yapılmıştır (Çizelge 3.5). Harcın tekstil malzemesi ve duvar yüzeyini iyi kavraması için Bölüm 5.1'de silindirik tüp birimlerin üretiminde kullanılan sık ağ aralıklarından oluşan tekstil malzemesinin aksine, hasarlı duvar iyileştirmesinde tekstilde sürekli fiberlerden oluşan ağ arası boşluğun küçük olmamasına dikkat edildi. Bu sebeple, harç malzemesinde PVA kısa fiber (6 mm) katkısı kullanılarak tekstil ağ arası boşluklarda çekme, eğilme etkilerini karşılama ve çatlak ilerleyişini durdurmada katkıda bulunması sağlandı. Kullanılan PVA fiberin çapı 0.027 mm olup, çekme dayanımı

1600 MPa ve elastisite modülü 39 GPa'dır. Çizelge 3.5'te farklı PVA fiber oranı, çimento oranı ve uçucu kül oranlarına sahip ECC karışımlar ve bu ECC'lerin basınç testi sonucunda elde edilen basınç dayanımı ve elastisite modülleri karşılaştırılmıştır. Test1 (ECC1), Test2 (ECC2) ve Test3'ün (ECC3) basınç dayanımı ve elastisite modülü, her bir test için 3'er adet 50x50x50 mm'lik küp ECC karışımlara uygulanan basınç testi sonucunda elde edilmiş olup, ECC4'ten ECC14'e kadar olan karışımlar literatürden bulunarak değerlendirilmiştir. Hacimsel oranı %2 olan fiber katkısının basınç dayanımının fiber katkısız ve daha az fiber katkılı ECC'lere göre çok az bir miktar azaldığı gözlenmiştir (ECC12 ve ECC13). Şahmaran ve diğ. (2012) çalışmalarından ECC4 ve ECC5, ECC6 ve ECC7 örneklerinde ise fiber katkısının dayanımı çok az miktarda arttırdığı görülmektedir (Çizelge 3.5). Su/bağlayıcı oranı dayanımda oldukça etkili olup, oranın azalması ile dayanımda artış gözlenmiştir (ECC1, ECC5, ECC8 ve ECC14). Çizelge 3.5'te ECC14'ten anlaşılabacağı üzere su/bağlayıcı oranı 0.15 olduğunda dayanım 86.5 MPa olmaktadır. ECC11 ve ECC12 karşılaştırıldığında ise, uçucu kül çimentonun 2 katından 4 katına çıkarıldığında ve agrega da arttırıldığında dayanımın bir miktar azaldığı görülmektedir. ECC karışımlarında kullanılan agrega, silis kumudur.

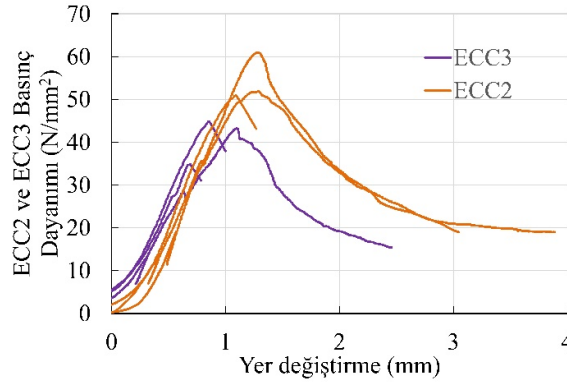
Çizelge 3.5 : Fiber katkılı ECC harç üzerine literatür araştırması ve deneysel çalışma.

ECC harç tipi	ECC harçların karışım oranları (ağırlıkça)							ECC harçların basınç test sonuçları		
	Çimento	Uçucu kül	Agrega	Su	Süper akışkanlaştırıcı	Fiber*	Su/Bağlayıcı	Basınç dayanımı (28-gün) (MPa)	E_m Harç elastisite modülü (GPa)	Kaynak
ECC1**	1	1.2	0.80	1	0.006	0.02	0.46	32.0	16.0	Test1
ECC2**	1	1.2	0.80	0.75	-	0.01	0.34	55.0	20.0	Test2
ECC3**	1	0.54	0.57	0.64	-	-	0.41	43.0	18.0	Test3
ECC4	1	1.2	0.80	0.58	0.004	-	0.27	60.3	bilinmeyen	Şahmaran ve diğ. (2012)
ECC5	1	1.2	0.80	0.58	0.004	0.02	0.27	62.5	bilinmeyen	Şahmaran ve diğ. (2012)
ECC6	1	2.2	1.16	0.85	0.005	-	0.27	52.4	bilinmeyen	Şahmaran ve diğ. (2012)
ECC7	1	2.2	1.16	0.85	0.005	0.02	0.27	54.1	bilinmeyen	Şahmaran ve diğ. (2012)
ECC8	1	1.2	0.80	0.51	0.030	0.02	0.23	65.0	20.4	Wang ve Li (2005)
ECC9	1	-	-	0.35	-	-	0.35	44.4	11.3	Nematollahi ve diğ. (2015)
ECC10	1	-	-	0.35	-	0.02	0.35	59.8	11.3	Nematollahi ve diğ. (2015)
ECC11	1	4	2.00	1.3	0.029	0.02	0.26	48.4	18.0	Zhou ve diğ. (2015)
ECC12	1	2.03	0.61	0.79	0.018	0.02	0.26	53.9	19.4	Zhou ve diğ. (2015)
ECC13	1	2.03	0.61	0.79	0.014	-	0.26	57.0	21.2	Zhou ve diğ. (2015)
ECC14	1	1.2	0.80	0.32	0.016	0.02	0.15	86.5	22.0	Mohammed ve diğ. (2016)

*Hacimsel oran

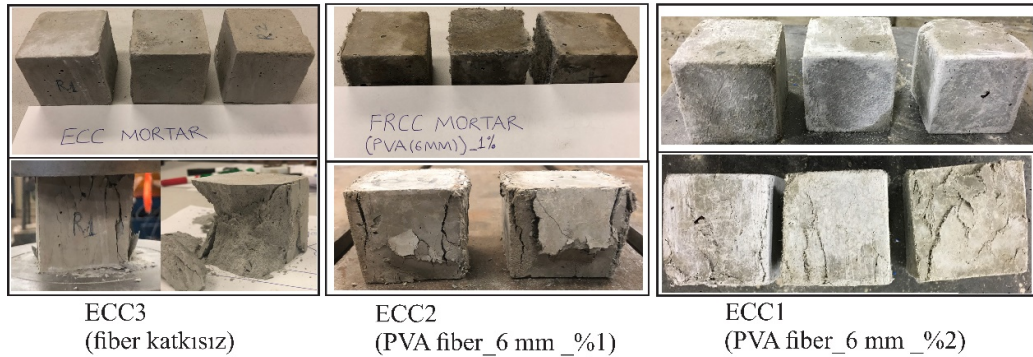
**Karışım yapışkan özellikli selülozik toz içermektedir (suyun ağırlığının 0.012 si kadar)

Bölüm 2.1.5’te açıklanan uçucu kül kullanımının avantajları sebebiyle çimentonun 1.2 katı ağırlığında uçucu kül kullanılması tercih edilmiştir. Güçlendirme/iyileştirme malzemesi olarak ECC harçta uçucu kül kullanımı, işlenebilirliği ve dayanımı artırıcı özelliğiyle tercih edilmiştir. Duvar yüzeyine ve tekstile iyileştirme harcı olarak iyi etki etmesi için suyun ağırlığının 0.012’si kadar yapışkan özellikli selülozik toz kullanılmıştır. İyileştirme malzemesi olarak, yapılan 3 testten dayanım ve elastisite modülünün yüksek olduğu ECC2 seçilerek çalışmalara devam edilmiştir. Tekstil malzemesinin ve kısa fiberlerin birlikte kullanıldığı bu iyileştirme/güçlendirme malzemesinde fiber oranı %1 olarak alınmıştır. Böylece, yüklemeler altında ECC harçta meydana gelen çatlakların tekstil malzeme ile ilerlemesi durdurularak süneklik kazandırılmış, 6 mm uzunluğunda PVA kısa fiber kullanılarak tekstil ağ aralıklarında harçta meydana gelen çatlaklarda köprüleme etkisiyle yükün dağıtılarak bir miktar daha yük taşıması amaçlanmıştır.



Şekil 3.24 : ECC2 ve ECC3 harçların basınç testi sonuçları.

Şekil 3.24’te görüldüğü gibi ECC2’de uçucu kül oranının artırılıp, su/bağlayıcı oranı düşürülerek dayanımın yaklaşık 55 MPa değerine yükseldiği gözlenmiştir.

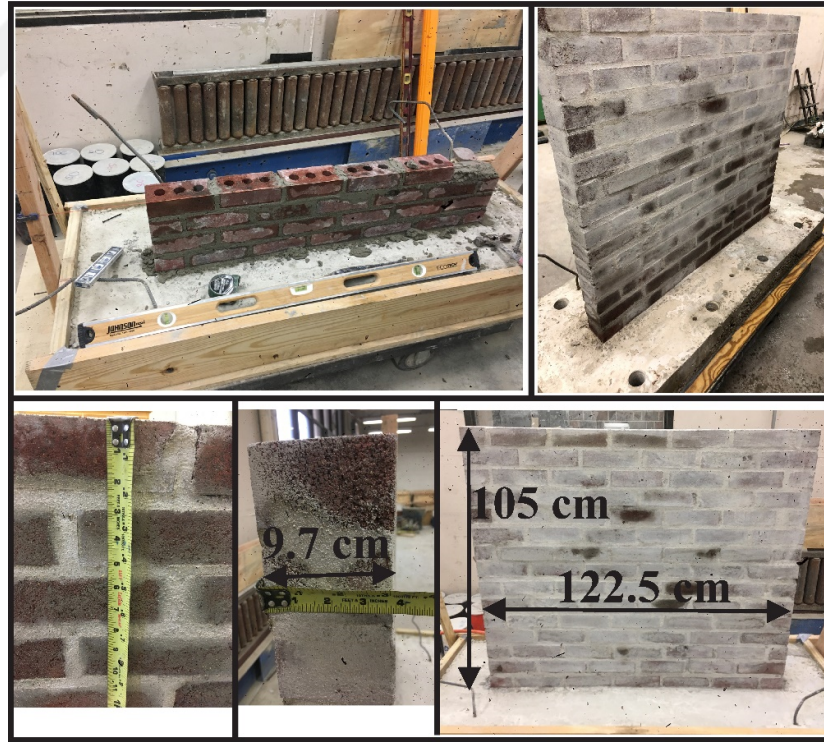


Şekil 3.25 : Basınç yüklemesi altında ECC numunelerinde oluşan hasarlar.

Şekil 3.26’da görüldüğü gibi duvar temelının duvara gelecek yatay yük altında devrilmemesi ve kırılmaması için demirle güçlendirilerek standart C20 beton dökülmüştür. Beton karışımının ağırlıkça oranı çimento 1, kum 1.5, agrega 3 ve su 0.5’tir. 3 adet duvar temeli Şekil 3.26’daki gibi hazırlanmıştır. Duvarların yapımına başlanmadan önce, betonun prizini alması ve dayanım kazanması için 28 gün kür uygulanarak beklenmiştir.

3.3.1 Kil tuğla bölme duvarların üretimi

Duvar temelleri yapıldıktan sonra temel ortasında bırakılan boşluğun içinden Şekil 3.1 ve Şekil 3.4’te belirtilen malzemeler kullanılarak duvar yapımına başlandı. Şekil 3.27’de görüldüğü gibi 122.5 cm genişliğinde, 105 cm yüksekliğinde, yaklaşık 10 cm kalınlıkta, yatay ve düşey tuğla birimler arası harç kalınlığı yaklaşık 15 mm olacak şekilde 2 adet tuğla bölme duvar üretimi yapıldı. Kullanılan tuğla birimlerle yatayda 15 sıra tuğla, düşeyde 6 sıra tuğla şaşırtmalı olarak yerleştirilerek duvarlar oluşturuldu.



Şekil 3.27 : Tuğla bölme duvar yapımı.

Duvarlar yapıldıktan sonra harcın prizini alması için 28 gün kürlenmesi beklenmiştir. Duvarların test makinesine sabitlenmesi için, temellerin uzun kenarlarında 40.6 cm aralıklarla 3.8 cm çapa sahip toplamda 8 adet delik açılarak sabitleme vidaları kullanılmıştır (Şekil 3.26 ve Şekil 3.27).

3.3.2 Beton blok bölme duvarların üretimi

Bölme duvar çeşitlerinden bir diğeri yaygın kullanılan beton blok bölme duvarlardır. Şekil 3.2’de gösterilen beton blok birimler ve S-tip harç kullanılarak, kil tuğla bölme duvarlarla aynı boyuta sahip, 122 cm uzunlukta, 104 cm yükseklikte ve 10 cm kalınlıkta beton blok duvar oluşturulmuştur. Yatayda 5 ve düşeyde 3 sıra beton blokların şaşırtmalı dizilimiyle beton blok duvar elde edilmiştir (Şekil 3.28). Yatayda ve düşeyde beton bloklar arası derz kalınlığı 15 mm’dir.



Şekil 3.28 : Beton blok bölme duvar yapımı.

Tuğla birimle benzer basınç dayanımlarına sahip beton blok birimlerle üretilen aynı boyutlardaki bölme duvarlarda kesme hasar modu elde edilerek bazalt tekstil takviyeli ECC2 harçla iyileştirildiğinde elde edilen sonuçlar karşılaştırılacaktır. Tuğla duvar numunesi üretiminde olduğu gibi, beton blok duvar numunesi de temelin orta bölgesine 20 cm derinlikte ankre edilerek üretilmiştir.

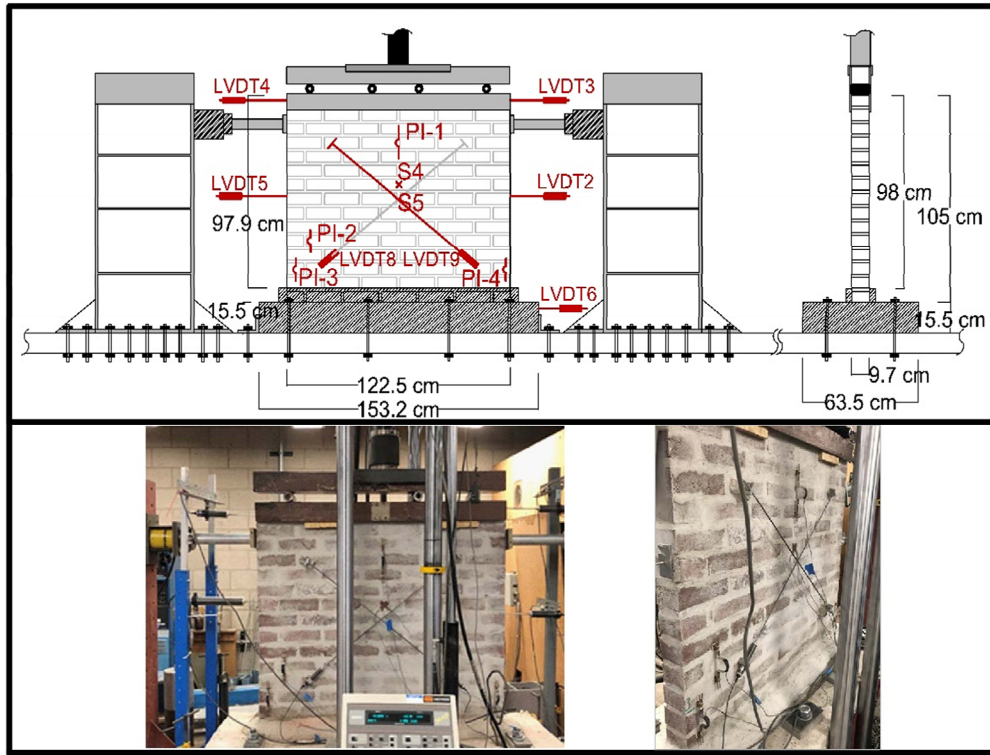
3.4 Farklı Ön Basınç Yüklemeleri ve Tekrarlı Yatay Yükler Altında Tuğla Bölme Duvarlarda Farklı Hasar Modlarının Oluşturulması

Bölme duvarlarda en kritik ve yaygın kırılma, deprem yükleri altında kesme kuvvetleri sonucunda oluşan gevrek kırılmalardır. Duvarlarda hasar tipinin oluşmasında malzeme

özellikleri, duvar uzunluğu ve duvar yüksekliği gibi parametrelere ek olarak düşey yükleme de etkili olmaktadır.

3.4.1 Deney ve ölçüm düzeneği

Tuğla bölme duvarların boyutları, deney ve ölçüm düzeneği Şekil 3.29 ile verilmektedir. Deney için 489.30 kN yük uygulama kapasitesine sahip Instron 8500R evrensel test makinesi (University of Illinois at Chicago_ Yapısal ve Beton Malzemeler Araştırma Laboratuvarı) kullanılmıştır. Duvar, test makinesine yerleştirilip, düşey yükün duvara yayılı biçimde uygulanması için duvar üstüne duvar kalınlığına uygun U profil yerleştirilmiştir. Düşey yük, 4 adet pin üzerine yerleştirilen çelik kiriş üzerinden uygulanmıştır. Duvarın üstünden uygulanacak eksenel basınç yükü, düşey yükün duvar üstüne yerleştirilen U çelik profile bu 4 adet pin noktasından aktarılması ile elde edilmiştir (Şekil 3.29).

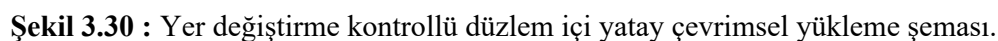


Şekil 3.29 : Tuğla bölme duvarların deney ve ölçüm düzeneği.

Duvara yatay yük uygulamadan önce, yük kontrollü olarak ön basınç yüklemesi değerine ulaşana kadar uygulanmış ve sonra bu değerde sabit tutulup, yatay çevrimsel yüklemeye başlanmıştır. Duvarlara kenar tepe noktasından düzlem içi yatay

Yatay çevrimsel yüklemeye altında duvarlarda diyagonal ve yatay yer değiştirmeleri ölçmek için 2 adet 25 mm kapasiteli diyagonal (LVDT8, LVDT9) ve 5 adet 50 mm kapasiteli yatay yer değiştirme ölçerler (LVDT2, LVDT3, LVDT4, LVDT5 ve LVDT6) olmak üzere toplam 7 adet LVDT kullanılırken, duvar orta üst kısımda ön basınç yüklemesi altında düşey yer değiştirmeyi, duvar sağ ve sol alt topuk tuğla birimlerde ezilme veya eğilme çatlaklarını (çatlak açıklığı) ölçmek amaçlı toplam 4 adet PI yer değiştirme ölçerler (Pi-shape displacement transducer) kullanıldı. Duvar orta kısımda diyagonal birim uzama ve kısalmayı ölçmek için gerinim ölçerler (strain gauges) yerleştirildi (Şekil 3.29). Her bir çevrimde yatay yük yükleme ve boşaltmada, yük ölçer ve yer değiştirme ölçerler ile ölçülen değerler veri toplayıcı (Data Logger) ile bilgisayara aktarılmıştır.

Duvar elemanlarına belirlenen ön basınç yükleme değerine kadar monotonik artan düşey yükleme uygulanmıştır. İstenilen düşey eksenel basınç yüklemesine ulaşıldığında, bu sabit basınç yüklemesi altında duvarın sağ ve sol üst kenarlarından yatay çevrimsel yük Şekil 3.30 ile gösterilen yükleme şeması FEMA 461'e göre yer değiştirme kontrollü olarak uygulanmıştır.



68

edilmiştir. Yer değiştirme kontrollü olarak uygulanan yatay çevrimsel yüklemelerde her bir yükleme adımında ulaşılan yer değiştirme değerlerine karşılık gelen yük ölçerler tarafından kaydedilen yükler kontrol edilmiştir. Sabit bir düşey ön basınç yüklemesi altında duvara uygulanan yatay çevrimsel yük maksimum değerinin %80'ine düştüğünde, duvara daha sonradan güçlendirme/iyileştirme işlemi uygulanacağından deney durdurulmuştur ve hasar kayıtları yapılarak, bu değer göçme yükü olarak kabul edilmiştir.

Yer değiştirme kontrollü olarak uygulanan yatay çevrimsel yüklemelerde her çevrimde ulaşılan duvarın yatay tepe yer değiştirme değerleri Şekil 3.29'da belirtilen LVDT3 ve LVDT4 olarak tanımlanan yer değiştirme ölçerlerden okunmuştur. Aynı zamanda duvarlar, temellerinden test makinesine sabitlenince de uygulanan yatay yük değeri arttıkça duvar temellerinde oluşabilecek ufak kaymaları (deney hatası) tespit etmek amacıyla LVDT6 yer değiştirme kayıtları alınmıştır.

3.4.3 Eksenel 0.6 MPa ön basınç yüklemesi için tekrarlı yatay yükleme testi

Deprem yükü gibi çevrimsel yatay yükler altında tuğla bölme duvarlarda eğilmeden kaynaklı hasar ve gevrek kesme hasarları oluşarak göçmeler meydana gelmektedir. Bölme duvarlarda oluşacak hasar tipinde duvara düşey olarak etkiyen yüklerin de etkili olduğu görülmektedir. Özellikle, yatay yük altındaki duvarlarda gelişen gevrek ve ani kesme kırılmaları oldukça tehlikeli olabilmektedir.

Şekil 3.29'da gösterilen duvar elemanına öncelikle 0.6 MPa ön basınç yüklemesine ulaşana kadar düşey yükleme yapılmıştır. Ön basınç yüklemesi 0.6 MPa değerinde sabit kalacak şekilde duvara Şekil 3.30'da tanımlanan yer değiştirme kontrollü tekrarlı yatay yükleme uygulanmıştır. Bu duvar "TD06" olarak isimlendirilmiştir.

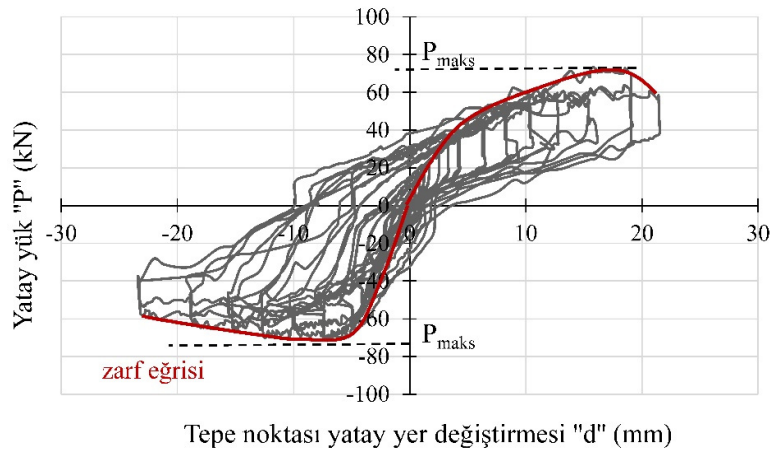
Test sonucunda Şekil 3.31'de görüldüğü gibi, düzlemsel eğilme etkisi nedeniyle duvarın bir bütün olarak temelden ayrılması ve yanal sallanma hareketi gözlenmiştir (rocking, uplift failure). Duvarın sol tarafından (+ yön) uygulanan 9. çevrimdeki yatay yükleme sonucunda duvarda oluşan moment etkisiyle duvarın sol taban kısmında eğilme çatlağının oluştuğu gözlenmiştir. Bu sırada yatay yükleme 28 kN olup, duvarın yatay tepe yer değiştirmesi 3 mm'dir. Yük boşaltılıp duvarın sağ tarafından (- yön) uygulanan yatay yükleme sonucunda da benzer şekilde duvarın sağ alt taban kısmında yatayda ilerleyen eğilme çatlağının başladığı gözlenmiştir. Duvarın yatay yer değiştirme değeri 15 mm'e ulaştığında, duvarın temel üst hizasındaki derz, duvar

uzunluğu boyunca çatlamış olup, duvar taban derzindeki çatlak açıklığı 2 cm'e ulaşmıştır (Şekil 3.31). Her çevrimde yatay yük uygulandığı esnada duvarda düzlem içi yatayda sallanma hareketi gözlenmiştir.



Şekil 3.31 : Duvar TD06'nın hasar tipi.

TD06 duvarının maksimum yatay yük taşıma kapasitesi 73 kN bulunmuştur. Son çevrimde yatay yük taşıma kapasitesi 60 kN'a düşerek, duvarın temel üst hizasındaki yatay derzinde yükün uygulandığı yönde kayma hareketi oluşmuştur. Şekil 3.32'de TD06'ya ait yatay yük ve duvar tepe noktasına ait yer değiştirme değerleri verilmiştir.

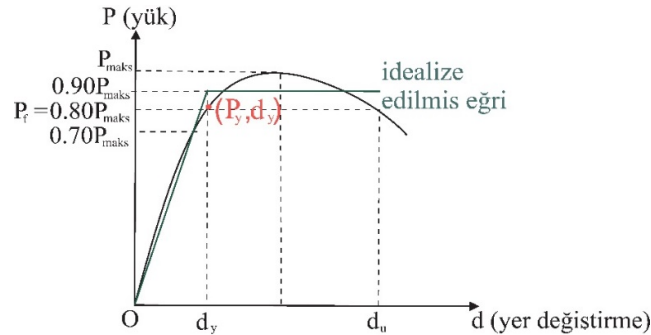


Şekil 3.32 : Tekrarlı yatay yük etkisindeki duvar TD06'nın yük (kN)-yer değiştirme (mm) eğrisi.

Şekil 3.32'de görüldüğü gibi yük maksimum değere ulaştıktan sonra duvar tabanında yatay derz boyunca ayrışmanın olması ve bu noktadan sonra duvarın sallanma hareketi kayma hareketine dönüşerek, yük değerinde bir miktar azalma tespit edilmiştir. Bölüm 3.1.2'de tuğla –harç arayüz deneylerinde bulunduğu gibi, mod I (açılma) dayanımının mod II (kayma) dayanımından küçük olması sebebiyle de yatay yük altında ilk olarak

duvar derzlerinde açılma görülüp, daha sonra derzdeki sürtünme etkisinin de aşılmasıyla kayma oluşmuştur. Bu durum, önceki bölümlerde (Bölüm 3.1.2) yapılan tuğla-harç arayüz deneylerinde ön görülmüştü. Ayrıca, tekrarlı yatay yük altında oluşan moment etkisiyle duvarın sağ ve sol alt köşe birimlerine gelen basınç kuvvetlerinden kaynaklı ezilmeler, 0.6 MPa sabit ön basınç yüklemesi altındaki TD06 duvarında gözlenmemiştir. Sabit düşey ve çevrimsel yatay yükler altında oluşan moment etkisiyle duvarın temelden ayrılmaya (çatlak oluşumunun) başlayarak sallanma hareketi yaptığı ve duvar uzunluğu boyunca yatay derzde çatlağın ilerlediği görülmüştür. Yatay derz boyunca oluşan kırılma sebebiyle duvarda kesme kuvveti etkisiyle kayma gözlenerek yük azalması oluşmuştur. Duvarda ön basınç yüklemesi 0.6 MPa olarak uygulandığına duvar yüzeyinde gevrek kesme kırılması oluşmamış olup, temel üst hizasına denk gelen duvar derzinden ayrılma meydana gelmiştir.

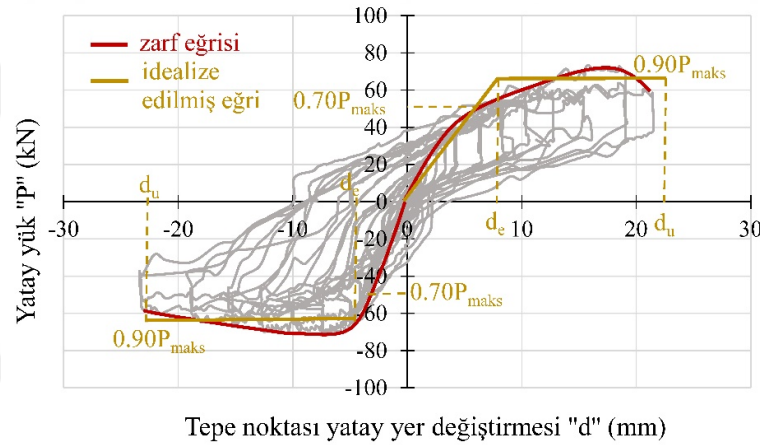
Şekil 3.32’de TD06’ya ait zarf eğrisi, tekrarlı yükler altında elde edilen yük-yer değiştirme eğrisinin her bir çevrimdeki maksimum yük değerlerinden geçirilmesiyle oluşturulmuştur. Deneysel elde edilen yük - yer değiştirme eğrilerinin zarf eğrileri genellikle sonuçların analiz edilip değerlendirilmesi için iki doğruya indirgenerek tanımlanan Şekil 3.33’te gösterilen idealize eğri ile ifade edilir (Vasconcelos ve Lourenço, 2009; Magenes ve Calvi, 1997).



Şekil 3.33 : Zarf eğrisinden idealize edilmiş eğrinin elde edilmesi.

Şekil 3.33’te gösterilen zarf eğrisi çevrimsel yükleme sonucu elde edilen davranışa karşı gelir. Bu zarf eğrisi bilineer olarak idealize edilerek elasto-plastik bir davranış şeklinde modellenebilir. İdealleştirilmiş bilineer eğrinin (zarf eğrisi) elde edilmesinde bazı kabullerden faydalanılmıştır. Oldukça lineer olmayan davranış gösteren deney numunelerinin yük - yer değiştirme eğrisinin tepe noktası maksimum yüke denk gelir (P_{maks}). Maksimum yükün 0.90 katı ($0.90P_{maks}$) idealize edilmiş bilineer eğrinin Şekil 3.33’te yatay doğru ile gösterilen plastik platoyu belirler. Davranışı incelenen

numunenin aplike edilen yüklemeler altındaki rijitliği ise orjin noktasından gerçek eğrinin $0.70P_{maks}$ değerine karşı gelen noktasına sekant çizgisi çizilerek bulunur. Sekant modülünün P_{maks} seviyesini kesen noktası akma kapasitesini belirlemede kullanılacak referans noktasını tayin eder. Bu referans noktasından düşey olarak çizilen doğrunun gerçek davranış eğrisi (zarf eğrisi) ile kesiştiği nokta akma kapasitesini (P_y), yatay eksen ile kesiştiği nokta ise akma kuvvetine karşı gelen yer değiştirmeyi (d_y) belirler. Numunelerin yer değiştirme kapasiteleri “ d_u ” olarak gösterilmektedir. Nihai yer değiştirmeler (d_u) ise gerçek davranışın pik sonrası maksimum yükün 0.90 'ına düştüğü nokta kabulüne dayanarak belirlenmiştir.



Şekil 3.34 : Duvar TD06'ya ait zarf eğrisi ve idealize edilmiş eğri.

Her bir numune için belirlenen zarf eğrileri ve bu zarf eğrilerinin değerleri kullanılarak elde edilmiş idealize bilineer eğriler numunelerin çevrimsel yük altındaki davranışları ile beraber aynı grafikte Şekil 3.34'teki gibi gösterilmektedir. Şekil 3.34'te numune davranışı her iki yön için verilmektedir. Numuneler genelde yatayda her iki yön için benzer davranış gösterse de, elde edilen yükler ve karşı gelen yer değiştirmeler küçük farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar nedeniyle yukarıda bahsedilen genel zarf ve idealize edilmiş eğrilerdeki yük ve yer değiştirme parametreleri her iki yön için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

3.4.4 Eksenel 1.2 MPa ön basınç yüklemesi için tekrarlı yatay yükleme testi

Şekil 3.29 ile gösterilen tuğla bölme duvar elemanına 1.2 MPa ön basınç yüklemesi monotonik artarak uygulanmış ve tekrarlı yatay yükleme boyunca 1.2 MPa değerinde sabit tutulmuştur. Tekrarlı yatay yükleme Şekil 3.30'da verildiği gibi uygulanmıştır. Tekrarlı yüklemeye ilk olarak duvar sol (+) taraftan başlanarak yükleme-boşaltma

yapılıp, daha sonra duvar sağı (-) yönden yer değıştirme kontrollü olarak yükleme-boşaltma şeklinde devam edilmiştir. Ön basınç değeri 1.2 MPa olarak uygulanan tuğla duvar, “TD12” olarak isimlendirilmiştir. Deney ve ölçüm düzeneğı TD06 duvar numunesi ile aynı olup, sadece ön basınç yüklemesi farklı olarak test gerçekleştirilmiştir.

Test sonucunda Şekil 3.35’te görüldüğü gibi, ilk olarak yatay yer değıştirme değeri 3 mm’ye ulaştığında TD06 numunesinde olduğu gibi, duvarın temel hizasındaki kenar derzden çatlak başlamış olup, çevrimsel yük boyunca çatlak yatayda ilerlemiştir. Duvarın alttan 2. ve 3. yatay derzlerinde de çatlaklar gözlenmiştir. Duvar tepe yatay yer değıştirme değeri 8 mm’e ulaştığında, duvarın temel hizasından yatay boyunca ilerleyen eğilme çatlakğı duvar ortasına kadar ulaşmıştır. Yük bu noktada yaklaşık 140 kN olup, maksimum değerindedir. Tekrarlı yüklemeye devam edildiğinde, duvarın tepe yatay yer değıştirme değeri 20 mm’ye ulaştığında, tuğla-harç arayüzünde ani şekilde gevrek kesme kırılması basamak şeklinde ortaya çıkmış ve yük değerinde azalma görülmüştür.



Şekil 3.35 : Duvar TD12’nin hasar tipi.

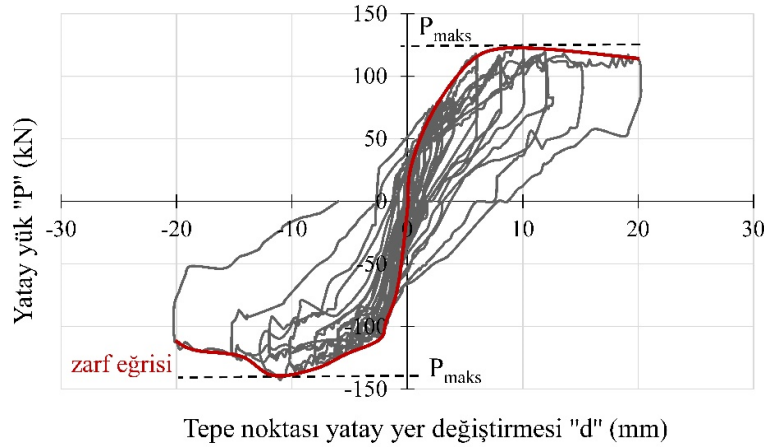
TD06 numunesine uygulanan 0.6 MPa ön basınç yüklemesi altında uygulanan tekrarlı yük sonucunda eğilme çatlakğı oluşup, sallanma hareketi yaptıktan sonra duvarda kayma meydana gelmişti. TD12 numunesinde ise ön basınç yüklemesi arttırılarak 1.2 MPa olarak uygulanmış olup duvarda eğilme ve kesme kırılması birlikte oluşmuştur (Şekil 3.35). Ön basınç yüklemesi 2 kat arttırılarak uygulandığında duvar hasar tipinin

değiştirdiği görülmektedir. Şekil 3.36'da ise, duvarda aynı zamanda düşey yükün ve yatay yükün etkisiyle oluşan momentten kaynaklı duvar alt köşe birimlerinde oluşan basınç ezilmeleri gözlenmektedir.



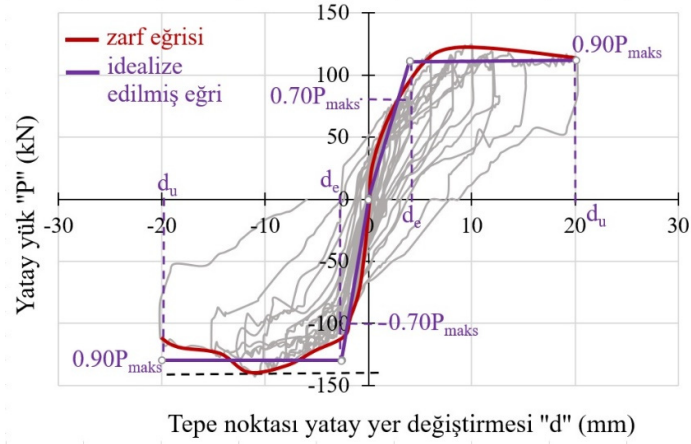
Şekil 3.36 : Duvar TD12 numunesinin alt köşe birimlerinde basınç ezilmesi.

Şekil 3.36'da gözlenen TD12 numunesinde köşe alt birimlerde oluşan basınç ezilmesi ile yük düşüşü gerçekleşmiş ve tekrarlı yük deneyi bu duvar numunesine iyileştirme uygulanmak üzere durdurulmuştur. Yatay yük ölçerlerden, LVDT3 ve LVDT4 yer değiştirme ölçerlerden elde edilen verilerle Şekil 3.37'deki yük – yer değiştirme eğrisi çizilmiştir.



Şekil 3.37 : Tekrarlı yatay yük etkisindeki duvar TD12'nin yük (kN)-yer değiştirme (mm) eğrisi.

Şekil 3.37'deki kırmızı ile çizilen zarf eğrisinden, verilerin değerlendirilmesi için Şekil 3.38'de gösterilen idealize edilmiş eğri elde edilmiştir. İdealize edilmiş eğriden duvarın rijitliği, yük taşıma ve yer değiştirme kapasitesi gibi veriler değerlendirilebilir.



Şekil 3.38 : Duvar TD12'ye ait zarf eğrisi ve idealize edilmiş eğri.

Şekil 3.38'de TD12 numunesinin yük taşıma kapasitesi, Şekil 3.34'te TD06 numunesine ait yük taşıma kapasitesinin yaklaşık 2 katı olduğu görülmektedir. Aynı zamanda duvar numunelerinin rijitlik değeri, idealize edilmiş eğriden elastik yükün, bu elastik yüke karşılık gelen yer değiştirmeye (d_e) bölünmesiyle bulunur. TD12 numunesinin rijitliği (+ yön için 8.43 GPa; - yön için 12.5 GPa), TD06 numunesinin rijitliğinin (+ yön için 29.28 GPa; - yön için 41.44 GPa) her iki yön için de 3.5 katı olduğu anlaşılmaktadır.

Tuğla bölme duvarlarda ön basınç yüklemesi 0.6 MPa değerinden 1.2 MPa değerine çıkarıldığında, duvarın tabanında oluşan yatay derzdeki eğilme çatlağına ek olarak, duvar yüzeyinde de eğilme ve kesme çatlakları elde edilmiş oldu. Bu elde edilmiş farklı hasar tiplerine sahip duvarlarda, bazalt tekstil takviyeli ECC2 malzeme ile iyileştirme yöntemleri geliştirilerek, hasarlı duvarların tekrar eski yük taşıma kapasitelerini geri kazandırmak ve sünek bir davranış elde etmek amaçlanmıştır.

3.5 Eksenel 0.2 MPa Ön Basınç Yüklemesi ve Tekrarlı Yatay Yükler Altında Beton Blok Bölme Duvarın Hasar Modunun Belirlenmesi

Tuğla bölme duvarlar gibi, ülkemizde ve dünyada beton blok bölme duvarların kullanımı da oldukça yaygındır. Deprem yüklerinden ilk hasar gören elemanlar bölme duvarlar olup, gevrek kırılma görülebilmektedir. Bu sebeple, hasar görmüş beton blok duvarların da onarım ve iyileştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Tekstil takviyeli ECC kompozit malzemelerin beton blok bölme duvarların hasar moduna göre kullanım yöntemlerinin geliştirilebilmesi ve duvarla etkileşiminin analizi için Şekil 3.28'de

Yatay çevrimsel yükleme altında duvarlarda diyagonal ve yatay yer değiştirmeleri ölçmek için 2 adet 25 mm kapasiteli diyagonal (LVDT8, LVDT9) ve 6 adet 50 mm kapasiteli yatay yer değiştirme ölçerler (LVDT2, LVDT3, LVDT4, LVDT5 ve LVDT6, LVDT7) olmak üzere toplam 8 adet LVDT kullanılırken, duvar orta üst kısımda ön basınç yüklemesi altında düşey şekil değiştirmeyi (ölçer S3), duvar sağ (ölçer S1) ve sol (ölçer S2) alt topuk tuğla birimlerde basınç ve çekme birim şekil değiştirmelerini ölçmek amaçlı toplam 3 adet beton şekil değiştirme ölçerler (strain gauges) kullanılmıştır. Duvar orta kısımda diyagonal birim uzama ve kısalmayı ölçmek için gerinim ölçerler (strain gauges) yerleştirildi (Şekil 3.39). Her bir çevrimde yatay yük yükleme ve boşaltmada, yük ölçer ve yer değiştirme ölçerler ile ölçülen değerler veri toplayıcı (Data Logger) ile bilgisayara aktarılmıştır.

3.5.2 Yükleme koşulları

Beton blok bölme duvarlarda tekrarlı yatay yükleme koşulu tuğla bölme duvarlarda uygulandığı gibidir. Duvarın sağ ve sol üst kenarlarından uygulanan tekrarlı yatay yük, FEMA 461'e göre Şekil 3.30'da gösterildiği gibi yer değiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Tuğla bölme duvarlarda uygulandığı gibi, sabit bir düşey ön basınç yüklemesi altında duvara uygulanan yatay çevrimsel yük maksimum değerinin %80'ine düştüğünde, duvara daha sonradan güçlendirme/iyileştirme işlemi uygulanacağından deney durdurulmuştur ve hasar kayıtları yapılarak, bu değer göçme yükü olarak kabul edilmiştir.

Şekil 3.39'da gösterilen yer değiştirme ölçerler (LVDT'ler), beton blok duvarlarda da tuğla bölme duvarlarda yerleştirdiği aynı noktalara apliedilerek veri elde edilmiştir. Ayrıca, düşey ve yatay yüklerin bileşkesinden oluşan momentin etkisiyle beton blok duvarların alt köşe birimlerinde meydana gelen basınç ve çekme birim şekil değiştirmelerin tespiti için S1, S2 şekil değiştirme ölçerler kullanılırken, diyagonal birim şekil değiştirme değerleri için duvar ortasına yerleştirilen S4 ve S5'den oluşan çift eksenli birim şekil değiştirme ölçer kullanıldı.

3.5.3 Eksenel 0.2 MPa ön basınç yüklemesi için tekrarlı yatay yükleme testi

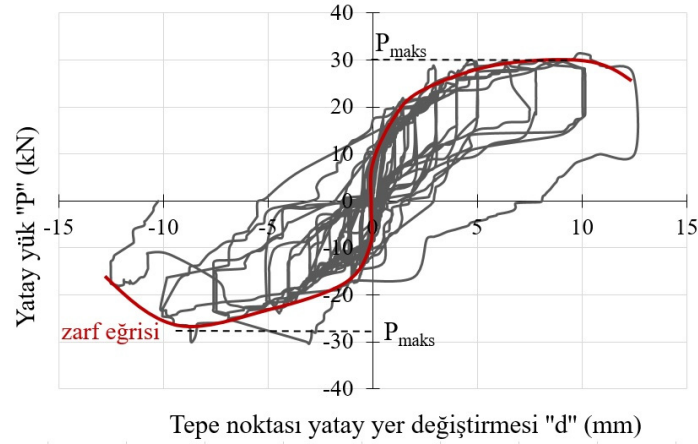
Duvarda yatayda düzlem içi tekrarlı yüklemeye ilk olarak duvar sol (+) taraftan başlanarak yükleme-boşaltma yapılıp, daha sonra duvar sağ (-) yönden yer değiştirme kontrollü olarak yükleme-boşaltma şeklinde devam edilmiştir. Ön basınç değeri 0.2 MPa olarak uygulanan beton blok duvar, "BD02" olarak isimlendirilmiştir.

Test sonucunda Şekil 3.40'ta görüldüğü gibi, ilk olarak yatay yer değiştirme değeri 0.5 mm'ye ulaştığında duvarın sol alttan 2. sıra derzinde kenardan başlayan eğilme çatlakları görülmüştür. Yer değiştirme değeri 1 mm olduğunda duvarın sağ alttan 2. sıra derzinde kenardan başlayan eğilme çatlakları meydana gelmiştir. Düşey derzde ilk çatlak, yer değiştirme değeri 1.5 mm olduğunda, duvar alt sıra birimlerin orta düşey derzinde görülmüştür. Tekrarlı yüklemeye devam edilirken, duvar tepe yatay yer değiştirme değeri 3 mm'yi aştığında duvarın alttan 2. sıra yatay derzinde çatlak açılması 4 mm civarındadır (Şekil 3.40).



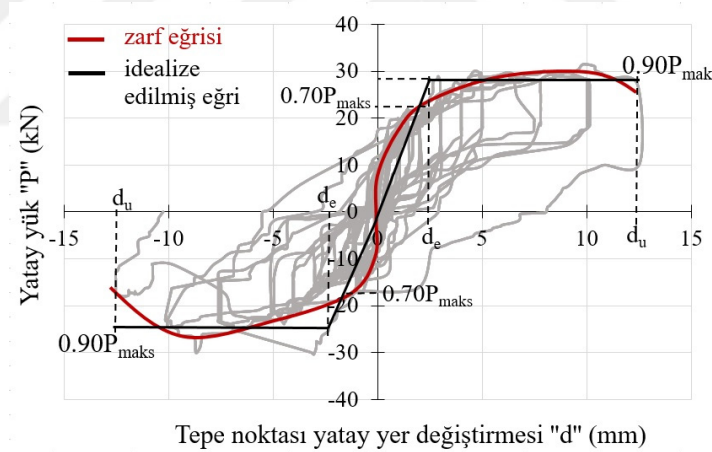
Şekil 3.40 : Duvar BD02'nin hasar tipi.

Duvar tepe yatay yer değiştirme değeri 10 mm değerine ulaşana kadar, duvar tabanı temel üst hizasındaki 1. sıra derzinde eğilme çatlakları oluşmuştur. Duvar alt köşe birimlerde ise, sağ (-) yönde 12.5 mm tepe yatay yer değiştirme esnasında sol alt köşe beton blok birimde diyagonal kırılma gözlenirken, sol (+) yönde 12.5 mm tepe yatay yer değiştirme değerine ulaşıldığında sağ alt köşe beton blok birimde diyagonal kırılma gözlenmiştir (Şekil 3.40). Duvarın alt köşe birimlerindeki kırılma ile Şekil 3.41'de kırmızı ile gösterilen zarf eğrisinde yük düşüşü oluşmuştur.



Şekil 3.41 : Tekrarlı yatay yük etkisindeki duvar BD02'nin yük (kN)-yer değiştirme (mm) eğrisi.

Tekrarlı yatay yük altında elde edilen BD02 numunesinin tepe yatay yük – yer değiştirme grafiği Şekil 3.41 ile verilmiştir. Şekil 3.42'de zarf eğrisinden elde edilen idealize edilmiş eğri bulunmuştur.



Şekil 3.42 : Duvar BD02'ye ait zarf eğrisi ve idealize edilmiş eğri.

Elde edilen sonuçlara göre, BD02 numunesinin yatay yük taşıma kapasitesi 30 kN civarındadır. Duvara ait tepe yatay yer değiştirme kapasitesi ise 12.5 mm'dir. Şekil 3.42'de elde edilen idealize eğriden BD02 numunesinin rijitliği (+) yön için 12.32 GPa, (-) yön için 10.41 GPa olarak bulunur. Duvarda 0.2 MPa eksenel ön basınç yüklemesi altında uygulanan tekrarlı yatay yükleme sonucunda, alt iki sıra derzde eğilme çatlakları oluşmuş olup, alt köşe birimler derzlerinden kırılarak duvardan ayrılmıştır. Duvarda düzlem içi sallanma hareketi gözlenmiştir. Moment etkisindeki düzlem içi yatay sallanma hareketi esnasında duvardan ayrılmış alt köşe birimlerinin

ucuna gelen basınç sebebiyle bu birimlerde diyagonal kırılma gözlenmiştir. Duvar genelinde kesme kırılmasına rastlanmamıştır.

3.6 Beton Blok Duvarın Yatay Derzinin Onarımı İçin Kullanılan Yöntem ve Tekrarlı Yatay Yükleme Testi

3.6.1 Beton blok duvarın yatay derzinin onarımı için kullanılan yöntem

Beton blok duvar numunesi BD02'nin tekrarlı yatay yükleme testi sonucu alt köşe blok birimlerinde kırılma ve yatay derzinde duvar uzunluğu boyunca hasar oluşumu gözlenmiştir. Oluşan hasarın onarımı için öncelikle hasar görmüş duvar alt köşe birimler çıkartılmış ve yatay derzde kırılmış harçlar temizlenmiştir. Çıkartılan hasar görmüş duvar alt köşe birimler yerine yeni bloklar yerleştirilmiştir.

Yatay derzde temizlenen harç bölgesine, günümüzde yaygın olarak yatay donatı, çelik ince çubuk veya teller gibi takviye malzemeler ile yüksek dayanımlı harçlarla dolgu yapılmaktadır. Bu çalışmada yatay derzde temizlenen harç yerine bazalt tekstil takviyeli ECC3 malzemesi kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak çelik tel veya demir donatı yerine alternatif olabilecek daha az maliyetli ve uygulandığı yere göre şekil alabilen bazalt tekstil malzemesi ve Çizelge 3.5'te gösterilen PVA kısa fiber katkısız ECC3 harç yatay derz dolgusu için seçilmiştir. Duvar birimleri (delikli beton bloklar) arasına 15 mm kalınlığında uygulanan ECC3 harcın arasına bazalt tekstil takviye malzemesi yerleştirilmiştir (Şekil 3.43). ECC3 harcın 15 mm kalınlıkta uygulanması, üst ve alt beton bloklarla olan temasının kesintiye uğramadan yapışmanın sağlanması için harç, PVA fiber katkısız olarak kullanıldı. Yatay derzinin onarımı yapılan beton blok duvar "BD06" olarak isimlendirildi. BD06'da bu derzde tekrar oluşabilecek kayma hasarlarını, onarımı yapılan yatay derzin alt ve üst sırasını oluşturan beton blok birimlerdeki ayrışmayı önlemesi ve bu derzde çatlak ilerlemesini sınırlandırması için Şekil 3.43'te görüldüğü gibi bazalt tekstil takviyesi kullanıldı. Şekil 3.23'te gösterilen geniş ağ aralıklarına (50 mm) sahip bazalt tekstil malzemesinin kullanılması sebebiyle, ECC3 harcın tekstil malzemesiyle ve beton blok birimlerin tüm yüzeyleriyle etkileşiminin sağlandığı kabul edilmiştir.



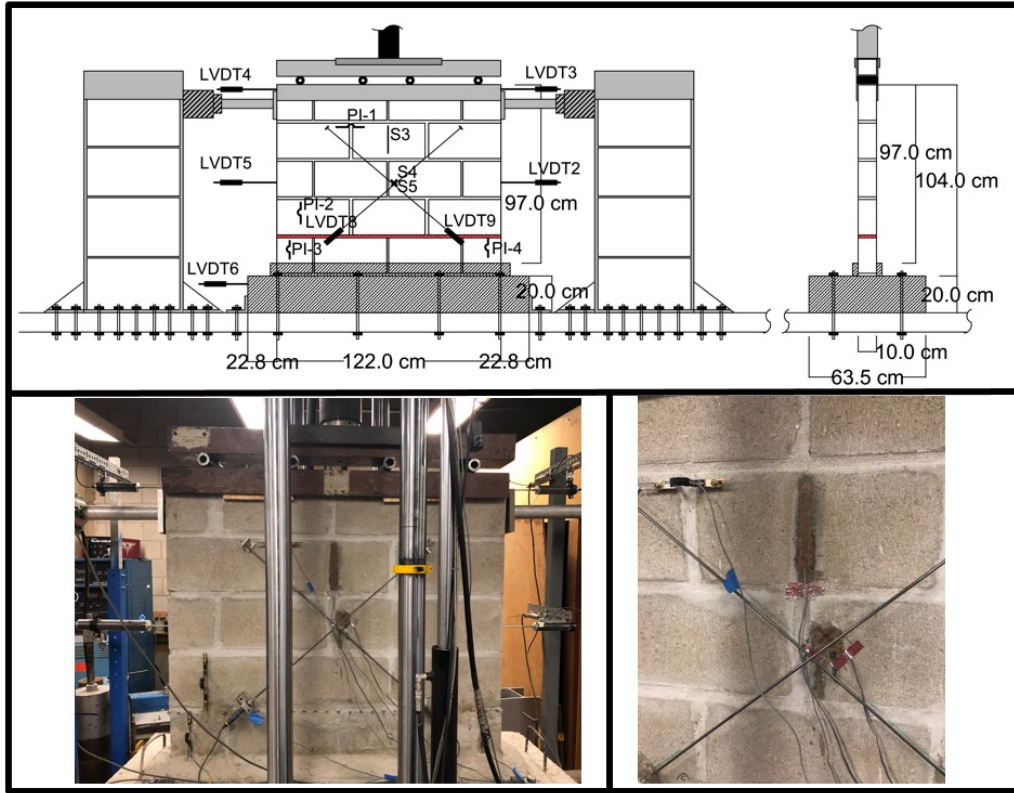
Şekil 3.43 : Kayma hasarı oluşmuş BD02 duvar numunesinin yatay derzinin onarımı.

Kayma hasarı görülmüş duvarın (BD02) yatay derzinde tekstil takviyeli ECC3 ile onarım yöntemi kullanılarak, hasarın olduğu zayıf yatay derz bölgesinde eğilme çatlaklarının ilerlemesi sınırlandırılıp, beton blok duvarında (BD06) yüzey iyileştirme yöntemlerinin geliştirilebilmesi için, deprem yükü etkisindeki bölme duvarlarda sık rastlanılan diyagonal (adım) kesme çatlağının oluşması amaçlanmıştır. Bu nedenle, kayma hasarı gerçekleşmiş yatay derz, bazalt tekstil-ECC3 kompozit malzeme ile güçlendirilip, tekrarlı yatay yüklemeye önce, eksenel ön basınç yüklemesi 0.2 MPa değerinden 0.6 MPa değerine yükseltilmiştir.

3.6.2 Deney ve ölçüm düzeneği

Yatay derz onarımı yapılmış beton blok duvarın deney ve ölçüm düzeneği Şekil 3.44'te verilmiştir. Deney düzeneği, BD02, TD06 ve TD12 numune testlerinde olduğu gibi hazırlanmıştır. BD06 numunesinde düzlem içi yatay ve diyagonal yer değiştirme ölçerlerin (LVDT'lerin) yeri, diğer duvar deneylerinde olduğu gibidir. Basınç ve çekme etkisiyle oluşan çatlak açıklığını ölçmek için ise Şekil 3.44'te PI-1, PI-2, PI-3 ve PI-4 olarak isimlendirilmiş pi-şekilli yer değiştirme ölçerler kullanılmıştır. Duvara tekrarlı yatay yükleme – boşaltma yapılmadan önce düşey yükleme etkisindeki şekil değiştirme değerini ölçmek ve kontrol etmek amaçlı S3 birim şekil değiştirme ölçer kullanılmıştır. Diyagonal birim şekil değiştirmeleri ölçmek için ise duvar orta

noktasında yüzeye yerleştirilen S4 ve S5 birim şekil değiştirme ölçerler kullanılmıştır (Şekil 3.44).

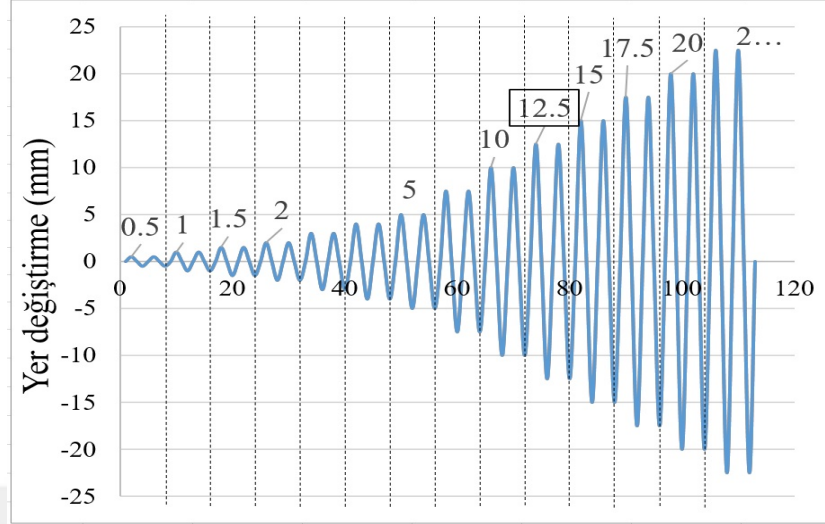


Şekil 3.44 : BD06 duvar numunesinin deney ve ölçüm düzeneği.

Her bir çevrimde yatay yük yükleme ve boşaltmada, Şekil 3.44'te gösterilen yük ölçer ve yer değiştirme ölçerler ile ölçülen değerler veri toplayıcı (Data Logger) ile bilgisayara aktarılmıştır.

3.6.3 Yükleme koşulları

Duvar BD06'nın tekrarlı yatay yükleme şeması Şekil 3.45'te gösterilmiştir. Duvarın sağ ve sol üst kenarlarından uygulanan tekrarlı yükleme - boşaltma, FEMA 461'e göre yer değiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.45 : Yer değiştirme kontrollü düzlem içi yatay çevrimsel yükleme şeması.

Sabit bir düşey ön basınç yüklemesi (0.6 MPa) altında duvara uygulanan ve Şekil 3.45'te gösterilen yatay çevrimsel yüke, duvarın ulaştığı maksimum yük değerinin %80'ine düşene kadar devam edilip, bu değer göçme yükü olarak kabul edilmiştir.

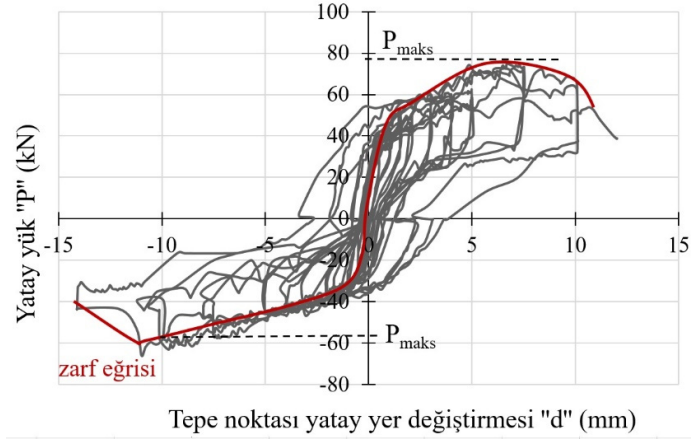
3.6.4 Eksenel 0.6 MPa ön basınç yüklemesi için tekrarlı yatay yükleme testi

Düşey yüklemedeki artış ve yatay derz onarımı ile duvar kayma hasarı oluşumuna karşı güçlendirilmiş ve rijitliği arttırılmıştır. Bu durum, beklendiği gibi duvar yatay yük kapasitesinde artışa sebep olurken, yatay yer değiştirme kapasitesinde azalma görülmüştür. Yatay çevrimsel yüklemeye BD06 numunesinin düzlemsel eğilme kapasitesi arttırıldığından, duvarda 74.95 kN yük değerine ulaşıldığında diyagonal (adım) kesme çatlağı meydana gelmiştir. Meydana gelen kesme çatlağı harç ve tuğla-harç arası yüzeyde oluştuğu görülmüştür. Şekil 3.46'da duvar her iki yüzünde oluşan diyagonal (adım) kesme çatlakları görülmektedir.



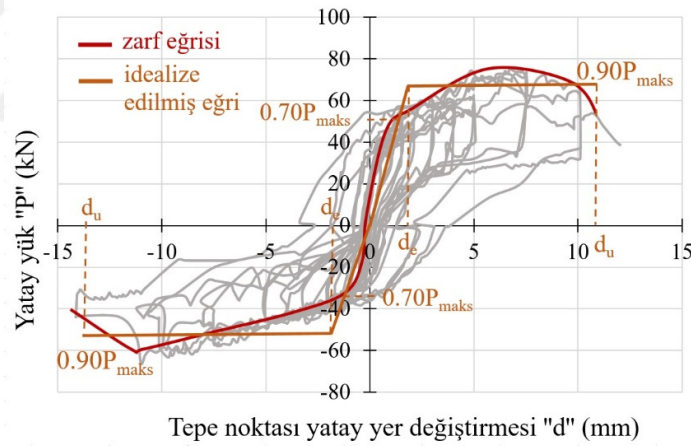
Şekil 3.46 : Duvar BD06’nın hasar tipi.

Duvara her iki yönde düzlem içi tekrarlı yatay yük uygulanırken duvar tepe yatay yer değiştirme değeri 1 mm olduğunda, ilk olarak duvar alt sıra yatay derzde eğilme çatlakları oluşmaya başlamıştır. Tepe yatay yer değiştirme değeri 3 mm’ye ulaştığında, duvar köşe blokların düşey derzlerinde çatlaklar gözlenmiştir. Şekil 3.46’da görüldüğü gibi duvar köşe bloğunda 9 numaralı diyagonal çatlak görülmeye başlandığında duvar tepe yatay yer değiştirme değeri 10 mm’ye ulaşmıştır. İlk diyagonal adım kesme çatlağı ise duvar ortasında (10 numaralı çatlak) meydana gelmiştir. Yatay yük kapasitesi maksimum değerine ulaştıktan sonra ani ve gevrek oluşan diyagonal (adım) kesme hasarı sebebiyle kapasite büyük ölçüde azalmıştır (Şekil 3.47).



Şekil 3.47 : Tekrarlı yatay yük etkisindeki duvar BD06'nın yük (kN)-yer değiştirme (mm) eğrisi.

Şekil 3.48'de BD06 numunesine ait zarf eğrisinden elde edilen idealize edilmiş eğri gösterilmiştir. İdealize edilmiş eğriden BD06 duvarının rijitliği, (+) yön için 38 GPa, (-) yön için 33 GPa olarak bulunur.



Şekil 3.48 : Duvar BD06'ya ait zarf eğrisi ve idealize edilmiş eğri.

BD06 duvarının maksimum tepe yatay yer değiştirme değeri (+) yön için yaklaşık 11 mm iken, (-) yön için 14 mm değerlerindedir. BD02 duvarında eğilme çatlakları ve kayma hasarı görülürken, kayma bölgesindeki yatay derzin bazalt tekstil takviyeli ECC3 harçla onarımı yapıldığında ve eksenel ön basınç değeri 0.6 MPa olarak uygulandığında duvarda kesme hasarı elde edilmiştir. Bazalt tekstil takviyeli ECC3 harçla yapılan onarımda beton blok duvarın düzlem içi tepe yatay yer değiştirme kapasitesinde etkin bir değişiklik gözlenmemiş olup, hasar tipinde değişiklik ve maksimum yük taşıma kapasitesinde artış gözlenmiştir. BC06 numunesinde, BC02 numunesinde olduğu gibi yatay derz çatlaklarının, kritik (kaymanın olduğu) yatay derz

boyunca uygulanan bazalt tekstil takviyesi sebebiyle duvar uzunluğu boyunca ilerleyemediği ve yön değiştirdiği görülmüştür.

3.7 Güçlendirilmemiş Bölme Duvarların Test Sonuçlarının Kodlar

Kullanılarak Analitik Karşılaştırmalarının Yapılması

Bölme duvarlar TD06, TD12, BD02 ve BD06'nın tekrarlı yatay yükler altında elde edilen kesme kapasite değerlerinin ve hasar modlarının, ampirik formüllerle ifade edilen standartlarla karşılaştırması yapılmıştır. Standartlar kullanılarak duvarların fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlı parametrelerle kesme kapasiteleri (V_n) hesaplanmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen kesme kapasiteleri bu standartlardan elde edilen değerlerle karşılaştırılarak, duvarların hasar modlarının analitik olarak değerlendirilmesi yapılmış ve deney sonuçları desteklenmiştir.

Buna göre, yığma duvarlarla ilgili CSA S304.1-04 Kanada Standartlarına göre kesme kapasitesi V_n , Denklem (3.3) ve Denklem (3.4) ile ifade edilmektedir.

$$V_n = (\nu_m b_w d_v + 0.25 P_d) \delta_g + (0.6 A_v f_y \frac{d_v}{s_h}) \quad (3.3)$$

$$\nu_m = 0.16(2 - \frac{h_w}{d_v}) \sqrt{f'_m} \quad (3.4)$$

Burada, ν_m , duvarın kayma dayanımını ifade etmekte olup, duvarın basınç dayanımı (f'_m) ile ilişkilidir. Duvarın basınç dayanımı, Şekil 3.5 ve Şekil 3.7'deki tuğla duvarlar için yapılan üç sıralı tuğla prizma basınç testi ile bulunabildiği gibi, UBC (The Uniform Building Code) standardı Tablo 21-D'den veya MSJC (Masonry Standard Joint Committee) şartnamesi Tablo 1 ve Tablo 2'den duvar üretiminde kullanılan birimin basınç dayanımı ve kullanılan harç tipine göre elde edilebilir. δ_g , duvar birimleri delikli değilse ya da deliklerin içi tamamen harçla doluysa 1 alınırken, bu çalışmada olduğu gibi delikli duvar birimi kullanılıp kısmi harçla dolu olmasına göre 0 ve 1 arasında bir değer alınır.

MSJC (2011)'e göre, kesme kapasitesinin hesabı Denklem (3.5) ve Denklem (3.6) ile verilmiştir.

$$V_n = \nu_m b_w l_w + 0.25 P_d + 0.5(\frac{A_v}{s_h}) f_y l_w \quad (3.5)$$

$$\nu_m = 0.083 \left[4.0 - 1.75 \left(\frac{h_w}{l_w} \right) \right] \sqrt{f'_m} \quad (3.6)$$

Eurocode 6'ya göre ise bölme duvarların kesme kapasitesinin hesabı Denklem (3.7) ve Denklem (3.8)'da verilmiştir.

$$V_n = \nu_m b_w l_w + 0.9 d_v \left(\frac{A_v f_y}{s_h} \right) \quad (3.7)$$

$$\nu_m = (0.3 + 0.4 \frac{P_d}{b_w l_w}) \quad (3.8)$$

Bu standartlara ek olarak Tomazevic ve diğ. (1997), duvar kesme kapasitesini duvarın genel 3 göçme şekliyle tanımlamıştır. Denklem (3.9) ile duvarda diyagonal çekme hasarı oluşturacak kesme kapasitesi V_{dt} , Denklem (3.10) ile kayma hasarı oluşturacak kesme kapasitesi V_{ss} ve Denklem (3.11) ile eğilmeden kaynaklı hasar oluşturacak kesme kapasitesi V_{fl} değerleri verilmektedir. Bu hesaplamalar sonucunda Denklem (3.12) ile elde edilen kesme kapasitesi değerlerinden en küçük olan değer, bölme duvarın kesme kapasitesi değerini verir.

$$V_{dt} = A_w \frac{f_t}{b} \sqrt{\frac{\sigma_y}{f_t} + 1} \quad (3.9)$$

$$V_{ss} = A_w (f_{vo} + \mu \sigma_y) \quad (3.10)$$

$$V_{fl} = \frac{M}{\alpha h}, \quad M = \frac{\sigma_y L^2 t}{2} \left(1 - \frac{\sigma_y}{f_m} \right) \quad (3.11)$$

$$V_n = \min(V_{dt}, V_{ss}, V_{fl}) \quad (3.12)$$

Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar (RYTEİE, 2019)'a göre ise, yığma yapılar için tanımlanmış göçme şekli ile ilişkili kesme kapasite hesapları kullanılmaktadır. Bu çalışmada aynı zamanda, Denklem (3.13), Denklem (3.14) ve Denklem (3.15) kullanılarak duvarların kesme kapasiteleri hesaplanıp, Çizelge 3.6'da diğer standartlarla karşılaştırması yapılmıştır. RYTEİE'ye göre yığma duvarların riskli eleman tespitinde, düşey ve yatay (deprem yükleri) yüklere maruz düzlem içi davranış gösterdiği kabul edilen yığma duvarlar için hesaplanan kesme kuvvetinin kesme kapasitesine bölünmesiyle Etki/Kapasite Oranı (m) elde edilir. Bu oran, RYTEİE

Tablo 7.4’te ve Denklem (3.13), (3.14) ve (3.15)’te hesaplanan kesme kuvveti değerlerinden en küçük değere karşılık gelen, duvarın göçme tipine göre belirlenen sınır değer ($m_{sınır}$) ile karşılaştırılır. İncelenen duvarın m değerinin $m_{sınır}$ değerden büyük olması duvarın riskli eleman olduğunu gösterir.

$$V_{dt} = \beta f_{dç} l_d t \sqrt{1 + \frac{\sigma}{f_{dç}}}; \quad \beta = \left\{ \begin{array}{l} 1, \frac{l_d}{H_d} \geq 1 \\ \frac{l_d}{H_d}, 1 \geq \frac{l_d}{H_d} \geq \frac{2}{3} \\ \frac{2}{3}, \frac{2}{3} \geq \frac{l_d}{H_d} \end{array} \right\}; \quad m_{sınır}=1.0 \quad (3.13)$$

$$V_{ss} = (\tau_o + \mu\sigma) l_d t; \quad m_{sınır}=2.0 \quad (3.14)$$

$$V_{fl} = \sigma \frac{l_d^2 t}{H_d} \left(1 - \frac{\sigma}{0.8 f_m} \right); \quad m_{sınır}=3.0 \quad (3.15)$$

Bu çalışmada değerlendirmesi yapılan duvarlar donatı içermeyen, güçlendirilmemiş elemanlar olduğundan Denklem (3.3), Denklem (3.5) ve Denklem (3.7)’de kesme kapasitesini belirlemede donatı katkısını içeren ikinci terimler sıfır olarak alınmıştır. RYTEİE (2019)’a göre duvarların kesme kapasitesi hesaplarında kullanılan duvar basınç dayanımları (f_m), beton blok duvarlar için Fortes ve diğ. (2017)’nin yaptığı çalışmalardan yaklaşık 12 MPa olarak kabul edilirken, tuğla duvarlar için yapılan üç sıralı tuğla prizma basınç testi sonucunda Şekil 3.7’de sunulan grafiğe göre 15 MPa olarak alınmıştır. Kohezyon (τ_o , başlangıç kayma gerilmesi) değerleri daha çok harçla ilgili olup, duvarlarda S-tip harç kullanılmıştır. Tuğla duvarlar için üçlü kesme testi sonucu elde edilen, Çizelge 3.3’te verilen tuğla-harç arayüz kayma bağ dayanımı, arayüz kohezyon değerini verir. Bu kohezyon değeri, tuğla duvarlar için 0.30 MPa alınırken, beton blok duvarlar için yaklaşık 0.25 MPa olarak kabul edilmiştir. Denklem (3.9)’da “ f_t ” ve Denklem (3.13)’te “ $f_{dç}$ ” olarak ifade edilen diyagonal çekme dayanımları, duvarlara diyagonal çekme testi uygulanmadığından, Dizhur ve Ingham (2013), Basili ve diğ. (2019)’un çalışmalarından yararlanarak tuğla duvarlar için 0.45 MPa ve beton blok duvarlar için 0.35 MPa olarak kabul edilmiştir. Değerlendirmesi yapılan beton blok bölme duvarların ve tuğla bölme duvarların yukarıda belirtilen standartlara göre kesme kapasitelerinin karşılaştırması, duvarların mekanik

özelliklerini belirlemede kullanılan duvar bileşenleri ile yapılan test sonuçlarından yararlanarak ve yapılan yaklaşık kabullerle Çizelge 3.6 ile verilmektedir.

Çizelge 3.6 : Bölme duvarların kesme kapasitesi test sonuçlarının literatürdeki farklı kodlardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması.

Numune	V_n , Bölme duvarların kesme kapasiteleri (kN)			Kullanılan kod ve referanslar
BD02	48.536			CSA S304.1-04
	53.395			MSJC) 2011
	44.764			Eurocode 6
	50.001*	35.868**	21.060***	Tomazevic ve diğ. (1997)
	53.520*	42.700**	28.027***	RYTEİE, 2019
	(+) yön 31.50; (-) yön 28.00			Test
BD06	54.653			CSA S304.1-04
	59.511			MSJC) 2011
	62.557			Eurocode 6
	66.235*	71.736**	73.747***	Tomazevic ve diğ. (1997)
	70.345*	67.100**	80.502***	RYTEİE, 2019
	(+) yön 74.95; (-) yön 55.00			Test
TD06	96.243			CSA S304.1-04
	104.512			MSJC) 2011
	61.459			Eurocode 6
	79.668*	70.699**	76.431***	Tomazevic ve diğ. (1997)
	81.597*	71.295**	79.019***	RYTEİE, 2019
	(+) yön 73.21; (-) yön 70.6			Test
TD12	112.312			CSA S304.1-04
	120.580			MSJC) 2011
	91.707			Eurocode 6
	100.473*	124.593**	198.093***	Tomazevic ve diğ. (1997)
	102.397*	110.250**	149.720***	RYTEİE, 2019
	(+) yön 124.78; (-) yön 142.73			Test

*Diyagonal çekme sebebiyle kesme kapasitesi hesabı, V_{dt}

**Kayma sebebiyle kesme kapasitesi hesabı, V_{ss}

***Düzlemsel eğilme sebebiyle kesme kapasitesi hesabı, V_{fl}

Çizelge 3.6’da farklı kodlarla ve literatürden elde edilen kesme kuvveti kapasitesi yaklaşımları ile test sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen değerler aynı zamanda duvarların hasar biçiminin de tahmin edilmesine olanak sağlamıştır. Duvarlara

uygulanen tekrarlı yatay yükleme testi sonuçlarına en yakın değerlerin ve hasar biçiminin, Tomazevic ve diğ. (1997), RYTEİE (2019) standartlarından elde edilen ve duvarlara ait göçme türüne göre hesaplanan kesme kapasite değerlerinden en küçük değere karşılık geldiği görülmektedir.

3.8 Kesme Hasarına Sahip Bölme Duvarların Yüzeyine Uygulanan İyileştirme Yöntemlerinin Geliştirilmesi

Kesme hasarı elde edilmiş tuğla duvar ve bölme duvarların bazalt tekstil takviyeli ECC2 ile iyileştirilmesi yapıldığında elde edilen güçlendirilmiş duvarın tekrarlı yatay yükler altında etki ve performansı incelenmiştir. Duvarların hasar ve göçme biçimleri dikkate alınarak iyileştirme yöntemleri geliştirilmiş ve etkileri incelenerek karşılaştırmaları yapılmıştır. Tekstil takviyeli ve fiber katkılı ECC malzemelerin, hasarlı duvarları iyileştirmedeki etkileri üzerinde durularak, yaygın olarak kullanılan ve hasar görmüş tuğla ve beton blok bölme duvarlarının iyileştirilmesi/güçlendirilmesi alanındaki kullanım yöntemleri, avantajları ve dezavantajları araştırılmıştır.

3.8.1 Hasarlı beton blok bölme duvarlarda iyileştirme yöntemlerinin geliştirilmesi

3.8.1.1 Duvar yüzeyine uygulanan iyileştirme/güçlendirme yöntemi

Tekrarlı yatay yükleme testleri yapılan beton blok bölme duvarlarda, duvarın temel hizasından ve yatay derz boyunca ayrılarak düzlem içi sallanma hareketi yaptığı ve sonunda kayma göçmesinin olduğu gözlenmiştir. Eksenel ön basınç yüklemesi artırıldığında ve yatay derzde onarım yapıldığında duvarda diyagonal kesme hasarı oluşmuştur. Bölme duvarlarda oluşan gevrek hasar türlerinden diyagonal kesme hasarının BD06 numunesinde tüm duvar yüzeyini etkilemesi sebebiyle, duvarın her iki yüzeyine 15 mm kalınlıkta bazalt tekstil takviyeli ECC2 harç uygulanmıştır. Bunun için Şekil 3.49’da gösterildiği gibi ECC2 harç hazırlanarak ilk olarak duvar yüzeyine 7.5 mm uygulanmıştır. Daha sonra, ECC2 harçlı yüzeye bazalt tekstil yerleştirilerek hasarlı yüzey tekstil malzemesiyle kaplanmış ve tekstil yüzeyine tekrar 7.5 mm kalınlıkta ECC2 harç uygulaması yapılmıştır. Telis bezi kullanılarak duvara 28 gün kür uygulanmıştır. Yüzey iyileştirmesi yapılmış hasarlı beton blok bölme duvar, “BD06YG” olarak isimlendirilmiştir.

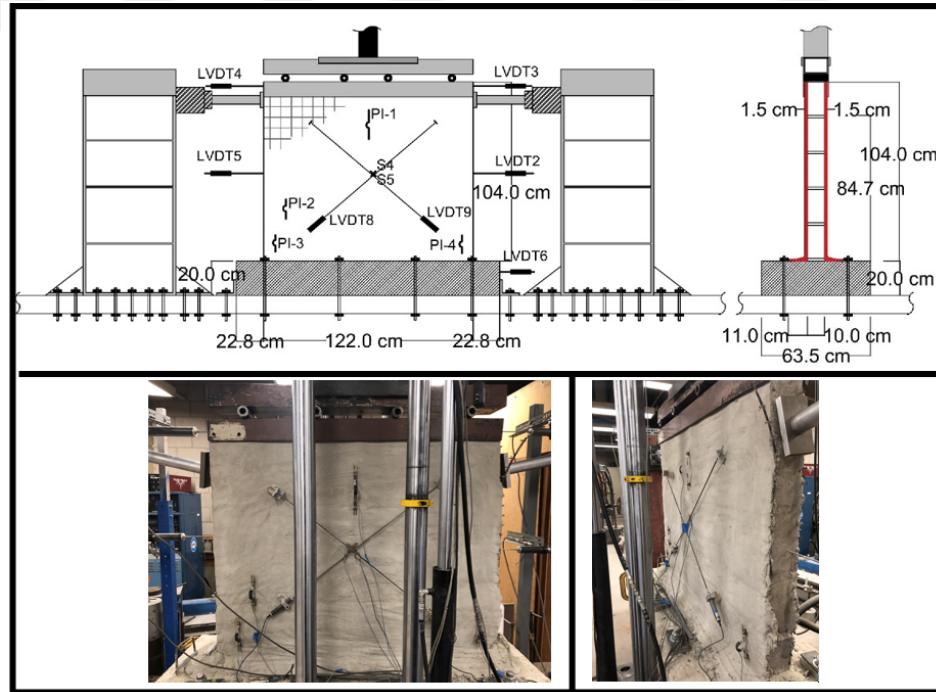


Şekil 3.49 : ECC2 harcın hazırlanması ve bazalt tekstil ile duvara uygulanma aşamaları.

İyileştirme uygulanan duvara tekrarlı yatay yükleme testi yapıldığında, duvarın hasar görmeden önceki yük taşıma kapasitesine ulaşarak, sünek davranış göstermesi amaçlanmıştır.

3.8.1.2 Duvar BD06YG numunesinin tekrarlı yatay yükleme testi

Yüzey iyileştirmesi yapılan BD06 numunesine ait deney ve ölçüm düzeneği Şekil 3.50’de gösterilmiştir. Duvar üzerine yerleştirilen ölçüm aletlerinin yerleri, bu çalışmadaki diğer duvar deneylerindeki benzerlik göstermektedir.

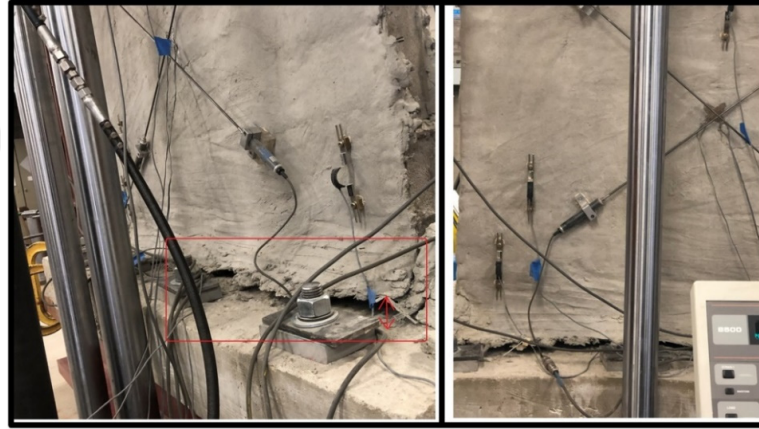


Şekil 3.50 : BD06YG duvar numunesinin deney ve ölçüm düzeneği.

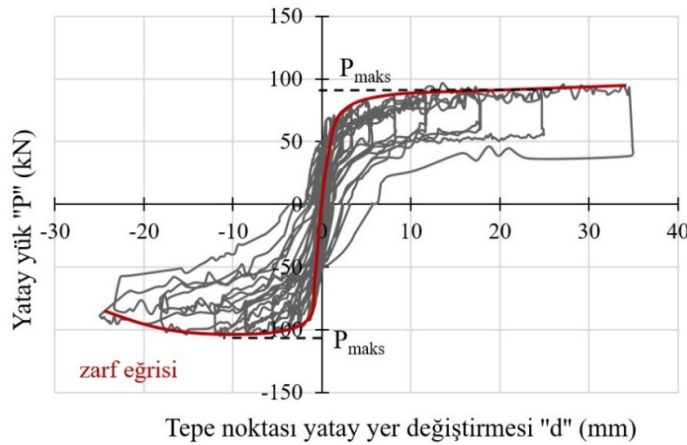
BD06YG numunesine ilk olarak, eksenel 0.6 MPa basınç değerine ulaşana kadar monotonik artan yükleme yapılmıştır. Duvar 0.6 MPa eksenel ön basınç değerinde sabit tutularak, duvara yatayda tekrarlı yükleme – boşaltma uygulanmıştır. Deney, bu

çalışmada diğer tüm duvar deneylerinin de gerçekleştirildiği 489.30 kN yük uygulama kapasitesine sahip Instron 8500R evrensel test makinesinde (University of Illinois at Chicago_ Yapısal ve Beton Malzemeler Araştırma Laboratuvarı) gerçekleştirilmiştir. Duvara kenar tepe noktasından düzlem içi yatay doğrultuda her iki yönde 250 kN yük kapasiteli hidrolik aktüatörler ve yük ölçerler kullanarak Şekil 3.50’de gösterildiği gibi düzlem içi iki yönlü ve tekrarlı yatay kuvvet (yükleme-boşaltma) uygulanmıştır.

Tekrarlı yüklemeler sonucunda duvar yüzeyinde herhangi bir hasar görülmemiş olup, temelden ayrılma gözlenmiştir (Şekil 3.51). Yük ölçerler ve yer değiştirme ölçerler LVDT4, LVDT3 kullanılarak elde edilen değerlerle duvarın yük – tepe noktası yatay yer değiştirme eğrisi elde edilmiştir (Şekil 3.52). Hasarlı duvar yüzeyi tekstil takviyeli ECC2 kompozit malzeme ile kaplandığında, diyagonal kesme çatlağına sahip hasarlı duvarda bütünlük sağlanmış olup, yük taşıma kapasitesinin de bir miktar arttığı görülmüştür.

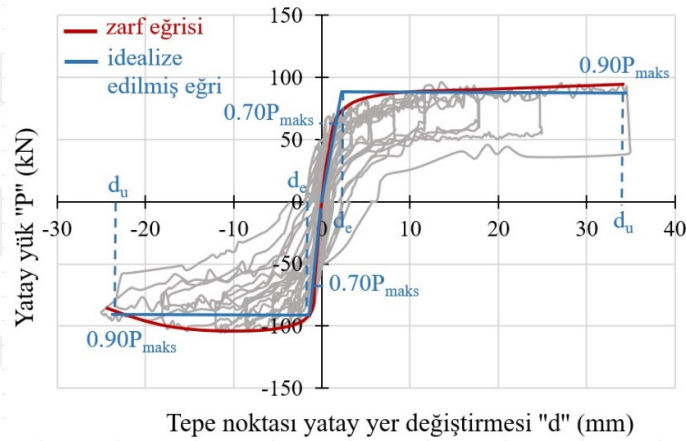


Şekil 3.51 : Duvar BD06YG’nin hasar tipi.



Şekil 3.52 : Tekrarlı yatay yük etkisindeki duvar BD06YG’nin yük (kN)-yer değiştirme (mm) eğrisi.

Duvar BD06YG numunesinin Şekil 3.52’de göre elde edilen yatay yük taşıma kapasitesi 105 kN’dur. Yer değiştirme kapasitesinin ise 34 mm olduğu ve tekstil takviyeli ECC2 harçla iyileştirilmiş duvarda sünekliğin arttığı gözlenmiştir. Duvarın tepe yatay yer değiştirme değerinin 12 mm’ye ulaşmasıyla duvarda düşey ve yatay yüklemeler etkisinde oluşan momentten kaynaklı, duvarın temel hizasından ayrıştığı ve düzlem içi dönme hareketi (rocking failure) yaptığı gözlenmiştir. Şekil 3.53’te zarf eğrisinden elde edilen idealize edilmiş eğri gösterilmiştir. İdealize edilmiş eğri, duvarın rijitlik, maksimum yük taşıma kapasitesi, elastik yer değiştirme ve maksimum yer değiştirme değeri gibi verilerin elde edilmesinde kolaylık sağlamaktadır.



Şekil 3.53 : Duvar BD06YG’ye ait zarf eğrisi ve idealize edilmiş eğri.

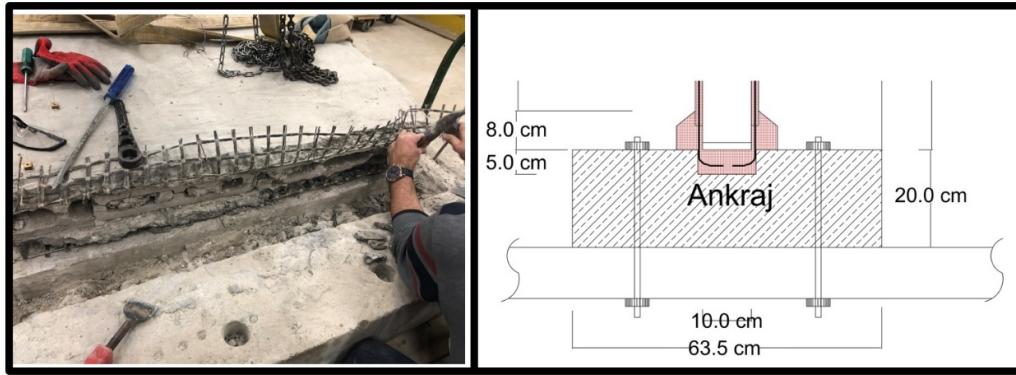
BD06YG numunesinin yatay yük taşıma kapasitesi BD06 numunesinin yaklaşık 1.5 katı olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, BD06YG duvarının tepe yatay yer değiştirme kapasitesi BD06 numunesinin yaklaşık 2 katıdır. BD06YG iyileştirilmiş/güçlendirilmiş duvar numunesinin rijitliğinin (+) yükleme yönü için 41.97 GPa, (-) yükleme yönü için 55.71 GPa değerine yükseldiği görülmektedir. Tekstil takviyeli ECC2 harçla hasarlı duvar yüzeyinin iyileştirilmesiyle hasarlı duvar, tekrarlı yatay yükler altında yatay yük ve yer değiştirme kapasitesi artmış şekilde kullanılabilir hale getirilmiştir. Bu durum, tekstil takviyeli kompozit malzeme ile iyileştirilen duvarda, diyagonal kesme kapasitesinin artmasıyla, iyileştirilmeden önce görülen diyagonal kesme hasarının yerine eğilmeden kaynaklı temel hizasından ayrılma hasarının oluşmasına neden olmuştur.

Bölme duvarlarda deprem etkilerinden meydana gelen diyagonal kesme hasarlarının duvar yüzeylerine uygulanan tekstil ve fiber içerikli harçla iyileştirilip yük taşıma kapasitesinin ve sünekliğinin artırılması sağlanabilmektedir. Fakat, eğilmeden

kaynaklı temel hizasından duvarın ayrılması ile görülen hasarın önlenmesi için duvar yüzeyine uygulanan tekstil takviyesinin temele ankraajı sağlanmalıdır. Böylece, duvarın düzlemsel eğilmeden kaynaklı kesme kapasitesi de arttırılarak, duvarda sünek davranış elde edilebilir.

3.8.1.3 Hasarlı duvarın iyileştirilmesinde temele tekstil bazlı ankraj uygulaması

Duvar BD06YG’de yüzey iyileştirmesinde takviye malzemesi olarak kullanılan bazalt tekstil, Şekil 3.54’te gösterildiği gibi hasarlı duvarın her iki yüzeyinden 50 mm derinlikte temele ankraajlanmıştır.



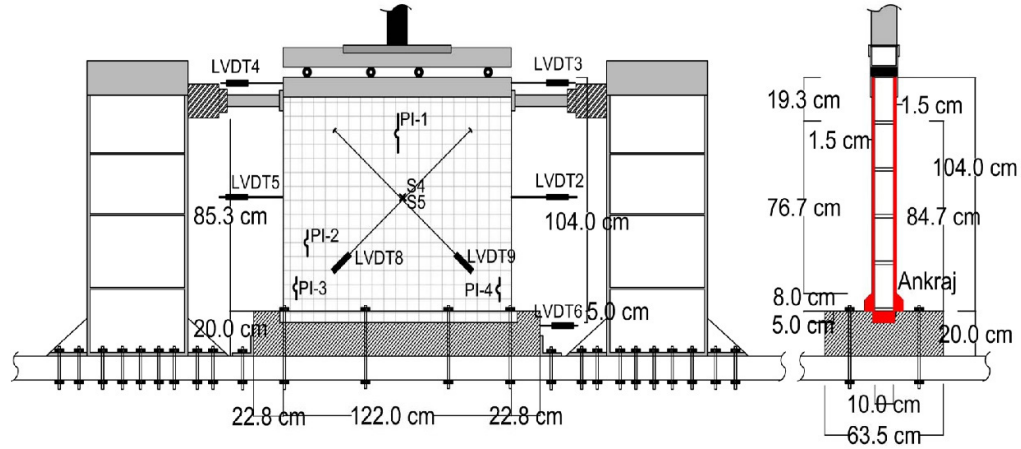
Şekil 3.54 : Bazalt tekstilin duvar boyunca temele ankraajı.

Duvarın her iki yüzeyinden temel içine 50 mm derinliğe kadar ankre edilen tekstil, duvarın altına doğru 90° bükülerek 50 mm uzatılmıştır. Temel içerisinde ankraj için açılan 50 mm derinlikteki hacim yüksek mukavemetli grout ile doldurulmuştur. Ankraj uygulaması ile iyileştirmesi/güçlendirmesi yapılan duvar “BD12YG” olarak isimlendirilmiştir.

3.8.1.4 Duvar BD12YG numunesinin tekrarlı yatay yükleme testi

Şekil 3.55’te BD12YG duvar numunesine ait boyutlar, deney ve ölçüm düzeneği şeması verilmiştir. Duvar yan ve ön yüzeyine yerleştirilen yer değiştirme ölçerler, BD06YG numunesi ve diğer değerlendirilmesi yapılan duvar numunelerle benzer yerlere yerleştirilmiştir. BD06YG numunesine 0.6 MPa ön basınç yüklemesi altında tekrarlı yatay yük uygulandığında, sadece duvar yüzeyine uygulanan iyileştirme ile duvarın kesme kapasitesi ve rijitliğinde artma olmasına rağmen, zayıf kalan temel hizası derzinden ayrılma gözlenmiştir. Bunun sebeplerinden biri, sabit eksenel ön basınç yüklemesinin yatay yük uygulandığında oluşan moment etkisinde zayıf

kalması, ve eğilme etkisindeki duvarın yüksek rijitlik göstermesidir. Bu sebeple, bazalt tekstil takviyeli ECC2 harçla yüzey iyileştirmesine ve tekstil bazlı ankraj uygulamasına sahip BD12YG numunesi için eksenel ön basınç yüklemesi 1.2 MPa değerine arttırılmıştır.



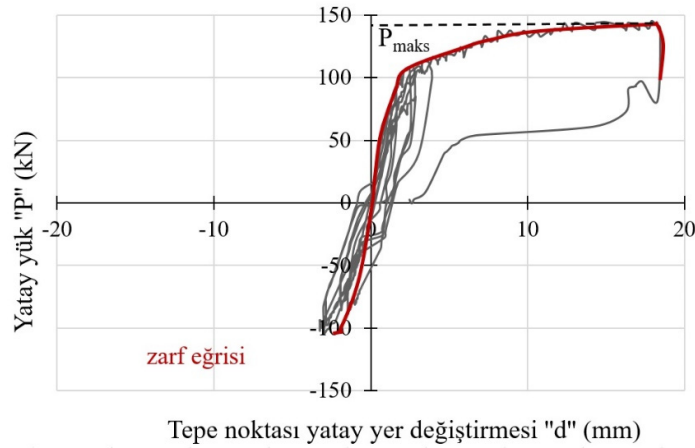
Şekil 3.55 : BD12YG duvar numunesinin deney ve ölçüm düzeneği.

Eksenel ön basınç yüklemesi 1.2 MPa değerinde sabit tutularak, duvara yatay yüklemeye, Şekil 3.45'te belirtildiği gibi tekrarlı düzlem içi yükleme – boşaltma (çift yönlü) ile başlanmıştır. Duvarın elastik yatay yer değiştirme sınırı aşıldığında duvarın temel hizasında, iyileştirme harcında başlayan eğilme çatlağının duvar boyunca ilerlediği gözlenmiştir. BD12YG duvar numunesine tekstil bazlı ankraj uygulaması yapıldığından, yatay ve düşey yükler etkisiyle oluşan momentin duvarın temelle birleştiği köşelerde oluşturduğu çekme yükleri, harcın hasar görmesinden sonra tekstil malzemesi ile karşılanmıştır. Duvarın tepe yatay yer değiştirme değeri 4 mm'yi aştığında duvarın alt köşelerinden başlayarak çekme etkisiyle tekstilde kopmalar gözlenmiştir (Şekil 3.56). Bu aşamadan sonra duvara göçme oluşana kadar tek yönlü ve monotonik artan yatay yük uygulanmıştır.



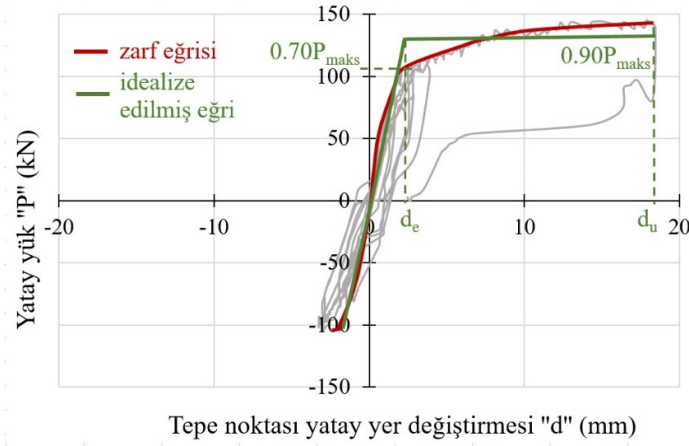
Şekil 3.56 : Duvar BD12YG'nin hasar tipi.

Tekstil bazlı ankraj uygulamasının ve eksenel ön basınç yüklemesindeki artışın, duvarın eğilme etkisinde temelden ayrılmasını bir miktar önlemiş olup, duvarın yük taşıma kapasitesini ve sünekliğini arttırdığı görülmektedir. Şekil 3.57'de yatay yükleme altında BD12YG'ye ait yük (kN) – yer değiştirme (mm) eğrisi elde edilmiştir. Yatay yük taşıma kapasitesi 145 kN'dur. Yatay yük etkisinde duvar oldukça rijit davranmış olup, duvar yüzeyinde gözle görülür hasar oluşmamış ve duvar bütünlüğünü korumuştur. Duvarın temelle birleşim bölgesinde oluşan çatlağın duvar uzunluğu boyunca ilerlemesiyle ve tekstil bazlı ankrajın tamamen kopmasıyla duvarda göçme oluşmuştur.



Şekil 3.57 : Düzlem içi yatay yük etkisindeki duvar BD12YG'nin yük (kN)-yer değiştirme (mm) eğrisi.

Şekil 3.57'de elde edilen zarf eğrisi kullanılarak Şekil 3.58'deki idealize edilmiş eğri elde edilmiştir. İdealize edilmiş eğriden duvar rijitliği, (+) yükleme yönü için 52.24 GPa, (-) yükleme yönü için 63.70 GPa olarak hesap edilir.



Şekil 3.58 : Duvar BD12YG'ye ait zarf eğrisi ve idealize edilmiş eğri.

Duvarda yüzey iyileştirilmesinde kullanılan tekstil takviyesinin temele ankrajı yapılmasına rağmen yatay yükleme sonucunda oluşan hasar, eğilmeden kaynaklı ankraj bölgesindedir. Bu durum, beton blok bölme duvarda duvarın tüm yüzeyine uygulanan tekstil takviyeli ECC2 kompozit iyileştirmenin, duvarın diyagonal kesme kapasitesini düzlemsel eğilmeden kaynaklı kesme kapasitesine göre daha fazla arttırmış olduğunu gösterir.

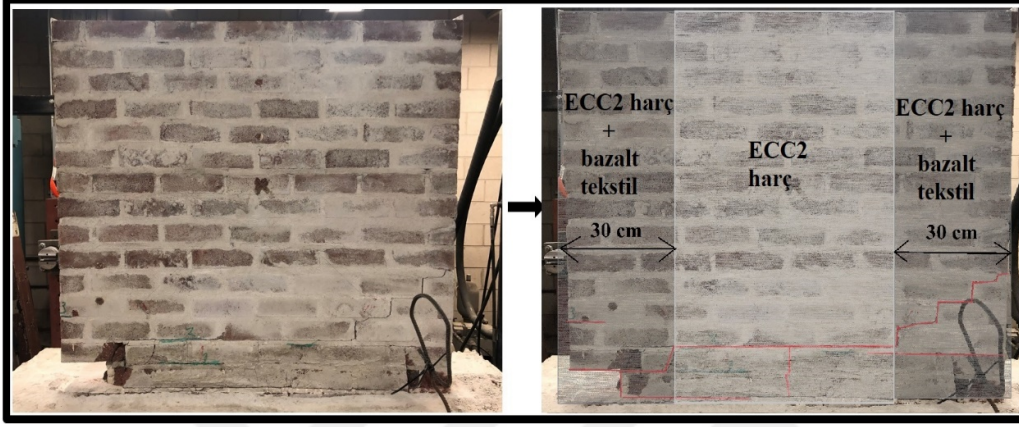
3.8.2 Hasarlı tuğla bölme duvarda iyileştirme yöntemlerinin geliştirilmesi

3.8.2.1 Duvar yüzeyine uygulanan iyileştirme/güçlendirme yöntemi

BD06 beton blok bölme duvarda meydana gelen diyagonal kesme kırılması duvarın tüm yüzeyini etkilemiş olduğundan, tüm duvar yüzeyinde tekstil takviyeli ECC2 (% 1 PVA kısa fiber içerir) malzeme kullanılarak duvar iyileştirilmesi yapıldı. Tuğla bölme duvarlarda ise, TD06'da eğilmeden kaynaklı duvar uzunluğu boyunca temel birleşim derzinden ayrılma görülürken, TD12'de duvar kenarından başlayan eğilme çatlağını diyagonal (adım) kesme çatlağı izlemiştir. TD06 duvarda yatay yükleme etkisinde ilk olarak düzlemsel eğilmeden kaynaklı kesme hasarının oluşması, duvarın düzlemsel eğilmeden kaynaklı kesme kapasitesinin duvarın diyagonal kesme kapasitesinden daha düşük olduğunu göstermektedir. TD12 numunesinde ise düzlemsel eğilme etkisiyle oluşan derz çatlağının yatayda ilerlemesinden sonra diyagonal adım kesme çatlağını oluşturması, duvarın diyagonal kesme kapasitesi sınır değerinin aşıldığını göstermektedir (Çizelge 3.6).

Şekil 3.59 ile TD12 numunesine ait hasarın tekstil takviyeli PVA içerikli harçla iyileştirme/güçlendirme yöntemi verilmiştir. İyileştirme için kullanılan kompozit

malzemeler beton blok bölme duvarların iyileştirilmesinde kullanılan malzemelerle aynıdır. Böylece, iyileştirme için kullanılan tekstil takviyeli ECC2 harcın (%1 PVA kısa fiber içerikli) beton blok duvarlarda ve tuğla duvarlarda kullanımının etkileri karşılaştırılabilir.



Şekil 3.59 : TD12 numunesinin yüzeyine uygulanacak iyileştirme/güçlendirme işleminin planlanması.

Şekil 3.59’da görüldüğü gibi TD12 duvarının sol alt kısmında başlayan eğilmeden kaynaklı derz çatlağını ve duvarın sağ bölgesinde oluşan diyagonal (adım) kesme çatlağını iyileştirmek, yatay yükler altında duvarın bütünlüğünü koruyarak tekrar yük taşıyabilir hale getirmek, yeni eğilme ve kesmeden kaynaklı çatlak oluşumunu önlemek için bazalt tekstil, duvar yüzeyinin sağ ve sol 30 cm uzunluğunu içeren bölgesine ECC2 harçla birlikte uygulanmıştır. TD12’de hasar, duvarın tüm yüzeyini etkilememektedir. Hasar, duvar kenarlarına yakın bölgelerde oluşmuş olup, bu bölgelerde tekstil takviyesi ile güçlendirilip, yeni çatlak oluşumunun önlenmesi amaçlanmıştır. Duvarın 62 cm uzunluktaki orta kısmında ise tekstil takviyesi uygulanmayıp, sadece PVA fiber içerikli ECC2 harç ile güçlendirmesi yapıp, duvarın diyagonal kesme kapasitesini arttırarak gevrek kesme göçmesinin önlenmesi amaçlanmıştır.

TD12 numunesine, Şekil 3.60’ta gösterildiği gibi ilk olarak ön ve arka yüzeyine ECC2 harç yaklaşık 5 mm kalınlıkta uygulanıp, duvar yüzeyinin sağ ve sol 30 cm uzunluktaki bölgesini kapsayacak şekilde 50 mm ağ aralığına sahip bazalt tekstil malzemesi yerleştirilmiştir. Bu aşamada bölüm 3.8.2.2’de açıklanan temele tekstil bazlı ankraj uygulaması yapıp, duvar yüzeyine tekrar yaklaşık 5 mm kalınlıkta ECC2 harç uygulanmıştır.

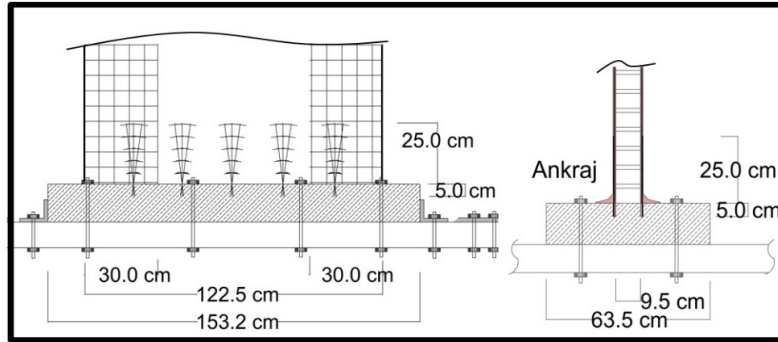


Şekil 3.60 : TD12 duvar numunesi yüzeyine uygulanan iyileştirme/güçlendirme.

Duvarda kırılmanın olduğu kısımlarda tekstil takviyesinin kullanımı duvarın bütünlüğünü koruyarak sünekliğini arttırması beklenirken; ECC2 harcın içerdiği PVA kısa fiber, duvar harcında oluşacak çatlakların ilerlemesini köprüleme etkisiyle engellemesi beklenmektedir. Düzlemsel eğilmeden kaynaklı kesme kapasitesinin arttırılması için beton blok duvarın yüzey iyileştirmesinde kullanılan tekstil malzemesinin temele ankraj uygulaması, TD12 duvar numunesi için de uygulanmıştır.

3.8.2.2 Hasarlı duvarın iyileştirilmesinde temele tekstil bazlı ankraj uygulaması

Hasarlı TD12 duvar numunesine duvar yüzeylerinden iyileştirme uygulanırken, aynı zamanda Şekil 3.61’de gösterildiği gibi yüzey iyileştirmesinde kullanılan bazalt tekstil malzemesi ile temele 5 noktadan 50 mm derinlikte duvarın her iki yüzü için ankraj yapılmıştır.



Şekil 3.61 : Tekstil bazlı ankrajın temele uygulanma detayı.

Hasar görmüş TD12 duvar numunesinin her iki yüzeyine öncelikle ECC2 harç 50 mm kalınlıkta uygulanmıştır. Duvar yüzeylerine uygulanan ECC2 harç üzeri, duvarın sağ ve sol kısımları 30 cm uzunlukta ve duvar yüksekliği boyunca bazalt tekstil malzemesi ile kaplanmıştır. Bu aşamada, Şekil 3.62’de gösterilen ve duvar yüzeyinin temelle birleşim bölgesinde önceden oluşturulan 50 mm derinlikteki boşluğa bazalt tekstil bazlı ankraj uygulaması yapılmıştır.



Şekil 3.62 : Duvarın bazalt tekstil kullanılarak temele ankraj işlemleri.

Ankraj, duvar iyileştirmesi için duvar yüzeylerinde kullanılan bazalt tekstilden elde edilen 30 cm uzunlukta 3 adet sürekli lif demetlerinin farklı açılarla birleştirilerek bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur (Şekil 3.62). Oluşturulan tekstil bazlı ankraj, Şekil 3.61’de gösterildiği gibi duvarın her iki yüzünde 5 adet olmak üzere, duvar yüzeyinin temelle birleştiği bölgede duvar uzunluğu boyunca uygulanmıştır. Tekstil bazlı ankrajın 25 cm olan üst kısmı duvar yüzeyine ECC2 harçla uygulanırken, 5 cm olan alt kısmı temele ankre edilmiştir. En sağ ve en soldaki tekstil bazlı ankrajlar, duvar yüzeyine iyileştirme için uygulanan 30 cm uzunluğundaki tekstil takviyesi üzerine 25 cm bindirme boyu olacak şekilde uygulanmıştır. Böylece, bu tekstil bazlı ankrajların, duvar yüzeyine iyileştirme için uygulanan tekstil malzemesi ile birlikte çalışması sağlanmıştır.

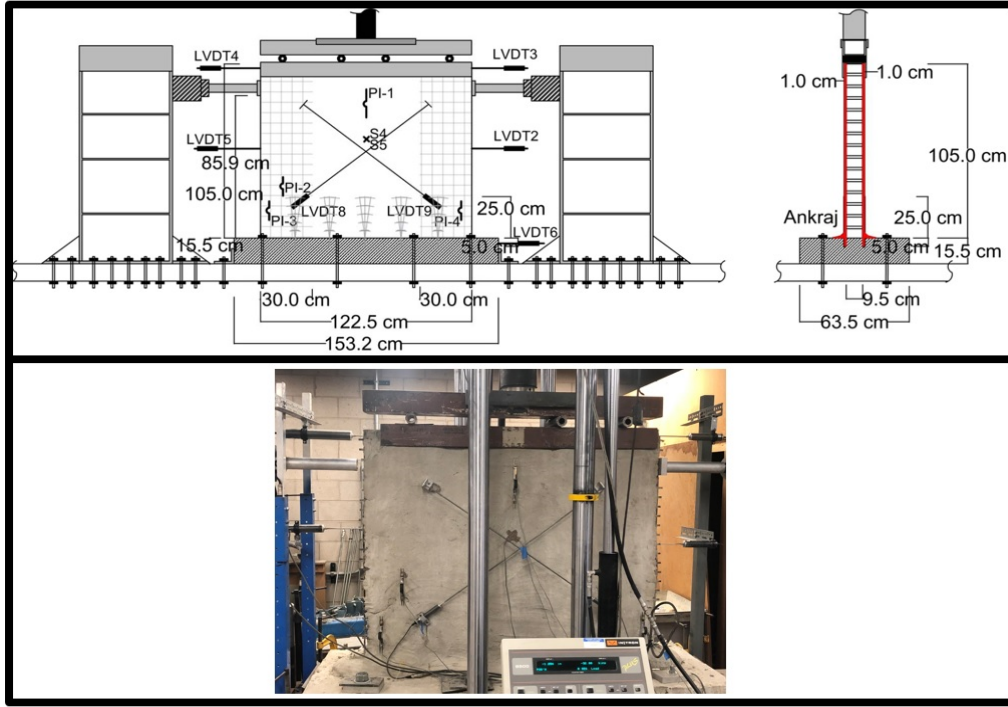
Duvar yüzeyine uygulanan 50 mm kalınlıkta ECC2 harcın üzerine, tekstil takviyesi ve ankraj uygulamalarından sonra, tekrar yaklaşık 50 mm kalınlıkta ECC2 harç uygulaması yapılarak duvar iyileştirmesi tamamlanmıştır (Şekil 3.63). İyileştirilmesi tamamlanan hasarlı tuğla bölme duvar “TD12YG” olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 3.63 : TD12YG duvar numunesi.

3.8.2.3 Duvar TD12YG numunesinin tekrarlı yatay yükleme testi

Şekil 3.64'te TD12YG duvar numunesine ait boyutlar, deney ve ölçüm düzeneği şeması verilmiştir. Duvar yan ve ön yüzeyine yerleştirilen yer değiştirme ölçerler diğer değerlendirilmesi yapılan duvar numunelerle benzer yerlere yerleştirilmiştir. TD12YG numunesine de ilk olarak BD12YG numunesindeki benzer olarak 1.2 MPa eksenel ön basınç yüklemesi uygulandı. Eksenel ön basınç 1.2 MPa değerinde sabit tutularak, yatay yükleme duvara düzlem içi her iki yönde ve çevrimsel olarak uygulandı. Yatay yükleme Şekil 3.45'te gösterildiği gibi yer değiştirme kontrollü olarak gerçekleştirildi.



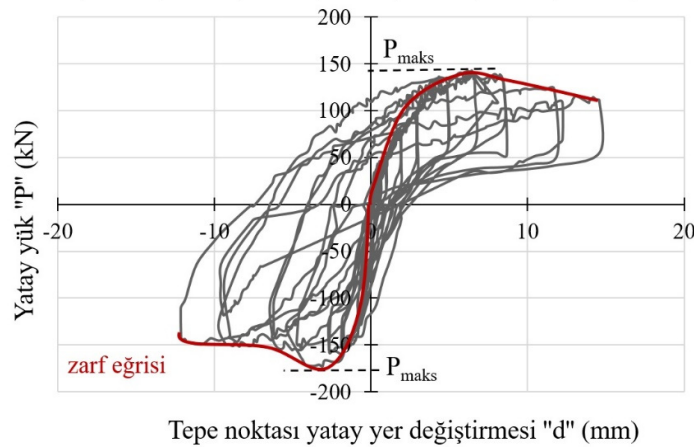
Şekil 3.64 : TD12YG duvar numunesinin deney ve ölçüm düzeneği.

Tekrarlı yatay yükleme testi sonucunda, Şekil 3.65'te görüldüğü gibi duvarda eğilme çatlaklarının dışında, düşey yük etkisinde tekstilin uygulandığı hizada ilerleyen çatlaklar gözlenmiştir. Bu çatlakların tekstili oluşturan sürekli fiberlerin etkisiyle daha fazla ilerleyemediği görülmektedir.



Şekil 3.65 : Duvar TD12YG'nin hasar tipi.

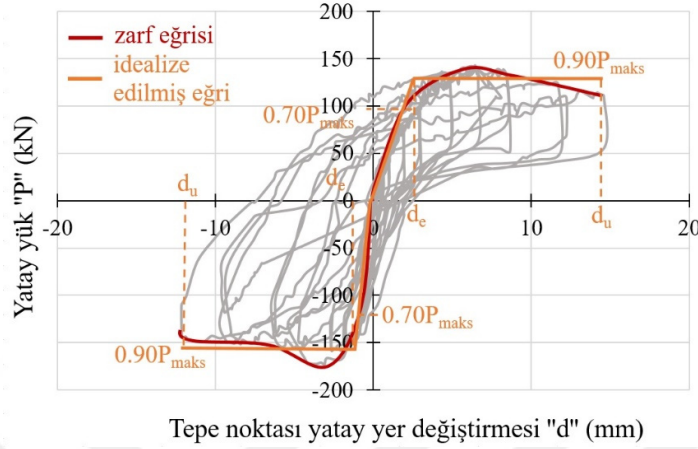
Duvar tepe yatay yer değiştirme değeri 3 mm'ye ulaştığında duvarın alt kısımlarında ECC2 harçta eğilme çatlakları başlamıştır. Yatay yer değiştirme değeri 5 mm olduğunda duvar yüzeyinde eğilme ve düşey çatlaklar oluşmuştur. Aynı zamanda, duvar yüzeyine yayılmış mikro çatlaklar gözlenmiştir. Yüklemeye devam edildiğinde hasarlı duvarın kayma hareketi yaptığı ve duvar yüzeyine uygulanmış tekstil takviyeli kompozit iyileştirme malzemesinin duvar yüzeyinden ayrışmaya başladığı görülmüştür. Duvarın tepe yer değiştirme değeri 12 mm'ye ulaştığında, duvarın temelle birleşim bölgesinde ayrılma ve tekstil ankrajlarında kopmalar meydana gelmiştir. Duvar maksimum yatay yük kapasitesine ulaştığında hasarlı duvar yüzeyine uygulanmış tekstil takviyeli ECC2 malzemesinin duvardan ayrıştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, duvar yüzeyinden temele uygulanan tekstil ankrajlarının kopması ile yük taşıma kapasitesinde azalma meydana gelmiştir (şekil 3.66). şekil 3.65'te duvara sol (+) yönden yapılan yatay yüklemede, duvarın sağ kenar kısmının duvar yüzeyine uygulanan iyileştirme harcından sıyrılarak kayma hareketi yaptığı görülmüştür. Tuğla bölme duvar iyileştirmesinde kullanılan hasarlı duvarın, yüzeyine uygulanan tekstil bazlı ECC2 iyileştirme malzemesinden ayrışması, beton blok duvar iyileştirmesinde görülmemiştir. Bu durumda, iyileştirme için kullanılan fiber katkı ECC2 harç malzemesinin, beton blok duvar yüzeyine yapışmasının, tuğla duvar yüzeyine yapışmasına göre daha güçlü olduğu sonucu çıkarılabilir.



şekil 3.66 : Tekrarlı yatay yük etkisindeki duvar TD12YG'nin yük (kN)-yer değiştirme (mm) eğrisi.

Tekrarlı yatay yük etkisinde TD12YG duvarına ait yük – yatay yer değiştirme eğrisi ve her çevrimin maksimum yüklerine denk gelen noktalardan elde edilen zarf eğrisi şekil 3.66'da verilmiştir. TD12YG duvar numunesinin yatay yük taşıma kapasitesi (+)

yön için 143 kN, (-) yön için 173 kN'dur. Zarf eğrisi kullanılarak Şekil 3.67'deki idealize edilmiş eğri elde edilmiştir.



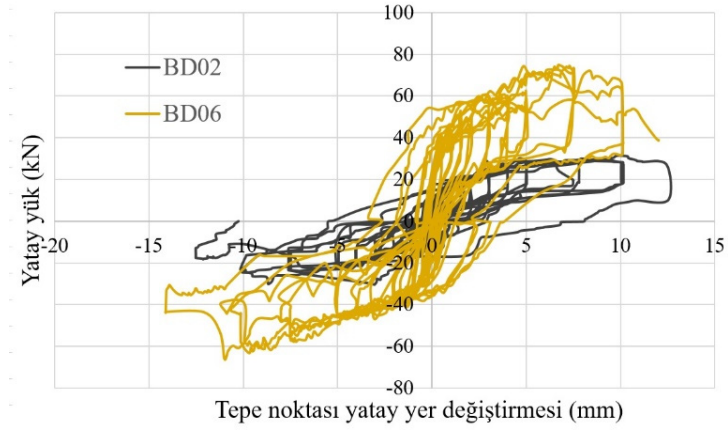
Şekil 3.67 : Duvar TD12YG'ye ait zarf eğrisi ve idealize edilmiş eğri.

İdealize edilmiş eğriden TD12YG'nin rijitliği (+) yön için 52 GPa, (-) yön için 99 GPa olarak bulunur. Ayrıca, tekstil takviyeli ECC2 kompozit kullanılarak iyileştirilen tuğla bölme duvarın düzlem içi yatay yer değiştirme kapasitesi 14 mm'dir. İyileştirilmiş tuğla bölme duvarın yatay yer değiştirme kapasitesinin, iyileştirilmiş beton blok duvarın yatay yer değiştirme kapasitesinden daha düşük çıkmasının en önemli sebebi, iyileştirilmiş tuğla bölme duvarlarda duvar yüzeyine uygulanan kompozit iyileştirme malzemesinin duvar yüzeyinden ayrışması olmuştur.

3.9 Duvar Numunelerinin Test Sonuçlarının Karşılaştırılması

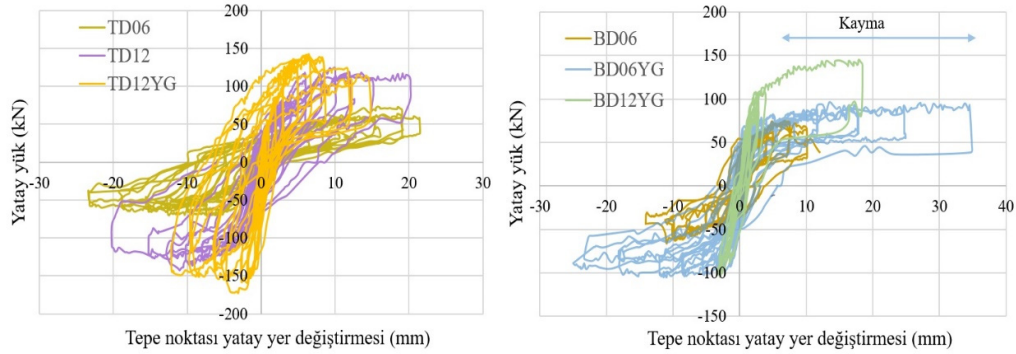
Aynı boyutlardaki tuğla ve beton blok bölme duvarlara farklı düşey yüklemeler altında uygulanan tekrarlı yatay yükleme testleri sonucunda duvarlarda farklı hasar tipleri oluşturulmuştur. Bu hasar tiplerinden diyagonal kesme hasar tipi, ani ve gevrek olup, duvarın tüm yüzeyini etkilemektedir. Bu tip hasarlar duvar yüzeylerine uygulanan tekstil bazlı kompozit güçlendirme ile kontrol altına alınarak, duvarın tekrar yük taşıyabilir duruma getirilmesi sağlanmıştır.

Tekrarlı yatay yükleme testinde beton blok duvarlar için eksenel ön basınç yüklemesinin etkisi Şekil 3.68'de verilmiştir. BD02 numunesine 0.2 MPa eksenel ön basınç yüklemesi uygulanırken, BD06 numunesine 0.6 MPa eksenel ön basınç yüklemesi uygulanarak yatay yükleme testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.68 : Tekrarlı yatay yükleme testi uygulanan beton blok duvarlarda düşey yükün etkisi.

BD02 numunesi ile BD06 duvar numuneleri benzer yer değiştirme kapasitelerine sahip olmasına rağmen, BD06'nın maksimum yatay yük taşıma kapasitesi BD02'nin maksimum yük taşıma kapasitesinin 2.4 katıdır. BD06 numunesinin tekstil takviyeli ECC3 harçla yatay derz onarımına sahip olması ve eksenel ön basınç yüklemesinin 0.6 MPa olarak uygulanması sebebiyle elastik rijitlik değerinin arttığı görülmüştür. Eksenel ön basınç yüklemesi 0.6 MPa olan TD06 numunesi BD06 ile aynı boyutlarda tuğla duvar numunesidir. Şekil 3.69'a göre, TD06 ve BD06 numunelerinin yatay yük taşıma kapasiteleri yaklaşık 66 kN olup, benzerlik göstermektedir.

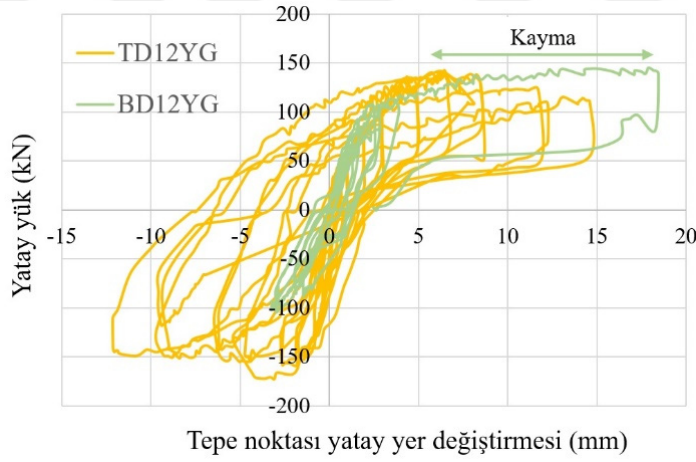


Şekil 3.69 : Tekrarlı yatay yükleme testleri sonucunda duvar numunelerinin yük (kN) – yer değiştirme (mm) eğrilerinin karşılaştırılması.

Tuğla duvar için ise eksenel ön basınç yüklemesi 0.6 MPa'dan 1.2 MPa değerine yükseltildiğinde diyagonal kesme kırılması elde edilmiştir. TD06 numunesinin yatay yük taşıma kapasitesi 65.89 kN iken, TD12 numunesinin yatay yük taşıma kapasitesi 112.30 kN olup, yaklaşık 2 katı değerindedir (Çizelge 3.7). TD06 ve TD12 duvar numunelerinin benzer yatay yer değiştirme kapasitelerine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 3.69). Hasarlı TD12 duvarının iyileştirmesi/güçlendirmesi yapıldıktan sonra

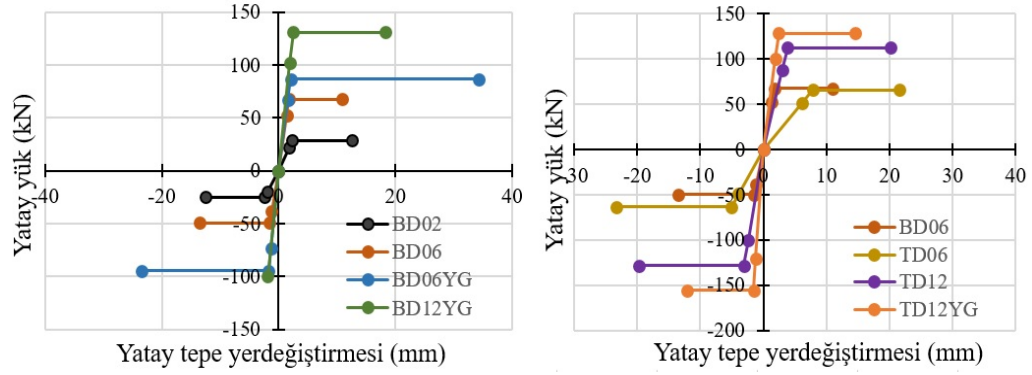
yatay yük taşıma kapasitesinin hasar öncesi değerine ulaştığı ve başlangıç rijitliğinde artış görülmüştür.

Şekil 3.69'a göre BD06YG numunesinin yer değiştirme kapasitesi ve yatay yük taşıma kapasitesinde BD06 numunesine göre artma gözlenirken, BD06YG numunesinde sünek davranış elde edilmiştir. Duvar yüzeyleri tekstil takviyeli ECC2 harçla iyileştirilerek, duvarlarda daha fazla hasar oluşması engellenmiş ve yük taşıma kapasitesi arttırılmıştır. TD12YG ve BD12YG numunelerinde ise duvar yüzeyine uygulanan tekstil malzemesinin temele ankrajının sağlanarak, yatay yükleme sonucunda duvarın temel birleşim bölgesinden ayrışıp dönme hareketi yapması engellenmiştir. Şekil 3.69 ve Şekil 3.70'te TD12YG ve BD12YG numunelerine ait yatay yük – yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması verilmektedir.



Şekil 3.70 : TD12YG ve BD12YG iyileştirilmiş duvar numunelerinin yatay yükleme test sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 3.70 ve duvarların idealize edilmiş eğrilerini gösteren Şekil 3.71'e göre, TD12YG ve BD12YG numunelerinin elastik rijitlik değerlerinin, yatay yük taşıma ve yer değiştirme kapasitelerinin benzer olduğu görülmektedir. TD12YG ve BD12YG numunelerinin göçme şekli duvarın temelle bağlantısını sağlayan tekstil ankrajlarının kopması ile gerçekleşmiştir. BD12YG'de tekstil ankrajlarının kopmasından sonra duvarda yatay yük etkisinde düzlem içi dönme ve kayma oluşmuştur. TD12YG'de ise tekstil ankrajlar koparken yatay yük kapasitesinde azalmalar meydana gelmiş ve duvarın sağ kısmında iyileştirme malzemesinin duvar yüzeyinden ayrıştığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.71 : Duvar numunelerin idealize edilmiş eğrilerinin karşılaştırılması.

Duvarların tekrarlı yatay yükleme testleri sonucunda elde edilen yatay yük – yer değiştirme zarf eğrilerinden Şekil 3.33 kullanılarak idelize edilmiş eğriler bulunmuştur (Şekil 3.71). Duvarların idelize edilmiş eğrilerinden, duvarların farklı düşey yüklemeler altındaki ve tekstil takviyeli kompozit iyileştirme yöntemleri uygulanmış durumlarının yatay yük kapasitelerindeki ve rijitliklerindeki değişimler görölmektedir. Zarf eğrileri ve idelize edilmiş eğriler kullanılarak, duvarların tekrarlı yatay yükleme testi sonuçlarından elde edilmiş verilerin özeti Çizelge 3.7’de yer almaktadır. Çizelge 3.7’ye göre iyileştirme için kullanılan bazalt tekstil takviyeli ECC2 kompozit harcın hasarlı duvarların bütönlüğünü korumasını sağlayarak, hasarlı duvarları hasar öncesi yatay yük taşıma kapasitelerine ulaştırmış, sünekliğini ve başlangıç rijitliğini arttırdığı gözlenmiştir.

Tuğla duvarların beton blok duvarlara göre rijitlik değerlerinin daha düşük olmasına rağmen, aynı boyutlardaki bu duvarların yatay yük taşıma kapasitelerinin benzer olduğu BD06 ve TD06 numunelerinden görölmektedir. Özellikle, TD12 numunesinin eksenel ön basınç yüklemesi 1.2 MPa olmasına rağmen rijitlik değeri, eksenel ön basınç yükü 0.6 MPa olan BD06 numunesine göre düşük olduğu görölmektedir (Çizelge 3.7). Bu durum, deneylerde kullanılan beton blok duvarların tuğla duvarlara göre yatay yükleme etkisinde daha rijit davrandığını göstermektedir (Şekil 3.72 ve Şekil 3.73). Beton blok ve tuğla duvarlarda aynı S-tip harç kullanılmıştır. Duvarların boyutları aynı olup, duvarları oluşturan birimler ve birimlerin boyutları farklılık göstermektedir. Duvarların yatay yükleme etkisindeki elastik rijitlik değerlerindeki farklılığın temel sebebi, duvarları oluşturan birimlerin malzeme ve boyut özellikleridir. Hasar görmüş duvarların yüzeylerine uygulanan iyileştirme yöntemlerinin duvarların rijitlik değerlerini ve yatay yük taşıma kapasitelerini arttırdığı görölmektedir. İyileştirme yapılmış duvar numuneleri BD12YG ve

TD12YG'nin aynı eksenel ön basınç yüklemesi altında yatay yük taşıma kapasitelerinin ve rijitliklerinin yaklaşık aynı değerde olduğu gözlenmiştir. Duvar numunelerinin göçme yükleri Çizelge 3.7'de verilmiştir. Aynı zamanda, tekrarlı yatay yükleme etkisindeki duvarların görelî yatay öteleme oranları, maksimum yatay yer değıştirmenin duvar yüksekliğine oranının yüzde (%) cinsinden ifade edilmesi ile bulunur. Çizelge 3.7'de duvarların görelî yatay öteleme oranları ve süneklik değeri mevcuttur. Deneylerde kullanılan beton blok duvarlar, tuğla duvarlara göre daha sünek davranmıştır. Yatay derz onarımı yapılan BD06 numunesinin sünekliği 6.13 değeriinden 16.66 değeriine yükselmiştir. Hasarlı duvarların yüzeyine uygulanan iyileştirme ile, tekrarlı yatay yükleme deneyinde eksenel ön basınç yüklemesi 1.2 MPa değeriine çıkarılmasına rağmen iyileştirilmiş duvarların süneklik değeri, duvarların hasar görmemiş (iyileştirme uygulanmamış) durumlarındaki süneklik değeriine göre bir miktar daha yüksek bulunmuştur.

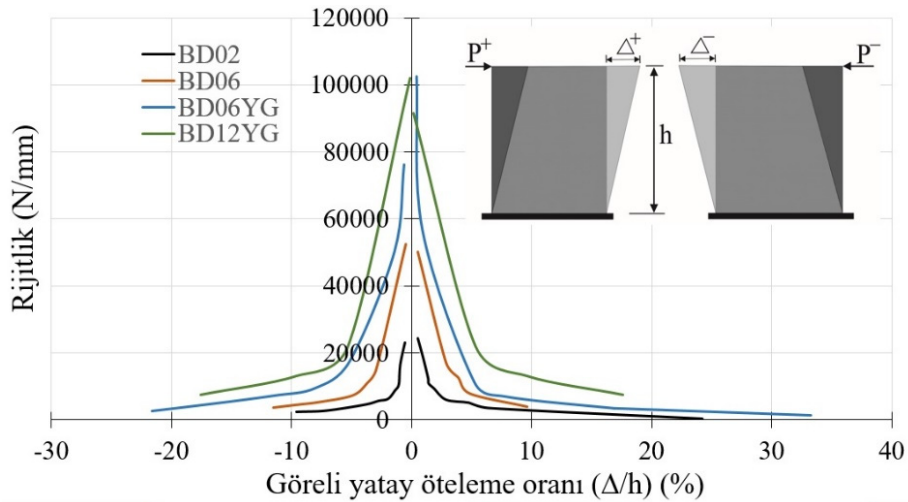
Çizelge 3.7 : Deney sonuçlarına göre zarf eğrisi ve idealize edilmiş eğrilerden elde edilen duvarlara ait karakteristik değerler ve hasar tanımları.

Numune adı	Ön basınç yüklemesi (MPa)	K_e (N/mm)	P_{maks} (kN)	$P_{göçme}=0.8P_{maks}$ (kN)	d_e (mm)	d_u (mm)	Δ_{maks} Görelî yatay ötelemesi (%)	Süneklik $\mu=d_u/d_e$	Hasar Tipi
BD02 (+ yön)	0.2	12327	31.50	25.20	2.30	12.53	1.21	5.45	Eğilme çatlakları, duvar alt iki yatay sıra tuğla-harç arası duvar uzunluğu boyunca çatlak oluşması, bir miktar kayma ve topuk tuğla birimlerde diyagonal kırılma
BD02 (- yön)	0.2	10413	28.00	22.40	2.42	12.53	1.21	5.18	
BD06 (+ yön)	0.6	38004	74.95	59.96	1.78	10.91	1.05	6.13	Eğilme çatlakları, diyagonal kesme çatlakları, pik sonrası basınç etkisiyle topuk ezilmesi
BD06 (- yön)	0.6	33000	55.00	44.00	1.50	13.52	1.30	9.01	
TD06 (+ yön)	0.6	8426	73.21	58.57	7.82	21.51	2.07	2.75	Eğilme çatlakları, duvarın temelden ayrılması düzlemsel yatay sallanması (rocking)
TD06 (- yön)	0.6	12536	70.61	56.49	5.06	23.30	2.24	4.60	
TD12 (+ yön)	1.2	29283	124.78	99.82	3.84	20.22	1.94	5.27	Eğilme-kesme (basamak) çatlakları, basınç etkisiyle topuk ezilmesi
TD12 (- yön)	1.2	41438	142.73	114.18	3.10	19.70	1.89	6.35	

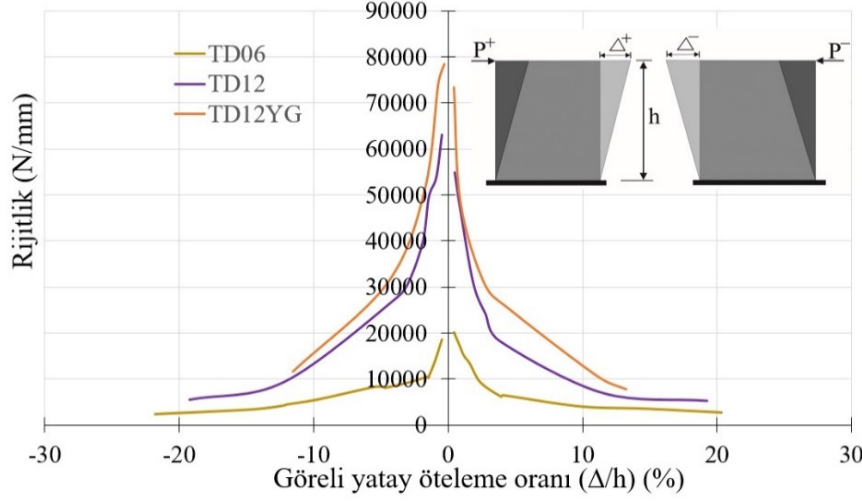
Çizelge 3.7 (devam) : Deney sonuçlarına göre zarf eğrisi ve idealize edilmiş eğrilerden elde edilen duvarlara ait karakteristik değerler ve hasar tanımları.

Numune adı	Ön basınç yüklemesi (MPa)	K_c (N/mm)	P_{maks} (kN)	$P_{göçme}=0.8P_{maks}$ (kN)	d_c (mm)	d_u (mm)	Δ_{maks} Görelî yatay ötelemesi (%)	Süneklik $\mu=d_u/d_c$	Hasar Tipi
BD06YG (+ yön)	0.6	41970	96.11	76.89	2.06	34.33	3.30	16.66	Duvarın temelden ayrılması düzlemsel yatay sallanması (rocking) ve kayma
BD06YG (- yön)	0.6	55713	105.24	84.19	1.70	23.38	2.25	13.75	
BD12YG (+ yön)	1.2	52244	145.12	116.10	2.50	18.27	1.76	7.31	Duvarın üst ve alt kısmında eğilme çatlakları, ankraj bölgesinde lif köprüleme ve lif kopması, kayma
BD12YG (- yön)	1.2	52244	-	-	2.50	-	-	-	
TD12YG (+ yön)	1.2	52120	142.58	114.06	2.46	14.61	1.41	5.94	Eğilme ve düşey çatlaklar, yüzeyde dağılmış kılcal çatlaklar ve TRCC güçlendirme malzemesinin duvardan bir miktar ayrılması (debonding)
TD12YG (- yön)	1.2	99404	172.74	138.19	1.56	12.15	1.17	7.79	

Duvarlarda yatay yükleme – boşaltmaya (+) yönden başlandığında duvarda oluşan deformasyon sebebiyle, (-) yönde tekrar yükleme yapıldığında duvar rijitliğinde azalma ve yük taşıma kapasitesinde bir miktar kayıp görülmektedir. Benzer şekilde, yatay yükleme – boşaltmaya (-) yönden başlandığında oluşan şekil değiştirme sebebiyle, (+) yönde tekrar yükleme yapıldığında duvarda rijitlik ve yük taşıma kapasitesinde (-) yöndeki yüklemekten elde edilen rijitlik ve yük taşıma kapasitesinden daha düşük bir değer elde edilmektedir (Çizelge 3.7). Duvarlarda oluşan hasar tipleri karşılaştırıldığında ise eksenel ön basınç yüklemesinin, yüzeye uygulanan iyileştirmenin ve ankrajın etkisi görülmektedir. Eksenel ön basınç yükü arttırıldığında duvarlarda diyagonal kesme kırılmaları görülmüş ve yer değiştirme kapasitelerinde azalma meydana gelmiştir. Hasarlı duvarlara tekstil takviyeli ECC2 kullanılarak iyileştirme uygulandığında duvar yüzeyinde herhangi bir hasar oluşmamış olup, duvarın temelle birleşim bölgesinde ya da tekstil bazlı ankrajın kopmasıyla göçmenin meydana geldiği görülmüştür. Hasarlı tuğla duvar yüzeyine uygulanan kompozit iyileştirme malzemesinin ise duvar yüzeyinden ayrıştığı gözlenmiştir. Bu çalışmadan, duvar iyileştirmesinde hasarlı duvarların yüzeylerinde kullanılan ECC2 harcın, beton blok duvar yüzeyine tuğla duvarlara göre daha iyi yapıştığı ve çalıştığı sonucu çıkarılabilir.



Şekil 3.72 : Tekrarlı yatay yükleme deneyleri sırasında beton blok duvarların rijitlik azalması (N/mm) – görelî yatay öteleme oranı (%) sonuçlarının karşılaştırılması.

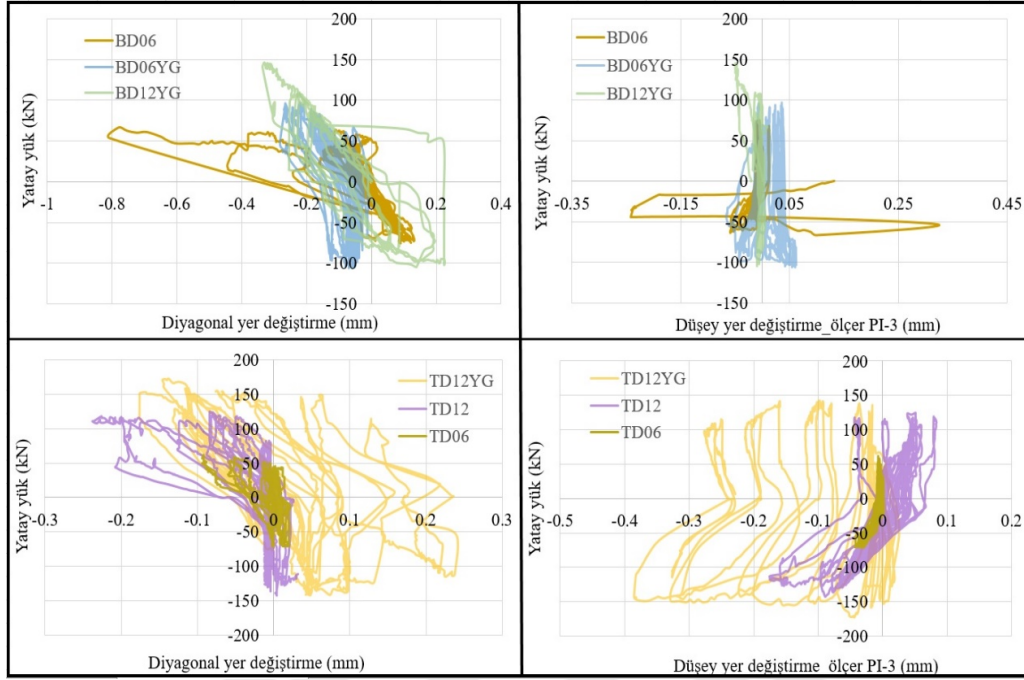


Şekil 3.73 : Tekrarlı yatay yükleme deneyleri sırasında tuğla duvarların rijitlik azalması (N/mm) – görelî yatay öteleme oranı (%) sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 3.72 ve Şekil 3.73'te iki yönlü tekrarlı yatay yükleme – boşaltma uygulanan beton blok ve tuğla duvar numuneleri ile iyileştirilmiş duvar numunelerini kapsayan rijitlik azalmaları, her bir yükleme – boşaltmada eğrinin sekant değeri bulunarak elde edilmiştir. Beton blok duvarlarda yatay derz onarımı, hasarlı duvar yüzeyine uygulanan tekstil takviyeli kompozit iyileştirme ve ankraj uygulamaları, beton blok duvarının rijitlik değerlerinde artış meydana getirmiştir. Hasarlı beton blok duvarın yüzeyine uygulanan tekstil takviyeli kompozit iyileştirme ile beton blok duvarın başlangıç rijitlik değeri 22000 N/mm değerinden 100000 N/mm değerine yükselmiştir. Şekil 3.73'te eksenel ön basınç yüklemesinin artmasıyla tuğla duvara uygulanan tekrarlı yatay yüklemede TD06 numunesinin başlangıç rijitliği 20000 N/mm değerinden TD12 numunesinde 60000 N/mm değerine yükselmiştir. Hasarlı tuğla duvar iyileştirmesinde yüzeye uygulanan tekstil takviyeli ECC2 kompozit uygulama ile elde edilen rijitlik değeri hasarsız numunenin de üzerine çıkarak 80 kN/mm mertebelerine ulaşmaktadır. Bu değer ile başlayan rijitlik çevrimsel yükleme sonucu oluşan hasarlar sonucu eksponansiyel bir dağılım ile 20 kN/mm mertebelerine kadar düşmektedir (Şekil 3.73). Bu rijitlik değerine karşı gelen görelî yatay yer değiştirme oranı ise $\pm 8\%$ civarındadır. Bu değer bahsi geçen rijitlik için en düşük yer değiştirme değeridir. Bu durumda yüzey güçlendirme işlemi ile oluşturulan TD12YG numunesinin rijitlik performansı oldukça yüksek olduğu sonucuna varılabilir. Çevrimsel yükün doğrultularına göre gösterilen rijitlik grafikleri her iki yönde oluşan rijitlik değerlerinin farklı olduğunu göstermektedir. Bu farklılık belirli bir yönde

oluşan hasarın beklenildiği gibi tek yönde olmayıp aksi yönde de etkisinin olmasından kaynaklanmaktadır. Mesela ilk olarak (+) yönde yapılan bir yükleme sonucu elde edilen rijitlik değeri, oluşan hasarın kalıcı olması nedeniyle, sonrasında (–) yönündeki yüklemelerde belli bir oranda düşük çıkmaktadır.

Çizelge 3.7’de tekstil takviyeli ECC2 kullanılarak hasarlı duvarların yüzeylerine iyileştirme yapıldığında süneklik değerlerindeki artış görülmektedir. Bu durum, hasar görmüş duvarlara tekstil takviyeli kompozit malzeme ile iyileştirme uygulandıktan sonra elde edilen duvarların yatay yük etkisinde gevrek davranmayıp, enerji yutma kapasitesinde artış sağlandığını gösterir. Şekil 3.71’de belirtilen duvarların idelize edilmiş eğrilerinin altında kalan alanlar hesaplanarak bölme duvar numunelerinin yatay yük altında enerji yutma kapasiteleri hesaplanmıştır. BD06 numunesinin yatay yük altında elde edilen enerji yutma kapasitesi 632.115 kNmm iken, hasarlı BD06 numunesinin duvar yüzeylerinin tekstil takviyeli ECC2 harçla güçlendirilmesiyle elde edilen BD06YG numunesinin enerji yutma kapasitesi 2880.41 kNmm olarak bulunmuştur. Tekstil takviyeli kompozit ile uygulanan iyileştirme yöntemiyle hasarlı BD06 numunesinin enerji yutma kapasitesi 4.5 katına çıkarılmıştır. Hasarlı tuğla duvar numunesinin yüzeylerine uygulanan tekstil takviyeli ECC2 ve tekstil bazlı temele ankraj uygulamaları ile elde edilen güçlendirilmiş duvar TD12YG’nin yatay yük altında enerji yutma kapasitesi 1716.14 kNmm iken, TD12 duvar numunesinin enerji yutma kapasitesi 2054.83 kNmm olarak daha yüksek bir değer bulunmaktadır. İyileştirme uygulanmış tuğla duvar numunesinin (TD12YG), hasar görmemiş TD12 numunesinin enerji yutma kapasitesinden daha düşük bir değerde bulunmasındaki temel sebep, duvar yüzeyine uygulanan tekstil takviyeli ECC2 harcın hasarlı tuğla duvar yüzeyinden ayrılması olarak gösterilebilir. Hasarlı tuğla duvar yüzeyine uygulanan tekstil takviyeli ECC2 harcın, tuğla duvarda yük taşıma kapasitesini arttırdığı, fakat duvar yüzeyi ile olan bağ dayanımının zayıf olması sebebiyle duvar yüzeyinden ayrılarak yatay yer değiştirme kapasitesinde ve enerji yutma kapasitesini arttırmada beton blok duvarlarda olduğu kadar etkili olamadığı görülmüştür. BD12YG numunesinin yatay yük etkisinde enerji yutma kapasitesi 2223 kNmm olup, TD12YG’nin enerji yutma kapasitesinin 1.3 katı değerindedir.



Şekil 3.74 : Duvarların ve güçlendirilmiş hasarlı duvarların farklı ön basınç yüklemeleri altında yatay yük (kN) - diyagonal yer değiştirme (mm) ve yatay yük (kN) - düşey yer değiştirme PI-3 (mm) grafikleri.

Şekil 3.74'e göre beton blok duvarların diyagonal yer değiştirme kapasiteleri aynı ön basınç yüklemesi altında (0.6 MPa) benzer boyutlardaki kil tuğla duvarlar için daha yüksektir. Özellikle, BD06'nın diyagonal yer değiştirme değeri diyagonal kesme hasarı sebebiyle 0.8 mm değerine ulaşmıştır. Hasarlı beton blok duvarın yüzeyine uygulanan iyileştirme ile elde edilen BD06YG numunesinin tekrarlı yatay yükleme altında diyagonal yer değiştirme değeri 0.3 mm olup, duvarda kesme hasarına rastlanmamıştır. BD06YG numunesinde sadece duvarın yüzeylerine iyileştirme uygulanmış olup, temele ankraj yapılmamıştır. Bu sebeple, BD06YG numunesinde tekrarlı yatay yük etkisinde hasar, duvarın temelle birleşim bölgesinde gerçekleşmiş olup, iyileştirilmiş duvar yüzeyinde hasar oluşmadığından diyagonal yer değiştirme değeri BD06 numunesine göre daha düşük çıkmıştır. Beton blok birimlerden oluşan hasarlı duvarın yüzeyine uygulanan tekstil güçlendirmesinden ve temele uygulanan tekstil bazlı ankraj uygulamasından sonra elde edilen BD12YG duvar numunesinin tekrarlı yatay yükleme deneyi sonucunda diyagonal yer değiştirme değeri bir miktar artarak 0.38 mm olmuştur. BD12YG'nin BD06YG'ye göre diyagonal yer değiştirmesindeki artışta tekstil bazlı ankraj ve arttırılan eksenel ön basınç yükü etkili olmuştur. Beton blok duvar numunelerinin (BD06, BD06YG, BD12YG) PI-3 ölçerden elde edilen düşey yer değiştirme değerleri benzer olup, 0.05 mm civarındadır.

TD12 duvarının sol alt biriminin düşey yer değiştirilmesi 0.15 mm'ye ulaşmış ve ezilme meydana gelmiştir. BD06 ve TD12 duvarlarında kesme ve eğilme çatlakları birlikte görülmüş olup, duvarın sol ve sağ alt birimlerinde oluşan basınç alanları sebebiyle ezilmeler meydana gelmiştir. Tekrarlı yatay yük altında TD12YG numunesinin her çevrimde diyagonal yönde kalıcı şekil değiştirme yaptığı görülmekte ve maksimum diyagonal yer değiştirme değeri 0.25 mm değerine ulaşmaktadır (Şekil 3.74). Benzer şekilde, TD12YG'ye ait PI-3 ölçerden tekrarlı yatay yükleme esnasında duvarların sol alt birimlerinde meydana gelen basınç ve çekme etkisindeki düşey yer değiştirmenin Şekil 3.74'te 0.4 mm'ye ulaştığı ve kalıcı şekil değiştirmelerin oluştuğu görülmektedir. TD12 numunesinde ise PI-3 ölçerden elde edilen maksimum düşey yer değiştirme değeri yaklaşık 0.2 mm'dir. Hasarlı TD12 numunesinin yüzeyinden yapılan tekstil takviyeli kompozit iyileştirme ve tekstil bazlı ankraj yöntemi ile PI-3 ölçerden elde edilen düşey yer değiştirme değeri TD12YG numunesinde 2 katına çıktığı görülmektedir.

Konthesingha ve diğ. (2013) bu çalışmaya benzer olarak, 1200 mm x 1200 mm x 110 mm (uzunluk x yükseklik x kalınlık) boyutlarda tuğla duvar elemanlarına 2.8 MPa, 2 MPa ve 1.4 MPa olan üç farklı eksenel ön basınç yüklemeleri altında düzlem içi çevrimsel yatay yükleme testi uygulayarak, duvarlarda çeşitli hasar seviyeleri oluşturmuşlardır. Hasarlı duvarlara karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) şeritler kullanılarak 3 farklı tipte iyileştirme metodu uygulanmıştır. Bunlardan birincisi, duvarın bir yüzüne 3 yatay şerit halinde, diğer yüzüne 3 düşey şerit olarak uygulanmıştır. İkincisi, duvarın her iki yüzeyine de 3'er yatay şeritler halinde uygulanmıştır. Sonuncusu ise, duvarın tek yüzeyinde 3 yatay şerit kullanılarak iyileştirilmesi olmuştur. Kullanılan şerit boyutları yatay şeritler için 1200 mm x 10 mm x 1.4 mm iken, düşey şeritler için 1100 mm x 10 mm x 1.4 mm'dir. Farklı hasar biçimlerine sahip duvarlara 3 farklı tipte iyileştirme uygulandıktan sonra, tekrardan farklı eksenel ön basınç yüklemeler altında çevrimsel yatay yükleme testi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar güçlendirilmemiş tuğla duvar elemanlarıyla karşılaştırılmış, CFRP şeritler kullanılarak hasarlı duvarlara uygulanan bu 3 farklı duvar iyileştirme metodunun duvarların dayanımı, yer değiştirme kapasitesi, enerji dağılımı ve sünekliği üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur.

Konthesingha ve diğ. (2013)'e ait çalışmada kullanılan duvar boyutları, bu tez çalışmasında hasarlı duvarların iyileştirilmesinde kullanılan duvar boyutlarıyla

oldukça benzerdir. Konthesingha ve diğ. (2013) çalışmalarında hasarlı duvarların iyileştirilmesinde CFRP şeritler kullanılırken, bu tez çalışmasında bazalt tekstil takviyeli ECC2 (%1 PVA fiber) hibrit kompozit malzeme ile farklı iyileştirme yöntemleri araştırılmıştır. Her iki çalışmada da sonuçlar kendi içerisinde iyileştirme/güçlendirme uygulanmamış (hasarsız) duvarların tekrarlı yatay yükleme test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır (Çizelge 3.8). Çizelge 3.8'e göre, Konthesingha ve diğ. (2013) çalışmalarında belirtilen URM1.4, URM2, URM2.8 numuneler güçlendirilmemiş referans tuğla duvarları; RHD1.4, RD2, RHD2.8 numuneler CFRP şeritlerle iyileştirme uygulanmış yüksek hasarlı duvarları; RLD2.8 numunesi ise CFRP şeritlerle iyileştirilmiş düşük hasarlı tuğla duvarları belirtmektedir. Çizelge 3.8'de tez çalışmasında gerçekleştirilen duvar test sonuçlarının tekrarlı yatay yüklemede (+) yön için elde edilen sonuçları kullanılmıştır.

Çizelge 3.8 : Hasarlı duvarların CFRP şeritlerle ve tekstil takviyeli ECC2 harçla iyileştirme yöntemlerinin karşılaştırılması.

Numune	Ön basınç yükü (MPa)	K_e (N/mm)	P_{maks} (kN)	d_u (mm)	Süneklik (μ)	Enerji (J)	Kaynak
URM1.4	1.4	13100	81.4	11.5	3.2	700.2	Konthesingh a ve diğ. (2013)
RHD1.4	1.4	7700	101.0	35.0	2.9	3295.0	Konthesingh a ve diğ. (2013)
URM2	2.0	12100	131.8	20.0	1.9	1856.0	Konthesingh a ve diğ. (2013)
RD2	2.0	8700	125.0	30.0	2.5	3176.0	Konthesingh a ve diğ. (2013)
URM2.8	2.8	14100	112.5	10.0	1.3	642.7	Konthesingh a ve diğ. (2013)
RHD2.8	2.8	13600	96.4	10.0	1.4	576.1	Konthesingh a ve diğ. (2013)
RLD2.8	2.8	13000	97.4	12.5	1.8	1260.0	Konthesingh a ve diğ. (2013)
TD12	1.2	29283	124.8	20.2	5.3	2054.8	Test
TD12YG	1.2	52120	142.6	14.6	5.9	1716.1	Test
BD06	0.6	38004	74.9	10.9	6.1	632.1	Test
BD06YG	0.6	41970	96.1	34.3	16.6	2880.4	Test
BD12YG	1.2	52244	145.1	18.3	7.3	2223.0	Test

Çizelge 3.8’de görüldüğü gibi tekrarlı yatay yükleme sonucunda elde edilen yüksek hasarlı tuğla duvarın URM1.4’ün 3 sıra yatay CFRP şeritlerle iyileştirilmesiyle duvar rijitliğinde azalma görülürken, yatay yük taşıma kapasitesi (P_{maks}) %24 artmış, duvarın tepe yatay yer değiştirme kapasitesi ise 3 katına çıkmıştır. URM2’de ise CFRP ile iyileştirme uygulandığında elde edilen RD2 duvarının yatay yük taşıma kapasitesinde yeteri kadar iyileşme gözlenmemiş olup, URM2’nin yatay yük taşıma kapasitesinden daha düşük bir yük taşıma kapasitesi görülmektedir. Benzer olarak, hasarlı URM2.8 duvarının 3 sıra yatay CFRP şeritlerle iyileştirilmesiyle elde edilen RHD2.8 ve RLD2.8 duvarlarının yatay yük taşıma kapasitesinde azalmalar görülmekte olup,

CFRP ile gerçekleştirilen iyileştirmenin URM2.8 duvarının yatay yük taşıma kapasitesinde yeterli artışa sebep olmadığı görülür. CFRP şeritleri ile iyileştirilen duvarların rijitlik değerleri referans duvarlara göre daha düşüktür. CFRP şeritlerle iyileştirme uygulanan hasarlı duvarların maksimum yatay yer değiştirme kapasiteleri, süneklik ve enerji yutma kapasitesilerinde ise genel olarak artış görülmektedir.

Çizelge 3.8’de bu tez çalışmasında hasarlı duvarların yüzeylerine uygulanan tekstil takviyeli ECC2 iyileştirme yöntemlerinin sonucu olarak, duvar rijitliklerinde, yatay yük taşıma kapasitelerinde, maksimum tepe yatay yer değiştirmelerinde ve süneklik değerlerinde, duvarların hasar görmemiş halinde tekrarlı yatay yükleme testleri sonucunda elde edilen değerlerine göre artış gözlenmiştir. Hasarlı duvarlara tekstil takviyeli ECC2 ile uygulanan iyileştirme metodlarından, CFRP şeritlerle uygulanan iyileştirme metodlarına göre daha etkili ve avantajlı sonuçlar elde edildiği izelge 3.8’den görülmektedir. Tekstil ve fiber takviyeli (hibrit) imento esaslı malzemelerle hasarlı duvarlara uygulanabilecek iyileştirme yöntemleri, CFRP şeritler ile geliştirilen iyileştirme yöntemlerine göre daha ekonomik ve deprem etkilerinde daha iyi performans sağlayabilecek bir alternatif olabilir.

4. DUVARLARIN SONLU ELEMAN ANALİZLERİ

Bu bölümde, önceki bölümde ele alınan güçlendirilmemiş tuğla ve beton blok duvarların mikro modelleri oluşturulup, deney sonuçlarıyla kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Mikro modelleme ile düşey ve yatay yük altında duvarların davranışının daha detaylı olarak tanımlanması amaçlanmıştır. Duvar birimi ve harçların malzeme özelliklerinin yanında duvar birimleri ve harç ara yüzeyindeki kohezif davranış için Benzeggagh-Kenane (1996) bileşke mod kohezyon kuralı kullanılarak modellemeler detaylı olarak oluşturulmuştur. Duvar modelleri oluşturulurken bölüm 3.1’de yığma duvar bileşenleri kullanılarak yığma bölme duvar hasar modlarının tahmini için deney ve nümerik çalışmalarda kullanılan parametreler ve elde edilen sonuçlardan yararlanılmıştır. Nümerik analizlerden elde edilen yatay yük-yer değiştirme eğrileri duvar deneylerinden elde edilen zarf eğrileri ile kalibre edilmiştir. Hasar görmüş duvarların bazalt tekstil ve PVA fiber takviyeli ECC harçla iyileştirme uygulanmış durumları da mikro model geliştirilerek doğrusal olmayan analizleri yapılmış ve deney sonuçları ile doğrulanmıştır.

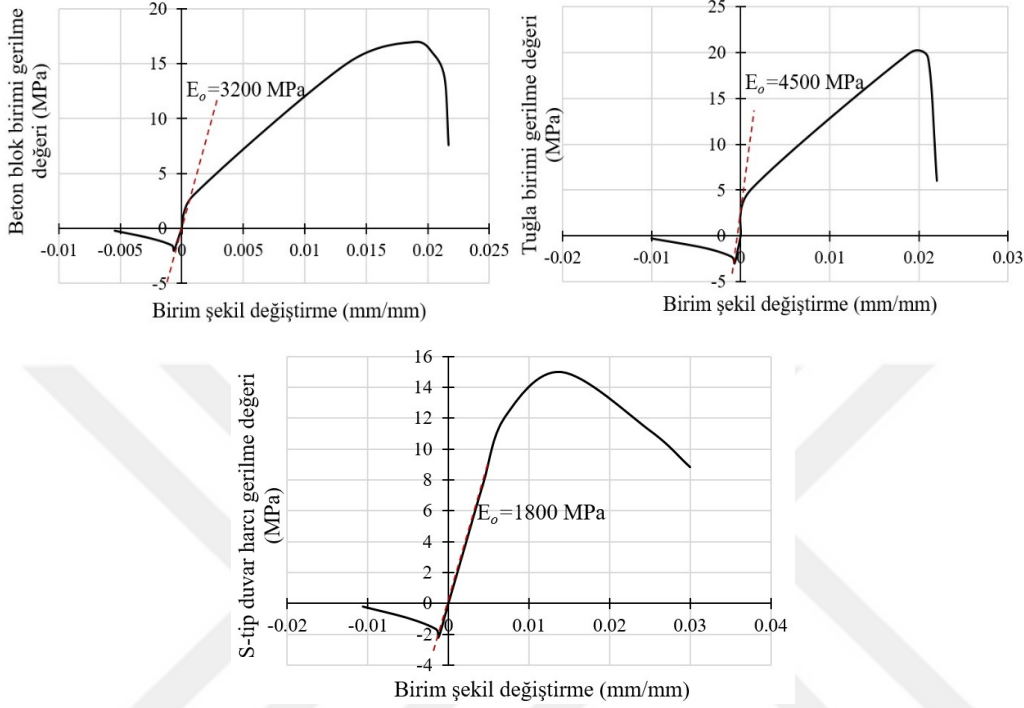
Duvarların mikro modelleri için Abaqus ver. 6.14/Explicit çözücüsünde doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir.

4.1 Güçlendirilmemiş Duvarların Mikro Modellerinin Oluşturulması ve Analizleri

4.1.1 Malzeme modelleri

Tuğla duvar ve beton blok duvarın sonlu eleman modellerinde duvar birimleri (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2) ve harçlarda kullanılan malzeme modeli doğrusal olmayan beton hasar plastisite modeli (concrete damaged plasticity model) kullanılarak oluşturulmuştur. Tuğla birimi için Şekil 3.1, delikli beton blok birim için Şekil 3.2 ve S-tip harç için Şekil 3.4’te deneyler sonucunda elde edilen malzeme özellikleri kullanılmıştır. Şekil 4.1’de sonlu eleman modelleri için kullanılan birimlerin malzeme özellikleri gösterilmiştir. Bu değerler Abaqus programında beton hasar plastisite modeli kullanılarak basınç ve çekme gerilmeleri ile plastik şekil değiştirme değerleri

olarak tanımlanmıştır. Hasar parametreleri bölüm 3'te belirtilen Denklem (3.1) ve Denklem (3.2) kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 4.1 : Sayısal modellemede kullanılan tuğla duvar ve beton blok duvar birimlerinin ve harcın malzeme özellikleri.

4.1.2 Duvar birimi/harç arayüz modelleri

Tuğla duvar ve beton blok duvarların modellenmesinde mikro modelleme tekniği kullanılmıştır. Duvar birimleri ve harç malzeme özellikleri kadar, duvar birimleri ve harç arayüz davranışını tanımlamak da gerekmektedir. Bölüm 3.1.2 ve bölüm 3.1.3'te tuğla-harç arayüz kırılma özelliklerinin belirlenmesi için deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarla duvar birimleri arayüzündeki çekme kırılması ve kayma kırılması mekanik özellikleri belirlenmiştir. Burada belirlenen mekanik özellikler duvar mikro modellemelerinde arayüz için kullanılan Benzeggagh-Kenane (B-K) kırılma kriterinde kullanılmıştır. Arayüzde gerilme oranlarına bağlı ikinci dereceden bir etkileşim fonksiyonu kullanılır. Hasarın başlaması Denklem (2.5)'te belirtilen fonksiyon ile tanımlanmıştır. Arayüzde meydana gelen kırılma (göçme) durumu ise Denklem (2.6)'da belirtilen kırılma enerjisi ile ifade edilmiştir. Çizelge 4.1'de duvarlarda kullanılan duvar birimi ve harç arayüzüne ait kohezif parametre değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.1 : Duvar derzi (harç) arayüzüne ait kohezif değerler.

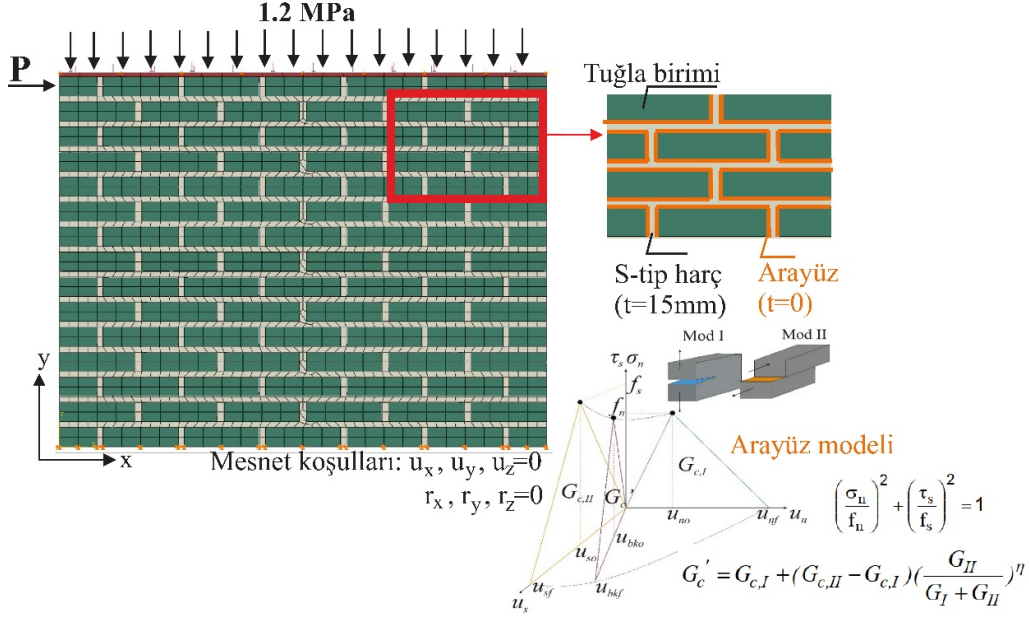
Duvar modelleri	Duvar birimi-harç arayüz hasar başlangıç dayanımları		Duvar birimi-harç arayüz kohezif rijitlik değerleri	
	Çekme dayanımı f_n (MPa)	Kayma dayanımı f_s (MPa)	Mod I rijitlik, k_n (N/mm ³)	Mod II rijitlik, k_s (N/mm ³)
Tuğla duvar	0.20	0.30	229.32	95.55
Beton blok duvar	0.24	0.30	202.10	84.21

Çizelge 4.1’de duvar derz arayüzlerindeki kohezif rijitlik değerleri tuğla duvar ve beton blok duvarlar için bölüm 3’te deney sonuçlarına göre elde edilmiş ve Şekil 4.1’de belirtilen malzeme özelliklerinin fonksiyonu olarak Denklem (2.4)’e göre bulunmuştur.

Arayüz kırılma enerjileri, bölüm 3’te duvar bileşenleri ile yapılan testler ve bölüm 4.1.3 ile bölüm 4.1.4’te duvarların sonlu eleman analizlerinden elde edilen yatay yük-duvar tepe noktası yer değiştirme eğrisinin deney sonuçları ile kalibrasyonu sonucunda elde edilmiştir.

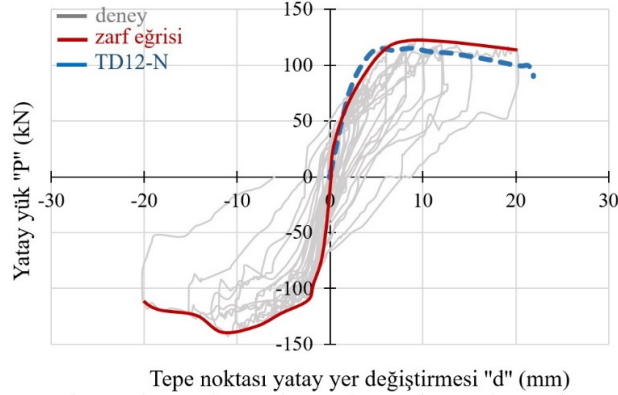
4.1.3 Tuğla duvarın modellenmesi ve analiz sonucu

Tuğla duvar sonlu eleman modeli için bölüm 3.4.4’te 1.2 MPa ön basınç yüklemesi altında yatay çevrimsel yükleme uygulanan TD12 duvarı ele alınmıştır. TD12 numunesinin sonlu eleman modeli Şekil 4.2’de verilmiştir. Tuğla duvar modelinin boyutları deney numunesi ile aynı olup, gerçek bir tuğla duvar elemanının yaklaşık 1/3 ölçeği civarındadır. Buna göre, duvar uzunluğu 1220 mm, yüksekliği 1050 mm ve kalınlığı 100 mm’dir. Modelleme üç boyutlu deforme olabilen katı modeller olarak sekiz kontak düğüm noktası ile (C3D8R) Abaqus programında oluşturuldu (Şekil 4.2). Modelde kullanılan toplam eleman sayısı 14644’dür. Mesnet koşulları ise duvar tabanında ankastre olup, eksenel ön basınç 1.2 MPa olarak deneyde gerçekleştirildiği gibi yatay yükleme uygulanmadan önce duvara etkilmiştir. Bu durum sonlu eleman analizinde 2 adımda tanımlanmıştır. İlk olarak, doğrusal olarak 1.2 MPa basınç değerine ulaşana kadar artan düşey yükleme olup, istenilen ön basınç yüklemesine ulaşıldığında bu değer sabit tutularak, ikinci adım olan yer değiştirme kontrollü yatay yükleme Abaqus programında tanımlanmıştır. Duvar modeli oluşturulurken, tuğla birimi ve harç için Şekil 4.1, tuğla birimi ve harç arayüzü için Çizelge 4.1’de elde edilen parametrelerden yararlanılmıştır.



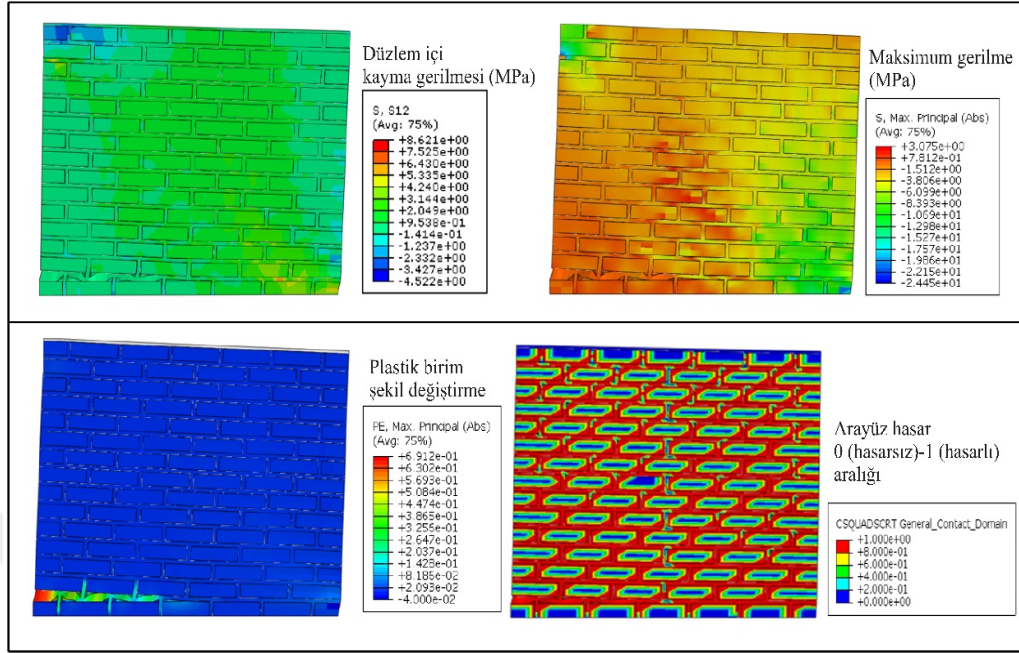
Şekil 4.2 : Tuğla duvarın (TD12) mikro modeli.

Şekil 4.2’de gösterilen tuğla duvarın mikro modelleme yöntemiyle doğrusal olmayan davranışını tanımlamak üzere sonlu eleman analiz sonucu yatay yük- yer değiştirme eğrisi ile Şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.3 : Sonlu eleman modeli TD12-N’nin deney sonucu ile doğrulaması.

TD12-N, deneyde kullanılan tuğla duvarın sonlu eleman (mikro) modelidir. Beton hasar plastisite modeli ve Benzeggagh-Kenane kırılma kriteri kullanılarak, düşey ve yatay yük altında gerçekleştirilen analiz sonucunun çevrimsel yükleme altında TD12 deney numunesinden elde edilen sonuçla iyi bir şekilde örtüştüğü görülmektedir. Şekil 4.4’te tuğla duvar modeline ait gerilme dağılımı (S), hasar biçimi ve plastik birim şekil değiştirme (PE) değerleri elde edilmiştir.



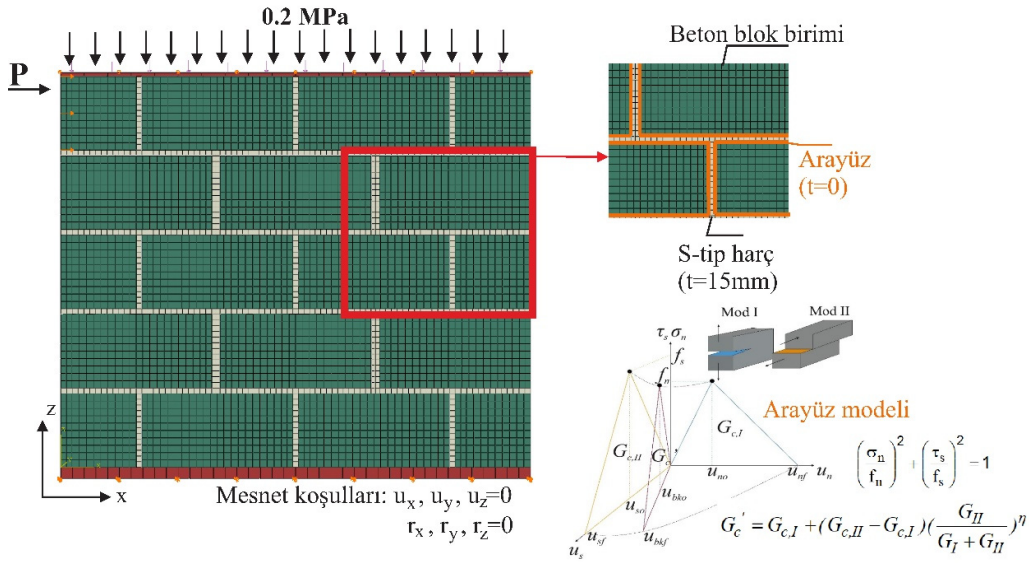
Şekil 4.4 : TD12-N gerilme, plastik şekil değiştirme ve arayüz hasar sonuçları.

Şekil 4.4'te görüldüğü gibi duvarda plastik birim şekil değiştirme, tuğla duvarının alttan birinci tuğla sırası yatay derzinde oluşmuştur. Duvara sol üst kenarından uygulanan yatay yük etkisiyle duvarın sağ alt köşe biriminde basınç ezilmesi görülmüş olup buradaki gerilme değeri 21 MPa civarını bulmuştur. Tuğla biriminin basınç dayanım kapasitesi deney sonucu Şekil 3.1 ve Şekil 4.1'de 19 MPa olarak bulunmuştur. Düşey ve yatay yükleme sonucunda duvar köşe noktalarına gelen gerilme değeri birimin basınç dayanım değerini aşarak kırıldığını göstermektedir. Sonlu eleman analiz sonucunun, Şekil 3.35 ve Şekil 3.36'da verilen deney sonuçları ile uyduğu görülmüştür.

4.1.4 Beton blok duvarın modellenmesi ve analiz sonucu

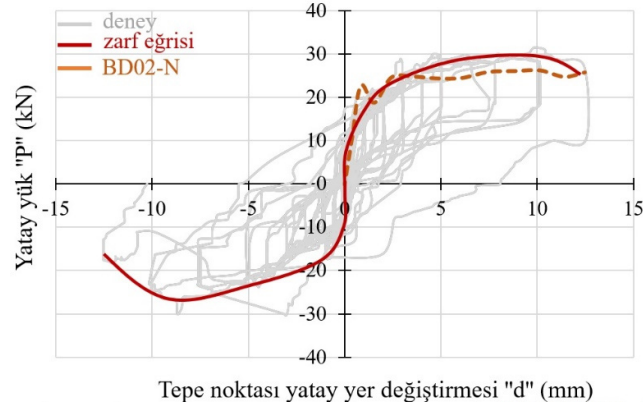
Beton blok duvarın sonlu eleman modeli için bölüm 3.5.3'te 0.2 MPa ön basınç yüklemesi altında yatay çevrimsel yükleme uygulanan BD02 duvarı ele alınmıştır. BD02 numunesinin sonlu eleman modeli Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Duvar sonlu eleman modelinin (BD02-N) boyutları deney numunesi ile aynı olup, duvar uzunluğu 1220 mm, yüksekliği 1040 mm ve kalınlığı 100 mm'dir. Modelleme, tuğla duvarında olduğu gibi üç boyutlu deforme olabilen katı modeller olarak sekiz kontak düğüm noktası ile (C3D8R) Abaqus programında oluşturuldu (Şekil 4.5). Modelde kullanılan toplam eleman sayısı 11858'dir. Mesnet koşulları tuğla duvardaki gibi ankastre olup, eksenel ön basınç yüklemesi 0.2 MPa olarak deney simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Mikro modellemede beton blok birimler, Şekil 4.1’de basınç, çekme ve plastik birim şekil değiştirme değerleri olarak Abaqus programında tanımlanmıştır. Denklem (3.2)’ye göre beton blok birim ve harç için hasar parametreleri elde edilmiştir. Beton blok birim ve harç arayüzü için duvarın düzlem içi davranışı sebebiyle mod I ve mod II’ye ait arayüz rijitlik ve hasar başlangıç gerilme değerleri Çizelge 4.1’den alınarak Benzeggagh-Kenane kırılma kriterinde kullanılmıştır. Yükleme tuğla duvarda olduğu gibi iki aşamada tanımlanmıştır. Öncelikle, eksenel ön basınç yüklemesi yapıp, daha sonra yatay yükleme uygulanmıştır.

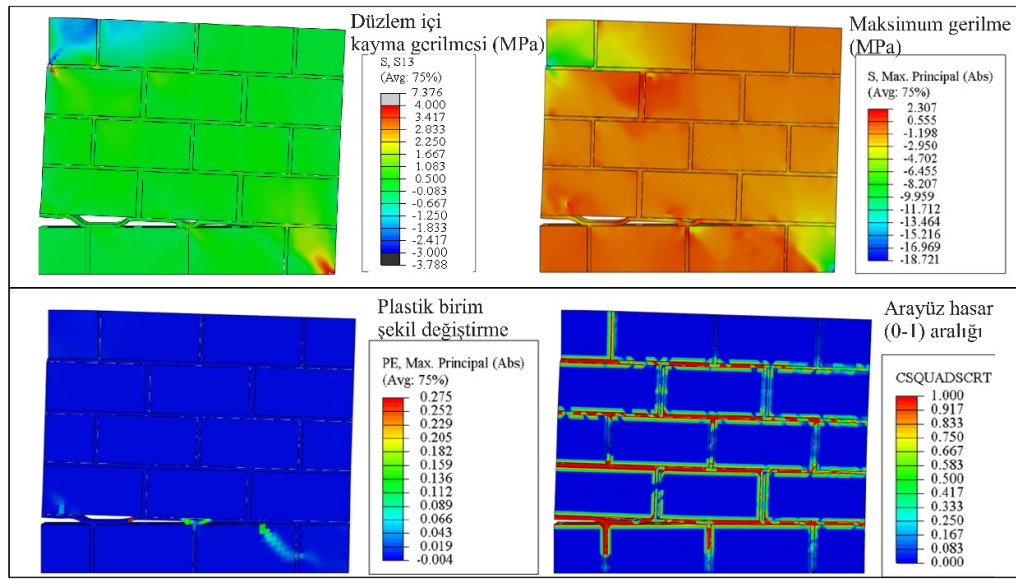


Şekil 4.5 : Beton blok duvarın (BD02) mikro modeli.

Doğrusal olmayan sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen yatay yük-yer değiştirme eğrisinin deney sonucu ile doğrulaması Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Analiz sonucunda duvarda oluşan hasar tipi eğilmeden kaynaklı oluşmuş olup, Şekil 4.7’de gösterildiği gibi duvar alt sıra derzinde açılma şeklindedir. Şekil 3.40’ta deney sonucunda oluşan hasar tipinde aynı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.6 : Sonlu eleman modeli BD02-N'nin deney sonucu ile doğrulaması.



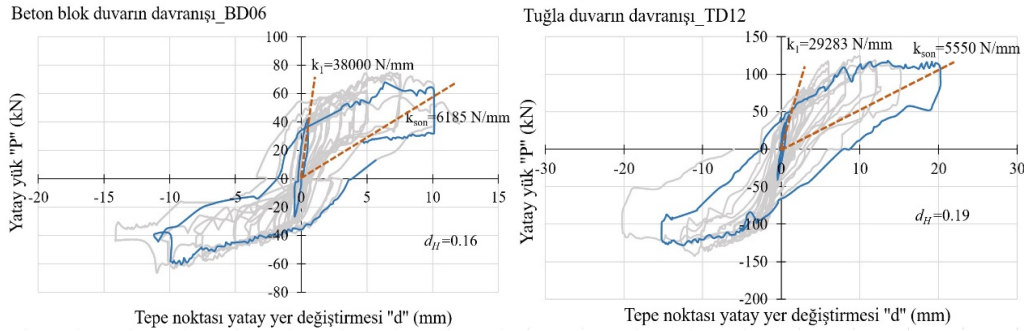
Şekil 4.7 : BD02-N gerilme, plastik şekil değiştirme ve arayüz hasar sonuçları.

Şekil 4.7'ye göre düzlem içi kesmeden kaynaklı gerilme değerlerinin duvarda kesme hasarı oluşturacak düzeyde olmadığı anlaşılmaktadır. Arayüz hasar durumu incelendiğinde, duvarda meydana gelen hasar durumunun eğilme kaynaklı olarak duvar birim-harç arayüzünden kaynaklandığı görülmektedir. Duvara sol tepe noktasından verilen yatay yükleme sonucunda eğilmeden kaynaklı olarak, duvar sağ alt köşe birimde oluşan maksimum gerilme değeri 12 MPa değerlerine ulaşmıştır. Duvarda hasar, alt sıra yatay derzde arayüzde oluşan açılma (mod I kırılması) şeklinde başlamış, duvar sağ köşe noktasında basınç ezilmesinden dolayı plastik birim şekil değiştirme yaparak (basınç kırılması) devam etmiştir.

4.2 İyileştirilmiş Hasarlı Duvarların Mikro Modellerinin Oluşturulması ve Analizleri

4.2.1 Malzeme modelleri

İyileştirilmiş beton ve tuğla birimlerden oluşturulmuş bölme duvarların modellenmesi için önce hasar durumları ile ilgili bazı kabuller yapılmıştır. Öncelikle duvarların çevrimsel yüklemde gösterdikleri davranış, hasar durumlarını belirler. Buna göre, Şekil 4.8’de yükleme ve boşaltma sırasında ilk ve son çevrimlerden elde edilen rijitlik değerleri duvarların hasar katsayısının belirlenmesinde kullanılmıştır. Başka bir deyişle, ilk çevrimden hesaplanan mekanik özellikler hasarsız bir duvarın parametrelerini verirken, son çevrim hasarlı bir duvarın davranışını yansıtmaktadır. Bu durumda ilk çevrimdeki sekant rijitliği ile son çevrimdeki sekant rijitliği karşılaştırılarak hasar oranı elde edilebilir. Bu kabule dayanarak son çevrimin yatay yüklemdeki rijitliği ile ilk çevrimdeki rijitlik değerleri oranı hasar katsayısı (d_H) olarak ele alınmıştır. Duvar modelini oluşturan malzemelerin elastisite modülleri bu katsayı ile çarpılmış olup yeni elastisite modülüne karşı gelen dayanım hesaplamaları yapılmıştır.



Şekil 4.8 : Duvarların ilk ve son çevrimdeki rijitlik değerleri.

Şekil 4.8’e göre beton blok duvar için hasar katsayısı 0.16, tuğla duvar için 0.19 olarak bulunmuştur. Hasarlı duvar modelleri, duvarların rijitliğinin bu hasar katsayısı ile çarpılarak azaltılması ile oluşturulmuştur. Bu azaltma duvar elastisite modülü üzerinden gerçekleştirilmiştir. Duvar elastisite modülü ise duvarı oluşturan birimlerin ve harcın elastisite modülü ve kalınlıklarına bağlı bir bağıntı ile elde edilebilir (Brenich ve diğ., 2002). Bu bağıntı Denklem (4.1), (4.2) ve (4.3) ile verilmektedir.

$$\frac{1}{E_M} = \frac{\lambda_b}{E_b} + \frac{\lambda_m}{E_m} + 2\lambda_m\lambda_b \frac{\nu_b E_m - \nu_m E_b}{\lambda_m(1-\nu_b)E_m + \lambda_b(1-\nu_m)E_b} \left(\frac{\nu_m}{E_m^2} - \frac{\nu_b}{E_b^2} \right) \quad (4.1)$$

$$\lambda_m = t_m / (t_m + h_b) \quad (4.2)$$

$$\lambda_b = h_b / (t_m + h_b) \quad (4.3)$$

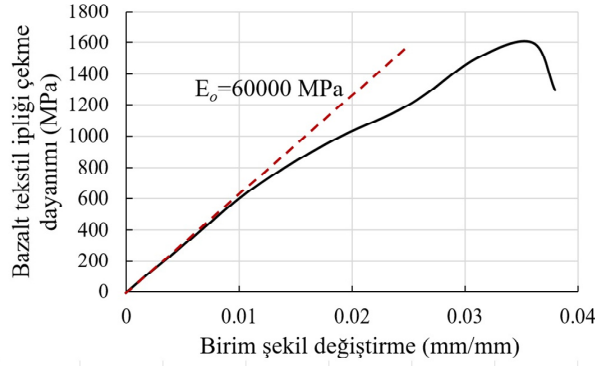
Çizelge 4.2’de hasarlı duvarlara ait mikro modeller için elde edilen parametreler verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Hasarlı duvarların mikro modellerinde kullanılan parametreler.

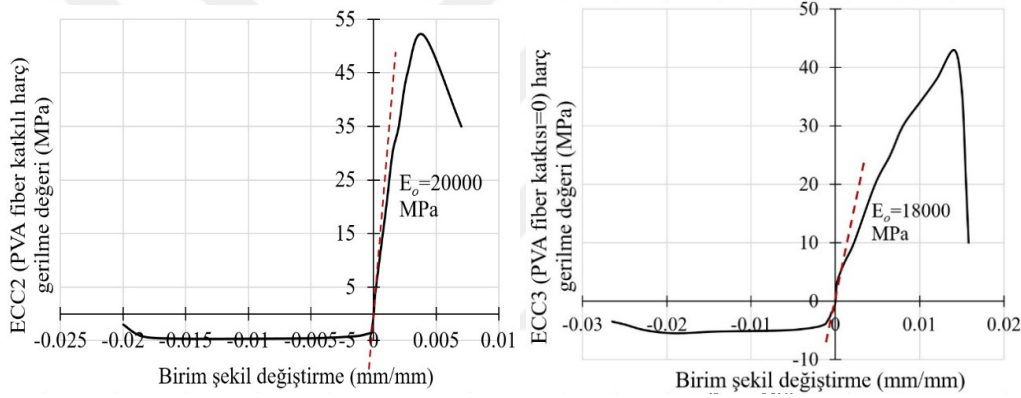
Değişkenler	Tuğla duvar	Beton blok duvar	Hasarlı tuğla duvar	Hasarlı beton blok duvar
h_b (mm)	58	195	58	195
t_m (mm)	15	15	15	15
λ_m	0.2055	0.0714	0.2055	0.0714
λ_b	0.7945	0.9286	0.7945	0.9286
ν_b	0.2	0.2	0.2	0.2
ν_m	0.2	0.2	0.2	0.2
E_b (MPa)	4500	3200	854	521
E_m (MPa)	1800	1800	342	293
E_M (MPa)	3439.82	3031.58	653.13	493.75

Şekil 4.8’de elde edilen hasar katsayısının duvarlarda kullanılan malzemelerin elastisite modülleri ile çarpılarak hasarlı duvarların azaltılmış elastisite modülleri Çizelge 4.2’de yer almaktadır. Denklem (4.1) kullanılarak elde edilen hasarlı duvarların elastisite modüllerinin, duvarların hasarsız durumlarında elde edilen elastisite modüllerine oranı da bu hasar katsayılarını vermektedir.

Hasarlı duvarların modeli bu kabüllere göre gerçekleştirildikten sonra iyileştirme malzemesi olan tekstil ile güçlendirilmiş hibrit kompozit yüzeylere sonlu bir kalınlıkta modellenerek yapıştırılmıştır. Modellemede kullanılan iyileştirme malzeme özellikleri Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da verilmektedir. Tekstil malzemesi harç içerisinde takviye elemanı (donatı) olarak modellenmiştir. ECC harçlar için beton hasar-plastisite (concrete damaged plasticity) modeli kullanılmış olup, tekstil malzemesi için elasto-plastik model kullanılmıştır.



Şekil 4.9 : Bazalt tekstil ipliği çekme dayanımı (Yao ve diğ., 2016; Padalu ve diğ., 2018).



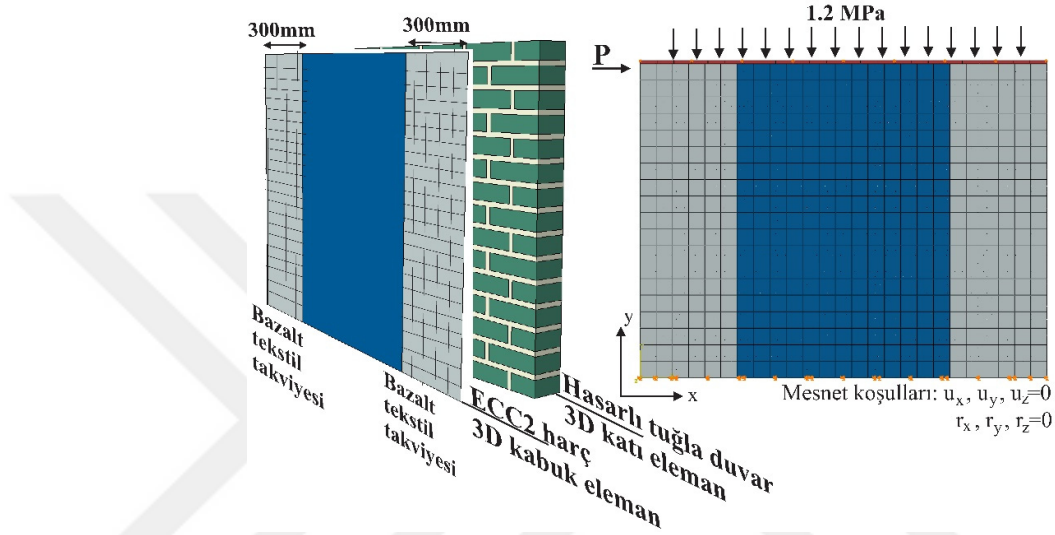
Şekil 4.10 : Sayısal modellerde duvar iyileştirmesi için kullanılan harçların malzeme özellikleri.

Şekil 4.10’da hasarlı duvarları iyileştirme harcı olarak iki adet harç verilmiştir. Harçların basınç dayanımı özellikleri deneyler sonucunda elde edilmiş olup, bölüm 3.2.2’de yer almaktadır. Çekme dayanımları için Şahmaran ve diğ. (2011)’e ait çalışmasından elde edilen sonuçlar baz alınmıştır. ECC2 harcı hasarlı duvarların yüzeylerine uygulanan PVA kısa fiber katkılı harç olup, ECC3 harç ise duvarın derz onarımı için kullanılan harçtır.

4.2.2 Yüzeylerine iyileştirme uygulanmış tuğla duvarın modellenmesi ve analiz sonucu

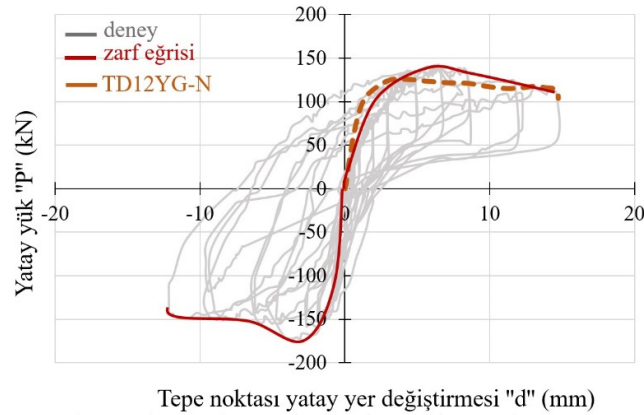
Hasarlı tuğla duvar TD12’nin yüzeylerine uygulanan tekstil takviyeli kompozit iyileştirme bölüm 3.8.2’de verilmiştir. Yüzeylerine iyileştirme uygulanmış hasarlı tuğla duvarın sonlu eleman modeli Şekil 4.11’de gösterildiği gibidir. Hasarlı tuğla duvar hasar katsayısı kullanılarak Şekil 4.8 ve Çizelge 4.2’de elde edilen verilerle üç boyutlu deforme olabilen katı modeller olarak sekiz kontak düğüm noktası ile

(C3D8R) Abaqus programında oluşturuldu. Duvar yüzeylerine uygulanan iyileştirme malzemesi ECC2 harcı, kabuk elemanlardan oluşturulup, tuğla duvar yüzeylerine tam bağlı olarak modellenmiştir. Deneysel çalışmada olduğu gibi, duvar yüzeylerinin sağ ve sol tarafından 300 mm uzunluğundaki bölgesinde yer alan ECC2 kabuk eleman içerisine tekstil malzemesi donatı olarak girilmiştir.



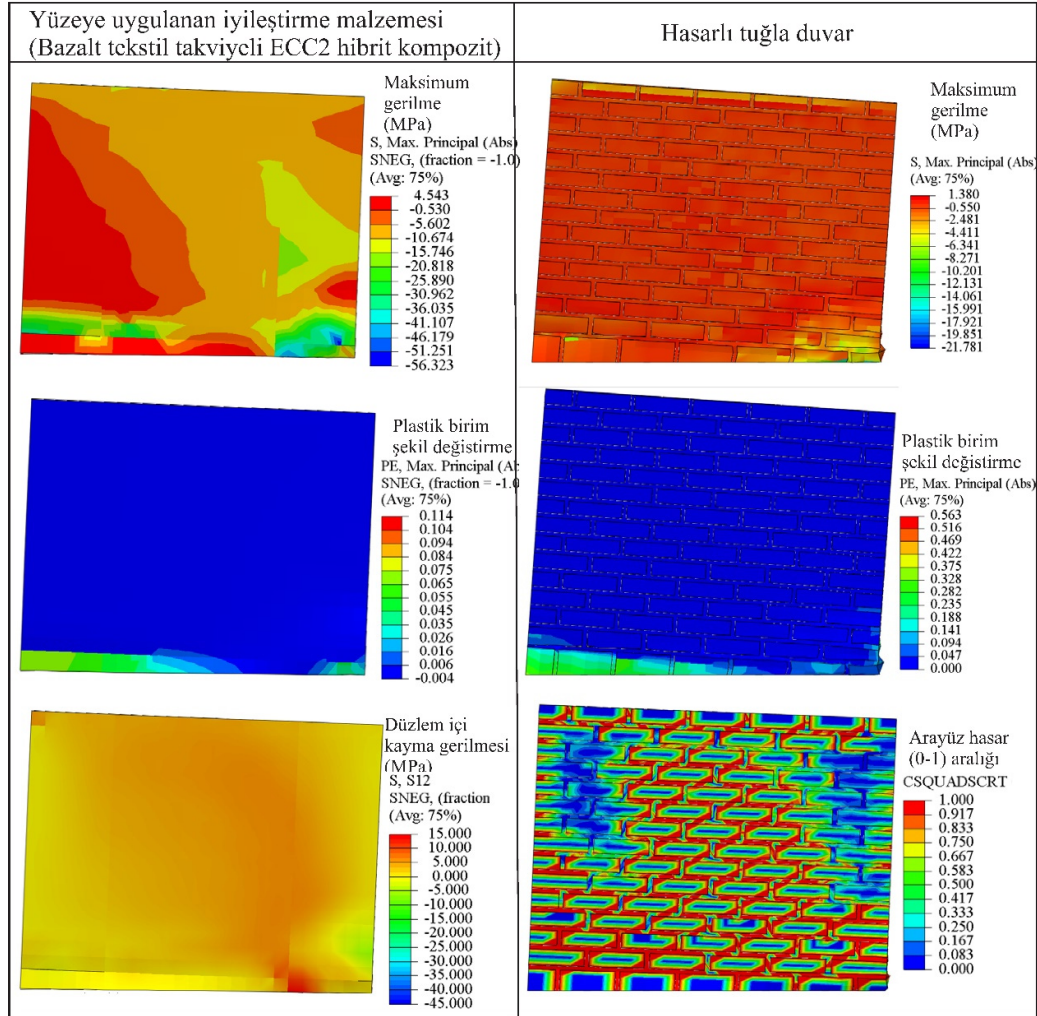
Şekil 4.11 : İyileştirme uygulanan hasarlı tuğla duvarın mikro modeli.

Şekil 4.11'deki modelde kullanılan toplam eleman sayısı 15594'tür. Mesnet koşulları ise duvar tabanında ankastre olup, eksenel ön basınç 1.2 MPa olarak deneyde gerçekleştirildiği gibi yatay yükleme uygulanmadan önce duvara etkitilmiştir. Sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen yatay yük- yer değiştirme eğrisinin Şekil 4.12'de deney sonucu ile örtüştüğü gösterilmiştir.



Şekil 4.12 : Sonlu eleman modeli TD12YG-N'nin deney sonucu ile doğrulaması.

Şekil 4.13'te TD12YG-N'nin gerilme, plastik şekil değiştirme ve hasar durumları gösterilmektedir. Sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen hasar biçiminin TD12YG numunesinin deney sonucu ile aynı olduğu gözlenmiştir. Hasarlı duvarın, yüzeylerine uygulanan tekstil takviyeli kompozit malzeme ile güçlendirilmesiyle yük taşıma kapasitesi arttırılmıştır. Hasarlı duvarın yüzeylerinin tekstil takviyeli kompozit ile kaplanması, duvarın rijitliği ve dayanımını arttırmış, yatay yük etkisinde duvarda oluşan hasar biçimini değiştirmiştir.



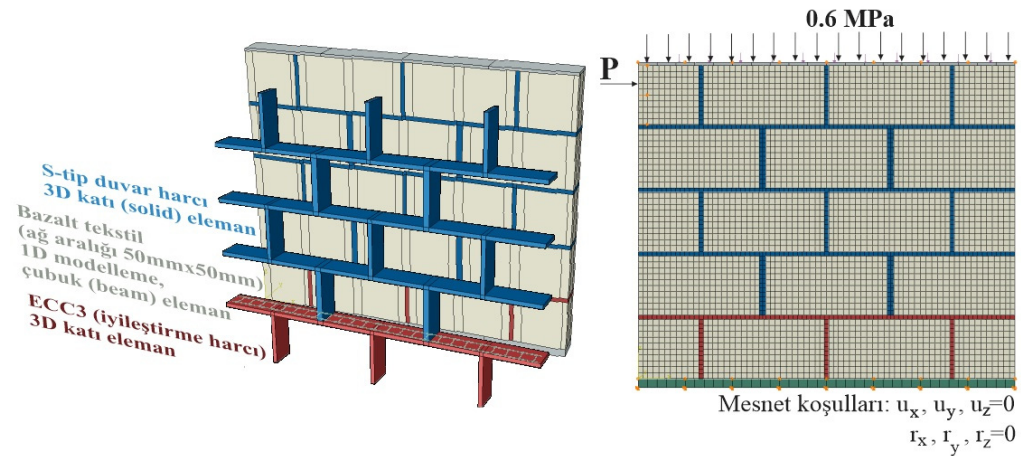
Şekil 4.13 : TD12YG-N'nin gerilme, plastik şekil değiştirme ve arayüz hasar sonuçları.

Şekil 4.13'te görüldüğü gibi düşey ve yatay yükleme altında duvarda oluşan gerilmeler hasarlı duvar yerine duvar yüzeyine uygulanmış tekstil takviyeli kompozit malzeme tarafından karşılanmaktadır. Tekstil takviyeli kompozit malzemedeki basınç gerilmesi 36 MPa, çekme gerilmesi 4.5 MPa değerlerindedir. Hasarlı duvarda ise basınç

gerilmesi 9 MPa, çekme gerilmesi 1 MPa değerlerindedir. Plastik birim şekil değiştirmelere bakıldığında, duvar tabanında oluşan şekil değiştirme, duvar yüzeylerine uygulanan kompozit iyileştirme malzemesinin taban kısmında oluşan şekil değiştirmenin 4 katı değerindedir. Plastik şekil değiştirme aynı zamanda duvar hasar durumu hakkında bilgi vermektedir. Hasarlı duvar yüzeylerine bazalt tekstil ve PVA fiber içerikli (hibrit) kompozitle iyileştirme uygulandığında duvar dayanımında artış görülmüş ve kesme hasarı oluşmamıştır. Kompozit iyileştirme malzemesinde düzlem içi kayma gerilmelerinin maksimum 10~15 MPa civarında olduğu görülmektedir (Şekil 4.13). İyileştirme uygulanmış duvarda hasar, TD12YG deney numunesine benzer şekilde temel kısmından ayrılma şeklinde meydana gelmiştir. Sonlu eleman modelinde kompozit iyileştirme malzemesinin duvar yüzeyine tam bağlı olduğu kabul edilmiştir. Bu sebeple, TD12YG deney numunesinde tekrarlı yatay yükleme sonucunda iyileştirme malzemesinin duvar yüzeyinden ayrılması, sonlu eleman modelinde gözlenmemiştir.

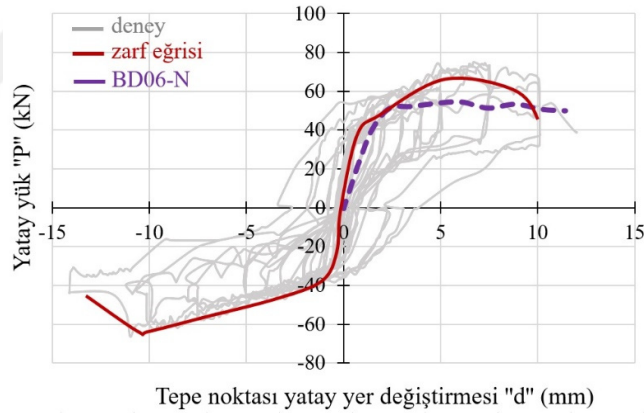
4.2.3 Tek sıra yatay derz güçlendirmesi uygulanmış beton blok duvarın modellenmesi ve analiz sonucu

Yatay ve düşey yükler etkisinde eğilme hasarı oluşmuş BD02 duvarının alt sıra yatay ve düşey derzlerinin onarımı ile duvarın güçlendirilmesine ait sayısal modeli Şekil 4.14'te gösterilmektedir. Bölüm 3.6'da deneysel çalışması gerçekleştirilen beton blok duvarın, bu bölümde Abaqus programı kullanılarak mikro modeli oluşturulmuştur.



Şekil 4.14 : Derz güçlendirmesi uygulanmış beton blok duvarın mikro modeli (BD06-N).

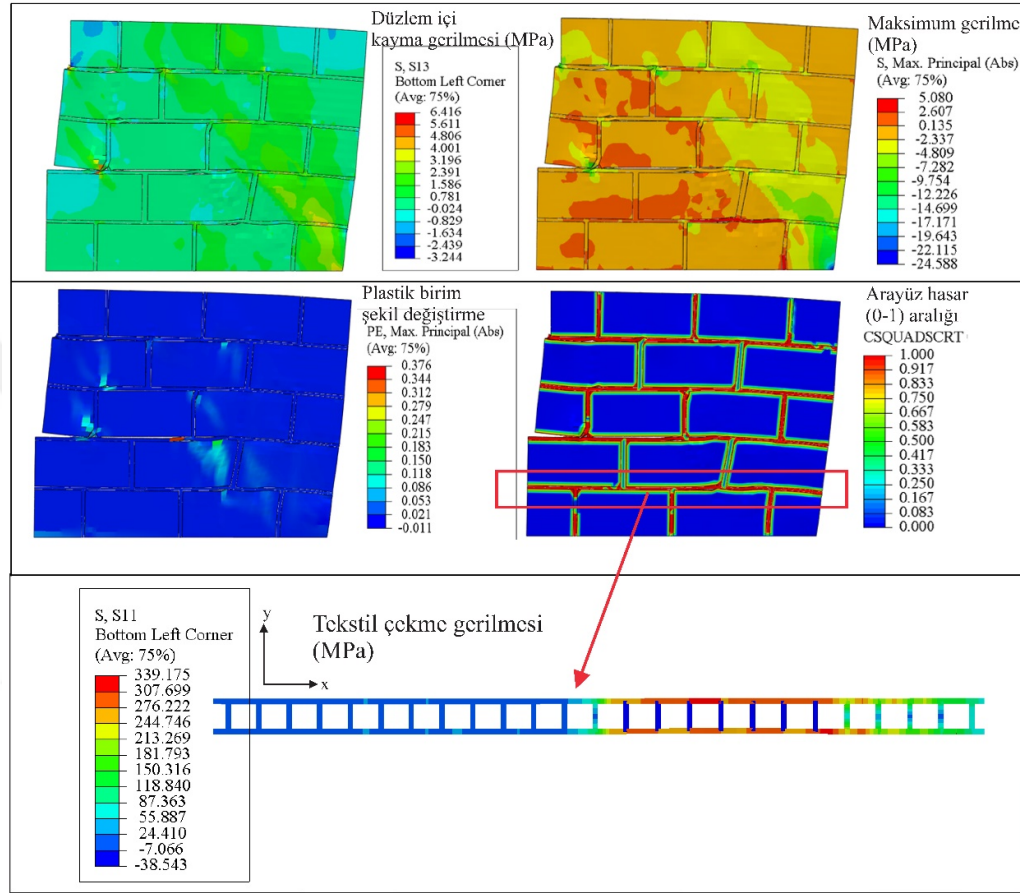
Şekil 4.14'te mavi renkte gösterilen harç modeli S-tip duvar harcını gösterirken, kırmızı ile gösterilen harç ECC3'tür. Harçlar 3 boyutlu katı eleman olarak modellenmiştir. BD06-N, BD02-N sonlu eleman modeliyle aynı şekilde oluşturulmuş olup, aynı malzeme özellikleri Abaqus programında tanımlanmıştır. BD06-N'nin modelinde alt sıra yatay derzde ECC3 harçla birlikte tek boyutlu çubuk (beam) eleman olarak bazalt tekstil malzemesi, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterildiği gibi programda tanımlanmıştır. İyileştirme harcı olarak kullanılan ECC3 ile beton blok birimlerin arayüzündeki rijitlik değerleri Denklem (2.4)'e göre, malzemelerin elastisite modülüne bağlı olarak hesaplanmıştır. Duvarın düzlem içi davranışı göz önüne alındığında mod I (açılma) rijitlik değeri 226.64 N/mm^3 ve mod II (kayma) rijitliği 94.44 N/mm^3 olarak bulunmuş ve Abaqus programında tanımlanmıştır. Şekil 4.14'te gösterilen modelin ağ (mesh) boyutu 19 mm olup, eleman sayısı 12008'dir. Modele 0.6 MPa eksenel ön basınç yüklemesi altında yatay yük etkililip, elde edilen yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 4.15'te gösterilmektedir.



Şekil 4.15 : Sonlu eleman modeli BD06-N'nin deney sonucu ile doğrulaması.

Şekil 4.15'te BD06 duvarına ait sonlu elemanlar analiz sonucunun deney sonucu ile örtüştüğü görülmektedir. Şekil 4.16'da BD06-N'ye ait gerilme dağılımı ve hasar durumu gösterilmektedir. Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen hasar tipi BD06 deney sonucu ile benzer olup, diyagonal (adım) kesme hasarı şeklindedir. Beton blok duvarın alt sıra yatay derzi boyunca tekstil takviyeli ECC3 harçla yapılan güçlendirme ile eğilme çatlağının bu yatay derzde ilerlemesi durdurulmuştur. Duvar derzinde eğilmeden kaynaklı başlayan çatlak, duvarın daha zayıf kaldığı noktalardan ilerleyerek diyagonal kesme hasarını oluşturmuştur. Şekil 4.16'da bazalt tekstil takviyesinin gerilme dağılımı (S11) gösterilmiştir. Bazalt tekstil ipliğinin çekme dayanımı 1600 MPa civarındadır (Şekil 4.9). Bu çalışmada tekstilde oluşan çekme

gerilmesi 320 MPa değerine ulaşmaktadır (Şekil 4.16). Bu durum, BD06 duvar deneyi ve sonlu eleman modelinde yatay derzde güçlendirme malzemesi olarak kullanılan bazalt tekstilin %20 kapasiteyle çalıştığını göstermektedir.



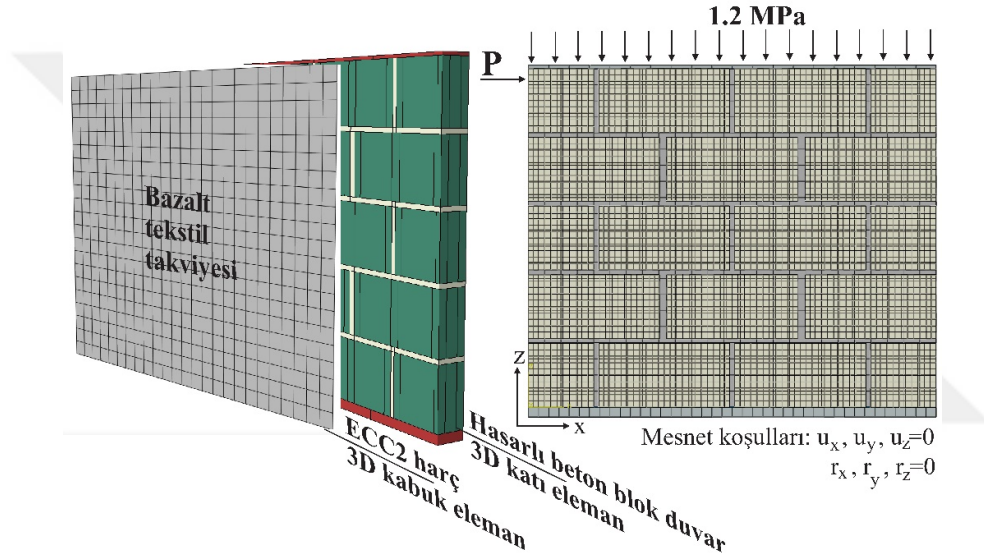
Şekil 4.16 : BD06-N'nin gerilme, plastik şekil değiştirme ve arayüz hasar sonuçları.

Şekil 4.16'da plastik birim şekil değiştirme duvar modelinin hasar durumu hakkında bilgi vermektedir. Bazalt tekstil takviyeli ECC3 kompozitle güçlendirilmiş duvar alt sıra yatay ve düşey derzlerin plastik şekil değiştirme değerleri ihmal edilecek kadar düşüktür. Duvar alt sıra yatay ve düşey derzlerde uygulanan güçlendirme sebebiyle hasarın, daha zayıf olan S-tip harcın kullanıldığı üst sıra derzlerde olduğu görülmektedir.

4.2.4 Yüzeylerine iyileştirme uygulanmış beton blok duvarın modellenmesi ve analiz sonucu

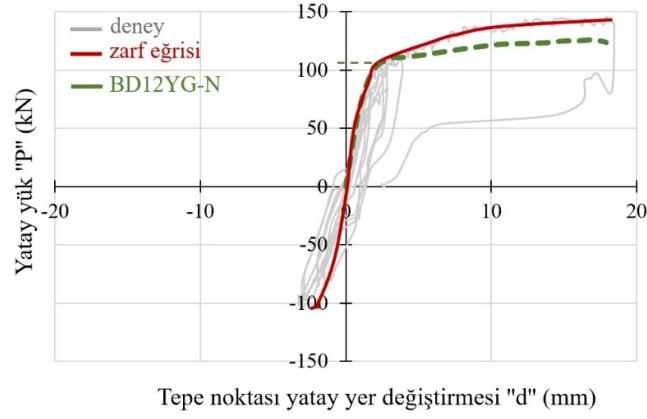
Diagonal (adım) kesme hasarına sahip beton blok duvarın yüzeylerine uygulanan tekstil takviyeli ECC2 kompozitle iyileştirme uygulaması bölüm 3.8.1'de ele

alınmıştır. İyileştirme uygulanmış hasarlı beton blok duvarın mikro modellemesi Şekil 4.17’de gösterilmektedir. Hasarlı beton blok duvarın malzeme özellikleri Şekil 4.8 ve Çizelge 4.2’ye göre Abaqus programında beton hasar plastisite modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Deneysel çalışmada olduğu gibi, sonlu eleman modelinde de ECC2 harç ve bazalt tekstil takviyesi hasarlı duvarın her iki yüzeyine uygulanmıştır. ECC2 harç 3 boyutlu (3D) kabuk (shell) eleman olarak modellenmiştir. Bazalt tekstil malzemesi ise donatı olarak ECC2 kabuk eleman içerisinde Şekil 4.9’da gösterilen dayanım özelliği ile tanımlanmıştır.



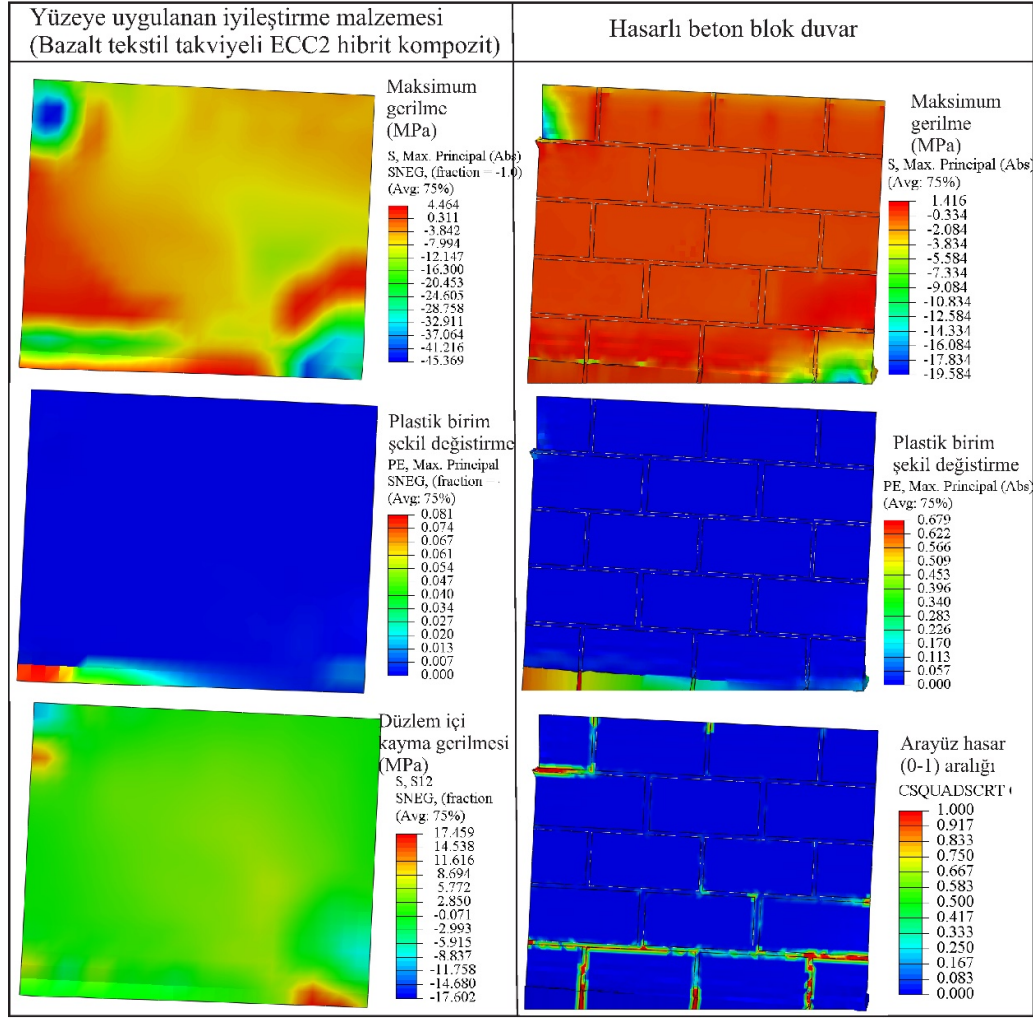
Şekil 4.17 : İyileştirme uygulanan hasarlı beton blok duvarın mikro modeli.

Şekil 4.17’de hasarlı beton blok duvarın yüzeylerine tam bağlı olarak modellenen kompozit iyileştirme malzemesinin ağ (mesh) aralığı 50 mm’dir. Modelde kullanılan toplam eleman sayısı ise 12908’dir. Yükleme iki adımda gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, eksenel ön basınç yükü 1.2 MPa değerine ulaşana kadar düşey yükleme uygulanmıştır. İkinci adımda, eksenel ön basınç 1.2 MPa değerinde sabit tutularak yatay yük yer değiştirme kontrollü olarak modelde tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme eğrisinin deney sonucu ile doğrulaması yapılmıştır (Şekil 4.18).



Şekil 4.18 : Sonlu eleman modeli BD12YG-N'nin deney sonucu ile doğrulaması.

Şekil 4.18'de BD12YG-N'nin deney sonucu ile uyumlu olduğu görülmektedir. İyileştirme uygulanan hasarlı duvarda yükün bir kısmının iyileştirme malzemesine aktarıldığı Şekil 4.19'da elde edilen gerilme dağılımından anlaşılmaktadır. İyileştirme malzemesi olarak kullanılan hibrit kompozit malzemede maksimum yükte oluşan basınç ve çekme gerilme dağılımları, beton blok duvarında oluşan gerilme değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. Duvar yüzeylerine uygulanan iyileştirme malzemesinin çekme gerilmesi 4 MPa değerlerindeyken, beton blok duvarda 1.5 MPa değerlerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.19 : BD12YG-N'nin gerilme, plastik şekil değiştirme ve arayüz hasar sonuçları.

Plastik şekil değiştirme duvarın hasar durumu hakkında bilgi vermektedir. Buna göre, Şekil 4.19'da plastik şekil değiştirmenin duvarın temelle birleşim bölgesinde olduğu görülmektedir. Kompozit malzeme hasarlı duvarı sararak duvarla birlikte çalışmış olup, duvarın yük taşıma kapasitesini arttırmıştır. Duvar alt sıra yatay derzde, beton blok birim ve harç arayüzünde hasar başlamış olup, yüzeye uygulanan kompozit iyileştirme malzemesi sebebiyle ilerleyememiş ve arayüzde açılma gözlenmemiştir. Ayrıca, BD12YG-N'nin hasar tipinin, Şekil 3.56'da BD12YG duvar numunesinin deney sonucunda oluşan hasar tipiyle uyduğu görülmektedir.

5. TRCC BİRİMLERİN VE BİRİMLERDEN OLUŞTURULAN BİR DUVAR FORMUNUN DENEYSEL ARAŞTIRMASI VE ANALİZLERİ

TRCC'lerin yapısal birim oluşturmada ve bu birimlerden oluşturulan duvar formu içerisindeki davranışları, yük aktarımı, dükilite ve hasar modu özellikleri incelenmiştir. Bunun için ilk aşamada, duvar formunu elde etmek için kullanılan birimin oluşturulması, mekanik davranışlarının deneysel ve nümerik çalışmalarla tanımlanması sağlanmıştır. Duvar formu oluşumunda kullanılacak birimlerin seçimi için farklı tipte tekstil malzemeleri ile oluşturulan birimlerle test ve analizler öncelikli olarak gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada, duvar formu elde edilip çevrimsel diyagonal basınç testi uygulanmıştır. Oluşturulan duvar formunun sünekliği ve hasar modları irdelenmiştir.

5.1 Silindirik Tüp Birimlerin Üretim ve Analiz Aşamaları

5.1.1 Kullanılan malzemeler ve özellikleri

TRCC'lerle silindirik tüp birimlerin üretiminde iki tip tekstil malzemesi kullanıldı. Bu malzemelerden biri çözgü ve atkılardan oluşan sürekli fiberlerin birbiri üzerinden ve altından geçerek oluşturduğu dokuma düzlem tipi PVA tekstildir. PVA tekstil, atkı ve çözgü mesafe aralıkları oldukça az, yoğun ve birbirine dik sürekli liflerden oluşmuştur. Diğer takviye malzemesi olarak kullanılan tekstil tipi, atkı, çözgü, atkı ve çözgülerin birbirine dik kesişen noktalarda bağlanarak ya da yapıştırılarak oluşturulan AR-glass tekstildir. AR-glass tekstil sürekli fiberlerin oluşturduğu bir ağ sistemdir. AR-glass ağ aralıkları, PVA dokuma türü tekstilin atkı ve çözgü aralıklarına göre daha fazla boşluğa sahiptir. Ağ aralıklarındaki mesafenin artması, harcın tekstil ağ aralığından rahat geçmesine olanak verirken, tekstili oluşturan sürekli fiberlerle de temas yüzeyinin artması ile bağ oluşumuna yardımcı olur. PVA ve AR-glass tekstil malzemeler kimyasal olarak inert malzemelerdir. Bu nedenle, portland çimento hamurunun yüksek alkali ortamına karşı dirençlidirler. Bu özellikler, yüksek gerilme mukavemeti ve sünekliği nedeniyle çok çeşitli yapısal uygulamalar için bir yapı

malzemesi olarak kullanılabilen TRCC'yi oluştururlar (Soranakom ve Mobasher, 2009).

Bu çalışmada kullanılan AR-glass tekstil takviye malzemesi her iki düzlem içi yönde 4 mm aralıklı ızgara sistemden oluşur. Kullanılan PVA tekstilin ağ boyutu neredeyse ihmal edilebilir düzeydedir. Bu sebeple, PVA tekstil, AR-glass tekstillere göre çok daha fazla akışkan (işlenebilir) harca ihtiyaç duyar. Çimento esaslı harç, imento, silis dumanı, ince agrega, süper akışkanlaştırıcı, köpük kesici ve polimerden oluşur. PVA tekstil ve AR-glass tekstil için basınç dayanımları aynı olacak şekilde, işlenebilirliği farklı iki harç karışımı Daşkiran (2018)'in tekstil malzemelerle kullanılacak imento esaslı harç çalışmalarından yola çıkarak seçilmiştir. Buna göre, AR-glass tekstil ve PVA tekstiller için kullanılan imento esaslı harçların her ikisi de yaklaşık %35 su/bağlayıcı (w/b) oranına ve %5 polimer tozu/bağlayıcı oranına sahiptir (Daskiran ve diğ., 2016). PVA tekstil için kullanılacak harçta işlenebilirlik, AR-glass tekstil için kullanılacak harca göre daha kritiktir. Bu nedenle, PVA tekstil ve AR-glass tekstil için kullanılan harçlarda sırasıyla, %95 ve %74 olmak üzere iki farklı bağlayıcı/agrega oranı kullanılmıştır. Matris malzemesinde kullanılan maksimum boyutlu agregalar ince taneli silis kumudur. Dolayısıyla, iki farklı bağlayıcı/agrega oranları arasındaki mekanik özelliklerdeki fark ihmal edilebilir düzeydedir.

Çizelge 5.1 : Silindirik tp birimlerde kullanılan harçlar (Daşkiran, 2018; Daskiran ve diğ., 2016).

Malzeme	AR-glass tekstil takviyeli harç karışımı (Ağırlıkça %)	PVA tekstil takviyeli harç karışımı (Ağırlıkça %)
Çimento	38	31
Silis dumanı	4	4.5
Uçucu kül	-	12.5
Silis kumu	56.8	50.8
Akışkanlaştırıcı	0.8	0.8
Köpük kesici	0.4	0.4

Çizelge 5.1 ile belirtilen harçlarda PVA tekstil için kullanılan harçta AR-glass tekstil için kullanılan harçtan farklı olarak çimentonun bir kısmı yerine uçucu kül kullanılmasıdır. Bu şekilde, PVA tekstille kullanılan harcın akışkanlığı ve işlenebilirliği arttırılmıştır. Bu çalışmada harçların mekanik zellikleri, Daşkiran

(2018)'in silindir basınç deney sonuçları baz alınarak devam edilmiştir. Bu sonuçlara göre, AR-glass tekstil malzemesi için kullanılan harcın ortalama basınç dayanımı 50.7 MPa iken, PVA tekstil için kullanılan harcın basınç dayanımı 47.5 MPa olarak kabul edilmiştir. Her iki harcın basınç dayanımları birbirine yakın değerde olduğu görülmektedir. Her iki harcın ortalama elastisite modülleri de birbirine yakın değerde olup, AR-glass tekstil malzemesinde kullanılan harç için 23298 MPa, PVA tekstil malzemesinde kullanılan harç için 24005 MPa olarak kabul edilmiştir.

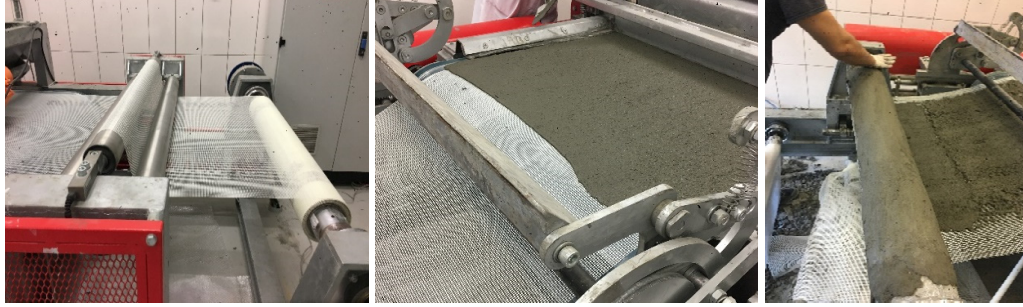
Kullanılan AR-glass tekstilin ağ göz açıklığı 4 mm ve iplik kalınlığı 0.16 mm, filament sayısı ise 400'dür. Daşkiran (2018)'e göre AR-glass tekstil malzemesinin çekme dayanımı 1250~1300 MPa, elastisite modülü 58760 MPa olarak bulunmuştur. Kullanılan PVA tekstil malzemesi tipi düz dokuma olup, kalınlığı 0.23 mm ve filament sayısı 200'dür. PVA tekstilin çekme dayanımı 920 MPa olup, elastisite modülü 36000 MPa olarak bulunmuştur.

5.1.2 Kompozit birimlerin PPR metoduyla üretim aşamaları

Duvar formunu oluşturmak için ilk olarak kompozit birimlerin üretimi gerçekleştirildi. Kompozit birimlerin formu silindirik tüp şekil olarak seçilmiştir. Bu form eğilme etkisinde uygun kompozit malzeme kullanıldığında yüksek şekil değiştirmeye sahip olarak sünek bir davranış göstereceği düşünülmüştür. Bunun için, içi dolu 15 cm çapa ve 100 cm uzunluğa sahip silindir kalıp kullanılmıştır.

İlk olarak, bir önceki bölümde Çizelge 5.1'de belirtilen AR-glass tekstil için belirtilen oranlardaki harç malzemeleri ve polimer tozu kuru halde 2 dk. kadar karıştırılmış ve sonra yavaşça su eklenerek karıştırılmaya devam edilmiştir. Su tamamen harca eklendikten sonra, 10 dk. kadar daha karıştırılarak harç 2 dk. dinlendirilmiştir. Daha sonra harç 5 dk. daha karıştırılıp, İstanbul Teknik Üniversitesi Kompozit Yapı Elemanları Laboratuvarında kompozit yapı elemanı üretim makinesinin harç haznesine yerleştirilerek vibratör uygulanmıştır. Kullanılacak tekstil malzemesi de makineye yerleştirilip, tekstilin makine üzerinde ilerlerken kıvrılma ve bollaşmanın olmayacağı şekilde germe uygulanmıştır. Tekstil malzemesi bant üzerinde ilerlerken harç haznesindeki harç tekstilin üzerine bırakılmıştır. Bant üzerinde ilerlemeye devam eden tekstilin üzerindeki harcın yayılmasını sağlayacak harç sıyırma mekanizmasından geçerek ilerleyen tekstil, çimeto esaslı harçla bütünleşerek dönen silindir kalıp üzerine istenilen tekstil tabaka sayısı kadar sarılarak işleme devam edilir.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de gösterildiği gibi bu çalışmada ağ aralıkları 4 mm olan AR-glass tekstil ve çimento esaslı harç, ve ihmal edilecek ağ aralığına sahip PVA tekstil ve daha akışkan olan çimento esaslı harç kullanılmıştır.



Şekil 5.1 : Silindir tüp form AR-glass TRCC üretim aşaması.



Şekil 5.2 : Silindir tüp form PVA TRCC üretim aşaması.

TRCC silindir tüpler, AR-glass TRCC’ler için 4 ve 6 tekstil kat sayılarından oluşurken, PVA TRCC’ler için 6 tekstil kat sayılarından oluşmaktadır. Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de gösterilen PPR üretim yöntemi istenilen tekstil kat sayısı için üretime olanak vermektedir. Numune tanımlamaları, tekstil takviyesini ve katman numarasını içerir. Bu numune kodlama sisteminde AR-glass takviyeli 4 katman, 6 katman ve PVA takviyeli 4 katman TRCC’ler için sırasıyla, ARG4L, ARG6L ve PVA4L olarak adlandırılmıştır.



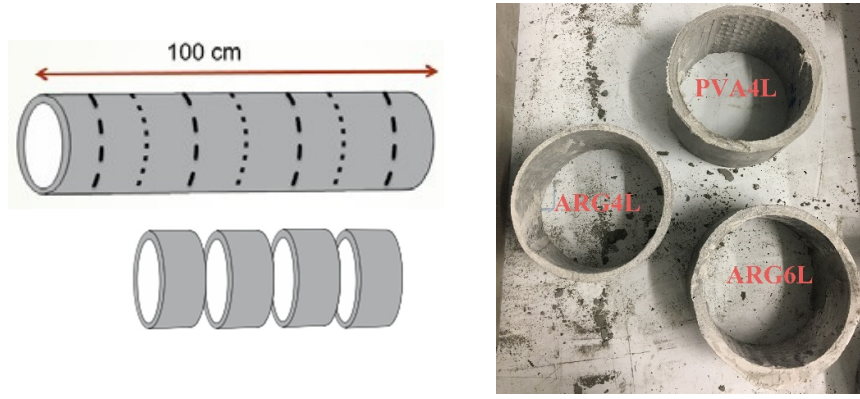
Şekil 5.3 : Üretilen silindir tüp TRCC'lerin kalıplanması.

PPR yöntemiyle yeni üretilen TRCC silindirler hava almayacak şekilde naylonla sarılarak kaplanıp, üzerine silindir çelik kalıp geçirilerek kalıpta 1 gün bekledi. Daha sonra silindirik çelik kalıp sökülerek, harç polimer modifiyeli çimento esaslı bir malzeme olduğundan üretilen silindir tüpler kürlenme havuzunda sadece 3 gün 20°C'de kürlenmeye bırakıldı. Üç gün sonunda, kürlenme havuzundan çıkarılan silindir tüp numunelere kuru kürlenme uygulanmaya devam edildi. 28 gün sonunda, Şekil 5.4 ile gösterilen 100 cm uzunluğundaki silindir tüp formlar elde edildi.



Şekil 5.4 : 100 cm uzunluğunda ARG4L, ARG6L ve PVA4L silindirik tüpler.

Şekil 5.4'te gösterilen 100 cm uzunluğunda ARG4L, ARG6L ve PVA4L silindirik tüpler 10 cm uzunluklarda kesilerek duvar formunu oluşturacak birimler elde edildi.



Şekil 5.5 : 10 cm uzunluğunda silindir tüp birimlerin elde edilmesi.

Şekil 5.5 ile gösterildiği şekilde 100 cm uzunluğundaki silindirler 10 cm aralıklarla işaretlenerek sulu kesim daire testere ile kesim yapıldı. Böylece silindirik tüp şeklindeki test numuneler 4 ve 6 tabakalı formlarda elde edildi. 4 kat AR-glass, 6 kat AR-glass ve 4 kat PVA tekstil takviyeli tüpler olarak üç tip TRCC numunesi oluşturuldu. Üretilen 10 cm uzunluktaki birim ARG4L, ARG6L ve PVA4L numunelerden her birinden 8'er adet numune üretilmiştir. Numunelerin her biri kullanılan numune sayısına göre ARG4L1/ARG4L2/ARG4L3/..., ARG6L1/ARG6L2/ARG6L3/... ve PVA4L1/PVA4L2/PVA4L3/... olarak adlandırılmıştır. Her bir tip numunelerin ortalama değerlerini ifade etmek için ARG4Lavg, ARG6Lavg ve PVA4Lavg kodlamaları kullanılmıştır.

Çizelge 5.2 : TRCC silindirik tüp birimlerin geometrik özellikleri.

Numune kodu	Uzunluk (mm)	Cidar kalınlığı "t" (mm)	Dış yarıçap "r _o " (mm)	Tekstil tabaka sayısı	Numune sayısı
ARG4Lavg	100	10	85	4	8
ARG6Lavg	100	18	93	6	8
PVA4Lavg	100	15	90	4	8

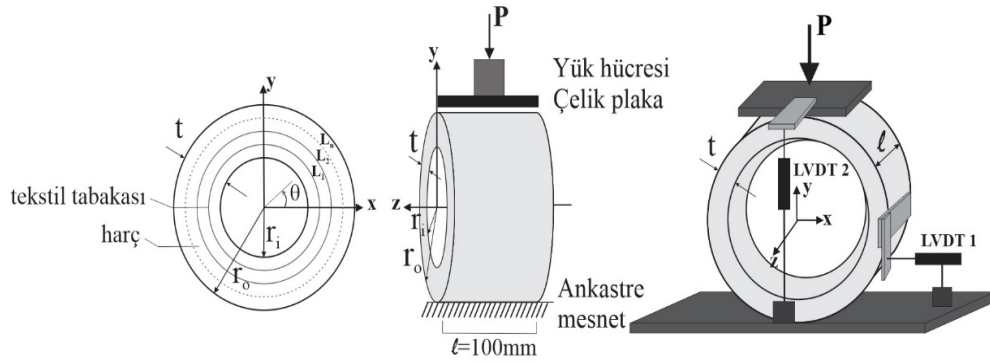
Çizelge 5.2'de elde edilen ARG4L, ARG6L ve PVA4L silindirik tüp birimlerin ortalama cidar kalınlıkları ve dış çap değerleri gösterilmiştir. Cidar kalınlıkları tekstil tabaka sayısına göre ve malzeme tipine göre farklılık göstermektedir. PVA4L'nin cidar kalınlığının ARG4L'nin cidar kalınlığından bir miktar fazla tercih edilmesinin sebebi, PVA tekstil malzemesinin ağ aralıklarının ihmal edilecek düzeyde az olması ve kullanılan harcın PVA tekstil ağ aralıklarına az nüfuz etmesiyle daha fazla harcın tekstil yüzeyinde kullanılmış olmasıdır.

5.1.3 Kompozit birimlere uygulanan test düzenekleri

Elde edilen silindirik tüp şeklindeki TRCC birimleri, monotonik basınç, monotonik çekme ve yarı çevrimsel basınç yükleme testleri uygulanmıştır. Böylelikle, mühendislik uygulamalarında silindirik tüp şeklindeki TRCC kompozitlerin kolay ve verimli bir şekilde kullanımı için veri elde edilmesi amaçlanmıştır. Numune kodlamalarının sonuna test kimlikleri de eklenmiştir. Bu bağlamda, MC, MT ve C sırasıyla monotonik basınç, monotonik çekme ve çevrimsel yüklemeleri tanımlar. Farklı yüklemelerin her biri için test kurulumu ve prosedürleri aşağıdaki bölümlerde açıklanmaktadır.

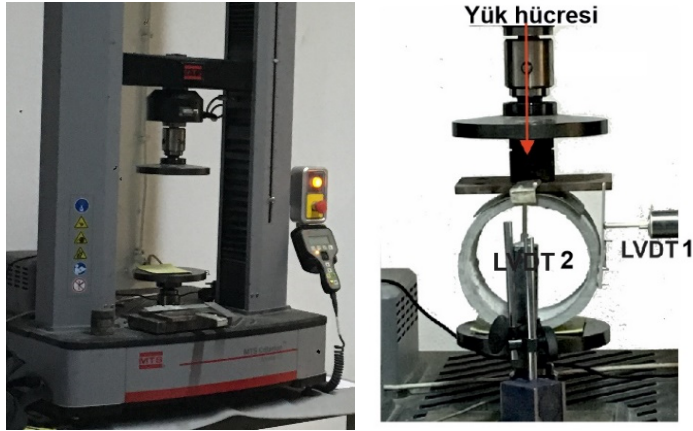
5.1.3.1 Monotonik yanal basınç test düzeneği

Test için ARG4L, ARG6L ve PVA4L silindirik tüp birimlerin her birinden 3'er adet kullanılmıştır. Şekil 5.6 ile TRCC silindirik tüp birimlerin genel oluşum formu ve deney kurulum şeması sunulmuştur. Monotonik basınç yüklemesi silindirik tüp numunelerin yanal eksenlerinden y-ekseninde uygulanmaktadır. Yükleme yönünde ve enine yönlerdeki toplam yer değiştirmeleri ölçmek için iki harici LVDT (yer değiştirme ölçer) kullanıldı.



Şekil 5.6 : TRCC silindir tüp numunelerin şekli ve deney kurulum şeması.

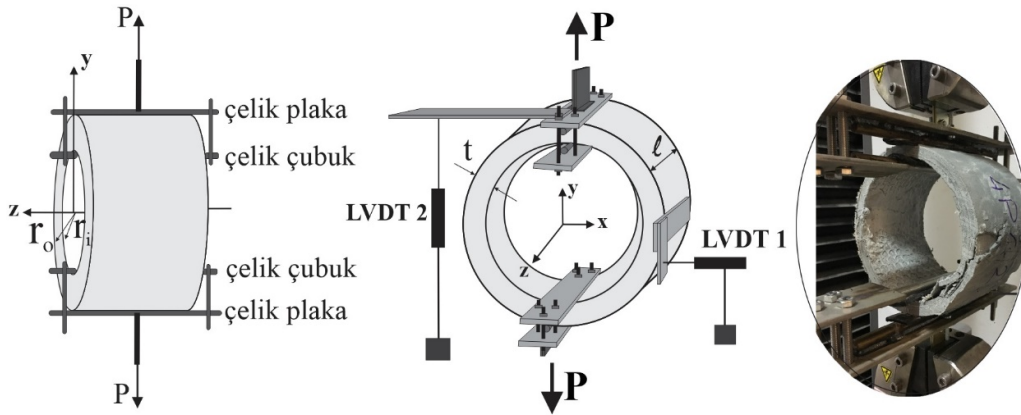
Testler 600 kN yük kapasiteli evrensel bir test makinesi (MTS C43) aracılığıyla gerçekleştirildi (Şekil 5.7). Fikstürler ve test aparatları numunelerin stabilite durumuna göre düzenlenmiştir. Testler yanal basınç yükleme hızı 5mm/dak. ve yer değiştirme kontrollü olarak uygulanmıştır. Yanal yükleme, monotonik yer değiştirme kontrollü olarak numunede göçme meydana gelene kadar arttırılarak uygulamaya devam edilmiştir.



Şekil 5.7 : Monotonik yanal basınç testi ve ölçüm düzeneği.

5.1.3.2 Monotonik yanal çekme test düzeneği

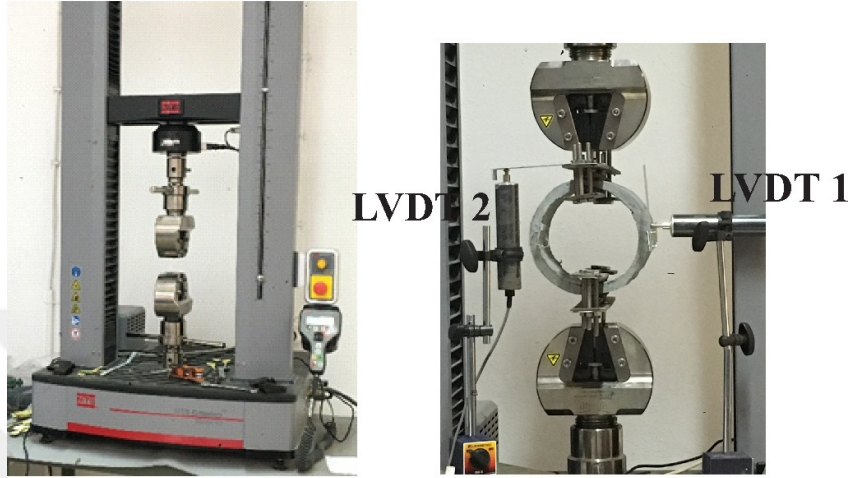
ARG4L, ARG6L ve PVA4L silindirik tüp numune tiplerinden her birinden 3'er adet olacak şekilde monotonik yanal çekme testi uygulanmıştır. Çekme testi için, Şekil 5.8'de gösterildiği gibi silindirik tüp numunelerin deney esnasında sabit ve kararlı durması için özel başlık aparatı uygulanmıştır. Özel başlık aparatının silindirle teması tüp cidarının her iki tarafında çelik çubuklarla olup, bu çelik çubuklar çelik plakaya kaynatılarak çelik plakalar vidalanıp çekme aparatına yerleştirilmiştir.



Şekil 5.8 : TRCC silindir tüp numunelerin yanal çekme deneyi kurulum şeması.

Testler monotonik yanal basınç testinde olduğu gibi 600 kN yük kapasiteli evrensel bir test makinesi (MTS C43)'de yer değiştirme kontrollü olarak yapılmıştır (Şekil 5.9). Yük, Şekil 5.8'de gösterildiği gibi y-ekseninde 5mm/dak. hızında hidrolik aktüatör ile uygulanmış ve bir yük hücresi tarafından yük değerleri kaydedilmiştir. Düşey (y-ekseni) ve yatay (x-ekseni) eksenlerdeki yer değiştirmeleri kaydetmek için iki adet 50 mm kapasiteli yer değiştirme ölçer (LVDT) kullanılmıştır (Şekil 5.9). Yükleme göçme

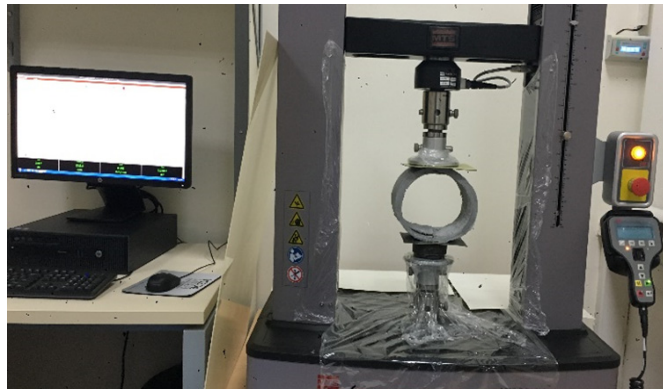
meydana gelene kadar monotonik olarak artan deplasmanlar şeklinde uygulanmıştır. Her bir yük artımında ölçülen değerler veri toplayıcı (Data Logger) ile bilgisayara aktarılmış ve özel bir bilgisayar programı kullanılarak kaydedilmiştir.



Şekil 5.9 : Monotonik yanal çekme testi ve ölçüm düzeneği.

5.1.3.3 Yarı çevrimsel yanal basınç test düzeneği

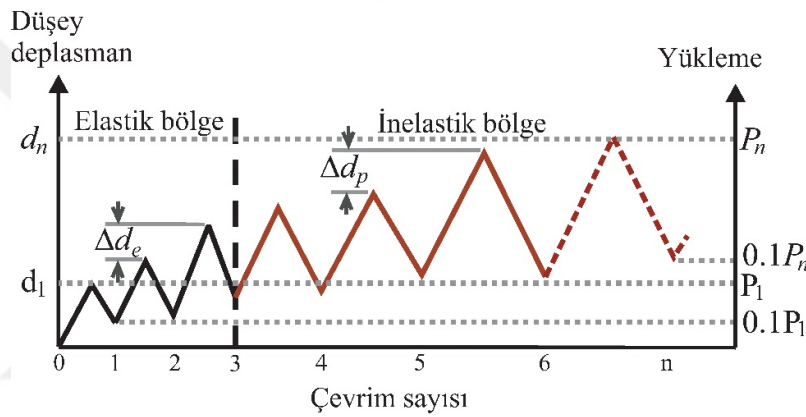
Yarı çevrimsel testler, TRCC silindirik tüp birimlere yükleme ve boşaltma sıralarına bağlı olarak hem yer değiştirme, hem de kuvvet kontrol prosedürleri altında, 10 kN yük kapasiteli evrensel bir hidrolik test makinesinde (MTS C43.104) gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.10).



Şekil 5.10 : Yarı çevrimsel yanal basınç testi ve ölçüm düzeneği.

Çevrimsel yükleme testleri, ARG4L, ARG6L ve PVA4L silindirik tüp birimlerin her birinden 2'şer adet numuneye yaklaşık 15 çevrimsel yükleme boşaltma uygulanacak şekilde tasarlanmıştır. Monotonik yanal basınç, çekme testlerinde olduğu gibi hidrolik test makine yükleme başlığı hızının 5 mm/dk. olup, bunun ARG4L, ARG6L ve

PVA4L silindirik tüp birimlerde formları ve cidar kalınlıkları itibarıyla tekabül eden yükleme hızlarının karşılığı sırasıyla, 1.2×10^{-4} , 1.8×10^{-4} ve 1.6×10^{-4} 'dür. Çevrimsel yükleme testinde yalnızca yanal basınç yükleme ve boşaltması uygulandığından yarı çevrimsel olarak adlandırılmıştır. Şekil 5.11'de görüldüğü gibi numuneler y-ekseninde düşey yer değiştirmenin öngörülen bir değerine kadar arttırılıp, y-ekseni (düşey yönde) yanal olarak yüklendi. Yüklemenin ardından, yükleme yönündeki yanal yer değiştirme bir önceki tepe noktası değerinin %10'una düşürülerek boşaltıldı. Sonraki çevrimde ise, bir önceki çevrimde maksimum yer değiştirmeye, öngörülen yer değiştirme adımı eklenerek bir sonraki çevrim için amaçlanan yer değiştirme değeri hesaplandı.



Şekil 5.11 : Elastik bölge (Δd_e) ve inelastik bölge (Δd_p) için öngörülen yer değiştirme adımlarına sahip çevrimsel yük şeması.

Yer değiştirme genliği elastik rejimde kalması beklenen ilk 3 çevrimden sonra değiştirildi. Yükleme aşamaları için ilk öngörülen yer değiştirme değerleri ARG4L, ARG6L ve PVA4L için sırasıyla 0.3, 0.3 ve 0.4 mm'dir. Bu değerler Şekil 5.11'de Δd_e olarak tanımlanmıştır. Elastik bölgeden sonra, ikinci yer değiştirme adımı (Δd_p) olarak ARG4L, ARG6L ve PVA4L için sırasıyla, 3.0, 1.5 ve 6 mm'e yükseltildi. ARG4L, ARG6L ve PVA4L için çevrimsel yüklemelerdeki yer değiştirme adımları, monotonik yanal basınç testlerden elde edilen maksimum yer değiştirme kapasitelerine bağlı olarak belirlendi. Yarı çevrimsel yanal basınç testi, nihai yer değiştirme değerine ulaşana kadar devam etti.

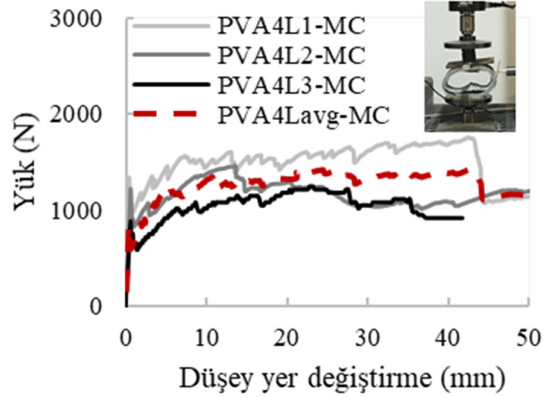
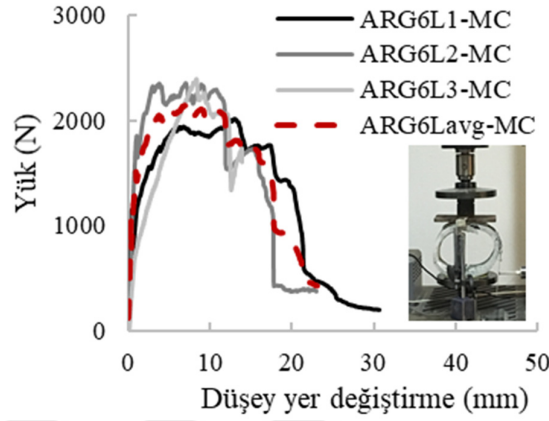
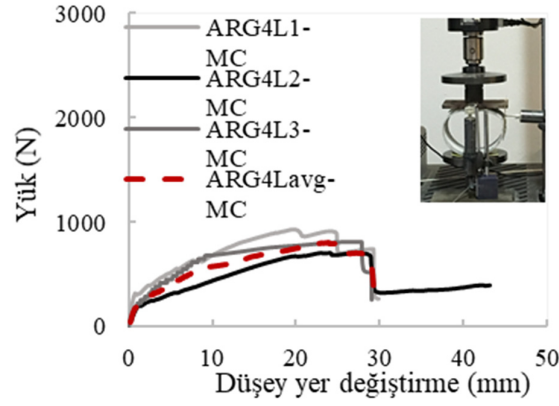
5.1.4 Kompozit birimlere uygulanan testler

TRCC silindirik tüp birimlere uygulanan testler sonucunda, birimlerin yanal basınç ve çekme yükleri altında mekanik davranışı, hasar analizi, düktilitesi ve enerji yutma kapasiteleri tanımlanmıştır. Duvar formunu oluşturmada kullanılacak birim için bir ön

analiz yapılmıştır. Duvar formunu oluşturmada kullanılacak birimin sünek davranış göstermesi, yüksek yer değiştirme ve enerji yutma kapasitesine sahip olması beklenmektedir.

5.1.4.1 Monotonik yanal basınç testi

Monotonik yanal basınç testleri sonucunda ARG4L, ARG6L ve PVA4L silindirik tüp birim numuneler için yük-düşey yer değiştirme davranışları Şekil 5.12 ile verilmiştir. ARG4L, ARG6L ve PVA4L numune tipleri için her birinden 3'er adet olmak üzere monotonik yanal basınç test sonuçları elde edilmiştir. Her bir tip için, üç numunenin aynı yer değiştirme değerlerinden okunan yük değerlerinin ortalaması alınarak ARG4Lavg, ARG6Lavg ve PVA4Lavg değerleri elde edildi.



Şekil 5.12 : Monotonik yanal basınç yükü altında ARG4L, ARG6L ve PVA4L silindirik tüp birimlerin yük (N)- düşey yer değiştirme (mm) eğrileri.

Şekil 5.12’den de görüleceği üzere ARG4L, ARG6L ve PVA4L numune tipleri için testleri yapılan her bir üç numune sonuçları benzer ve tutarlı elde edilmiştir. Her bir tip için elde edilen üç numune arasındaki küçük farklar, üretim esnasında numune cidar kalınlıklarındaki ufak değişimlerden kaynaklanmaktadır.

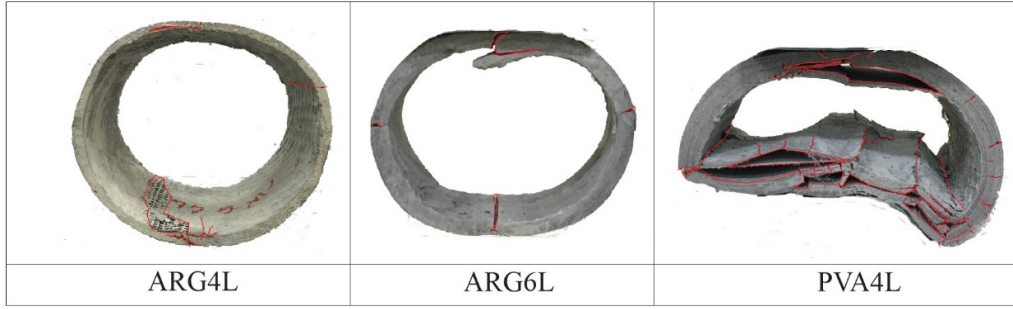
Malzeme tipi, tekstil tabaka sayısı göz önüne alınmaksızın, genel olarak TRCC silindirik tüp birimlerin monotonik yanal basınç altındaki davranışlarının oldukça

sünek olduğu görülmektedir (Şekil 5.12). Elastik bölgenin oldukça küçük olduğu ve genel olarak davranışın plastik bölgede olduğu gözlemlenmiştir. Bu test sonuçlarında eğilme sınır noktası (BOP), matristeki ilk elastik rejimin sona erdiği veya matriste oluşan çatlakların başlangıç noktasına karşılık geldiğini ifade etmektedir (Çizelge 5.3). Tüm numuneler için, BOP değerine ulaşıldıktan sonra maksimum yük değerine kadar pekleşme görülmektedir. TRCC silindirik tüp birimlerde kullanılan farklı malzeme ve tekstil tabaka sayısındaki farklılık, test sonuçlarındaki ulaşılan maksimum yükü ve hasar tipini etkilemiştir.

Çizelge 5.3 : Monotonik yanal basınç test sonucu numunelerin yük taşıma kapasiteleri ve düktilitesi.

Numune	P_{BOP} (N) BOP'deki yük değeri	d_{BOP} (mm) P_{BOP} 'deki yer değiştirme değeri	P_{maks} (N) maksimum yük değeri	d_{maks} (mm) P_{maks} 'daki yer değiştirme değeri	P_f (N) göçme yükü ($P_f=0.85P_{maks}$)	d_u (mm) P_f 'deki yer değiştirme değeri	Düktilite $\mu_{0.85}$ ($\mu_{0.85}=d_u/d_{BOP}$)
ARG4 Lavg- MC	222.70	1.05	801.00	24.29	680.85	26.10	24.95
ARG6 Lavg- MC	1446.80	0.91	2148.94	10.73	1826.60	12.23	13.44
PVA4L avg- MC	758.62	0.65	1406.89	42.54	1195.86	44.44	68.36

Numunelerdeki tekstil malzemesi ve tabaka sayısı harçta çatlak oluşumu ve ilerlemesini engeller. Tekstil katman sayısı çatlak köprüleme mekanizmasını kısıtlar. Bu nedenle, katman sayısı çatlak ilerleme bölgesinin (fracture process zone veya FPZ) derinliği/uzunluğu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. ARG4L numunelerindeki hemen hemen tüm katmanların farklı kritik moment kesitlerinde eş zamanlı olarak kırılma/kopma meydana gelir (Şekil 5.13). Monotonik yanal basınç yüklemesindeki önemli yük düşüşleri (nihai yükün % 85'i) numunelerin göçme hasarına karşılık gelir. PVA4L numunelerin diğer tip numunelerden en büyük farkı maksimum yer değiştirme kapasiteleridir. PVA tekstiller AR-glass tekstillere kıyasla daha düktil davranış gösterir. Bu nedenle, PVA tekstil takviyeli silindirik tüp birimlerin mekanik davranışı AR-glass takviyeli tüp birimlere göre önemli ölçüde değişiklik gösterir.



Şekil 5.13 : Düşey yönde yanal basınca maruz TRCC numunelerin hasar modları.

Polimerik çimento esaslı harçların çekme dayanımları, basınç dayanımlarına kıyasla çok düşük olup, 2.5~5 MPa aralığındadır (İsmail ve diğ., 2011). Böylece, düşey ekseninde yanal basınç yüküne maruz tüp forumdaki TRCC numunelerinin moment taşıyan kesitlerinde oluşan çekme kuvvetleri ilk olarak harçta çatlak başlamasına sebep olur. PVA4L numunelerde PVA tekstillerin ağ aralıklarının ihmal edilecek kadar az olması nedeniyle radyal yöndeki çatlaklar ilerleyemez. Bu nedenle, Şekil 5.12’de yük-yer değiştirme eğrilerine bakıldığında PVA4L numuneler ARG4L numunelere göre daha fazla plastisite özellik gösterdiği görülür. PVA4L numunelerdeki hasar, tabakalaşma şeklinde PVA tekstil tabakasının harçtan ayrışması şeklinde oluşmaktadır (Şekil 5.13). PVA4L numunelerde çatlakların genişliği kademeli olarak büyür, ve bu durum, daha fazla enerji absorbe ederek PVA4L tüp birimde enerji dağılımını artırır.

ARG6L, PVA4L’den daha kırılgan (gevrek) davranış gösterir. Bu durum, tekstil malzeme özelliğiyle ilişkilendirilebilir. Ayrıca, ARG6L’de cidar kalınlık etkisi de önemli rol oynamaktadır. Cidar kalınlığı azaldıkça, düşey yönde etkili yanal basınç kuvveti etkisinde silindirik tüpte momentin olduğu kesitlerdeki (radyal yöndeki kesitler) çekme ve basınç kuvvetlerinin dağılımıda artmaktadır. Son olarak, tekstilin kopması maksimum yükü belirlemede etkili olmaktadır.

Şekil 1.4’deki grafikte tanımlandığı gibi, hasar mekanizmaları 4 fazda açıklanabilir. Tüm numuneler önemli yer değiştirme kapasitesine sahiptir. Bu nedenle, faz II uzun iken, faz I oldukça kısadır. Harçta uzunlamasına (boyuna) çatlaklar meydana geldi. Başlangıç çatlaklar TRCC tüp birimlerin dış yüzeyinde meydana gelip, iç yüzeyine doğru ilerledi. Harçta çoklu çatlakların oluşmasından sonra faz III başladı. Faz III’de bir miktar sertleşme görüldü. TRCC tüp birimler yük taşıma kapasitelerine ulaştıklarında ise göçme meydana geldi. ARG4L ve ARG6L’de tekstil malzemesinin kopmasıyla yükde ani düşme ve göçme meydana gelirken, PVA4L numunelerde tabakalaşma ve tamamen tekstil-harç tabakasının birbirinden ayrışması şeklinde hasar

meydana geldiği gözlemlendi (Şekil 5.13). PVA4L numunelerinde çevresel yönde başlayan çatlaklar nedeniyle tekstil ve harç arayüz bağlarının açılmasıyla göçme meydana gelmiştir. Buradaki eğilme çatlağı, yükleme devam ettikçe genişlemiş ve malzeme tipi, geometri ile ilişkili delaminasyonla sonuçlanan arayüz kayma gerilmelerini tetiklemiştir.

ARG6L numunelerinde çoklu başlangıç çatlakları dışında, dış yüzeyde tüp formu çevresinin $\theta=0^\circ$, $\theta=90^\circ$, $\theta=180^\circ$ ve $\theta=270^\circ$ açılarında lokalize ana eğilme çatlakları oluşmuştur. Faz II’de ana çatlaklar radyal yönde numunelerin iç yüzeyine yayılmıştır. AR-glass tekstilin kopmasıyla ani yük düşüşü ile göçme meydana gelmiştir (Şekil 5.14).

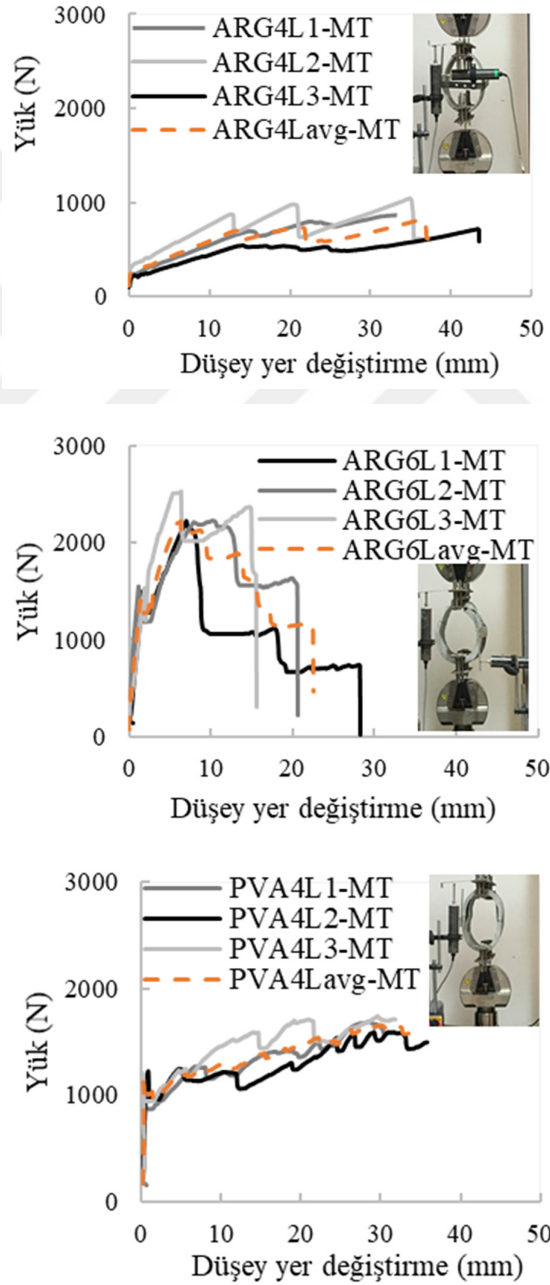


Şekil 5.14 : ARG6L numunelerde AR-glass tekstilin kopması.

5.1.4.2 Monotonik yanal çekme testi

ARG4L, ARG6L ve PVA4L numune tiplerinden her biri için 3’er adet numunelere monotonik düşey ekseninde yanal çekme testi uygulanmıştır. Test sonucunda her bir numuneden ve her tip numunelerden elde edilen ortalama yük-düşey yer değiştirme eğrileri Şekil 5.15 ile verilmektedir. ARG4L numunelerin düşey ekseninde yanal çekme yüküne karşılık gelen yer değiştirme tepkisi, Şekil 5.12’de gösterilen yanal basınç yüküne karşılık gelen yer değiştirme tepkisiyle çok benzer olduğu görülmektedir. ARG4L ve PVA4L numunelerde ARG6L numunelere göre daha yüksek sünek davranış gözlemlenmiştir. ARG6L numunelerde tekstil malzemesinin cam elyaflardan oluşması, tekstil tabaka sayısının ve cidar kalınlığının yüksek olması gibi faktörler, ARG6L numunelerinin maksimum yük taşıma kapasitesine ARG4L ve PVA4L numunelerine göre daha düşük deplasmanlarda ulaşmasında etkili olmuştur. ARG6L numunelerinde maksimum yük taşıma kapasitelerine ulaştıktan sonra tekstilin de

kopmasıyla ani yük düşüşleri görülmüştür (Şekil 5.15). ARG4L ve PVA4L numunelerinde eğilme sınır noktasında (BOP) ilk harç çatlağı görüldükten sonra, harçta çoklu çatlaklar görülüp tüp birimde bir miktar daha sertleşme görülmeye devam edilmiştir. ARG4L’de tekstil tabaka sayısı ARG6L numunelerine göre daha az olduğundan ARG4L numuneleri ARG6L numunelerine göre yaklaşık 2 kat daha düktil davranış göstermiştir (Çizelge 5.4).

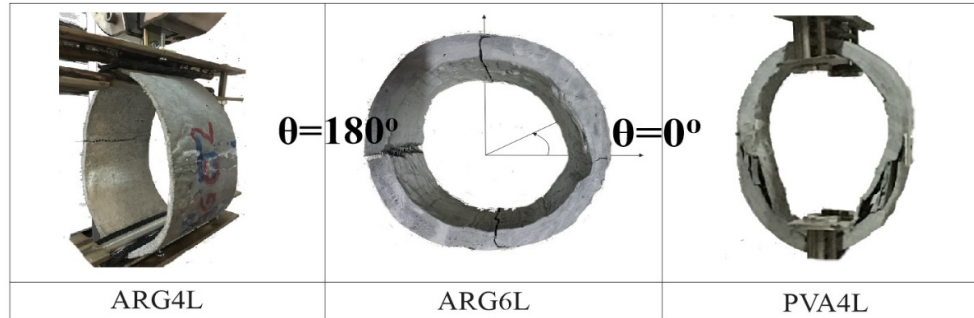


Şekil 5.15 : Monotonik yanal çekme yükü altında ARG4L, ARG6L ve PVA4L silindirik tüp birimlerin yük (N)- düşey yer değiştirme (mm) eğrileri.

Çizelge 5.4'te AR-glass tekstil takviyeli TRCC tüp birimlerin tekstil katman sayısı 4'den 6'ya artırıldığında, yük taşıma kapasitelerininde 3 kat arttığı, göçme yükündeki yer değiştirme değerlerinin de yarıya düştüğü görülmüştür. PVA4L'nin duktilitesi 70.31 değerlerine ulaşmıştır (Çizelge 5.4). PVA4L numunelerindeki yüksek duktilitenin sebebi ise, PVA tekstil malzemesinin boşluksuz ve sık örgü yapısında olması ile tabakaların ayrışması şeklinde göçmenin görülmesidir. PVA4L numunelerde tekstil malzemesinde kopma görülmemiştir (Şekil 5.16).

Çizelge 5.4 : Monotonik yanal çekme test sonucu numunelerin yük taşıma kapasiteleri ve duktilitesi.

Numune	P_{BOP} (N) BOP'deki yük değeri	d_{BOP} (mm) P_{BOP} 'deki yer değiştirme değeri	P_{maks} (N) maksimum yük değeri	d_{maks} (mm) P_{maks} 'daki yer değiştirme değeri	P_f (N) göçme yükü ($P_f=0.85P_{maks}$)	d_u (mm) P_f 'deki yer değiştirme değeri	Duktilite $\mu_{0.85}$ ($\mu_{0.85}=d_u/d_{BOP}$)
ARG4 Lavg- MT	234.15	1.05	737.00	21.22	626.45	22.33	21.35
ARG6 Lavg- MT	1269.44	1.25	2202.77	8.82	1872.35	14.03	11.23
PVA4L avg- MT	1072.54	0.64	1650.17	29.78	1402.64	45.00	70.31



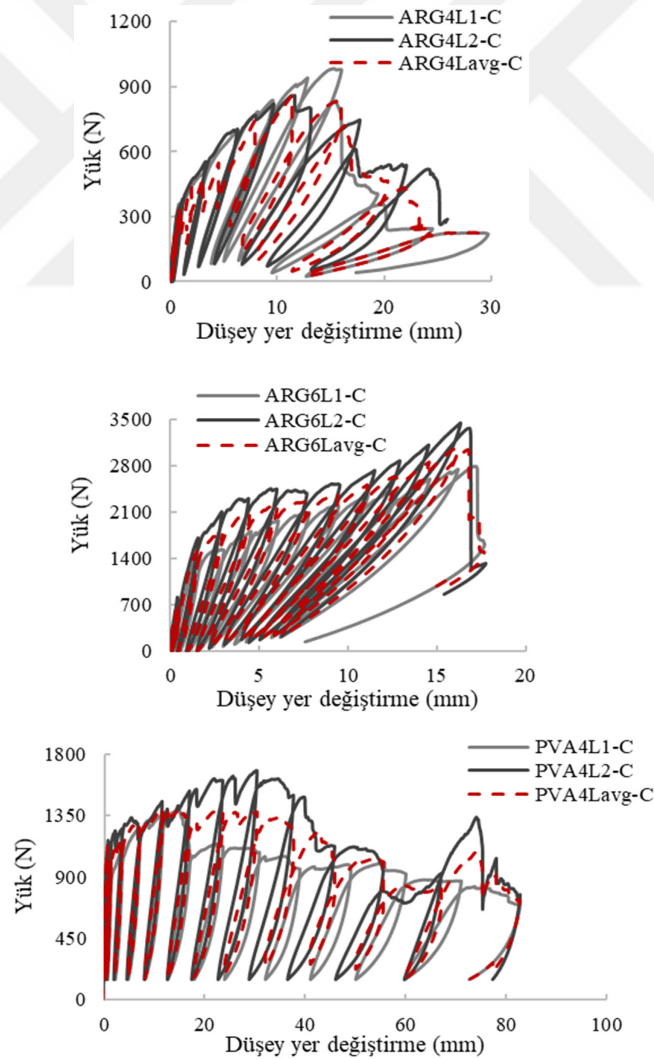
Şekil 5.16 : Düşey yönde yanal çekmeye maruz TRCC numunelerin hasar modları.

ARG4L, ARG6L ve PVA4L silindirik tüp birimler için düşey yönde yanal çekme yükleri altında oluşan hasar tipleri, monotonik yanal basınç yüklemede görülen hasar tipleriyle benzerdir. PVA4L numunelerde tekstil tabakaların birbirinden ayrışması, tabakalar arası kayma bağ dayanımının aşılması ile meydana gelirken; ARG4L ve ARG6L numunelerinde harcın çekme dayanımının basınç dayanımına göre daha düşük olması sebebiyle, tüp birimin radyal kesitlerinde çekme gerilmelerinin harcın çekme dayanımını aştığı noktalarda hasar oluşmaya başlar (Şekil 5.16). Özellikle,

düşey yönde monotonik çekme yüküne maruz ARG6L numunelerde $\theta=0^\circ$ ve $\theta=180^\circ$ açılarda tüp birimin iç bölgeleri yoğun çekme bölgeleri olduğundan, harçta meydana gelen ilk çatlamlar bu bölgelerde başlamış ve tüp birimin dış yüzeyine doğru ilerlemiştir (Şekil 5.16).

5.1.4.3 Yarı çevrimsel yanal basınç testi

Düşey yönde yanal çevrimsel basınç yükü altında silindirik tüp şeklindeki TRCC birimlerinin yük-düşey yer değiştirme eğrileri Şekil 5.17 ile verilmektedir. Yanal çevrimsel basınç yüklemesinde, ARG4L, ARG6L ve PVA4L numunelerinin her biri için yük boşaltma ve tekrar yükleme sabit bir yer değiştirme genliğinde, göçme meydana gelene kadar uygulandı.



Şekil 5.17 : Düşey ekseninde çevrimsel yanal basınç yükü altında ARG4L, ARG6L ve PVA4L silindirik tüp birimlerin yük (N)- düşey yer değiştirme (mm) eğrileri.

ARG4L, ARG6L ve PVA4L numunelerinin her birinin yükleme boşaltma eğrileri birbiriyle çakışmadığı gibi, başlangıç yükleme eğrisine de paralel devam etmemektedir. Numunelerdeki hasar çevrimsel yüklemelerden görülebilmektedir. Çevrimsel yüklemelerde her çevrimde başlangıç rijitliğine göre rijitlikteki düşüş, numunelerde hasar oluşumuna işaret etmektedir. ARG4Lavg, ARG6Lavg ve PVA4Lavg, numunelerin aynı yer değiştirme değerlerine karşılık gelen ortalama yük değerlerinden elde edilmiştir. Şekil 5.17’de TRCC tüp birimlerin elastik şekil değiştirmelerinin oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Çizelge 5.5’te çevrimsel yanal basınç yüklemesinden elde edilen yük taşıma kapasitesi ve düktilite özellikleri gösterilmiştir. Çizelge 5.5’e göre PVA4Lavg’nin eğilme sınır noktasındaki (BOP) düşey yer değiştirme değeri ARG4Lavg ve ARG6Lavg’nin yer değiştirme değerlerinden oldukça düşüktür. Bu durum, PVA4L numunelerinin elastik bölgede yer değiştirme kapasitelerinin ARG4L ve ARG6L numunelerinin yer değiştirme kapasitelerinden düşük olduğunu gösterirken, Şekil 5.17 ve Çizelge 5.5’ten PVA4L numunelerin maksimum yer değiştirme kapasiteleri, ARG4L ve ARG6L numunelerinin 2.5 katı değerinde olduğunu göstermektedir. ARG6L numunelerde göçmeden önce şekil değiştirme sertleşmesi görülüp, yük maksimum değere ulaştıktan sonra ARG4L ve PVA4L numunelerin aksine ani kırılma ve yük düşüşü gözlemlendi. Tekstil tabaka sayısının ve birim cidar kalınlıklarının artması yük taşıma kapasitesini arttırmasına rağmen, ani kırılmaya da sebep olmaktadır. Ani kırılmada bir diğer faktör de tekstil dokusudur. Tekstil dokusu ağ şeklinde ve sürekli fiberler arası boşluklar fazlaysa, çekmeye maruz kesitte tekstilde kopma meydana gelmesine ve ani yük düşüşüne sebep olmaktadır.

ARG4L, ARG6L ve PVA4L numuneleri için elde edilen plastik bölgedeki yer değiştirme değeri ve enerji yutma kapasiteleri aslında numunelerin düktilitesi hakkında da fikir vermektedir. Çizelge 5.5 ile gösterilen göçme yüküne (P_f) karşılık gelen düşey yer değiştirme değeri, maksimum yer değiştirme değeri olarak tanımlanır. Düktilite katsayısı μ ise, maksimum yer değiştirmenin elastik bölgenin sonundaki yer değiştirmeye oranı olarak elde edilir. Çizelge 5.5’de hesaplandığı gibi, numunelerin düktilite katsayısı, tüp birim cidar kalınlığı ve tekstil katman sayısı arttıkça azalır. PVA4L’nin düktilite katsayısının ARG4L’nin 3 katına, ARG6L’nin 5 katına tekabül ettiği görülmektedir. Test sonuçlarına göre, harç ve tekstil malzemesinin özellikleri,

TRCC tüp birimlerin tekstil katman sayısı ve geometrisinin, numunelerin yük taşıma kapasitesini ve düktilitesini etkilediği gözlemlenmiştir.

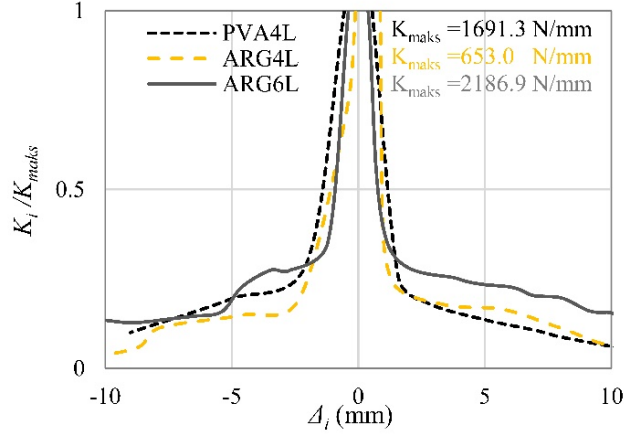
Çizelge 5.5 : Çevrimsel yanal basınç test sonucu numunelerin yük taşıma kapasiteleri ve düktilitesi.

Numune	P_{BOP} (N) BOP'deki yük değeri	d_{BOP} (mm) P_{BOP} 'deki yer değiştirme değeri	P_{maks} (N) maksimum yük değeri	d_{maks} (mm) P_{maks} 'daki yer değiştirme değeri	P_f (N) göçme yükü ($P_f=0.85P_{maks}$)	d_u (mm) P_f 'deki yer değiştirme değeri	Düktilite $\mu_{0.85}$ ($\mu_{0.85}=d_u/d_{BOP}$)
ARG4	229.92	1.05	850.00	15.90	722.50	16.57	15.84
Lavg-C							
ARG6	1404.26	1.18	3021.28	16.07	2568.09	16.80	14.23
Lavg-C							
PVA4	917.12	0.64	1431.19	29.80	1216.51	42.71	66.73
Lavg-C							

ARG4L, ARG6L ve PVA4L birimlerin rijitlik azalmaları Şekil 5.18 ile her çevrimsel yükleme ve boşaltma sisteminin sekant değerleri hesaplanarak elde edildi. Dolayısıyla bu yöntemle göre, hem yükleme hem de yük boşaltma aşamaları için rijitlik değerlerini hesaplamada Denklem (5.1) kullanıldı.

$$K_i = (P_{i+} - P_{i-}) / (d_{i+} - d_{i-}) \quad (5.1)$$

Denklem (5.1)'de kullanılan K_i , i numaralı çevrimde numunenin rijitlik değerini; P , yükü; ve d , düşey yer değiştirme değerlerini temsil eder. Ayrıca, Denklem (5.1)'de yük ve düşey yer değiştirme değerlerinde alt simge olarak kullanılan “i+” ve “i-”, yükleme ve boşaltma yolları üzerindeki sırasıyla yerel maksimum ve yerel minimum yük ve düşey yer değiştirme değerlerine karşılık gelir. Şekil 5.18'de numunelerin elastik bölgedeki başlangıç rijitliklerine normalize edilmiş çevrimler arası rijitlik sapmaları gösterilmiştir.



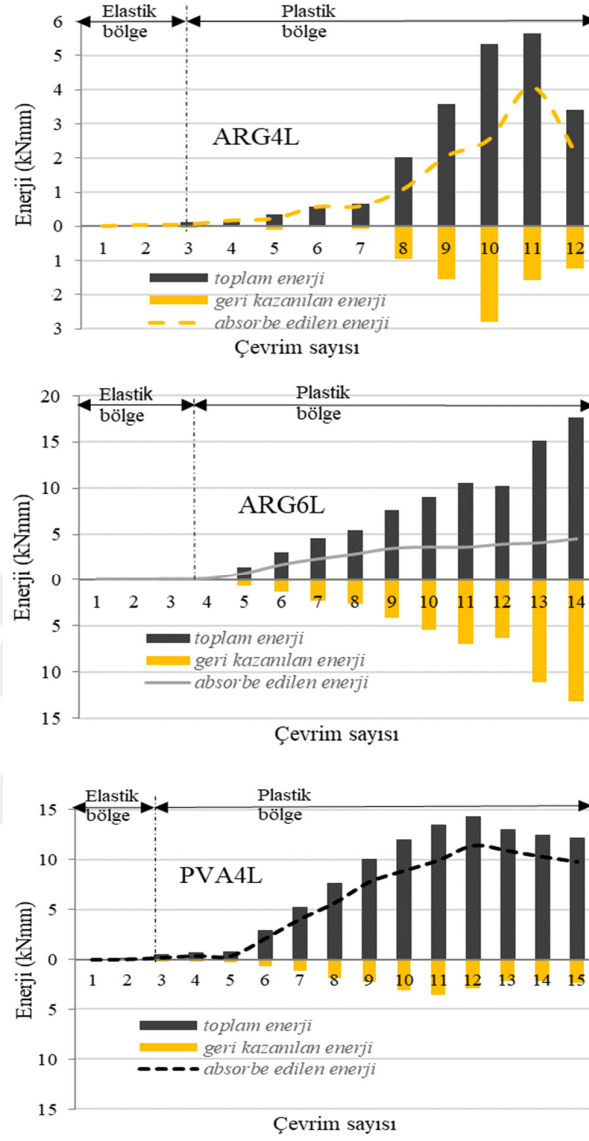
Şekil 5.18 : Düşey yönde çevrimsel yanal basınç yüklemesi boyunca TRCC tüp birimlerde normalize edilmiş rijitlik azalması.

Şekil 5.17’de birim numunelerdeki çevrimsel yükleme-boşaltma eğrilerinde tüm numuneler için yeniden yükleme eğrileri, boşaltma eğrisi ile kesişim noktasına kadar neredeyse doğrusal davranış göstermektedir. Doğrusal olmayan davranış bu kesişme noktasından sonra başladığı görülür. ARG6L’nin başlangıç rijitliği ARG4L’dan %61 ve PVA4L’dan %3 daha yüksektir (Şekil 5.18). Burada, tekstil katman sayısı daha yüksek başlangıç rijitliğinin nedenlerinden biri olabilir. Tekstil tabakalarında matrisin çekme mukavemetine ulaşıldığında, ilave yük diğer tekstil katmanlarına yeniden dağılır. Bu yeniden yük dağılım noktasında bir rijitlik düşüşü meydana gelir. Rijitlik düşüşü, daha yüksek yük seviyelerine ulaşıldığında ve numunede göçme meydana gelene kadar tekrar görülür.

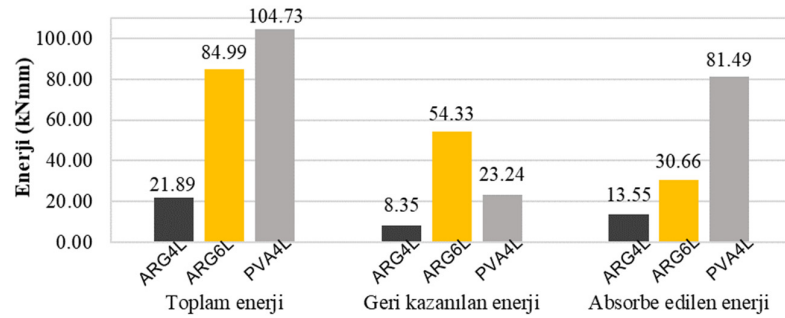
Testlerde dört temel hasar türü gözlenir. Bunlar, matris kırılması, arayüz ya da tabakaların ayrışması ve tekstil kopmasıdır. Bunlardan her biri rijitliğin azalmasına neden olur. ARG4L ve ARG6L numunelerinin rijitliği ilk aşamada aniden azalır ve daha sonra kararlı durum aşamasında kademeli olarak azalmaya devam eder. ARG4L’nin rijitliği ARG6L’dan daha düşük değerlere ulaşır. Bunun nedeni, ARG4L’nin ARG6L’dan daha düşük cidar kalınlığına ve tekstil katman sayısına sahip olmasıdır. Böylece, ARG6L’de gevrek kırılma görülürken, ARG4L’de daha sünek bir davranış ve hasar modu gözlenir. PVA4L’nin rijitlik azalması ise ilk adımda ARG4L ve ARG6L’ye benzer şekilde, fakat daha istikrarlı olup, bir sonraki adımda daha doğrusal olarak azalmaya devam ettiği görülür (Şekil 5.18).

Enerji yutma kapasitesi, tekstil kompozit tüp birimlerin plastik şekil değiştirme kabiliyeti olarak değerlendirilebilir. Kırılma işi, enerji yutma kapasitesiyle ilişkilidir.

Numunelerin tüm yayılan ve absorbe edilen enerji miktarları, her bir döngü için hesaplanan yük-düşey yer değiştirme eğrilerin altında kalan alan olarak tanımlanır (Şekil 5.19). Bu çalışmada kullanılan tekstil kompozitleri açısından geri döndürülemez plastik enerjileri çoğunlukla kırılma noktasına kadar dağılmış çatlama mekanizmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 5.19'da sunulduğu gibi, ARG4L ve ARG6L için tekstil katmanları arttıkça enerji yutma kapasitelerinin arttığı görülmektedir. ARG6L'nin enerji emme kapasitesi yaklaşık olarak ARG4L'nin iki katıdır. PVA4L, ARG4L ve ARG6L'nin absorbe edilen enerji değerleri, toplam enerjilerinin sırasıyla %78, %62 ve %36'sı kadardır. PVA4L, ARG4L ve ARG6L'nin geri kazanım enerjileri, toplam enerjilerinin sırasıyla %22, %38 ve %64'ü kadardır. PVA4L'nin ARG4L ve ARG6L numunelerine kıyasla plastik bölgedeki yüksek yer değiştirme kapasitesi, esas olarak her çevrimde geri kazanılan enerji değerlerinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Ek A'da Çizelge A.1 ile ARG4L, Çizelge A.2 ile ARG6L ve Çizelge A.3 ile PVA4L tüp birimlere ait düşey ekseninde yarı çevrimsel basınç yüklemesine ait her çevrimde elde edilen toplam enerji, geri kazanılan enerji ve absorbe edilen enerji değerleri ayrıntılı olarak belirtilmiştir. Aynı zamanda ARG4L, ARG6L ve PVA4L için, her çevrimde elde edilen enerji değerlerinin toplanmasıyla hesaplanan, Şekil 5.20'de sunulan kümülatif değerler, Ek A'da detaylı olarak yer almaktadır.



Şekil 5.19 : Silindirik tüp şeklindeki ARG4L, ARG6L ve PVA4L numuneleri için çevrimsel yüklemenin her bir çevrimi için toplam enerji, geri kazanılan enerji ve yayılan enerji değerleri.



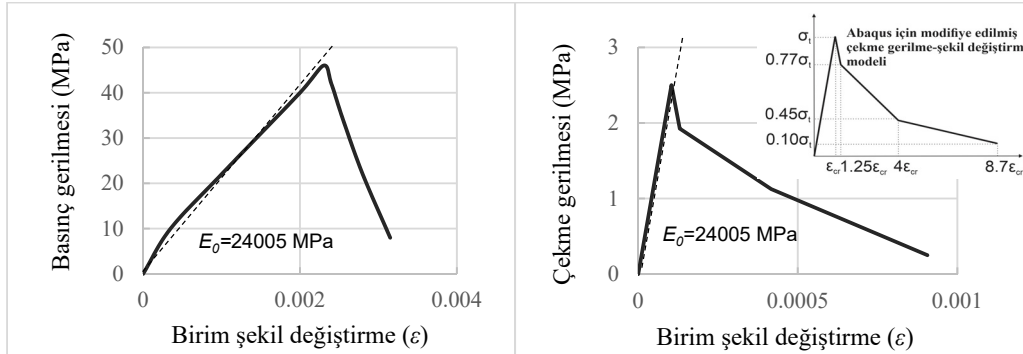
Şekil 5.20 : ARG4L, ARG6L ve PVA4L tüp birimlerin kümülatif toplam enerji, geri kazanılan enerji ve absorbe edilmiş enerji değerleri.

5.1.5 Kompozit birimlerin sayısal analizleri

Test edilen TRCC tüp birimler ince cidarlı olarak düşünülemez (Durelli ve Lin, 1986). Dolayısıyla, tüp birimlerin delik çapı veya cidar kalınlıkları kompozit malzemelerin elastik kısımdaki gerilme dağılımını etkilediği gibi plastik kısımdaki gerilme dağılımını da etkiler. TRCC tüp birimler çoğunlukla plastik bölgeden oluşmaktadır.

TRCC tüp birimlere uygulanan monotonik basınç, çekme ve çevrimsel basınç testi sonuçlarının benzer ve tutarlı olduğu görülmektedir. TRCC birimlerin silindirik tüp şeklinde ve simetrik olması dolayısıyla çizgisel yanal basınç ve çekme sonuçlarının benzer olması beklenen bir sonuçtu. Bu bölümde, çizgisel yanal basınç yüklemesi dikkate alınarak TRCC tüplerinin davranışını incelemek için ayrıntılı bir üç boyutlu nümerik sonlu eleman modeli oluşturuldu. Bunun için sonlu eleman programı olan ABAQUS versiyon 6.14 kullanıldı. ARG4Lavg, ARG6Lavg ve PVA4Lavg için sonlu eleman modelleri oluşturuldu. Bu nümerik modeller, ARG4L-N, ARG6L-N ve PVA4L-N olarak adlandırıldı. Nümerik modeller monotonik yanal basınç deneyinde olduğu gibi yer değiştirme kontrollü olarak uygulandı. TRCC tüp birimlerin nümerik modellemeleri için doğrusal olmayan malzeme modelleri tanımlandı. Malzeme modellemelerinde testte kullanılan malzeme özellikleri tanımlandı. Buna göre, ARG-glass tekstilin elastik modülü (E_o) 58760 MPa, çekme dayanımı ise 1250 MPa olarak alındı (Daşkiran, 2018). PVA tekstil için elastik modül (E_o) 34000 MPa, çekme dayanımı ise 920 MPa olarak kabul edildi (Daşkiran, 2018; Mobasher, 2011).

Deneylerde kullanılan çimento esaslı harcın malzeme özellikleri ise Şekil 5.21 ile tanımlanmıştır.

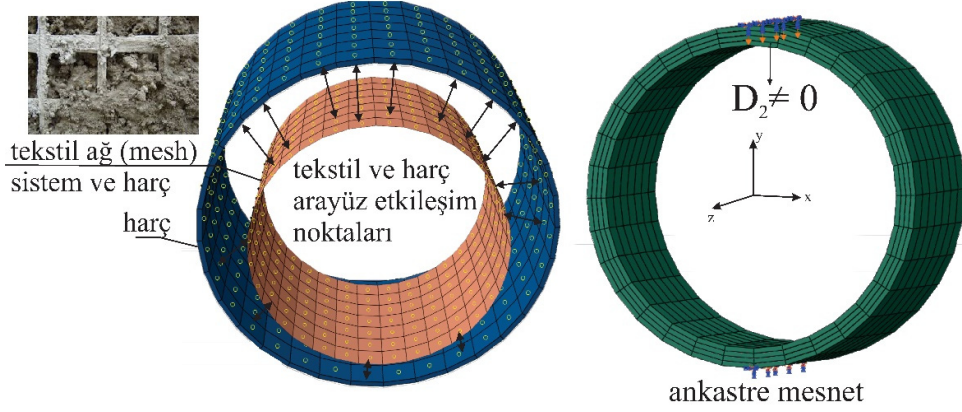


Şekil 5.21 : Çimento esaslı harcın mekanik özellikleri.

Çimento esaslı malzeme için doğrusal olmayan malzeme modeli olan beton plastisite hasar modeli kullanılmıştır. Burada, iki temel hasar mekanizması olan çekme çatlağı

ve basınç kırılması esas alınır. Şekil 5.21’de gösterilen harç için Daşkiran (2018)’in çalışmasından elde edilen basınç gerilme (σ)-birim şekil değiştirme (ϵ) diyagramı analizde kullanıldı. Şekil 5.21’de gösterilen çekme gerilmesi (σ_t)-birim şekil değiştirme (ϵ) diyagramı, Wahalathantri ve diğ. (2011) çalışmasında geliştirilen Abaqus programı için modifiye edilmiş çekme gerilme-birim şekil değiştirme modelinde kullanılan katsayılarla oluşturulmuştur. Çimento bazlı harcın çekme dayanımı, Ismail ve diğ. (2011) çalışmalarından elde edilen 2.5 MPa değeri kabul edilerek nümerik çalışmada hesaba katıldı. AR-glass ve PVA tekstil malzeme özellikleri ise Abaqus programı içerisinde yer alan plastisite model kullanılarak oluşturuldu. Denklemler (3.1) ve (3.2) kullanılarak hasar parametre ve çatlama birim şekil değiştirme değerleri nümerik analizde tanımlandı.

Silindir tüp şekilli TRCC birimlerin sonlu eleman modellerinde 3 boyutlu katı model ve 2 boyutlu kabuk elemanlar kullanılmıştır. Yukarıda bahsedilen çimento esaslı harç, 3 boyutlu katı eleman olarak ARG4L, ARG6L ve PVA4L’nin cidar kalınlıklarına uyumlu olarak modellendi. Modellenen tüp birim formundaki harç, tekstil katman sayısına bölündü. Daha sonra 2 boyutlu kabuk eleman modelleri harç malzemesi özellikleri tanımlanarak, tekstil katman sayısı kadar oluşturuldu. Oluşturulan 2 boyutlu harç katmanlarına kullanılan tekstil malzemesi tanımlandı. Bunun için, 2 boyutlu harç malzemesi içerisine sürekli lif demetleri çözgü ve atkı yönlerinde, lif aralıkları dikkate alınarak, donatı malzemesi şeklinde tanımlandı. Nümerik analizde kullanılan tekstil malzemeler için deneylerde kullanılan AR-glass ve PVA tekstil malzeme özellikleri tanımlandı. Tekstille güçlendirilmiş kabuk harç elemanı, 3 boyutlu modellenen ve tekstil katman sayısına bölünen harç elemanları arasına, yüzeylerden tam bağlı olarak yerleştirildi (Şekil 5.22). Analiz safhasına geçmeden önce 3D model mesh denilen küçük dörtgenlere bölündü. Meshleme ile birimin davranışından alınacak sonuçların doğruluk payı arttırılmış oldu. Dörtgen elemanlar şeklinde meshleme oluşturularak 4 adet integrasyon noktası oluşturulmuş oldu. Her integrasyon noktası 4 adet sonuç vermektedir. Elemanın gerilme veya şekil değiştirme değerleri okunmak istendiğine bu sonuçların ortalaması alınır. Burada ayrı olarak meshlenen 2D kabuk elemanlar ve 3D elemanlar birleştirilirken birbirlerine temas ettikleri bölgelerdeki düğüm noktaları, karşı parçanın düğüm noktalarıyla birleştirilerek tam bağlı olarak tek parça gibi davranacak mesh model oluşturulmuş oldu (Çizelge 5.6).



Şekil 5.22 : TRCC tüp birimlerin sayısal modelleme tekniği, mesnet ve yükleme koşulları.

Nümerik modellerde Şekil 5.22’de gösterildiği gibi y-eksenindeki düşey yer değiştirme D_2 olarak, x-eksenindeki esneme sonucu yatay yer değiştirme D_1 olarak tanımlanmaktadır. Burada simüle edilen monotonik yanal basınç yüklemesi olduğundan, tüp birimin üst kısmına çizgisel yanal basınç yüklemesi yer değiştirme kontrollü olarak uygulandı. Bunun için, üst kısımda çizgisel yüklemeye D_2 serbest bırakılıp, dönmeler ve diğer yöndeki yer değiştirmeler sınırlandırıldı. Silindirik tüp birimlerin mesnet koşulu olarak da alt kısmında çizgisel olarak ankastre mesnet tanımlandı.

Deneysel sonuçlardan elde edilen ARG4L, ARG6L, ve PVA4L’ye ait maksimum düşey yer değiştirme kapasiteleri göz önünde bulundurularak yer değiştirme kontrollü Abaqus/Explicit (açık çözümleme yöntemi) yöntem uygulanarak analizler gerçekleştirildi. Elde edilen analiz sonuçları Çizelge 5.7 ile verilmiştir.

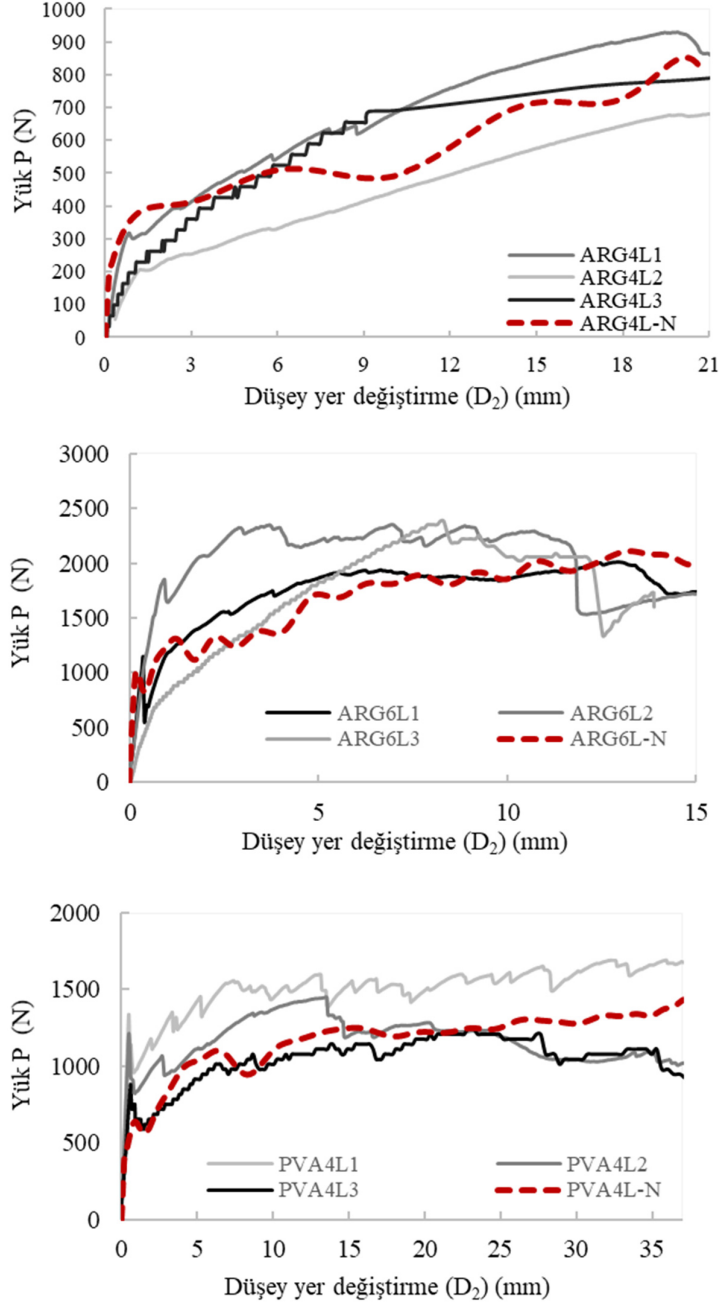
Çizelge 5.6 : 100 mm uzunlukta silindirik TRCC tüp nümerik modellerin geometrik özellikleri.

Model	Ortalama dış çap (D_e) (mm)	Ortalama cidar kalınlığı (t) (mm)	D_e/t
ARG4L-N	170.00	10.00	17.00
ARG6L-N	186.00	18.00	10.33
PVA4L-N	180.00	15.00	12.00

Çizelge 5.7 : TRCC tüp birimlerin nümerik analiz sonuçları.

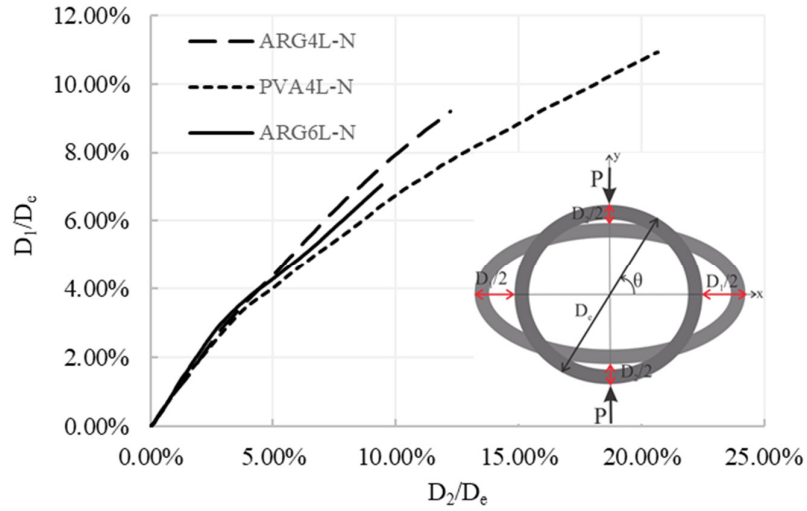
Model	P_{BOP} (N)	d_{BOP} (mm) P_{BOP} 'daki yer değiştirme değeri	P_{maks} (N) maksimum yük değeri	d_{maks} (mm) P_{maks} 'daki yer değiştirme değeri	P_f (N) göçme yükü ($P_f=0.85$ P_{maks})	d_u (mm) P_f 'deki yer değiştirme değeri	Düktilite $\mu_{0.85}$ ($\mu_{0.85}=d_u/d_{BOP}$)
ARG4L -N	375.00	1.14	846.00	20.43	719.10	27.70	24.30
ARG6L -N	1082.30	0.67	2005.00	11.00	1704.25	14.50	21.64
PVA4L -N	617.00	0.60	1303.26	26.97	1107.77	37.30	62.17

TRCC tüp birimlerin nümerik modellerine ait geometrik özellikler Çizelge 5.6'da gösterilmiştir. Çizelge 5.7'ye göre nümerik analiz sonucunun test sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir. Çizelge 5.3 test sonuçlarında ARG4L için elde edilen düktilite değeri 24.95 iken, Çizelge 5.7'de 24.30; ARG6L için elde edilen düktilite değeri 13.44 iken, Çizelge 5.7'de 21.64; PVA4L için 68.36 iken, nümerik analiz sonucu 62.17 bulunmuştur. Çizelge 5.7'deki göçme yükü hesabında Han ve diğ. (2009)'da yaptığı çalışmada kullanılan yöntem ile hesaplanmıştır. Bu yöntemle göre, göçme yükü (P_f) maksimum yükün %85'i olarak hesap edildi. Çizelge 5.6'da modellerin dış çapının cidar kalınlıklarına oranlarının artması ile Çizelge 5.7'de TRCC tüp modellerin maksimum yük taşıma kapasitelerinde azalma olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, Şekil 5.23'de test sonuçlarıyla nümerik sonuçların yük-düşey yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Şekil 5.23'de nümerik sonuçlara ait veriler kırmızı kesik çizgi ile gösterilmiştir. Deneysel sonuçlarla nümerik verilerin örtüşmesi nümerik analizde kullanılan modelleme yönteminin uygunluğu doğrulamıştır.



Şekil 5.23 : Yanal çizgisel basınç yüklemesi altında TRCC tüp test numunelerle nümerik modellerin karşılaştırılması.

Şekil 5.24'te düşey yönde yanıl basınç yüküne maruz TRCC tüp birimlerin, yükün uygulandığı doğrultudaki yer değıştirme değeriyle, yükün etkisiyle yatay doğrultudaki esnmeden kaynaklanan yer değıştirme değeri incelenmiştir. Bunun için, yatay yöndeki yer değıştirme değeri (D_1), her bir TRCC tüp birimin Çizelge 5.6'da belirtilen dış çap (D_e) değeriine bölünerek birim şekil değıştirme değeri elde edilmiştir.



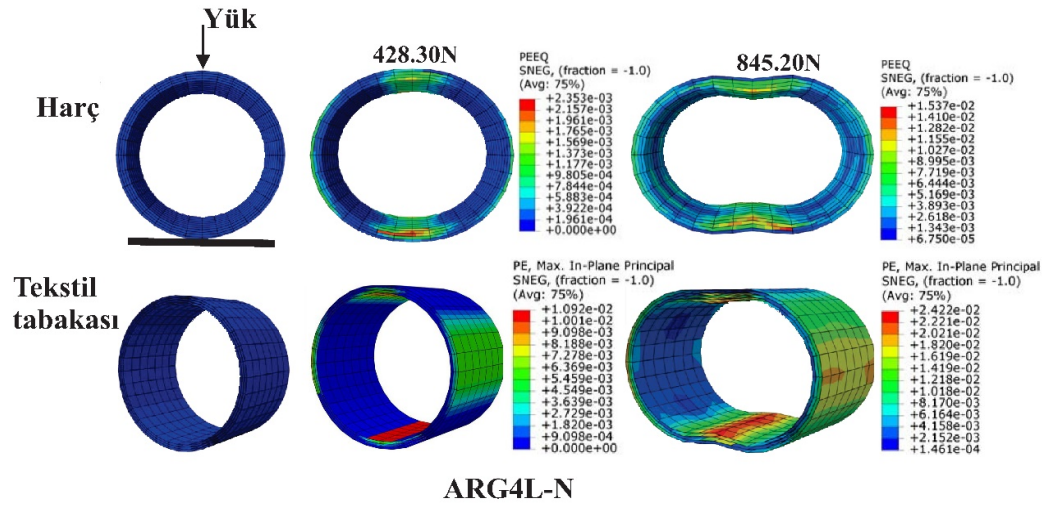
Şekil 5.24 : Düşey yönde yanal basınç yüküne maruz nümerik TRCC tüp modellerin yatay (D_1/D_e) ve düşey (D_2/D_e) yöndeki birim şekil değiştirme değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 5.24'te kuvvet yönünde elde edilen tüm TRCC tüp birimlerin düşey yer değiştirmeleri 0.03 (%3) değerine kadar yatay yer değiştirmelerle doğrusal olarak ilerlemiştir. Yer değiştirme oranları %3'e ulaştıktan sonra, TRCC tüp birimlerin maksimum düşey yer değiştirme oranı, yatay yöndeki maksimum yer değiştirme oranının ARG4L-N için 1.25 katı, ARG6L-N için 1.4 ve PVA4L-N için 1.88 katı olduğu görülmektedir. Göçme yüküne ulaşıldığında, PVA4L-N'deki düşey yöndeki birim şekil değiştirme değeri yatay yöndeki birim şekil değiştirme değerinin yaklaşık 2 katına ulaşmaktadır. Bu durumda etkili olan faktörler TRCC tüp birimlerin geometrik ve malzeme özelliklerine dayalı duktıl davranışları ve hasar mod tipleridir.

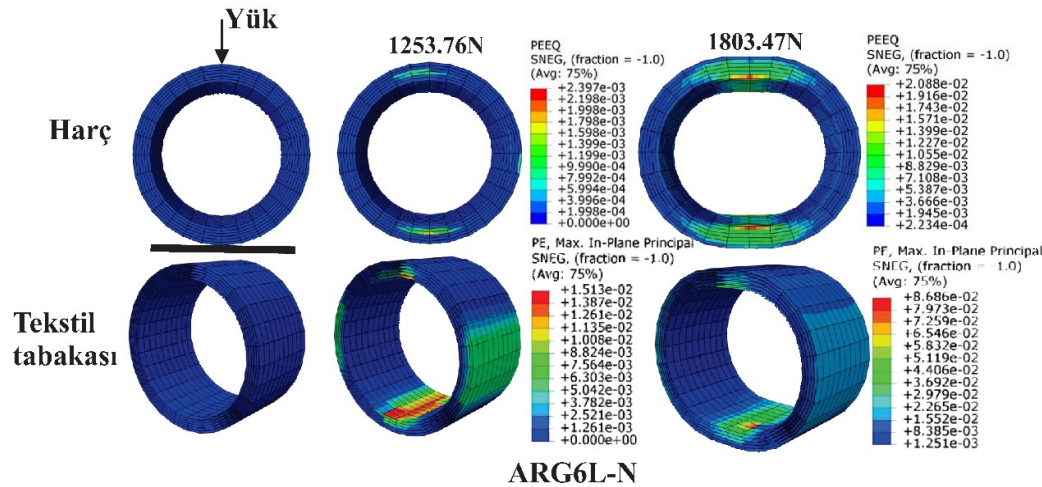
5.1.6 Kompozit birimlerin deneysel ve nümerik olarak elde edilen hasar modlarının değerlendirilmesi

Nümerik analiz sonuçlarında elde edilen Şekil 5.25, Şekil 5.26 ve Şekil 5.27'de belirtilen TRCC tüp birimlerin hasar modları, çizgisel yanal basınç yükleme deneyleri sonucunda elde edilen Şekil 5.13'de ARG4L, ARG6L ve PVA4L birimlerin hasar modlarıyla benzer olduğu görülmektedir. Üç tip TRCC tüp birimlerde şekil değiştirme süreci elastik ve plastik olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Elastik şekil değiştirme süreci tüm numuneler için oldukça kısadır. İlk harç çatlamasından sonra plastik şekil değiştirme görülmeye başlandı.

Nümerik analiz sonucunda Şekil 5.25, Şekil 5.26 ve Şekil 5.27’de gösterilen renk skalasında mavi renkten kırmızıya doğru gidildikçe plastik şekil değiştirme değeri arttığı ifade edilmektedir. Şekil 5.25’de ARG4L-N’nin 428.30 N yük değerinde, Şekil 5.26’da ARG6L-N’nin 1253.76 N yük değerinde üst ve alt bölgelerinde plastik mafsallıkların geliştiği gözlemlendi. Harçta meydana gelen çatlaklarla birlikte tekstil malzemesinde de çekme şekil değiştirmeleri görülmeye başlandı. Yük maksimum değere ulaştığında ARG4L-N ve ARG6L-N için yatay eksenle sağ ve sol bölgelerde de plastik mafsallaşma gözlemlendi. Bu aşamadan sonra, çekme yükleri tekstil malzemeleri tarafından bir miktar taşınıp, AR-glass liflerin kopmasıyla göçme meydana gelmiştir.

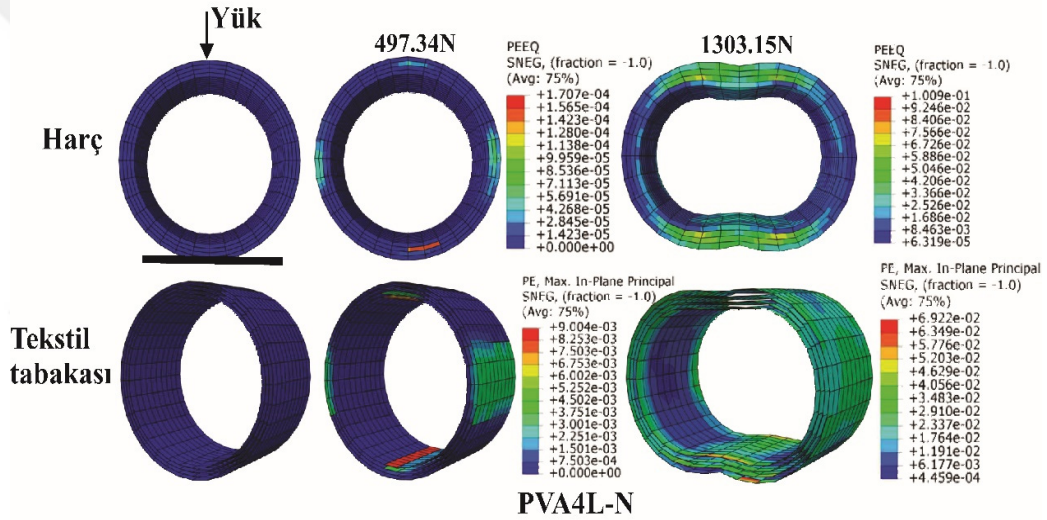


Şekil 5.25 : ARG4L-N’nin harç, tekstil tabakalarının hasar modu ve plastik birim şekil değiştirme değerleri (PEEQ ve PE).



Şekil 5.26 : ARG6L-N’nin harç, tekstil tabakalarının hasar modu ve plastik birim şekil değiştirme değerleri (PEEQ ve PE).

Şekil 5.27’de PVA4L-N’nin hasar modunun ARG4L-N ve ARG6L-N’den farklı olduğu görülmektedir. Düşey yanal yük arttıkça, eğilme çatlakları PVA4L deney numunelerinde ve PVA4L-N’de tüp birimin iç kısımlarında tekstil tabakaları arasında başladığı gözlemlendi. Bu durum, tabakalar arası delaminasyona sebep olup, tekstil tabaka ve harç arayüzünde kayma gerilmelerinin oluşumunu tetikler. ARG4L ve ARG6L numunelerde ve nümerik analizleri sonucunda görülmeyen delaminasyon türü hasarın, PVA4L numunelerde ve nümerik analiz sonucunda görülmesinde etkili olan sebep, PVA tekstil türünün örgü tipinde olmasıyla lifler arası boşluğun ihmal edilecek kadar düşük olmasıdır. PVA4L numunelerde harçta çatlaklar ve delaminasyon görülürken, PVA tekstil malzemesinde kopma gözlenmemiştir.



Şekil 5.27 : PVA4L-N’nin harç, tekstil tabakalarının hasar modu ve plastik birim şekil değiştirme değerleri (PEEQ ve PE).

Çimento esaslı AR-glass tekstil kompozitin sarım sayısı 4’den 6’ya çıkarıldığında dayanım 2 katına çıkmakta, deplasmanda ise 4 katmanlı AR-glass tekstil kompozit daha sünek davranmış olup, çevrimsel yüklerde de görüldüğü üzere 6 katmanlı AR-glass tekstil kompozit maksimum yüke ulaştıktan sonra ani göçmektedir. Bu da 6 katmanlı AR-glass tekstil kompozit silindir parçanın daha az sünmesi ve daha az enerji yutması anlamına gelmektedir. PVA 4 katmanlı tekstil kompozit ise oldukça sünek davranıp, plaklaşma gözlenerek kırılma adım adım gerçekleşmektedir ve yüksek deplasmanlar yapmaktadır.

5.2 Silindirik Kompozit Tüp Birimlerin Duvar Formu İçerisinde Davranışı

Deneysel ve nümerik sonuçlarda ARG4L tüp birimlerin dayanımının duvar formu üretimi için düşük olabileceği, fakat ARG6L numunelerine göre daha düktil davrandığı gözlenmiştir. Tekstil takviyeli çimento esaslı silindirik tüp birimlerin üretiminde AR-glass tekstil malzemesinin örgü arası (mesh aralığı) boşlukları PVA tekstile göre daha geniş olduğundan üretim esnasında büyük kolaylık sağlamaktadır, ve üretimler daha düzgün çıkmaktadır. Çimento esaslı harcın, AR-glass tekstilin örgü sıklığının daha az olması sebebiyle tekstil malzemesini daha iyi ve kolay kavraması üretimi kolaylaştırmaktadır. Duvar formunun üretiminde de ARG4L tüp birimlerin kullanılması tercih edilmiştir. Deneysel ve nümerik çalışmalarla elde edilen veriler duvar elemanında kullanılacak silindir tüp birimlerin maksimum yük ve yer değiştirme değerleri, enerji yutma kapasiteleri konularında ön bilgi edinmemizi sağlamıştır.

5.2.1 Silindirik kompozit tüp birimlerle duvar formunun oluşturulması

Üretilen silindirik ARG4L tüp birimlerin bir araya gelmesi ve yeni bir sistem oluşturmasında yük aktarımı, yer değiştirme kapasiteleri, enerji yutma kapasitesi ve hasar modlarının oluşum şekillerinin irdelenmesi gerekmektedir.

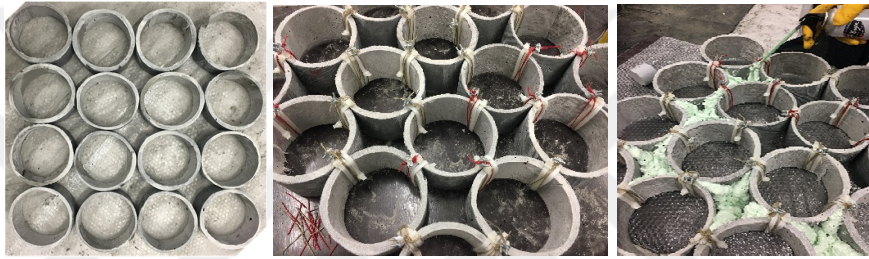
İlk olarak, ARG4L tüp birimlerin üretimi için bölüm 5.1.2’de bahsedilen üretim metodu ile 100 cm uzunluğunda ARG4L silindir tüpler üretildi. Üretilen ARG4L silindir tüpler 10 cm uzunluğunda silindirik tüp birimlere kesilerek duvar formunu oluşturacak Şekil 5.28’de gösterilen birimler elde edilmiş oldu.



Şekil 5.28 : ARG4L silindirik tüp birimler.

Duvar formunu oluşturmak için üretilen tüp birimlerin iç çapı 15 cm, dış çapı 17 cm, cidar kalınlıkları yaklaşık olarak 1 cm’dir. Elde edilen 16 adet ARG4L birimlerden Şekil 5.29’da gösterilen 4x4 sıra olacak şekilde duvar formu için sistem

oluşturulmuştur. Tüp birimlerin birbiriyle etkileşimini irdelemek esas amaç olduğundan, tüp birimler bir araya getirilerek çizgisel yanal yük aktarımının başarılı şekilde sağlanması için sağlam şekilde plastik kelepçe ve çelik tellerle bağlanmıştır. Birimler bir araya getirilip sabitlendikten sonra, her bir tüp birim arası boşluklar poliüretan köpük ile dolduruldu (Şekil 5.29). Böylece, yüke maruz kalan sistemde birimler arası kayma azaltılıp, yük aktarımının daha başarılı şekilde sağlanması amaçlanmıştır. Ayrıca, bu basit uygulamayla tüp birimlerin şekil değiştirme kabiliyetleri kısıtlanmamış olup, tüp birimlerin birbiriyle ilişkili olarak şekil değiştirme yapmasına olanak verilmiştir.

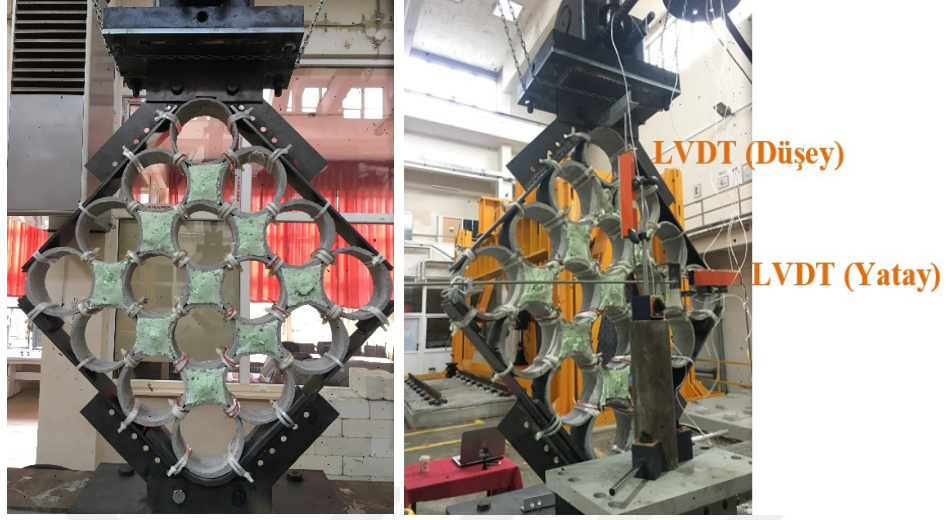


Şekil 5.29 : ARG4L birimlerle duvar formunun oluşturulması.

Şekil 5.29’da gösterildiği gibi üretilen duvar formuna, deprem yükleri altında kesme dayanımı ve hasar davranışını tahkik etmek üzere yarı çevrimsel diyagonal basınç yüklemesi uygulanmıştır. Çekme uygulanmamasının sebebi ise, birimler arasındaki bağlantı malzemesinin etkisini devre dışı bırakarak, sadece basınç yüklemesi altında birimler arasında yük ve şekil değiştirme ilişkilerinin ortaya konulmasını sağlamaktır.

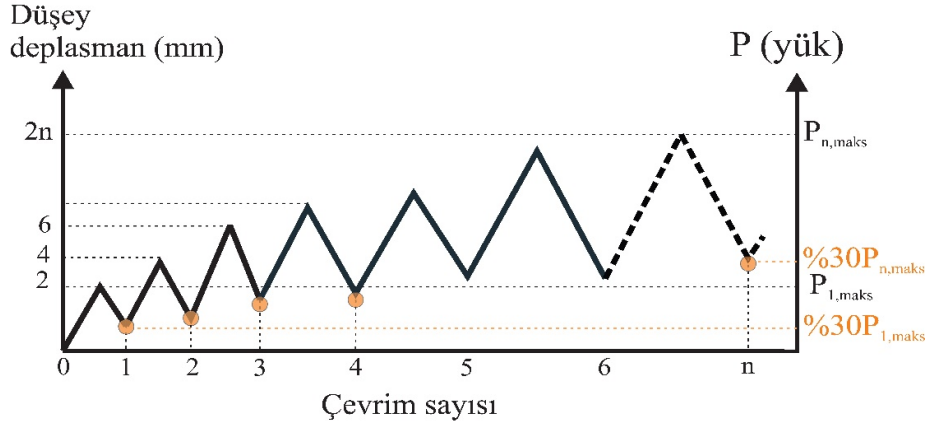
5.2.2 Yarı çevrimsel diyagonal kayma test düzeneği

ARG4L birimlerden oluşturulan duvar formu ASTM E519-02 (2002)’de tarif edilen yığma yapılar için önerilen, kayma gerilmesi deney metodu kullanılmıştır. Diyagonal kayma testini uygulamak için 700 mm x 700 mm boyutlarındaki ARG4L tüp birimlerden oluşan duvar formu 45° döndürülerek düşey kuvvet yer değiştirme kontrollü olarak yükleme-boşaltma şeklinde çevrimsel olarak uygulanmıştır (Şekil 5.30). Çevrimsel yükleme-boşaltma, duvar formunda göçme oluşana kadar devam ettirilmiştir. Oluşturulan duvar formunun yük taşıma kapasitesi, yer değiştirme kabiliyeti, kayma rijitliği, düktilitesi ve hasar modu tanımlanmıştır.



Şekil 5.31 : Duvar formu üzerindeki yer değıştirme ölçerler (LVDT).

Yükleme, İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında 200 kN yük kapasiteli düşey yüklem çerçevesinde yüklem hızı sabit tutularak, yer değıştirme kontrollü olarak göçmeye kadar 2 mm’lik artımlarla gerçekleştirilmiştir. Yüklem, yer değıştirme kontrollü olarak 2 mm’lik arttırımla gerçekleştirilirken, boşaltmada ise düşey yük her çevrimde ulaşılan maksimum yükün %30’una inene kadar devam eder (Şekil 5.32). Yüklem-boşaltma yapılarak elde edilen yükler yük ölçer (load cell) ile kaydedilmiştir.

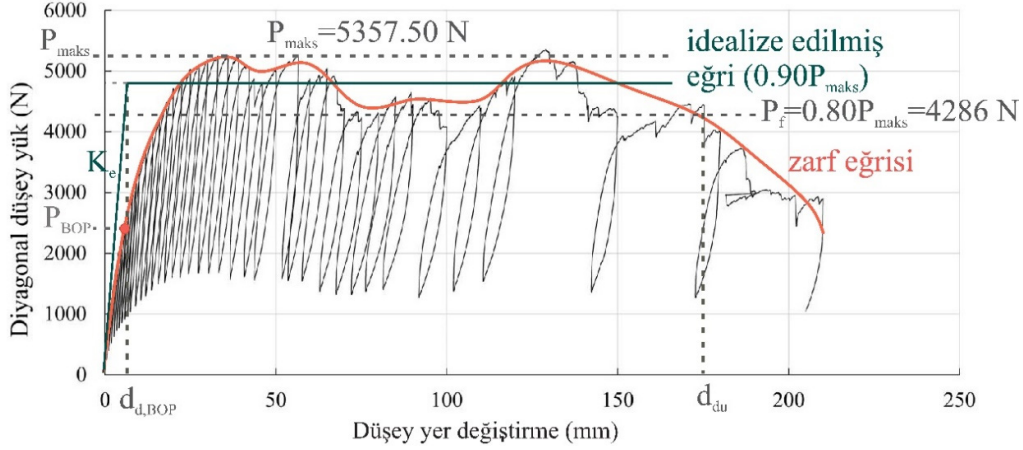


Şekil 5.32 : Diyagonal kayma deneyi yüklem şeması.

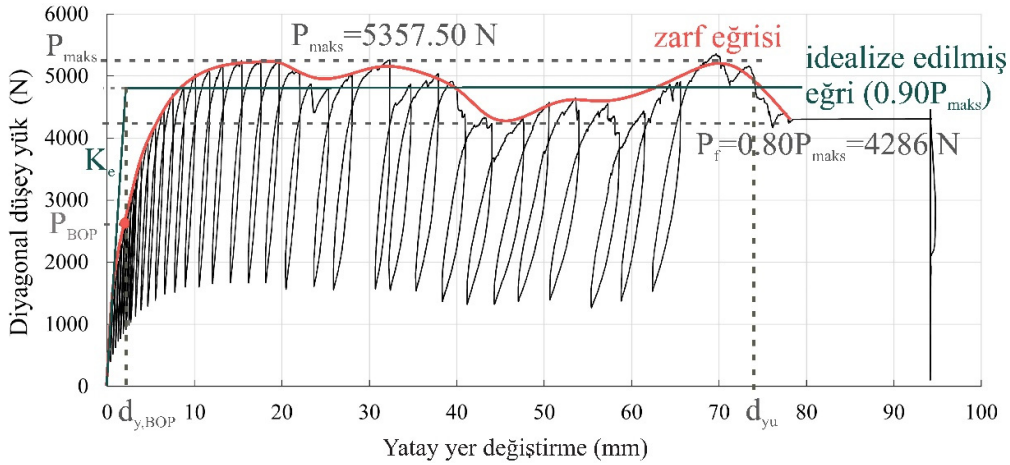
Şekil 5.32’de gösterildiği gibi her bir çevrim sayısının 2 katı düşey yer değıştirme değerine ulaşıp bu yer değıştirme değerinde elde edilen maksimum yükün %30’una düşene kadar (turuncu nokta) boşaltma uygulanmıştır. Her çevrimde yük, maksimum yükün %30 değerine düşürüldüğünde toplam düşey yer değıştirmenin bir kısmı geri dönerken, bir kısmı plastikleşmeden dolayı kalıcı şekil değıştirme oluşturur.

5.2.3 Yarı çevrimsel diyagonal kayma testi

ARG4L tüp birimlerden oluşturulan duvar formuna uygulanan diyagonal basınç testi sonucunda elde edilen düşey yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 5.33 ve Şekil 5.34 ile verilmiştir. Uygulanan yük diyagonal yarı çevrimsel basınç yüklemesi şeklindedir. Bu yükleme altında ARG4L birimlerin birbirine yük aktarımı ve sistemin davranış şekli düşey yer değiştirme ve yatay yer değiştirme olarak incelenmiştir.



Şekil 5.33 : Diyagonal düşey yük (N)-düşey yer değiştirme (mm) eğrisi.



Şekil 5.34 : Diyagonal düşey yük (N)-yatay yer değiştirme (mm) eğrisi.

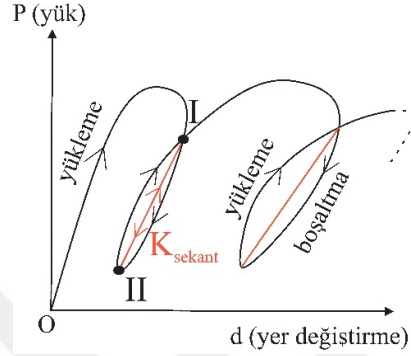
Diyagonal düşey çevrimsel yükleme maksimum yükün %80'ine düşene kadar devam etmiştir (Tomazevic, 1999). Böylece 38 çevrim ile test tamamlanmıştır. Tekstil takviyeli kompozit tüp birimlerden oluşan duvar formu oldukça sünek davranış göstermiştir. Şekil 5.33 ve Şekil 5.34'deki eğrilerden elastik davranışın ilk 4 ya da 5 çevrimde meydana geldiği ve daha sonraki çevrimlerde plastik davranış gösterdiği görülmektedir. Maksimum yüke ulaşıldıktan sonra yük değerinde ciddi bir düşüş

olmadan yüksek yer değiştirme değerlerine ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Bu durum aynı zamanda duvar formunun yüksek süneklik ve enerji yutma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Eğrilerden anlaşıldığı üzere her çevrimsel yükleme sonrası ulaşılan maksimum yer değiştirme değerinin yük boşaltma esnasında çok az bir miktarı geri dönüşüyle (toparlanmasıyla) yüksek kalıcı şekil değiştirmeler meydana gelmektedir.

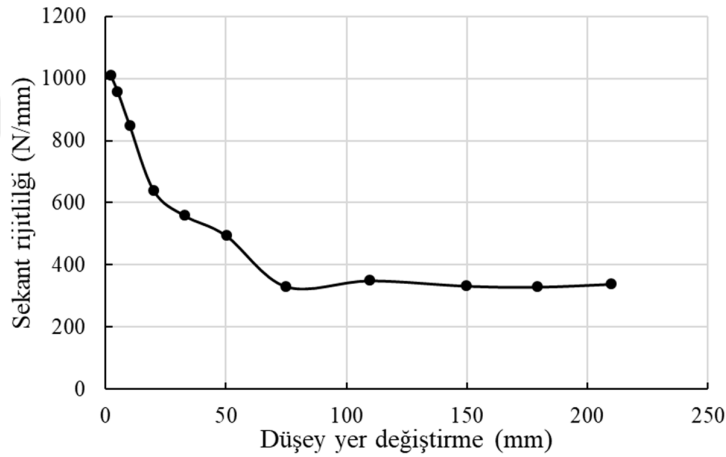
şekil 5.33 ve şekil 5.34'te elde edilen çevrimsel eğrinin her çevrimindeki maksimum noktaların birleştirilmesiyle elde edilen zarf eğrisi kırmızı ile gösterilmiştir. Başlangıç noktasından zarf eğrisine teğet geçirilerek elastik rijitlik değeri elde edilmiştir. Tomazevic (1999), Magenes ve Morandi (2008) alışmalarında olduğu gibi zarf eğrisinden idealize edilmiş eğriye geçiş yapılmıştır. Bunun için ilk olarak, zarf eğrisinden elde edilen maksimum değerin %90'ından yatay bir doğru geçirilmiştir. Elastik rijitlik için başlangıç noktasından eğriye teğet geçirilen doğrunun zarf eğrisinden elde edilen maksimum değerin %90'ından geçirilen yatay doğruyu kesmesi ile idealize edilmiş eğri elde edilmiştir. İdealize edilmiş eğride bu keşişim noktasından düşey bir doğru indirilerek çevrimsel eğriyi keşiği nokta, eğilme sınır noktası (BOP) olarak tanımlanabilir. Duvar formu ARG4L kompozit tüplerle oluşturulduğundan, ARG4L'nin malzeme özellikleri ve tüp formunun etkisiyle, duvarda diyagonal düşey yüklemede her bir tüp biriminde eğilme davranışı ve eğilme hasarı meydana geldiğinden duvar formu oldukça sünek davranış göstermiştir. Böylece, kesme hasarı gevrek kırılmaya yol açarken, eğilme hasarlarının oluşmasını sağlamak sünek davranışı arttıracadığından gevrek hasar oluşumunu önlemiş olur.

Diyagonal düşey yük eğilme sınır noktasına ulaşana kadar (P_{BOP}), yükün uygulanmaya başladığı ARG4L birimlerden alttaki ARG4L birimlere doğru yük aktarımı gerçekleşmeye başlar. Eğilme sınır noktasına ulaştıktan sonra birimlerdeki harçlarda eğilme çatlakları oluşmaya ve yük maksimuma ulaşana kadar çatlaklar üst ARG4L birimlerden alt birimlere doğru oluşmaya devam eder. Maksimum yüke ulaşıldıktan sonra ARG4L birimlerin üst, alt, sağ ve sol bölgelerinde eğilme çatlakları oluşup bu noktalardan mafsallaşan silindirik tüpler eğilme davranışı yapar. Yükte bir artış olmazken, yer değiştirme artmaya devam eder. şekil 5.33'de çevrimsel düşey yükleme eğrisinde düşey yer değiştirme değeri 60 mm'e ulaştıktan sonra yükte bir azalış olmuştur. Bu noktada, ARG4L birimlerin bir kısmında harçta çatlakların oluşmaya devam ettiğini göstermektedir. Sekant rijitliklerine bakıldığında 60 mm düşey yer

değiştirmeden sonra ciddi rijitlik azalması görülmemektedir (Şekil 5.36). Duvar formunun rijitlik değerleri Şekil 5.35’de gösterildiği gibi her çevrim için sekant değerleri elde edilerek sağlanmıştır. Sekant rijitliği ise I noktası ile II noktası arasındaki yük farkının, bu iki nokta arasındaki yer değiştirme farkına oranı hesaplanarak elde edilir.



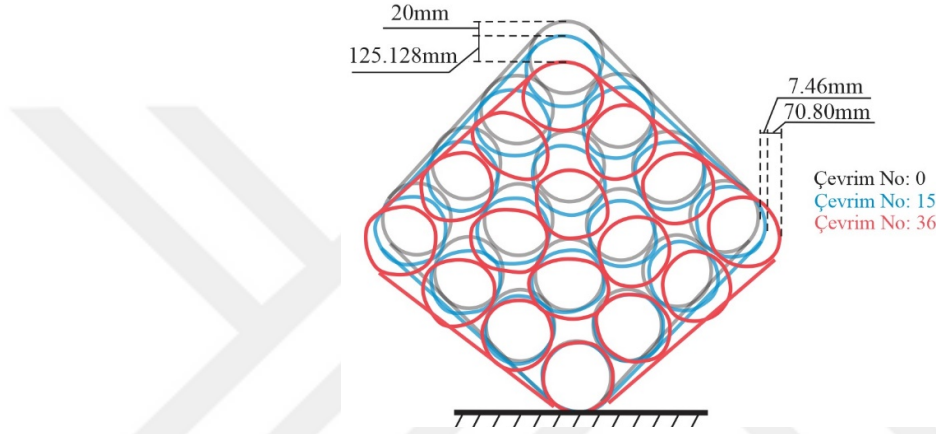
Şekil 5.35 : Her çevrim için sekant rijitliklerinin bulunması.



Şekil 5.36 : Duvar formu rijitlik azalması.

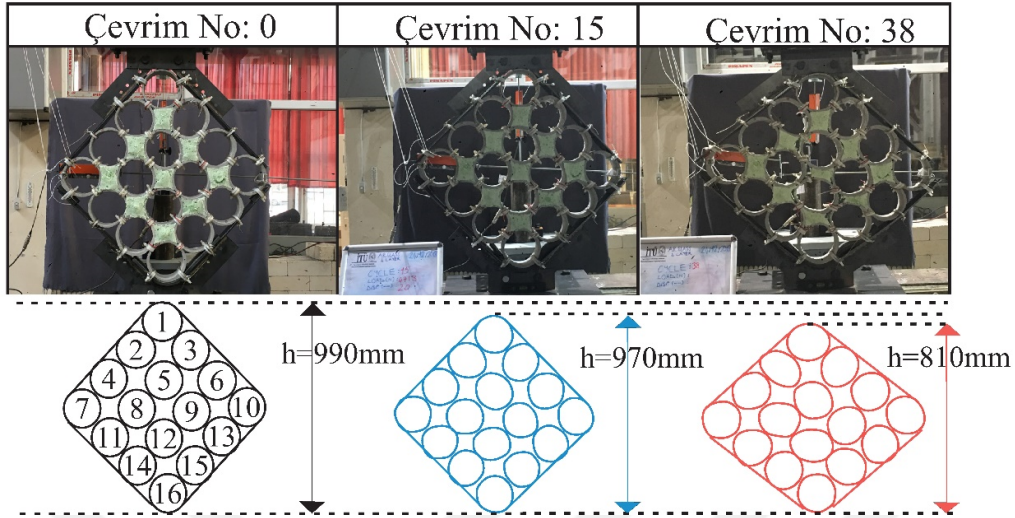
Düşey yer değiştirme değeri 110 mm’e ulaştıktan sonra bir miktar pekleşme görülmektedir. Bunun sebebi, hasar gören birimlerin yerine henüz daha sağlam olan birimlerin yükü taşımaya devam etmesidir. Düşey yer değiştirme değeri 130 mm’e ulaştıktan sonra tüm birimlerdeki harçlarda çatlakların oluştuğu ve yük düşüşü görülmüştür. Harçta çatlakların meydana geldiği birimlerde tekstil malzemesi diyagonal düşey yüklemeden birimlerde oluşan eğilmeden kaynaklı çekme yüklerini taşımaya devam etmiştir. Bu esnada harçta çatlakların büyümesi ile yükte azalma meydana gelirken, yer değiştirmede artış devam etmiştir. Maksimum yükün %80’i göçme yükü olarak kabul edilmiştir. Şekil 5.34’de duvar formu çevrimsel diyagonal

düşey yüklemeye maruz kalırken, her bir ARG4L'nin düşey yönde sıkışması ile yatay yönde esneme hareketinin oluşması duvar formunda yatay yer değiştirmeye sebep olmuştur. Yükleme boyunca yatay yer değiştirme değerleri düşey yer değiştirme değerlerinin ilk çevrimlerde 0.30 katı değerlerindeyken, göçme yükü değerine kadar ilerleyen çevrimlerde 0.55 katı değerine ulaşmaktadır. Şekil 5.37'de diyagonal düşey yükleme altında duvar formunun ve duvar formunu oluşturan her bir ARG4L biriminin aldığı deformasyon şekilleri gösterilmiştir.

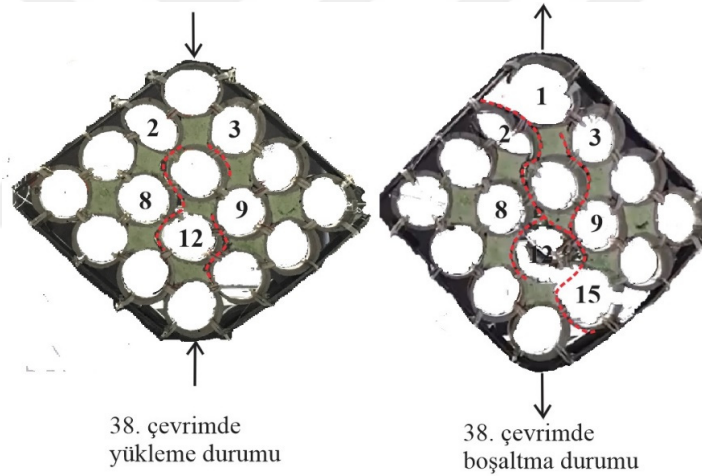


Şekil 5.37 : Duvar formunu oluşturan ARG4L birimlerin ve genel duvar formunun deformasyon şekilleri.

Yükleme ve boşaltma boyunca duvar formunun düşey yönde yaptığı yer değiştirme 15. çevrimde 20 mm iken, yatay yönde yaptığı yer değiştirme 7.46 mm'dir. Çevrim sayısı 36'ya ulaştığında düşey yöndeki yer değiştirme değeri 145.128 mm olurken, yatay yöndeki yer değiştirme değeri 78.26 mm olmaktadır. Özellikle, yükleme yönündeki düşey yer değiştirmenin 15. çevrimde ve son çevrim olan 38. çevrimdeki yer değiştirme değerleri ve duvar formunun aldığı şekiller Şekil 5.38'de gösterilmiştir. Şekil 5.38'de duvar formunu oluşturan her bir ARG4L birime numara verilmiş ve hasar oluşumu incelenmiştir. Şekil 5.37 ve Şekil 5.38'de duvar formunun diyagonal düşey yük altında ARG4L birimlerin şekil değiştirmesi ile oldukça esneyebildiği görülmektedir. Şekil 5.38 ve Şekil 5.39'da son çevrimde yükleme-boşaltma durumunda göçmenin meydana geldiği duvar formunda, ilk hasar alan ARG4L birimlerden 1, 2 ve 3 numaralı birimler olup, daha sonraki çevrimlerde 12, 8 ve 9 numaralı birimlerde hasarlar gözlenip, son olarak 15 numaralı birimde hasar ve göçme gözlenmiş olup duvar formunda göçme oluşmuştur.

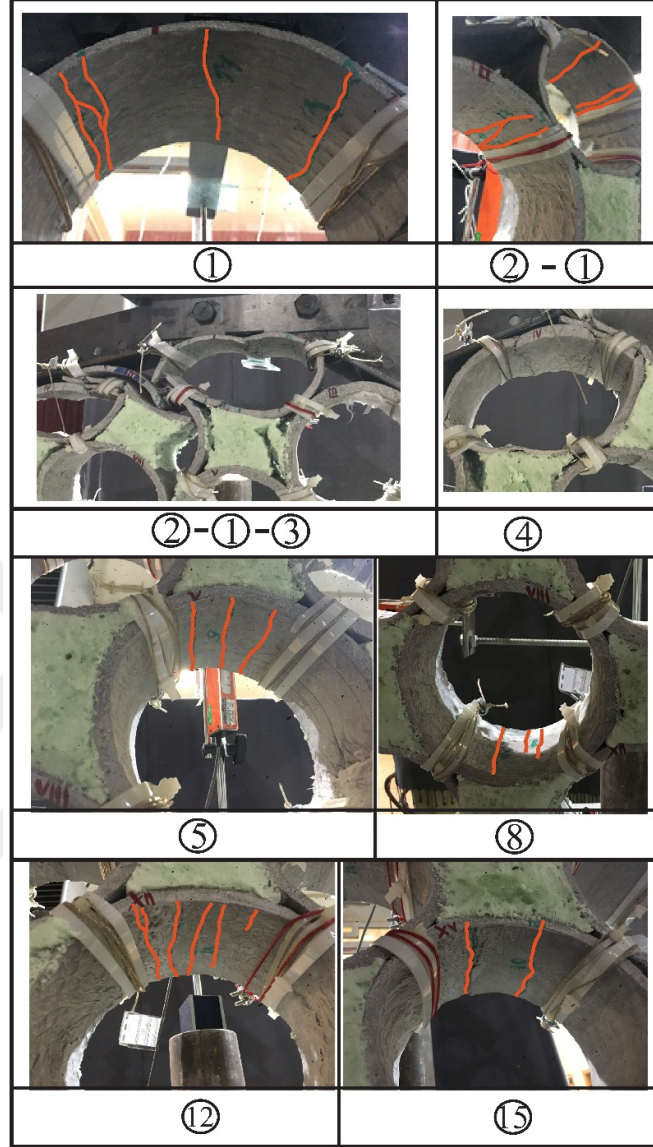


Şekil 5.38 : Çevrimsel diyagonal düşey yükleme boyunca duvar formunun deformasyon durumları.



Şekil 5.39 : Son çevrimde yükleme-boşaltma esnasında duvar formunun göçme durumu.

Diyagonal çevrimsel basınç yüklemesi altında yükleme esnasında birimlerin birbirlerine uyguladığı basınç noktalarında harçta oluşan çatlaklar mafsallı noktası gibi davranarak birimlerin eğilme davranışı yaparak enerji yutma ve yüksek şekil değiştirme yapmalarına olanak vermektedir. Yuvarlak formda olan birimler yük altında esneyerek elips şeklini almakta, birimlerin birbirine bağlandığı ve yük aktardığı noktalardan göçme oluşmaktadır. Şekil 5.39’da son çevrimde diyagonal basınç yüklemesi altında 2, 3, 8 ve 12 numaralı birimlerde oluşan çatlaklar açılarak birimlerde göçme oluştururken, birimlerin deformasyonu ile diyagonal düşey yönde poliüretan köpük ve birimlerde ayrışma gözlemlenmiştir. Şekil 5.40’da duvar formunu oluşturan birimlerde oluşan çatlaklar kırmızı ile gösterilmiştir.



Şekil 5.40 : Duvar formunu oluşturan birimlerin hasar durumu.

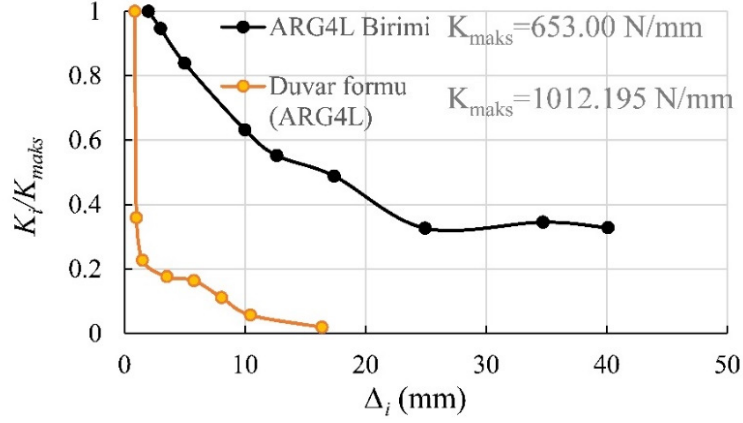
Şekil 5.40’da 1 numaralı ARG4L birim yükün uygulandığı üst çizgisel bölgede ve birimlere bağlandığı noktalardan eğilmeye maruz kaldığından tüp iç tarafında oluşan çekme etkileri sebebiyle harçta çizgisel çatlaklar oluşmuştur. Daha alt birimlerde, 5, 8, 12 ve 15 numaralı birimlerde olduğu gibi, bağlantı bölgelerinin dışında da düşey yük aktarımı itibariyle birim cidarlarındaki eğilme etkisiyle harçta çekme çatlaklarının çizgisel olarak olduğu görülmektedir. Şekil 5.39’da son çevrimde boşaltma yapıldığında 1, 2, 3, 12 ve 15 numaralı birimlerde tekstil malzemesinde de kopma olduğu görülerek test sonlandırılmıştır.

Diyagonal çevrimsel basınç yüklemesi altında duvar formuna ait elde edilen yük taşıma kapasitesi ve düktilite değerleri Çizelge 5.8 ile verilmiştir. Ayrıca, ARG4L

birim için çevrimsel düşey yükleme altında elde edilen test sonuçları ile karşılaştırma yapılmıştır. ARG4L birimin basınç yüklemesi altında tek başına gösterdiği yük taşıma kapasitesi ve düktilite değerlerinin 16 adet ARG4L birimle 4x4 matris formunda oluşturulan duvar formunda sırasıyla 6 katı ve 1.80 katı olduğu görülmektedir. Duvar formunun maksimum yük kapasitesi 5357.50 N olarak bulunmaktadır. Tek bir ARG4L birimin yük taşıma kapasitesi 850 N'dur. Duvar formunda uygulanan yük, üst ARG4L birimlerden alt birimlere doğru yükü aktarmaktadır. ARG4L birimlerde yük artışıyla hasar meydana gelip göçme başladıktan sonra Şekil 5.33'de gösterilen grafikte 130 mm düşey yer değiştirme değerinden sonra bazı ARG4L birimlerinde göçmenin de meydana gelmesiyle ciddi yük düşüşleri görülmeye başlanmıştır. Fakat, devre dışı kalan ARG4L birimlerin taşıyacağı yük diğer sağlam ARG4L birimlere aktararak yükte düşüş olmasına rağmen duvar formu bir miktar yük taşımaya ve yer değiştirme yapmaya devam etmiştir. Şekil 5.41'de gösterilen ARG4L birim ve duvar formuna ait rijitlik oranı ve göreceli düşey yer değiştirme değerleri karşılaştırıldığında, ARG4L birimine tek başına uygulanan çevrimsel düşey yüklemede rijitlik değerinde ilk çevrimlerden itibaren ciddi bir azalış gözlenirken, duvar formunda bu azalış oldukça düşüktür. Duvar formunda rijitlik azalışı neredeyse yatay eksene paralel ilerlerken, ARG4L birimde sıfır değerine gelmiştir. Duvar formunda çok yüksek yer değiştirme değerlerine ulaşılmasına rağmen rijitlik azalmasının oldukça yavaş ilerlediği gözlemlenmektedir. Burada ARG4L birimlerin bir arada kullanılmasının oldukça etkili olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.8 : Duvar formu ve ARG4L birimin çevrimsel basınç yüklemesi altındaki yük taşıma kapasiteleri ve düktilite değerleri.

Numune	P _{BOP} (N) ilk çatlaklara neden olan kuvvet	d _{BOP} (mm) P _{BOP} 'deki yer değiştirme değeri	P _{maks} (N) maksimum yük değeri	d _{maks} (mm) P _{maks} 'daki yer değiştirme değeri	P _f (N) göçme yükü	d _{du} (mm) P _f 'deki yer değiştirme değeri	Düktilite μ ($\mu = d_{du}/d_{BOP}$)
ARG4L birim	229.92	1.05	850.00	15.90	722.50	16.57	15.84
Duvar formu	2410	6.20	5357.50	30.00	4286	177.00	28.55



Şekil 5.41 : ARG4L birim ve duvar formunun rijitlik oran (K_i/K_{maks})-görelü düşey yer değiştirme (Δ_i) grafiği.

Duvar formunun enerji yutma kapasitesi Şekil 5.33'te elde edilen zarf eğrisinin altında kalan alan bulunarak elde edilmiştir. Benzer şekilde ARG4L birim için de enerji yutma kapasitesi hesaplanmıştır. Duvar formunun enerji yutma kapasitesi 879.21 Nm iken, tek bir ARG4L birimin enerji yutma kapasitesi 17.80 Nm olarak bulunmuştur. Duvar formunun enerji yutma kapasitesi tek bir ARG4L biriminin enerji yutma kapasitesinin 49 katıdır. Duvar formunun yük taşıma kapasitesinin düşük olmasına rağmen, çok yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olduğu ve sünek davranış gösterdiği belirlenmiştir. ARG4L birimlerden oluşturulan duvar formunun, bir duvar elemanı oluşturmak için iskelet olarak kullanılabileceği görülmüştür.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ülkemiz başta olmak üzere dünyada pek çok yapıda depreme karşı yeterince dayanıklı olmayan tuğla veya beton blok birimlerden oluşan bölme ve yığma duvarlar mevcuttur. Deprem etkilerinde bölme duvarlarda ciddi hasarlar oluşmakta ve gevrek kesme kırılması ile göçmeler meydana gelebilmektedir. Bu çalışma, deprem etkilerinde mevcut hasarlı duvarların çimento esaslı tekstil kompozitlerle iyileştirme yöntemlerinin deneysel ve nümerik olarak geliştirilmesi ve bölme duvarlara sünek davranış kazandıracak yenilikçi bölme duvar tasarımı üzerine araştırmaları kapsamaktadır. Tüm iyileştirme/güçlendirme yöntemlerinin amacı, beraber veya ayrı ayrı bölme duvarların sünekliğini, yatay yük taşıma kapasitelerini, rijitliklerini ve deprem etkilerinde enerji yutma kapasitelerini arttırmaktır. Bunun için, günümüzde yaygın olarak araştırması yapılan çimento esaslı tekstil kompozitlerin, hasarlı yığma bölme duvarlarda iyileştirme malzemesi olarak kullanım yöntemlerinin geliştirilmesi ve yeni bir duvar birimi oluşturmada kullanımı gibi alanlarda etkileri araştırılıp, avantajları ve eksiklikleri ortaya konulmuştur.

Yaygın kullanılan iki tip bölme duvar üzerinde durulmuştur. Bunlardan biri tuğla duvarlar, diğeri de beton blok duvarlardır. Deprem etkilerinde özellikle duvarların düzlemi içinde görülen ani ve gevrek kesme çatlaklarının çimento esaslı tekstil kompozitlerle iyileştirilmesiyle, hasarlı duvarlar tekrar yük taşıyabilir hale getirilip, duvarlarda sünek davranış elde edilmiştir. Bunun için öncelikle, tuğla ve beton blok duvarlarda kullanılan malzeme özellikleri ve duvarlarda kullanılan S-tip harcın mekanik özelliklerini tanımlamak için üç sıralı tuğla basınç, kayma ve z-şekilli numune testleri yapılmıştır. Daha sonra, tuğla ve beton blok duvarlara farklı eksenel ön basınç yüklemeler altında tekrarlı yatay yükleme testleri yapılarak farklı hasar modları elde edilmiştir. Bu hasar modlarından gevrek diyagonal kesme hasarı elde edilmiş duvarların yüzeyine uygulanan tekstil takviyeli ve PVA kısa fiber içerikli ECC harcın, tekrarlı yatay yük etkisindeki bu hasarlı duvarların yük taşıma kapasitesi, rijitlik ve süneklik değerleri üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur. Yaklaşık aynı boyutlarda 1220x1040x100 mm olan hasarlı beton blok ve tuğla bölme duvarların iyileştirilmesinde bu tekstil takviyeli kompozit malzemenin etkileri karşılaştırılmıştır.

Tekrarlı yatay yükleme testleri uygulanan iyileştirilmiş duvarlarda elde edilen sonuçlara göre tekstil takviyeli kompozitlerle iyileştirme yöntemleri araştırılmıştır. Tüm araştırmalar deneysel ve nümerik olarak gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın sonucuna göre, beton blok duvarda ortaya çıkan yatay derz hasarının onarımında tekstil takviyeli ECC3 harç kullanımı, duvarın kaymadan oluşan kesme dayanımını arttırmasıyla duvarın hasar modunun değişmesini sağlamıştır. Bunun sonucunda duvarda kayma hasarı yerine diyagonal kesme hasarı görülmüştür.

Tuğla duvarlarda ise eksenel ön basınç yükü arttırılarak eğilme ve diyagonal (adım) kesme hasarı elde edilmiştir. Diyagonal kesme hasarına sahip duvarların iyileştirilmesinde duvarın yüzeyinden uygulanan tekstil takviyeli kompozit harç ve eğilme etkisinde duvarın temelle birleşim bölgesinden ayrılıp düzlem içi dönmesini sınırlayan tekstil bazlı ankraj uygulamalarının etkileri ayrı ayrı ve birlikte irdelenmiştir.

Çalışmada tekstil kompozitlerin yapısal birim ve yeni bir sistem oluşturmada kullanım alanı üzerine de değinilmiştir. Tekstil kompozitlerin süneklik özelliklerinden yararlanılarak sünek bir bölme duvar tasarımı ele alınmıştır. Bunun için ilk olarak duvar sistemi için yapısal birim üretimleri ve sayısal analizleri üzerinde çalışılmıştır. Bölüm 5'te duvar birimlerinin üretimi ve duvar formunun oluşturulması ile ilgili detaylara yer verilmiştir. Farklı tekstil malzemeleri kullanılarak çimento esaslı tekstil kompozit malzemeden silindirik yapıda tüp formlar elde edilmiştir. Alkali dayanımlı cam elyaftan (AR-glass) oluşan çimento esaslı tekstil kullanılarak 8 adet 4 tabakalı, 8 adet 6 tabakalı ve PVA tekstil kullanılarak 8 adet 4 tabakalı silindirik tüp birimler üretilmiştir. Bu tüp formlara basınç, çekme ve yarı çevrimsel basınç testleri uygulanmış ve karşılaştırmaları yapılmıştır. Seçilen çimento esaslı 16 adet tekstil kompozit tüp birimler kullanılarak 700x700x100 mm boyutlarında duvar sistemi oluşturulmuş ve duvar sistemine diyagonal çekme testi uygulanmıştır. Kompozit tüp birimler kullanılarak elde edilen duvar sisteminin oldukça sünek davranış gösterdiği ve enerji yutma kapasitesinin tek bir birimden elde edilen enerji yutma kapasitesinin 49 katına ulaştığı sonucu çıkarılmıştır. Aynı zamanda, diyagonal çekme testi sonucunda tuğla bölme duvarlarda oluşan ani ve gevrek diyagonal kesme hasarı, TRCC tüp birimlerden oluşan duvar sisteminde tekstil kompozit birimlerin etrafından ilerleyerek oluşmuştur. Çimento esaslı tekstil kompozit birimlerden oluşan tüp birimler, diyagonal basınç yükü uygulandığı esnada eğilmeye çalışarak, duvar sistemi

oldukça sünek davranış göstermiştir. Duvarda oluşan diyagonal kesme çatlağının ilerleme yolu uzamıştır. Bu avantajlı özellikleri dikkate alındığında duvar formu olarak kullanılmak üzere gelecekte geliştirilmeye açık bir konudur.

Tekrarlı yükler altında hasarlı bölme duvarlarının çimento esaslı tekstil kompozitlerle iyileştirme tekniklerinin deneysel ve nümerik olarak geliştirilmesinde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Yapısal birim oluşturmada kullanılan ağ (mesh) aralıkları oldukça düşük tekstil malzemesi yerine hasarlı duvar iyileştirmesinde kullanılan tekstil malzemesi, ağ aralığı ve çekme dayanımı oldukça yüksek olan bazalt tekstil malzemesi olarak seçilmiştir. Hasar görmüş duvarlarda güçlendirme yapıldıktan sonra süneklik elde edebilmek için yüksek ağ aralıklı tekstil takviyesiyle birlikte ECC harçta PVA kısa fiber kullanılmıştır. Hasarlı duvar yüzeylerine uygulanan bazalt teskil takviyeli PVA fiber içerikli ECC harcının beton blok duvarlarla tuğla duvarlara göre daha iyi bağ dayanımı ve aderans gösterdiği görülmüştür. Hasarlı tuğla duvar yüzeyine uygulanan tekstil takviyeli kompozit malzemenin tekrarlı yükler altında duvar yüzeyinden ayrıştığı görülmüştür.
- Beton blok ve tuğla duvarlarda uygulanan farklı eksenel ön basınç yüklemeler ile hasar modu değiştirilmiştir. Düşük eksenel ön basınç uygulandığında tekrarlı yatay yükler altında duvarlarda temelle birleşim bölgelerinden kırılma, düzlem içi dönme ve kayma gözlenirken, yüksek eksenel ön basınç değerlerinde tekrarlı yük uygulandığından diyagonal kesme kırılmaları oluşmuştur.
- Tuğla ve beton blok duvarlarda kullanılan harçlar aynı olup, S-tip harçtır. Harcın mekanik özelliklerini, arayüz bağ dayanımını ve kırılma enerjilerini elde etmek için duvar bileşenleri kullanılarak yapılan testlerden elde edilen sonuçlar sonlu eleman modellemelerinde lineer olmayan analizlerde kullanılmıştır. Analizlerde mod I (açılma) ve mod II (kayma) kırılmasının bileşkesini içeren karışık mod modeli kullanılmıştır. Duvar bileşenleri üzerinden yapılan deney ve sonlu eleman analizleri örtüşerek, benzer malzeme ve harç ile oluşturulan duvar numunelerinde hasar oluşumu ve duvarın mekanik özellikleri hakkında bilgi sağlanılmıştır.
- Duvar mekanik özellikleri belirlendikten sonra, duvar elemanlarında oluşabilecek hasar tipleri farklı eksenel ön basınç yüklemeler altında yapılan

tekrarlı yatay yükleme testleriyle tespit edilmiş olup, tekstil takviyeli kompozit harçlarla iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir.

- Diyagonal kesme hasarına sahip duvarların iyileştirilmesinde duvar yüzeyinde tekstil bazlı kompozit malzeme kullanımının, duvarın diyagonal kesme kapasitesini arttırdığı ve duvarın daha zayıf noktası olan duvarın temelle birleşim bölgesinde hasarın oluşmasına sebep olduğu görülmüştür. Bu durum, duvar yüzeyine uygulanan tekstil malzemesinin temele ankrajı yapılarak birlikte çalışmasının sağlanması gerektiğini göstermiştir.
- Temele tekstil bazlı ankraj yapılarak hasarlı duvar yüzeyine uygulanan tekstil takviyeli (hibrit) kompozit malzemesi ile iyileştirilmiş duvarın yatay yük taşıma kapasitesi ve düktilite değeri, duvarın hasar görmemiş halindeki yatay yük taşıma kapasitesinden ve düktilite değerinden daha yüksek olarak elde edilmiştir.
- Tekstil ve kısa fiberlerin birlikte kullanıldığı çimento esaslı kompozitler ile iyileştirilmiş duvarlara deprem gibi yatay yüklerde duvarın hasar görmemiş halinden daha yüksek yük taşıma kapasitesi ve sünek davranış kazandırılmıştır. Özellikle, bu çalışmadan beton blok bölme duvarların tekstil takviyeli ECC (PVA fiber katkılı) harçlarla daha uyumlu çalıştığı ve aderansının tuğla duvarlara göre daha yüksek olduğu sonucu çıkarılır.
- Ayrıca, bu çalışmada hasarlı duvarlarda tekstil takviyeli ECC (%1 PVA içerik) kullanılarak geliştirilen iyileştirme yöntemleri, Konthesingha ve diğ. (2013) çalışmalarında kullanılan CFRP şeritlerle geliştirilmiş iyileştirme yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, tekstil takviyeli ECC'lerin hasarlı duvarları iyileştirmede FRP ile uygulanan iyileştirme yöntemlerine iyi bir alternatif olabileceği gösterilmiştir.
- Deneylerde kullanılan beton blok duvar ve tuğla duvarların mikro modelleri Abaqus programında oluşturulmuştur. Duvar birimleri ile yapılan deneylerin sonucu kullanılarak sonlu eleman modellerinde malzeme özelliklerini tanımlamak için beton hasar-plastisite modeli, duvar birimi-harç arayüz mekanik özelliklerini tanımlamak için Benzeggagh-Kenane bileşke mod kuralı kullanılmıştır. İyileştirilmiş duvar modelleri için tuğla ve beton blok duvarların çevrimsel yükleme deney sonuçlarından yararlanılarak mikro modeller geliştirilmiştir. Sayısal olarak geliştirilen modellerden elde edilen sonuçların

deney sonuçları ile kalibrasyonu yapılmıştır. Geliştirilen sayısal analiz sonuçlarıyla duvarların ve iyileştirme malzemesi olarak kullanılan hibrit kompozitteki gerilme ve hasar dağılımları incelenmiştir. Hibrit kompozit malzemedeki gerilme değerlerinin hasarlı duvar elemanına göre daha yüksek çıkması, duvar yük taşıma kapasitesinin artması ve kesme (gevrek) hasarının önlenmesi, yatay yüklere maruz duvarlarda iyileştirme malzemesinin etkili çalıştığını göstermiştir.

Var olan ve hasarlı bölme duvarların iyileştirilmesinde etkili çalıştığı görülen tekstil takviyeli çimento esaslı kompozitlerin, diğer bölme duvar elemanlarının iyileştirme/güçlendirme yöntemlerine (betonarme mantolama, gergi demiriyle güçlendirme, betonarme hatıllarla veya çelik profillerle güçlendirme, FRP kompozitlerle güçlendirme) alternatif olarak kullanılabileceği görülmektedir. Depreme karşı hasar görmemiş bölme duvarları güçlendirerek taşıyıcı eleman haline dönüştürülmesinden farklı olarak, tekstil takviyeli çimento esaslı kompozit harçlarla geliştirilen iyileştirme yöntemleriyle hasar görmüş bölme duvarlarını tekrar depreme karşı yatay yük taşıyabilir duruma getirerek, süneklik kazandırılabilirdiği sonucuna ulaşılmaktadır. Bu çalışmada duvar iyileştirilmesinde kullanılan tekstil ve PVA fiber takviyeli çimento esaslı kompozitin, tuğla duvar iyileştirilmesinde tekrarlı yatay yükleme esnasında duvar yüzeyinden ayrıldığı görülmüştür. Bu sebeple, tuğla duvarlarla daha iyi aderans gösteren tekstil takviyeli hibrit kompozit iyileştirme malzemesi üzerine çalışmaların geliştirilmesi önerilebilir.

Tekstil kompozitlerle yapısal birimler oluşturma alanında tekrarlı yükler altında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Farklı tekstil tipleri ve tabaka sayısına sahip 100 mm uzunlukta TRCC tüp birimlere uygulanan basınç, çekme ve yarı çevrimsel basınç testleri sonucunda numunelerde farklı hasar tipleri meydana gelmiştir. PVA4L'nin hasar modu tabakaların delaminasyonu şeklindeyken, ARG4L ve ARG6L'nin hasar modu radyal çatlaklar şeklinde oluşmuştur. TRCC silindirik tüp birimlerin hasar modu yarı-kırılgan olarak tanımlanabilir.
- PVA4L, PVA'nın yüksek plastik yer değiştirme kapasiteleri nedeniyle diğer tüp numunelere göre daha yüksek düşey yer değiştirme kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Yüksek şekil değiştirme kabiliyetine rağmen PVA tekstilin ağ

aralıklarının ihmal edilir düzeyde olması, harcın ağ aralıklarından geçmesinin ve her lifi çevrelemesinin güçlüğü sebebiyle görülen delaminasyon, PVA4L tüp birimleri kullanılarak oluşturulacak duvar sistemi için dezavantaj olarak görülmüştür.

- TRCC tüplerin sayısal ve deneysel sonuçlarına dayanarak harcın özellikleri temel olarak maksimum yükü ve ilk elastik tepkiyi belirler. TRCC tüp numunelerin pik sonrası davranışı esas olarak tekstil materyalleri tarafından kontrol edilir. Tekstil malzemesinin çatlak köprüleme mekanizması, tüp birimlerin plastik şekil değiştirme kabiliyetini arttırmaktadır.
- TRCC tüp numunelerin katman sayısı, cidar kalınlıkları, tekstil malzemesinin türü ve harç özellikleri numunelerin enerji yutma kapasiteleri, süneklik ve rijitliklerinde önemli rol oynadığı görülmüştür. Bu bağlamda, tekstil tabaka sayısının veya tüp numunelerinin cidar kalınlıklarının artmasıyla yer değiştirme kapasitelerinde azalma görülürken, rijitlik, absorbe edilen enerji ve toplam enerjide artış gözlenmiştir. ARG6L tüp numuneler ARG4L numunelere göre cidar kalınlığının ve tabaka sayısının artmasıyla daha kırılğan davranış sergilemiştir.
- Silindirik TRCC tüp birimlerden oluşturulan duvar sistemi için ARG4L birimler kullanılmıştır. ARG4L birimlerin bir araya getirilerek yarı çevrimsel diyagonal basınç yükü altında gerçekleştirilen test sonucunda ARG4L birimlerin birbirine yük aktarımı sırasındaki hasar oluşumu ve yer değiştirme kapasiteleri irdelenmiştir. Duvar formunun enerji yutma kapasitesi tek bir ARG4L biriminin enerji yutma kapasitesinin 49 katı bulunmuştur. Yüksek sünek davranış elde edildiği, fakat yük taşıma kapasitesinin düşük kaldığı gözlenmiştir.
- Bu çalışma, ARG4L tüp birimlerin bir arada kullanılmasıyla çok yüksek enerji yutma kapasitesine sahip sünek davranış gösteren duvar elemanları oluşturulabileceğini göstermiştir. ARG4L birimlerden oluşturulan duvar formu, bir duvar elemanı oluşturmak için iskelet olarak kullanılabilir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre, tekstil takviyeli çimento esaslı kompozitlerle geliştirilen yapısal birim ve bu yapısal birimlerle oluşturulan formun duvar elemanına dönüştürülebilmesi üzerine çalışmaların yapılması önerilebilir.

KAYNAKLAR

- 6306 sayılı Kanunun Uygulama Yönetmeliği Ek-2: Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar (RYTEİE).** (2019). *T. C. Resmi Gazete*, 30688, 16 Şubat 2019.
- ABAQUS** (2014). V. 6.14 Analysis user's manual online documentation. Dassault Systèmes Simulia Corp, Providence.
- Al-Gemeel, A. N., & Zhuge, Y.** (2018). Experimental investigation of textile reinforced engineered cementitious composite (ECC) for square concrete column confinement. *Construction and Building Materials*, 174, 594-602.
- Al-Gemeel, A. N., Zhuge, Y., & Youssf, O.** (2019). Experimental investigation of basalt textile reinforced engineered cementitious composite under apparent hoop tensile loading. *Journal of Building Engineering*, 23, 270-279.
- Al-Saadi, N. T. K., Al-Mahaidi, R., & Abdouka, K.** (2016). Bond behaviour between NSM CFRP strips and concrete substrate using single-lap shear testing with cement-based adhesives. *Australian Journal of Structural Engineering*, 17(1), 28-38.
- Alvarez-Perez, J., Chavez-Gomez, J. H., Teran-Torres, B. T., Mesa-Lavista, M., & Balandrano-Vazquez, R.** (2020). Multifactorial behavior of the elastic modulus and compressive strength in masonry prisms of hollow concrete blocks. *Construction and Building Materials*, 241, 118002.
- American Concrete Institute – Committee 440** (2002). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI 440.2R-02, ACI, Farmington Hills, MI, USA.
- American Society for Testing and Materials** (1992). ASTM C109, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement. *Annual Book of ASTM Standards*.
- Andreotti, G., Graziotti, F., & Magenes, G.** (2018). Detailed micro-modelling of the direct shear tests of brick masonry specimens: the role of dilatancy. *Engineering Structures*, 168, 929-949.
- Annual Book of ASTM Standards**, American Society for Testing and Materials C270 (1951), Revision 19A, May 1, 2019. *Standard Specification for Mortar for Unit Masonry*. doi: 10.1520/C0270-19AE01
- Armaanidis, V. I.** (1998). *A model for the shear strength of rough rock discontinuities under low normal stress* (Doctoral dissertation, M. Sc. dissertation, School of Civil Engineering and Geosciences, Univ. of Newcastle, Upon Tyne, UK).

- Arslan, M. E., & Celebi, E.** (2019). An experimental study on cyclic behavior of aerated concrete block masonry walls retrofitted with different methods. *Construction and Building Materials*, 200, 226-239.
- ASTM C140** (2007). Standard test methods for sampling and testing concrete masonry units and related units. *PA: American Society of Testing and Materials*, Philadelphia.
- ASTM** (2013b). ASTM C67-13, Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile. West Conshohocken, PA: ASTM.
- ASTM** (2002). ASTM E 519-02, Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- Barbosa, C. S., Lourenço, P. B., & Hanai, J. B.** (2010). On the compressive strength prediction for concrete masonry prisms. *Materials and Structures*, 43(3), 331-344.
- Basili, M., Vestroni, F., & Marcari, G.** (2019). Brick masonry panels strengthened with textile reinforced mortar: experimentation and numerical analysis. *Construction and Building Materials*, 227, 117061.
- Bauchmoyer, J., David, D. S., Mehre, H., Dey, V., & Mobasher, B.** (2017, September). Pultruded Textile Reinforced Concrete Structural Shapes. In *International Conference on Strain-Hardening Cement-Based Composites* (pp. 762-769). Springer, Dordrecht.
- Benzeggagh, M. L., & Kenane, M. J. C. S.** (1996). Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus. *Composites science and technology*, 56(4), 439-449.
- Bernat-Maso, E., Escrig, C., Aranha, C. A., & Gil, L.** (2014). Experimental assessment of Textile Reinforced Sprayed Mortar strengthening system for brickwork wallettes. *Construction and Building Materials*, 50, 226-236.
- Bramhuber, W. (Ed.).** (2006). *Report 36: textile reinforced concrete-state-of-the-art report of RILEM TC 201-TRC* (Vol. 36). RILEM publications.
- Brencich, A., Corradi, C., Gambarotta, L., Mantegazza, G. ve Sterpi, E.** (2002). Compressive Strength of Solid Clay Brick Masonry under Eccentric Loading. *Proc. Brit. Mason. Soc.(UK)*, 9(11), 37-46.
- Bui, T. L., Larbi, A. S., Reboul, N., & Ferrier, E.** (2015). Shear behaviour of masonry walls strengthened by external bonded FRP and TRC. *Composite Structures*, 132, 923-932.
- Bui, T. L., Nguyen, X. H., & Larbi, A. S.** (2017, October). In-Plane Behavior of Seismically Damaged Clay Masonry Walls Repaired with External TRC. In *Congrès International de Géotechnique Ouvrages Structures* (pp. 925-934). Springer, Singapore.
- Caggegi, C., Lanoye, E., Djama, K., Bassil, A., & Gabor, A.** (2017). Tensile behaviour of a basalt TRM strengthening system: Influence of mortar and reinforcing textile ratios. *Composites Part B: Engineering*, 130, 90-102.

- Canbay, E., Ersoy, U., & Ozcebe, G.** (2003). Contribution of reinforced concrete infills to seismic behavior of structural systems. *ACI Structural Journal*, 100(5), 637-643.
- Churilov, S., & Dumova-Jovanoska, E.** (2011). Experimental evaluation of in-plane shear behavior of unreinforced and strengthened brick masonry walls. *7th International Conference AMCM2011*, Poland.
- Colombo, I. G., Magri, A., Zani, G., Colombo, M., & Di Prisco, M.** (2013). Erratum to: Textile Reinforced Concrete: experimental investigation on design parameters. *Materials and structures*, 46(11), 1953-1971.
- CSA S304.1-04** (2004). Design of Masonry Structures. *Canadian Standards Association*, Mississauga, Ontario, Canada.
- Daskiran, E. G., Daskiran, M. M., & Gencoglu, M.** (2016). Development of fine grained concretes for textile reinforced cementitious composites. *Computers and Concrete*, 18(2), 279-295.
- Daşkıran, E. G.** (2018). *Dayanım ve dayanıklılık açısından yüksek performanslı çimento esaslı tabakalı kompozitlerin geliştirilmesi* (doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi).
- Deng, M., Dong, Z., & Ma, P.** (2019). Cyclic loading tests of flexural-failure dominant URM walls strengthened with engineered cementitious composite. *Engineering Structures*, 194, 173-182.
- Dharmasena, K. P., Wadley, H. N., Xue, Z., & Hutchinson, J. W.** (2008). Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading. *International Journal of Impact Engineering*, 35(9), 1063-1074.
- Dizhur, D., & Ingham, J. M.** (2013). Diagonal tension strength of vintage unreinforced clay brick masonry wall panels. *Construction and Building Materials*, 43, 418-427.
- Du, E., Yan, Y., & Guo, J.** (2017). Mechanical property test of polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced concrete. *Chemical Engineering Transactions*, 62, 727-732.
- Durelli, A. J., & Lin, Y. H.** (1986). Stresses and displacements on the boundaries of circular rings diametrically loaded.
- Durgun, İ.** (2014). El Yatırma Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi. *7. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu*. Ankara: Çankaya Üniversitesi, Mayıs 15-16.
- Eker, A.** (2014). *Plastik Matrisli Kompozitler* [PowerPoint slides]. Retrieved from <https://docplayer.biz.tr/32390798-Plastik-matrisli-kompozitler-prof-dr-aysegul-akdogan-eker.html>
- European Committee for Standardization (CEN).** (2000). Determination of shear strength including damp proof course. *European norm for method of test for masonry units: Part 4*. EN 1052-4, Brussels.
- European Committee for Standardization** (2002). *Methods of test for masonry (bölüm 3): Determination of initial shear strength*. BS EN 1052-3:2002/A1:2007.

- Fajuyitan, O. K., Sadowski, A. J., Wadee, M. A., & Rotter, J. M.** (2018). Nonlinear behaviour of short elastic cylindrical shells under global bending. *Thin-Walled Structures*, 124, 574-587.
- Fan, H., Yang, W., & Zhou, Q.** (2011). Experimental research of compressive responses of multi-layered woven textile sandwich panels under quasi-static loading. *Composites Part B: Engineering*, 42(5), 1151-1156.
- FEMA** (2007). FEMA 461, Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components.
- Ferrara, G., Caggegi, C., Gabor, A., & Martinelli, E.** (2019). Experimental Study on the Adhesion of Basalt Textile Reinforced Mortars (TRM) to Clay Brick Masonry: The Influence of Textile Density. *Fibers*, 7(12), 103.
- Fortes, E., Parsekian, G., Camacho, J., & Fonseca, F.** (2017). Compressive strength of masonry constructed with high strength concrete blocks Resistência a compressão da alvenaria estrutural com blocos de concreto de alta resistência. *IBRACON Structures and Materials Journal*, 10(6), 1273-1319. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952017000600008>
- Fowler, D. W.** (2009). Repair materials for concrete structures. In N. J. Delatte (Ed.), *Failure, distress and repair of concrete structures* (3th ed., pp. 194-207). Woodhead Publishing.
- Gabor, A., Ferrier, E., Jacquelin, E., & Hamelin, P.** (2006). Analysis and modelling of the in-plane shear behaviour of hollow brick masonry panels. *Construction and building Materials*, 20(5), 308-321.
- Gencoglu, M.** (2009). Effect of fabric types on the impact behavior of cement based composites in flexure. *Materials and structures*, 42(1), 135-147.
- Ghazali, M. Z., Riddington, J. R.** (1988). Simple test method for masonry shear strength. *Proceedings of the institution of civil engineers*, 85(3), 567-574. <https://doi.org/10.1680/iicep.1988.454>
- Gumaste, K. S., Rao, K. N., Reddy, B. V., & Jagadish, K. S.** (2007). Strength and elasticity of brick masonry prisms and wallettes under compression. *Materials and structures*, 40(2), 241-253.
- Gür, M.** (2017). *Çimento esaslı kompozit plakalarla güçlendirilmiş bölme duvarlarının kayma dayanımının belirlenmesi* (yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi). <https://polen.itu.edu.tr/handle/11527/15740>
- Han, L. H., Tao, Z., & Wang, W. D.** (2009). Advanced composite and mixed structures-testing, theory and design approach. China Science Press.
- Hegger, J., & Voss, S.** (2008). Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete. *Engineering structures*, 30(7), 2050-2056.
- Ismail, M., Muhammad, B., Yatim, J. M., Noruzman, A. H., & Soon, Y. W.** (2011). Behavior of concrete with polymer additive at fresh and hardened states. *Procedia engineering*, 14, 2230-2237.

- Jafari, S., Rots, J. G., & Esposito, R.** (2020). Core testing method to assess nonlinear shear-sliding behaviour of brick-mortar interfaces: A comparative experimental study. *Construction and Building Materials*, 244, 118236.
- Jiang, J., Jiang, C., Li, B., & Feng, P.** (2019). Bond behavior of basalt textile meshes in ultra-high ductility cementitious composites. *Composites Part B: Engineering*, 174, 107022.
- Khalaf, F. M.** (2005). New test for determination of masonry tensile bond strength. *Journal of materials in civil engineering*, 17(6), 725-732.
- Kong, K., Mesticou, Z., Michel, M., Larbi, A. S., & Junes, A.** (2017). Comparative characterization of the durability behaviour of textile-reinforced concrete (TRC) under tension and bending. *Composite Structures*, 179, 107-123.
- Konthesingha, K. M. C., Masia, M. J., Petersen, R. B., Mojsilovic, N., Simundic, G., & Page, A. W.** (2013). Static cyclic in-plane shear response of damaged masonry walls retrofitted with NSM FRP strips—An experimental evaluation. *Engineering Structures*, 50, 126-136.
- Kouris, L. A. S., & Triantafillou, T. C.** (2018). State-of-the-art on strengthening of masonry structures with textile reinforced mortar (TRM). *Construction and Building Materials*, 188, 1221-1233.
- Koutas, L. N., Tetta, Z., Bournas, D. A., & Triantafillou, T. C.** (2019). *Strengthening of concrete structures with textile reinforced mortars: state-of-the-art review* (Doctoral dissertation, American Society of Civil Engineers).
- Lepech, M., Popovici, V., Fischer, G., Li, V. C., & Du, R.** (2010). Improving concrete for enhanced pipeline protection. *Pipeline and Gas journal*, 237(3).
- Li, V. C.** (1993). From micromechanics to structural engineering-the design of cementitious composites for civil engineering applications.
- Li, V. C.** (2003). On engineered cementitious composites (ECC). *Journal of advanced concrete technology*, 1(3), 215-230.
- Lieboldt, M., Helbig, U., & Engler, T.** (2006). Textile reinforced concrete multilayer composite pipes. *Proceedings of the ICTRC*, 369-378.
- Lignola, G. P., Caggegi, C., Ceroni, F., De Santis, S., Krajewski, P., Lourenço, P. B., ... & Zuccarino, L.** (2017). Performance assessment of basalt FRCM for retrofit applications on masonry. *Composites Part B: Engineering*, 128, 1-18.
- Lignola, G. P., Prota, A., & Manfredi, G.** (2009). Nonlinear analyses of tuff masonry walls strengthened with cementitious matrix-grid composites. *Journal of Composites for Construction*, 13(4), 243-251.
- Lourenço, P. B., Barros, J. O., & Oliveira, J. T.** (2004). Shear testing of stack bonded masonry. *Construction and Building Materials*, 18(2), 125-132.

- Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., & Oñate, E.** (1989). A plastic-damage model for concrete. *International Journal of solids and structures*, 25(3), 299-326.
- Luccioni, B., & Rougier, V. C.** (2010). Shear behaviour of brick–mortar interface in CFRP retrofitted or repaired masonry. *International journal of mechanical sciences*, 52(4), 602-611.
- Magenes, G., & Morandi, P.** (2008, July). Some issues on seismic design and assessment of masonry buildings based on linear elastic analysis. In *Proceedings of the Michael John Nigel Priestley Symposium* (pp. 83-94). Pavia: Iuss Press.
- Mallick, P. K. (Ed.).** (1997). *Composites engineering handbook*. CRC Press.
- Martins, A., Vasconcelos, G., Fangueiro, R., & Cunha, F.** (2015). Experimental assessment of an innovative strengthening material for brick masonry infills. *Composites Part B: Engineering*, 80, 328-342.
- Mazloomi, M. S., Ranjbar, M., Boldrin, L., Scarpa, F., Patsias, S., & Ozada, N.** (2018). Vibroacoustics of 2D gradient auxetic hexagonal honeycomb sandwich panels. *Composite Structures*, 187, 593-603.
- McNary, W. S., & Abrams, D. P.** (1985). Mechanics of masonry in compression. *Journal of Structural Engineering*, 111(4), 857-870.
- Mehl, R.** (2013). Samples of the reinforcement scrim made of thin carbon fibers. *BFT International Magazine*, 12/2013. Erişim adresi http://www.bft-international.com/en/artikel/bft_Textile-reinforced_concrete_roof_shells_with_a_component_thickness_of_just_1856524.html
- Meli, R.** (1973, June). Behaviour of masonry walls under lateral loads. In *Fifth world conference on earthquake engineering*.
- Mobasher, B.** (2012). Mechanics of Fiber and Textile Reinforced Cement Composites (1st ed.). *Engineering & Technology, Physical Sciences*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11181>.
- Mobasher, B., Peled, A., & Pahilajani, J.** (2006). Distributed cracking and stiffness degradation in fabric-cement composites. *Materials and structures*, 39(3), 317-331.
- Mohamad, G., Lourenço, P. B., & Roman, H. R.** (2007). Mechanics of hollow concrete block masonry prisms under compression: Review and prospects. *Cement and Concrete Composites*, 29(3), 181-192.
- Mohammed, B. S., Aswin, M., Beatty, W. H., & Hafiz, M.** (2016, February). Longitudinal shear resistance of PVA-ECC composite slabs. In *Structures* (Vol. 5, pp. 247-257). Elsevier.
- MSJC, T.** (2011). Masonry Standard Joint Committee's (MSJC) Book-Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures. *Containing TMS*, 402.
- Mustafaraj, E., & Yardim, Y.** (2019). Retrofitting damaged unreinforced masonry using external shear strengthening techniques. *Journal of Building Engineering*, 26, 100913.

- Nematollahi, B., Sanjayan, J., & Ahmed Shaikh, F. U.** (2015). Tensile strain hardening behavior of PVA fiber-reinforced engineered geopolymer composite. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(10), 04015001.
- Niasar, A. N., Alaei, F. J., & Zamani, S. M.** (2020). Experimental investigation on the performance of unreinforced masonry wall, retrofitted using engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 239, 117788.
- Özel, C., Öz, B.** (2016). Lif Boyu ve Su/Çimento Oranının Ultra Yüksek Dayanımlı Fiber Katkılı Betonların Basınç Dayanımlarına Etkileri. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi (CFD)*, Cilt 37, No. 4.
- Özkul, M. H., & Taşdemir, M. A.** (2003). Onarım Harçlarının Temel Özellikleri. *Türkiye Mühendislik Haberleri*. Sayı 426-2003/4, 142-146.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S.** (2009). Tungsten mine waste geopolymeric binder: Preliminary hydration products investigations. *Construction and Building Materials*, 23(1), 200-209.
- Padalu, P. K. V. R., Singh, Y., & Das, S.** (2018). Efficacy of basalt fibre reinforced cement mortar composite for out-of-plane strengthening of unreinforced masonry. *Construction and Building Materials*, 191, 1172-1190.
- Papanicolaou, C. G., & Papantoniou, I. C.** (2010). Mechanical behavior of textile reinforced concrete (TRC)/concrete composite elements. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 8(1), 35-47.
- Papanicolaou, C., Triantafillou, T., & Lekka, M.** (2011). Externally bonded grids as strengthening and seismic retrofitting materials of masonry panels. *Construction and Building Materials*, 25(2), 504-514.
- Pascal, S., Alliche, A., & Pilvin, P.** (2004). Mechanical behaviour of polymer modified mortars. *Materials Science and Engineering: A*, 380(1-2), 1-8.
- Paulay, T., & Priestley, M. N.** (1992). Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings.
- Peled, A., & Bentur, A.** (2003). Fabric structure and its reinforcing efficiency in textile reinforced cement composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(2), 107-118.
- Peled, A., Sueki, S., & Mobasher, B.** (2006). Bonding in fabric-cement systems: effects of fabrication methods. *Cement and concrete research*, 36(9), 1661-1671.
- Petry, S., & Beyer, K.** (2015). Limit states of modern unreinforced clay brick masonry walls subjected to in-plane loading. *Bulletin of earthquake engineering*, 13(4), 1073-1095.
- Raof, S. M., Koutas, L. N., & Bournas, D. A.** (2017). Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams. *Construction and Building Materials*, 151, 279-291.

- Ravula, M. B., & Subramaniam, K. V.** (2017). Experimental investigation of compressive failure in masonry brick assemblages made with soft brick. *Materials and Structures*, 50(1), 1-11.
- Reboul, N., Mesticou, Z., Larbi, A. S., & Ferrier, E.** (2018). Experimental study of the in-plane cyclic behaviour of masonry walls strengthened by composite materials. *Construction and Building Materials*, 164, 70-83.
- Reboul, N., Larbi, A. S., & Ferrier, E.** (2018). Two-way bending behaviour of hollow concrete block masonry walls reinforced by composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 137, 163-177.
- Riddington, J. R., & Ghazali, M. Z.** (1988). Shear strength of masonry walls. *Brick and Block Masonry* (8th IBMAC, Vol. 1, pp. 548-558) London, Elsevier Applied Science.
- Riddington, J. R., & Jukes, P.** (1994). A masonry joint shear strength test method. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 104(3), 267-274.
- Salmanpour, A. H., Mojsilović, N., & Schwartz, J.** (2015). Displacement capacity of contemporary unreinforced masonry walls: an experimental study. *Engineering Structures*, 89, 1-16.
- Sarangapani, G., Venkatarama Reddy, B. V., & Jagadish, K. S.** (2005). Brick-mortar bond and masonry compressive strength. *Journal of materials in civil engineering*, 17(2), 229-237.
- Sarıkaya, E.** (2019). *Doğal fiber takviyeli kompozit üretimi ve mekanik özelliklerinin tespiti* (doktora tezi, Pamukkale Üniversitesi). <http://acikerisim.pau.edu.tr:8080/xmlui/handle/11499/26917>
- Schneider, H. N., & Bergmann, I.** (2008). The application potential of textile-reinforced concrete. *Special Publication*, 250, 7-22.
- Shabdin, M., Zargar, M., & Attari, N. K.** (2018). Experimental diagonal tension (shear) test of Un-Reinforced Masonry (URM) walls strengthened with textile reinforced mortar (TRM). *Construction and Building Materials*, 164, 704-715.
- Singh, S. B., & Munjal, P.** (2017). Bond strength and compressive stress-strain characteristics of brick masonry. *Journal of Building Engineering*, 9, 10-16.
- Singhal, V., & Rai, D. C.** (2014). Suitability of half-scale burnt clay bricks for shake table tests on masonry walls. *Journal of materials in civil engineering*, 26(4), 644-657.
- Sinha, B. P.** (1983). Factors affecting the brick/mortar interface bond strength. *International Journal of Masonry Construction*, 3(1), 14-18.
- Soranakom, C., & Mobasher, B.** (2009). Geometrical and mechanical aspects of fabric bonding and pullout in cement composites. *Materials and structures*, 42(6), 765-777.
- Standard, B.** (2005). Eurocode 6, Design of masonry structures. *British Standard Institution*. London.

- Standard, I.** (1998). IS 3495 Part-I: 1992, Methods of tests of burnt clay building bricks–determination of compressive strength (3. Revizyon). *BIS*, New Delhi.
- Sueki, S., Soranakom, C., Mobasher, B., & Peled, A.** (2007). Pullout-slip response of fabrics embedded in a cement paste matrix. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(9), 718-727.
- Şahmaran, M., Özbay, E., Yücel, H. E., Lachemi, M., & Li, V. C.** (2011). Effect of fly ash and PVA fiber on microstructural damage and residual properties of engineered cementitious composites exposed to high temperatures. *Journal of materials in civil engineering*, 23(12), 1735-1745.
- Taşkın, E.** (2015). *Kevlar/karbon elyaf takviyeli lamina kompozitlerde termal şekil değiştirme davranışının incelenmesi* (yüksek lisans tezi, Namık Kemal Üniversitesi).
- Termkhajornkit, P., Nawa, T., Nakai, M., & Saito, T.** (2005). Effect of fly ash on autogenous shrinkage. *Cement and Concrete Research*, 35(3), 473-482.
- Tetta, Z. C., Koutas, L. N., & Bournas, D. A.** (2016). Shear strengthening of full-scale RC T-beams using textile-reinforced mortar and textile-based anchors. *Composites Part B: Engineering*, 95, 225-239.
- Tomaževič, M.** (1999). Earthquake-resistant design of masonry buildings.
- Tomazevic, M.** (1997). Seismic resistance verification of masonry buildings: Following the new trends. In P. Fajfar ve H. Krawinkler (Eds.), *Seismic design methodologies for the next generation of codes*, 323-334.
- Tomazevic, M.** (2000). Seismic redesign of existing stone-masonry buildings. *European Earthquake Engineering*, 14(3), 59-66.
- Triantafillou, T. (Ed.).** (2016). Textile fibre composites in civil engineering. Woodhead Publishing.
- Triantafillou, T. C., Karlos, K., Kapsalis, P., & Georgiou, L.** (2018). Innovative structural and energy retrofitting system for masonry walls using textile reinforced mortars combined with thermal insulation: In-plane mechanical behavior. *Journal of Composites for Construction*, 22(5), 04018029.
- Tysmans, T.** (2010). *Design of anticlastic shells in innovative textile reinforced cement composites*. 995 (doktora tezi). *Vrije Universiteit Brussel*, 996.
- URL-1**<<https://www.kompozitshop.com/karbon-fiber-elyaf-pultruzyon-borular-nasil-uretilir>>, erişim tarihi 20.09.2020.
- Ünal, M. T., & Şimşek, O.** Çimento Harçlarında Optimum Uçucu Kül ve PVA Lif Oranının Belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*.
- Van Der Pluijm, R.** (1993). Shear behaviour of bed joints. In *6th North American Masonry Conference*, 6-9 June 1993, Philadelphia, Pennsylvania, USA (pp. 125-136). Technomic Publ. Co..
- Vasconcelos, G., & Lourenço, P. B.** (2009). In-plane experimental behavior of stone masonry walls under cyclic loading. *Journal of structural engineering*, 135(10), 1269-1277.

- Vermeltfoort, A. T., Martens, D. R. W., & Van Zijl, G. P. A. G.** (2007). Brick–mortar interface effects on masonry under compression. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(11), 1475-1485.
- Vyas, C. V. U., & Reddy, B. V.** (2010). Prediction of solid block masonry prism compressive strength using FE model. *Materials and structures*, 43(5), 719-735.
- Wadley, H. N., Fleck, N. A., & Evans, A. G.** (2003). Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures. *Composites science and technology*, 63(16), 2331-2343.
- Wahalathantri, B. L., Thambiratnam, D. P., Chan, T. H. T., & Fawzia, S.** (2011). A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS. In *Proceedings of the first international conference on engineering, designing and developing the built environment for sustainable wellbeing* (pp. 260-264). Queensland University of Technology.
- Wang, S., & Li, V. C.** (2005, May). Polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites: material design and performances. In *Proc., Int'l Workshop on HPFRCC Structural Applications*, Hawaii.
- Wang, Q., Yi, Y., Ma, G., & Luo, H.** (2019). Hybrid effects of steel fibers, basalt fibers and calcium sulfate on mechanical performance of PVA-ECC containing high-volume fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 97, 357-368.
- Yacila, J., Salsavilca, J., Tarque, N., & Camata, G.** (2019). Experimental assessment of confined masonry walls retrofitted with SRG under lateral cyclic loads. *Engineering Structures*, 199, 109555.
- Yang, E. H., Yang, Y., & Li, V. C.** (2007). Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness. *ACI materials journal*, 104(6), 620.
- Yang, G., Yu, J., & Luo, Y.** (2019). Development and Mechanical Performance of Fire-Resistive Engineered Cementitious Composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(5), 04019035.
- Yao, Y., Bonakdar, A., Faber, J., Gries, T., & Mobasher, B.** (2016). Distributed cracking mechanisms in textile-reinforced concrete under high speed tensile tests. *Materials and Structures*, 49(7), 2781-2798.
- Zhang, S., Richart, N., & Beyer, K.** (2018). Numerical evaluation of test setups for determining the shear strength of masonry. *Materials and Structures*, 51(4), 110.
- Zhang, Z., Qian, S., & Ma, H.** (2014). Investigating mechanical properties and self-healing behavior of micro-cracked ECC with different volume of fly ash. *Construction and Building Materials*, 52, 17-23.
- Zhou, J., Pan, J., & Leung, C. K.** (2015). Mechanical behavior of fiber-reinforced engineered cementitious composites in uniaxial compression. *Journal of materials in civil engineering*, 27(1), 04014111.

EKLER

EK A : Düşey eksen de yarı çevrimsel basınç yüklemesi altında her çevrimde tûp birimlerden elde edilen toplam enerji, geri kazanılan enerji ve açığa çıkan enerji değeri



EK A

Çizelge A.1 : ARG4L için kümülatif enerji.

Çevrim numarası	Maksimum yer değiştirme (mm)	Toplam Enerji (kNmm)	Geri kazanılan enerji (kNmm)	Açığa çıkan enerji (kNmm)
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.35	0.04	0.00	0.04
3	0.68	0.15	-0.06	0.09
4	1.00	0.32	-0.06	0.26
5	1.99	0.66	-0.18	0.48
6	3.07	1.23	-0.18	1.05
7	4.53	1.88	-0.25	1.63
8	7.92	3.90	-1.19	2.71
9	11.38	7.49	-2.73	4.75
10	15.97	12.83	-5.54	7.30
11	20.30	18.49	-7.12	11.37
12	24.51	21.89	-8.35	13.55

Çizelge A.2 : ARG6L için kümülatif enerji.

Çevrim numarası	Maksimum yer değiştirme (mm)	Toplam Enerji (kNmm)	Geri kazanılan enerji (kNmm)	Açığa çıkan enerji (kNmm)
1	0.00	0.02	-0.01	0.01
2	0.15	0.07	-0.04	0.03
3	0.30	0.19	-0.11	0.08
4	0.46	0.37	-0.17	0.20
5	1.60	1.74	-0.82	0.92
6	2.93	4.76	-2.18	2.58
7	4.45	9.36	-4.48	4.88
8	5.69	14.82	-7.12	7.70
9	7.62	22.40	-11.28	11.13
10	9.36	31.40	-16.69	14.70
11	11.08	41.97	-23.71	18.27
12	11.84	52.24	-30.08	22.15
13	14.56	67.36	-41.17	26.19
14	16.16	84.99	-54.33	30.66

Çizelge A.3 : PVA4L için kümülatif enerji.

Çevrim numarası	Maksimum yer değiştirme (mm)	Toplam Enerji (kNmm)	Geri kazanılan enerji (kNmm)	Açığa çıkan enerji (kNmm)
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.01	0.08	-0.03	0.04
3	0.49	0.50	-0.26	0.24
4	0.87	1.14	-0.52	0.62
5	1.29	1.85	-0.86	0.99
6	3.50	4.69	-1.58	3.11
7	6.93	9.84	-2.69	7.15
8	11.54	17.42	-4.61	12.81
9	16.99	27.46	-6.92	20.55
10	23.57	39.42	-10.02	29.40
11	30.42	52.90	-13.59	39.31
12	37.68	67.19	-16.52	50.66
13	45.87	80.20	-18.70	61.50
14	55.53	92.58	-20.83	71.75
15	67.08	104.73	-23.24	81.49



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Didem Dönmez

Doğum Tarihi ve Yeri :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü.
2012, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü.
- **Yükseklisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Yapı Mühendisliği.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Dönmez, D.**, Dönmez, A. A., & Gençoğlu, M. 2020. Mechanical response of textile reinforced cementitious composite tubes under monotonic and cyclic loadings, *Construction and Building Materials*, 251, 118963.
- **Donmez, D.**, Gencoglu, M., & Donmez, A. A. 2019. Experimental assessment of TRC cylindrical tube-shaped units. In *The Tenth International Structural Engineering and Construction Conference, ISEC* (Vol. 6, p. 201).

