

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEKSTİL DONATILI HARÇLAR İLE YIĞMA
ELEMANLARIN GÜÇLENDİRİLMESİ

Mustafa Esat GÜNEŞ

DOKTORA TEZİ

Mimarlık Anabilim Dalı

Yapı Programı

Danışman

Prof. Dr. Zehra Canan GİRGIN

Temmuz, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEKSTİL DONATILI HARÇLAR İLE YIĞMA ELEMANLARIN
GÜÇLENDİRİLMESİ

Mustafa Esat GÜNEŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 06.07.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı, Yapı Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Zehra Canan GİRGİN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Zehra Canan GİRGİN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Alper İLKİ, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Bilge DORAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Bekir Yılmaz PEKMEZCİ, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman KURUŞCU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Zehra Canan GİRGIN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Tekstil Donatılı Harçlar ile Yığma Duvarların Güçlendirilmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Mustafa Esat GÜNEŞ

İmza



*Aileme
ve
biricik eşime*

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca disiplini, bilgi birikimi, rehberliği ve en önemlisi samimiyeti ile danışmanlığın akademik bir vazifenin çok ötesinde olabileceğini örnekleyerek gösteren çok kıymetli hocam Prof. Dr. Zehra Canan GİRGIN'e ne kadar teşekkür etsem azdır. Tez ilerleme toplantılarında yaptıkları yol gösterici öneriler ve motive edici değerlendirmeler ile emin adımlarla ilerleyebilmemde ciddi katkılar sağlayan TİK üyesi değerli hocalarım Doç. Dr. Bekir Yılmaz PEKMEZCİ ve Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman KURUŞCU hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmaların numune üretimi aşamalarında yanımda olarak bana hem maddi hem de manevi destek olan kardeşim Ahmet Abdullatif GÜNEŞ'e; laboratuvar testleri sırasında cihaz kullanımı ve düzeneklerin oluşturulmasındaki yardımları ve değerli dostluğu için Arş. Gör. Hasan Nuri TÜRKMENOĞLU'na ve laboratuvarında görevli tekniker/teknisyen ağabeylerime en içten duygularla teşekkür ederim

Son olarak, iyi dilekleri ve cesaretlendirici sözleriyle daima yanımda olan değerli aileme; gösterdikleri sabır, anlayış ve destekleri için en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Mustafa Esat GÜNEŞ
Karabük, Temmuz 2022

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	3
1.3 Hipotez.....	4
2 TEKSTİL DONATILI HARÇLAR	6
2.1 Tarihsel Gelişim.....	6
2.2 TRM Kompozitlerin Mekanik Özellikleri ve Etkileyen Faktörler.....	8
2.2.1 TRM Kompozitlerde Uygulanan Testler	8
2.3 TRM Tekstilleri.....	18
2.3.1 Lif Tipleri	19
2.3.2 Tekstil Üretim Teknikleri.....	23
2.3.3 Tekstil Yapısının TRM Mekanik Özelliklerine Etkisi	25
2.3.4 Tekstil Kaplamaları	31
2.4 TRM Harçları.....	34
2.4.1 Mineral Katkılar	35
2.4.2 Kısa Kesilmiş Liflerin Etkisi.....	37
2.5 Dayanıklılık.....	38
2.6 TRM'nin Yapısal Davranışa Etkisi.....	43
2.6.1 Düzlem İçi Davranış	44
2.6.2 Düzlem Dışı Davranış	47
3 TRM KUPONLARINDA EĞİLME TESTLERİ	52
3.1 Malzemeler.....	52
3.1.1 Harç Türleri ve Mekanik Özellikleri.....	52
3.1.2 Tekstiller	53
3.2 Eğilme Numunelerinin Hazırlanması.....	55
3.3 Eğilme Test Düzenegi.....	57

3.4 Yaşlandırma Yöntemi	57
3.5 Test Sonuçları	58
3.6 Kırılma Modları ve Mikroskopik Gözlemler	63
3.7 Enerji Kapasiteleri.....	67
4 GÜÇLENDİRİLMİŞ YIĞMA KİRİŞLERDE EĞİLME TESTLERİ	70
4.1 Malzemeler.....	70
4.1.1 Tuğla	70
4.1.2 Harçlar.....	71
4.2 İlk Testler: Triplet Numunelerde Kayma Testleri.....	71
4.3 Yığma Kiriş Numunelerin Hazırlanması	74
4.4 Test Düzenegi	75
4.5 Test Sonuçları ve Değerlendirmesi	77
4.5.1 Referans Numuneler.....	77
4.5.2 GF1 ile Güçlendirilmiş Yığma Kirişler.....	78
4.5.3 GF2 ile Güçlendirilmiş Yığma Kirişler.....	78
4.5.4 BF ile Güçlendirilmiş Yığma Kirişler.....	79
4.5.5 CF1 ile Güçlendirilmiş Yığma Kirişler.....	80
4.5.6 CF2 ile Güçlendirilmiş Yığma Kirişler.....	81
4.5.7 Kırılma Modları	81
4.5.8 Enerji Kapasiteleri.....	83
5 SONUÇ VE ÖNERİLER	86
KAYNAKÇA	88
A YÜK-YERDEĞİŞTİRME EĞRİLERİ	99
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	111

SİMGE LİSTESİ

E_{cr}	İlk Çatlak Enerjisi
E_p	Maksimum Yük Düzeyi Enerjisi
E_u	Maksimum Yutulmuş Enerji
f_b	Basınç Dayanımı
f_e	Eğilme Dayanımı
K_1	Başlangıç Rijitliği
K_2	Pekleşme Rijitliği
K_3	Yumuşama Rijitliği
P_{cr}	İlk Çatlak Yüğü
P_u	Maksimum Yüğü
Δ_{cr}	İlk Çatlak Yerdeğıştirmesi
Δ_p	Maksimum Yüğü Yerdeğıştirmesi
Δ_u	Maksimum Yerdeğıştirme

KISALTMA LİSTESİ

AR	Alkali Resistant (Alkali Dayanımlı)
BF	Basalt Fiber
CF	Carbon Fiber
CH	Calcium Hydroxide [Ca(OH) ₂ , portlandite]
C-S-H	Calcium-Silicate-Hydrate
EBS	Externally Bonded Systems (Harici Yapıştırma Sistemleri)
FA	Fly Ash (Uçucu Kül)
FRC	Fiber Reinforced Concrete (Lif Donatılı Beton)
FRM	Fabric Reinforced Mortar
FRCM	Fabric Reinforced Cementitious Matrix (Kumaş Donatılı Çimentolu Matris)
FRP	Fiber Reinforced Polymer (Lif Donatılı Polimer)
GF	Glass Fiber
HDPE	High Density Polyethylene
MK	Metakaolin
NHL	Natural Hydraulic Lime (Doğal Hidrolik Kireç)
PBO	Poliparafenilen Benzobisokzal
PC	Portland Cement
PE	Polyethylene
PP	Polypropylene
PSP	Polystyrene Peroxide
PVA	Polyvinyl Alchol
SBR	Styrene Butadien Rubber
SF	Silica Fume (Silis Dumanı)
SRG	Steel Reinforced Grout (Çelik Donatılı Sıva Harcı)
TRC	Textile Reinforced Concrete (Tekstil Donatılı Beton)
TRM	Textile Reinforced Mortar (Tekstil Donatılı Harç)
URM	Unreinforced Masonry (Güçlendirilmemiş Yığma)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. 1	Deprem kaynaklı ölümlerin nedenlerinin dağılımı [1].....	1
Şekil 2. 1	(a) Tekstil donatılı beton tekne-J.S. Lambot [5], (b) Hangar in Orvieto-P.L.Nervi[6]	7
Şekil 2. 2	(a), (b) Lif esaslı donatı çubukları,cam ve bazalt lif [7], [8], (c) Karbon FRP kumaş [9]	7
Şekil 2. 3	FRP ve TRM kupon çekme davranışının karşılaştırılması [12]	9
Şekil 2. 4	Tek eksenli çekme testi düzeneği [22]	10
Şekil 2. 5	RILEM TC 232-TDT tarafından önerilen eksenel çekme düzeneği ve minimum numune boyutları [24]	10
Şekil 2. 6	Eksenel çekme testinde TRM kompozitinin davranışı [30]	11
Şekil 2. 7	Sıkarak kenetleme test düzeneği [32].....	12
Şekil 2. 8	Kenet halkası test düzeneği [33]	12
Şekil 2. 9	Farklı takviye oranlarındaki TRM kompozitlerin mekanik davranışı [34]	13
Şekil 2. 10	TRM kompozitlerin eğilme testlerinde karşılaşılan göçme biçimleri [41] ..	14
Şekil 2. 11	Eğilme testinde TRM kupon davranışına örnek [38]	14
Şekil 2. 12	Tabaka adedi ve göz açıklığının eğilme davranışına etkisi [39]	15
Şekil 2. 13	Tekstil yapısındaki değişikliklerin eğilme performansına etkisi [35]	15
Şekil 2. 14	RILEM tarafından önerilen yüzeye aderans testi düzeneği [52]	16
Şekil 2. 15	Yüzeye yapışma testlerindeki olası kırılma modları [25]	17
Şekil 2. 16	Çeşitli yapay lifli tekstiller: a) bazalt, b) karbon, c) cam, d) PBO [56]	18
Şekil 2. 17	(a) Tek doğrultulu tekstil [20], (b) çok doğrultulu tekstil [57].....	18
Şekil 2. 18	Doğal lifli bazı tekstiller: a) jüt, b) sisal, c)kenevir, d) keten [55]	19
Şekil 2. 19	3D tekstil örneği [59]	19
Şekil 2. 20	Lif elastisite modülünün çimentolu matris ile aderansa etkisi [62].....	22
Şekil 2. 21	Farklı elastisite modüllü liflerle takviye edilmiş kompozitlerin çekme davranışı [63].....	22
Şekil 2. 22	Demet lif yoğunluğu ve matrise nüfuz etme durumu a)HDPE, b)Kevlar [65]	23
Şekil 2. 23	a) Karbon lif demeti ve çeperler ile sınırlı matris nüfuziyeti, b) Karbon TRM ile karbon tekstilin çekme davranışının karşılaştırılması [66]	23

Şekil 2. 24 (a)Dokuma kumaş yapısı, (b) Leno dokuma tekniği, (c) atkılı örme tekniği, (d) çözgümlü örme tekniği, (e) yapıştırma tekniği, (f) dokusuz tekstil yapısı [11]	25
Şekil 2. 25 Çimentolu matris içinde a) dokuma tekstil [67], b) örme tekstil [68]	26
Şekil 2. 26 Polimer esaslı kompozitlerde iplik kıvrımlarının etkisi [69].....	26
Şekil 2. 27 Çimentolu matris içinde örme kumaş bağlantı noktası [59].....	27
Şekil 2. 28 İkincil doğrultudaki iplikler nedeniyle hasar oluşumu ve çatlaklar [70].....	27
Şekil 2. 29 Farklı yoğunlukta dokuma kumaş takviyeli TRM SEM görüntüleri (a) 5 dolgu ipliği/cm, (b) 10 dolgu ipliği/cm [11], (c) sıkı dokuma PVA lifli tekstil [68].	27
Şekil 2. 30 Enine (ikincil) doğrultudaki iplik yoğunluğunun etkisi: (a) eğilme testi performansı [35] (b) tek eksenli çekme testi performansı [71]	28
Şekil 2. 31 Matris içinde gömülü bir ipliğin kesiti; a) şematik görünüm, b) karbon ipliğinin gerçek görüntüsü [78] (c) Teleskopik kayma mekanizması [77] ..	28
Şekil 2. 32 Kaplamanın iplikteki aktif lif sayısına etkisi [83]	29
Şekil 2. 33 Matris ile epoksi kaplamanın kimyasal uyumsuzluğu nedeniyle oluşan delaminasyon hasarı [87]	30
Şekil 2. 34 a) referans, b) silis dumanı dolgulu, c) epoksi kaplamalı uygulamalar [92]	30
Şekil 2. 35 Çeşitli dolgu malzemelerinin kompozit performansına etkisi [77]	31
Şekil 2. 36 Ön kaplamanın lif çekme dayanımına etkisi [80]	32
Şekil 2. 37 Kaplama içeriğindeki nano bileşenlerin etkisi [93].....	32
Şekil 2. 38 Kaplama kalınlığının çatlak yayılımı ve şekildeğiştirmeye etkisi [97].....	33
Şekil 2. 39 Kaplama türünün iplik çekme dayanımına etkisi [82], [98].....	33
Şekil 2. 40 Kaplama miktarı, kaplama içeriği ve tekstil çekme dayanımı ilişkisi [85] ..	34
Şekil 2. 41 Akışkanlığın iç filamentlere doğru matris penetrasyonuna etkisi [99]	35
Şekil 2. 42 Matrise eklenen mineral katkıların TRM performansına etkisi [105].....	36
Şekil 2. 43 Farklı oranlardaki silis dumanının etkisi [106]	36
Şekil 2. 44 Farklı uçucu kül oranlarının TRM performansına etkisi [106]	37
Şekil 2. 45 Kısa liflerin tekstil-matris arasında oluşturduğu çapraz bağlantılar.....	37
Şekil 2. 46 Kısa liflerin TRM çatlak oluşumuna etkisi [108].....	38
Şekil 2. 47 Çimento çözeltisinde bekletilmiş AR-cam lif yüzeyindeki delikler	40
Şekil 2. 48 Puzolanik katkıların matris-lif arayüzüne bağlanmaya etkisi [127].....	41
Şekil 2. 49 Kılcal su emme ve tuz kristalizasyonu döngüsü sonucunda takviyenin ayrıldığı göçme modu [130]	43
Şekil 2. 50 Yığma duvarlarda düzlem içi davranış [138]	45
Şekil 2. 51 TRM uygulaması ile kesme çatlaklarının yatay çatlaklara dönüşmesi [141] ...	46

Şekil 2. 52 Farklı güçlendirme oranlarının düzlem içi davranışa etkisi [144]	46
Şekil 2. 53 a) Yığma yüzeye karbon TRM uygulanması, b) diyagonal basınç testi düzeneği, c) kayma gerilmesi-şekildeğiştirme eğrileri [145].....	47
Şekil 2. 54 Güçlendirilmemiş yığma duvarlarda düzlem dışı davranış [138]	47
Şekil 2. 55 Yığma duvarların düzlem dışı devrilmesi [21].....	48
Şekil 2. 56 Yığma duvarlarda düzlem dışı yük etkisinde üç mafsal oluşumu.....	48
Şekil 2. 57 Yığma duvarlarda kemerleme etkisi ve düzlem dışı eğilme[21].....	49
Şekil 2. 58 Orta ölçekli numunelerle gerçekleştirilen düzlem dışı eğilme testleri[142] [148]	50
Şekil 2. 59 Hava yastığı ile düzlem dışı yük verilmesi [150].....	50
Şekil 2. 60 Tam ölçekli numunelere düzlem dışı yatay yük verilmesi [46]	50
Şekil 2. 61 Düzlem dışı davranışın sarsma tablası ile incelenmesi [151].....	51
Şekil 2. 62 Yığma kirişlerde gerçekleştirilen eğilme testleri [152], [153]	51
Şekil 3. 1 Kullanılan tekstillerin tipik görünüşleri	53
Şekil 3. 2 Çözüğü yönünde lif demetlerinin tipik perspektif görünüşleri.....	54
Şekil 3. 3 Tekstil çekme testi düzeneği ve tekstillerin yük-uzama eğrileri	54
Şekil 3. 4 TRM kupon numunesi ve eğilme test düzeneği şematik gösterimi.....	55
Şekil 3. 5 Kupon numune kalıpları.....	56
Şekil 3. 6 Kupon numune üretim aşamaları	56
Şekil 3. 7 Kupon eğilme test düzeneği detayları	57
Şekil 3. 8 Sıcak suya daldırma düzeneği	58
Şekil 3. 9 Eğilme testlerinden elde edilen tipik yük-yerdeğiştirme eğrisi.....	59
Şekil 3. 10 Kupon eğilme numunelerine ait yük-yerdeğiştirme grafikleri.....	62
Şekil 3. 11 Kupon eğilme testlerinde gözlemlenen tipik çatlak şekilleri	64
Şekil 3. 12 BF takviyeli kompozitlerde teleskopik göçme modu.....	67
Şekil 3. 13 Kireç esaslı kompozitlerin maksimum yüke kadar tükettiği enerji (E_{maks}) ..	68
Şekil 3. 14 Çimento esaslı kompozitlerin maksimum yüke kadar tükettiği enerji (E_{maks})	68
Şekil 3. 15 Kireç esaslı kompozitlerin test sonuna kadar tükettiği enerji (E_u).....	69
Şekil 3. 16 Çimento esaslı kompozitlerin test sonuna kadar tükettiği enerji (E_u)	69
Şekil 4. 1 Harman tuğlasının görünüşü ve geometrik özellikleri	70
Şekil 4. 2 Tuğla basınç dayanımlarının belirlenmesi	71
Şekil 4. 3 Triplet testleri ile başlangıç kayma dayanımının belirlenmesi.....	72
Şekil 4. 4 Triplet kayma numunelerinin hazırlanma aşamaları	72

Şekil 4. 5 Traşlanmış triplet numuneleri	72
Şekil 4. 6 Triplet testleri karşılaştırmalı yük-yerdeğiştirme eğrileri (ön basınç yok).....	73
Şekil 4. 7 Triplet testleri karşılaştırmalı yük-yerdeğiştirme eğrileri (ön basınç etkisi).	73
Şekil 4. 8 Güçlendirilmemiş yığma kirişler	74
Şekil 4. 9 Kireç ve çimentolu harç ile güçlendirilmiş yığma kirişler ve şematik görünüm	75
Şekil 4. 10 Yığma birimlerin eğilme testi [162].....	75
Şekil 4. 11 Yığma kiriş eğilme testi düzeneği ve numune detayları	76
Şekil 4. 12 Yığma kiriş eğilme testi düzeneği	76
Şekil 4. 13 Donatısız sıvalı yığma kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri.....	77
Şekil 4. 14 GF1 ile güçlendirilmiş yığma kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri	78
Şekil 4. 15 GF2 ile güçlendirilmiş yığma kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri	79
Şekil 4. 16 BF ile güçlendirilmiş yığma kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri.....	80
Şekil 4. 17 CF1 ile güçlendirilmiş yığma kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri.....	80
Şekil 4. 18 CF2 ile güçlendirilmiş yığma kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri.....	81
Şekil 4. 19 Güçlendirilmiş yığma kirişlerde maksimum yüke kadar yutulan enerji miktarı	84
Şekil 4. 20 TRM ile güçlendirilmiş yığma kirişlerde toplam yutulan enerji miktarı	84
Şekil 4. 21 Güçlendirilmiş yığma kirişlerde kümülatif enerji grafikleri	85
Şekil 4. 22 Güçlendirilmiş yığma kirişlerde E_u , E_{maks} dağılımı	85

TABLO LİSTESİ

Tablo 2. 1 Lif tiplerinin mekanik karakteristikleri	20
Tablo 3. 1 Harçların mekanik özellikleri	53
Tablo 3. 2 Tekstillerin fiziksel ve mekanik özellikleri	55
Tablo 3. 3 Kupon eğilme test sonuçlarının özeti.....	60
Tablo 3. 4 Kupon eğilme testlerinde gözlenen kırılma modları ve mikro görünüşler ...	64
Tablo 4. 1 Yığma kiriş eğilme testi sonuçlarının özeti	77
Tablo 4. 2 Yığma kiriş eğilme numunelerinde gözlemlenen kırılma modları	82
Tablo A. 1 Kupon eğilme serilerinde tüm numunelerin yük-yerdeğiştirme eğrileri.....	99
Tablo A. 2 Kupon eğilme numunelerinin I.Bölgedeki yük-yerdeğiştirme eğrileri.....	104
Tablo A. 3 Yığma kiriş eğilme serilerinde tüm numunelerin yük-yerdeğiştirme eğrileri	109

Tekstil Donatılı Harçlar ile Yığma Elemanların Güçlendirilmesi

Mustafa Esat GÜNEŞ

Mimarlık Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Zehra Canan GİRGIN

Yığma yapılar bugün hala dünya genelindeki yapı stoğunun büyük bir bölümünü oluşturur. Yığma yapı söz konusu olduğunda, genellikle tarihi ve kültürel mirasa ait anıtsal yığma yapılar ilk olarak akla gelse de, kırsal kesimlerdeki yığma binaların yığma yapı envanterindeki oranı büyüktür. Anıtsal nitelikte olmayan ve mühendislik hizmeti almamış yığma taşıyıcı sistemli bu binaların çoğunluğunun, büyük depremlere dayanabilecek güçte olmadığı bilinmektedir. Bu yapıları çeşitli yöntemlerle güçlendirerek deprem dayanımının artırılması, deprem kaynaklı kayıpların azaltılması bakımından önemlidir. Diğer taraftan, anıtsal yığma yapılar çok uzun yıllar yıkılmadan günümüze ulaşarak deprem dayanımını ispatlamış olsalar da, çeşitli çevresel faktörlere bağlı hasarların bu yapıları zayıflatmış olması söz konusudur. Bu bakımdan yığma yapı güçlendirme, kültürel mirasın geleceğe güvenle aktarılması açısından önem arz eder.

Tekstil takviyeli harçlar (TRM), tipik olarak ince agregalı inorganik esaslı harcın (matris); cam, karbon, bazalt vb. malzemelerin eriyiklerinden çekilen, sürekli ipliklerden oluşan kompozit bir malzemedir. Çekme dayanımı, kalınlık, maliyet ve ısıl dayanım avantajları ile, yığma yapıların onarım ve güçlendirilmesi için uygun bir teknoloji sunmaktadır.

Tez kapsamında, öncelikle TRM kompozitler ve yığma elaman güçlendirmeleri üzerine deneysel çalışmalar ve uygulamalar incelenmiştir. İkinci aşamada, özgül katkı olarak; üç farklı lif tipinin tekstilleri, iki tip kaplama ve harç değişkenleri ile aderans düzeyi farklılaşan matris-tekstil ara yüzü ve eğilme karakteristikleri, ve bunlarla ilişkili dayanıklılıktaki değişim araştırılmıştır. Uygulanan yaklaşımın, aynı zamanda, maliyetli büyük duvar numuneleri yerine düşük maliyetli kupon numuneler üzerinden düzlem dışı eğilme için hızlı bir ön kestirim imkanı sunacağı düşünülmektedir.

Tezin Birinci Bölümü teze giriş niteliğindedir; amaç, kapsam ve hipotez konularına yer verilmiştir.

İkinci Bölümde literatürde yer alan çalışmalar detaylı olarak incelenmiş; tekstil tipleri ve kaplamaları, harçlar, matris-tekstil arayüz karakteristikleri, çekme/eğilme dayanımları, kırılma modları ve dayanıklılık üzerine çıkarımlara yer verilmiştir.

Tezin özgül deneysel çalışmalarının ilk bölümü Üçüncü Bölümde yer almaktadır. Küçük ölçekli (50 x 250 x 13 mm³) TRM kupon numuneler üzerinde eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Bağlayıcı bileşen olarak doğal hidrolik kireç (NHL, Natural Hydraulic Lime) ve çimento esaslı iki tip harç kullanılmış; takviye amaçlı alkali dayanımlı (AR) cam, bazalt ve karbon esaslı beş tip tekstil seçilmiştir. Toplam on farklı TRM kupon serisi, üç farklı kür sürecinde (7.gün, 28.gün ve hızlandırılmış yaşlandırma sonrası) test edilmiştir.

Dördüncü Bölümde, TRM ile güçlendirilmiş yığma kiriş numunesi testleri bulunmaktadır. Eğilme etkinlikleri bulunmuş TRM kupon serisinden hareketle, bu defa orta ölçekli (22 x 55 x 10 cm³) yığma kirişler eğilme testlerine tabi tutulmuştur. Testlerde; yükün kompozite dolaylı olarak aktarımı sağlanmış, kompozit ile tuğla yüzey arasındaki aderansın kompozitin eğilme etkinliğine etkisi araştırılmış ve kupon numunelerden elde edilen sonuçlar ile uyumu incelenmiştir.

Beşinci Bölüm tezde ulaşılan sonuçlara ayrılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tekstil Donatılı Harçlar (TRM), Yığma Güçlendirme, Kompozit, Düzlem-dışı Davranış, Dayanıklılık

Strengthening of Masonry Members with Textile Reinforced Mortars

Mustafa Esat GÜNEŞ

Department of Architecture

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Zehra Canan GİRGIN

A large part of the worldwide building stock still consists of masonry structures today. Even if the monumental masonry buildings and cultural heritage usually come to mind first, the proportion of masonry buildings in rural areas in the masonry building inventory is significant. It is well known that the majority of these buildings having no monumental property or any engineering service are not strong to resist severe earthquakes. Enhancing their resistance to vulnerable earthquakes through various methods is important to reduce earthquake-induced deaths. On the other hand, although the monumental masonry structures have proved their earthquake resistance for many years, the damage caused by deteriorating environmental factors is under consideration. In this respect, masonry strengthening is important for durable cultural heritage to the future.

Textile-reinforced mortar (TRM) is a composite material, and typically consists of inorganic-based mortar (matrix) with fine aggregates and continuous threads from the pultrusion process of melted materials such as glass, carbon, and basalt. TRM has recently emerged as a suitable technology for the repair and strengthening of masonry structures, as they offer significant advantages on the tensile strength, thickness, cost and thermal resistance.

Within the scope of the Thesis, first of all, the experimental studies and applications on TRM composites and strengthening masonry members were examined. In the second

stage, as the original contribution of this Thesis; the effect of the adherence variations in the matrix-textile interface on flexural characteristics, and durability performance were experimentally investigated on TRM composites which are composed of five textiles from three fiber types with uncoated and two types of coating, and two types of mortar. The approach via low-cost coupon specimens may present a relatively fast prediction for out-of-plane bending rather than costly great-masonry wall specimens as well.

The First Part of this Thesis is an introduction to the thesis; purpose, scope, and hypothesis are included.

In the Second Part, the studies in the literature were examined in detail; the effects of textile type and coating, mortar, and the variations in matrix-textile interface characteristics, tensile/flexural strengths, fracture modes and durability are included.

The first part of the original experimental studies of the Thesis is presented in the Third Part. Bending tests were performed on small-scale (50 x 250 x 13 mm³) TRM coupon samples. Natural Hydraulic Lime (NHL) and cement-based mortars were used as the binding materials; five types of alkali resistant (AR) glass, basalt, and carbon based textiles were selected for reinforcement. Total ten different TRM coupon series were subjected to bending tests in three different periods (7 days, 28 days, and after accelerated aging).

In the Fourth Part, there are flexural tests of the medium-scale (22 x 55 x 10 cm³) masonry beam specimens strengthened with TRM from the experience on the TRM coupon series. In these tests, the indirect transfer of the load to the composite was ensured, the adherence and flexural efficiency between the composite and the substrate were investigated and the compatibility between the results obtained from the coupon samples was examined.

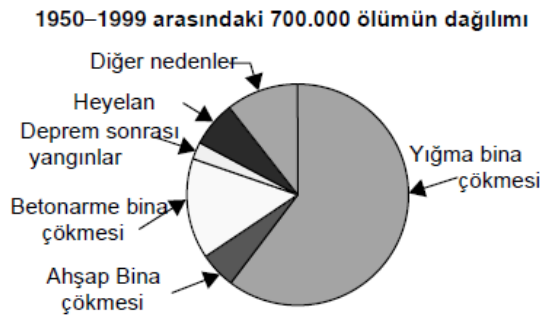
The Fifth Part is devoted to the conclusions reached in this Thesis.

Keywords: Textile Reinforced Mortar (TRM), Masonry Strengthening, Composite, Out-of-plane Behaviour, Durability

1.1 Literatür Özeti

Yığma yapılar, dünya çapında bulunan en eski yapı türlerini oluşturur. Güçlendirilmemiş yığma duvarların, orta ve yüksek şiddetteki depremler veya şiddetli rüzgâr etkilerine karşı hasar görebilirliklerinin yüksek olması önemli bir güvenlik tehlikesine sebep olur. 20. yüzyılın ikinci yarısında deprem nedenli ölümlerin dağılımı incelendiğinde, kayıpların yaklaşık %60'ının yığma yapı hasarlarından [1] kaynaklandığı görülmektedir (Şekil 1.1). Ayrıca, yaşlanma veya sismik kaynaklı kümülatif hasarlar nedeniyle oluşan yapısal bozulmalar, birçok ülkenin kültürel mirasının önemli bir bölümünü oluşturan tarihi yapılar için tehdit oluşturmaktadır. Bu nedenle, mevcut yığma yapıların onarım ya da güçlendirilmesi gerekmektedir.

Deprem bölgelerindeki binaların önemli bir kısmı eski deprem yönetmeliklerine göre tasarlanmış veya herhangi bir mühendislik hizmeti almamış yapılardır. Bu yapılar, mevcut sismik tasarım standartlarının talep ettiği yükseltilmiş performans seviyelerini karşılamamaktadır. Diğer taraftan, deprem bölgesi olmayan alanlarda ise işlev değişiklikleri nedeniyle artan yapısal yükler bu yapıların güçlendirilmesini gerektirmektedir.



Şekil 1. 1 Deprem kaynaklı ölümlerin nedenlerinin dağılımı [1].

Yığma duvarların dayanımını ve/veya sünekliğini arttırmayı amaçlayan çok sayıda güçlendirme tekniği mevcuttur. Ancak, güçlendirme kapsamında yapılacak müdahalelerin, binanın işlevi ve görünümü üzerinde etkilerinin mümkün olduğunca düşük seviyede

kalması özellikle kültürel mirasın korunması açısından önemlidir. Bu anlayışla, mevcut yığma duvarların/yapıların lif takviyeli kompozitler ile iç/dış yüzeylerinden güçlendirilmesi şeklinde tanımlanan “donatılı sıva ile güçlendirme” ya da diğer bir ifade ile “harici yapıştırma” (*Externally Bonded Systems, EBS*) teknikleri, son yıllarda yığma yapıların onarımı ve güçlendirilmesine bir alternatif olarak geliştirilmiştir.

Donatılı sıva ile güçlendirme sistemleri; çekme dayanımı, ağırlık ve kalınlık açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Yığma sistem yüzeyine dıştan yapıştırılan lif takviyeli polimerlerin yapısal performansı, betonarme sistemlerdeki gibi, donatının çekme gerilmelerini taşıma kapasitesine dayanırken, basınç gerilmeleri yığma yapı elemanı tarafından karşılanır. Geleneksel güçlendirme teknikleriyle (çelik profil takviyesi, kesit büyütme, betonarme mantolama vb.) karşılaştırıldığında, donatılı sıva ile güçlendirme teknikleri mevcut yapıya daha az müdahale edilmesi ve dolayısıyla yapının mimari görünümünün etkilenmemesi bakımından öne geçmektedir.

Lif takviyeli polimerlerin (*Fiber Reinforced Polymer, FRP*) yığma duvarlara (*Unreinforced Masonry, URM*) epoksi ile yapıştırıldığı güçlendirme uygulamaları, EBS tekniğinin başlangıcı olarak kabul edilebilir. FRP ile güçlendirme tekniği; yüksek mukavemet ve düşük ağırlık/dayanım oranı, korozyon direnci, uygulama kolaylığı ve uygulanan yapıya minimum müdahale edilmesi gibi konularda önemli avantajlar sunması ile güçlendirme uygulamalarında önemli bir yer edinmiştir. Ancak, avantajlarına rağmen, lifleri bağlamak veya emprenye etmek için kullanılan organik reçinelerle ilgili dayanıklılık ve yangın dayanımı konularında bazı dezavantajları vardır. Ayrıca, kompozitin yüzeye aşırı güçlü yapışması, tarihi yığma binalara yönelik müdahale stratejileriyle ilgili temel bir kriter olan “müdahalenin gerektiğinde kaldırılabilir olması” ilkesine aykırıdır ve bu durum, FRP uygulamalarının tarihi yapılarda kullanımını kısıtlamaktadır.

FRP ile güçlendirmenin söz konusu sorunlarına çözüm olarak, organik matris yerine çimento veya hidrolik kireç harcı gibi inorganik matris kullanılması düşüncesi gelişmiştir [2]. Böylece tekstil donatılı harç (*Textile Reinforced Mortar, TRM*) sistemleri ile; yangın dayanımı, uygulama yüzeyi ile uyum ve dayanıklılık gibi konularda karşılaşılan olumsuzlukların giderilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, sürekli lif tabakaları yerine geniş göz açıklıkları bulunan dokuma tekstillerin kullanılmasıyla, lif-matris etkileşimi daha sıkı hale getirilmiştir. Diğer taraftan, hava geçirgenliği ve gerektiğinde esas yapıya zarar

vermeden kaldırılabilir olması kültürel mirası koruma kriterlerine uygunluğu açısından FRP ile güçlendirmeye kıyasla avantajlar sunmaktadır.

TRM kompozitler, 2000'li yılların başında, yığma yapıların sismik güçlendirilmesi alanında başarıyla kullanılmaya başlandı. Başlangıçta, bu yeni tip kompozitler Avrupa'da "tekstil takviyeli beton" (*Textile Reinforced Concrete*, TRC) veya "tekstil takviyeli harç" (*Textile Reinforced Mortar*, TRM) olarak tanımlandı. Sadece ince agregaların kullanılması nedeniyle inorganik matrisin "beton" olarak adlandırılması halen tartışma konusudur. Diğer taraftan, A.B.D'de, bu kompozitler "tekstil takviyeli çimentolu matris" (*Fabric Reinforced Cementitious Matrix*, FRCM) olarak isimlendirilmiştir.

Literatürde aynı kompozit türünü ifade ettiği halde; tekstil donatılı harçlar için TRM (*Textile Reinforced Mortar*), FRCM (*Fabric Reinforced Cementitious Matrix*), TRC (*Textile Reinforced Concrete*), FRM (*Fabric Reinforced Mortar*) gibi farklı kısaltmalar kullanılır ve bu durum konu ile ilgili ortak bir dil oluşmasını engellemektedir. Matris fazında çimento dışındaki bağlayıcıların (kireç, geopolimer vb.) da kullanılması nedeniyle FRCM kısaltması tarafımızdan tercih edilmemiştir. TRC kısaltması kompozitin matris fazında betonu çağrıştırmaktadır, oysa ki çalışılan kompozitte iri agrega yoktur. Diğer taraftan, FRM kısaltmasının başındaki ilk harf "fabric" kelimesini temsil eder ve "lif (fiber)" olarak algılanıp, lif donatılı beton (Fiber Reinforced Concrete-FRC) ile karıştırılması da muhtemeldir. Söz konusu nedenlerle; bu tezde "tekstil takviyeli harç" (*Textile Reinforced Mortar*, TRM) tanımını kullanma fikri benimsenmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Tekstil donatılı kompozitlerin yapı malzemesi sektöründe pazara sunulması, TRM üzerine kapsamlı araştırma yoğunluğunu beraberinde getirmiştir. Birçok araştırma grubu tarafından hazırlanan yayınlar, hızla büyümesi beklenen bu yenilikçi yapısal malzemeye dünya çapında ilgiyi giderek arttırmaktadır. Matris fazı için kuru harç karışımları ve takviye fazı için tekstil malzemelerinin alım-satımı yaygınlaşmaya başlamıştır.

TRM, matris ve takviye tekstili olmak üzere iki ana bileşeni olan kompozit bir malzemedir. Matris olarak genellikle çimento ya da kireç esaslı harçlar kullanılır; ancak, matris de kendi içinde mineral katkı gibi puzolanik bileşenler ile çeşitlenir. Diğer taraftan, tekstil endüstrisinde çeşitli hammaddelerden lif üretebilme, çok sayıda liften iplik üretimi ve birbirine bağlanma şekilleri ile ipliklerin kaplanma durumu farklılıkları, bilimsel

çalışmaları bu yöne doğru itse de değişken sayısına kıyasla bilimsel çalışmaların çeşitlenmesi sınırlı düzeydedir. Kupon numune bazında aksel çekme testleri ağırlıktadır, bunların içinde de cam lifli tekstillerin çimentolu TRM içindeki davranış testleri çoğunluktadır, diğer tekstiller ve farklı test düzeneklerinin kullanıldığı yayınlar sayıca çok daha azdır. Ayrıca TRM kullanımının yaygınlaşması açısından; değişken sayısının fazlalığına karşılık, bu konuda standartlar ve kılavuzlarda ciddi eksiklikler mevcuttur ve daha fazla bilimsel çalışmaya ihtiyaç vardır. Çevresel etkenler ve farklı lif türlerinin dayanıklılığı konusu, üzerinde en az çalışılmış konudur ve yeterli bilgi birikimi yoktur.

Bu tezde; literatürde TRM kompozitler üzerine çok az araştırılmış konulara odaklanılmıştır. Düzlem dışı duvar davranışı açısından; cam, bazalt ve karbon liflerin kaplamasız/kaplamalı tekstilleri ile iki farklı matrisin arasındaki aderansın kısa ve uzun dönemde değişimi, eğilme yeteneği açısından, küçük ölçekli TRM kupon numuneler üzerinde araştırılmıştır. Buradan elde edilen sonuçlardan, küçük ölçekli numunelerin uzun dönem için ön tahmin amaçlı kullanılabilirliğini belirlemek hedeflenmiştir. Burada, orta ölçekli yığma kiriş deneyleri yapılması, sonuçların mevcut test sonuçları ve kırılma modları ile karşılaştırılarak yapısal performansa yönelik; pratik ve gerçekçi bir yaklaşım sağlanması, zaman ve ekonomik kayıpların en aza indirilmesi amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Tekstil takviyeli harcı oluşturan matris ve tekstil takviyesi bileşenlerinin çeşitlilik potansiyeli oldukça büyüktür. Harç ve tekstilin optimal kombinasyonu dayanıklılık parametresini de içerecek şekilde detaylı araştırılmalıdır. Tezin amacında belirtilen hedefe yönelik olarak, düzlem dışı davranışın pratik ve gerçekçi bir yaklaşım ile belirlenmesi açısından, bu davranış ile uyumlu üç noktalı eğilme testleri tercih edilmiştir. Kupon numune boyutları, TRM uygulamalarındaki güçlendirme tabakasının kalınlığıyla uyumlu olacak şekilde belirlenmiş, üç farklı kompozit yaşı için seriler kolaylıkla üretilmiştir. Dayanıklılık açısından, numunelerin sıcak suya daldırma yöntemi ile hızlandırılmış yaşlanması sağlanmış, böylece kompoziti oluşturan fazlar ve matris-tekstil arayüzünün uzun dönem performansı ile ilgili değerlendirilmeler yapılmıştır.

DeneySEL çalışmaların ikinci aşamasında; ilk aşamadaki TRM kupon numune kombinasyonları ile güçlendirilen yığma tuğla kirişler eğilme testlerine tabi tutulmuştur. Böylece, aynı değişkenlerin hem mikromekanik testlerde hem de yapısal testlerde eğilme

performansına etkisi gözlenmiştir. Takiben, kupon eğilme testi sonuçları ile yığma kiriş eğilme testi sonuçlarının aynı kompozit türleri için karşılaştırması yapılmış, kompozit performansı açısından aralarında uyum olduğu görülmüştür. Buradan hareketle; yeni geliştirilecek TRM kompozitlerin verimlilik seviyesinin, gerçekçi ve pratik kupon eğilme testleri ile tahmin edilebileceği düşünülmektedir. Ön değerlendirmeler ile; mezo ölçekten makro ölçeye geçişte bazı değişkenler elenecek; böylece, uzun süreç ve büyük işgücü gerektiren yapısal boyuttaki test sayıları azaltılabilecektir.



2.1 Tarihsel Gelişim

Farklı malzemelerin kombinasyonları ile yeni bir malzeme üretilmesi şeklinde tanımlanan kompozit malzemeler, yapı alanında sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun nedeni, yapısal ve ekonomik performans açısından gereksinimleri tek başına karşılayacak doğal malzemenin genellikle mevcut olmamasıdır. Malzemelerin dezavantajlarını karşılıklı ortadan kaldırarak; yük taşıma kapasitesi, dayanıklılık, ağırlık ve maliyet gibi avantaj özellikleri birleştirmek gerekir. Yapı mühendisliğinde en sık kullanılan yapı malzemeleri beton ve çeliktir. Beton nispeten ekonomik ancak düşük çekme dayanımı ve şekildeğiştirilmesi bakımından gevrek bir malzemedir, sadece basınç gerilmelerinin olduğu (çekme gerilmelerinin ihmal edildiği) durumlar dışında, donatısız olarak uygulanamaz. Buna karşılık çelik; yüksek çekme dayanımı nedeniyle, 19. yüzyılın ortalarından itibaren, eğilmeye maruz yapı elemanlarının çekmeye çalışan bölgelerinde betonun güçlendirilmesi (betonarme) fikrine yol açmıştır.

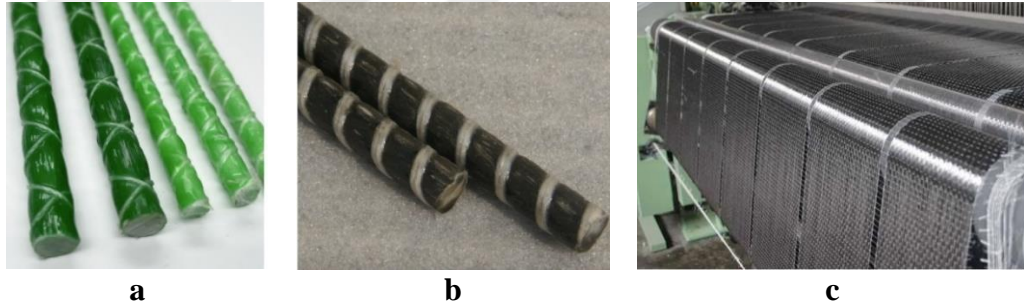
1840'ların sonlarında Josef-Louis Lambot'un, tekne ve su deposu yapımında çimento harcına gömülü demir teller kullanması (Şekil 2.1-a) çimento esaslı bir matrise yüksek dayanımlı bir tekstil yerleştirme fikrinin başlangıcı sayılabilir [3]. Bundan 100 yıl sonra, Pier Luigi Nervi'nin ince çelik tekstil tabakaları üzerine çimento sıva uygulayarak kabuk formunda yapılar (Şekil 2.1-b) inşa etmesi, bu düşüncenin bir gelişimi olarak *ferrocement*'i ortaya çıkarmıştır [4].

Çelik donatıların betona gömülmesinin büyük bir avantajı, betonun alkalinitesinin çeliği teorik olarak uzun yıllar boyunca korozyondan korumasıdır. Ancak, çimentonun hidrasyonu sırasında iç yapıda oluşan Ca(OH)_2 (CH, *portlandite*)'in CO_2 ile reaksiyona girmesi nedeniyle betonun alkalinitesi giderek azalır. Betonun karbonatlaşması (CaCO_3) olarak da bilinen bu süreç, yüzeyde başlar ve iç kısma doğru ilerleyerek zamanla çeliğin korozyona uğramasına neden olur. Dayanıklılık (*durability*) ile ilgili bu sorun, çelik yerine korozyona uğramayan takviye malzemeleri arayışına yol açmıştır.



Şekil 2. 1 (a) Tekstil donatılı beton tekne-J.S. Lambot [5], (b) Hangar in Orvieto-P.L.Nervi[6].

Lif halinde üretildiğinde yüksek elastisite modül ve çekme dayanımlı malzemelere karbon, alkali dayanımlı cam veya bazalt örnek verilebilir. Bu tip yüksek dayanımlı lifler ve polimerik matrisler ile oluşturulan kompozitler; 20.yüzyıl ortalarından itibaren havacılık ve otomotiv gibi alanların yanısıra, 1990’lardan beri inşaat mühendisliğinde de takviye amaçlı olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.2). Ancak, geleneksel çelik donatı ile karşılaştırıldığında maliyetlerin yüksek olması, bazalt ve cam liflerin elastisite modülünün çelik donatıdan düşük olması nedeniyle, yerdeğiştirmede artış gibi uygulamayı sınırlayan durumlar söz konusudur.



Şekil 2. 2 (a), (b) Lif esaslı donatı çubukları,cam ve bazalt lif [7], [8],
(c) Karbon FRP kumaş [9].

Paralel bir gelişme olarak, 1960’larda, hazır veya kesilmiş kısa liflerin betona eklenmesi (*Fiber Reinforced Concrete, FRC*) fikri geliştirilmiştir ve uzun yıllardır yaygın olarak kullanılmaktadır. Yönlendirme iki boyutta veya üç boyutta rastgele olabilir. Lifler; iki boyutlu uygulamalarda takviye veya kuruma rötresini azaltma amacıyla lif takviyeli harç olarak, üç boyutlu uygulamalarda ise daha ziyade takviye amaçlı olarak uygulanmaktadır. Üç boyutlu uygulamalarda, liflerin beton içerisinde ana gerilme yönlerine göre

yönlendirilememesi, tamamen rastgele dağılımı nedeniyle doğrudan çekme/eğilme dayanımında artıştan ziyade enerji yutma kapasitesini artırma etkisinden bahsedilebilir.

Liflerin diğer bir kullanım alanı olarak, iki doğrultuda sürekli olarak yönlendirilmiş lif demetlerinin takviye olarak kullanımı son yıllarda yaygınlaşmıştır. Sürekli liflerin inorganik bağlayıcılarla birleştirilmesine yönelik düşünceler 1980'lerde başlamış ve ilk araştırmalar 1990'larda Almanya'da RWTH Aachen Üniversitesi ve Dresden Teknik Üniversitesi'nde yapılmıştır [10]. Betonarmedeki çelik hasır donatının yerini tekstil takviyesinin aldığı tekstil takviyeli beton (TRC) ile çok ince cidarlı, yüksek dayanımlı ve korozyona dayanıklı beton elemanların üretilmesi hedeflenmiştir. 2000'li yıllara gelindiğinde ise bu malzemelerin yapısal onarım ve güçlendirme amaçlı kullanımı üzerine çalışmalar başlamıştır. Bu alanda tekstil takviyeli harç kompozitlerin (*Textile Reinforced Mortar*, TRM) de önemli kullanım imkanı bulmaya başladığı görülmektedir.

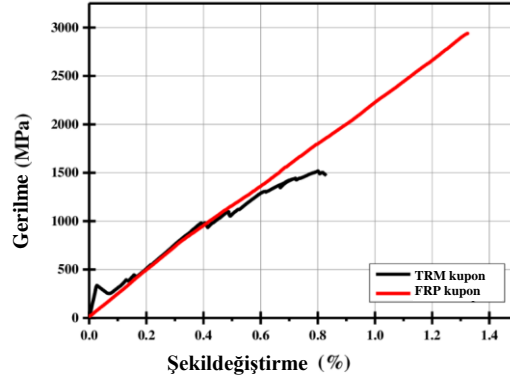
2.2 TRM Kompozitlerin Mekanik Özellikleri ve Etkileyen Faktörler

TRM kompozitler ile, gevrek matris kaynaklı sınırlamalarını ortadan kaldıran, dayanım ve şekildeğiştirme kapasitesi yüksek kompozit üretimi hedeflenir. İnorganik matrisli TRM, organik matrisli FRP'den farklı olarak, matris-tekstil ara yüzündeki bağların daha zayıf olması nedeniyle lineer elastik davranış göstermez (Şekil 2.3). Polimerik matris esaslı FRP kompozitlerde (*Fiber Reinforced Polymer*), lif takviye oranı oldukça yüksek, genellikle hacimce %50-80 düzeyindedir [11]. FRP'de takviye lifleri, yüklemenin erken aşamalarında bile yükün çoğunu taşır; bu nedenle polimer bazlı kompozitlerde göçme, lif kopmasından kaynaklanır. TRM kompozitlerde ise, tekstil takviyesi esas olarak matris çatlayıp lif demetleri çatlağı köprüledikten sonra etkili olur. Bununla birlikte, lifler tam potansiyelini gerçekleştirmeden çok önce (çekme dayanımına ulaşmadan) göçme olur. Bu nedenle TRM kompozitlerin mekanik özellikleri çok daha karmaşıktır ve bileşenlerine ait bir çok parametreye bağlı olarak, yükleme altında farklı davranış eğilimleri gösterir.

2.2.1 TRM Kompozitlerde Uygulanan Testler

TRM kompozitlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalar genellikle küçük ölçekli numuneler üretilerek, kompozitin gerçekte maruz kalacağı yükleme durumu ile uyumlu olma kaygısı taşımadan gerçekleştirilir. Bu testler; eksenel (tek eksenli) çekme testleri, eğilme testleri, yüzeye yapışma testleri olmak üzere üç başlık altında toplanabilir. Testler sonucunda elde edilen çatlak özellikleri, dayanım-

verdeğiştirme/gerilme-şekildeğiştirme davranışları ve mikro yapısal incelemeler ile kompozitin mekanik performansı belirlenir.



Şekil 2. 3 FRP ve TRM kupon çekme davranışının karşılaştırılması [12].

Eksenel Çekme Testleri

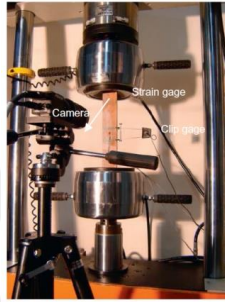
TRM kompozitlerin çekme davranışı, birçok çalışmada prizmatik kupon numuneler üzerinde eksenel çekme testleri ile incelenmiştir [13]–[20]. Bu çalışmalarda, matris ve tekstilin mekanik özelliklerinin yanı sıra rijitlik ve çatlak modelini etkileyen tekstil-matris etkileşiminin önemi vurgulanmıştır.

Eksenel çekme testleri, servo-hidrolik test cihazında (Şekil 2.4) tek eksenli olarak gerçekleştirilir. Statik çekme testleri, cihaz çekme başlıkları yardımıyla sabit bir verdeğiştirme hızında veya numune üzerine monte edilmiş dönüştürücüler aracılığıyla kontrol edilir. Numune geometrisi genellikle dikdörtgendir, ancak köpek kemiği formu (*dogbone*) da kullanılmıştır. Numunelerin tipik boyutları; tekstil boyutu ve numune genişliği boyunca tekstil ipliklerinin yeterli temsiline bağlı olarak, uzunluk: 150-400mm, genişlik: 24-50mm ve kalınlık: 6-12 mm aralıklarında belirlenir. Hidrolik çenelerin basıncı, gerilme yığılmasını en aza indirmek ve ezilme olasılığını azaltmak için özenle ayarlanmalıdır. Sıkıştırma nedeniyle numune kenetlenme bölgesinde oluşan basıncı yaymak için, numunenin her iki ucuna ince alüminyum levhalar yapıştırılabilir [21].

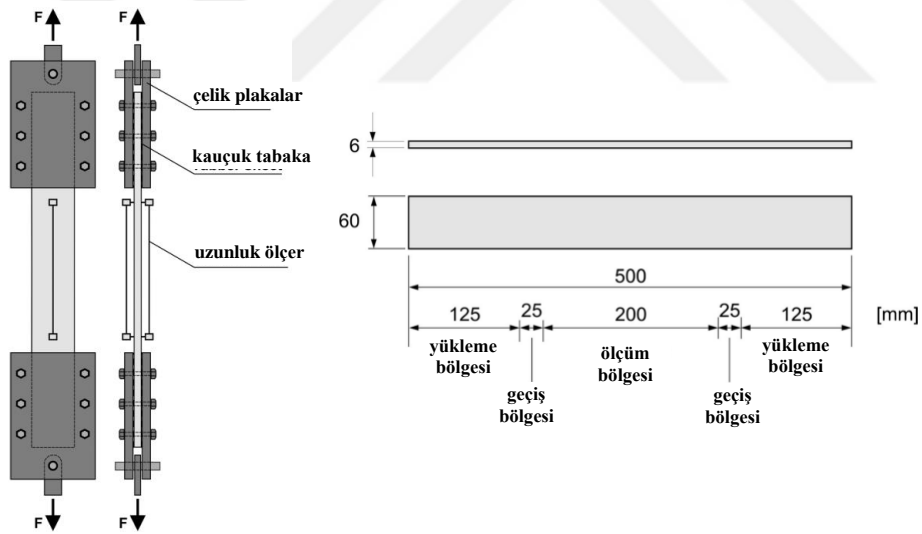
Standart, kod ve öneri belgelerinde bu testin detaylarının belirlenmesi, bu durumun hem nedeni hem de sonucudur. ICC-ES¹ tarafından hazırlanan “Acceptance Criteria for Masonry and Concrete Strengthening Using Fiber-reinforced Cementitious Matrix

¹ International Code Council-Evaluation Services

(FRCM)-AC434” [23], TRM kompozitler için aksel çekme testlerini önermektedir. Ayrıca, RILEM² Technical Committee TC 232-TDT³ (2016) standartlaştırılmış tek aksel çekme testi yöntemi tanımlanmıştır (Şekil 2.5) [24]. Bu yayını takiben, RILEM Technical Committee TC 250-CSM⁴ tarafından 2016-2017 yıllarında 19 enstitü ve 11 endüstriyel tedarikçinin dahil olduğu Round Robin Test organizasyonu gerçekleştirilmiş; mevcut TRM kompozitlerin temel özelliklerine genel bir bakış sağlamak amaçlanmış ve yığma yapılarda güçlendirme için sektördeki en yaygın 30 farklı ticari ürün test edilmiştir [25]–[29].



Şekil 2. 4 Tek aksel çekme testi düzeneği [22].



Şekil 2. 5 RILEM TC 232-TDT tarafından önerilen aksel çekme düzeneği ve minimum numune boyutları [24].

² International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures

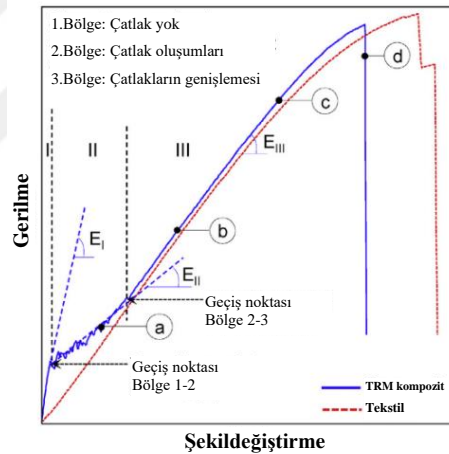
³ Test Methods and Design of Textile Reinforced Concrete

⁴ Composites for Sustainable Strengthening of Masonry

Eksenel çekme test sonuçlarından elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrilerine göre, mekanik davranış genellikle üç bölge ile karakterize edilir;

- I. Bölge'de, kompozitin hem rijitliği hem de yük taşıma kapasitesine ana katkıyı harç sağlar, ancak bu bölgede tekstil takviyesinin etkin olmadığı söylenemez. Matrisin çekme dayanımı ve harç-tekstil aderansı ne kadar güçlü olursa, ilk çatlak oluştuğu gerilme seviyesi ve başlangıç rijitliği o kadar yüksek olur.
- İlk çatlak sonrası başlayan II. Bölgede, çatlak dağılımı aşamalı olarak gelişir. Çatlak oluşumu tamamlandıktan sonra, rijitliğin aniden arttığı ve gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin doğrusala yakınlaştığı III. Bölge'ye geçiş olur.
- III. Bölgede daha fazla çatlak gelişmez, ancak mevcut çatlaklar genişler ve toplam şekildeğiştirme artar.

Kompozit kupon ve harçtan bağımsız tekstil malzemesinin eksenel çekme testi şematik gerilme-şekildeğiştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 2.6'da verilmiştir.

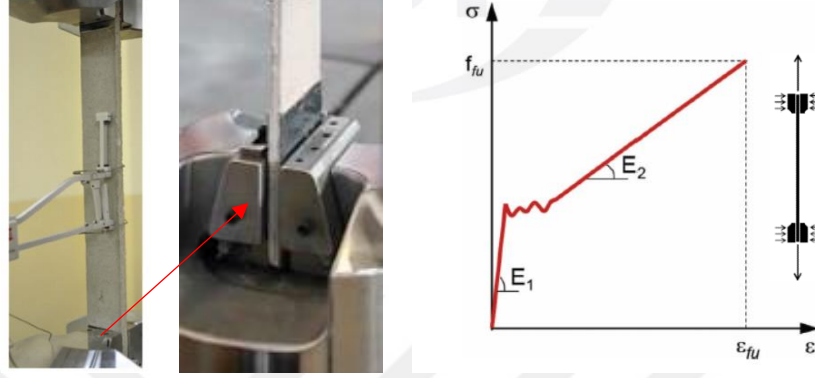


Şekil 2. 6 Eksenel çekme testinde TRM kompozitinin davranışı [30].

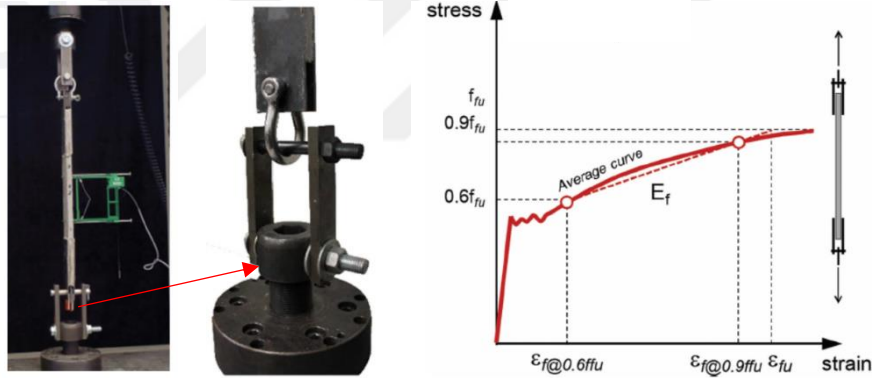
Eksenel çekme testlerinde, deney düzeneğinin test sonuçlarını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür [19], [30], [31]. Test, sıkarak kenetleme düzeneği veya kenet halkası düzeneği ile gerçekleştirilir, davranış şu şekilde özetlenebilir:

- Tekstilin matris içinde kaymasına karşı yanal basıncın uygulandığı sıkma-kenetleme düzeneğinde (Şekil 2.7), kompozitin III. Bölgedeki rijitliği ve yük taşıma kapasitesi tekstilin elastisite modülüne bağlıdır. Bu nedenle elastisite modülü ve çekme dayanımı tek başına tekstilin değerlerine (Şekil 2.6) yakındır.

- Yapıştırma-kenet halkası düzeneğinde (Şekil 2.8); tekstil-matris ara yüzündeki sıyrılma, çenelerde yanal basınç olmaması nedeniyle kısıtlanmaz. Bu nedenle, kompozit sistemin III. Bölge rijitliği ve yük taşıma kapasitesi, esas olarak tekstil-matris arasındaki aderans düzeyine bağlıdır, numunenin yapıştırma bölgesinden sıyrılarak ayrılması durumunda test başarısızlıkla sonuçlanır.

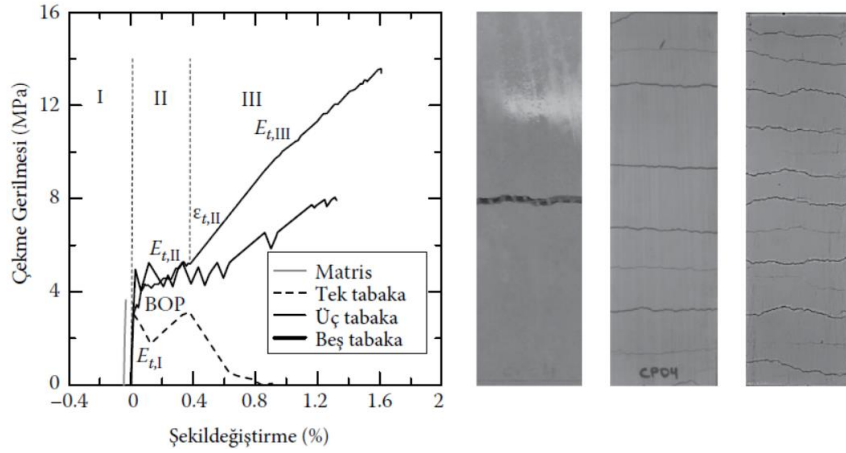


Şekil 2. 7 Sıkarak kenetleme test düzeneği [32].



Şekil 2. 8 Kenet halkası test düzeneği [33].

- Eksenel çekme testinde tek tabaka veya çok tabakalı tekstil uygulamasının kompozitin çekme dayanımı-şekildeğiştirme grafiğine etkisi incelendiğinde, tabaka sayısındaki artış ile TRM kompozitte pekleşme ve çekme dayanımının belirgin şekilde arttığı görülmektedir (Şekil 2.9). Göçme modu da değişmekte, tek geniş çatlaktan çoklu ince çatlaklara geçiş olmaktadır. Çok tabakalı tekstil uygulamasında çekme davranışının belirgin biçimde iyileşmesi, eksenel çekme testi için beklenen bir durumdur; eğilmeye çalışılan numunede bu derece belirgin olmayacaktır.



Şekil 2. 9 Farklı takviye oranlarındaki TRM kompozitlerin mekanik davranışı [34].

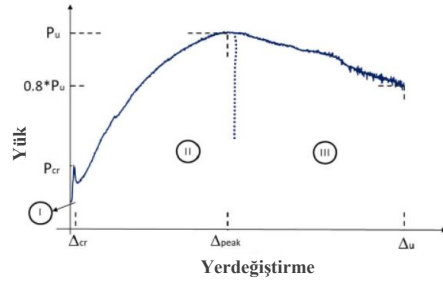
Eğilme Testleri

Literatürde TRM kuponlar üzerinde yapılan diğer bir test tipi eğilme testidir [35]–[40]. Numune ve test düzeneğini hazırlamak için harcanan iş gücü açısından eğilme testleri daha kolaydır. Literatürde eğilme testi ile ilgili olumsuz bir görüş olmamasına rağmen, TRM kuponların mekanik karakteristiklerinin eğilme testleri ile araştırıldığı çalışmalar oldukça azdır. Ayrıca, eğilme testleri ile ilgili detay içeren yönetmelik ya da tavsiye dökümanı da literatürde mevcut değildir.

Eğilme testlerinin yük-şekildeğiştirme eğrilerinde, ana katkının büyük ölçüde matris tarafından karşılandığı I.Bölge sonrası, bu tez kapsamında iki farklı davranış gözlenmiştir (Şekil 2.10) :

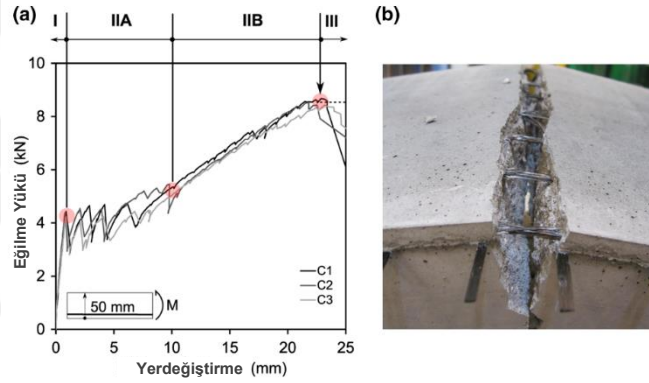
- i- II. Bölgede tekstil-matris ara yüzünde aderans ayrılmaları ile birlikte pekleşme (*strain hardening*), çoklu çatlak oluşumları ve eşlik eden çatlak açılmaları gözlenir (sünek davranış). Maks.yük düzeyi sonrası III. Bölgede (yumuşama) artan yerdeğiştirmelere azalan yük düzeyi eşlik eder, göçmeye yaklaşılır.
- ii-II. Bölgede tekstil-matris ara yüzünde aderans ayrılması çok sınırlı kalabilir, I.Bölge sonrası hızla maks. yüke ulaşılır, böylece III.Bölge oluşmadan maks. yükte kompozit ani olarak kırılabilir (gevrek davranış).

Burada belirtilen iki davranış biçiminde, ana hatları itibarı ile benzerlik olsa da, tekstili oluşturan lifler ve tekstil kaplamasına göre kısmi farklılıklar gözlenecektir. Konu, literatürden eğilme testlerine bazı örnekler verilerek aşağıda irdelenecektir.



Şekil 2. 10 TRM kompozitlerin eğilme testlerinde karşılaşılan göçme biçimleri [41].

- Portal vd. [38] karbon tekstil takviyeli TRM kompoziti incelemiştir. Elastik sınır sonrası keskin aderans ayrılmaları ile çatlakların oluşumunu takiben, maksimum yüke pekleşme +çatlak açılması (sıyırılma ile) ile ulaşılmıştır. Tekstil performansının maksimum olduğu bu göçme durumu iplik kopması ile elde edilir (Şekil 2.11).

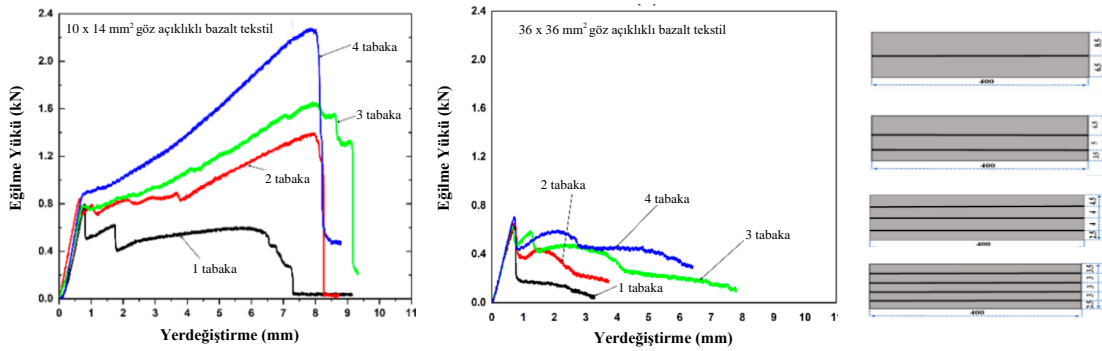


Şekil 2. 11 Eğilme testinde TRM kupon davranışına örnek [38].

- Chi vd. [39]⁵, takviye tabakası sayısındaki artış ve tekstil göz boyutlarının etkisini gözlemiştir (Şekil 2.12). Tek tabakalı olanda, tekstil tarafsız eksende olduğu için eğilme davranışına etkisi çok sınırlı kalmıştır. Çekme bölgesinde tekstil bulunan iki ve üç tabakalı olanlarda maks. yük düzeyleri birbirine yakındır. Dört tabakalı ise pekleşme davranışı çok belirgin hale gelmiştir. Bu durum doğrudan sadece eğilme dayanımı açısından değil, katmanlar arası mesafenin azalması ile sıyırılmanın kolaylaşması ve basınç bölgesine desteğin artması ile ilişkilendirilebilir. Göçme, iplik kopması ile ani şekilde meydana gelmektedir. Diğer taraftan, göz boyutu 10 mm x 14 mm yerine 36 mm x 36 mm' e çıkarıldığında eğilme dayanımındaki belirgin pekleşme

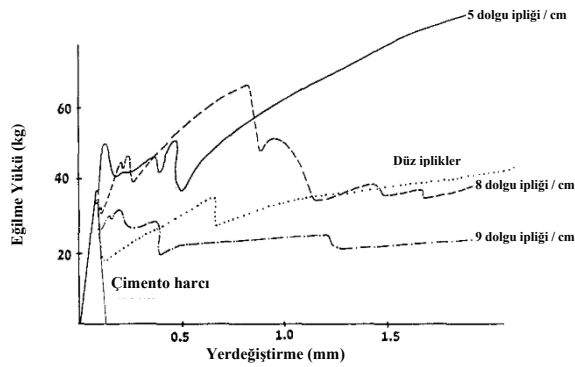
⁵ TRM kompozitte, farklı göz açıklıklarına sahip üç tip bazalt tekstil kullanılmıştır. Dikdörtgen numunenin boyutları 400×100×15 mm³'tür.

davranışı kaybolmuş, tabaka adedinin de anlamı kalmamıştır; burada göz açıklığının önemi görülmektedir.



Şekil 2.12 Tabaka adedi ve göz açıklığının eğilme davranışına etkisi [39].

- Yin vd. [37], tekstil üzerindeki optimum harç tabakası kalınlığını (paspayı) araştırmış⁶, 2-3 mm'lik kalınlığın yeterli olduğu sonucuna ulaşmıştır. Ayrıca, aynı tabaka kalınlığı için, tekstil kaplaması üzerine kum püskürtülmesi ve matrise kısa lif eklenmesi kompozit mekanik performansını iyileştirmiştir.
- Peled vd. [35], tekstil dokumasındaki değişikliklerin etkisini incelemiştir; iplik içeriğinin yükleme yönünde sabit tutulduğu polietilen (PE) tekstillerde, ikincil doğrultuda iplik yoğunluğu değiştirilmiştir. Bir cm başına beş dolgu ipliği içeren tekstil, sekiz ve dokuz dolgu ipliği içerenlerden daha fazla pekleşme göstermiş ve çok daha fazla enerji yutmuştur (Şekil 2.13). Bu konu TRM tekstilleri konusunda detaylı irdelenecektir.



Şekil 2.13 Tekstil yapısındaki değişikliklerin eğilme performansına etkisi [35].

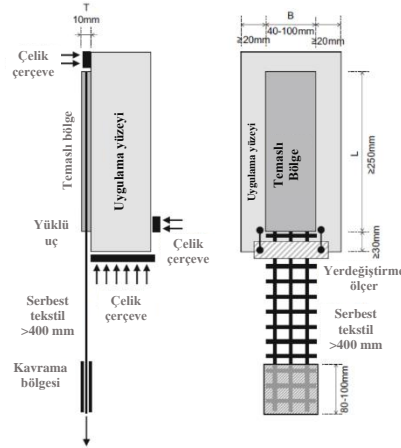
⁶ Karbon ve cam ipliklerinden oluşan hibrit tekstil takviyeli tekstilde, yüzey işleme ve kısa PP liflerin etkisi incelenmiştir.

Aderans Testleri

Aderans (yapışma) testlerinde, TRM kompozit ile uygulama yüzeyi ve tekstil ile matris arasındaki arayüzey dayanımı araştırılır. Literatürde, TRM kompozit performansının aderans testleri ile incelendiği çok sayıda çalışma mevcuttur [13][15]–[17][21][22][42]–[51]. Uygulama esasları, RILEM TC 250-CSM “Test Method for Textile Reinforced Mortar to Substrate Bond Characterization” (2018) ile belirlenmiştir [52]. Söz konusu testler, genellikle, tek yüzeyli veya çift yüzeyli itme-çekme düzeneği ile gerçekleştirilir (Şekil 2.14), araştırılan parametreler üç farklı fazın değişkenlerini içerir:

- Tekstil: aramid, cam, bazalt, karbon, PBO⁷
- Harçlar: Çimento, kireç ve geopolimer esaslı harçlar
- Uygulama yüzeyi: tuğla, beton, gazbeton, kerpiç vb. yüzeyler

Testlerin sonucunda; TRM kompozitin birleşeceği yüzey (*substrate*) tipi, matrisin mekanik özellikleri, tekstilin geometrik yapısı, ön ve nihai kaplamanın (*sizing+coating*) etkileri hakkında bilgiler de elde edilmiştir. Yüzey hazırlığı (pürüzlülüğün yapay olarak artırılması, yüzey bütünlüğünün sağlanması ve yapışma artırıcı uygulanması) ve harç kür koşullarının önemi vurgulanmıştır. Ayrıca, etkili aderans uzunluğunun genellikle 200-250 mm olduğu belirlenmiştir [53]. Bu uzunluk; kompozitin yapıştığı yüzeyin pürüzlülüğü, matrisin çekme dayanımı ve tekstil-matris yapışmasına bağlıdır.

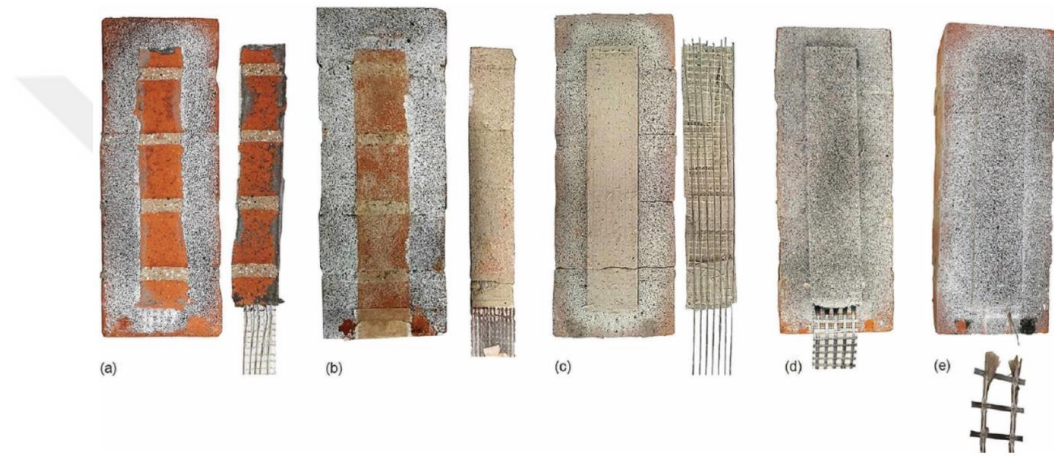


Şekil 2.14 RILEM tarafından önerilen yüzeye aderans testi düzeneği [52].

⁷ poliparafenilen benzobisoksazol

Aderans testlerinde söz konusu olabilecek bazı kırılma modları mevcuttur, bunlar (Şekil 2.15); (a) uygulama yüzeyini oluşturan malzemedeki moleküler bağların zayıflığı nedeniyle kopma, (b) kompozit-alt tabaka ara yüzünde ayrılma, (c) tekstil-matris ara yüzünde ayrılma, (d) tekstilin harç içinde sıyrılması ve (e) tekstilin kopmasıdır [31]. Söz konusu modlar:

- Güçlü bir matris, daha zayıf bir malzemeye bağlandığında kompoziti bağlanma yüzeyinden koparak ayrılmasına neden olabilmektedir (Şekil 2.15a). Tipik olarak FRP ile güçlendirme sistemlerinde karşılaşılr, TRM kompozit ile tarihi yapı güçlendirilmesinde bu göçme modundan özellikle kaçınılmalıdır.



Şekil 2. 15 Yüze yapışma testlerindeki olası kırılma modları [25].

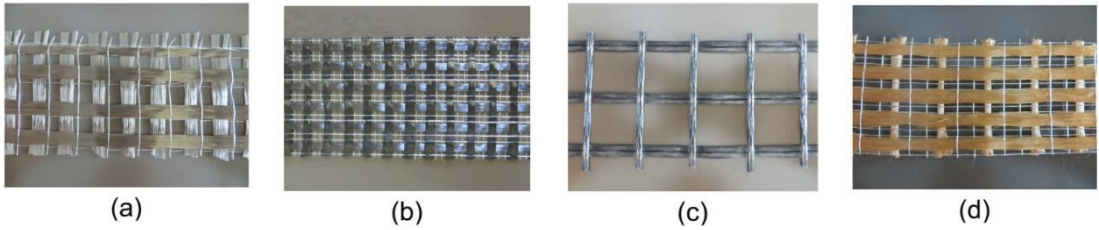
- Arka yüzey ile matris ara yüzündeki ayrılma, pürüzlülüğü az yüzeylerde gerçekleşir (Şekil 2.15-b). Pürüzlü duvar yüzeyi genellikle bu kırılma modunu engellemesine rağmen, bazı kil esaslı tuğla yüzeylerde de gözlenir. Bu duruma, numune hazırlama esnasında olası işçilik hatalarının neden olduğu düşünülebilir. Yüzeyin hazırlığı (tozun giderilmesi, ıslatılması, pürüzlendirilmesi, gerektiğinde sağlamlaştırma) ve harcın uygun şekilde kürlenmesi (nem ve sıcaklık açısından) sağlanmalıdır.
- Tekstil-matris ara yüzünde ayrılma; harcın, tekstili oluşturan lif demetlerinden geçemediği sık örülmüş tekstillerde meydana gelir (Şekil 2.15-c). Tekstil-matris ayrılması, yeterli ızgara aralığına sahip tekstil ve ince taneli harç kullanımı ile kontrol edilebilir.
- Lif demetleri ve harç arasındaki bağın zayıf olması durumunda göçme modu; maksimum yük düzeyi sonrası tekstilin harç içinden yavaşça sıyrılmasına bağlı yük azalması ile gerçekleşir (Şekil 2.15-d).

- Yukarıda bahsedilen göçme durumlarından biri gerçekleşmediyse tekstilde çekme kopması gerçekleşir (Şekil 2.15-e). Bu göçme modu, harç-tekstil arasındaki aderansın güçlü olduğu, tekstilin harç içinden sıyrılmadığı durumda oluşur. Numunenin maks.şekildeğiştirme, sıyrılarak göçme modundan daha azdır. Göçme; gerilme-şekildeğiştirme eğrilerinde ani yük/şekildeğiştirme azalması biçiminde kendini gösterir.

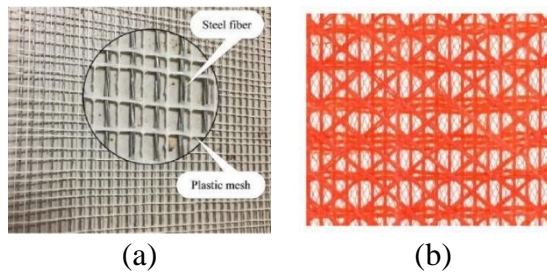
2.3 TRM Tekstilleri

TRM kompozitlerin güçlendirme fazını oluşturan tekstiller, doğal ya da yapay lifli ipliklerin, istenen doğrultularda yönlendirilmek üzere çeşitli yöntemler (dokuma, örme, yapışma vb.) ile bir araya getirildiği yapılardır. İplik, yapay ya da doğal liflerin yüzlerce veya binlercesinin oluşturduğu bir demettir.

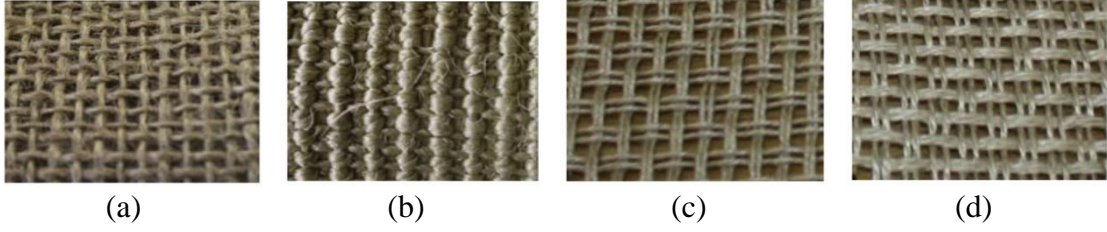
Yapısal tekstillerin üretiminde çoğunlukla cam, karbon, aramid, bazalt, PBO vb. lifler kullanılır (Şekil 2.16). Tekstiller, genellikle lif demetlerinin iki yönde ızgara şeklinde düzenlenmesiyle üretilir (Şekil 2.16-c), ancak maliyeti azaltmak için lif demetlerinin tek doğrultuda (Şekil 2.17-a), yada ikiden fazla doğrultuda yönlendirildiği (Şekil 2.17-b) çok doğrultulu tekstiller de mevcuttur [54]. Burada önemli olan, tekstildeki aralıkların inorganik matrisin nüfuzuna izin vermesidir. Yapısal tekstil üretiminde jüt, sisal, keten, kenevir (Şekil 2.18) gibi dokunmuş doğal lifler de kullanılmaktadır [55].



Şekil 2. 16 Çeşitli yapay lifli tekstiller: a) bazalt, b) karbon, c) cam, d) PBO [56].

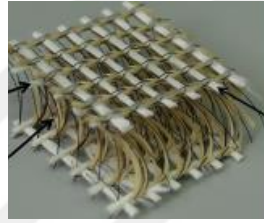


Şekil 2. 17 (a) Tek doğrultulu tekstil [20], (b) çok doğrultulu tekstil [57].



Şekil 2. 18 Doğal lifli bazı tekstiller: a) jüt, b) sisal, c)kenevir, d) keten [55].

Üretim yöntemlerindeki esneklik, tekstil yapısının ön tasarımına izin verir. Tekstiller genellikle iki boyutlu (2D, düzlemsel) ızgara şeklinde düzenlenir, ancak üç boyutlu-3D tekstil yapıları da mevcuttur (Şekil 2.19). Üç boyutlu olması durumunda, kompozitin kalınlığı yönünde yükleri de taşıyabilir. 3D tekstil kullanımı durumunda, üretilmek istenen elemanın geometrik formu tekstil ile kolaylıkla oluşturulur. Böylece, yapısal kompozit parçaların üretiminde harcanan emek ve zamandan tasarruf edilmiş olur [58].



Şekil 2. 19 3D tekstil örneği [59].

2.3.1 Lif Tipleri

TRM tekstillerin kompozitin davranışına etkisi ve servis ömrü boyunca takviye özelliğini sürdürebilmesi; kullanılan liflerin miktarı, kaplaması, mekanik karakteristikleri, tekstilin dokuma biçimi, matrisin ile bağlanma düzeyi, harcın alkali ortamı ve dış etkilere dayanıklılığına bağlıdır. Üretimde kullanılacak lif malzemesi ve tekstil türünü, kompozitin gereksinimleri belirler. Ayrıca lifler, standart tekstil makinelerinde düşük bir maliyet ile TRM takviye tekstiline dönüştürülebilmeli ve tekstil kolay işlenebilir olmalıdır. Uygulamada kullanılan lif tiplerinin mekanik karakteristikleri Tablo 2.1’de topluca verilmiştir, en çok kullanılan üç lif tipi burada ayrıca irdelenecektir.

Cam Lifler

Çimento esaslı kompozitlerde, cam lifler en yaygın lif türüdür. Cam lifler, yüksek özgül dayanımları (çekme dayanımı/yoğunluk oranı) ve düşük birim maliyeti açısından avantajlıdır. Cam liflerin temel bileşeni silikadır (SiO_2), ağ yapısı diğer oksitler eklenerek

değiştirilebilir. Lif üretimini kolaylaştırma amacıyla, Si ve O arasındaki bazı kovalent kimyasal bağları kırmak için Ca, K ve Na gibi düşük bağ değerli atomlar eklenebilir. Bu şekilde daha düşük atomik bağlar ile karakterize edilen ağ yapısı, lif üretim sürecini kolaylaştırırsa da, lifin elastisite modülünde dikkate değer bir azalma olur.

Tablo 2. 1 Lif tiplerinin mekanik karakteristikleri.

Lif Türü	Yoğunluk (g/cm^3)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Şekildeğiştirme (%)
Çelik	7.85	1200	200	3–4
Cam (AR)	2.78	2500	70	3.6
Bazalt	2.7	3000–4840	79.3–93.1	3.1
Karbon	1.60–1.95	3500–6000	230–600	1.5–2.0
PBO	1.56	3400	210	2.5
PVA	1.3	880–1900	25–41	6–10
Aramid	1.4	3000	60–130	2.1–4.0
Polietilen	0.95	250	1.4–2.2	10–15
HDPE	0.97	2000–3500	50–125	3–6
Sisal	1.33	600–700	38	2–3
Kenevir	1.2	530	45	3
Keten	1.45	700	60	2.3
Jüt	1.4	325	37.5	2.5

Bileşimlerine göre farklılık gösteren çeşitli cam lif türleri mevcuttur. Polimer bazlı kompozitler için; E-cam (yüksek elektrik direnci), S-cam (yüksek mukavemet) ve C-cam (kimyasal dirençli) lifleri kullanılır. Bunlar arasında E-cam en ekonomik ve yaygın olarak kullanılan türdür (polimer esaslı kompozitlerde), çapı genellikle 3-20 μm aralığındadır. Ancak, E-cam lifler, çimento bazlı matrislerde hidrasyon aşamasında açığa çıkan CH_2 'a dayanıklı değildir; OH^- iyonları camın yapısında bulunan SiO_2 bağlarını kırarak dıştan içe doğru kabuklanma ile cam lifi korozyona uğratar. Bu durum, çimento veya kireç esaslı kompozitler için alkali dirençli (AR) cam liflerin geliştirilmesine yol açmıştır. AR-cam lifler % 16-20 (ağ.) iç yapıya zirkonyum dioksit (ZrO_2) eklenerek elde edilir.

Bazalt Lifler

Bazalt, yeryüzüne çıktığında katılaştıran erimiş lavların oluşturduğu volkanik bir kayadır. Kristal yapılarında, erimiş lavların soğuma hızı da etkilidir; bazalt oluşumlarının mineral seviyeleri ve kimyasal yapıları, bölgeden bölgeye önemli ölçüde değişir.

Bazalt lifler, çelik kadar olmasa da -cam life benzer- yüksek elastisite modülü (79.3–93.1 GPa), yüksek çekme dayanımı (3.000–4.840 MPa), cam life göre daha yüksek yangın dayanımı (fiziksel hasara uğramadan 1100-1200°C sıcaklığa saatlerce dayanabilir), kolay

işlenebilir olması ve uygun maliyeti ile oldukça avantajlıdır. Bazaltın çeliğe göre yoğunluğu çok düşük ($2800\text{--}2900\text{ kg/m}^3$) olup karbon ve cam life yakındır. Karbon liflerden daha ekonomik, cam liflerden daha yüksek dayanımlıdır. Bazalt liflerin nem içeriği %1'den azdır, çapları genellikle 10-20 μm aralığındadır. Çimentolu matris ile olan uygulamalarda sıklıkla kaplamasız kullanılır, CH kaynaklı korozyona dikkat edilmelidir.

Karbon lifler

1970'lerde güvenlik ve kalitenin maliyetten daha önemli olduğu havacılık ve uzay endüstrisi için geliştirilmiş; 1980'lerde karbon lif maliyetindeki önemli azalma ile, karbon lif başka alanlara da genişlemiş ve kullanımı yaygınlaşmıştır [60].

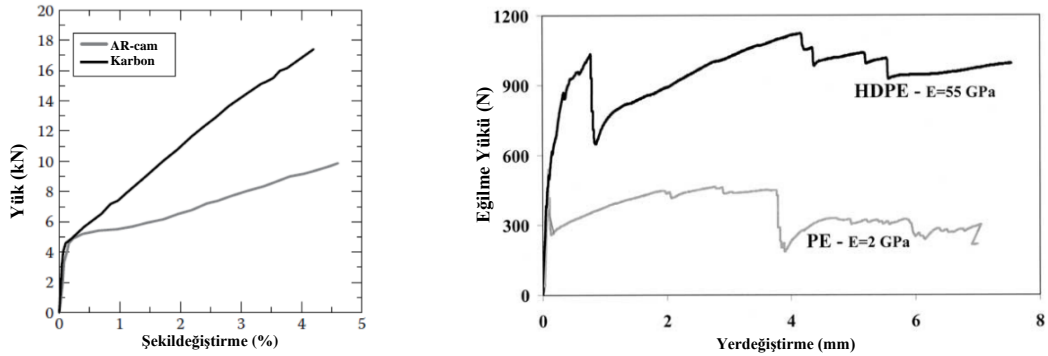
Ticari olarak, sürekli ya da kısa kesilmiş (6-50 mm uzunluğunda) karbon lifler mevcuttur. Sürekli karbon iplikler kullanım alanına göre değişmekle birlikte onbinlerce lif ($\sim 5\ \mu\text{m}$ çap) içerebilir, çekme dayanımları, iplik inceliğine bağlı olarak değişmekle birlikte $\sim 2.000\text{ MPa}$ 'dır. İnorganik matrisli uygulamalarda karbon lifin çok düz yüzeyi nedeniyle kolaylıkla sıyrılma problemi söz konusudur, bu amaçla bağlanmayı artırıcı kaplamalar ve/veya mineral katkılı matris uygulamaları yapılmaktadır.

Lif Tipinin TRM Mekanik Özelliklerine Etkisi

Tekstili oluşturan lif tipinin çekme dayanımı, şekildeğiştirme kapasitesi, elastisite modülü, kaplaması, matrise yapışma düzeyi ve matrisin alkali ortamına karşı dayanıklılığı kompozitin mekanik karakteristiklerini belirler. Karakteristikleri belirleyici etkenler olarak;

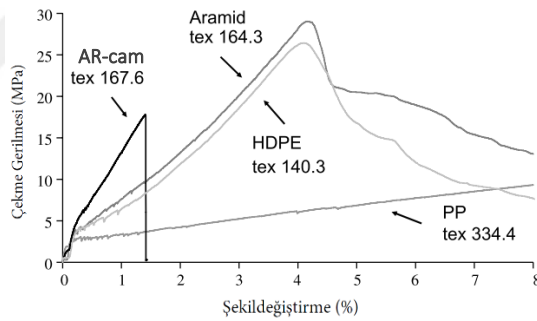
- TRM kompozit, tekstil kumaş ile takviye edilmiş inorganik esaslı bir matristen yapılıdır. Suyu seven yapıdaki bir lifin (*hydrophilic*) matris ile -genellikle lifin zayıf alkali direnci nedeni ile korozyonu sonucu oluşan kabuklanma (*incrustation*) nedeniyle aşırı güçlü (*overbonding*) bağı, donatının sıyrılmadan kopmasına neden olabilir (gevrek davranış). Suyu sevmeyen liflerde (*hydrophobic*) ise ara yüzeydeki zayıf bağ oluşumu liflerin harç içerisinde hızla sıyrılmasına neden olacaktır, bu durumda düşük dayanımlı bir davranış söz konusu olur.
- Tekstili oluşturan liflerin elastisite modülü diğer bir önemli parametredir. Karbon ve AR cam liflerden üretilmiş kompozitlerin aksenal çekme testlerinde [61], karbon lifli TRM'nin ~ 3 kat daha yüksek elastisite modülü nedeniyle çekme dayanımı daha yüksektir (Şekil 2.20a). Aynı matris bileşimi için, elastisite modülü çok farklı HDPE

ve PE tekstiller ile takviye edilmiş TRM'de ise [62]; ilk çatlak sonrası, yüksek elastisite modüllü HDPE kompozitin eğilme dayanımı ~3 katı yüksek bulunmuştur (Şekil 2.20b).



Şekil 2. 20 Lif elastisite modülünün çimentolu matris ile adersana etkisi [62].

- Kompozitin maks.şekildeğiştirmesini, tekstilin çekme dayanımı ve matris ile adersan düzeyi yönetir. Çekme dayanımı, tekstilin çekme dayanımı ve elastisite modülü ile orantılı iken; şekildeğiştirme, tekstilin maks. şekildeğiştirme kapasitesi ve matristen sıyrılıp çıkabilme yeteneğine bağlıdır (Şekil 2.21).

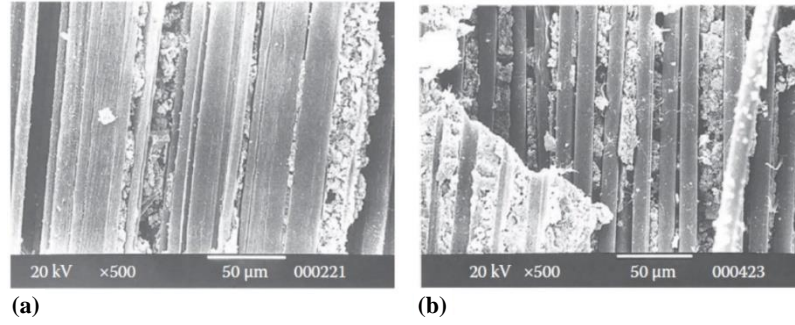


Şekil 2. 21 Farklı elastisite modüllü liflerle takviye edilmiş kompozitlerin çekme davranışı [63].

- Benzer kalınlıklı demetlerde lif çapı, matrisin liflere nüfuziyeti açısından önemlidir. Aynı göz açıklıklı AR-cam lif demeti⁸, 13 kat daha fazla liften oluşan karbon lif demeti ile karşılaştırıldığında [64] tek başına karbon tekstil, AR-cam kumaşa kıyasla %60 daha yüksek dayanım gösterse de matris içerisinde iken; kompozit dayanımı/lif dayanımı oranı AR-cam demetli olanda iki kat fazla olmuştur. Bu durum, karbon lif demetindeki çok sayıda lif nedeniyle düşük matris penetrasyonunun bir sonucudur.

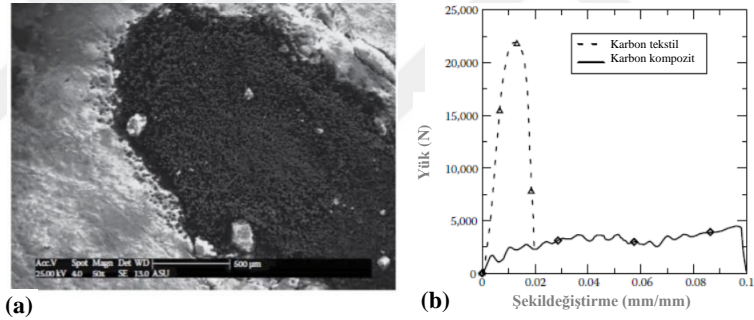
⁸ Karbon lif demeti 21.000 lif (1.600 tex), AR-cam lif demeti 1.600 liften (2.400 tex) meydana gelmiştir.

Elastisite modülü birbirine yakın HDPE ve 1/3'ü daha az lif içeren Kevlar⁹ takviyeli kompozitler incelendiğinde [65] de, Kevlar demetinin matris geçirgenliğinin daha iyi olduğu görülmüştür (Şekil 2.22).



Şekil 2. 22 Demet lif yoğunluğu ve matrise nüfuz etme durumu a)HDPE, b)Kevlar [65].

Demetteki lif adedi fazlaysa (Şekil 2.23-a), matris nüfuz edemeyeceği için, iç kısımdaki lifler kolaylıkla sıyrılarak çıkacak ve dayanım tekstilin kendisine kıyasla çok daha düşük olacaktır (Şekil 2.23-b).



Şekil 2. 23 a) Karbon lif demeti ve çeperler ile sınırlı matris nüfuziyeti, b) Karbon TRM ile karbon tekstilin çekme davranışının karşılaştırılması [66].

2.3.2 Tekstil Üretim Teknikleri

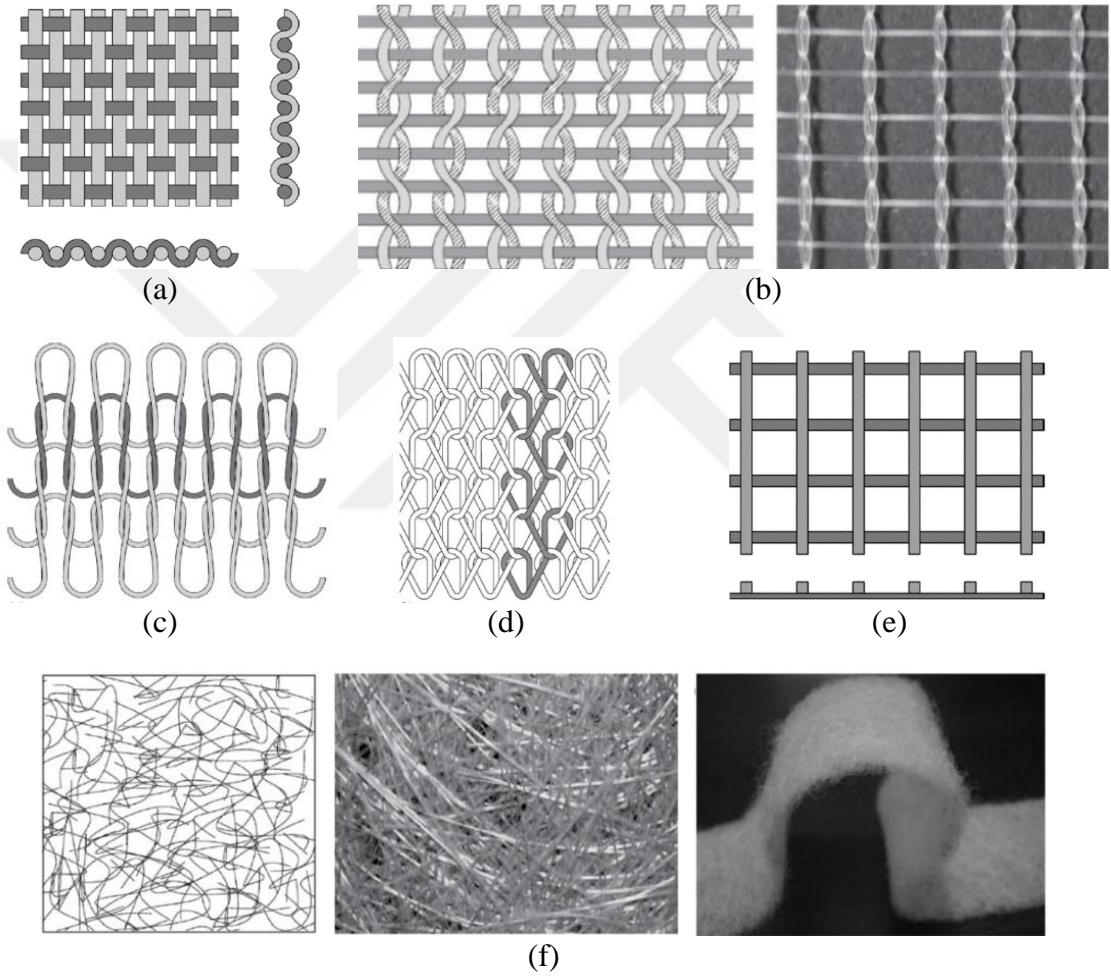
Tekstiller, esas olarak ipliklerin kumaş yapısını oluşturmak için nasıl birleştirildiğine göre farklılık gösteren çeşitli geometrilerde üretilebilir. Tekstil takviyeli kompozit uygulamaların etkinliğini belirleyen önemli bir kriter, kumaşın açık ızgara yapısı ve yeterli form stabilitesinde olmasıdır. Ortalama boyutu ~10 µm olan çimento taneleri ile tipik çapı 1 mm ve daha ince olan agregalardan oluşan matris, tekstil demetleri arasındaki boşluklara nüfuz edebilmelidir. İpliklerin bağlantı yöntemi; kumaş geometrisini, göz

⁹ Kevlar lif demeti 325 lif, HDPE lif demeti 900 liften oluşmaktadır.

açıklıklarını, iplik geometrisini, kumaş özelliklerini ve işlenebilirliği etkiler. Kumaşlar tipik olarak, basitten karmaşık formlara doğru değişen üretim yöntemlerine göre sınıflandırılır; burada öncelikle bu üretim yöntemlerinden bahsedilecektir.

- *Dokuma Tekniği:* Dokuma kumaşlar, birbirine dik ($0^{\circ}/90^{\circ}$) iki iplik takımının birbirinin altından ve üstünden dönüşümlü olarak geçirilmesiyle üretilir (Şekil 2.24-a). Kumaş boyunca uzanan ipliklere çözümlü iplikleri, eni boyunca uzanan ipliklere ise atkı veya dolgu iplikleri denir. Dokuma kumaşlarda iplikler birleşme noktalarında sürtünme ile birbirine bağlanır, kumaşı sabit bir şekilde bir arada tutmak için yeterli sayıda bağlantı noktası gereklidir. Bu kumaşlar iplik bakımından yoğundur, iplikler dağılmaz, ancak, ızgara şeklinde düzenlenemez. Dokuma kumaşta çözümlü ve dolgu ipliklerinin birbirinin altından ve üstünden geçirilmesi, yani bağlantı yönteminden dolayı her iki yöndeki iplikler kıvrım şeklindedir. Bağlantı yöntemi yalnızca sürtünme ile olduğu için, ipliğin içindeki lifler her yönde sıkılmaz, bu da demetleri daha gevşek ve açık bırakır. Burada, iplikleri bir arada tutacak kadar güçlü ama uygulaması kolay özel bir dokuma yöntemi gereklidir. Bu ihtiyaç leno dokuma tekniği (Şekil 2.24-b) ile karşılanır. Leno dokuma, güçlü bir kenetlenme sağlamak için iki çözümlü ipliğinin atkı ipliklerinin etrafına büküldüğü ve seyrek göz açıklıkları olan, stabil kumaş formunda özel bir dokuma yapısıdır. İplik kayması, yerdeğiştirmesi olmadan bükülmüş çözümlü iplikleri atkı ipliklerine sıkıca bağlanır. Açıklık derecesi, eşleştirilmiş çözümlü iplikleri arasındaki aralığın boyutu ile belirlenir. TRM kompozit uygulamaları için ideal olarak güçlü, hafif ve açık bir tekstil yapısı üretir. Bu tip tekstillerde klasik dokumadan farklı olarak atkı iplikleri düzdür (kıvrımlı değildir).
- *Örme Tekniği:* Örme kumaş yapısı, ipliklerin birbirine ilmeklenmesiyle üretilir. İlmekleri oluşturmak için, iplikleri çeken bir dizi yakın aralıklı iğne kullanılır. İki ana örme kumaş üretim yöntemi atkılı örme (Şekil 2.24-c) ve çözümlü örmedir (Şekil 2.24-d).
- *Yapıştırma Tekniği:* Yapıştırma kumaşlar, iki dik çözümlü ve atkı ($0^{\circ}/90^{\circ}$) ipliğinin birleşim yerlerinden tutkalla veya ısıtılarak birleştirilmesiyle üretilir (Şekil 2.24-e). İplik bağlantı noktalarındaki güçlü bağlantılar nedeniyle, ağ yapıları çok çeşitli açıklıklarda mevcuttur. Her iki yöndeki iplikler düz formda olduğundan, bu tip tekstiller, TRM kompozitler için uygundur.

- *Dokusuz (Nonwoven) Tekstil Tekniği:* Dokunmamış kumaşlar; yapıştırma, ısıtma, iğneyle delme vb. ile birbirine bağlanan lif ağlarından üretilir (şekil 2.24-f). Örme veya dokuma kumaşların aksine; uzun lif demetleri yerine kısa, uzun veya sürekli liflerden yapılır, lifler her yöne rastgele düzenlendiği için yoğun bir yapıdadır. İplik retimi olmaması, örme veya dokuma tekstile göre daha düşük maliyetli, yüksek hızlı ve büyük hacimli üretim sağlar. Genellikle iplikten üretilene göre daha düşük mekanik performans sergilemesine rağmen, TRM kompozitler için düşük maliyetli bir alternatiftir.

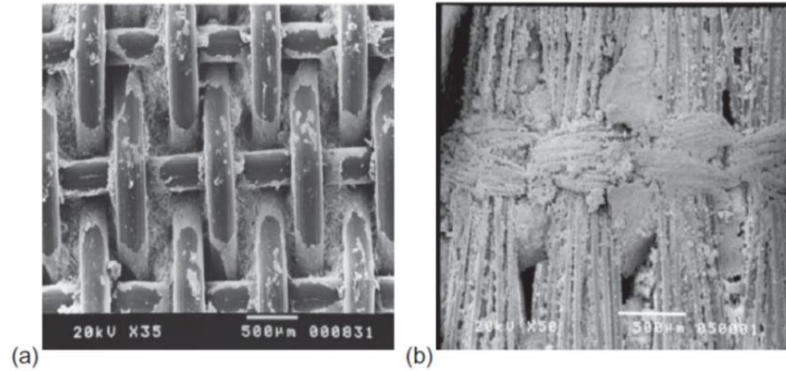


şekil 2. 24 (a)Dokuma kumaş yapısı, (b) Leno dokuma tekniği, (c) atkılı örme tekniği, (d) zğl örme tekniği, (e) yapıştırma tekniği, (f) dokusuz tekstil yapısı [11].

2.3.3 Tekstil Yapısının TRM Mekanik zelliklerine Etkisi

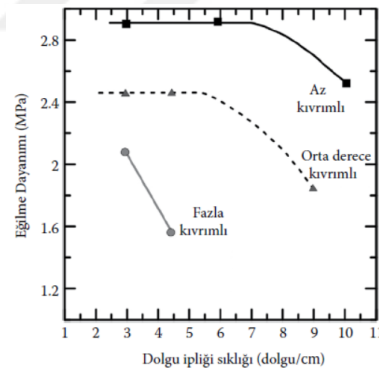
Genellikle tekstiller, yüzlerce ince çaplı liften oluşan çok lifli (*multifilament*) ipliklerden üretilir. Dokuma sırasında oluşan iplikteki girinti-çıkıntılar (şekil 2.25) tekstil-matris

aderansını etkiler. Tekstili oluşturan iplik, yüksek takviye verimliliği için mümkün olduğunca düz olmalıdır.



Şekil 2. 25 Çimentolu matris içinde a) dokuma tekstil [67], b) örme tekstil [68].

Ko (1987) [69], dolgu ipliklerindeki (yük yönüne dik) kıvrım artışının¹⁰, düz formda olmayan tekstil kullanılan FRP kompozitte eğilme dayanımını azalttığına işaret etmiştir (Şekil 2.26). TRM kompozitlerde ise, tekstil geometrisi ve kompozitin eğilme dayanımı arasındaki ilişki, polimer kompozitlerden önemli ölçüde farklı ve daha karmaşıktır. Harç matris ile tekstil arasında gelişen bağ matrisin taneli yapısından dolayı genellikle zayıftır. Bu durumda, mekanik ankraj gerilme transferinin kontrolunda önemli hale gelir.



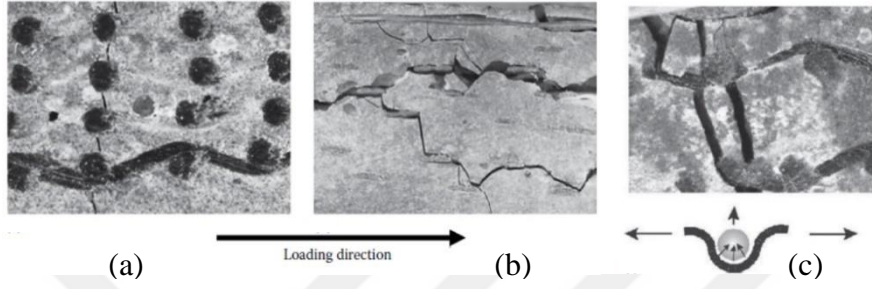
Şekil 2. 26 Polimer esaslı kompozitlerde iplik kıvrımlarının etkisi [69].

Enine ipliklerin düğüm noktaları, zayıf noktalar olarak kabul edilebilir ve dik ipliklerin etrafındaki matriste lokal gerilme birikimleri gelişmesi mümkündür. Çatlaklar bu bölgelerden başlar (Şekil 2.27) ve bir zayıf noktadan diğerine yayılma eğilimindedir (Şekil 2.28) [70]. Çekme yüklemesi dalgalı geometrileri düzleştirdiğinden, düğüm noktaları yakınında çatlamlar söz konusu olur (Şekil 2.28-c).

¹⁰ Dokuma tekstillerde, iki dik iplik takımı ($0^\circ/90^\circ$) birbirinin altından ve üstünden geçtiği için kıvrılır.

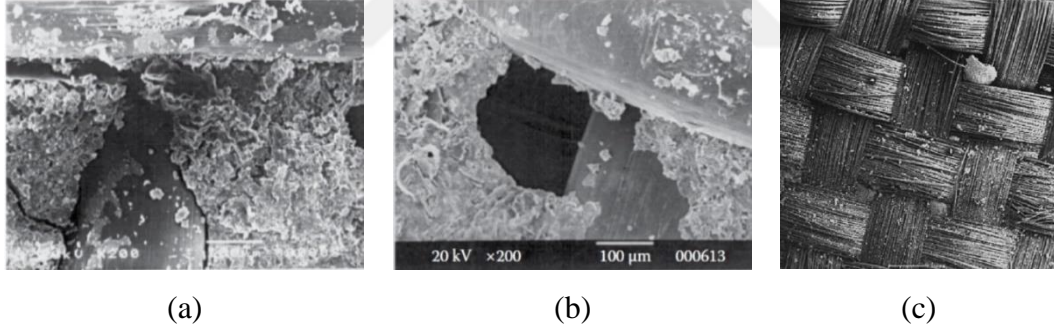


Şekil 2. 27 Çimentolu matris içinde örme kumaş bağlantı noktası [59].



Şekil 2. 28 İkincil doğrultudaki iplikler nedeniyle hasar oluşumu ve çatlaklar [70].

Enine doğrultudaki iplik artışı matrisin penetrasyonunu da azaltır, Şekil 2.29-a,b’de bu durum 10 dolgu ipliği/cm (göz açıklığı <1 mm) ile 5 dolgu ipliği/cm tekstili için karşılaştırılmıştır. Benzer bir örnek de PVA düz dokuma için Şekil 2.29-c’de verilmiştir.



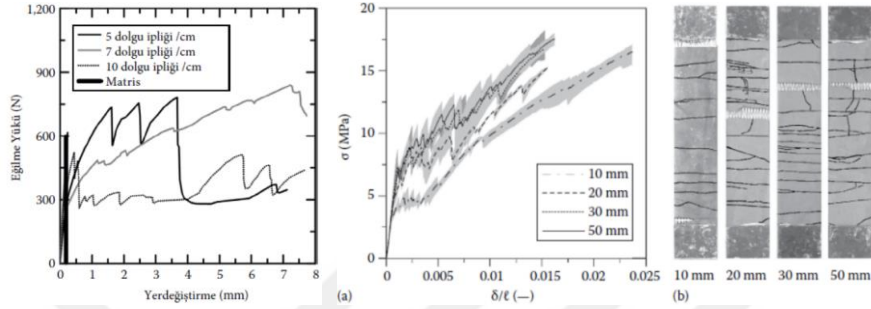
Şekil 2. 29 Farklı yoğunlukta dokuma kumaş takviyeli TRM SEM görüntüleri

(a) 5 dolgu ipliği/cm, (b) 10 dolgu ipliği/cm [11], (c) sıkı dokuma PVA lifli tekstil [68].

Peled vd. [35], PE düz dokuma tekstilli TRM’de dolgu ipliği yoğunluğunu araştırmıştır. 5,7 ve 10 dolgu ipliği/cm yoğunluklu tekstiller karşılaştırılmış, sırası ile 15, 18 ve 13 MPa eğilme dayanımı elde edilmiştir; 7 dolgu ipliği/cm, yüksek pekleşme düzeyi ve tekstilin sıyrılabilmesi ile en optimum sonucu vermiştir (Şekil 2.30-a).

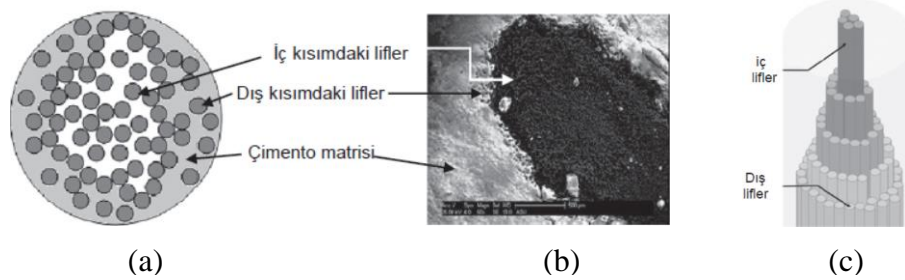
Tekstil göz açıklıklarının boyutu, matrisin iplik aralığına ne ölçüde nüfuz edebileceğini belirler. Daha yüksek tekstil geçirgenliği, daha güçlü mekanik ankraj ve daha iyi

kompozit performansına yol açar. Colombo vd. (2013) [71]; leno dokumalı tekstilde atkı aralığı 10, 20, 30, 50 mm olan kumaşları karşılaştırmıştır (Şekil 2.30-b). 10 mm için pekleşme ile birlikte sıyrılarak göçme performansı hakimdir. 20, 30 ve 50 mm durumunda pekleşme, sert aderans ayrılmaları ile birlikte gözlenmiştir. 30 ve 50 mm aralıklı olanda yük taşıma kapasitesi daha fazla ve benzerdir, 50 mm lik olanda atkı iplikleri arasında çatlaklar mevcuttur, en yoğun boyuna çatlak durumu 30 mm açıklıkta elde edilmiştir.



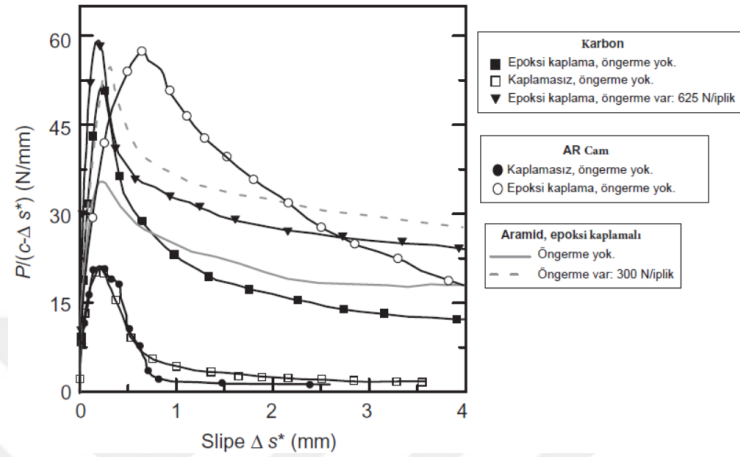
Şekil 2. 30 Enine (ikincil) doğrultudaki iplik yoğunluğunun etkisi: (a) eğilme testi performansı [35] (b) tek eksenli çekme testi performansı [71].

Taneli yapıdaki inorganik matris, iplik içindeki boşluklara nüfuz edebilmelidir, yeterince nüfuz edemediği durumda iç lifler (çekirdek) nispeten serbest kalır ve kompozit dayanımına katkısı olamaz [72]–[75] (Şekil 2.31). Zhu ve Bartos [72]; itme (*push-in*) testi ile, çimentolu matrise gömülü bir demeti araştırmış, farklı konumlardaki liflerin kayma dirençlerinin farklılıklar gösterdiğini ve dış liflerin, iç liflere göre daha fazla gerilme taşıdığını saptamıştır. Yükleme sırasında önce dış liflerde kopmalar meydana gelir ve yüksek ilk çatlak dayanımı sağlar. Dış lifler koptuktan sonra, iç liflerin dış lifler üzerinde kaydığı *teleskopik çekme* durumu oluşur, bu durumda içteki lifler gerilmeleri sadece aralarındaki yüzeysel temas yoluyla aktarır (Şekil 2.31-c) [73][76][77]. Maksimum performans için, iç ve dış lifler arasında gerilme aktarımı iyileştirilmelidir.



Şekil 2. 31 Matris içinde gömülü bir ipliğin kesiti; a) şematik görünüm, b) karbon ipliğinin gerçek görüntüsü [78] (c) Teleskopik kayma mekanizması [77].

Lif demetlerini kaplama ve demet içi boşlukları polimer ile doldurmanın olumlu etkileri bildirilmektedir [79]–[82]. Xu vd. [83], epoksi ile kaplanmış karbon, AR-cam ve aramid demetlerin, kaplanmamış olanlara göre çimento esaslı matrise daha güçlü bağlandığı sonucuna ulaşmıştır (Şekil 2. 32). Ancak, artan dayanıma karşılık enerji yutma özelliği belirgin şekilde artmayabilmektedir.



Şekil 2. 32 Kaplamanın iplikteki aktif lif sayısına etkisi [83].

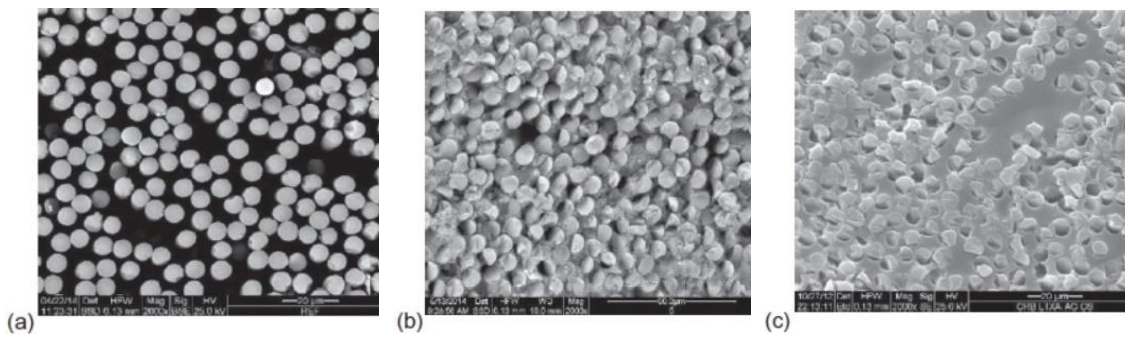
Hegger vd. [84]; akrilat emdirilen AR-cam tekstil ile üretilmiş kompozitin, epoksi reçine uygulanmış olana kıyasla dayanımın daha çok arttığını gözlemiştir. Akrilat kaplama durumundaki daha yoğun çatlak aralığına karşılık, epoksi kaplamalı olanda daha ince çatlakların görülmesi bu iyileşme ile ilişkilendirilmiştir. Karbon tekstiller için polimer kaplama ile yük taşıma kapasitesindeki artış Koeckritz vd. [85] tarafından da bildirilmiştir. Ayrıca, Li ve Xu [86], mekanik ankrajı arttırmak için, karbon tekstilin üzerine kum serpilmiş polimer kaplama uygulaması ile çimento esaslı matrise daha güçlü bağlanma elde etmiştir.

Polimer kaplamanın tekstilde aktif olarak çalışan liflerin oranını artırması, kompozit açısından önemli bir kazanımdır, ancak bu kullanımı sınırlayan etkenler de olasıdır. Epoksi kaplamalı karbon-tekstil ile üretilmiş çimentolu kompozitte [87], polimer ile matrisin uyumsuz kimyasal özelliklerinden dolayı [88], tekstil ile matris arasındaki daha düşük bağlanma özelliğinden kaynaklanan *delaminasyon* (ayrılma) mümkündür (Şekil 2.33). Ayrıca, pratik kullanım açısından, polimer bazlı dolgu maddelerinin yüksek sıcaklığa duyarlı olduğu da unutulmamalıdır. Kaplama ile; bir yandan lif demetlerindeki boşlukları doldurarak donatının verimini en üst düzeye çıkarırken, diğer taraftan kimyasal uyumsuzluk ve ısıl duyarlılık gibi sorunların üstesinden gelmek gerekir.



Şekil 2. 33 Matris ile epoksi kaplamanın kimyasal uyumsuzluğu nedeniyle oluşan delaminasyon hasarı [87].

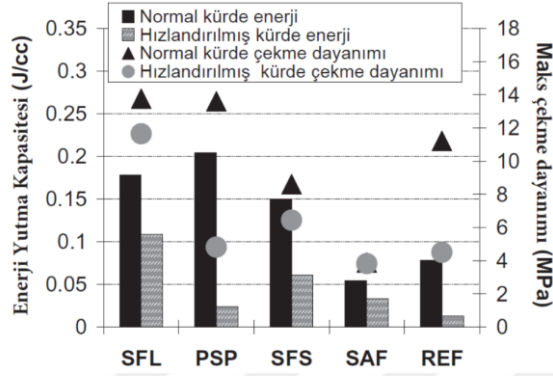
Yaşlanma sırasında iplik içindeki lifler arasında CH birikiminin sınırlanması, teleskopik göçme mekanizmasının oluşmaması ve sünekliği artırmak hedeflenir. Bu konuya çözüm arayan araştırmacılar, lifler arasındaki boşlukları polimerler yerine nano bileşenler ile doldurma yöntemini denemiştir. Scheffler vd. [80], kaplamaya nano bileşenlerin eklenmesi ile iplik-matris arayüzünde C-S-H oluşumu ve arayüz rijitliğinin artmasıyla kompozit dayanımının iyileştiğini ifade etmiştir. Nano yapı silis dumanı (SF) uygulanmış AR-cam ve çeşitli karbon tekstiller de, polimer kaplı kompozitler ile karşılaştırılmıştır [77], [89]–[91]. Polimer kaplama üzerine SF'nin uygulandığı hibrit kaplamalar da denenmiştir. Zamir vd. [92] karbon tekstillerde, epoksi reçine üzerine yarı kurumuş durumda iken SF çözeltisi uygulamıştır. Tekstil-matris aderansı referans numunelere (dolgunsuz-kaplamasız) kıyasla iki kat artmış, hem erken yaşlarda hem de zamanla liflerin arasındaki CH'nin Ca^{+2} iyonları ile SF'nin puzolanik reaksiyona girmesiyle boşlukların homojen biçimde C-S-H ile sarıldığı, çekme dayanımı ve toklukta önemli iyileşmeler olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.34), aynı zamanda kolaylıkla sıyrılmaya yada delaminasyon durumları da engellenmiştir.



Şekil 2. 34 a) referans, b) silis dumanı dolgulu, c) epoksi kaplamalı uygulamalar [92].

AR-cam kompozitlerde [77], [90], [91] nano boyutlu dolgular, referans numunelere kıyasla, normal kür şartlarında kompozit performansını değişen oranlarda arttırmaktadır. Ancak, yaşlanma sonrası lif yüzeyinde oluşan korozyon ve buna bağlı gevrekleşmenin

tam olarak engellenemediği görülmüştür (Şekil 2.35). Yaşlandırma öncesi ve sonrası yutulan enerji değerlendirilirse, en iyi performans (% 39 azalma) 200 nm SF dolgusu (SFL) ile elde edilmiştir [50 nm boyutlu SF(SFS)'ye kıyasla daha iyi sonuç alınmıştır]. En büyük azalma (%89) ise PSP (*polystyrene peroxide*) uygulanmış kompozitte izlenmiştir.



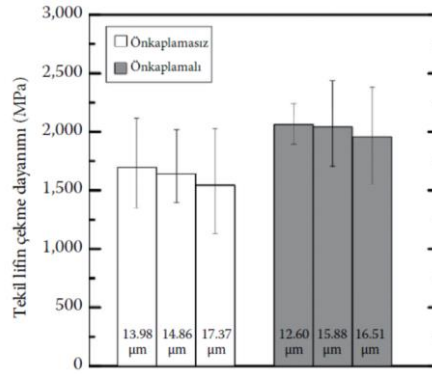
Şekil 2.35 Çeşitli dolgu malzemelerinin kompozit performansına etkisi [77].

2.3.4 Tekstil Kaplamaları

Lifler, lif demetleri veya tekstil yüzeyleri aşağıda sıralanan nedenlerle kaplanır:

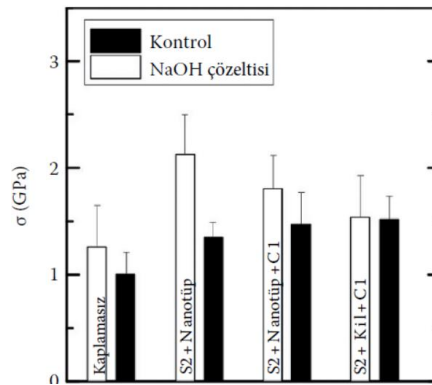
1. Tekstili, dayanım ve aşınma direnci açısından korumak [82];
2. Lifleri demet halinde tutarak yük taşıma kapasitesinin arttırmak;
3. Tekstil-matris arasındaki aderansı arttırmak [79], [93];
4. Tekstilde form stabilitesi ve lif demetlerinin matriste istenen doğrultuda hizalanmasını sağlamak;
5. Lif demetlerini kimyasal saldırılara karşı korumak, dayanıklılığını arttırmak.

Lifin dayanımı, lif yüzeyinde bulunan ve gerilmelerin yoğunlaştığı yüzey kusurlarına da bağlıdır. Bu kusurlar genellikle lif çapı ile ilişkilidir, büyük çaplar daha fazla yüzeysel kusur içerir, lifin çekme dayanımı çapı ile ters orantılıdır. Farklı çaplarda AR-cam liflerden (13, 17 ve 19 μm) üretilmiş iplikler ile yapılmış deneysel bir çalışmada [80], dayanımlar sırasıyla 427, 353 ve 304 MPa olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan, liflere eriyikten çekildikten hemen sonra uygulanan ön kaplama (*sizing*, *haşılma*), lif yüzeyindeki kusurları kısmen doldurarak lifin çekme dayanımını iyileştirir [94]. Ön kaplama uygulanmış çeşitli çaplardaki AR-cam liflerin ön kaplamasız liflere göre çekme dayanımındaki artış Şekil 2.36'da görülmektedir.



Şekil 2. 36 Ön kaplamanın lif çekme dayanımına etkisi [80].

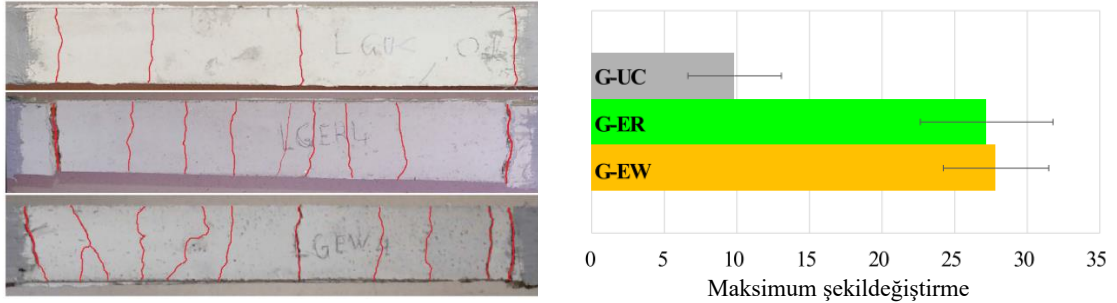
Lif çekme dayanımları, ön kaplama malzemesine nano bileşenler eklenerek geliştirilebilir. Bu bileşenler lif çatlağına/kusuruna yerleşerek, kusurların kendi kendini iyileştirmesini sağlar ve kusur ucundaki gerilme yoğunluğunu azaltır [95]. Lif yüzeyinin kaplanması, kimyasal dayanıklılığın artmasına yol açarak liflerin ve dolayısıyla kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirir. SBR ve/veya içerisine düşük bir oranda (ağırlıkça: %0.2) karbon nanotüplü karışım ile kaplanan AR cam liflerin, çekme dayanımı yüksek oranda (~%70) artmıştır. Ayrıca, ön kaplamaya ağırlıkça %1 oranında organokil eklenmesi de AR cam lif dayanımını %25 oranında arttırmış ve ipliğin alkali direncini iyileştirmiştir (Şekil 2.37) [93].



Şekil 2. 37 Kaplama içeriğindeki nano bileşenlerin etkisi [93].

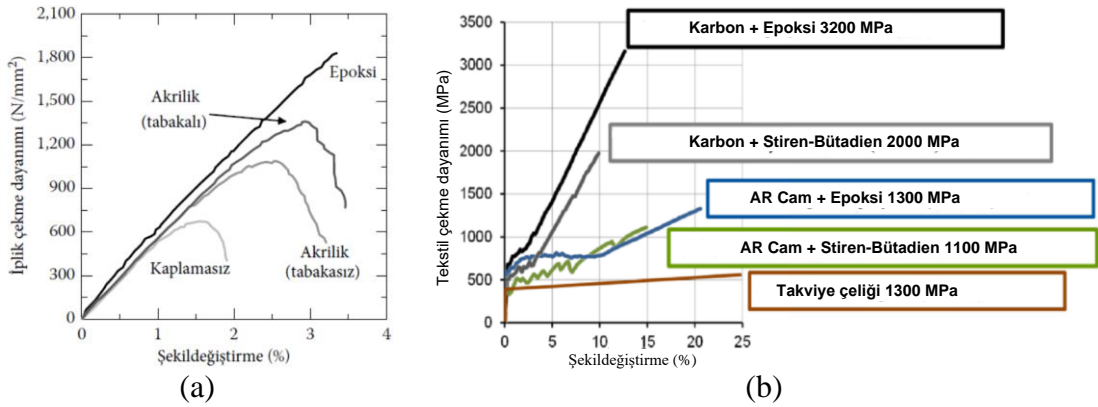
Kaplamanın tekstil üretmek için kullanılan lif demetlerine/ipliklere uygulanması durumunda, lif demetinin çekme dayanımı, büyük ölçüde kaplamanın ağırlıkça oranına bağlıdır. Ağırlıkça artan oranlarda SBR kaplamalı AR-cam ve karbon lif demetleri ile yapılan çalışmalarda, çekme dayanımları giderek artmıştır [96]. Diğer taraftan, kaplamasız (G-UC) ve farklı iki epoksi kaplama kalınlığının (G-ER,G-EW) kompozit

etkinliğine etkisi incelendiğinde [97], kaplama miktarındaki artışın optimal oranda olması gerektiği görülmektedir, epoksi kalınlığı daha ince olan G-EW’da hem çekme dayanımı, hem de şekildeğiştirme daha fazladır, daha sık çatlak oluşumundan (en alt numune) da bu durum gözlenmektedir (Şekil 2.38-b).



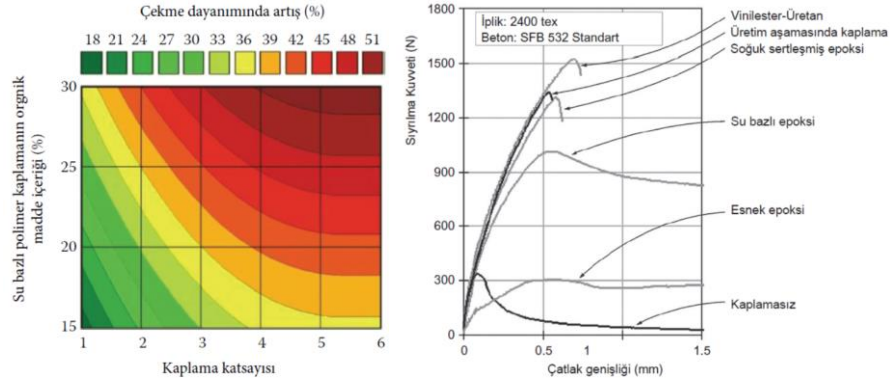
Şekil 2. 38 Kaplama kalınlığının çatlak yayılımı ve şekildeğiştirmeye etkisi [97].

Kaplamanın lif demetine uygulanması söz konusu olduğunda; kaplama demetin lifleri arasındaki boşlukları doldurur, çok sayıda lifi etkin bir şekilde çalıştırır ve böylece lif demetinin çekme karakteristiklerini iyileştirir. Epoksi ve akrilik çözeltisi ile kaplanmış AR-cam lif demetinin çekme davranışı iyileşmiş (Şekil 2.39-a) [82]; benzer sonuçlar, AR-cam ve karbon ipliklerinin epoksi ve SBR ile kaplandığı tekstillerde de gözlenmiştir. Epoksi kaplanmış kompozitler SBR ile kaplanmış kompozitlere göre daha büyük dayanıma ulaşmıştır (Şekil 2.39-b) [98].



Şekil 2. 39 Kaplama türünün iplik çekme dayanımına etkisi [82], [98].

Polimer kaplama uygulanarak tekstil mekanik performansında elde edilen iyileştirme, kaplama miktarı ve su bazlı polimer çözeltisindeki organik içeriğin fonksiyonudur (Şekil 2.40) [85]. Çözeltideki organik içerik ve kaplamanın miktarı arttıkça tekstilin çekme dayanımı artar ama gevrekleşir [82].



Şekil 2.40 Kaplama miktarı, kaplama içeriği ve tekstil çekme dayanımı ilişkisi [85].

Tekstil içindeki çok lifli demetlerin, demet kesitindeki tüm liflere düzgün bir şekilde nüfuz eden bir polimer ile tamamen kaplanması, demeti oluşturan lifleri birbirine bağlar ve böylece çok lifli olan iplik, tek bir yapısal birim olarak yükleri taşır. Böylece etkin lif sayısı, dolayısıyla kompozitin toplam dayanımı artar. Kaplama malzemesinin ipliklere tam olarak nüfuz edebilmesi için, polimer düşük viskoziteli olmalıdır.

Lif ve lif demetlerine uygulanan kaplamalara ek olarak; tekstil ızgarası yüzeyine de son bir kaplama uygulanabilir, ancak matrisin nüfuziyeti için tekstil göz boşlukları açık bırakılmalıdır. Tekstil üzerindeki bu son kaplama, mekanik performansı iyileştirmesinin yanında, tekstilin taşınma ve kullanım özelliklerini iyileştirir.

2.4 TRM Harçları

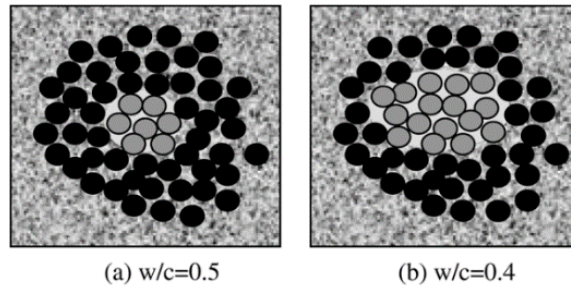
TRM kompozit sistemlerinde matris fazı olan ince taneli harç, içinde gömülü olan takviye tekstilini sararak çevresel etkilerden korur ve uygulama yüzeyi ile kompozit arasında gerilme transferini sağlar. Bu harçlar, genellikle çimento veya kireç esaslı karışımlardan oluşur. Harcın esas bileşenine ek olarak silis dumanı (SF), uçucu kül (FA), yüksek fırın cürufu (S) ve doğal puzolanların eklendiği karışım tasarımları da literatürde sıkça görülür. Bunların yanında, harç ile tekstil arasındaki yapışmayı güçlendirmek ya da harcın işlenebilirliğini arttırmak amacıyla organik esaslı polimer katkıları harç karışımına eklenebilir, ancak bu katkıları kompozitin hava geçirgenliği ve yangın dayanımı konularında olumsuz etkiye neden olur [100].

TRM kompozitleri için tasarlanan matris malzemesi için temel gereksinimler aşağıdaki gibi sıralanabilir [101]:

- Yük aktarımı için yeterli mekanik özelliklere sahip olması,

- Tekstillere iyi nüfuz etmesi ve tekstil-matris arayüzünde yeterli bağlanmayı sağlaması,
- Lifler ve uygulama yüzeyi ile termal ve kimyasal uyumluluğunun olması,
- Isıl direnç ve yangına dayanıklılık,
- Sahada işlenebilirlik (geniş dikey yüzeylere uygulanabilirlik, uygulama için yeterli izni veren priz süresi),
- Ekolojik kabul edilebilirlik seviyesinde olması.

Çimento esaslı harçlar, betonarme yapıların onarımı ve güçlendirilmesi için sıklıkla kullanılırken; tarihi yapıların restorasyon çalışmalarında ise kireç esaslı harçların kullanımı daha uygundur [102]. Tekstil takviyelerinin görece yoğun ağ yapısı nedeniyle; polimerik matrislerin aksine, çimentolu matrisin penetrasyonu, tam verimli değildir. Bu durumda matrisin taneli kompozitler sınıfına giren bir malzeme olması etkilidir. TRM matrisin viskozitesi kompozit performansını önemli ölçüde etkiler. Farklı su/çimento oranına sahip matrislerde, akışkanlığın artmasına bağlı olarak, nüfuz etme oranı dolayısıyla iç liflerin bağlanması artmaktadır (Şekil 2.41) [99].



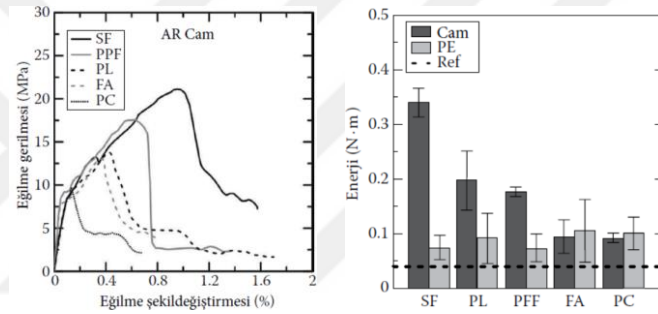
Şekil 2.41 Akışkanlığın iç filamentlere doğru matris penetrasyonuna etkisi [99].

2.4.1 Mineral Katkılar

Matris ve tekstil arasındaki kuvvet aktarımı, aderans ve sürtünme yoluyla mümkün olduğundan; iyi bir mekanik performans ve dayanıklılık için matrisin de tekstil donatı malzemesine uyarlanması gerekir. Dayanıklılık için matris ile temas halindeki tekstillerin kimyasal stabilitesi dikkate alınmalıdır. CH'a duyarlı olan cam, bazalt, PVA, bitkisel liflerden yapılan TRM kompozitler için özel matris bileşimlerine ihtiyaç vardır. CH'ı puzolanik reaksiyon ile C-S-H a dönüştürmek en uygun yaklaşım olacaktır. Çimentonun

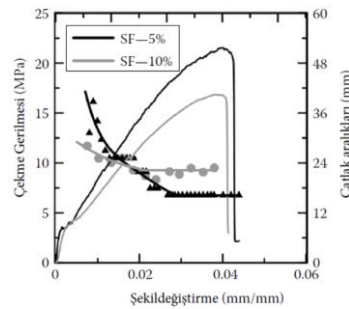
kısmen yüksek fırın cürufu, uçucu kül, metakaolin ve silis dumanı gibi puzolanik malzemeler ile yerdeğiştirmesi bu amaca yöneliktir.

Silva vd. [103], sisal tekstil takviyeli TRM kompoziti için, %50 Portland çimentosu, %30 metakaolin ve %20 kalsine atık tuğla kırıklarından oluşan karışım ile doğal lifler için dayanıklı matris tasarlamıştır. Butler vd. [104], AR- cam tekstilli TRM için yüksek fırın cürufu çimento FA ve SF/MK ikame etmiştir, özellikle MK'nin FA ile birlikte kullanılması, yaşlanma sırasında mekanik performansta azalma olmadan iyi bir davranış sağlamıştır. AR-cam ve PE tekstil, çimento ile ağırlıkça ikame edilen FA (%25), SF (%7), polimer (%5) ve kısa PP lifler (%0,1 PPF) içeren farklı matrislerde denenmiş; TRM'nin hem eğilme mukavemeti hem de enerji kapasitesinde değişiklikler olduğu görülmüştür (Şekil 2.42) [105]. En iyi sonuçların elde edildiği AR-cam ve SF li matriste yük ve enerji yutma kapasitesi referans numuneye kıyasla %242 ve %329 oranında artmıştır.



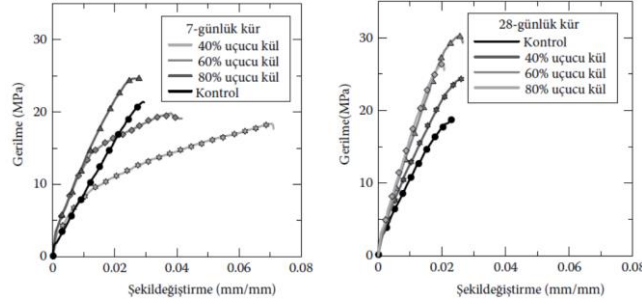
Şekil 2. 42 Matrise eklenen mineral katkıların TRM performansına etkisi [105].

Mineral katkıları her ne kadar kompozit performansını arttırsa da, matris içerisinde optimum kullanım oranına dikkat etmek gerekir. Farklı SF oranlarının (%5 ve %10) çekme performansına etkisi karşılaştırıldığında (Şekil 2.43) [106], %10'luk oranın negatif etkisi görülmüştür. Ancak, bu durum, yazarların matrisi karıştırma aşamasında yeterli işlenebilirliği elde edememesinden kaynaklandığını düşündürmektedir.



Şekil 2. 43 Farklı oranlardaki silis dumanının etkisi [106].

Farklı FA içeriklerine sahip, AR-cam TRM kompozitlerin karşılaştırıldığı bir çalışmada [106], 28 günlük dayanıma etki %60 FA kül içeriğinde maksimum olmuştur (Şekil 2.44). Bu iyileşme, CH'in puzolanik aktivite ile azaltılması, kumaş açıklıkları arasında daha işlenebilir bir karışım ve matris penetrasyonu ile tekstil-matris arasındaki aderansın artmasına bağlıdır.

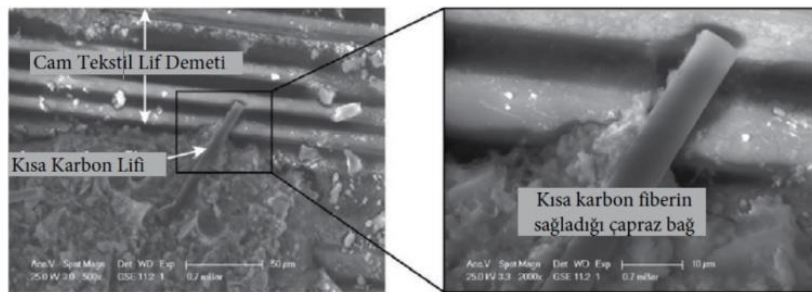


Şekil 2.44 Farklı uçucu kül oranlarının TRM performansına etkisi [106].

2.4.2 Kısa Kesilmiş Liflerin Etkisi

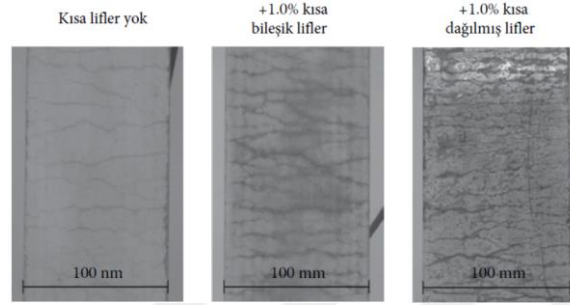
TRM matrisine kısa liflerin eklenmesiyle, daha iyi çatlak dağılımına sahip kompozit üretilir, böylece hizmet ömrü-dayanıklılıkta ve yük taşıma kapasitesinde iyileşme görülür. Kısa liflerin eklenmesiyle TRM mekanik özelliklerinin geliştirilmesi birkaç temel mekanizma açıklanabilir. Kısa lifler,

1. Mikro çatlakları köprüler, böylece büyümelerini engeller ve çatlak yayılmasını durdurur;
2. Matriste büzülme ve dolayısıyla iç matris hasarını sınırlar;
3. Takviye oranını kısmi de olsa artırarak kompozitin genel performansını artırır;
4. Tekstil iplikleri ile çapraz bağlar oluşturarak tekstil-matris arası bağları kuvvetlendirir (Şekil 2.45).



Şekil 2.45 Kısa liflerin tekstil-matris arasında oluşturduğu çapraz bağlantılar.

Kısa liflerin eklenmesi, ince taneli TRM matrisinin işlenebilirliğinde azalmaya yol açabilir, bu da bazı pratik uygulamalar için sorun oluşturur. Genellikle sadece $\sim 15 \mu\text{m}$ mikron çapında olan kısa lifler, matris akışkanlığını önemli ölçüde azaltır, optimal kısa lif yüzdesi ve karışım özelliklerinin belirlenmesini gerektirir [107]. Kısa lif eklenmiş kompozitler sadece tekstil donatısı olanlara kıyasla (Şekil 2.46), genellikle daha çok, daha ince ve daha yoğun çatlak oluşumları gösterir.



Şekil 2. 46 Kısa liflerin TRM çatlak oluşumuna etkisi [108].

2.5 Dayanıklılık

TRM kompozitlerinden beklenen dayanıklılık performansı, elemanların kullanım yerlerine bağlı olarak farklılık gösterir. Hedeflenen gereksinimleri en iyi şekilde karşılamak için, kullanılan malzemeler de önemli ölçüde değişebilir. Bu nedenle, bu tür yapısal elemanlar ve yapıların dayanıklılık sorunu ile ilgili genel bir çerçeveye ihtiyaç duyulmaktadır. Şekildeğiştirme ile yüksek enerji yutma kapasitesi, TRM kompozitlerin belirleyici bir özelliği olduğundan, bu özelliğin zaman içinde önemli oranda olumsuz yönde değişmemesi gerekir.

Yapısal dayanıklılık göz önüne alındığında, çatlakların matris bünyesine sıvıların ve gazların taşınmasını önemli ölçüde arttırarak korozyon sürecini hızlandırmasından dolayı, çatlaklar mekanik dayanım ile doğrudan ilgilidir. Çatlak oluşumu ve ilerlemesi, genellikle herhangi bir çatlığa neden olan mekanik yükler uygulanmadan önce başlar. Isıl şekildeğiştirmeler veya kuruma büzülmesi nedenleri ile oluşan bu çatlaklar, yükleme tipine (aşırı yükleme, yorulma yüklemesi, ani darbe yükleri vb.) bağlı olarak şiddetlenebilir [109].

Çatlak oluşumu her ne kadar olumsuz bir olgu olsa da TRM kompozitlerinde tekstil takviyesinin etkin kullanımı için gereklidir. Bu kompozitin önemli bir avantajı,

geleneksel olarak güçlendirilmiş yapılara kıyasla çok küçük ve iyi kontrollü çatlak genişlikleri sağlamasıdır. Diğer bir deyişle, TRM kompozitlerde tekstil, yapısal elemanların yük taşıma kapasitesini arttırırken aynı zamanda çatlak kontrolü sağlar.

Yapısal dayanıklılığın sağlanabilmesi için öncelikle kompoziti oluşturan bileşenlerin dayanıklılığında emin olunmalıdır. Bu bağlamda TRM bileşenlerinin ve dolayısıyla bir bütün olarak sistemin dayanıklılığı aşağıdaki parametreler ile ilgilidir:

1. TRM matrisin dayanıklılığı,
2. Tekstil ve tekstil bileşenlerinin dayanıklılığı,
3. Tekstil-matris arayüzünün dayanıklılığı,
4. Kompozit-uygulama yüzeyi bağının dayanıklılığı

Matrisin Dayanıklılığı

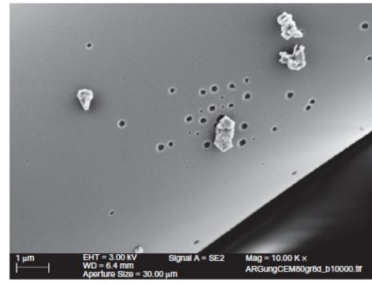
Donma-çözünme etkileri, agresif maddelerin kimyasal atakları ve aşınma, TRM matrisin dayanıklılığında dikkate alınmalıdır. Bu temel etkiler beton konusunda oldukça iyi bilinir; bununla birlikte özel karışım bileşimi, iri agregaların olmaması, yüksek bağlayıcı oranı ve liflerin varlığı nedeniyle TRM matris davranışını belirlemek daha karmaşıktır [109].

Hidratasyonda ortaya çıkan CH'nin azaltılması ve dayanıklılığı geliştirmek için matris bileşenlerinde değişiklikler yapılır; öğütülmüş yüksek fırın cürufu, silis dumanı, metakaolin, pirinç kabuğu külü, uçucu kül gibi bazı mineral katkıları karışıma eklenebilir veya kalsiyum alüminat/sülfoalüminat çimentoları kullanılabilir. ACI 544.5R [110], AR-camlı sistemlerin bozunma mekanizmalarını belirleyerek uzun dönem performanslarını geliştirmek için tavsiyeler sunmaktadır. Bazı çalışmalarda; lifler arasındaki boşluklar, polimer ve SF ile doldurularak cam tekstillerin dayanıklılığını arttırmak amaçlanmıştır [77][91]. Tekstiller, özellikle kısa lifler ile birarada kullanıldığında [111], matris aşırı agresif ortamda olsa bile, TRM kompozitin bozulmasını bir ölçüde engeller. Donma-çözülme etkileri konusundaki ilk sonuçlar, temel olarak beton için bilinen eğilimleri göstermiştir [112].

Tekstil ve Bileşenlerinin Dayanıklılığı

Standart AR-cam lifler, geleneksel E tipine kıyasla kütlece %16-20 ZrO₂ ile alkali direnci geliştirilmiş liflerdir. Yüzeydeki bozulmalar, lif yüzeyine yakın farklı element konsantrasyonları nedeniyle düzensiz bir şekilde meydana gelir. Bozulma hızı ve miktarı

pH değeri ve sıcaklık ile doğru orantılıdır [113]. Cam ipliklerin üretimi sırasında yüzeylerine uygulanan organik polimer kaplamalar, bu tür korozyonu önlemede önemli ölçüde etkilidir. Scheffler vd. [114], yaşlandırma testlerinde çimento çözeltisindeki AR-cam lif korozyonunun, farklı boyut ve derinlikte delik oluşumu ile karakterize edildiğini göstermiştir (Şekil 2.47). Butler vd. [115] liflerin yerel olarak zarar görmesi için gerekli ön koşulları; boyuttaki kusurlar, dökme camın bileşimindeki tutarsızlıklar ve gözenek çözeltisinin yüksek pH değeri olarak sıralamıştır. İnce taneli matrise gömülü cam liflerde korozyon sadece nadiren gözlemlenir. Ancak, TRM'de kullanılan çok lifli ipliklerde, tek tek liflerin korozyon nedeniyle bozulması, yükün komşu liflere yeniden dağıtılmasıyla büyük olasılıkla telafi edilebilir. Bu durumda, birkaç lifin hasar görmesinin, çok lifli ipliğin yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkileyemeyeceği söylenebilir [104].



Şekil 2. 47 Çimento çözeltisinde bekletilmiş AR-cam lif yüzeyindeki delikler.

Bazalt lif, AR-camdan yapılan liflere bir alternatif olarak kabul edilmiştir [116]. Yangın dayanımı, dünya çapında yaygın olarak bulunabilirliği ve nispeten düşük maliyeti, bazalt lifleri çok çeşitli uygulamalar için uygun hale getirmiştir [117]. Bazalt liflerinin üretimi sırasında; bazaltın erimesi ve ardından gelen hızlı soğuma nedeniyle, ham maddenin kristal özellikleri kaybolur. Bu nedenle, bazalt liflerin mikro yapısı öncelikle amorfudur ve bu nedenle cam ağına benzer. Amorf özellik, malzemenin alkali ortama direncinde azalmaya, bunun sonucunda da liflerde korozyon ve yük taşıma kapasitesinde azalmaya neden olur [114]. Alkali dirençleri ve diğer özellikleri, kimyasal bileşimlerine büyük ölçüde bağlıdır. Cam liflerden temel farkı, daha yüksek Fe_xO_y (%7-15) içeriğidir. CaO/Fe_xO_y oranındaki artış bazalt liflerin alkali dayanımını azaltır [118]. Ayrıca, korozyon ürünlerinin morfolojik olarak, bazalt anakayasının alkalinitesi (bariyer işlevi nedeniyle) ile ilişkili olduğu bulunmuştur. Bazalt lifler, AR-cam life göre daha düşük alkali direncine sahiptir; alkali direnci, ZrO_2 ilavesiyle iyileştirilebilir [119].

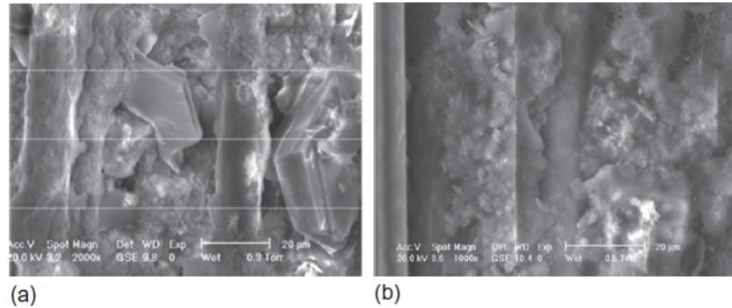
Karbon tekstillerin dayanıklılığı üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır. Çoğunlukla, FRP kompozitlerin mekanik performansı ve yapışma gücündeki kayıpları araştıran bu çalışmalarda karbon liflerin; nem [120], yüksek sıcaklık [121], donma çözünme etkileri [122], ve alkali ortama [123] karşı yüksek kimyasal dayanımının olduğu bildirilmiştir.

Tekstil–Matris Arayüzünün Dayanıklılığı

- AR-Cam Tekstiller

Çimento esaslı matrisler ile yaygın ve başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Dayanıklılığı özellikle FRC konusunda uzun yıllardır incelenmiş, uzun dönem özellikleri dikkate alan bir tasarım metodolojisi oluşturulmuştur (MNL 128-01) [124]. Tasarım yöntemi, 50-80°C sıcaklık aralığını kullanan, gerçek iklim koşullarıyla ilişkilendirilmiş ampirik hesap yöntemlerine dayandırılmıştır [125]. Farklı sıcaklıklar için hızlandırılmış yaşlanma ve gerçek çevresel koşullara maruz kalma üzerine tablolar önerilmiştir [126].

TRM için de, artan yaş ile birlikte gözlenen dayanıklılık kaybı; matris-lif arayüzü ve lif kaplaması üzerinde katı fazların oluşumu, beraberinde kabuklanma ile korozyon oluşumu ve kırılmalıkta artış lif-matris arayüzündeki CH birikimi ile orantılıdır (Şekil 2.48-a). CH kristallerinin lifler üzerinde oluşturduğu yerel gerilme artışları liflerde yerel parçalanmaya neden olur. Kamalı kristallerin neden olduğu tekillikler ve yanal basınç, liflerin erken bozulmasına yol açan çentikler gibi davranır. Matristeki çimento içeriği düşük olduğunda ve puzolanik katkı maddeleri kullanıldığında, iyi bağlanma özelliklerine yol açan ince C-S-H tabakası lif-matris ara yüzüne hâkim olur (Şekil 2.48-b). Dış liflerin bu tür ince kaplamaları, matris ile iyi ve kusursuz bir bağlanma sağlar. Böylece çatlakları köprüleyen ipliğin sünek davranışını sağlayan kısmi bağ kopması ve lif kayması sağlanır [127].



Şekil 2. 48 Puzolanik katkıların matris-lif arayüzüne bağlanmaya etkisi [127].

Cohen ve Peled [77], yaşlanma sırasında gözlemlenen, lif demetinin içine matris geçirgenliğinin değişmesi nedeniyle iki tip bozunma mekanizması tanımlamışlardır: (i) lif demeti-matris arayüzünde bağlanmanın gevrekleşmesi sonucu teleskopik davranışın değişmesi ve (ii) daha fazla lif çimentolu matris ile doğrudan temas halinde olduğundan, liflerin kimyasal olarak bozulması. Yazarlar, tekstil-matris arayüzüne eklenen dolgu malzemelerin, CH'nin zamanla demet lifleri arasına nüfuz edebilirliğini azalttığını gözlemişlerdir. Bu nano dolgular; teleskopik çekme modunu ve kompozit sünekliği desteklerken aynı zamanda çekirdek lifleri kimyasal saldırıdan korur.

Karbon lifler, AR-cam liflere kıyasla çok dayanıklıdır [128]. Bununla birlikte, tek tek liflerin ön kaplanması ve ipliklerin nihai kaplanmasının sonucu olarak tekstil yüzeyinin bir miktar iyileşmesi beklenebilir. Butler vd. [115] deneysel çalışmalarında, karbon tekstil-matris arayüzünde C-S-H oluşumlarından bahsetmiş, CH kristallerinin bulunmadığını tespit etmiştir. Bunun sonucu olarak, karbon liflerin arayüz morfolojisinin büyük ölçüde karbon liflerin yüzey özellikleri tarafından belirlendiği ve bağlayıcı türü etkisinin çok az olduğu düşünülür [80]. Karbon tekstil takviyeli TRM'nin bir sis odasında (sıcaklık 40 °C, %99 bağıl nem) 1 yıl kadar saklanması sonrası çekme dayanımı ve şekil değiştirme kapasitesinde artış gözlemlenmiştir. AR-cam tekstili takviyeli kompozitte ise dayanım ve süneklikte yaşlandırma sonunda karbon tekstilli kompozitlerin aksine azalma olmuştur. Benzer eğilim Langlois vd. [128] tarafından çeşitli matris yaşlarında yapılan eğilme ve çekme testlerinde de tespit edilmiştir.

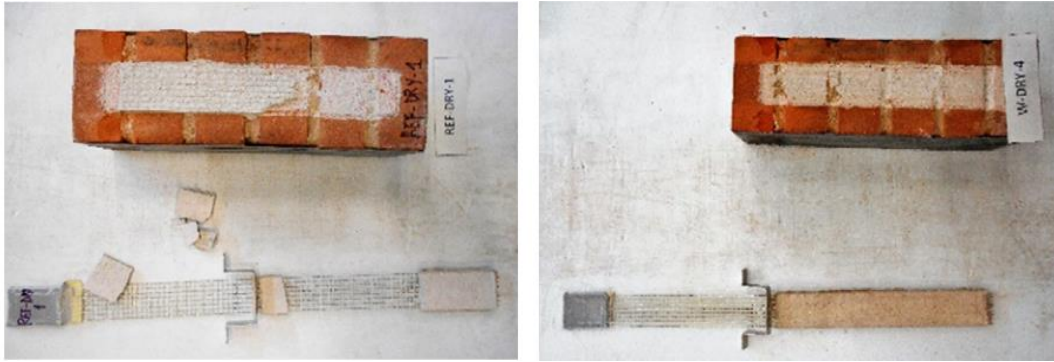
Hempel vd. [129], kaplamalı ve kaplamasız bazalt tekstil takviyesinin dayanıklılığını araştırmıştır. Sis odasında hızlandırılmış yaşlanmanın, kaplanmamış bazalt lifleri olan numunelerde, hem ön kaplama hem de bazalt liflerinin alkalin saldırısına karşı yetersiz direnci nedeniyle mekanik performansta çarpıcı bir düşüşe yol açtığını görülmüştür. Bu durum, ilerleyen lif hasarına ve liflerin nispeten düşük kuvvet seviyelerinde kalmasına neden olur. Bazalt ipliklere uygulanan stiren butadien (SBR) kaplama, bazalt ipliklerin dayanımını ve bağlanma davranışını belirgin şekilde iyileştirmiştir; ancak sis odasında yaşlandırmanın neden olduğu mekanik performansta düşüşü engelleyememiştir. Bazalt liflerinin zarar görmesi kaplama ile yavaşlatılabileceği, ancak uzun dönemde önlenemez olduğu sonucuna ulaşılır. Bazalt lifli ipliklerin TRM uygulamalarına göre geliştirilmesi ve alkali matristeki lifleri yeterince korunması için, özel olarak tasarlanmış uygun boyutlandırma ve kaplamaların geliştirilmesi gereklidir.

Uygulama Yüzeyi - Kompozit Arayüzünün Dayanıklılığı

TRM kompozitinin bir malzeme olarak performansı ne kadar iyi olursa olsun, güçlendirme uygulamalarında kompozitin bağlandığı yüzeye uyumu güçlendirmenin etkinliğini belirler. Bu açıdan kompozit uygulama yüzeyinde meydana gelebilecek bozulmalar, uzun dönemde güçlendirme sisteminin katkısının hedeflenen performans seviyesinin oldukça gerisinde kalmasına neden olabilir.

Dayanıklılığı incelemek için gerekli test numunesi boyutlarının, küçük ölçekli numunelere kıyasla daha büyük olması gereklidir ve hızlandırılmış yaşlandırma çevrimlerine dahil edilmeleri küçük ölçekli olanlara kıyasla oldukça zordur. Bu nedenle, TRM kompozit-arka yüzey arayüzünün dayanıklılığının incelendiği duvar deneyleri mevcut literatürde oldukça kısıtlı ve küçük ölçeklidir.

Franzoni vd. [130]; beş adet tuğlanın üst üste örülmesiyle üretilen numuneleri, hidrolik kireç bazlı harç içine gömülü galvanizli çelik liflerden yapılmış FRCM şeritleri ile güçlendirmiştir. Ardından, kılcal su emme ve tuz kristalizasyon döngülü hızlandırılmış yaşlandırma işlemi uygulanmıştır; testler sonucunda arka yüzey ile kompozit arayüzündeki yapışma seviyesinin azaldığı, güçlendirme tabakasının kısmen ya da tamamen ayrıldığı göçme modları gözlenmiştir (Şekil 2.49).



Şekil 2. 49 Kılcal su emme ve tuz kristalizasyonu döngüsü sonucunda takviyenin ayrıldığı göçme modu [130].

2.6 TRM'nin Yapısal Davranışa Etkisi

TRM sistemi ile güçlendirme uygulamalarında; öncelikle ilgili teknik personel, eksiklik veya kusurların nedenlerini tespit ederek mevcut yapıyı değerlendirmeli, mevcut duvar tabakasının kapasitesini belirlemelidir. Bu değerlendirme, bir saha incelemesi, ilgili

belgelerin gözden geçirilmesi ve yapısal bir analizi içermelidir. TRM ile güçlendirme genellikle aşağıda sıralanan durumlarda tercih edilebilir:

- yapısal bir eleman içindeki veya bitişik elemanlar arasındaki çekme gerilmelerini karşılamak için eğilme ve kesme güçlendirmesi;
- elemanlar arasındaki bağlantı sağlamak (örneğin, ortogonal duvarlar veya tonoz ve duvar bağları arasındaki bağlantılar);
- zemin iyileştirme;
- çatlak genişliği sınırlaması;
- kolonların sargılanarak eksenel yük kapasitenin artırılması.

TRM ile güçlendirmenin birincil amacı, bir yığma yapının genel taşıma kapasitesinin yanı sıra yığma elemanların dayanımını arttırmaktır. Harici olarak uygulanan sıva zarfının arasında tekstil donatı yerleşimi şeklinde uygulanan TRM, öncelikle çekme gerilmelerinin taşınacağı alanlara yerleştirilir ve basınç gerilmelerini karşılamadığı kabul edilir.

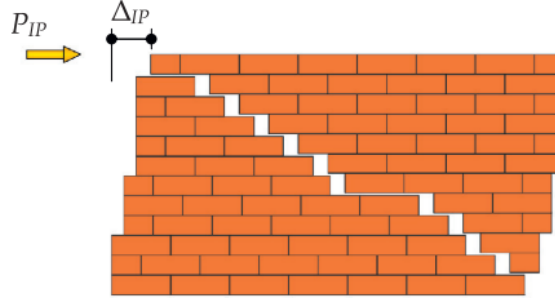
TRM güçlendirmesi tarihi yapılarla ilgiliyse, koruma ve restorasyon esaslarına göre bir değerlendirme ve bu doğrultuda uygun sistemin seçimi yapılmalıdır. Bu durumda tercih edilen çözüm; tarihi doku ile uyumluluğu, dayanıklılığı ve gerektiğinde esas yapıya zarar vermeden kaldırılabilirliği (*reversibility*) garanti etmelidir [131].

Bir kompozit olarak TRM'nin malzeme özelliklerinin belirlenmesi, kompozitin yapısal güçlendirmede kullanımında verimli olup olmadıklarını anlamak için tek başına yeterli değildir. Malzeme mekanik özelliklerinin belirlenmesine yönelik yürütülen testlerde malzemelerin maruz kaldığı yükleme modu, malzemenin gerçekte maruz kalacağı yükler ile genellikle uyumlu değildir. Bu nedenle malzemelerin gerçek kullanımında maruz kalacağı yüklenme durumlarını benzeştirecek yapısal testlere ihtiyaç vardır. Duvarlar için düşünüldüğünde, yapısal davranışı anlamaya yönelik düzlem içi ve düzlem dışı davranış olmak üzere iki ana davranış vardır. Literatürde TRM ile güçlendirilmiş yığma elemanların yapısal davranışa etkisi, her iki durum için farklı test düzenekleriyle deneysel olarak araştırılmıştır.

2.6.1 Düzlem İçi Davranış

Yığma duvarların paralel sismik kuvvetlerin etkisiyle ya da zemin oturmaları gibi nedenlerle düzlemi içinde hareket ederek hasar alması sık görülen bir göçme

mekanizmasıdır (Şekil 2.50). Literatürde yığma duvarların düzlem içi davranışı genellikle diyagonal basınç ve sabit düşey basınç altında itme-çekme testleriyle incelenir. TRM ile güçlendirilmiş tuf, tuğla, gazbeton ve taş duvarların düzlem içi davranışı, diyagonal basınç deneylerinin kullanıldığı bir dizi çalışmada incelenmiştir [132]–[137].

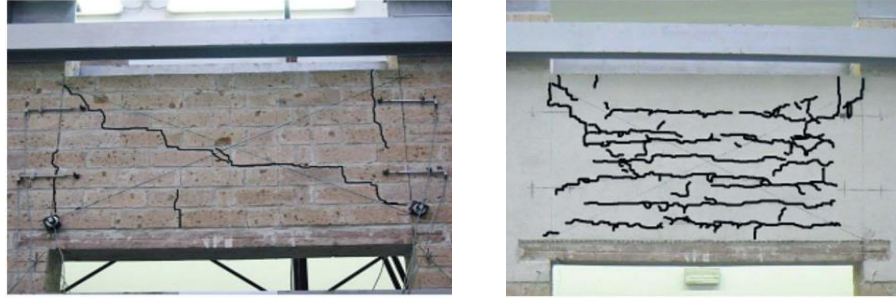


Şekil 2. 50 Yığma duvarlarda düzlem içi davranış [138].

Yığma perde duvarların FRP ile güçlendirilmesi için halen benimsenen (ACI 440.7R) tasarım yaklaşımlarına dayanarak, literatürde TRM sistemleri ile takviye edilmiş yığma duvarların düzlem içi dayanımının değerlendirilmesi için bazı modeller önerilmiştir. Tipik FRP güçlendirme uygulamaları, düzlem içi davranış ele alındığında (eğilme etkisi gözardı edildiğinde); ya bir ızgara olarak yönlendirilmiş veya duvarın köşegenleri boyunca yerleştirilmiş, ayrık, tek yönlü şeritler halindedir. Aynı yaklaşımla, çapraz şeritler kullanılması durumunda TRM'nin kesme dayanımına katkısı, şeritlerin çekme etkisindeki yatay bileşeni olarak belirlenebilir [139].

Literatürdeki düzlem-içi deneysel çalışmalar incelendiğinde genel olarak, TRM ile güçlendirilmiş duvarların kayma dayanımının %40-%500, sünekliğinin %110-%450 ve rijitliğinin %40-%90 arttığı görülmektedir. Şekildeğiştirme kapasitesi ve rijitlik artışının görece zayıf duvar tabakalarında daha belirgin olduğu söylenebilir. TRM ile güçlendirilmiş duvarlarda, gerilme dağılımının daha uniform olması sağlanmıştır. Çalışmalarda, tipik konsantrasyon çatlakları yerine, dağılı çatlakların (Şekil 2.51) gözlenmektedir [140].

Augenti vd. [141]; tam ölçekli tuf yığma duvarda çevrimsel yanal yükleme ile düzlem içi davranışı test etmiştir. Önce yığma duvar mevcut hali ile monotonik yüklere tabi tutulmuş; sonra, duvarın her iki tarafına cam tekstil TRM uygulanarak çevrimsel yükler tatbik edilmiştir. Duvarın kırılma modu; gevrek diyagonal kesme çatlağından, sünek yatay çatlaklara dönüşmüş ve maksimum yatay yük %17 artmıştır (Şekil 2.51).



Şekil 2. 51 TRM uygulaması ile kesme çatlaklarının yatay çatlaklara dönüşmesi [141].

Güçlendirme etkinliği açısından, duvarın her iki tarafına uygulama tek taraflı uygulamaya göre daha yüksektir. Donatısız numunelere kıyasla; dayanım tek taraflı uygulamada 1.9 kat, çift taraflıda 3.1 kat, süneklik ise sırası ile 1.1 ve 2.3 kat artmaktadır [133], [134], [136]. TRM'nin uygulandığı duvarın iki tarafı arasındaki bağlantı uygun yapılmalı [142]; yüzeyden ayrılma tipi kırılma modu oluşmaması için, iç ve dış güçlendirme tabakaları birbirine bağlanmalıdır [143].

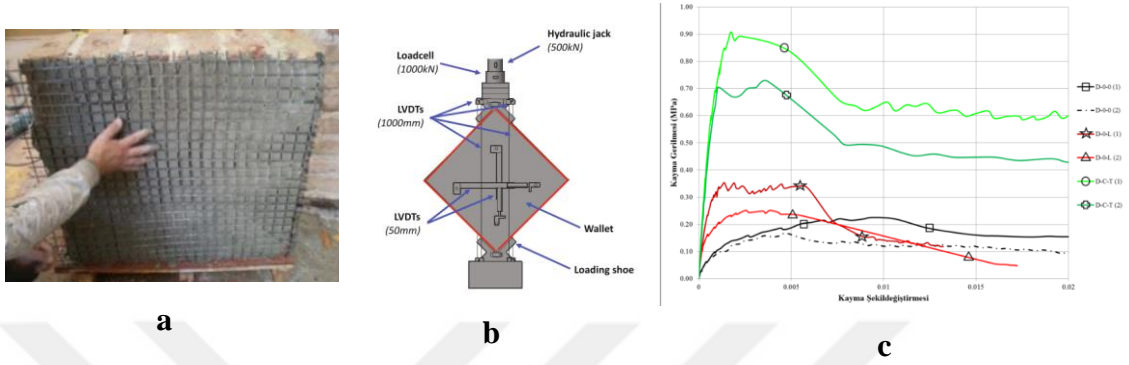
Düzlem içi yüklere maruz kalan TRM ile güçlendirilmiş yığma duvarların kırılma modları genellikle, karbon tekstiller kullanıldığında tekstilin matris içinde kayması, bazalt veya cam tekstiller için ise tekstillerde çekme kopması şeklinde gelişmektedir. Yüksek güçlendirme oranlarında ise, yığma tabakada basınç ezilmeleri ile kapasite, duvarın basınç dayanımı tarafından yönetilir (Şekil 2.52). Bu nedenle aşırı güçlendirmenin etkisiz olacağı sonucuna varılmıştır [144].



Şekil 2. 52 Farklı güçlendirme oranlarının düzlem içi davranışa etkisi [144].

Çevrimsel yanal yükler altında TRM uygulanmış duvarın düzlem içi davranışı incelendiğinde [143], kesme dayanımındaki artışın, şekildeğiştirme kapasitesinde artış ile (bu çalışmada şekildeğiştirmeler üç kattan fazla iyileşmiştir) ilişkili olduğu görülmüş, mevcut yığma yapıları TRM ile sismik açıdan güçlendirmenin uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

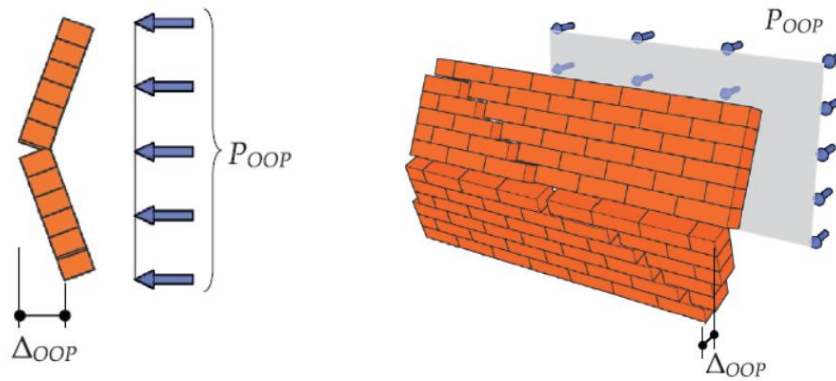
Mezrea vd. [145]; tarihi bir yapıdan alınan tuğlalar ile üretilen numuneleri diyagonal basınç testine tabi tutmuştur. Kireç ve çimentonun birlikte olduğu karma bir harç ve takviye donatısı olarak karbon lif esaslı tekstil kullanılmıştır. Sıvasız, donatısız sıvalı ve güçlendirilmiş numuneler ile gerçekleştirilen testlerde kayma dayanımı, şekildeğiştirme ve enerji kapasitesinde önemli artış sağlanmıştır (Şekil 2.53).



Şekil 2. 53 a) Yığma yüzeye karbon TRM uygulanması, b) diyagonal basınç testi düzeneği, c) kayma gerilmesi-şekildeğiştirme eğrileri [145].

2.6.2 Düzlem Dışı Davranış

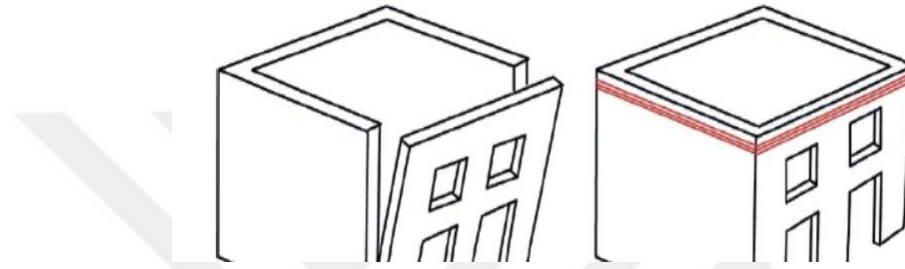
Çok düşük çekme kapasiteli gevrek malzemeler ile inşa edilen, çekme gerilmelerini karşılayacak iç donatısı bulunmayan yığma duvarlarda, düzlem dışı eğilme etkileri altında ani gevrek göçme gerçekleşir (Şekil 2.54), bu göçme tipi en sık görülen göçme mekanizmalarından biridir.



Şekil 2. 54 Güçlendirilmemiş yığma duvarlarda düzlem dışı davranış [138].

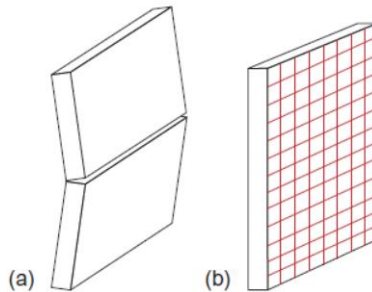
Böyle bir mekanizma, öncelikle sismik hareketlerin ve ikincil olarak da kemer ve tonozlardan kaynaklanan yatay kuvvetlerin sonucudur. Düzlem dışı hasarlar; devrilme, dikey eğilme kırılması veya yatay eğilme kırılması şeklinde gelişebilir.

Devrilerek çökme (Şekil 2.55-a); yığma duvarları destekleyen ortogonal duvarlara bağlı olmama ve duvar hareketinin üstten engellenmemesi durumunda, duvar tabanının mafsallaşarak dönmeye izin vermesi sonucu gerçekleşir. Bu mekanizma, sınır koşulları ve duvarın narinliği dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır. Olası bir güçlendirme çözümü olarak, duvarın üst kısmına uygulanan ve ortogonal duvarlara uygun şekilde sabitlenen, TRM ile kuşaklama önerilebilir (Şekil 2.55-b). Bu durumda devrilmeye karşı direnç, TRM sisteminin yatay lifleri ile sağlanır. Duvar köşeleri pahlanarak, liflerde gerilme yoğunlaşmasının önüne geçilmiş olur [21].



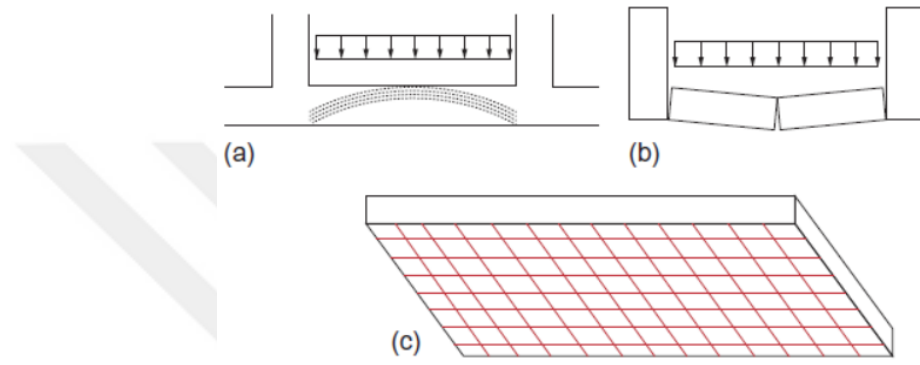
Şekil 2. 55 Yığma duvarların düzlem dışı devrilmesi [21].

Hem üst hem de alt bölgelerde sınırlanan ve yatay yüklemeye maruz kalan yığma duvarlar; üstte, altta ve arada üç mafsal oluşumu ile eğilmeye zorlanır (Şekil 2.56-a). Yüksek yığma duvarlarda ve/veya ortogonal duvarlardan çok uzakta bulunan duvarlarda düşey eğilme kırılması meydana gelebilir. Sismik yükler söz konusu olduğunda, farklı yüksekliklerde yer alan döşemeler tarafından zıt yönlerden yüklenen yığma duvarlar özellikle düşey eğilme göçme mekanizmalarına karşı hassastır. Bu tür duvarlar, gerilme tarafında TRM ile güçlendirilebilir. Tekstil ana doğrultusundaki iplikler düşey doğrultuda yönlendirilmelidir (Şekil 2.56-b) [21].



Şekil 2. 56 Yığma duvarlarda düzlem dışı yük etkisinde üç mafsal oluşumu.

Alt taraflarından sabitlenen ve (dikey) enine duvarlar ile sıkı bir şekilde bağlantılı olan yığma duvarlar, üç taraftan desteklenen döşemelere benzer bir şekilde davranır. Üst şeridin yay etkisi ile yatay kuvvetlere direnirler (Şekil 2.57-a). Literatürde buna kemerleme etkisi (*arching effect*) denilmektedir. Diğer taraftan; alt taraflarından sabitlenmiş, ancak enine duvarlar ile yeterli bağlanmamış yığma duvarlar, Şekil 2.57-b'de gösterildiği gibi göçebilir. Bu tür duvarlar, eğilmeye karşı TRM ile güçlendirilebilir. Bu durumda, tekstil ana doğrultusundaki iplikler yatay doğrultuda yönlendirilmelidir (Şekil 2.57-c).



Şekil 2. 57 Yığma duvarlarda kemerleme etkisi ve düzlem dışı eğilme[21].

Papanicolaou vd. [2]; düzlem dışı çevrimsel yükler için, TRM ile güçlendirilmiş duvarı, eşdeğer FRP ile güçlendirilmiş duvar davranışı ile karşılaştırmıştır. TRM ile güçlendirme FRP ile kıyaslandığında daha düşük bir dayanım artışı sağlamış olsa da yeterli dayanım ve şekildeğiştirme kapasitesinde iyileşme sağladığı gösterilmiştir.

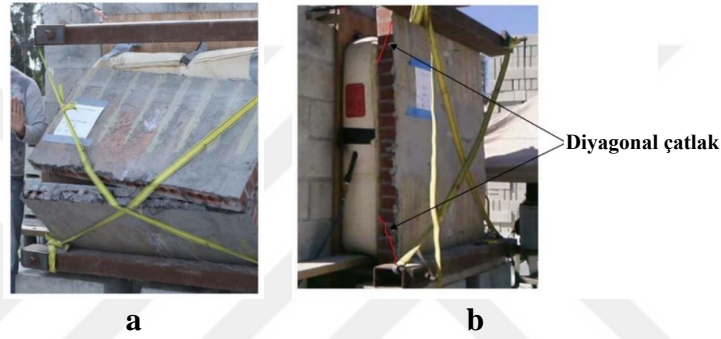
TRM ile güçlendirilmiş yığma duvarların düzlem dışı davranışını araştıran çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Yatay olarak yerleştirilmiş orta ölçekli duvar numunelerin düşey monotonik ve tekrarlı yüklere maruz kaldığı üç veya dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.58). Bu düzenek ile yapılan testlerde kullanılan takviye tekstilleri arasında karbon [146], çelik, bazalt, cam [147] [148][142], PP, polyester [148], PBO ve PBO+cam lif [149] bulunmaktadır. Matris bileşiminde; kısa lifler [148], polimerik katkı maddeleri [149] içeren kireç [147] veya çimento bazlı harçlar [146] [142] kullanılmıştır.

Babaeidarabad vd. [150], tam ölçekli yığma duvarın her iki yüzünü iki-doğrultulu karbon tekstil donatılı harç ile güçlendirmiş; alttan ve üstten yerdeğiştirmeleri sınırlayarak hava yastığı yardımıyla düzlem dışı eğilme etkisi oluşturmuştur. Test edilen numunelerde ya

duvar yüksekliğinin yarısında çizgisel çatlak ve tekstil ipliklerde kopma (Şekil 2.59-a) ya da aşırı güçlendirmeye bağlı olarak mesnet bölgelerinde diyagonal kayma çatlakları (Şekil 2.59-b) gözlemlenmiştir.

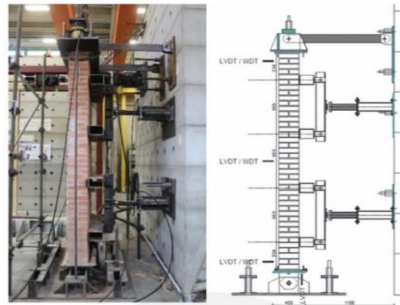


Şekil 2. 58 Orta ölçekli numunelerle gerçekleştirilen düzlem dışı eğilme testleri[142] [148].



Şekil 2. 59 Hava yastığı ile düzlem dışı yük verilmesi [150].

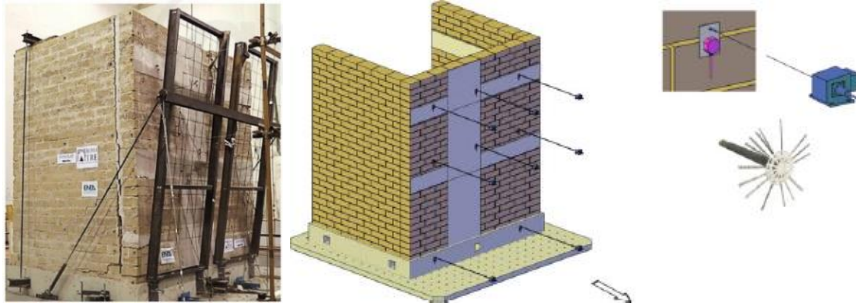
Bellini vd. [46], tek yüzeyi dört farklı cam ve kireç esaslı TRM ile güçlendirilmiş tam ölçekli tuğla duvarlara, sabit düşey aksenal yük altında çevrimsel düzlem dışı yatay yükler uygulamıştır (Şekil 2.60). Tüm numunelerde göçme modu yine yükseklik ortasında çatlak ve tekstil çekme kopması şeklinde oluşmuştur.



Şekil 2. 60 Tam ölçekli numunelere düzlem dışı yatay yük verilmesi [46].

De Santis vd. [151], SRG (steel reinforced grout) ile güçlendirilmiş tam ölçekli tuf U-duvarı sarsma tablasında test etmiştir (Şekil 2.61). Test sonuçları, geleneksel çelik

takviyeli güçlendirmeye kıyasla, düzlem dışı sismik kapasiteyi geliştirmek için harç bazlı kompozitlerin daha uygun olduğunu göstermiştir.



Şekil 2. 61 Düzlem dışı davranışın sarsma tablası ile incelenmesi [151].

Borri vd. [152] ve Sisti vd. [153]; çimento ve kireç esaslı matrisli, cam, çelik ve PBO+cam takviyeli TRM kompozitler ile güçlendirilmiş yığma hatılların düzlem dışı davranışını incelemiştir. Monotonik ve çevrimsel yükler altında üç veya dört noktalı eğilme testlerinde (Şekil 2.62); yatak bağlantılarına gömülü özellikle cam tekstillerde önemli bir eğilme dayanımı sağlanmıştır.



Şekil 2. 62 Yığma kirişlerde gerçekleştirilen eğilme testleri [152], [153].

Özet olarak, TRM'in düzlem dışı davranışa katkısını araştıran deneysel çalışmalarda, duvar numunelerinin düzlem dışı (yatay veya dikey) eğilme performansı, TRM kompozitler ile önemli derecede iyileştirilmiştir. Karbon ve çelik takviyesi ile yığma duvar dayanımını 15 kata kadar, bazalt ve cam donatısı ile yer değiştirme kapasitesi 20-30 kata kadar iyileştirmiştir. Sarsma tablası testleri, TRM takviyesinin duvarın dinamik özelliklerinde büyük değişikliklere yol açmaması ve gerilme yığılmalarına neden olacak aşırı güçlendirmeden sakınılması gerektiğini göstermiştir. Birden fazla tekstil tabakasını içeren kompozit takviyenin kullanılması, eğilme dayanımında artış sağlar; ancak bu artış tek tabaka kullanılması durumuyla karşılaştırıldığında doğru orantılı değildir. Çoklu tabaka kullanımı, şekildeğiştirme kapasitesinde azalma, alt tabakada kesme veya ezilme göçmesinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

TRM KUPONLARINDA EĞİLME TESTLERİ

Bu bölüm, TRM kompozitlerin mekanik karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik kupon numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmaları içermektedir. Beş tip tekstil takviyesi ve iki farklı harç ile üretilen beşer numunelik kupon TRM serileri, üç farklı kompozit yaşında (7. gün, 28. gün, yaşlandırılmış) üç noktalı eğilme testlerine tabi tutulmuştur.

3.1 Malzemeler

3.1.1 Harç Türleri ve Mekanik Özellikleri

Yığma duvar yüzeylerini örten sıva harcı, TRM ile güçlendirme uygulamalarında aynı zamanda kompozitin matris fazını oluşturmaktadır. Bu tez kapsamında TRM matrisi olarak doğal hidrolik kireç (*Natural Hydraulic Lime, NHL*) ve çimento esaslı olmak üzere iki tip harç kullanılmıştır :

- Kireç esaslı harç olarak, yığma yapı güçlendirmesi ve onarımı için önerilen, esas bileşeni NHL olan ticari kuru karışım (TICM TGH-101) su ile karıştırılarak kullanılmıştır. Kuru karışımda agrega iki tane aralığında (0-200 μm , 200-1000 μm) oluşmaktadır. Karışımda çatlak oluşumunu sınırlamak için mikro lifler de mevcuttur. Kütlece su/kuru karışım oranı; dayanım, dayanıklılık ve işlenebilirlik gereksinimlerinin sağlanması için üretici tarafından 0.18 olarak belirlenmiştir.
- Çimento esaslı harç bileşiminde bağlayıcı olarak CEM I 42.5 R Portland çimentosu mevcuttur; kum D_{maks} . 1.0 mm boyutundadır. Karışımdaki oranlar, RILEM TC 203-RHM (Repair Mortars for Historic Masonry) [154] dokümanına göre, ağırlıkça çimento/kum oranı 1/3 ve su/bağlayıcı oranı 0.8 olarak belirlenmiştir.

İki harç tipi için üçer adet 4x4x16 cm harç prizma numunesi hazırlanmıştır. Dökümden iki gün sonra kalıplardan çıkarılarak, $25\pm 3^{\circ}\text{C}$ ve $\%65\pm 5$ bağıl nemde kapalı polietilen torba içerisinde test gününe kadar bekletilmiştir. Mekanik testler BS EN 1015-11'e [155] göre uygulanmış, üç noktalı eğilme testi ve ardından eğilmede kırılarak ayrılan parçalar üzerinde (40x40 mm² yükleme alanı) basınç testleri yapılmıştır. Harç türlerinin 7. ve 28.

günlük ortalama basınç (f_b) ve eğilme (f_e) dayanımları Tablo 3. 1'de verilmiştir. Sıva harçlarında basınç dayanımı açısından 28 gün bazında büyük bir farklılık yoktur. Diğer taraftan, eğilme dayanımında puzolanik davranış ve mikro liflerin de etkisi ile NHL esaslı sıva harcının eğilme dayanımı çimentoluya kıyasla % 35 daha yüksektir.

Tablo 3. 1 Harçların mekanik özellikleri.

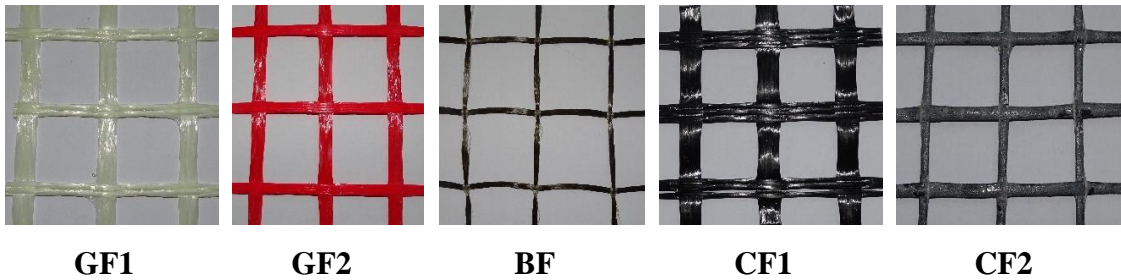
	$f_{b,7}$ (MPa)	$f_{b,28}$ (MPa)	$f_{e,7}$ (MPa)	$f_{e,28}$ (MPa)
Derz Harcı	4.12	6.94	1.69	2.03
Çimento Esaslı Sıva Harcı	6.19	11.64	1.75	1.87
NHL Esaslı Sıva Harcı	11.06	13.91	1.77	2.54

3.1.2 Tekstiller

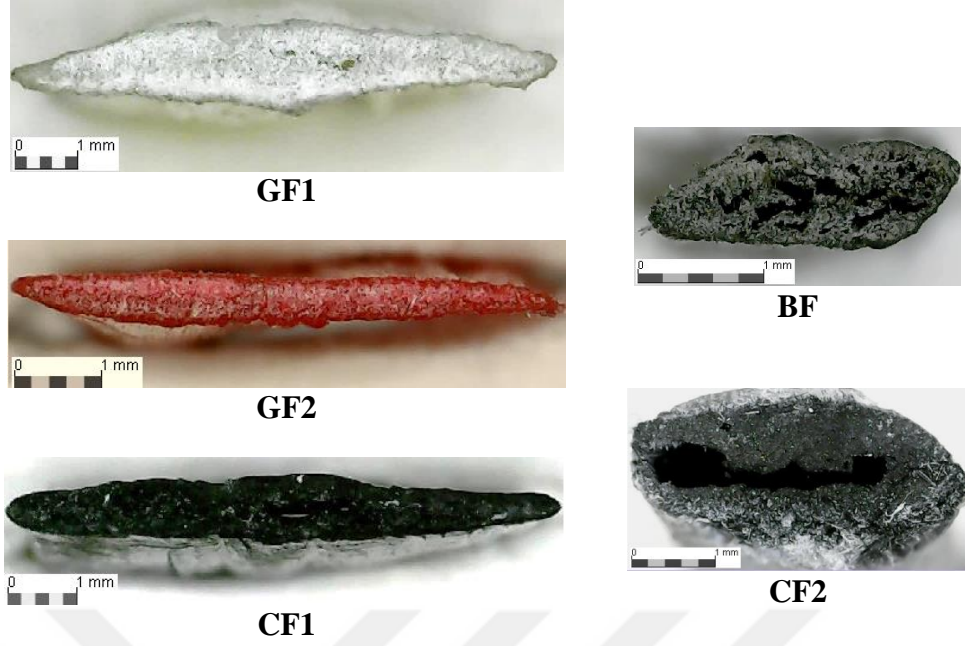
Güçlendirme uygulamalarında kullanılan beş tip çift yönlü (*bi-directional*) tekstil denenmiştir; iki tip cam tekstil (GF1, GF2), bir tip bazalt tekstil (BF) ve iki tip karbon tekstilden (CF1, CF2) oluşmaktadır (Şekil 3. 1). Tekstil özellikleri şu şekildedir:

- Tekstil üretimi öncesi, demeti oluşturan liflerin üretiminde ön kaplama (*sizing*) uygulandığı bilinmektedir.
- BF tipi tekstil hariç, lif demetleri üzerinde SBR (*Styrene Butadien Rubber*) kaplama mevcuttur, BF tekstilinde ise sadece ön kaplama olarak Silane (SiH_4) mevcuttur.
- CF2 tekstilinde, diğerlerinden farklı olarak, SBR kaplama üzerine aderansı arttırmak üzere ilave olarak SF uygulanmıştır.

Tekstil tipik görünüşleri Şekil 3.1'de, çözgü yönündeki kesitlerden mikro görünüm ise Şekil 3. 2'de verilmiştir. Daha yüksek kaplama oranına sahip GF1 ve CF2, diğer tekstil türlerine göre yaklaşık iki kat kalınlığa sahiptir. Aynı lif tipi ve aynı tip kaplamaya rağmen; kaplama miktarındaki artışa bağlı olarak, GF1 tekstili, GF2'ye oranla daha rijit formdadır.

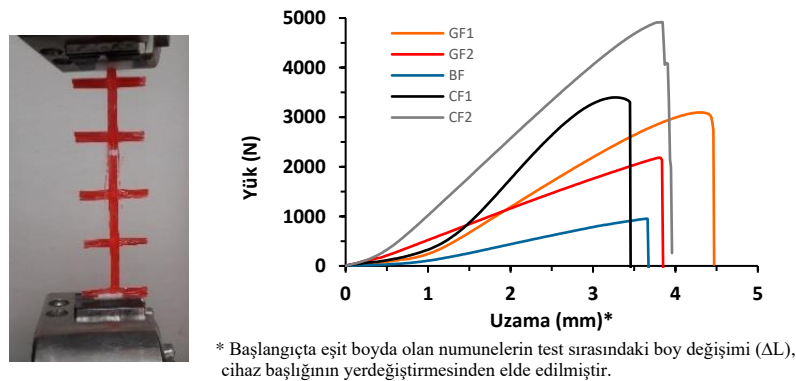


Şekil 3. 1 Kullanılan tekstillerin tipik görünüşleri.



Şekil 3. 2 Çözgü yönünde lif demetlerinin tipik perspektif görünüşleri.

Tekstillerin mekanik özellikleri aksenal çekme testi ile belirlenmiştir. Her tekstil türünün çözgü ve atkı doğrultularından 150 mm uzunluğundaki altışar lif demeti kesilmiş; yerdeğiştirme kontrollü *MTS Criterion Model 43* cihazında, ASTM D6637'ye [156]¹¹ göre 15 mm/sn hızla aksenal çekme testine tabi tutulmuştur (Şekil 3.3). Test sonuçları, çözgü ve atkı doğrultusundaki lif demetleri arasında çekme dayanımı açısından önemli bir fark olmadığını göstermiştir. Beş tip tekstilin ortalama fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3. 2'de sunulmuştur.



Şekil 3. 3 Tekstil çekme testi düzeneği ve tekstillerin yük-uzama eğrileri.

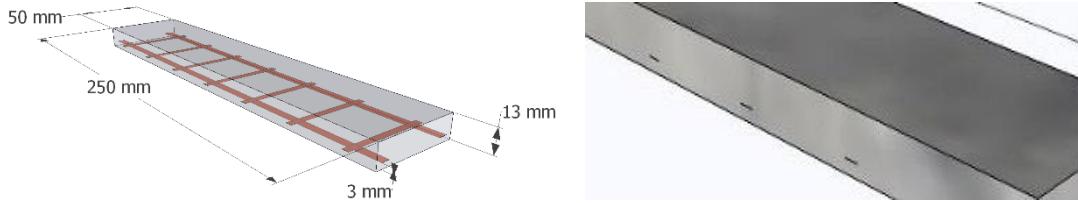
¹¹ ASTM D6637 [156]: Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Geogrids by the Single or Multi-Rib Tensile Method

Tablo 3. 2 Tekstillerin fiziksel ve mekanik özellikleri.

Tekstil Tipi	GF1	GF2	BF	CF1	CF2
Lif Türü	AR-Cam	AR-Cam	Bazalt	Karbon	Karbon
Nominal Ağırlık (g/m ²)	670	340	153	408	370
Göz Açıklığı (mm) (Çözgü/Atkı)	35.0 / 39.0	34.5 / 27.6	36.0 / 36.0	21.1 / 21.6	25 / 25
Dayanım (kN/m) (Çözgü/Atkı)	2.92 / 2.84	1.92 / 1.86	0.81 / 0.63	3.40 / 3.10	4.50 / 3.80
Maks. şekildeğiştirme (%) (Çözgü/Atkı)	2.63 / 2.03	2.23 / 1.98	2.03 / 2.02	1.93 / 1.03	2.32 / 1.81
Kaplama	SBR	SBR	-	SBR	SBR+SF
Dokuma Türü	Leno	Leno	Leno	Leno	Leno

3.2 Eğilme Numunelerinin Hazırlanması

Kupon numune tasarımında tekstilin, eğilme sırasında çekme gerilmelerinin olduğu alt tarafa konumlanması hedeflenmiştir. Numune boyutları, ASTM C947-03 [157]¹²'de önerilen aralıklara uygun olarak, 250mm x 50mm x 13mm olarak belirlenmiştir. Tekstilin harç içindeki şematik konumu Şekil 3. 4'te verilmiştir.



Şekil 3. 4 TRM kupon numunesi ve eğilme test düzeneği şematik gösterimi.

Kupon numuneler Şekil 3.5'te gösterilen ahşap kalıplar ile üretilmiştir, üretime başlamadan önce basınçlı hava ile temizlenen kalıplar fırça yardımı ile yağlanmış, harcın kalıplara aşırı yapışması engellenmiştir. Numune üretim aşamasında ilk olarak, Şekil 3.4'e uygun olarak, kalıpların alt yüzeyinde 3 mm kalınlığında bir harç tabakası oluşturulmuş (Şekil 3. 6a), ana doğrultuda 25 mm uzunluk ve bir göz genişliğindeki

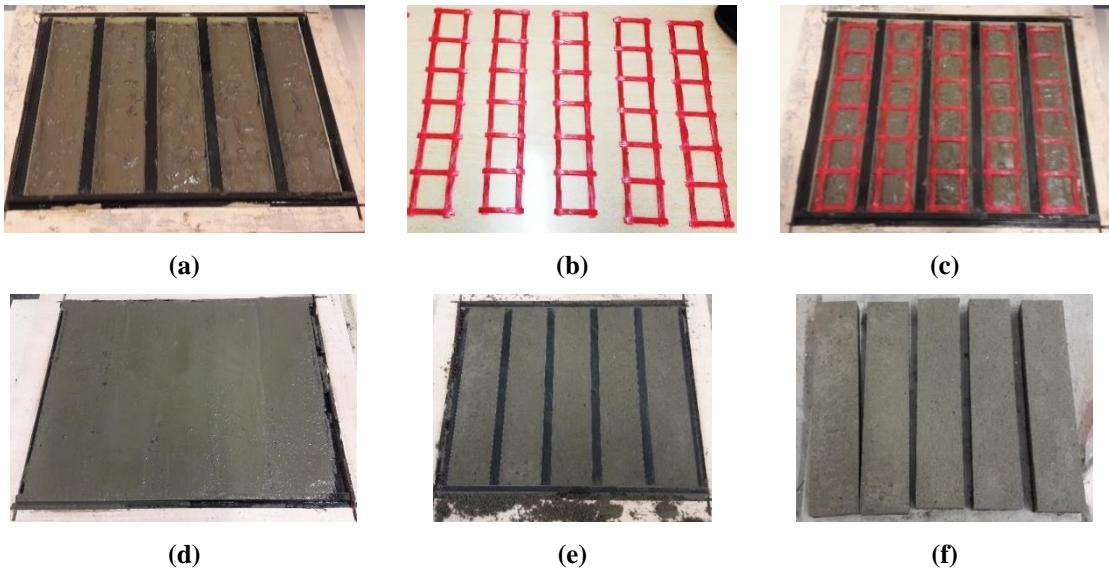
¹² ASTM C947-03 [157] : *Standard Test Method for Flexural Properties of Thin-Section Glass-Fiber-Reinforced Concrete*

tekstil parçaları (Şekil 3. 6b) bu tabakanın üzerine yerleştirilmiştir. Harç ile tekstil arasında boşluk kalmaması için, hafifçe bastırılarak tekstil parçaları harcın içine gömülmüştür (Şekil 3. 6c). Ardından, üstteki ~10 mm'lik boş kısım, kalıbın üst seviyesine kadar harçla doldurulmuş ve mala yardımıyla numune üst yüzeyi düzlenmiştir (Şekil 3. 6d). Kalıba dıştan uygulanan periyodik darbeler ile numune içerisinde hava boşluklarının minimum düzeyde kalması sağlanmıştır.



Şekil 3. 5 Kupon numune kalıpları.

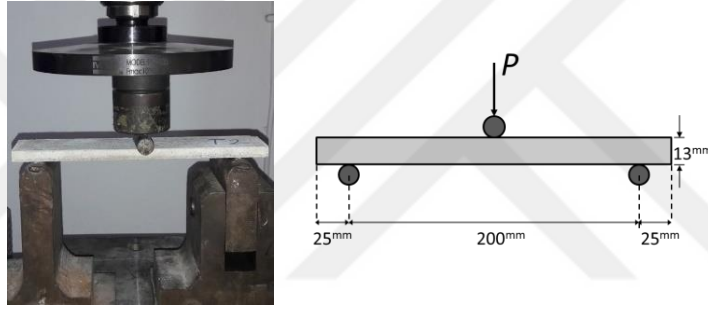
Priz sürecinde su kaybını önlenmek amacıyla, kalıpların üzeri muşamba ile örtülmüş ve 48 saat laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. Kalıptan çıkarma öncesi, spatula ile kalıp üst yüzeyindeki harç fazlalığı alınarak, numuneler eşit boyutlara getirilmiştir (Şekil 3. 6e). Çerçeve çıkarıldıktan sonra numuneler birbirinden ayrılmış (Şekil 3. 6f), test gününe kadar nemli polietilen poşetler içinde laboratuvar koşullarında saklanmıştır.



Şekil 3. 6 Kupon numune üretim aşamaları.

3.3 Eğilme Test Düzenegi

Üç noktalı eğilme testleri, yerdeğiştirme kontrollü bir test cihazı olan MTS Criterion Model 43'de gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında cihaza 50 kN kapasiteli yük dönüştürücü takılmıştır. Kupon numuneler, her iki kenardan 25 mm uzaklıkta ve alt yüzeyden mesnetlenmiştir, mesnet açıklığı 200 mm'dir (Şekil 3.7). Yükleme hızı, ASTM C947-03'de [157]'de önerilen yükleme hızı aralığına (1.27-5.1 mm/dk) uygun olarak 1.8 mm/dk belirlenmiştir. Açıklığın ortasına yerleştirilen silindirik çelik çubuk ile, numune genişliği boyunca çizgisel yükleme sağlanmıştır. Test sırasında, yükleme doğrultusunun değişmemesi için, çelik çubuğun üzerine oynar bir başlık yerleştirilmiştir. Test cihazının üst başlığı, oynar başlık ile temas ettikten sonra, numuneye ~ 25-30 N'luk ön yükleme ile test başlatılmıştır. Test sırasında, yük değerleri ve açıklık ortası yerdeğiştirme değerleri kaydedilmiştir. Test, maksimum yük sonrası %20 azalma düzeyinde sonlandırılmıştır.



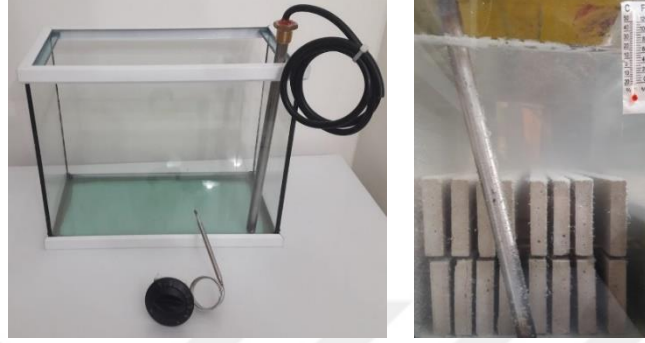
Şekil 3. 7 Kupon eğilme test düzenegi detayları.

3.4 Yaşlandırma Yöntemi

Kompozitlerin uzun dönem performanslarını tahmin edebilmek için sıcak suya daldırma yöntemi uygulanmıştır. Sıcak suda bekletme, cam lif takviyeli çimentolu kompozitler için sık kullanılan bir yaşlandırma yöntemidir. Bu yöntem, kompozitlerin belirli bir sıcaklıkta sıcak su ile doldurulmuş tanklara daldırılması ve bu sıcaklığın belirli bir süre korunması şeklindedir. Literatürde, su sıcaklığı ve bekletme sürelerine bağlı olarak, çimentolu harcın İngiltere iklim koşullarındaki yaşını tahmin eden denklikler verilmiştir [125]. Bu denkliklere göre 50°C'deki su içerisinde bir gün bekletme, doğal iklim koşullarındaki 101 günlük etkiye eşdeğerdir.

Bu deneysel çalışmada, laboratuvar koşullarında, nemli poletilen poşetler içinde 28 gün bekletilen kupon numuneler, rezistansa bağlı termostat ile sıcaklığın sabit kalması

sağlanarak, su tankında 50°C'da 10 gün boyunca bekletilmiştir (ASTM C1560-03) [158]¹³. Buharlaşmayı önlemek için su tankının üzeri metal bir kapak ile kapatılmıştır. Buna rağmen az da olsa buharlaşan suyun yerine, üstten takviye yapılarak numunelerin süreç boyunca tamamen sıcak suda kalmaları sağlanmıştır (Şekil 3.8). 38. günün sonunda sıcak sudan çıkarılan numuneler eğilme testine tabi tutulmuştur.

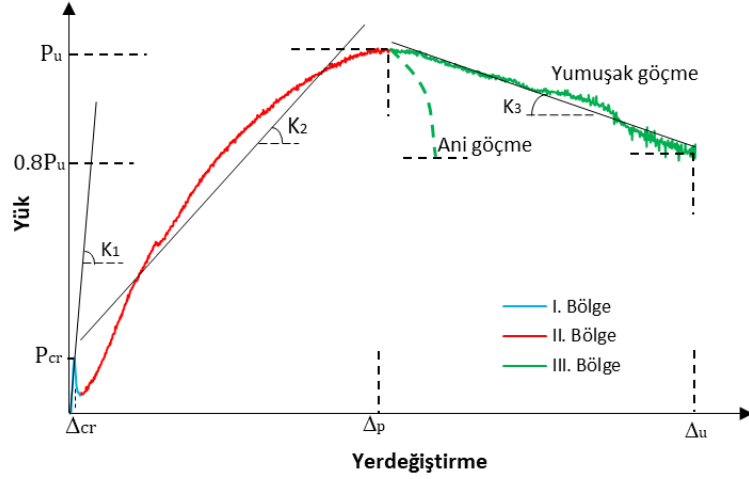


Şekil 3. 8 Sıcak suya daldırma düzeneği.

3.5 Test Sonuçları

Eğilme testleri sırasında kaydedilen verilerden, yük-yerdeğiştirme ($P-\Delta$) eğrileri oluşturulmuştur. Burada, kompozitlerin eğilme etkisindeki davranışı, bu eğriler kullanılarak yorumlanacaktır. Numunelerin genel davranışını temsil eden tipik $P-\Delta$ eğrisi üç bölgeden oluşmaktadır (Şekil 3.9). Doğrusal elastik davranışın gözlemlendiği I.Bölge, test başlangıcından numunede ilk çatlak oluştuğu noktaya (P_{cr} , Δ_{cr}) kadar olan bölgeyi ifade eder. İlk çatlak oluştuğundan sonra genellikle yük değerinde ani bir azalma meydana gelir. Bu ani azalma sonrası, maksimuma ulaşmaya kadar (P_u , Δ_p) yük artışının devam ettiği kısım II. Bölge olarak tanımlanmıştır. III. Bölge ise, maksimum yük değerine ulaştıktan sonra artan yerdeğiştirmeye karşılık yük değerinde azalmanın görüldüğü, kompozitin dayanımını kaybetmeye başladığı bölgedir. Bu bölgede maksimum yük sonrası kompozit, ya çok hızlı bir şekilde dayanım kaybederek ani göçme gerçekleşir ya da enerji yutmaya devam ederek, yük değerindeki yavaş azalma ile testin sonlandırılacağı noktaya ($0.8P_u$, Δ_u) ulaşır.

¹³ ASTM C1560-03 [158]: *Standard Test Method for Hot Water Accelerated Aging of Glass-Fiber Reinforced Cement-Based Composites*



Şekil 3. 9 Eğilme testlerinden elde edilen tipik yük-yerdeğiştirme eğrisi.

Bu çalışmada; kompozitlerin eğilmedeki performansları, yük-yerdeğiştirme eğrileri ve tanımlanan parametrelere göre değerlendirilmiştir. Söz konusu parametreler:

- Eğri altında kalan alan hesaplanarak, P_u ve $0.8P_u$ düzeyine kadar numunelerin enerji yutma kapasitesi (E_p , E_u) belirlenmiştir.
- Eğilme testlerinde Δ_p değerinin büyüklüğü, numunenin P_u 'ya ne kadar sürede ulaştığını ifade eder, yutulan enerji miktarını etkiler.
- Kompozitin rijitliği; tipik $P-\Delta$ eğrisinde tanımlanan bölgelere ait eğilim doğruları ile tanımlanmıştır. K_1 henüz çatlak oluşmamış I. Bölgedeki başlangıç rijitliğini, K_2 çatlak oluşumu sonrası (II. Bölge) tekstilin etkin çalıştığı pekleşme rijitliğini, K_3 ise III. bölgedeki yumuşama rijitliğini ifade eder. II.bölge tekstilin çalışma bölgesidir, enerji yutması açısından artan yük ve yerdeğiştirme değerleri beklenir.
- Kompozit performansını süreklilik açısından değerlendirmek için şekildeğiştirme sürekliliği (Δ_u/Δ_p) ve enerji sürekliliği $[(E_u - E_p)/E_p]$ parametreleri de dikkate alınmıştır.

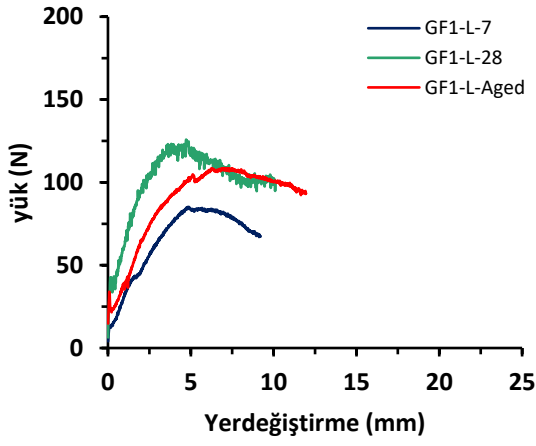
Söz konusu kritik parametreler, eğilme testi uygulanan her bir seri içinden seçilen ortalama (temsili) eğriler kullanılarak Tablo 3. 3'te verilmiştir. Serileri tanımlamak için, tekstil türleri olarak GF1, GF2, BF, CF1, CF2; harç türü olarak doğal hidrolik kireç (L), çimento (C), kompozit yaşı olarak 7.gün, 28.gün ve yaşlandırma (Aged) verileri esas alınmıştır. Burada, örneğin; "GF1-C-7", GF1 tekstilli çimento esaslı kompozitin 7.günde test edilen serisini tanımlar. "CF2-L-Aged", CF2 tekstilli doğal hidrolik kireçli kompozitin yaşlandırılmış serisini ifade eder.

Tablo 3. 3 Kupon eğilme test sonuçlarının özeti.

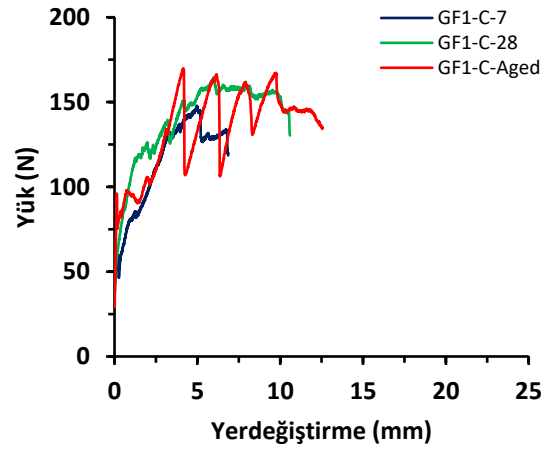
	P_{cr} (N)	Δ_{cr} (mm)	K_I (N/mm)	P_u (N)	Δ_p (mm)	E_p (N.mm)	K_2 (N/mm)	$0.8*P_u$ (N)	Δ_u (mm)	E_u (N.mm)	K_3 (N/mm)	Δ_u/Δ_p	$(E_u-E_p)/E_p$
GF1-L-7	12.9	0.12	91.5	84.6	4.8	256	13.6	67.7	9.2	601	4.7	1.92	1.35
GF1-L-28	42.2	0.24	77.3	124.7	4.9	452	18.8	99.7	10.1	1010	3.5	2.06	1.23
GF1-L-Aged	33.5	0.10	226.8	108.4	6.3	474	14.4	93.0	11.9	1055	2.6	1.90	1.23
GF1-C-7	59.9	0.23	87.1	147.7	4.9	529	19.4	118.5	6.9	779	4.3	1.41	0.47
GF1-C-28	84.8	0.53	286.2	163.7	6.0	769	11.7	130.7	10.6	1480	2.4	1.77	0.92
GF1-C-Aged	96.0	0.14	509.7	169.0	4.2	1270	20.4	134.2	12.5	1675	4.2	2.98	0.32
GF2-L-7	40.8	0.11	113.7	158.0	8.2	892	17.2	126.4	14.9	1847	4.7	1.82	1.07
GF2-L-28	51.9	0.19	123.7	143.6	6.4	644	17.1	114.9	14.0	1625	3.1	2.19	1.52
GF2-L-Aged	76.0	0.16	129.2	160.9	6.2	766	17.2	128.7	11.3	1500	6.4	1.82	0.96
GF2-C-7	51.4	0.41	43.6	116.8	8.7	884	6.4	95.2	20.5	2092	1.7	2.37	1.37
GF2-C-28	31.9	0.08	72.2	137.3	12.1	1412	6.2	109.9	19.7	2353	3.4	1.63	0.67
GF2-C-Aged	77.5	0.24	257.0	172.9	11.6	1578	8.7	136.4	22.5	3248	3.2	1.94	1.06
BF-L-7	20.5	0.08	156.0	56.1	5.7	225	7.6	44.8	5.9	232	18.2	1.04	0.03
BF-L-28	27.0	0.41	115.5	123.4	21.4	2076	2.8	98.7	28.6	2936	2.2	1.34	0.41
BF-L-Aged	22.3	0.07	98.0	125.7	11.4	1020	8.8	97.1	18.8	1916	2.0	1.65	0.88
BF-C-7	11.1	1.37	1.0	65.8	15.8	652	3.6	53.0	27.2	1375	0.2	1.72	1.11
BF-C-28	18.1	1.30	10.3	96.7	24.6	1571	3.7	86.9	26.8	1774	11.3	1.09	0.13
BF-C-Aged	45.6	1.33	17.4	108.1	21.3	1595	3.3	53.9	23.7	1826	15.4	1.11	0.14
CF1-L-7	56.5	0.18	153.0	141.0	13.6	1636	4.9	112.8	16.1	1960	9.8	1.18	0.20
CF1-L-28	70.5	0.25	86.0	155.0	13.7	1737	4.9	124.0	17.7	2319	8.5	1.29	0.34
CF1-L-Aged	66.1	0.12	262.4	161.7	11.1	1414	8.3	129.4	13.5	1754	13.3	1.22	0.24
CF1-C-7	48.3	0.08	235.7	145.4	5.1	576	19.1	116.0	10.5	1261	5.2	2.06	1.19
CF1-C-28	68.9	0.17	302.1	248.2	12.8	2638	11.7	198.5	17.8	3773	11.3	1.39	0.43
CF1-C-Aged	95.3	0.19	365.0	344.5	8.7	2407	23.7	275.2	30.8	9219	1.9	3.56	2.83
CF2-L-7	-	-	-	161.3	4.8	610	23.1	129.0	6.6	878	21.8	1.38	0.44
CF2-L-28	-	-	-	202.3	3.8	594	38.7	161.8	6.2	1035	18.4	1.63	0.74
CF2-L-Aged	-	-	-	235.5	2.5	426	81.3	188.4	4.5	848	27.3	1.80	0.99
CF2-C-7	72.4	0.17	282.3	294.1	4.6	937	55.4	200.2	8.1	1857	23.5	1.76	0.98
CF2-C-28	112.8	0.19	378.9	362.0	5.2	1331	50.1	288.2	6.2	1678	76.7	1.19	0.26
CF2-C-Aged	103.9	0.18	453.3	374.1	4.0	1024	75.9	96.3	5.3	1507	17.7	1.33	0.47

TRM kuponların 7, 28.gün ve yaşlandırılmış serilerine ait $P-\Delta$ eğrileri Şekil 3. 10'da verilmiştir, kireç esaslı harç numuneler solda, çimento esaslı numuneler sağda olacak şekilde sıralanmıştır. Serilerdeki diğer numunelere ait yük-yerdeğiştirme eğrileri bölüm EK-A'da verilmiştir. Eğilme deneylerine ait grafikler ve Tablo 3.3'den aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

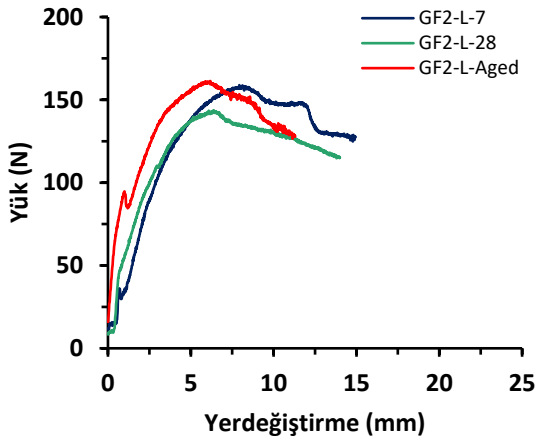
- Aynı harç türü, farklı tekstiller ile takviye edildiğinde K_I de görülen değişiklikler; I. Bölgede etkili fazın sadece matris olmadığını ve tekstil takviyesinin de bu bölgede etkili olduğunu göstermektedir. İlerleyen yaşlarda, başlangıç rijitliklerinde (K_I) tekstil türüne göre farklılıklar izlenmektedir. Çimento esaslı kompozitlerde tüm tekstil türlerinde 7.günden 28.gün ve yaşlandırma sonrasına geçişte K_I değerleri sürekli artmıştır. Ancak, kireç esaslı kompozitlerde ise bu durumun istisnaları vardır. En büyük K_I ; çimento esaslılarda GF1-C-Aged serisinde (509.7 N/mm), kireç esaslılarda CF1-L-Aged serisinde (262.4 N/mm) meydana gelmiştir. CF2-L serisinde I.Bölgenin sonunda yükte ani düşüş gözlenmemiş, P_{cr} , Δ_{cr} ve K_I değerleri bu seri için verilmemiştir.



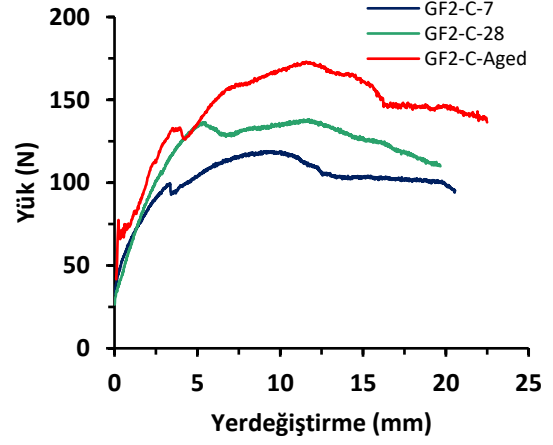
(a)



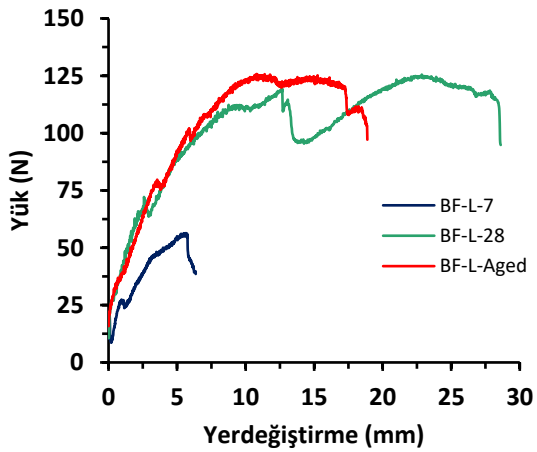
(b)



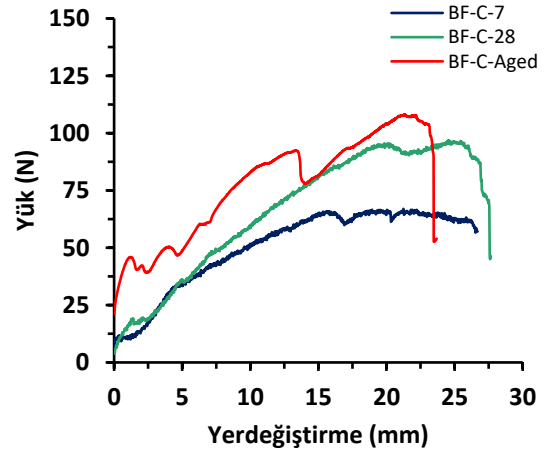
(c)



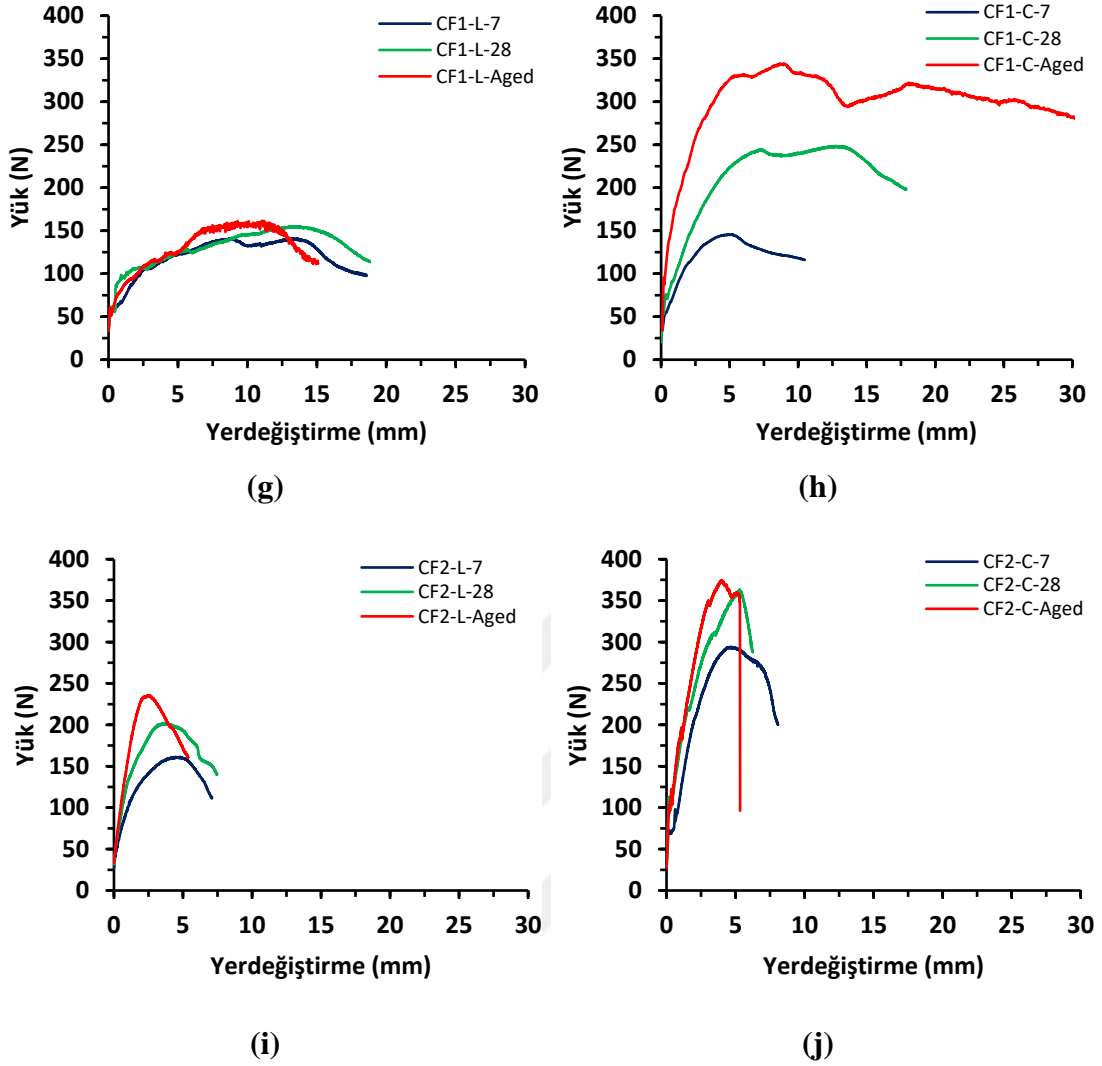
(d)



(e)



(f)



Şekil 3. 10 Kupon eğilme numunelerine ait yük-yerdeğiştirme grafikleri.

- Çimento esaslı tüm serilerde yaşa göre P_u düzeyindeki farklılıklar, kireç esaslı serilere kıyasla daha fazladır ve 7 günden yaşlandırmaya sürekli artmıştır. Kireç esaslı serilerde; 28 günden yaşlandırmaya artış, CF2 hariç, gözlenmemiştir. En büyük P_u ; çimento esaslı CF2-C-Aged (374.1 N), kireç esaslı CF2-L-Aged (235.5 N) serilerinde oluşmuştur. BF tekstili kaplamasız olduğu için, yumuşak aderans ayrılmalarının izin verdiği ölçüde harç içinden diğer serilere kıyasla daha fazla sıyrılmış, geldiği maks. yük seviyesinde ani azalma sonrası yeniden yük almaya devam etmiştir, nedeni mikro fotoğraflar üzerinden tartışılacaktır.
- GF2-L ve CF1-L serilerinde farklı yaşlardaki dayanım, çimentolu olanlara kıyasla birbirine çok yakındır, yaşlandırma yönteminden daha az etkilendikleri söylenebilir.

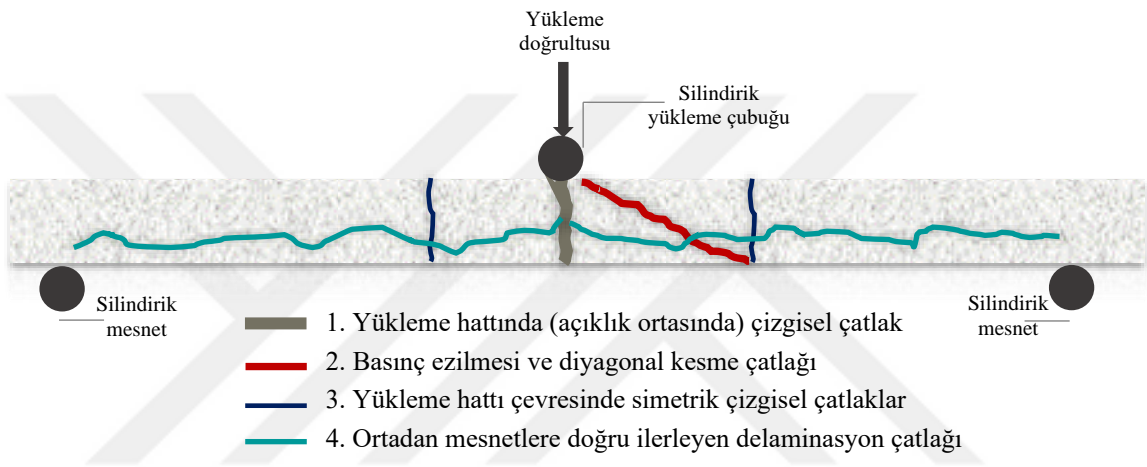
Kireç esaslı kuponlarda; 7 günden yaşlandırma sonuna kadar en fazla farklılık gösteren BF serisidir, bu da lifin kaplamasız olması, hidrofilik yapısı ve CH etkileşimi ile ilgilidir.

- CF2 serisinde K_2 değerleri, SBR üzerine SF kaplaması ile gelişen güçlü matris-tekstil aderansı nedeniyle, diğer serilere kıyasla oldukça büyüktür.
- GF2-C ve CF1-C hariç diğer serilerde, 28.günden yaşlandırma sonrasına Δ_p değerleri azalmıştır. CF1-L ve CF1-C serileri Δ_p açısından iyi bir performans göstermiştir, bu durum, tekstilin çok kalın olmayan SBR kaplaması ile matris uyumunun bir sonucudur. GF1 ve GF2 serileri karşılaştırıldığında, GF2 tekstili iki harç tipinde de daha iyi performans göstermiştir. GF1'in yüksek SBR kaplama miktarının tekstil rijitliğini arttırdığı ve dolayısı ile kompozit sünekliğini azalttığı söylenebilir. Tekstil ve matris arasındaki rijitlik uyumunun önemi burada net şekilde gözlenmektedir.
- SBR kaplamalı GF1, GF2 ve CF1 serileri P_u sonrası daha sünek bir performans, devam eden yerdeğiştirmeler, ile büyük oranda yük taşıma kapasitelerini korumuşlardır. Diğer taraftan ani göçme durumu, her iki harç tipinde de CF2 takviyeli kompozitlerde görülmüştür. CF2 tekstilinin yüzeyindeki SBR+SF kaplaması bu durumun en büyük nedeni olarak düşünülebilir.
- SBR kaplamalı tekstiller ile takviye edilmiş kompozitler genel olarak yüksek şekildeğiştirme sünekliği (Δ_u/Δ_p) sergilemiştir, yaşlandırma sonrasında çimento esaslı GF2 ve CF1 serilerinde süneklik daha da artmıştır.
- AR-cam ve karbon esaslı tekstillerin enerji süneklikleri karşılaştırıldığında; $(E_u - E_p)/E_p$ açısından AR-cam tekstillerin kireç esaslı harçlarda, CF1 tekstillerin ise çimento esaslı harçlarda daha iyi performans gösterdiği söylenebilir ve bu durum "güçlü harç-güçlü tekstil / zayıf harç-zayıf tekstil" kavramını destekler. Kireç esaslı kompozitlerde, en büyük enerji sünekliği (1.52) GF2-L-28 serisinde, en düşük değer (0.03) BF-L-7 serisinde gerçekleşmiştir. Çimento esaslı kompozitlerde, en büyük enerji sünekliği (2.18) CF1-C-Aged serisinde; en düşük değer ise BF-C-28 serisinde (0.13) gözlemlenmiştir. Yutulan enerji konusu Bölüm 3.7'de daha ayrıntılı ele alınacaktır.

3.6 Kırılma Modları ve Mikroskopik Gözlemler

Eğilme altındaki kupon numunelerde görülen tipik çatlak şekilleri Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Birinci çatlak tipi, açıklık ortasında ve numune derinliği (yükleme çizgisi)

boyunca devam eden tekil çatlaktır. Kesitin alt tarafında, çekme gerilmelerinden dolayı açılma görülürken; üst kısımda, basınç gerilmeleri harcın ezilmesine neden olur. İki numaralı çatlak tipi, basınç ezilmesi ve diyagonal kesme çatlaklarıdır. Bu çatlak tipi, çekme bölgesindeki dayanım sınırı henüz aşılmamış iken, basınç bölgesinde gerilmelerin aşırı artması nedeniyle oluşan numune göçme türüdür. Üç numaralı çatlak tipi ise bir numaralı çatlağın sağ ve sol yanında ikili olarak ortaya çıkan, diğer çatlak tiplerine göre daha ince çatlaklardır. Dört numaralı delaminasyon çatlakları, açıklık ortasından mesnetlere doğru, tekstilin kompozit içindeki konumu hizasında ilerleyen ve numunenin alt kısmında tabaka halinde ayrılmaya neden olur.















Şekil 3. 11 Kupon eğilme testlerinde gözlemlenen tipik çatlak şekilleri.

Üç noktalı eğilme testlerine tabi tutulan kompozit türlerinin alt ve yan yüzey görüntüleri, Şekil 3.11’de tanımlanan çatlak tipleri kırılma modları ve numunelerden kesilerek çıkarılan tekstil parçalarına ait mikro görüntüleri Tablo 3. 4’te verilmiştir. Numune görüntüleri 28 gün sonrası yaşlandırılmış numunelere aittir.







Tablo 3. 4 Kupon eğilme testlerinde gözlenen kırılma modları ve mikro görüntüleri.

Kompozit	Alt ve yan yüzeyler -yaşlandırılmış numuneler-	Kırılma Modları	Mikro görüntüleri
GF1-L		1, 4	

Tablo 3. 4 Kupon eğilme testlerinde gözlenen kırılma modları ve mikro görünüşler.

Kompozit	Alt ve yan yüzeyler -yaşlandırılmış numuneler-	Kırılma Modları	Mikro görünüşler
GF1-C		1,4	
GF2-L		1	
GF2-C		1, 4	
BF-L		1, 3	
BF-C		1	
CF1-L		4	

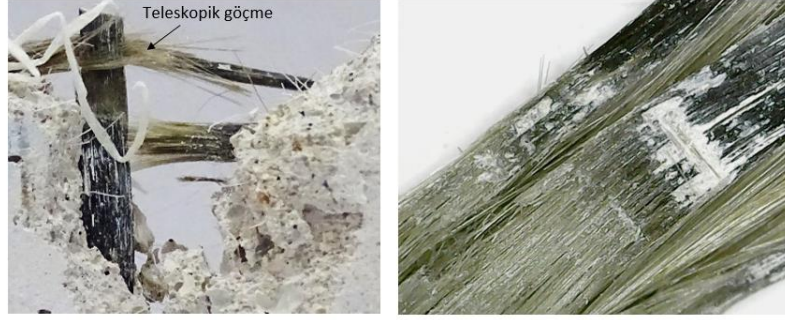
Tablo 3. 4 Kupon eğilme testlerinde gözlenen kırılma modları ve mikro görünüşler.

Kompozit	Alt ve yan yüzeyler -yaşlandırılmış numuneler-	Kırılma Modları	Mikro görünüşler
CF1-C		4	
CF2-L		2	
CF2-C		2	

Yaşlandırılmış numunelerin yüzey görünümleri ve kırılma modlarının izlendiği Tablo 3.4'den aşağıdaki sonuçlara ulaşılmaktadır:

- Tekstilin harç içerisinde sıyrılmasına izin veren, matris-tekstil aderansının çok güçlü olmadığı kompozitlerde açıklık ortasında çizgisel bir çatlak oluşmuştur. Tekstil, oluşan bu çatlağı köprüleyerek test boyunca şekil değiştirmeye devam etmiştir (GF1,GF2).
- BF-L numunelerinde, dolgu iplikleri nedeniyle ana doğrultuya dik ilave çatlaklar da gözlenmiştir. BF-C'de ise bu çatlaklar yok olmuştur, belirgin biçimde delaminasyon izlenmektedir.
- Kaplamasız, hidrofilik bazalt lifli numunelerde; CH birikimi nedeniyle iyon alışverişinin sonucu olarak, matris-tekstil ara yüzünde korozyon oluşumu ve kabuklanma meydana gelmiştir. Tekstilin dış liflerindeki aşırı tutunma bu liflerdeki

sıyrılmayı engellemiş, teleskopik göçme moduna neden olmuştur (Şekil 3.12). Bu durum Şekil 3.1.0e ve f'deki BF-L-28 ve BF-C-aged numunelerde grafikte ani azalma ve sonrası tekrar yükselme şeklinde kendini göstermektedir. Dış liflerin arasından biraz daha içteki lifler kısmen aderans kısmen sürtünme ile sıyrılmaktadır. Daha önce cam liflerde gözlenen bu mekanizma ilk defa bu çalışmada bazalt liflerde de gözlenmiştir.



Şekil 3.12 BF takviyeli kompozitlerde teleskopik göçme modu.

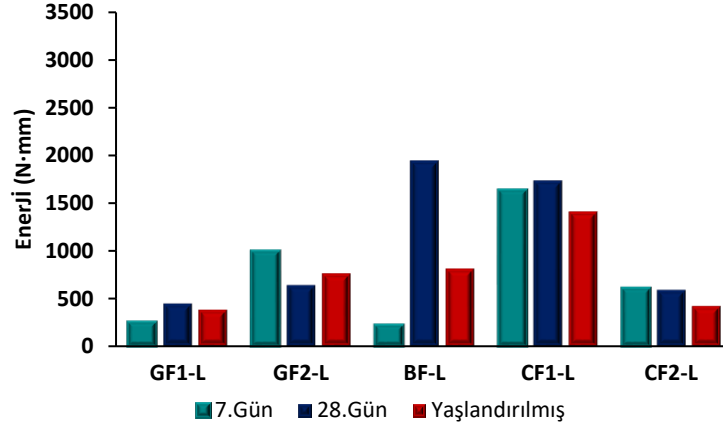
- CF1 takviyeli kuponların alt yüzünde, diğerlerinden farklı olarak, dağınık şekilde çoklu çatlaklar oluşmuştur. Devam eden test sürecinde artan yerdeğıştirmeler nedeniyle yer yer dökülmeler meydana geldiği görülmektedir, bu göçme durumu sadece CF1 numunelere özgüdür.
- CF2 takviyeli kompozitlerde, tekstil yüzeyindeki ilave SF bileşeni, matris-tekstil arasındaki aderansı büyük ölçüde arttırmış ve bunun bir sonucu olarak diyagonal kesme çatlakları ile ani göçme meydana gelmiştir. Özellikle CF2-C numunelerinde tekstil yüzeyinde yoğun C-S-H birikimi izlenmektedir.

3.7 Enerji Kapasiteleri

Test edilen TRM kompozitler, eğilme dayanımı ve yerdeğıştirme kapasitesi bakımından farklı karakterdedir. Bu bölümde, dayanım ve şekildeğıştirme kapasitesinin birlikte etkili olduğu, Tablo 3.3'teki veriler kullanılarak yük-yerdeğıştirme eğrileri altında yutulan enerjiler karşılaştırılacaktır (Bu karşılaştırmada E_u için, P_u sonrası %20 dayanım kaybında sonlandırılmış $0.8P_u$ düzeyi esas alınacaktır).

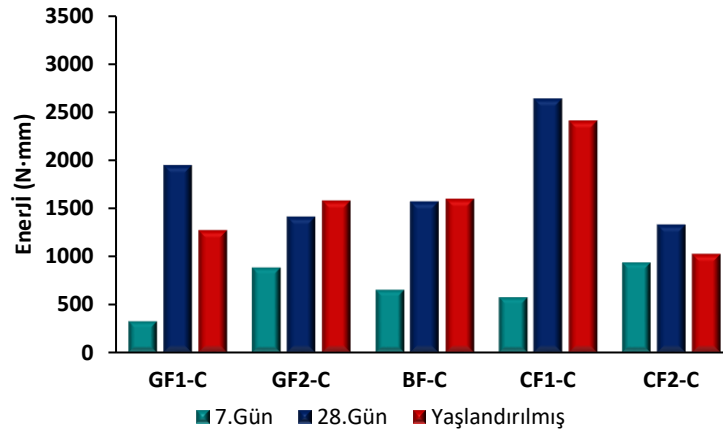
Kireç esaslı matrisler içerisinde (Şekil 3.13), 7 gün ve yaşlandırma sonrasında maksimum yüke kadar en fazla enerjiyi (E_{maks}) CF1-L serisi sönümlenmiştir. 28. günde BF-L serisi, CF1-L'ye göre daha fazla enerji tüketmiş olsa da yaşlandırma sonrası azalmıştır. Diğer

tüm tekstil türleri için E_{maks} yaşlandırmayla azalırken, GF2-L serisinde hafif artış mevcuttur. Kür sürecinde, CF2-L'nin dayanımındaki artışa karşılık yuttuğu enerji gittikçe azalmıştır. SBR kaplaması kalın olan GF1-L numuneleri tüm yaşlarda çok az enerji sönümlenmiştir.



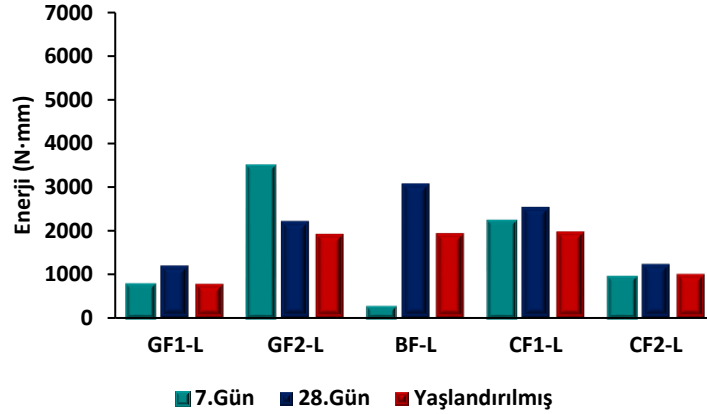
Şekil 3. 13 Kireç esaslı kompozitlerin maksimum yüke kadar tükettiği enerji (E_{maks}).

Çimento esaslı matrisler içerisinde (Şekil 3.14), CF1-C serisi yine en yüksek enerji yutma kapasitesine ulaşmıştır. İkinci sırada, CF2-C serisi; yerdeğiştirme kapasitesi çok az olmasına rağmen, yüksek eğilme dayanımı nedeniyle GF ve BF serileri ile benzer seviyelerdedir. GF2-C'de, kireç esaslı harçta da olduğu gibi, 28 günden yaşlandırmaya sonrasına sönümlendiği enerji miktarı artmıştır. BF-L'deki yaşlandırma sonrası dramatik azalma, BF-C numunelerinde yoktur.



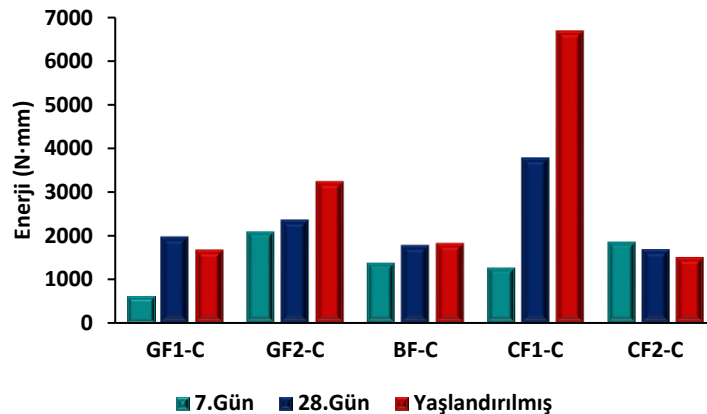
Şekil 3. 14 Çimento esaslı kompozitlerin maksimum yüke kadar tükettiği enerji (E_{maks}).

Kireç esaslı matrislerde (Şekil 3.15), tüm tekstiller için 28.günden yaşlandırma sonrasında toplam enerji kapasitelerinde (E_u) azalma mevcuttur, bu azalma en fazla BF-L kuponlarında görülmektedir. Yaşlandırma sonrasında en fazla enerjiyi CF1-L serisi yutmuştur. GF2-L serisinde ise 7 den yaşlandırma sonrasında sürekli olarak azalmıştır, GF1-L kuponları en düşük enerji yutma kapasitesine sahiptir.



Şekil 3. 15 Kireç esaslı kompozitlerin test sonuna kadar tükettiği enerji (E_u).

Çimento esaslı matrisler içerisinde (Şekil 3.16), CF1-C serisinin enerji kapasitesi yaşlanma ile sürekli artmıştır. Diğer taraftan, GF2-C de aynı şekilde ardışık yaşlarda toplam enerji kapasitesini arttırmaktadır. CF2-C serisinin, devam eden yaşlarda azalan yerdeğiştirme kapasitesine bağlı olarak enerji kapasitesi azalmıştır. BF-C kuponları, yerdeğiştirme kapasiteleri yaşlanmayla azalmasına karşılık, yük seviyelerinde artış ile enerji seviyesini korumuştur. GF1-C kompozitlerin yuttuğu enerji, aynı lif türünden GF2-C'ye göre düşük seviyede kalmıştır.



Şekil 3. 16 Çimento esaslı kompozitlerin test sonuna kadar tükettiği enerji (E_u).

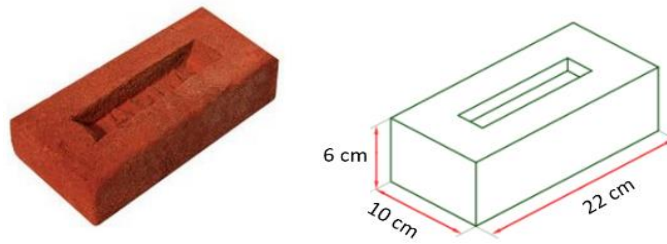
GÜÇLENDİRİLMİŞ YIĞMA KİRİŞLERDE EĞİLME TESTLERİ

Bu bölüm, TRM ile güçlendirilmiş yığma duvar elemanlarının düzlem-dışı davranışlarını belirlemek amacıyla yığma kirişler üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmaları içermektedir. Beş tip tekstil ve iki farklı harç ile güçlendirilen TRM kupon serileri, eğilme testlerine tabi tutulmuştur, her seride üç adet numune test edilmiştir.

4.1 Malzemeler

4.1.1 Tuğla

Bu çalışmada anıtsal, sivil mimari yapı taşıyıcı duvarlarında sıklıkla kullanılan tuğlaların özelliklerine uygun üretilmiş harman tuğlaları kullanılmıştır. Eskişehir’de geleneksel yöntemler ile üretim yapan bir tesisten temin edilen tuğlalarının fiziksel ve mekanik özellikleri deneysel çalışmalar ile belirlenmiştir. 22’lik antik harman tuğlası olarak isimlendirilen tuğlaların boyutları 22 cm x10 cm x 6cm’dir. Kenarları ve yan yüzleri düzgün olup; üst yüzünde harç cebi olarak da bilinen, derinliği 10 mm olan bir çukur mevcuttur (Tuğla üreticisi firmanın adı bu harç cebinin içinde görülmektedir). Söz konusu tuğlanın görseli ve boyutları Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 1 Harman tuğlasının görünüşü ve geometrik özellikleri.

Tuğla kalitesini belirleyen en önemli parametre basınç dayanımıdır, BS EN 772-1’e [159] göre belirlenmiştir (Şekil 4.2). Basınç dayanımını etkileyen faktörler; toprağın cinsi, pişirilme ısısı, porozite, tuğla geometrisidir. Toplam 10 adet tuğla üzerinde gerçekleştir-

tirilen basınç testleri sonucunda ortalama basınç değeri 15.7 ± 2 MPa olarak belirlenmiştir. Tuğlalardaki boşluk oranı da BS EN 772-3'e [160] göre ortalama %11.5 bulunmuştur.



Şekil 4. 2 Tuğla basınç dayanımlarının belirlenmesi.

4.1.2 Harçlar

Derz Harcı

Deney numunelerinin üretiminde, tuğla arası derzlerde kullanılacak harcın tarihi yığma yapılar ile uyumlu olması hedeflenmiştir. Bu amaçla, bağlayıcı olarak doğal hidrolik kireç (TICM CALCE) kullanılmıştır. Karışım tasarımında ağırlıkça bağlayıcı/kum oranı 1/3, su/bağlayıcı oranı ise 0.8 olarak belirlenmiştir. Kullanılan dere kumundaki maks. tane boyutu 2 mm ile sınırlandırılmıştır.

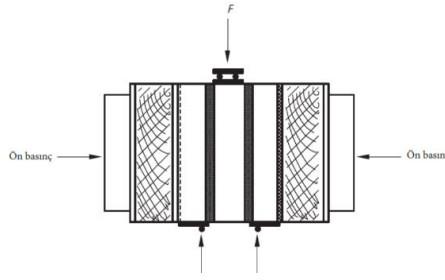
Sıva Harcı (TRM Matrisleri)

Yığma kirişlerde güçlendirme işleminde sıva harcı olarak, TRM'nin matris fazını (Bölüm 3.1.1) da oluşturan kireç ve çimento esaslı harçlar kullanılmıştır. Böylece, kupon eğilme testi ve yığma kiriş eğilme testi sonuçları arasında karşılaştırmalar yapılabilmesi hedeflenmiştir.

4.2 İlk Testler: Triplet Numunelerde Kayma Testleri

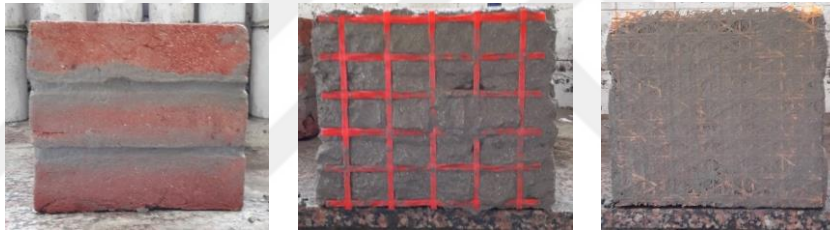
TRM ile güçlendirmenin tuğla birimleri üzerindeki etkinliğini görmek ve ilerleyen aşamalar için pratiklik kazanmak amacıyla, küçük ölçekli numuneler ile bazı testler gerçekleştirilmiştir. Yığma birimlerin başlangıç kayma dayanımı testleri BS-EN 1052-3 [161]'a göre uygulanmıştır (Şekil 4.3). Üç adet tuğla, derz harcıyla birleştirilerek triplet numuneler üretilmiştir. Kenarda kalan tuğlalar mesnetlenerek, ortadaki tuğlayı kaydırarak şekilde derz doğrultusunda düşey kuvvet uygulanmıştır. Triplet kayma testleri sıvasız, donatısız sıvalı ve üç farklı tekstil (GF1, GF2 ve Hibritex 4D) ile güçlendirilmiş olmak üzere beş farklı seride ön yanal basınç olmadan ve 0.5 MPa ön yanal basınç altında

gerçekleştirilmiştir. Yükleme hızı olarak 1 mm/dk olarak belirlenmiştir. Sıva harcı olarak, Bölüm 3.1.1’de bahsedilen çimento esaslı harç kullanılmıştır.



Şekil 4. 3 Triplet testleri ile başlangıç kayma dayanımının belirlenmesi.

Triplet kayma testleri için numunelerin hazırlanma aşamaları Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Üst üste üç tuğlanın birleştirilmesiyle oluşturulan yığma birimlerin üretiminden en az 28 gün geçtikten sonra boş sıva ve donatılı sıva uygulanmıştır. Üretime geçmeden önce triplet numunelerin suya doygun hale gelmesi sağlanmış, donatısız sıva ve TRM uygulaması numunelerin her iki yüzeyine de yapılmıştır.



Şekil 4. 4 Triplet kayma numunelerinin hazırlanma aşamaları.

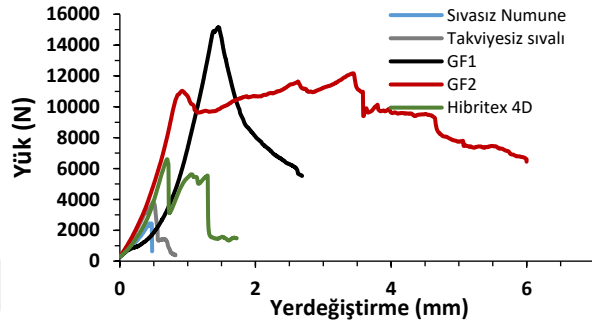
Sıva ve güçlendirme işlemini takip eden 28 günün sonunda, yük uygulama yüzeylerindeki pürüzlülüğün giderilmesi amacıyla, taşlı kesme makinasında numuneler traşlanmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4. 5 Traşlanmış triplet numuneleri.

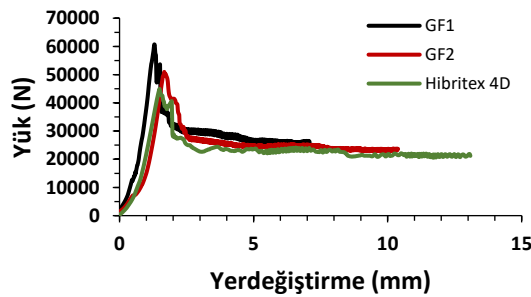
Ön yanal basınç olmaksızın test edilmiş triplet kayma testlerine ait yük-yerdeğiştirme eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.6’da verilmiştir, TRM ile güçlendirmenin katkısı

görülmektedir. Burada farklı tekstil türleri ile yapılan güçlendirilmenin birbirlerine göre oldukça farklı tepki vermesi kompozit etkinliklerini karşılaştırma konusunda yardımcı olmuştur. Donatısız sıva uygulaması, başlangıç kayma dayanımını bir miktar arttırmıştır, ancak tekstil donatılı harç ile güçlendirilmedeki artışa göre bu artış oldukça sınırlı kalmıştır. GF1 ve GF2 kıyaslandığında, GF1 takviyeli güçlendirilmenin kayma dayanımının daha fazla olduğu, ancak GF2'nin daha büyük şekildeğişirmeye bağlı olarak daha fazla enerli yutma etkinliğine sebep olduğu olduğu görülmüştür.



Şekil 4. 6 Triplet testleri karşılaştırmalı yük-yerdeğiştirme eğrileri (ön basınç yok).

Ön yanal basınç (0.5 MPa) uygulanarak, üç farklı tekstil ile güçlendirilmiş triplet testlerine ait yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 4.7'de verilmiştir. Ön basıncın etkisiyle numunelerde birbirine daha benzer davranış gözlenmiştir. Ancak kayma dayanımı sıralaması ön basıncın sıfır olduğu durumdaki sıralamayla aynı olmuştur. Burada yanal basıncın etkisiyle, tekstil etkinliği bitmiş olsa da, sürtünme kuvvetlerinin etkisiyle yük-yerdeğiştirme eğrisi ~ 2.5 mm'den itibaren yatay bir doğru olarak devam etmiştir.



Şekil 4. 7 Triplet testleri karşılaştırmalı yük-yerdeğiştirme eğrileri (ön basınç etkisi).

4.3 Yığma Kiriş Numunelerin Hazırlanması

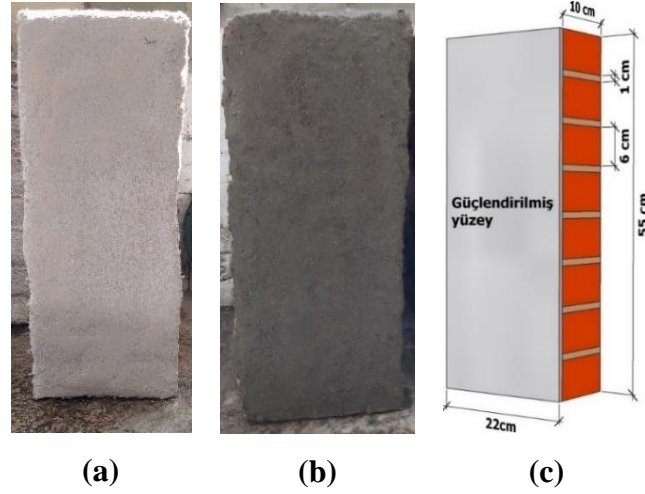
Suya doymun hale getirilmiş sekiz adet tuğlanın aralarında 1.0 cm derz olacak şekilde düşeyde üst üste dizilmesiyle 55x10x22 cm ölçülerinde yığma kirişler üretilmiştir (Şekil 4.8). Yukarıda belirtilen boyutlar, ASTM E-518’de belirtilen sınır değerlere (*mesnet açıklığı/numune derinliği* ≥ 2.5) uygun olarak belirlenmiştir. Böylece, kısa kiriş oluşumu önlenmiş ve kirişlerin eğilmeye çalışması sağlanmıştır.

İki farklı harç türü ve beş farklı tekstil ile bu birimlere güçlendirme yapılarak on farklı seri oluşturulmuştur. Ayrıca tekstil donatının düzlem dışı davranışa katkısını görebilmek için her iki harç türü ile sıvanmış, ancak güçlendirilme yapılmamış iki serinin test edilmesi planlanmıştır. Her seri için üç adet yığma birimi üretilmiş; güçlendirme uygulamasından önce en az bir ay laboratuvar koşullarında bekletilmiştir.



Şekil 4. 8 Güçlendirilmemiş yığma kirişler.

Güçlendirme aşamasında, TRM ile güçlendirilecek yığma birimler; su püskürtülerek ve yüzey üzerinde ıslak sünger gezdirilerek tekrar suya doymun hale getirilmiştir. Böylece, güçlendirme harcının yığma yüzeye tam yapışmasını engelleyecek, pişmiş kil tuğlaların aşırı su emmesinden kaynaklı sorun oluşmasını engellenmiştir. Uygulama öncesi yüzey üzerindeki harç kalıntıları mala yardımıyla temizlenmiştir. İlk hazırlığın ardından düz mala ile ~4 mm kalınlığındaki ilk harç tabakası uygulanmıştır. Hasır tekstil, bu ilk tabakanın üzerine, tekstilin çözü yönü duvar ünitesinin yüksekliği boyunca hizalanarak yerleştirilmiş ve taze harcın içine doğru hafifçe bastırılmıştır. Ardından tekstilin üzeri 4 mm'lik ikinci harç tabakası ile sıvanmış ve düzgün bir yüzey görünümü oluşana kadar mala ile tesviye uygulanmıştır (Şekil 4.9-a,b). Güçlendirme işlemi yığma birimlerin tek yüzeyine uygulanmıştır, uygulama ve şematik görünüm Şekil 4.9-c’de verilmiştir.



Şekil 4. 9 Kireç ve çimentolu harç ile güçlendirilmiş yığma kirişler ve şematik görünüm.

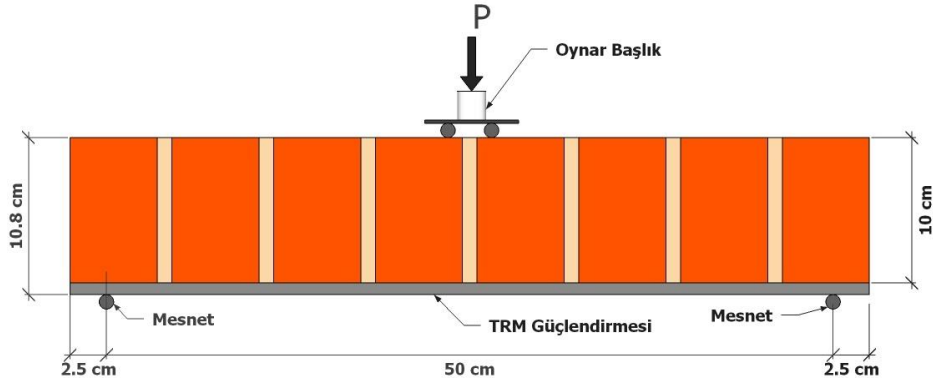
4.4 Test Düzenegi

ASTM E-518 [162]'de, donatısız yığma birimlerin yapışma özelliklerini belirlemek için eğilme testi önerilmektedir (Şekil 4.10). Bu test yönteminden esinlenerek, TRM ile güçlendirilmiş kagir birimlerde düzlem dışı davranış, eğilme testi ile benzeştirilmiştir.



Şekil 4. 10 Yığma birimlerin eğilme testi [162].

Güçlendirilen yığma birimler, laboratuvar koşullarında 28 gün bekletildikten sonra eğilme testine tabi tutulmuştur. $22 \times 55 \text{cm}^2$ 'lik yüzeylerinden biri TRM ile güçlendirilmiş numunelerin, güçlendirilen yüzeyleri altta kalacak şekilde yan yatırılarak yığma bir kiriş gibi çalışması sağlanmıştır (Şekil 4.11). Kirişler, kenarlardan 2.5 cm uzaklıkta, bir ucu sabit diğer ucu mafsalı, açıklığı ayarlanabilir test aparatı üzerine yerleştirilmiş, 50 cm mesnet açıklığı elde edilmiştir.



Şekil 4. 11 Yığma kiriş eğilme testi düzeneği ve numune detayları.

Yığma kiriş eğilme testinin, Bölüm 3'teki kupon testleri ile uyumlu olması amacıyla, üç noktalı olarak yapılması planlanmıştır. Ancak, numunenin ortasındaki derzin açıklık ortasına denk gelmesi ve bu noktadan yük verilmesini sakıncalı hale getirmesi nedeniyle; yük aktarımının tuğlalardan başlayarak diğer elemanlara doğru devam etmesinin daha gerçekçi olacağı yaklaşımıyla, derz bitişlerinden 1'er cm sağda ve solda olmak üzere iki adet yükleme noktası belirlenmiştir. Böylece dört noktalı eğilme düzeneği oluşturulmuş gibi olsa da, üstteki yükleme noktalarının birbirine çok yakın (~ 3 cm) olması nedeniyle üç noktalı kabul edilebilecek bir eğilme düzeneği oluşturulmuştur. Silindirik çelik yükleme çubuklarının üzerine dikdörtgen bir levha, bu levhanın üzerine oynar başlık yerleştirilmiştir (Şekil 4.12). MTS cihazının basınç başlığı aşağı doğru hareket ettirilerek oynar başlık ile teması sağlanmıştır. Ezilmelerden kaynaklı yerdeğiştirmenin test sonuçlarını etkilemesini engellemek için ~200 N değeri sabit kalana kadar ön yükleme yapıldıktan sonra, yükleme hızı 1 mm/dk ile test başlatılmıştır.



Şekil 4. 12 Yığma kiriş eğilme testi düzeneği.

4.5 Test Sonuçları ve Değerlendirmesi

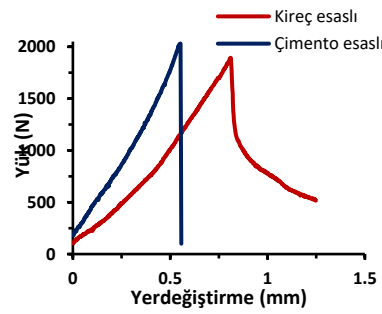
Yığma kiriş eğilme testleri sırasında elde edilen $P-\Delta$ eğrileri kullanılarak, TRM ile güçlendirilmiş yığma kirişlerin eğilme davranışı belirlenmiştir. Kupon eğilme testlerinde görülen (Bölüm 3.5) tipik üç bölgeli davranış güçlendirilmiş yığma kirişlerde de gözlenmiştir (Şekil 3.9). Yığma kiriş eğilme testleri uygulanan tüm test serileri için, güçlendirilmiş numune davranışını temsil eden ortalama eğriler dikkate alınarak belirlenen kritik parametreler Tablo 4.1’de verilmiştir. Serilere ait diğer tüm numunelerin yük-yerdeğiştirme eğrileri bölüm Ek-A’da verilmiştir.

Tablo 4. 1 Yığma kiriş eğilme testi sonuçlarının özeti.

	P_{cr} (N)	Δ_{cr} (mm)	K_1 (N/mm)	P_u (N)	Δ_p (mm)	E_p (N.mm)	K_2 (N/mm)	$0.8*P_u$ (N)	Δ_u (mm)	E_u (N.mm)	K_3 (N/mm)	Δ_u/Δ_p	$(E_u-E_p)/E_p$
GF1-L	3156	1.44	2140	8420	5.8	39196	1427	5403	11.3	69900	458	1.95	0.78
GF1-C	5978	1.40	4569	13834	6.8	59619	1419	10946	7.5	68326	4137	1.10	0.15
GF2-L	2644	0.82	3064	6977	3.9	16134	1566	5500	10.6	54619	10	2.74	2.39
GF2-C	5045.0	1.49	3275	12483	7.8	59823	1332	9403	9.1	74754	1655	1.17	0.25
BF-L	1388	0.80	1520	2931	4.8	8107	519	1785	10.5	20530	78	2.21	1.53
BF-C	3469	2.12	3641	4276	3.4	5684	639	3290	3.6	11259	7408	1.05	0.98
CF1-L	2203	1.41	1470	7508	6.4	25977	924	5934	7.8	35491	1063	1.21	0.37
CF1-C	6827	1.94	3442	10447	5.3	33957	818	7426	5.7	37720	5563	1.08	0.11
CF2-L	4507	1.59	2792	11645	4.0	22781	3208	5930	4.5	26885	6132	1.14	0.18
CF2-C	7420	1.84	4301	18871	5.0	47535	3738	1302	5.0	48196	4622	1.01	0.01

4.5.1 Referans Numuneler

Güçlendirmenin eğilme performansına katkısının belirlenebilmesi için, öncelikle tek yüzeyleri tekstil takviyesiz sadece sıva ile kaplanmış yığma kirişler eğilme testlerine tabi tutulmuştur. Bu numunelerin yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 4.13’te gösterilmiştir.



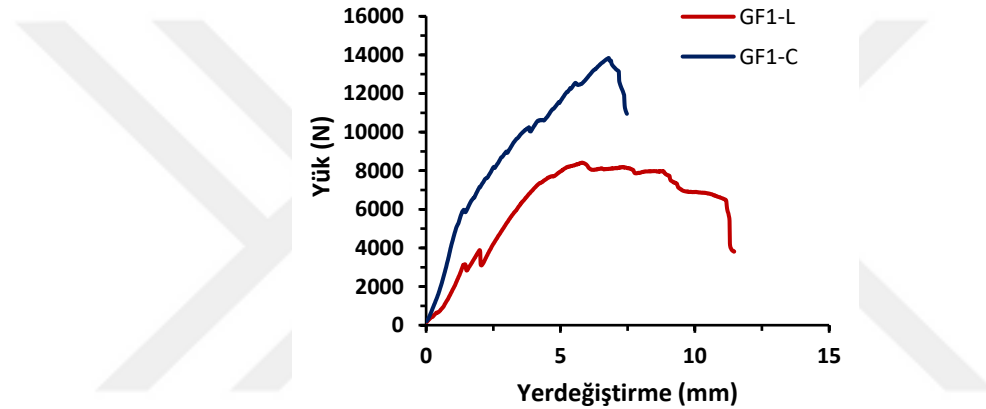
Şekil 4. 13 Donatısız sıvalı yığma kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri.

Her iki harç türü ile donatısız olarak sıvanan yığma kirişler, başlangıçtan maks.yüke ulaşınca kadar doğrusal davranış göstermiştir. ~2000 N’da açıklık ortasında ilk çatlak oluşmuş ve ani göçme modu ile dayanımı kaybetmişlerdir. Çimento esaslı harç ile sıvanan

kirişler 0.5 mm yerdeğiştirme yaptıktan sonra maksimum yüke ulaşır kırılırken, kireç esaslı harçta bu değer 0.75 mm civarındadır. Maksimum yük sonrası kireç esaslı harçta dayanım kaybetme aşaması, çimento esaslı harca göre daha yumuşak gerçekleşmiştir.

4.5.2 GF1 ile Güçlendirilmiş Yığma Kirişler

GF1 takviyeli yığma kirişlerde ilk çatlağın oluştuğu yerdeğiştirme miktarı; her iki harç tipi için benzer olmasına rağmen, GF1-C ile güçlendirilmiş yığma kirişlerde P_{cr} yük seviyesi, GF1-L ile güçlendirilmiş olanların ~2 katıdır (Şekil 4.14). Başlangıç rijitlik değerleri (K_1) kireç esaslı güçlendirilmiş numunelerde, çimento esaslı olanlara göre ~%50 daha düşüktür.

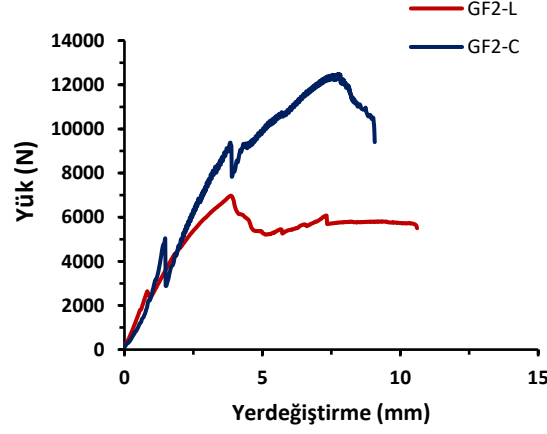


Şekil 4. 14 GF1 ile güçlendirilmiş yığma kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri.

II. bölgede pekleşme rijitlikleri (K_2), her iki harç için birbirine oldukça yakın olmuştur. Ancak; GF1-C numunelerinde, hem ulaşılan maksimum yük seviyesi hem de maks.yüke karşılık gelen yerdeğiştirme seviyesinin yüksek oluşu nedeniyle, yutulan enerji miktarı GF1-L numunelerden %50 daha yüksektir. Kireç esaslı güçlendirmelerin maks. yük sonrası dayanımlarını uzun süre koruması, enerji kapasitelerinde artışa neden olmuştur; yutulan enerji miktarı, GF1-C ve GF1-L için aynı seviyelerdedir.

4.5.3 GF2 ile Güçlendirilmiş Yığma Kirişler

GF2 takviyeli yığma kirişlerin yük-yerdeğiştirme grafiklerinde (Şekil 4.15); I. bölgede her iki harç tipi için başlangıç rijitlikleri (K_1) benzer olmasına rağmen, GF2-C numuneleri daha yüksek ilk çatlak dayanımına sahiptir. İlk çatlağın oluştuğu yerdeğiştirme seviyesi ise, GF2-C numunelerinde GF2-L'ye göre ~% 80 daha fazladır.



Şekil 4.15 GF2 ile güçlendirilmiş yığma kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri.

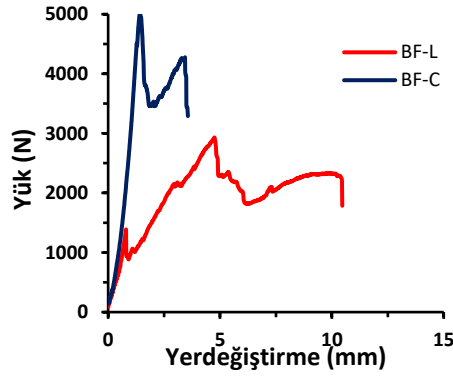
II. bölgede GF2-L ve GF2-C numunelerinde pekleşme rijitlikleri çok yakındır. Buna bağlı olarak I. bölgedeki yük ve yerdeğiştirme seviyelerindeki oran bu bölgede de korunarak, GF2-C'nin maksimum yük ve yerdeğiştirmesi GF2-L'nin ~2 katı olmuştur. Maksimum yüke kadar yutulan enerji miktarları arasındaki oran ise 3.7 olarak gerçekleşmiştir.

Maksimum yük sonrasında çimento esaslı harç ile güçlendirilmelerde dayanım kaybı, kireç esaslı harç ile güçlendirmelere göre daha sert olmuştur. GF2-L numunelerinin yük-yerdeğiştirme eğrileri maksimum yüke ulaştıktan sonra yataya yakın, daha fazla yerdeğiştirme yaparak test sonunda kadar enerji tüketmeye devam etmiştir. GF2-L numunelerinin bu bölgedeki sünek davranışı sonucunda GF2-C ile arasındaki enerji yutma kapasitesi oranı azalarak 1.4 olmuştur.

4.5.4 BF ile Güçlendirilmiş Yığma Kirişler

BF takviyeli yığma kirişlerin yük-yerdeğiştirme grafiklerinde (Şekil 4.16), kupon testlerinde gözlenen ani dayanım azalması yığma kirişlerde de gözlenmektedir. BF-L numunelerinde maksimum yük değerleri BF-C'den daha düşük olmasına karşılık yerdeğiştirme değerlerinin yüksek olması nedeniyle 2.8 kat fazla enerji tüketmiştir.

Çimento esaslı kompozitlerdeki daha fazla rijitlik artışı nedeniyle, dayanım kayıpları kireç esaslılara kıyasla daha hızlı ve ani olmuştur. BF-L ile güçlendirilmiş kirişler, düşük yük seviyesine rağmen, şekildeğiştirme kapasitesinin büyük olması sayesinde; BF-C ile güçlendirilmiş kirişlere göre iki kat daha fazla enerji yutmuştur.

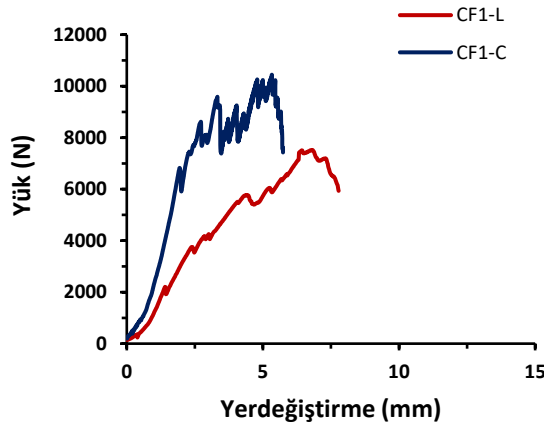


Şekil 4. 16 BF ile güçlendirilmiş yığma kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri.

4.5.5 CF1 ile Güçlendirilmiş Yığma Kirişler

CF1 takviyeli TRM ile güçlendirilmiş yığma kirişlerin eğilme testlerinde (Şekil 4.17), I. bölgede CF1-L ve CF1-C numunelerinde ilk çatlağın oluştuğu yerdeğiştirmeler benzer iken, yük değerleri arasında önemli fark bulunmaktadır. Bu farka bağlı olarak K_1 başlangıç rijitliklerinin oranı 2.34 olarak gerçekleşmiştir.

Kireç esaslı harçlarla güçlendirilmiş kirişler, çimento esaslılara göre daha sünek davranış göstermiştir, maksimum yük sonrası dayanım kaybı daha yavaştır. Maksimum yerdeğiştirme, CF1-L numunelerinde CF1-C'ye göre %36 daha fazla olmuştur. Toplam yutulan enerji miktarı bakımından, daha geride olan CF1-L kirişleri daha sünek davranış göstererek test sonuna kadar aradaki farkı kapatmıştır.

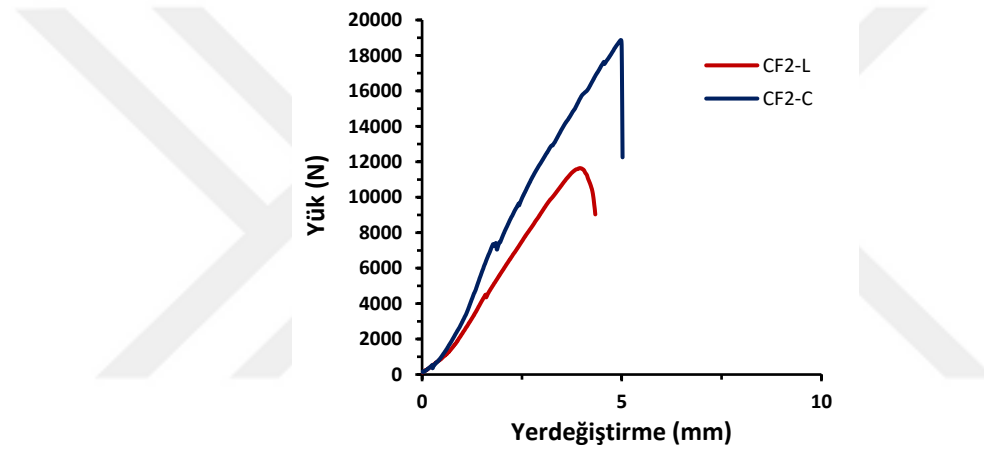


Şekil 4. 17 CF1 ile güçlendirilmiş yığma kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri.

4.5.6 CF2 ile Güçlendirilmiş Yığma Kirişler

CF2 takviyeli TRM ile güçlendirilmiş yığma kirişlerin yük-yerdeğiştirme grafiklerinde (Şekil 4.18), takviyenin getirdiği yüksek başlangıç rijitliği her iki harç tipinde de gözlenmiştir. Δ_{cr} değerleri özellikle CF2-L numunelerinde çok belirsiz olmakla birlikte 1.59 mm olarak tespit edilmiştir, CF2-C 'de bu değer 1.84 mm olmuştur.

Maks.yük seviyesi bakımından CF2-C, CF2-L'ye göre %40 daha fazla eğilme dayanımı ve %20 daha fazla yerdeğiştirmeye ulaşmıştır, maksimum yüke kadar yuttuğu enerji, CF2-L'nin iki katıdır. P_u sonrasında CF2-C numunelerinin şekildeğiştirme kabiliyeti neredeyse tamamen bitmiş ve ani göçme oluşmuştur, toplam enerji miktarına III. bölgenin katkısı yok denecek kadar azdır.













Şekil 4. 18 CF2 ile güçlendirilmiş yığma kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri.

4.5.7 Kırılma Modları

TRM ile güçlendirilmiş yığma kirişlerde gerçekleştirilen eğilme testleri sonucunda numunelerde gözlemlenen kırılma modları belirlenirken; TRM ile güçlendirme kısmı, güçlendirme-tuğla yüzey arayüzeyi, yığma kirişi oluşturan ana tuğla birimi olmak üzere üç odak noktasındaki hasara yoğunlaşmıştır. Deneylerde belirlenen kırılma modları şu şekilde sıralanabilir: harç ve tekstilin ayrışması, güçlendirme yüzeyinde çizgisel çatlaklar, tekstilin kopması, basınç kırılması+diyagonal çatlak, basınç ezilmesi, diyagonal kesme çatlağı, yığma biriminde kırılma, tuğla yüzeyinden ayrılma (Tablo 4.2). Güçlendirilmiş numunelerde bu hasar tiplerinden bir ya da birkaçı gözlenmiştir.

Tablo 4. 2 Yığma kiriş eğilme numunelerinde gözlemlenen kırılma modları.

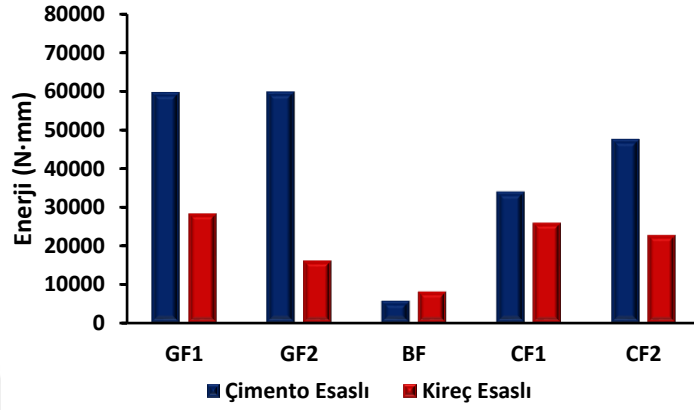
TRM	Yığma Kiriş Test Sonrası Görünüm	Gözlemlenen Hasarlar
GF1-L		<ul style="list-style-type: none">➤ Harç ve tekstilin ayrışması➤ Basınç ezilmesi
GF1-C		<ul style="list-style-type: none">➤ Basınç kırılması + diyagonal çatlak➤ Harç ve tekstilin ayrışması➤ Yığma biriminde kırılma
GF2-L		<ul style="list-style-type: none">➤ Tuğla yüzeyden ayrılma➤ Güçlendirme yüzeyinde çizgisel çatlaklar➤ Basınç kırılması + diyagonal çatlak
GF2-C		<ul style="list-style-type: none">➤ Tekstilde kopma➤ Harç ve tekstilin ayrışması
BF-L		<ul style="list-style-type: none">➤ Tekstilin kopması (Teleskopik)

TRM	Yığma Kiriş Test Sonrası Görünüm	Gözlemlenen Hasarlar
BF-C		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tekstilin kopması (Teleskopik) ➤ Yığma biriminde kırılma + diyagonal çatlak
CF1-L		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Harç ve tekstilin ayrışması ➤ Tuğla yüzeyden ayrılma ➤ Yığma biriminde kırılma + diyagonal çatlak
CF1-C		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Harç ve tekstilin ayrışması ➤ Yığma biriminde kırılma + diyagonal çatlak
CF2-L		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Diyagonal kesme çatlağı ➤ Yığma biriminde kırılma
CF2-C		<ul style="list-style-type: none"> ➤ Diyagonal kesme çatlağı ➤ Yığma biriminde kırılma

4.5.8 Enerji Kapasiteleri

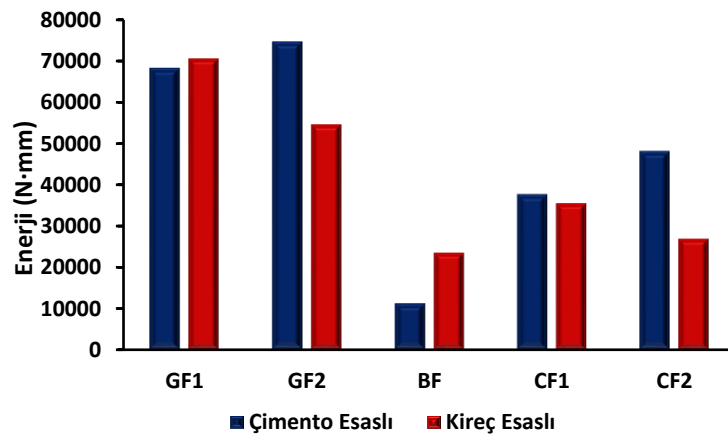
TRM ile güçlendirilmiş yığma kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrilerinin altında kalan alanlar hesaplanarak, numunelerin yuttuğu enerji miktarları belirlenmiştir. Maksimum yük (P_u) düzeyine kadar yutulan enerji miktarı (E_p), tüm tekstil takviyelerinin hidrolik kireç ve çimento esaslı harçlar ile kombinasyonları için Şekil 4.19'da verilmiştir.

o Yüksek bağlayıcılık özelliği nedeniyle, çimento esaslı harç ile güçlendirilmiş numuneler daha fazla enerji tüketmektedir. BF ile güçlendirme, her iki harç tipi için en düşük seviyededir. P_u 'ya kadar en fazla enerji tüketimi GF1-C, GF2-C olup, CF2-C, CF1-C serileri takip etmektedir. Kireçli serilerde sıralama GF1-L, CF1-L ve CF2-L şeklindedir.



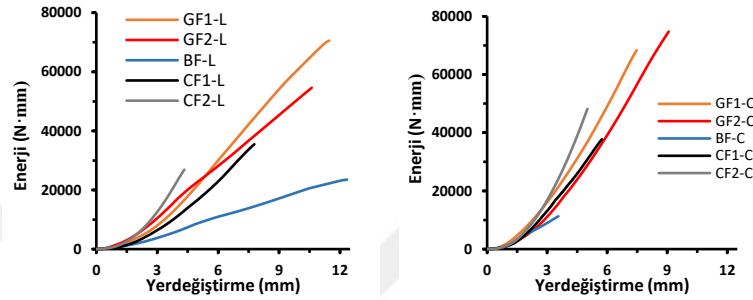
Şekil 4. 19 Güçlendirilmiş yığma kirişlerde maksimum yüke kadar yutulan enerji miktarı.

o Test sonuna kadar yutulan enerji miktarları (E_u) açısından (Şekil 4.20), P_u sonrası enerji tüketme kapasitesinde en büyük değişim kireç esaslı harçlarda görülmüştür. Şekil 4.19'da E_{maks} düzeyleri arasındaki fark, P_u sonrası kireç esaslı harcın kullanıldığı numunelerin daha sünek davranışı nedeniyle azalmıştır. Ayrıca, GF1-L numunelerinin test sonuna kadar yuttuğu enerji miktarı GF1-C'e göre daha fazladır. GF1 ve GF2 takviyeli kirişler, hem kireç esaslı hem de çimento esaslı harçlarda en yüksek enerji kapasitesine ulaşmıştır; onları karbon esaslı tekstiller takip ederken, BF tekstilleri için her iki harç türünde de en düşük performansa sahiptir.



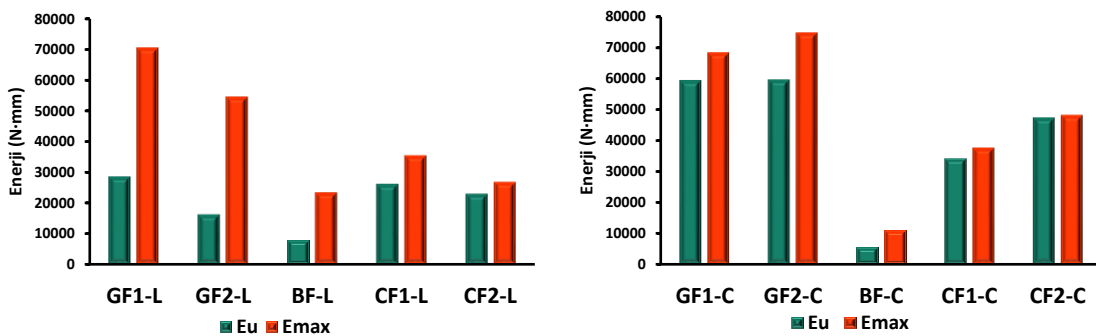
Şekil 4. 20 TRM ile güçlendirilmiş yığma kirişlerde toplam yutulan enerji miktarı.

o Güçlendirilmiş yığma kirişlerde, artan yerdeğiştirmeye bağlı olarak toplam yutulan enerjinin kümülatif değişimi Şekil 4.21’de verilmiştir, böylece güçlendirme sistemleri aynı yerdeğiştirmeye karşı gelen enerji yutma miktarı bakımından karşılaştırılabilir. Buradan, yığma eleman tasarım kurallarına uygun bir yerdeğiştirme/şekildeğiştirme düzeyi belirlendikten sonra, buna en uygun matris ve güçlendirme tekstili seçilebilir. Güçlendirme sistemlerinin hedef enerji seviyesine ne kadar yerdeğiştirme yaparak ulaştığı parametresi performans karşılaştırma kriteri olarak tercih edilebilir.



Şekil 4. 21 Güçlendirilmiş yığma kirişlerde kümülatif enerji grafikleri.

TRM ile güçlendirilmiş yığma kirişlerin, eğilme testlerinde maksimum yük ve test sonuna kadar tükettikleri maksimum enerji dağılımları Şekil 4.22’de verilmiştir. Bu iki kritik noktadaki fark, güçlendirmenin etkinliği ile ilgili bilgi vermektedir. Çimento esaslı numuneler, P_u sonrası sınırlı yerdeğiştirme yapmış ve enerji kapasitesindeki artış kireç esaslılara kıyasla sınırlı kalmıştır. Diğer taraftan, CF tekstillerinde P_u sonrası şekildeğiştirme yeteneğinin diğer tekstillere göre daha az olduğu görülmektedir. GF tekstillerinde ise özellikle kireç esaslı harç kullanımında P_u sonrası şekildeğiştirme yeteneğine bağlı olarak yutulan enerji miktarında önemli artış mevcuttur.



Şekil 4. 22 Güçlendirilmiş yığma kirişlerde E_u , E_{maks} dağılımı.

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Yaygın epoksi kaplamaların aksine, yaşlandırma sırasında şekildeğiştirme kapasitesinde bir miktar azalma olmasına rağmen; uygun kalınlıkta SBR kaplama, AR-cam ve karbon lifli TRM kompozitlerde enerji sönümlenme ve dayanıklılık performansını artırma açısından umut vericidir.
- AR-cam lifli kompozitlerde, kaplama miktarının fazla olduğu kompozitin performansının daha az kaplama içerene göre daha düşük olması dikkat çekicidir. Yaşlandırma sonrası kaplama oranı fazla olan kompozitlerde hem yük hem de şekildeğiştirme açısından azalmalar daha belirgindir.
- Kaplanmamış hidrofilik bazalt liflerin kullanılması durumunda; bu çalışmada gözlemlendiği üzere, CH kaynaklı korozyon/kabuklanmanın neden olduğu teleskopik göçme modu söz konusudur. Bu nedenle bazalt liflerin kaplamasız kullanımı uygun değildir.
- Silis dumanı, karbon lifler için umut verici olsa da, yaşlandırma dikkate alınarak kompozitin dayanıklılık performansı şimdiye kadar araştırılmamıştır. Bu çalışmada; SBR+SF kaplama ile matris arasındaki güçlü bağın, nemli ve sıcak hava koşullarında aşırı bağlanma yoluyla sünek davranışı gevrekleşmeye çevirebileceği görülmüştür.
- Çimentolu kompozitler daha büyük yük taşıma kapasitelerine ulaşırken, kireç esaslı kompozitler şekildeğiştirme kapasitesi açısından daha iyi sonuç vermiştir. Bu durum yığılma kırılganlık numuneleri için de geçerlidir.
- Benzer göz açıklıklarına sahip, her ikisi de SBR ile kaplanmış olan GF2 ve CF1 tekstilleri NHL esaslı harç içinde yakın performans gösterirken, çimento esaslı harçta karbon lifli tekstilin hem şekildeğiştirme hem de yük seviyesi bakımından öne geçtiği görülmektedir. Bu durum “güçlü harç-güçlü tekstil” ya da “zayıf harç-zayıf tekstil” sonucunu desteklemektedir.

- Kupon testlerinde sadece CF2 takviyesinde gözlemlenen diyagonal kesme çatlakları, yığma kiriş testlerinde diğer tekstil türlerinde görülmüştür. Her iki deneysel çalışmada numuneler eğilmeye çalışacak şekilde tasarlanmış olsa da, kupon numunelerde “*mesnet açıklığı/numune kalınlığı*” oranı daha büyük olduğundan eğilme davranışı kesmeye göre daha baskındır. Ayrıca bu durumun oluşmasında, üç noktalı eğilme testi düzeneğinde açıklık ortasında maksimum moment ve kesme kuvvetinin birlikte bulunması etkili olmuştur. Bu etkiden kaçınmak için dört noktalı eğilme testleri tercih edilebilir, ancak bu durumda açıklık ortası ve çevresinde kesme kuvvetinin sıfır olacağı dikkate alınmalıdır.
- Mevcut kumaş ve harç türü çeşitliliği, hedeflenen amaca uygun tasarım yapılmasına imkan verir. Ancak çeşitliliğe karşılık araştırmalardaki eksiklikler, uzun süreli saha performansı ve dayanıklılık konularına henüz tam cevap vermekten uzaktır.
- Göçme modunu sünekten gevrek hale getirebilecek dayanıklılık konusu, literatürde düzlem dışı eğilme deneylerinde dikkate alınmamaktadır, araştırmaya çok açık bir konudur, standart test ve ölçüm metodolojilerinin geliştirilmesi gereklidir.
- Eğilme testi; ayrı ayrı uygulanan tek/çift bindirmeli aderans testi ve eksenel çekme testi yerine, pratik olarak tek adımda hem tekstil-matris arasındaki aderansı, hem de eğilme altında çekme kapasitesinin belirlenmesini sağlar. Böylece, en uygun performansı gösteren kompozit bileşimi detaylı yığma duvar deneylerine tabi tutulabilir.
- Bu çalışmadan hareketle, düzlem dışı davranış ile basitçe benzeşim kurmak için eğilme testinin doğrudan TRM plaka numuneleri üzerinde kullanılması önerilir. Bu küçük ölçekli test ile, dış ortam koşullarına dayanıklılık pratik olarak belirlenebilir. Böylece maliyetli, zaman alan duvar tesleri yerine göçme mekanizması ekonomik ve pratik olarak tahmin edilebilir.

- [1] A. Coburn and R. Spence, *Earthquakes, Disasters and Protection*. 2006.
- [2] C. G. Papanicolaou, T. C. Triantafillou, M. Papathanasiou, and K. Karlos, “Textile reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: Out-of-plane cyclic loading,” *RILEM Mater. Struct.*, vol. 41, no. 1, pp. 143–157, 2008.
- [3] G. de Felice, “Pros and cons of mortar-based composites for strengthening historic structures,” *Struct. Anal. Hist. Constr. Anamn. Diagnosis, Ther. Control.*, pp. 309–314, 2016.
- [4] L. A. S. Kouris and T. C. Triantafillou, “State-of-the-art on strengthening of masonry structures with textile reinforced mortar (TRM),” *Constr. Build. Mater.*, vol. 188, pp. 1221–1233, 2018.
- [5] Maison Lambot B&B Provence, URL: <https://www.maisonlambot.com/en/joseph-louis-lambot> (Erişim zamanı; 07, 21, 2022).
- [6] Omrania, URL: <https://omrania.com/inspiration/pier-luigi-nervi-marriage-architecture-engineering> (Erişim zamanı; 07, 21, 2022).
- [7] Alibaba.com, URL: https://www.alibaba.com/product-detail/Rebar-Glass-Fiber-High-Strength-Pultruded_1600514857933.html?spm=a2700.7724857.0.0.5532d860Fgy5oO (Erişim zamanı; 07, 21, 2022).
- [8] Alibaba.com, URL: https://www.alibaba.com/product-detail/High-Property-Gfrp-bar-Rod-Strip_62540510517.html?spm=a2700.7724857.0.0.5cc72ed1kg6WLS (Erişim zamanı; 07, 21, 2022).
- [9] Horse Construction, URL: <https://www.horseen.com/carbon-fiber-strengthening-system/unidirectional-CFRP-wrap/600g-unidirectional-carbon-fiber-sheet> (Erişim zamanı; 07, 21, 2022).
- [10] A. Brückner, R. Ortlepp, and M. Curbach, “Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear,” *RILEM Mater. Struct.*, vol. 39, no. 292, pp. 741–748, 2006.
- [11] A. Peled, Mobasher Barzin, and A. Bentur, *Textile Reinforced Concrete*, vol. 53, no. 9. 2019.
- [12] S. M. Raoof and D. A. Bournas, “TRM versus FRP in flexural strengthening of RC beams: Behaviour at high temperatures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 154, 2017.
- [13] L. Ascione, G. De Felice, and S. De Santis, “A qualification method for externally bonded Fibre Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) strengthening systems,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 78, pp. 497–506, 2015.
- [14] S. Liu, D. Zhu, Y. Yao, and C. Shi, “Effects of Strain Rate and Temperature on the Flexural Behavior of Basalt and Glass Textile-Reinforced Concrete,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 30, no. 8, p. 04018172, 2018.

- [15] G. P. Lignola, C. (Corina) Papanicolaou, F. Ceroni, C. Caggegi, and P. B. Lourenço, “Performance assessment of basalt FRCM for retrofit applications on masonry,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 128, pp. 1–18, 2017.
- [16] J. Donnini and V. Corinaldesi, “Mechanical characterization of different FRCM systems for structural reinforcement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 145, pp. 565–575, 2017.
- [17] A. Bilotta, F. Ceroni, E. Nigro, and M. Pecce, “Experimental tests on FRCM strengthening systems for tuff masonry elements,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 138, pp. 114–133, 2017.
- [18] K. Al Lami, T. D’Antino, and P. Colombi, “Durability of Fabric - Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composites : A Review,” *Appl. Sci.*, no. March, 2020.
- [19] D. Arboleda, F. G. Carozzi, A. Nanni, and C. Poggi, “Testing procedures for the uniaxial tensile characterization of fabric-reinforced cementitious matrix composites,” *J. Compos. Constr.*, vol. 20, no. 3, pp. 1–11, 2016.
- [20] A. Dalalbashi, B. Ghiassi, D. V. Oliveira, and A. Freitas, “Fiber-to-mortar bond behavior in TRM composites: Effect of embedded length and fiber configuration,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 152, no. March, pp. 43–57, 2018.
- [21] T. Triantafyllou, “Strengthening of existing concrete structures: Concepts and structural behavior,” in *Textile fibre composites in civil engineering*, Elsevier, 2016, pp. 303–322.
- [22] B. Mobasher, “Textile fiber composites: Testing and mechanical behavior,” in *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*, Elsevier, 2016, pp. 101–150.
- [23] ICC, “434 Acceptance Criteria for Masonry and Concrete Strengthening Using Fiber-reinforced Cementitious Matrix (FRCM),” *ICC*, no. July, 2011.
- [24] RILEM, “Recommendation of RILEM TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete,” *RILEM Mater. Struct.*, vol. 49, no. 12, pp. 4923–4927, 2016.
- [25] S. De Santis *et al.*, “Round Robin Test on tensile and bond behaviour of Steel Reinforced Grout systems,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 127, pp. 100–120, 2017.
- [26] C. Caggegi *et al.*, “Experimental analysis on tensile and bond properties of PBO and aramid fabric reinforced cementitious matrix for strengthening masonry structures,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 127, pp. 175–195, 2017.
- [27] M. Leone *et al.*, “Glass fabric reinforced cementitious matrix: Tensile properties and bond performance on masonry substrate,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 127, pp. 196–214, 2017.
- [28] F. G. Carozzi *et al.*, “Experimental investigation of tensile and bond properties of Carbon-FRCM composites for strengthening masonry elements,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 128, pp. 100–119, 2017.
- [29] G. de Felice *et al.*, “Experimental characterization of composite-to-brick masonry shear bond,” *RILEM Mater. Struct.*, vol. 49, no. 7, pp. 2581–2596, 2016.
- [30] S. De Santis and G. De Felice, “Tensile behaviour of mortar-based composites for

- externally bonded reinforcement systems,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 68, pp. 401–413, 2015.
- [31] S. De Santis, F. G. Carozzi, G. de Felice, and C. Poggi, “Test methods for Textile Reinforced Mortar systems,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 127, pp. 121–132, 2017.
- [32] A. Bellini, M. Bovo, and C. Mazzotti, “Experimental and numerical evaluation of fiber-matrix interface behaviour of different FRCM systems,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 161, no. November 2018, pp. 411–426, 2019.
- [33] S. De Santis, H. A. Hadad, F. De Caso y Basalo, G. de Felice, and A. Nanni, “Acceptance Criteria for Tensile Characterization of Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Systems for Concrete and Masonry Repair,” *J. Compos. Constr.*, vol. 22, no. 6, p. 04018048, 2018.
- [34] D. A. S. Rambo, F. de Andrade Silva, R. D. Toledo Filho, and O. da Fonseca Martins Gomes, “Effect of elevated temperatures on the mechanical behavior of basalt textile reinforced refractory concrete,” *Mater. Des.*, vol. 65, pp. 24–33, 2015.
- [35] A. Peled, A. Bentur, and D. Yankelevsky, “Woven fabric reinforcement of cement matrix,” *Adv. Cem. Based Mater.*, vol. 1, no. 5, pp. 216–223, 1994.
- [36] A. Peled, “Pre-tensioning of fabrics in cement-based composites,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 5, pp. 805–813, 2007.
- [37] S. Yin, S. Xu, and H. Li, “Improved mechanical properties of textile reinforced concrete thin plate,” *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.*, vol. 28, no. 1, pp. 92–98, 2013.
- [38] N. Williams Portal, L. Nyholm Thrane, and K. Lundgren, “Flexural behaviour of textile reinforced concrete composites: experimental and numerical evaluation,” *RILEM Mater. Struct.*, vol. 50, no. 1, 2017.
- [39] H. Le Chi, L. Van Su, V. Kovacic, and T. Bakalova, “Composite Performance Evaluation of Basalt Textile-Reinforced Geopolymer Mortar,” no. July, 2019.
- [40] R. Kamani, M. Kamali Dolatabadi, and A. A. A. Jeddi, “Flexural design of textile-reinforced concrete (TRC) using warp-knitted fabric with improving fiber performance index (FPI),” *J. Text. Inst.*, vol. 109, no. 4, pp. 492–500, 2018.
- [41] M. E. Gunes, B. Y. Pekmezci, and Z. C. Girgin, “Durability of natural hydraulic lime (NHL) based TRM composites through hot water immersion method,” *RILEM Mater. Struct.*, vol. 54, no. 1, 2021.
- [42] E. Grande, M. Imbimbo, and E. Sacco, “Numerical investigation on the bond behavior of FRCM strengthening systems,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 145, no. October 2017, pp. 240–251, 2018.
- [43] A. D’Ambrisi, L. Feo, and F. Focacci, “Experimental and analytical investigation on bond between Carbon-FRCM materials and masonry,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 46, pp. 15–20, 2013.
- [44] G. De Felice *et al.*, “Mortar-Based Systems for Externally,” pp. 1–22.
- [45] F. G. Carozzi and C. Poggi, “Mechanical properties and bonding strength of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for masonry strengthening,”

- Compos. Part B Eng.*, vol. 70, pp. 215–230, 2015.
- [46] A. Bellini, A. Incerti, and C. Mazzotti, “Out-of-plane strengthening of masonry walls with FRCM composite materials,” *Key Eng. Mater.*, vol. 747 KEM, no. Dic, pp. 158–165, 2017.
- [47] R. S. Olivito, R. Codispoti, and O. A. Cevallos, “Bond behavior of Flax-FRCM and PBO-FRCM composites applied on clay bricks: Experimental and theoretical study,” *Compos. Struct.*, vol. 146, pp. 221–231, 2016.
- [48] B. Ghiassi, D. V. Oliveira, V. Marques, E. Soares, and H. Maljaee, “Multi-level characterization of steel reinforced mortars for strengthening of masonry structures,” *Mater. Des.*, vol. 110, pp. 903–913, 2016.
- [49] A. Razavizadeh, B. Ghiassi, and D. V. Oliveira, “Bond behavior of SRG-strengthened masonry units: Testing and numerical modeling,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 64, pp. 387–397, 2014.
- [50] M. Malena and G. de Felice, “Debonding of composites on a curved masonry substrate: Experimental results and analytical formulation,” *Compos. Struct.*, vol. 112, no. 1, pp. 194–206, 2014.
- [51] M. Zaydan, C. Caggegi, M. Michel, and L. Curtil, “Experimental analysis on tensile and bond properties of basalt-ettringite TRM for strengthening masonry structures,” *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–24, 2021.
- [52] RILEM Technical Committee 250, “TC 250-CSM: Test method for Textile Reinforced Mortar to substrate bond characterization,” *RILEM Mater. Struct.*, vol. 51, no. 4, pp. 1–9, 2018.
- [53] RILEM Technical Committee 250, “Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric Reinforced Mortar (FRM) Systems for Repair and Strengthening Masonry Structures,” 2018.
- [54] T. Gries, M. Raina, T. Quadflieg, and O. Stolyarov, “Manufacturing of Textiles for Civil Engineering Applications,” in *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*, Elsevier Ltd., 2016, pp. 3–24.
- [55] R. Codispoti, D. V. Oliveira, R. S. Olivito, P. B. Lourenço, and R. Figueiro, “Mechanical performance of natural fiber-reinforced composites for the strengthening of masonry,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 77, pp. 74–83, 2015.
- [56] C. Escrig, L. Gil, and E. Bernat-Maso, “Experimental comparison of reinforced concrete beams strengthened against bending with different types of cementitious-matrix composite materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 137, pp. 317–329, 2017.
- [57] B. Istegun and E. Celebi, “Triplet Shear Tests on Retrofitted Brickwork Masonry Walls,” vol. 11, no. 9, pp. 1250–1255, 2017.
- [58] S. B. Abdellahi, S. M. Hejazi, and H. Hasani, “Investigation of flexural behavior of 3D textile reinforced concrete using both experimental tests and finite element method,” *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 20, no. 5, pp. 578–594, 2018.
- [59] E. A. Sasi and A. Peled, “Three dimensional (3D) fabrics as reinforcements for cement-based composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 74, no. April, pp. 153–165, 2015.

- [60] F. Fitzer and M. Heine, "Carbon fibre manufacture and surface treatment," *Elsevier Sci. Publ. B. V., Fiber Reinf. Compos. Mater.*, vol. 2, pp. 73–148, 1988.
- [61] J. Hegger, O. Bruckermann, and S. Voss, "AR-glass and carbon fibers in textile reinforced concrete—simulation and design," *Am. Concr. Institute, ACI Spec. Publ.*, vol. SP-244, pp. 57–76, 2007.
- [62] A. Peled and A. Bentur, "Fabric structure and its reinforcing efficiency in textile reinforced cement composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 34, no. 2, pp. 107–118, 2003.
- [63] A. Peled, Z. Cohen, Y. Pasder, A. Roye, and T. Gries, "Influences of textile characteristics on the tensile properties of warp knitted cement based composites," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, no. 3, pp. 174–183, 2008.
- [64] J. Hegger, D. M. Zell, and D. S. Voss, "Dimensioning of TRC structures," *Grc 2008*, 2008.
- [65] A. Peled and A. Bentur, "Reinforcement of cementitious matrices by warp knitted fabrics," *RILEM Mater. Struct.*, vol. 31, no. 8, pp. 543–550, 1998.
- [66] D. Zhu, A. Peled, and B. Mobasher, "Dynamic tensile testing of fabric-cement composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 1, pp. 385–395, 2011.
- [67] A. Peled, A. Bentur, and D. Yankelevsky, "Flexural Performance of Cementitious Composites Reinforced With Woven Fabrics," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 11, no. November, pp. 1–8, 1999.
- [68] A. Peled and B. Mobasher, "Tensile Behavior of Fabric Cement-Based Composites: Pultruded and Cast," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 19, no. 4, pp. 340–348, 2007.
- [69] F. K. Ko, "Advanced textile structural composites," in *Advanced Topics in Materials Science and Engineering*, Springer, 1993, pp. 117–137.
- [70] B. Mobasher, A. Peled, and J. Pahilajani, "Distributed cracking and stiffness degradation in fabric-cement composites," *RILEM Mater. Struct.*, vol. 39, no. 287, pp. 317–331, 2006.
- [71] I. G. Colombo, A. Magri, G. Zani, M. Colombo, and M. Di Prisco, "Erratum: Textile reinforced concrete: Experimental investigation on design parameters (Materials and Structures (2013))," *RILEM Mater. Struct.*, vol. 46, no. 11, pp. 1953–1971, 2013.
- [72] W. Zhu and P. J. M. Bartos, "Assessment of interfacial microstructure and bond properties in aged GRC using a novel microindentation method," *Cem. Concr. Res.*, vol. 27, no. 11, pp. 1701–1711, 1997.
- [73] B. Banholzer, "Bond behaviour of a multi-filament yarn embedded in a cementitious matrix." Bibliothek der RWTH Aachen, 2004.
- [74] B. Banholzer, T. Brockmann, and W. Brameshuber, "Material and bonding characteristics for dimensioning and modelling of textile reinforced concrete (TRC) elements," *RILEM Mater. Struct.*, vol. 39, no. 292, pp. 749–763, 2006.
- [75] A. Bentur and S. Mindess, "Fibre Reinforced Cementitious Composites," p. 624, 2006.

- [76] W. Brameshuber, "Textile reinforced concrete-state-of-the-art report of RILEM TC 201-TRC," *Reun. Int. des Lab. Expert. des Mater. Syst. Constr. Ouvrages*, 2006.
- [77] Z. Cohen and A. Peled, "Controlled telescopic reinforcement system of fabric-cement composites - Durability concerns," *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 10, pp. 1495–1506, 2010.
- [78] D. Zhu, B. Mobasher, and A. Peled, "Experimental study of dynamic behavior of cement-based composites," *J. Sustain. Cem. Mater.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–12, 2013.
- [79] S. L. Gao, E. Mäder, and R. Plonka, "Coatings for glass fibers in a cementitious matrix," *Acta Mater.*, vol. 52, no. 16, pp. 4745–4755, 2004.
- [80] C. Scheffler *et al.*, "Interphase modification of alkali-resistant glass fibres and carbon fibres for textile reinforced concrete I: Fibre properties and durability," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 69, no. 3–4, pp. 531–538, 2009.
- [81] M. Schleser, *Einsatz polymerimprägnierter, alkaliresistenter Glastextilien zur Bewehrung zementgebundener Matrices*. Shaker, 2008.
- [82] M. Glowania, T. Gries, J. Schoene, M. Schleser, and U. Reisgen, "Innovative coating technology for textile reinforcements of concrete applications," *Key Eng. Mater.*, vol. 466, pp. 167–173, 2011.
- [83] S. Xu, M. Krüger, H.-W. Reinhardt, and J. Özbolt, "Bond characteristics of carbon, alkali resistant glass, and aramid textiles in mortar," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 16, no. 4, pp. 356–364, 2004.
- [84] J. Hegger, N. Will, O. Bruckermann, and S. Voss, "Load-bearing behaviour and simulation of textile reinforced concrete," *RILEM Mater. Struct.*, vol. 39, no. 292, pp. 765–776, 2006.
- [85] U. Koeckritz, C. Cherif, S. Weiland, and M. Curbach, "In-situ polymer coating of open grid warp knitted fabrics for textile reinforced concrete application," *J. Ind. Text.*, vol. 40, no. 2, pp. 157–169, 2010.
- [86] "In-Situ Polymer Coating of Open Grid Warp Knitted Fabrics for Textile Reinforced Concrete Application," vol. 40, no. 2.
- [87] M. Zamir, D. Dvorkin, and A. Peled, "Fabric cement-based composites with nanoparticles filler, interfacial characteristics," in *3rd International RILEM Conference on Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC3)*. Dordrecht Nederland, 2014, pp. 171–178.
- [88] Q. Li and S. Xu, "Experimental research on mechanical performance of hybrid fiber reinforced cementitious composites with polyvinyl alcohol short fiber and carbon textile," *J. Compos. Mater.*, vol. 45, no. 1, pp. 5–28, 2011.
- [89] A. Bentur, R. Tirosh, M. Yardimci, M. Puterman, and A. Peled, "Bonding and microstructure in textile reinforced concrete," in *Textile reinforced concretes. Proceedings of the International RILEM Conference on Materials Science*, 2010, vol. 1, pp. 23–33.
- [90] A. Bentur, M. Y. Yardimci, and R. Tirosh, "Preservation of telescopic bonding upon aging of bundled glass filaments by treatments with nano-particles," *Cem.*

- Concr. Res.*, vol. 47, pp. 69–77, 2013.
- [91] Z. Cohen and A. Peled, “Effect of nanofillers and production methods to control the interfacial characteristics of glass bundles in textile fabric cement-based composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 43, no. 6, pp. 962–972, 2012.
- [92] M. Zamir, R. Sripada, and A. Peled, “Hybrid fillers in carbon-fabric-reinforced cement-based composites,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 98, pp. 113–124, 2019.
- [93] S. L. Gao, E. Mäder, and R. Plonka, “Nanocomposite coatings for healing surface defects of glass fibers and improving interfacial adhesion,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 68, no. 14, pp. 2892–2901, 2008.
- [94] P. Zinck, E. Mäder, and J.-F. Gerard, “Role of silane coupling agent and polymeric film former for tailoring glass fiber sizings from tensile strength measurements,” *J. Mater. Sci.*, vol. 36, no. 21, pp. 5245–5252, 2001.
- [95] G. K. Tyagi, “Yarn structure and properties from different spinning techniques,” *Adv. Yarn Spinn. Technol.*, pp. 119–154, 2010.
- [96] E. Mäder, R. Plonka, M. Schiekkel, and R. Hempel, “Coatings on alkali-resistant glass fibres for the improvement of concrete,” *J. Ind. Text.*, vol. 33, no. 3, pp. 191–207, 2004.
- [97] M. Messori, A. Nobili, C. Signorini, and A. Sola, “Mechanical performance of epoxy coated AR-glass fabric Textile Reinforced Mortar: Influence of coating thickness and formulation,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 149, no. May, pp. 135–143, 2018.
- [98] S. G. Venigalla, A. B. Nabilah, N. A. M. Nasir, N. A. Safiee, and F. N. A. Abd Aziz, “Textile-Reinforced Concrete as a Structural Member: A Review,” *Buildings*, vol. 12, no. 4, 2022.
- [99] A. Peled, E. Zaguri, and G. Marom, “Composites : Part A Bonding characteristics of multifilament polymer yarns and cement matrices,” vol. 39, pp. 930–939, 2008.
- [100] ACI, *549.4R Design and construction of externally bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for repair and strengthening concrete and masonry Structures*. 2013.
- [101] H. Kolsch, “Carbon Fiber Cement Matrix (CFCM) Overlay System for Masonry Strengthening,” *J. Compos. Constr.*, vol. 2, no. 2, pp. 105–109, 1998.
- [102] M. R. Valluzzi, C. Modena, and G. de Felice, “Current practice and open issues in strengthening historical buildings with composites,” *RILEM Mater. Struct.*, vol. 47, no. 12, pp. 1971–1985, 2014.
- [103] F. de A. Silva, M. Butler, V. Mechtcherine, D. Zhu, and B. Mobasher, “Strain rate effect on the tensile behaviour of textile-reinforced concrete under static and dynamic loading,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 528, no. 3, pp. 1727–1734, 2011.
- [104] M. Butler, V. Mechtcherine, and S. Hempel, “Experimental investigations on the durability of fibre-matrix interfaces in textile-reinforced concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 4, pp. 221–231, 2009.
- [105] M. Tsesarsky, A. Katz, A. Peled, and O. Sadot, “Textile reinforced concrete (TRC) shells for strengthening and retrofitting of concrete elements: influence of

- admixtures,” *RILEM Mater. Struct.*, vol. 48, no. 1, pp. 471–484, 2015.
- [106] A. Peled and B. Mobasher, “Pultruded fabric-cement composites,” *ACI Mater. J.*, vol. 102, no. 1, p. 15, 2005.
- [107] M. Hinzen and W. Brameshuber, “Hybrid short fibres in fine grained concrete,” in *ICTRC’2006-1st International RILEM Conference on Textile Reinforced Concrete*, 2006, pp. 35–44.
- [108] R. Barhum and V. Mechtcherine, “Effect of short, dispersed glass and carbon fibres on the behaviour.pdf,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 92, pp. 56–71, 2012.
- [109] V. Mechtcherine, “Durability of Structures Made of or Strengthened Using Textile-Reinforced Concrete,” in *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*, 2016, pp. 151–168.
- [110] L. Key and D. Id, “544.5r-10.”
- [111] C. L. Page and M. M. Page, *Durability of Concrete and Cement Composites*. 2007.
- [112] V. Mechtcherine, “Durability of structures made of or strengthened using textile-reinforced concrete,” in *Textile fibre composites in civil engineering*, Elsevier, 2016, pp. 151–168.
- [113] V. YILMAZ and F. P. Glasser, “Reaction of alkali-resistant glass-fibers with cement. 2. Durability in cement matrices conditioned with silica fume,” 1991.
- [114] C. Scheffler, T. Förster, E. Mäder, G. Heinrich, S. Hempel, and V. Mechtcherine, “Aging of alkali-resistant glass and basalt fibers in alkaline solutions: Evaluation of the failure stress by Weibull distribution function,” *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 355, no. 52–54, pp. 2588–2595, 2009.
- [115] M. Butler, S. Hempel, and V. Mechtcherine, “Zeitliche Entwicklung des Verbundes von AR-Glas-und Kohlenstofffaser-Multifilamentgarnen in zementgebundenen Matrices,” 2009.
- [116] B. Wei, H. Cao, and S. Song, “Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 527, no. 18–19, pp. 4708–4715, 2010.
- [117] J. Branston, S. Das, S. Y. Kenno, and C. Taylor, “Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 124, pp. 878–886, 2016.
- [118] T. Förster, “Einfluss der chemischen Zusammensetzung und der Oberflächenmodifizierung auf die Eigenschaften von Basaltfasern.” 2015.
- [119] V. A. Rybin, A. V. Utkin, and N. I. Baklanova, “Alkali resistance, microstructural and mechanical performance of zirconia-coated basalt fibers,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 53, pp. 1–8, 2013.
- [120] V. M. Karbhari, “Introduction: The use of composites in civil structural applications,” *Durab. Compos. Civ. Struct. Appl.*, pp. 1–10, 2007.
- [121] R. El-Hacha, M. F. Green, and G. R. Wight, “Effect of severe environmental exposures on CFRP wrapped concrete columns,” *J. Compos. Constr.*, vol. 14, no. 1, pp. 83–93, 2010.
- [122] K. A. Soudki and M. F. Green, “Freeze-thaw response of CFRP wrapped

- concrete,” *Concrete International*, vol. 19, no. 8. pp. 64–67, 1997.
- [123] F. Micelli and M. A. Aiello, “Residual tensile strength of dry and impregnated reinforcement fibres after exposure to alkaline environments,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 159, pp. 490–501, 2019.
- [124] P. C. Institute, “Recommended Practice for Glass Fiber Reinforced Concrete Panels,” 2001.
- [125] K. L. Litherland, D. R. Oakley, and B. A. Proctor, “The use of accelerated ageing procedures to predict the long term strength of GRC composites,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 11, no. 3, pp. 455–466, 1981.
- [126] V. Dey and B. Mobasher, “Quantitative characterization of accelerated aging in cement composites using flexural inverse analysis,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 89, pp. 181–191, 2018.
- [127] M. Butler, V. Mechtcherine, and S. Hempel, “Durability of textile reinforced concrete made with AR glass fibre: Effect of the matrix composition,” *RILEM Mater. Struct.*, vol. 43, no. 10, pp. 1351–1368, 2010.
- [128] V. Langlois, B. Fiorio, A. L. Beaucour, R. Cabrillac, and D. Gouvenot, “Experimental study of the mechanical behavior of continuous glass and carbon yarn-reinforced mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 1, pp. 198–210, 2007.
- [129] S. Hempel, M. Butler, and V. Mechtcherine, “Bond behaviour and durability of basalt fibres in cementitious matrices,” in *3rd ICTR International Conference on Textile Reinforced Concrete Brameshuber, W.(ed.) Aachen, Germany*, 2015, pp. 225–233.
- [130] E. Franzoni, C. Gentilini, M. Santandrea, and C. Carloni, “Effects of rising damp and salt crystallization cycles in FRCM-masonry interfacial debonding: Towards an accelerated laboratory test method,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 175, pp. 225–238, 2018.
- [131] G. Giacomini, “Innovative strengthening materials for the post-earthquake reconstruction of L’Aquila masonries,” *Struct. Anal. Hist. Constr. Anamn. Diagnosis, Ther. Control.*, pp. 330–337, 2016.
- [132] A. Benedetti, “In Plane Behaviour of Masonry Walls Reinforced with Mortar Coatings and,” no. July, 2019.
- [133] F. Parisi, I. Iovinella, A. Balsamo, N. Augenti, and A. Prota, “In-plane behaviour of tuff masonry strengthened with inorganic matrix-grid composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 45, no. 1, pp. 1657–1666, 2013.
- [134] G. Marcari, M. Basili, and F. Vestroni, “Experimental investigation of tuff masonry panels reinforced with surface bonded basalt textile-reinforced mortar,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 108, pp. 131–142, 2017.
- [135] M. Shabdin, M. Zargarani, and N. K. A. Attari, “Experimental diagonal tension (shear) test of Un-Reinforced Masonry (URM) walls strengthened with textile reinforced mortar (TRM),” *Constr. Build. Mater.*, vol. 164, pp. 704–715, 2018.
- [136] S. Babaeidarabad, D. Arboleda, G. Loreto, and A. Nanni, “Shear strengthening of un-reinforced concrete masonry walls with fabric-reinforced-cementitious-

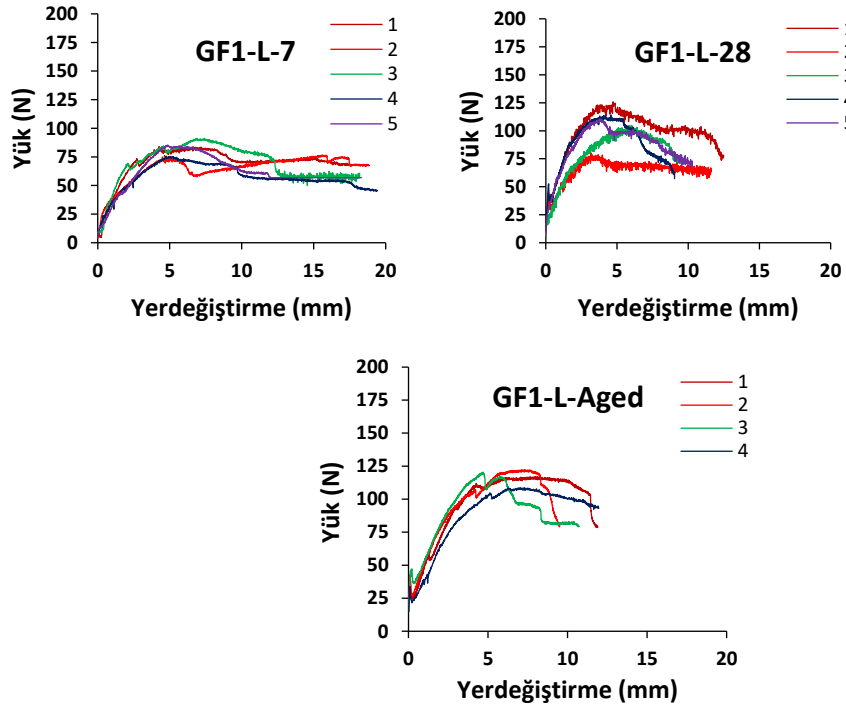
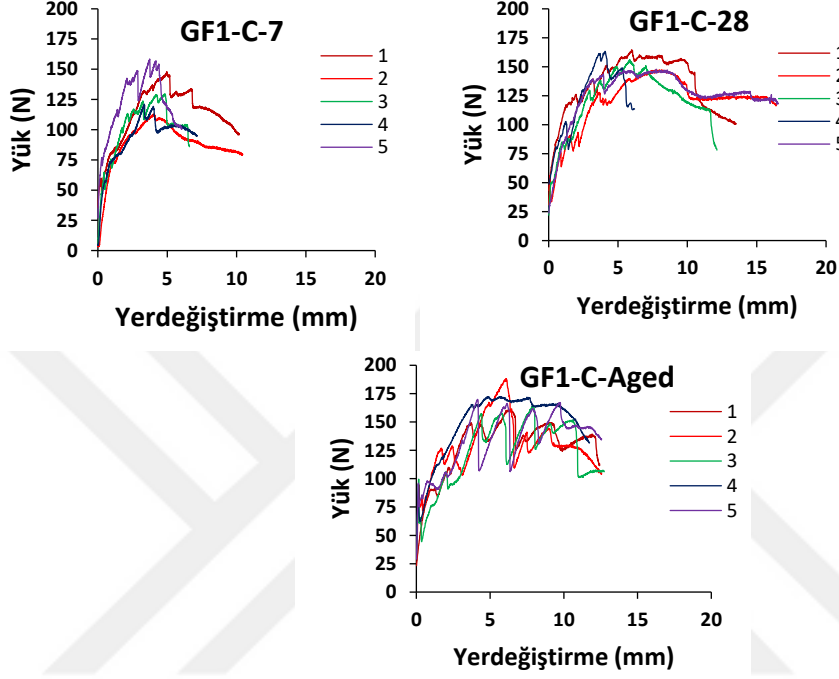
- matrix,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 65, pp. 243–253, 2014.
- [137] T. L. Bui, A. Si Larbi, N. Reboul, and E. Ferrier, “Shear behaviour of masonry walls strengthened by external bonded FRP and TRC,” *Compos. Struct.*, vol. 132, pp. 923–932, 2015.
- [138] P. Agnihotri, V. Singhal, and D. C. Rai, “Effect of in-plane damage on out-of-plane strength of unreinforced masonry walls,” *Eng. Struct.*, vol. 57, pp. 1–11, 2013.
- [139] A. Prota, G. Manfredi, and F. Nardone, “Assessment of Design Formulas for In-Plane FRP Strengthening of Masonry Walls,” *J. Compos. Constr.*, vol. 12, no. 6, pp. 643–649, 2008.
- [140] A. Cascardi, F. Micelli, and M. A. Aiello, “Analytical model based on artificial neural network for masonry shear walls strengthened with FRM systems,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 95, pp. 252–263, 2016.
- [141] N. Augenti, F. Parisi, A. Prota, and G. Manfredi, “In-plane lateral response of a full-scale masonry subassembly with and without an inorganic matrix-grid strengthening system,” *J. Compos. Constr.*, vol. 15, no. 4, pp. 578–590, 2011.
- [142] C. Papanicolaou, T. Triantafillou, and M. Lekka, “Externally bonded grids as strengthening and seismic retrofitting materials of masonry panels,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 2, pp. 504–514, 2011.
- [143] P. Triller, M. Tomažević, M. Lutman, and M. Gams, “Seismic Behavior of Strengthened URM Masonry - An Overview of Research at ZAG,” *Procedia Eng.*, vol. 193, pp. 66–73, 2017.
- [144] S. Babaeidarabad, F. De Caso, and A. Nanni, “URM walls strengthened with fabric-reinforced cementitious matrix composite subjected to diagonal compression,” *J. Compos. Constr.*, vol. 18, no. 2, pp. 1–9, 2014.
- [145] P. E. Mezrea, M. Ispir, I. A. Balci, I. E. Bal, and A. Ilki, “Diagonal tensile tests on historical brick masonry wallets strengthened with fabric reinforced cementitious mortar,” *Structures*, vol. 33, pp. 935–946, 2021.
- [146] C. G. Papanicolaou, T. C. Triantafillou, K. Karlos, and M. Papathanasiou, “Textile-reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: in-plane cyclic loading,” *RILEM Mater. Struct.*, vol. 40, no. 10, pp. 1081–1097, 2007.
- [147] M. Harajli, H. ElKhatib, and J. T. San-Jose, “Static and Cyclic Out-of-Plane Response of Masonry Walls Strengthened Using Textile-Mortar System,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 22, no. 11, pp. 1171–1180, 2010.
- [148] M. R. Valluzzi, F. da Porto, E. Garbin, and M. Panizza, “Out-of-plane behaviour of infill masonry panels strengthened with composite materials,” *RILEM Mater. Struct.*, vol. 47, no. 12, pp. 2131–2145, 2014.
- [149] F. G. Carozzi, P. Colombi, and C. Poggi, “Fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) systems for strengthening of masonry elements subjected to out-of-plane loads,” in *Advanced Composites in Construction*, 2015, pp. 182–188.
- [150] S. Babaeidarabad, F. De Caso, and A. Nanni, “Out-of-Plane Behavior of URM

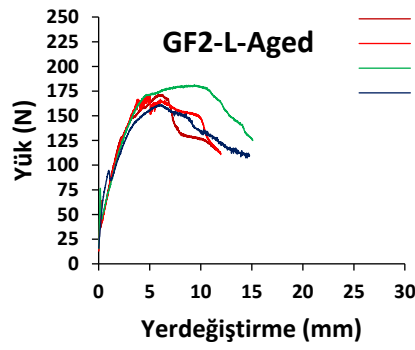
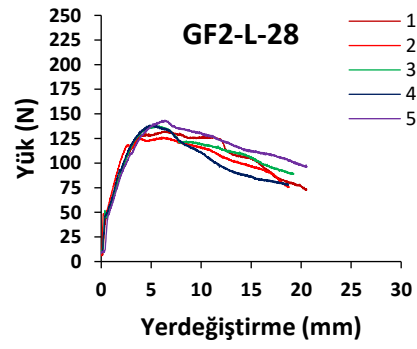
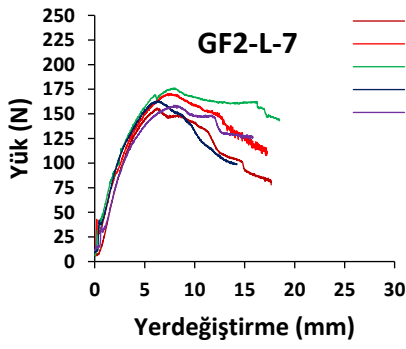
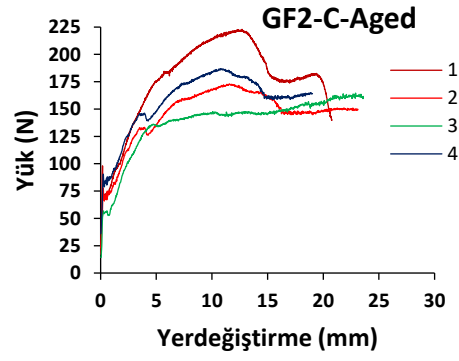
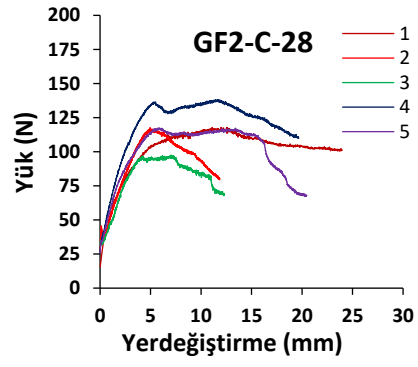
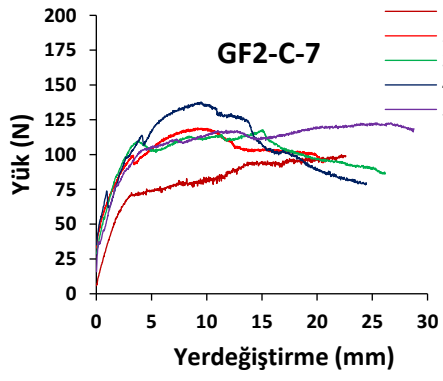
- Walls Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Composite,” *J. Compos. Constr.*, vol. 19, no. October, p. 04015072, 2014.
- [151] S. De Santis *et al.*, “Seismic performance of masonry walls retrofitted with steel reinforced grout,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 45, no. 2, pp. 229–251, 2016.
- [152] A. Borri, G. Castori, and A. Grazini, “Retrofitting of masonry building with reinforced masonry ring-beam,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 5, pp. 1892–1901, 2009.
- [153] R. Sisti, M. Corradi, and A. Borri, “An experimental study on the influence of composite materials used to reinforce masonry ring beams,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 122, pp. 231–241, 2016.
- [154] RILEM, *State-of- the-art report RILEM TC 203-RHM Repair Mortars for Historic Masonry*, no. August 2017. 2016.
- [155] BSEN, “1015-11 Methods of test for mortar for masonry - Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar,” no. May, 1999.
- [156] ASTM, “D6637 - Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Geogrids by the Single or Multi-Rib Tensile Method,” vol. i, pp. 1–6, 2015.
- [157] ASTM, “C947-03 Standard Test Method for Flexural Properties of Thin-Section Glass-Fiber-Reinforced Concrete (Using Simple Beam With Third-Point Loading) 1,” *Concr. Prod.*, vol. 03, no. Reapproved 2016, pp. 5–7, 2017.
- [158] ASTM, “C1560 - Standard Test Method for Hot Water Accelerated Aging of Glass-Fiber Reinforced,” vol. 03, no. Reapproved 2009, pp. 3–4, 2013.
- [159] BSEN, “772-1 Methods of test for masonry units Part 1 : Determination of compressive strength,” *BSI Stand. Publ.*, no. March, 2015.
- [160] BSI, “BS EN 772-3: Methods of test for masonry units Part 3: Determination of net volume and percentage of voids of clay masonry units by hydrostatic weighing,” 1998.
- [161] BSEN, “1052-3 Determination of initial shear strength,” vol. 3, no. 1, 2004.
- [162] ASTM, “E518 - Standard Test Methods for Measurement of Masonry Flexural Bond Strength 1,” no. C, pp. 2–14, 2016.

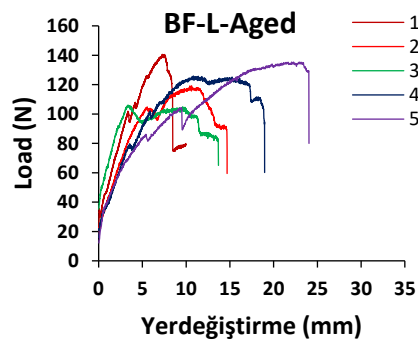
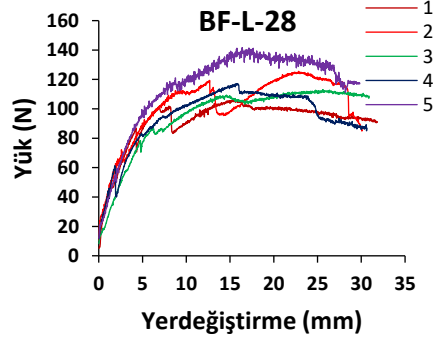
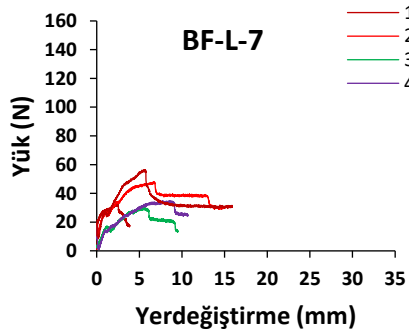
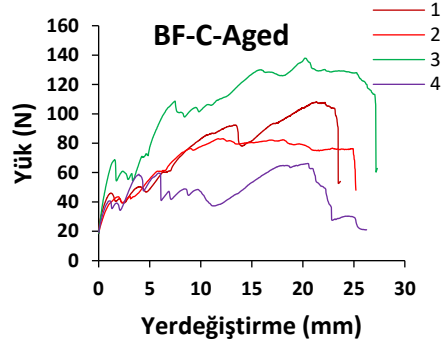
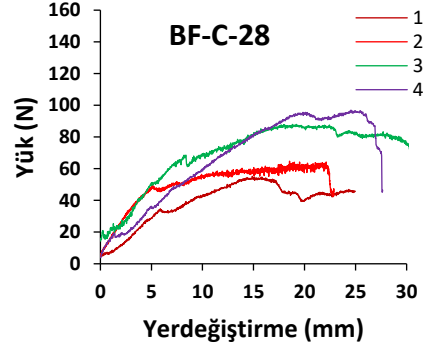
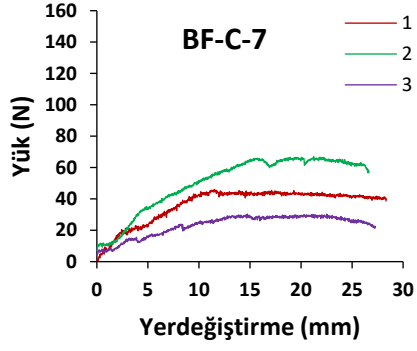
A

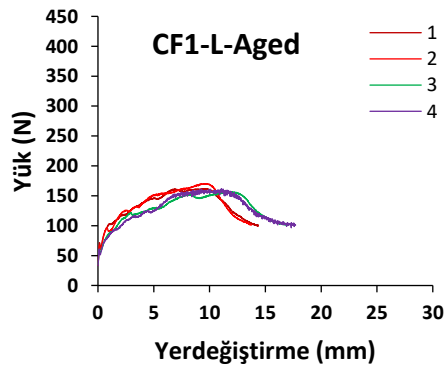
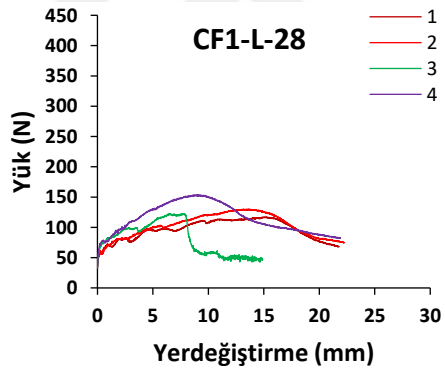
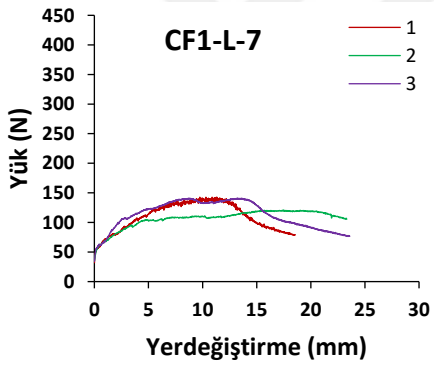
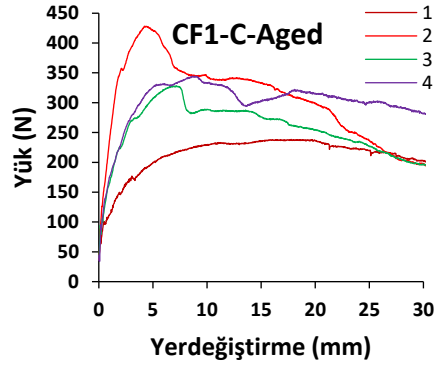
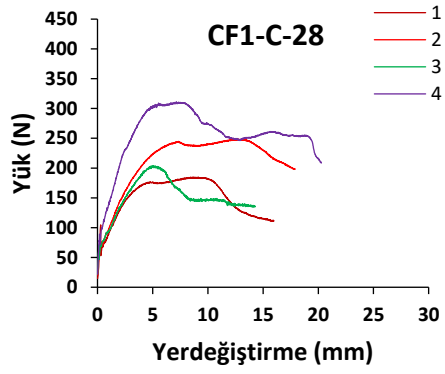
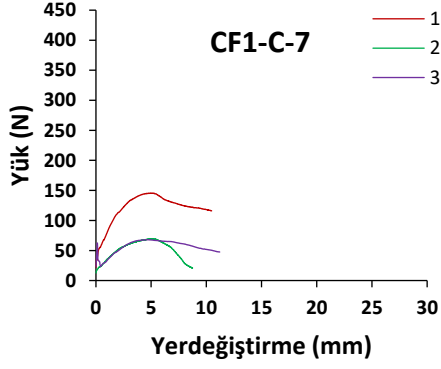
YÜK-YERDEĞİŞTİRME EĞRİLERİ

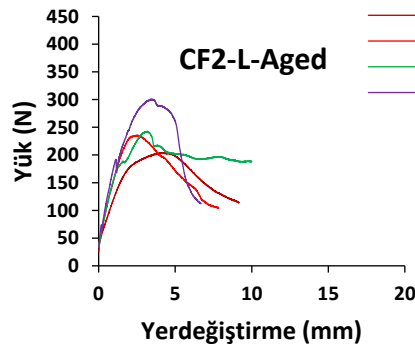
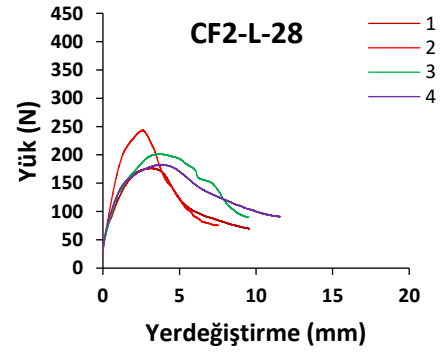
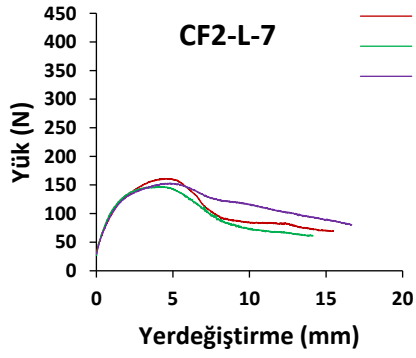
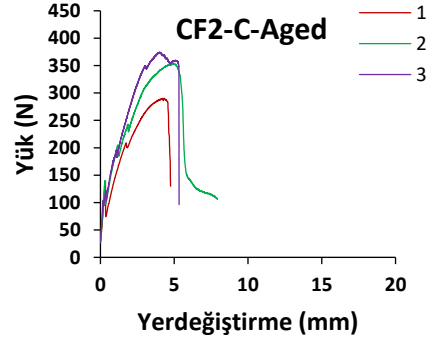
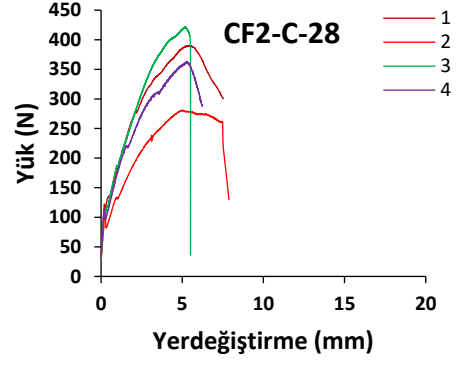
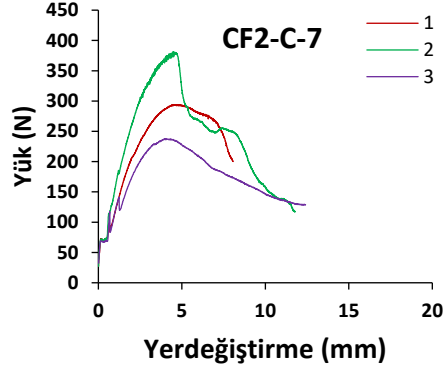
Tablo A. 1 Kupon eğilme serilerinde tüm numunelerin yük-yerdeğiştirme eğrileri



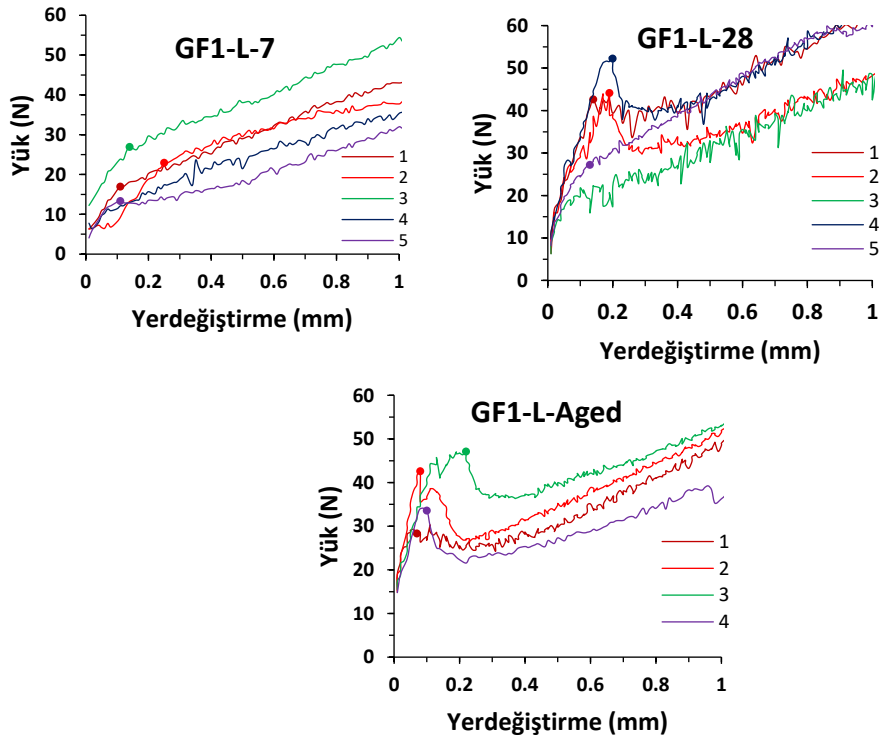
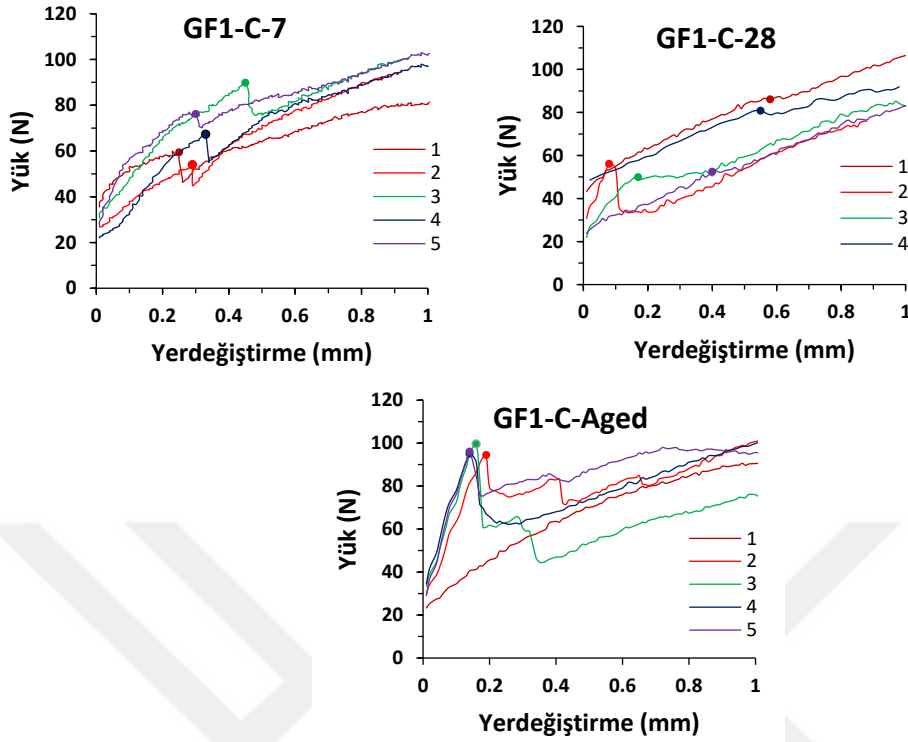


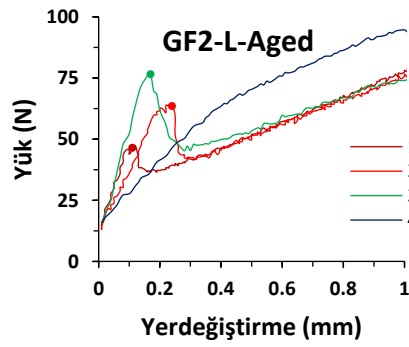
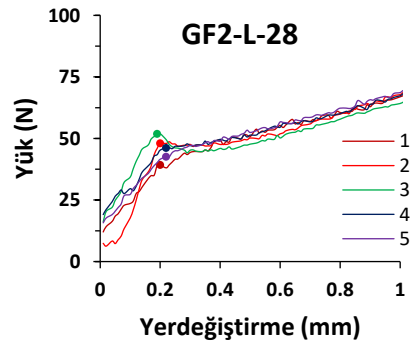
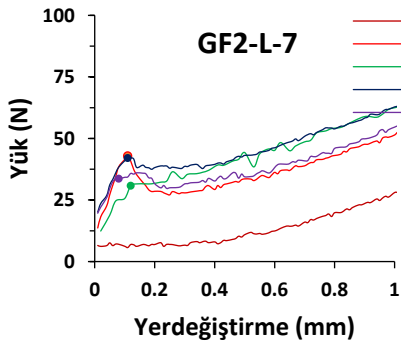
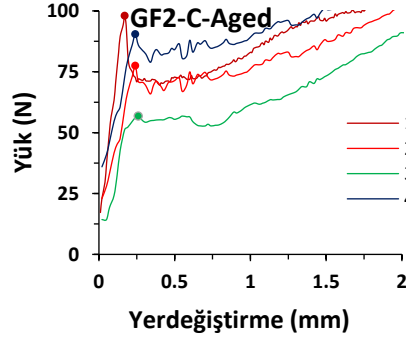
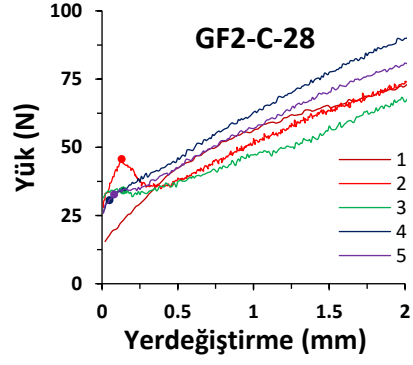
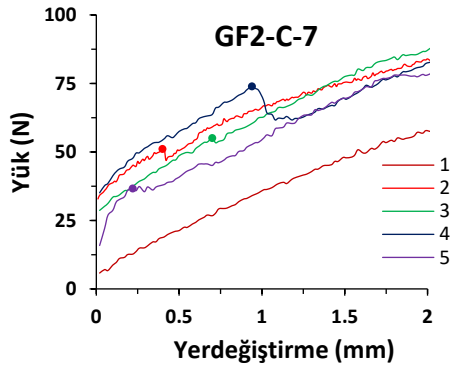


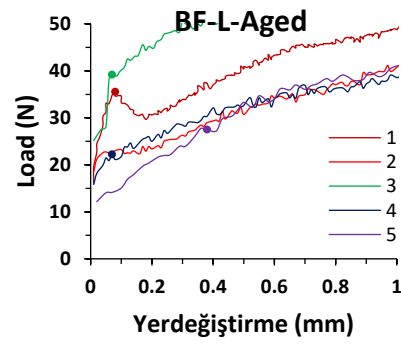
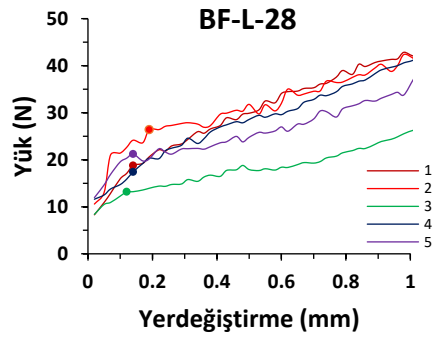
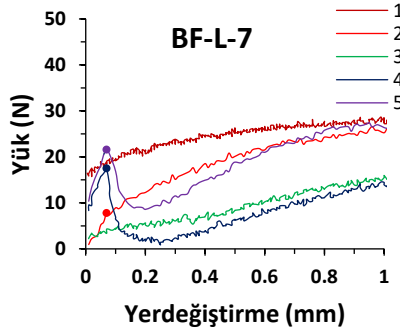
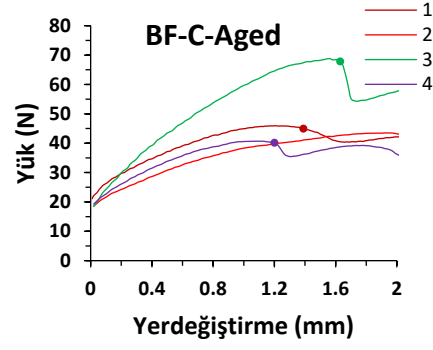
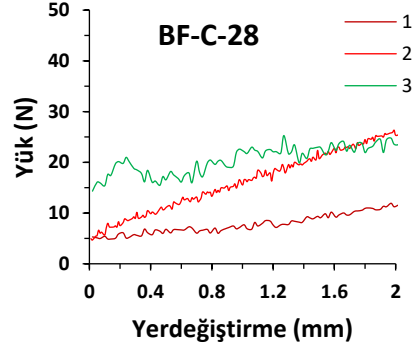
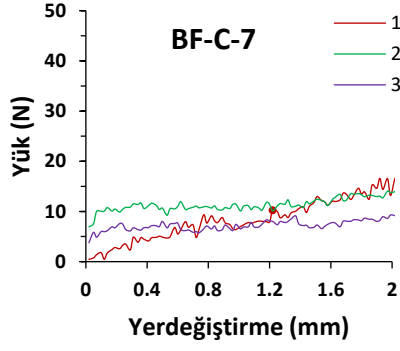


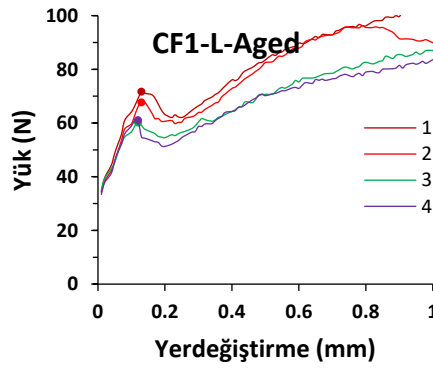
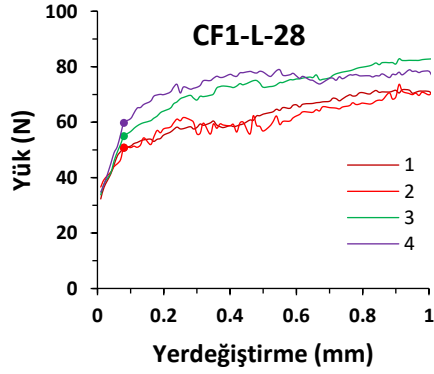
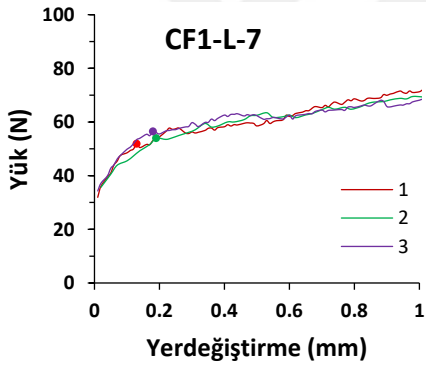
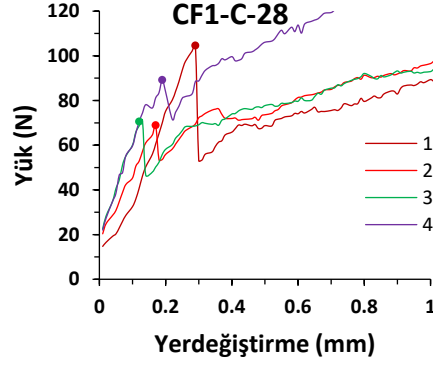
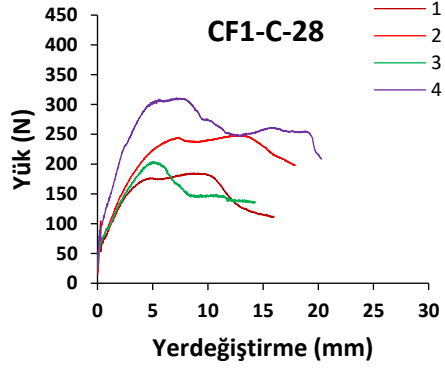
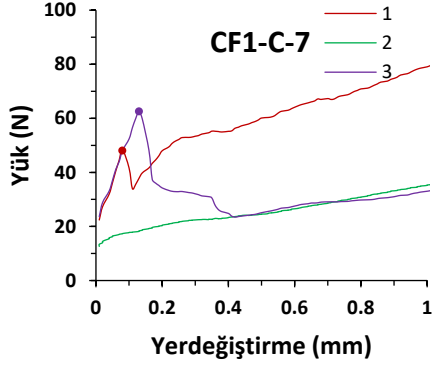


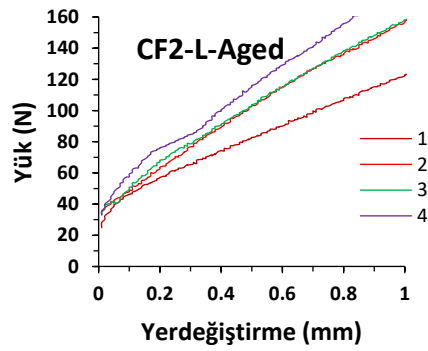
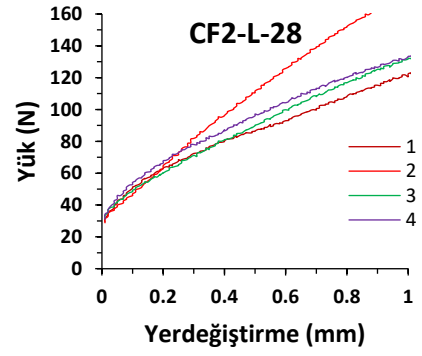
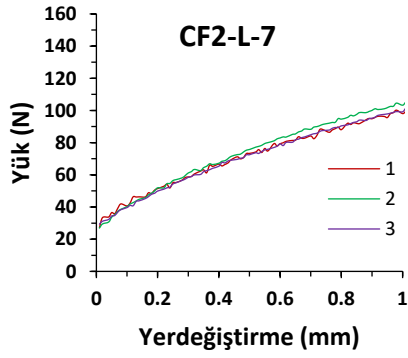
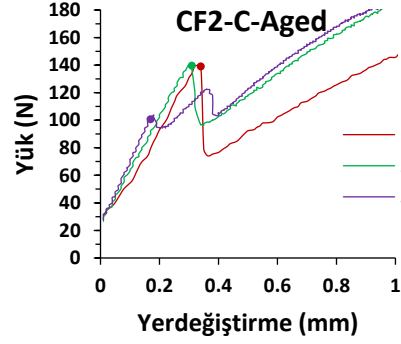
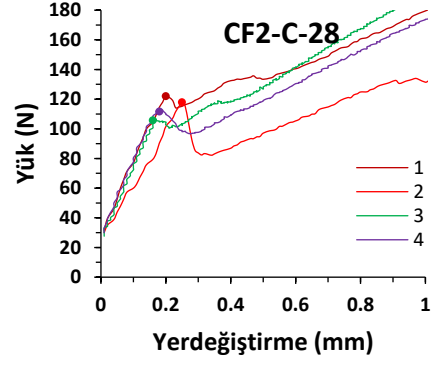
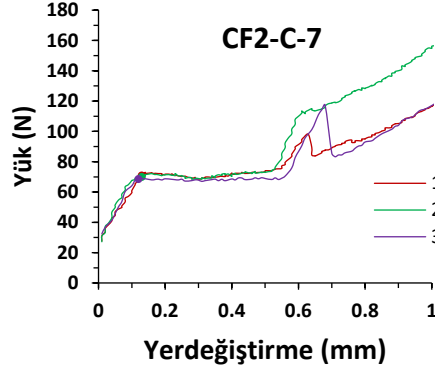
Tablo A. 2 Kupon eğilme numunelerinin I.Bölgedeki yük-yerdeğiştirme eğrileri



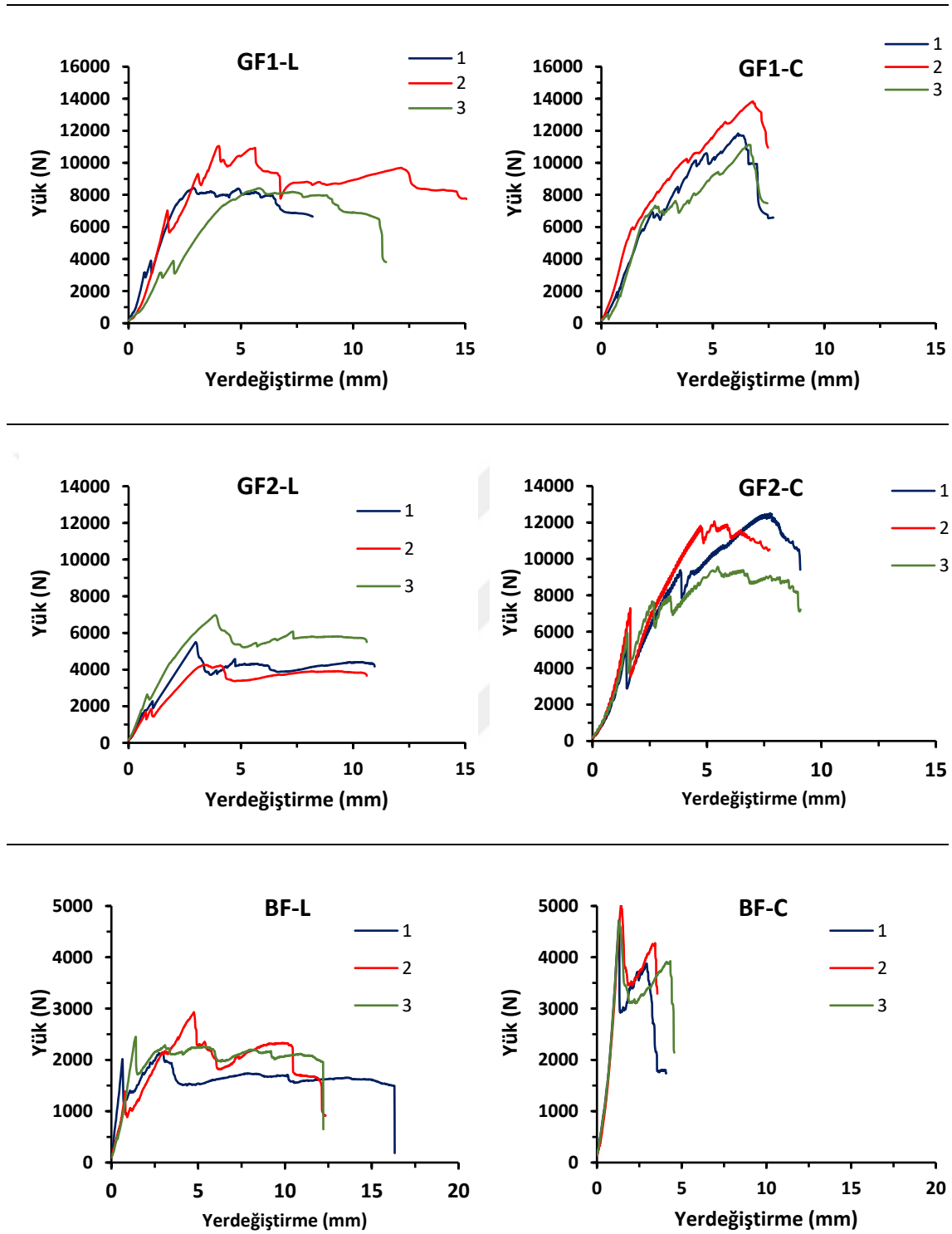


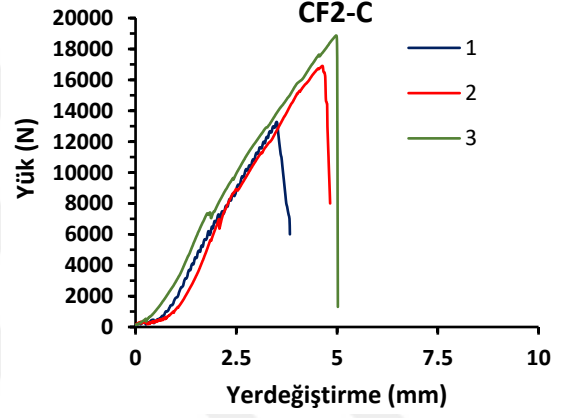
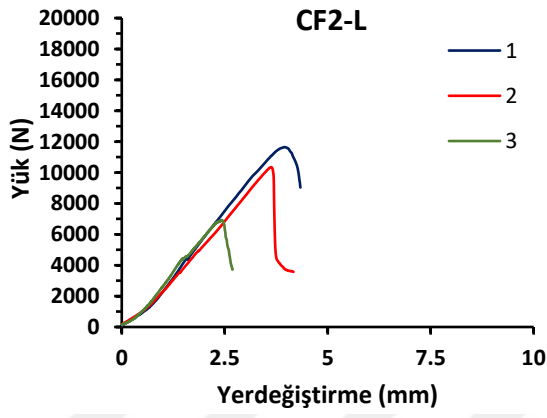
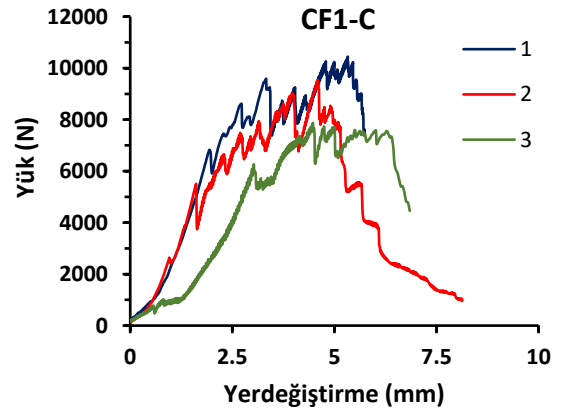
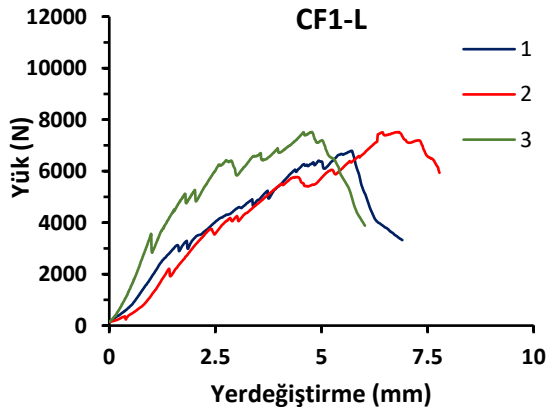






Tablo A. 3 Yığma kiriş eğilme serilerinde tüm numunelerin yük-yerdeğiştirme eğrileri





Konferans Bildirileri

1. M. E. Güneş, Z. C. Girgin, and B. Y. Pekmezci, “Flexural behaviour of fabric reinforced cement-based composites in strengthening of masonry walls,” in *International Workshop on Advanced Materials and Innovative Systems in Structural Engineering: Seismic Practices*, 2018, p. 191.

Makaleler

1. M. E. Gunes, B. Y. Pekmezci, and Z. C. Girgin, “Durability of natural hydraulic lime (NHL) based TRM composites through hot water immersion method,” *RILEM Mater. Struct.*, vol. 54, no. 1, 2021.