

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ÇOK DÜŞÜK DAYANIMLI BETON SİLİNDİRLERİN
GERİ KAZANDIRILMIŞ PET LİFLİ POLİMER İLE GÜÇLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Neslihan ASLAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ÇOK DÜŞÜK DAYANIMLI BETON SİLİNDİRLERİN
GERİ KAZANDIRILMIŞ PET LİFLİ POLİMER İLE GÜÇLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Neslihan ASLAN
(501211022)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Medine İSPİR ARSLAN

HAZİRAN 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501211022 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Neslihan ASLAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ÇOK DÜŞÜK DAYANIMLI BETON SİLİNDİRLERİN GERİ KAZANDIRILMIŞ PET LİFLİ POLİMER İLE GÜÇLENDİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Medine İSPİR ARSLAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Alper İLKİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Güray ARSLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 26.05.2023
Savunma Tarihi : 23.06.2023





Değerli Aileme,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca bana bilgi ve deneyimlerini aktaran ve bana her konuda destek olan değerli danışman hocam Doç. Dr. Medine İspir Arslan'a teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Değerli katkıları için Prof. Dr. Alper İlki'ye; çalışma sürecimde yanımda olan Araş. Gör. Ali Gürkan Genç'e, çalışma arkadaşlarım İsmail Sencar'a ve Ömer Faruk Eskicumalı'ya ve Yapı ve Deprem Laboratuvarı personeli Sayın Hakan Saruhan'a, Yapı Malzemesi Laboratuvarı personeline ve adlarını buraya sığdıramadığım kıymetli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Her zaman olduğu gibi bu süreçte de beni destekleyen ve hep yanımda olan başta sevgili annem Emine Aslan, babam Erdoğan Aslan ve kardeşim Aslıhan Aslan'a teşekkür ederim.

Haziran 2023

Neslihan ASLAN
İnşaat Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xviii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. NUMUNE ÖZELLİKLERİ VE HAZIRLANIŞI	15
2.1 Giriş.....	15
2.2 Numune Üretimi.....	16
2.3 Numunelerin LP ile Güçlendirilmesi	16
3. MALZEME ÖZELLİKLERİ	19
3.1 Giriş.....	19
3.2 Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler	19
3.2.1 Beton	19
3.2.1 Güçlendirme malzemeleri	20
3.3 Malzeme Testleri.....	22
4. DENEY DÜZENİĞİ	27
4.1 Giriş.....	27
4.2 Deney Düzenliğinin Kurulması	28
5. DENEY SONUÇLARI.....	31
5.1 Giriş.....	31
5.2 Monoton Artan Yüklemeler için Deney Sonuçları.....	32
5.2.1 Referans numunelere ait deney sonuçları.....	32
5.2.2 Sargılı numunelere ait deney sonuçları	34
5.2.2.1 Tek kat sargılı numuneler.....	34
5.2.2.2 Çift kat sargılı numuneler.....	39
5.3 Tekrarlı Yüklemeler için Deney Sonuçları	42
5.3.1 Referans numunelere ait deney sonuçları	42

5.3.2	Sargılı numunelere ait deney sonuçları.....	43
5.3.2.1	Tek kat sargılı numuneler.....	43
5.3.2.2	Çift kat sargılı numuneler.....	44
5.4	Göçme Mekanizmaları	46
5.5	Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	49
5.6	Hasar Gelişimi	61
6.	MEVCUT ANALİTİK MODELLERİN TAHMİNİ.....	65
7.	SONUÇLAR	77
KAYNAKLAR.....		79



KISALTMALAR

LP	: Lifli Polimer
PET	: Polietilen Tereftalat
PEN	: Polyethylene naphthalate
PA	: Polyamide
PVC	: Polyvinyl Chloride
PP	: Polypropylene
CLP	: Karbon Fiber Takviyeli Polimer
BLP	: Bazalt Takviyeli Polimer
ALP	: Aramid Fiber Takviyeli Polimer
GLP	: Cam Fiber Takviyeli Polimer
LRS	: Large Rupture Strain
ELCS	: Aşırı Düşük Beton Basınç Dayanımı
LCS	: Düşük Beton Basınç Dayanımı
PHD	: Yüksek Lif Yoğunluğu
PLD	: Düşük Lif Yoğunluğu



SEMBOLLER

D	: Numune apı
E_c	: Beton elastisite modülü
f_c	: Standart silindir basınç dayanımı
f_{co}	: Sargısız numune basınç dayanımı
f_{cc}	: Glendiriliř numune basınç dayanımı
ε_{co}	: Sargısız numune eksenel şekildeğiştirmesi
ε_{cc}	: Glendiriliř numune eksenel şekildeğiştirmesi
f_{lu}	: Maksimum yanal sargı basıncı
K	: Kesit şekline bağlı etki faktörünü
p_f	: LP'nin hacimsel oranını
f_t	: Lifli polimer kumaşın gerilme direncini
t_f	: Lifli polimer kumaşın kalınlığı
n	: LP tabaka sargı sayısı

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1: Literatürde PET LP kullanılan çalışmaların özeti.	14
Çizelge 3.1: Beton karışım oranları.	19
Çizelge 3.2: Slump testi sonuçları.	20
Çizelge 3.3: Deneyde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.	22
Çizelge 3.4: PLD liflerin kupon testi sonuçları.	24
Çizelge 3.5: PHD liflerin kupon testi sonuçları.	25
Çizelge 5.1: Numunelere ait özet bilgiler.	31
Çizelge 5.2: REF-ELCS-M numunelerine ait deney sonucunda elde edilen veriler.	34
Çizelge 5.3: ELCS-PLD-M-1 numunelerine ait deney sonucunda elde edilen veriler.	36
Çizelge 5.4: ELCS-M-PHD-1 numunelerine ait deney sonucunda elde edilen veriler.	39
Çizelge 5.5: ELCS-PHD-M-2 numunelerine ait deney sonucunda elde edilen veriler.	41
Çizelge 5.6: REF-ELCS-C numunelerine ait deney sonucunda elde edilen veriler.	42
Çizelge 5.7: ELCS-PLD-C-1 numunelerine ait deney sonucunda elde edilen veriler.	44
Çizelge 5.8: ELCS-PLD-C-2 numunelerine ait deney sonucunda elde edilen veriler.	46
Çizelge 6.1: Mevcut çalışmaların özet bilgisi.	65
Çizelge 6.2: Çalışmalara ait bağıntılar.	66
Çizelge 6.3: İlki (2003)'deki bağıntılara göre numunelerin analitik ve deneysel sonuçları.	72
Çizelge 6.4: Lam ve Teng (2003)'deki bağıntılara göre numunelerin analitik ve deneysel sonuçları.	72
Çizelge 6.5: Fahmy (2010)'daki bağıntılara göre numunelerin analitik ve deneysel sonuçları.	74
Çizelge 6.6: Dai (2011)'deki bağıntılara göre numunelerin analitik ve deneysel sonuçları.	75

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Numunelerin ıslak döşeme tekniği ile sargılanması.....	18
Şekil 3.1: FRP lifli polimer tiplerinin çekme gerilmesi-şekildeğiştirme tepkilerinin karşılaştırılması.	21
Şekil 3.2: PET LP kupon testi	23
Şekil 3.3: Düşük yoğunluklu lifli polimerler için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi. ..	24
Şekil 3.4: Yüksek yoğunluklu lifli polimerler için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.	25
Şekil 4.1: Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	28
Şekil 4.2: Yerdeğiştirme ve şekildeğiştirmeölçerlerin konumlandırılması.	28
Şekil 4.3: Ölçüm düzeneği.....	29
Şekil 4.4: Deney düzeneğinin genel görünümü.	29
Şekil 5.1: REF-ELCS-M numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.....	31
Şekil 5.2: REF-ELCS-M numunelerinin deney sonrası görünümleri.....	33
Şekil 5.3: ELCS-PLD-M-1 numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.	35
Şekil 5.4: ELCS-PLD-M-1 numunelerinin yükleme sonrasındaki görünümleri.	35
Şekil 5.5: ELCS-PHD-M-1 numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi:.....	37
Şekil 5.6: ELCS-PHD-M -1 numunelerinin yükleme sonrasındaki görünümleri:	38
Şekil 5.7: ELCS-PHD-M-2 numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi:.....	40
Şekil 5.8: ELCS-PHD-M-2 numunelerinin yükleme sonrasındaki görünümleri.	41
Şekil 5.9: REF-ELCS-C numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.....	42
Şekil 5.10: ELCS-PLD-C-1 numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.	43
Şekil 5.11: ELCS-PLD-C-2 numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi:	44
Şekil 5.12: ELCS-PLD-2-C numunelerinin yükleme sonrasındaki görünümleri.....	45
Şekil 5.13: Deney anında numunelerde oluşan bozulmalar.....	48
Şekil 5.14: Numunelerin monoton yüklemeler altında eksenel gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.....	49
Şekil 5.15: Numunelerin tekrarlı yüklemeler altında gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.	50
Şekil 5.16: Monoton artan yükler altında farklı lif yoğunluğuna sahip LP ile güçlendirmenin basınç dayanımına etkisi: a) ELCS-PHD-M numuneleri; b) ELCS-PLD-M numuneleri.....	51
Şekil 5.17: Monoton artan yükler altında farklı lif yoğunluğuna sahip LP ile güçlendirmenin f_{cc}/f_{co} oranına etkisi: a) ELCS-PHD-M numuneleri; b) ELCS-PLD-M numuneleri.	52
Şekil 5.18: Monoton artan yükler altında farklı lif yoğunluğuna sahip LP ile güçlendirmenin $\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$ oranına etkisi: a) ELCS-PHD-M numuneleri; b) ELCS-PLD-M numuneleri.	53
Şekil 5.19: Monotonik yüklemeler altında tek katlı ve çift katlı numunelerde polimer yoğunluğunun davranışa etkisi.....	54
Şekil 5.20: LP ile güçlendirmenin monoton artan yükler altında şekildeğiştirme kapasitesine etkisi: a)ELCS-PHD-M numuneleri; b) ELCS-PLD-M numuneleri.....	55

Şekil 5. 21: Monoton artan yüklemeler altında LP sargı tabaka sayısının davranışa etkisi.	56
Şekil 5. 22: LP ile güçlendirmenin tekrarlı artan yükler altında basınç dayanımına etkisi.	57
Şekil 5. 23: Tekrarlı yüklemeler altında PLD polimer yoğunluğundaki LP sargı tabaka sayısının davranışa etkisi.	57
Şekil 5. 24: Tekrarlı yüklemeler altında PLD polimer yoğunluğundaki LP sargı tabaka sayısının davranışa etkisi.	59
Şekil 5. 25: Tek katlı PLD lifli kumaş sarılı nmunelerde yükleme biçiminin davranışa etkisi.	59
Şekil 5. 26: Tekrarlı artan yükler altında farklı sargı tabaka sayısına sahip LP ile güçlendirmenin f_{cc}/f_{co} oranına etkisi.	60
Şekil 5. 27: Tekrarlı artan yükler altında farklı sargı tabaka sayısına sahip LP ile güçlendirmenin $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$ oranına etkisi.	60
Şekil 5. 28: ELCS-PLD-C-2-4 numunesi hasar gelişim grafiği.	61
Şekil 5. 29: ELCS-PLD-C-1-2 numunesi hasar gelişim grafiği.	62
Şekil 6. 1: İlki modeline göre analitik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	68
Şekil 6. 2: Lam ve Teng modeline göre analitik ve deneysel sonuçların .karşılaştırılması.....	69
Şekil 6. 3: Fahmy ve Wu modeline göre analitik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	70
Şekil 6. 4: Dai modeline göre analitik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması	71



ÇOK DÜŞÜK DAYANIMLI BETON SİLİNDİRLERİN GERİ KAZANDIRILMIŞ PET LİFLİ POLİMER İLE GÜÇLENDİRİLMESİ

ÖZET

Dünya genelinde en çok can alan doğal afetlerin başında deprem yer almaktadır. Bu durum da depreme karşı alınan tedbirleri zorunlu hale getirmektedir. Deprem anında açığa çıkan kuvvetleri karşılamaksızın gevrek davranış sergileyen yapılar, can ve mal kaybına sebebiyet vermektedir. Tasarıma uygun inşa edilmeyen, yeterli beton basınç dayanımına sahip olmayan beton ile inşa edilen ve yeterli donatılanmaya sahip olmayan yapılar deprem anında hasara uğramaktadır. Meydana gelecek hasarı ya da yıkımı minimum seviyeye indirebilmek amacıyla yapıların daha sünek hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla yapıların güçlendirilmesi son yirmi yılda dünya genelinde oldukça tercih edilen bir uygulama haline gelmiştir.

Yapıların güçlendirilmesinde kullanılan geleneksel lifli polimerler, yapıların dayanımını artırsa da sünek davranış konusunda istenildiği kadar etkin değildir. Yükleme anında açığa çıkan gevrek davranışın önüne geçebilmek amacıyla PET lifli polimer malzemeler ile sargılamalar üzerinde çalışılmaktadır. Sağladığı sünek davranışın dışında geri kazandırılarak üretiliyor olmasıyla hem çevre dostu hem de ekonomik olan PET lifli polimerler geleneksel lifli polimerlere tercih edilebilir.

Bu çalışma ile düşük dayanıma sahip beton yapılarda PET LP ile güçlendirmenin yapı üzerindeki etkilerini araştırabilmek amacıyla düşük dayanımlı beton silindirle çalışılmıştır. Farklı lif yoğunluğuna sahip liflerin kullanıldığı sargılamalarda farklı sargı tabaka sayısına sahip olacak şekilde sargılanmıştır. Sargılamaların ardından güçlendirmenin numunenin davranışı üzerindeki etkisini inceleyebilmek amacıyla numuneler monoton ve tekrarlı artan yüklere maruz bırakılmıştır.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonucunda PET LP ile güçlendirmenin yapıların dayanımda, şekilgeçistirme kapasitelerinde ve sünekliliklerinde iyileştirici etkiye sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda hem uygulama kolaylığı sağlaması ve diğer güçlendirme malzemelerine kıyasla ekonomik olması hem de sürdürülebilir bir malzeme olması sebebiyle yapıların güçlendirilmesinde kullanılmak üzere tercih edilebilir bir malzeme olduğu sonucuna varılmıştır.

VERY LOW STRENGTH CONCRETE CYLINDERS STRENGTHENING WITH RECYCLED PET FIBER POLYMER

SUMMARY

Earthquake is one of the most common natural disasters in the world. This situation makes it necessary to take measures against earthquakes. Countries in the earthquake zone in which our country is located are in search of new methods in order to control the effect of the earthquake. Structures that exhibit brittle behavior without meeting the forces emerging during an earthquake cause loss of life and property. Structures that are not built according to the design, built according to the old regulation, built with concrete that does not have sufficient concrete compressive strength, and do not have adequate reinforcement are damaged in the event of an earthquake. It is aimed to make the structures more ductile in order to minimize the damage or destruction that will occur. For this purpose, strengthening of structures has become a highly preferred practice throughout the world in the last two decades.

Today, the wrapping method, which is used to strengthen the structures in order to increase the strength and ductility values of the carrier elements of the structures, has become a very preferred application. The reason for this is that this application prevents the time and cost of demolishing and rebuilding existing structures. It is easy to apply in existing structures and does not cause production to stop during application. With the wrapping method, the resistance of the structures to environmental conditions such as corrosion and humidity increases. Conventional fibrous polymers are widely used, which enable existing structures to be strengthened by providing ease of application. Conventional fibrous polymers used in the reinforcement of structures increase the strength of the structures, but are not as effective as desired in terms of ductile behavior. In order to prevent the brittle behavior that occurs during loading, PET fibrous polymer materials and wraps are being studied. Apart from the ductile behavior it provides, PET fibrous polymers, which are both environmentally friendly and economical, can be preferred to traditional fibrous polymers because they are produced by recycling.

In recent years, there are studies using traditional fibrous polymers. As a result of these studies, it was determined that the deformation and ductility capacities of concrete samples increased significantly. However, sudden failures cannot be avoided in studies using conventional LPs. For this reason, the use of Polyethylene Terephthalate (PET) fibrous polymers with a much higher deformation capacity has been considered today. Unlike fibers such as carbon, glass, aramid, PET FRPs significantly increases the ductility of the structure and absorb the earthquake energy in a substantial amount. However, it is a material with a low modulus of elasticity. PET is a transparent polymer with good mechanical properties under varying loads and good chemical resistance. Studies in the literature are insufficient to represent buildings with low strength

concrete pressure in the existing building stock. Reinforcement studies were carried out on samples with low concrete compressive strength, albeit in limited. Among these studies, the number of studies wrapped with PET LP is very limited. Therefore, in this thesis, it is aimed to determine the effect of wrapping on the behavior of the cylinder after the cylinders with low concrete compressive strength are reinforced with PET FRP.

In this study, low strength concrete cylinder was used to investigate the effects of PET FRP strengthening on low strength concrete structures. It is aimed both to contribute to the literature and to represent the structures made of low-strength concrete, which constitute a significant part of the building stock in our country, by working on low-strength concretes, which are thought to be missing in the literature. In windings in which fibers with low and high fiber density are used, the samples were wrapped in single and double layers in order to determine the effect of different winding layers on the strengthening. In order to examine the effect of strengthening on the behavior of the specimen after winding, the specimens were subjected to monotonous and repetitive increasing loads. Fiber density, number of wrap layers and loading pattern are the parameters of the experimental study.

In recent years, the concept of sustainability has been rapidly increasing its importance. As in many sectors, measures are taken in the construction sector to ensure both the elimination of waste and the reduction of material consumption. In addition to the performance advantages of PET FRPs such as high deformation capacity, it is a very important material for sustainability as it is obtained by recycling wastes. The fact that the fiber-reinforced polymer material to be used in reinforcement is obtained without recycling is quite environmentally friendly, both in terms of eliminating the existing waste and reducing the amount of raw material to be spent for the production of a new material.

In this experimental study, concrete cylinders with a diameter of 150 mm and a height of 300 mm were reinforced with PET FRP in the transverse direction, and their behavior was investigated by subjecting them to monotonic and cycling increase loads. While strainage was used to measure the deformations that may occur in the samples in the transverse and longitudinal directions at the time of loading, axial strains were measured using 50 mm capacity LVDTs (linear variable displacement transducers)

As a result of the experimental studies carried out, it has been seen that the reinforcement with PET FRP has an improving effect on the strength, deformation capacity and ductility of the structures. Considering the fiber density of the polymer material used in the wrapping, which is one of the main comparison parameters, it has been observed that PHD fabrics with high fiber density have a higher contribution to both strength and axial elongation capacity compared to those with low fiber density. In line with the results obtained, it has been concluded that it is a preferable material to be used in the strengthening of structures because it provides ease of application, is economical compared to other strengthening materials and is a sustainable material. In addition, the data obtained as a result of the experimental studies were put into the existing analytical models and the results were tried to be estimated. Considering the fiber density of the polymer material used in the wrapping, which is one of the main comparison parameters, it has been observed that PHD fabrics with high fiber density have a higher contribution to both strength and axial elongation capacity compared to those with low fiber density.

Axial stress and strain results were estimated by replacing the data obtained as a result of experimental studies in existing analytical models. The maximum strength and the corresponding strain values of the cylindrical specimens strengthened by wrapping in the transverse direction with PET FRP were substituted in the empirical relations known from the existing studies and the results were compared. As expected, studies involving PET LP-wrapped samples of the models used made the closest estimates to the experimental results. While the Fahmy model is successful in estimating the strength capacity value from the prediction values calculated using different models, the Dai model is successful in estimating the strain capacity. The models used were insufficient in estimating true values.



1. GİRİŞ

Deprem dünyamız için önüne geçilemez bir doğal afettir. Depremi engellemek ne yazık ki elimizdeki imkanlarla mümkün gözükmemektedir. Bu amaçla yaşadığımız çevreyi ve yapıları deprem anında can ve mal kaybını minimum seviyeye indirgeyecek şekilde tasarlamamız gerekmektedir. Yaşadığımız coğrafya gibi deprem bölgesinde yer alan ülkelerde bu afetle yaşamayı mümkün kılmak adına yapıları depreme dayanıklı olarak tasarlamak büyük bir önem taşımaktadır. Bununla birlikte, mevcut yapı stokuna bakıldığında deprem tehdidine karşı koyabilecek bina sayısı oldukça azdır.

Yapıların deprem anında açığa çıkan kuvvetlere karşı koyamıyor oluşu düşük dayanımlı beton ile inşa edilmesi, yetersiz donatı kullanılması ve tasarıma uygun inşa edilmemesi gibi birçok nedene bağlıdır. Taşıyıcı elemanlar deprem anında meydana gelen ek yükleri absorbe edemediğinden yapının hasar almasına hatta daha ileri aşamada göçmesine sebep olan gevrek bir davranış sergilemektedir. Bu durumun önüne geçebilmek adına yeni yapılar yönetmeliğe uygun olarak inşa edilirken mevcut standart altı yapılar güçlendirme uygulamalarıyla depreme hazırlıklı hale getirilmektedir.

Mevcut yapıların güçlendirilmesinde farklı uygulama yöntemleri mevcuttur. Betonarme yapıların güçlendirilmesinde 1990'lı yıllardan itibaren, uygulanabilirliği kolay olmasından kaynaklı taşıyıcı elemanların lifli polimer kumaşlarla güçlendirilmesi yöntemi en çok tercih edilen yöntemlerden biri haline gelmiştir. Lif takviyeli polimer (LP) malzemelerin kullanıldığı sargılama yöntemi son yıllarda oldukça yaygın olarak tercih edilmektedir.

Geleneksel lifli polimer (Fiber Reinforced Polymer) olarak bilinen karbon takviyeli polimer (CFRP), cam takviyeli polimer (GFRP), bazalt takviyeli polimer (BFRP) ve aramid takviyeli polimer (AFRP) yüksek dayanım ve elastisite modülüne sahip olmakla birlikte kolay ve hızlı bir şekilde uygulanmaktadır. Lifli polimer malzemeler yüksek çekme ve eğilme dayanımına sahiptir. CFRP'ler yüksek çekme dayanımına sahip olmakla birlikte oldukça hafif bir malzemedir. Yüksek gerilme dayanımına sahip

olmasının yanında yükleme altında ultra sünek bir davranış sergilemektedir. Sahip olduğu bu özelliklerinden dolayı güçlendirme uygulamalarında oldukça sık tercih edilmektedir. GFRP sahip olduğu yüksek dayanımla birlikte yüksek ısı yalıtımı özelliğinden dolayı yapılarda güçlendirme malzemesi olarak sıklıkla tercih edilen bir diğer güçlendirme malzemesidir. Güçlendirme amacıyla kullanılan geleneksel kompozit malzemeler arasında en düşük maliyetli olan malzeme olması tercih edilmesinin bir diğer önemli nedenidir. AFRP ise düşük basınç dayanımına sahip olmasından kaynaklı çoğunlukla yapısal bir malzeme olarak kullanılmaktan ziyade otomotiv ve savunma sanayide kullanılmaktadır. BFRP, fiziksel ve kimyasal dirence dayanıklı olmakla birlikte korozyona karşı da iyi bir direnç göstermektedir. Maliyeti cam takviyeli polimere kıyasla daha yüksektir.

Son yıllarda geleneksel lifli polimerlere alternatif olarak büyük kopma gerilimine sahip LRP lifli polimerler kullanılmaya başlanmıştır. Plastikler; düşük yoğunluk, kolay işlenebilme, iyi mekanik ve kimyasal özellikler, yüksek ısı yalıtımı ve elektriksel yalıtım gibi özellikleri ile güçlendirme malzemesi olarak kullanılmaya imkan sağlamaktadır. Plastikler ısıya maruz kalmalarının ardından gösterdikleri tepkiye göre başlıca iki gruba ayrılabilir: termoset ve termoplastik polimerler. Termoset polimerler, ısıtma sırasında serleşme göstererek ısı karşısında değişime uğramazken termoplastikler sıcaklık değişiminden etkilenmeksizin ısı kullanılarak şekillendirilebilir. Başlıca örnekleri şu şekildedir: termoset için epoksi reçineler, polyesterler ve termoplastik için PET, PP, PVC. Lifli polimer kumaşlardaki lifler arasında yük transferini sağlamak amacıyla polimer matrisler (reçineler) kullanılmaktadır. Lifli polimer kumaşlarda asıl taşıyıcı görevini lifler üstleniyor olsa da yük transferi sırasında oluşabilecek hasarları önlemesi açısından reçineler büyük bir önem arz etmektedir.

Son yıllarda geleneksel lifli polimerlerin kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar sonucunda beton numunelerin deformasyon ve süneklik kapasitelerinin kayda değer biçimde arttığı belirlenmiştir. Ancak geleneksel LP'lerin kullanıldığı çalışmalarda ani arızaların önüne geçilememektedir. Bu nedenle günümüzde çok daha yüksek deformasyon kapasitesine sahip Polietilen Tereftalat (PET) lifli polimerlerin de kullanılması göz önüne alınmıştır. PET LP'ler karbon, cam, aramid gibi liflerin aksine yapının sünekliğini ciddi oranda artırmakta ve deprem enerjisini azımsanamayacak miktarda sönmlemektedir. Bununla birlikte düşük elastisite modülüne sahip bir malzemedir.

PET değişken yükler altında iyi bir mekanik özelliğe sahip olmakla birlikte iyi bir kimyasal dirence sahip olan şeffaf bir polimerdir. PET atıkları; şişeler, folyolar ve lastik atıkları olmak üzere başlıca üç alanda açığa çıkmaktadır. Şişelerin üzerindeki etiketlerde kullanılan tutkal, folyoların üretimi sırasında kullanılan katkı maddeleri saflıklarını etkilemektedir (Sulyman vd., 2016). Bu sebeple lastik atıklarının kullanılması saflığı etkilememesi açısından daha uygundur.

Son dönemlerde sürdürülebilirlik kavramı hızlı bir şekilde önemini artırmaktadır. Birçok sektörde olduğu gibi inşaat sektöründe de hem atıkların ortadan kaldırılmasını hem de malzeme tüketiminin azaltılmasını sağlayacak önlemler alınmaktadır. PET LP'lerin sahip olduğu yüksek şekildeğiştirme kapasitesi gibi performans avantajlarının yanı sıra, atıkların geri dönüştürülmesiyle elde ediliyor olmasıyla sürdürülebilirlik için de oldukça önemli bir malzemedir. Güçlendirmede kullanılacak olan lif takviyeli polimer malzemenin geri dönüştürülmeden elde ediliyor olması, hem mevcut atığı ortadan kaldırması açısından hem de yeni bir malzeme üretimi için harcanacak ham madde miktarını azaltıyor olmasıyla oldukça çevre dostudur.

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak başlıca iki unsur dikkate alınmıştır. Bunlardan ilki mevcut yapı stoğunu temsilen kullanılan düşük basınç dayanımına sahip beton silindirlerin kullanılmasıdır. Diğer önemli özellik ise güçlendirme malzemesinin geri kazandırılmış PET atıklarından elde ediliyor olmasıdır. Mevcut çalışmalardan farklı olarak sargılamada kullanılmak üzerine yeni bir malzeme üretilmeksizin güçlendirmede lastik fabrikasından elde edilen atıklar kullanılmıştır. Böylece çevreye verilen zararın azaltılması hedeflenmiştir.

1.1 Literatür Taraması

Çalışmanın bu kısmında lifli polimer malzeme kullanılarak gerçekleştirilen güçlendirme çalışmalarında, lifli polimerlerin yapı elemanlarına sağladığı mekanik özellikler incelenmiştir.

Samaan vd. (1998) farklı beton tiplerine ve farklı LP sargı tabaka sayısına sahip 30 adet silindirik numune monoton ve tekrarlı artan yükler altında tek eksenli olacak şekilde test edilmiştir. Mevcut modeller LP ile sınırlandırılmış betonun davranışını tahmin etmede başarısız olduğundan deneylerin sonucuna dayanarak betonun eksenel ve yanal yönlerdeki davranışını tahmin edebilmek amacıyla yeni bir model önerilmiştir. Bununla birlikte LP ile sargılamanın beton kolonların dayanımını ve sünekliğini kayda değer biçimde artırdığı tespit edilmiştir (Michel Samaan vd., t.y.).

İlki & Kumbasar (2003) yaptığı deneysel çalışmalarda daire, kare ve dikdörtgen kesitli 8'er adet düşük dayanımlı ön hasarlı ve ön hasarsız betonarme kolonların CFRP ile güçlendirilmesinin elemanlara sağladığı mekanik özellikleri incelemiştir. Monoton artan ve tekrarlı artan yüklere maruz bırakılan numunelerin eksenel basınç davranışları incelenmiştir. CFRP ile sargılama tüm numunelerde yük taşıma kapasitesini ve şekildeğiştirebilme kapasitesini önemli miktarda artırmıştır. Kesit tipi ve lif sargısının kalınlığı değerlendirilen parametreler arasındadır. Dairesel olmayan kesitlerde ciddi bir artış olmasıyla beraber sargılamanın eksenel davranışa en büyük katkısı dairesel kesitlerde gözlemlenmiştir. Ön hasar verilerek güçlendirilen beton numunelerin davranışı ön hasarsız numuneler ile karşılaştırıldığında, numunenin ön hasarlı olması elemanın davranışı üzerinde dikkate değer bir dezavantaja neden olmamıştır.

Lam vd. (2003) farklı tip (aramid, cam ve karbon) LP ile sargılanmış 76 adet dairesel betonun gerilme-şekildeğiştirme davranışı için mevcut çalışmalar gözden geçirilerek yeni bir model önerilmiştir. Çalışmaların büyük bir kısmında monoton artan çift doğrusal bir eğri elde edilmiştir. Bu çalışma sonucunda önerilen model farklı LP tipleri için kullanılmaya uygundur.

İlki vd. (2008) düşük (14-16 MPa) ve orta (31 MPa) dayanımlı beton basıncına sahip dairesel ve dikdörtgen kesitli kolonlar CFRP ile sargılandıktan sonra eksenel basınç altındaki davranışları incelenmiştir. Numunelerin 40 tanesi düşük dayanımlı beton ve yetersiz donatılı, 28 tanesi ise orta dayanımlı beton kullanılarak ve yeterli iç donatılı olacak şekilde hazırlanmıştır. FRP kalınlığı, kesit şekli, beton dayanımı, donatı düzeni,

güçlendirme malzemesinin yapıştırma şekli ve yükleme tipi deney sırasında dikkate alınan başlıca parametrelerdir. Yapılan deneyler sonucunda lifli malzemeler ile güçlendirilen kolonların dayanım ve süneklilik özelliklerinin kayda değer biçimde arttığı görülmüştür. Yazarın 2003'teki çalışmasından bilindiği şekilde güçlendirme etkisi dairesel kesitli kolonlarda dikdörtgen kesitli kolonlara kıyasla daha belirgindir. Bununla birlikte düşük beton dayanımına sahip numunelerde de güçlendirme etkisi orta dayanımlılara nazaran daha yüksek olmuştur. Köşe yarıçapı daha büyük olan elemanların dayanımları daha yüksek olsa da monoton ve tekrarlı artan yüklemeler için eksenel şekildeğişirmelerde önemli bir fark görülmemiştir. Güçlendirmenin betonun davranışına olan katkısını belirleyebilmek amacıyla bir de analitik model önerilerek modelin mevcut modellerle kıyaslandığında kabul edilebilir bir doğrulukta olduğu görülmüştür (Ilki vd., 2008).

Dai vd. (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, büyük kopma gerilmesine sahip kompozit (LRS) LP ile sarılı betonarme kolonların gerilme-şekildeğişirme davranışını incelemek üzere genellikle geri dönüştürülmüş malzemelerden elde edilen PEN ve PET lifler kullanılmıştır. Bu çalışmayla gerilme-şekildeğişirme davranışının yanı sıra geleneksel LP'ler için geliştirilen kapatma modellerinin LRS LP'ler için uygulanabilirliği araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda LRS LP'ler geleneksel LP'lerden farklı olarak doğrusal olmayan çekme gerilimi-şekildeğişirme tepkisi göstermiştir. Geleneksel LP'ler ile karşılaştırıldığında büyük yırtılma gerilmelerinden dolayı basınç dayanımlarında daha düşük bir artışla beraber süneklilikte önemli bir artış gözlemlenmiştir. Önerilen değiştirilmiş model LRS LP sarılı betonun basınç dayanımı, nihai eksenel şekildeğişirme ve basınç gerilimi-şekildeğişirme davranışı için tahmin etmede iyi performans göstermiştir. Bu çalışma sonucunda beton yapıların sismik olarak güçlendirilmesinde LRS LP'lerin kullanılmasının geleneksel LP'lerden daha tercih edilebilir olduğu belirlenmiştir (J.-G. Dai vd., 2011).

Dai (2012) 6 adet PET LP sargılı kare betonarme kolonun deney sonuçları, bir tanesi aramid LP sargılı diğer ikisi referans olmak üzere üç numunenin sonuçlarıyla karşılaştırılarak sismik güçlendirmeye olan etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır. Sabit eksenel yük ve tekrarlı artan yanal yüklere maruz kalan PET LP numuneler yerdeğişirme sünekliliğini kayda değer biçimde artırmış ve nihai sınır durumunda kırılmadan kalmasıyla geleneksel LP'lere alternatif olarak kullanılmaya uygun olacağı söylenmiştir. Boyuna çelik çubukların burkulması sargılı numunelerde yük taşıma kapasitesinde ani bir düşüşe neden olmamakla birlikte burkulma sonrasındaki yük

taşıma kapasitesi LP ceketin sertliğine bağlı olarak değişiklik göstermiştir (J. G. Dai vd., 2012).

Bai vd. (2014), yüksek beton basınç dayanımına sahip (35.6 ve 46.2 MPa) beton silindirler geri dönüştürülmüş plastiklerden elde edilen PEN ve PET LP kullanılarak farklı sargı tabaka sayılarında sargılanmıştır. Dairesel beton silindirler üzerine yapılan döngüsel eksenel sıkıştırma testlerinin sonucunda LRS LP ile sınırlı beton, geleneksel LP ile sınırlı betonla benzer bir polinom şekli sergilemiş ve yüksek bir süneklilik göstermiştir. Bu çalışmada LRS LP sarılı betonun döngüsel basınç gerilmesi-şekildeğiştirme tepkisi için bir model önerilmiş olup mevcut test sonuçlarına yakın tahmin elde edilmiştir (Y.-L. Bai vd., 2014).

İspir (2015) tarafından PET LP ile sarılı betonun basınç davranışıyla ilgili yeterli sayıda çalışma olmadığı düşüncesi ile 14 adet silindirik numune üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalarda yükleme tipleri (monoton artan ve tekrarlı artan yükleme) ve PET levha katman sayısı (1, 2 ve 3) göz önüne alınmıştır. Çalışmalar sonucunda lifli polimer kumaş ile sarılmış betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi diğer LP tipleri ile (CFRP, GFRP) benzer bir ilişki gösterdiği belirlenmiştir (iki parça ve bir geçiş parçasından oluşan). Diğer LP tipleriyle sarılı numunelere benzer şekilde nihai eksenel gerinim artışı gösterirken bozulmada yere yakın PET yanal gerilimi yüksektir. (İspir, 2015)

Dalgıç vd. (2016) tarafından kare ve dikdörtgen kesitli beton prizmaların ön hasarlı ve hasarsız olması halinde CFRP ile güçlendirilmesinin davranışa olan etkisi incelenmiştir. Ön hasarın olması hapsetme etkinliğini olumsuz etkilemiş olmasına rağmen lifli polimer ile sargılamanın hasarlı beton prizmalarının dayanımını ve şekildeğiştirme kapasitesini artırdığı tespit edilmiştir. Prizmanın hasar seviyesi arttıkça güçlendirmenin etkinliği azalmaktadır. Güçlendirmenin dikdörtgen kesitli numunelere kıyasla kare kesitli numunelerin davranışına olan etkisi daha büyüktür. Dikdörtgen numunelerde daha belirgin olmakla birlikte ön hasarlı numunelerin eksenel rijitliğinde azalma görülmüştür. Test tipi (monoton ve tekrarlı artan eksenel yüklemeler) sınırlandırılmış numunelerin dayanımında etkisi olmasa da nihai eksenel şekildeğiştirmeler üzerinde etkili olmuştur (Dalgıç vd., 2016).

Zhang (2017) tarafından farklı seviyelerde korozyona sahip etriyeli aşınmış betonarme kolonları güçlendirmenin kesme dayanımına olan etkisi üzerinde çalışılmıştır. LP levhanın hacim oranı artırılarak kolonun en yüksek yükteki kayma direnci artmıştır ve sargılı numunenin kesme kapasitesi yetersiz olsa da beton çekirdeği bütünlüğünü

korumuştur. Korozyonun betonarme kolonun kayma direncine olan etkisine kıyasla PET LP levhanın kayma direnci üzerinde daha fazla etkisi bulunmaktadır. Bunun nedeni kaplama betonundaki çatlakların levhaların ve alt tabakadaki kolonun zayıflamış monolitik tepkisi olarak düşünülmüştür. Sargılanmış aşınmış betonarme kolonların kesme kapasitesini tahmin edebilmek amacıyla yeni bir model önerilmiştir ve bu model hem yapılan testlerle hem de mevcut çalışmalarla doğrulanmıştır (Zhang vd., 2017).

Saleem vd. (2018) tarafından dairesel ve dairesel olmayan 54 adet numunenin geleneksel LP'lerin sahip olduğu sınırlı şekildeğiştirme kapasitesinden kaçınmak amacıyla PET LP ile sargılandığı çalışma gerçekleştirilmiştir. Boyutları 150x300 olan numuneler eksenel basınç kuvvetine maruz bırakılarak yanal dayanımları test edilmiştir. Deney parametresi olarak kesit şekli, LP katman sayısı ve köşe yarıçapı göz önüne alınmıştır. Dairesel kesitlerde radyal yönde düzgün bir genleşme meydana gelirken kare kesitli numunelerde sınırlayıcı gerilmeler daha yüksek olup düz kenarlarda aşırı yanal genişleme meydana gelmiştir. Dairesel numuneler gerilme-şekildeğiştirme grafiği bir geçiş bölgesi ile çift doğrusal bir davranış sergilemiştir. PET LP katman sayısının artmasıyla birlikte etkili sınırlama basıncı artmış olup betonun mukavemeti ve yanal sünekliliğini artırmak amacıyla kullanılabilir olduğu görülmüştür. Farklı katman sayısına sahip numunelerin yanal tepkisi mevcut modellerle tahmin edilememiştir .

Pimanmas & Saleem (2019) PET LP ile sargılanmış betonun nihai durumunu tahmin etmek amacıyla mevcut çalışmalar kullanıldığında bazı modeller nihai gücün tahmin edilmesinde elverişli iken nihai gerilim için aynı durum söz konusu olmamıştır. Nihai şekildeğiştirmeyi tahmin edebilmek için ise eksenel şekildeğiştirme kapasitesi dikkate alındığında daha doğru sonuçlara ulaşılmıştır. Yeni model ile birlikte sadece nihai sonuçların tahmini için kullanılan bir modelden öte gerilme-şekildeğiştirme eğrisi boyunca kontrol noktaları da içeren bir model oluşturulmuştur. Önerilen model keskin köşeleri olan numunelerin nihai durumunu tahmin etmede diğer modellerden daha iyi performans göstermiştir (Pimanmas & Saleem, 2019) .

Bai (2019) literatürde bulunan tasarım odaklı modellerin çoğu LP kopma şekildeğiştirmesinin bir fonksiyonu olarak eksenel gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin eğimini tanımlamaktadır. Aynı sertliğe sahip olsa da farklı kopma gerilmelerine sahip LP ile sargılanan beton numunelerin deneylerinden elde edilenlerin aksine farklı eksenel sertliklere yol açmaktadır. Bu durum LRS LP katkılı betonda nihai durumu

hatalı bir şekilde tahmin etmeye yol açabilir. Bu durumun önüne geçebilmek amacıyla kopma gerilimi yerine ceket sertliğinin kullanılarak tanımlandığı tasarım odaklı yeni bir model geliştirilmiştir. Mevcut numunelerden oluşan veri tabanına 26 adet LRS LP sargılı dairesel silindir test edilerek eklenmiştir. Mukavemete dayalı olmaktan ziyade sertliğe dayalı olarak önerilen model hem geleneksel hem de LRS LP ile sargılanmış beton kolonlarda uygulanabilmektedir. Bununla birlikte model hem sertleşme hem de yumuşama davranışlarını iyi tahmin etmektedir (Y. L. Bai vd., 2019).

Saleem vd. (2020) bu çalışmayı büyük kopma gerilimli (LRS) PET LP ile sınırlandırılmış dahili çelik çubuklu kare ve dikdörtgen kesitli betonarme kolonlardaki aksenal basınç davranışını tespit etmek amacıyla gerçekleştirmiştir. 32 adet numune monoton artan aksenal sıkışma etkisi altında test edilirken LP katman sayısı, etriye aralığı, enine kesit şekli gibi parametreler dikkate alınmıştır. Yapılan deneyler sonucunda numunelerin mukavemetleri ve deformasyon kapasitelerinin göz önüne alınan parametrelerden büyük ölçüde etkilendiği tespit edilmiştir. PET LP katmanlarının sayısının artmasıyla numunelerin davranışının iyileştiği gözlemlenmiştir. Kare kesitli numuneler dikdörtgen kesitli numunelere kıyasla daha yüksek dayanımlar sergilemiştir. PET LP ile sargılama sayesinde, çelik çubuklarda oluşan yanal deformasyonlar sonucu etriyelerin açılmasının büyük oranda önüne geçilmiştir. Yüksek yanal gerilme ile birlikte çelik donatının burkulmasının daha az zararlı etkiye sahip olduğu belirlenmiştir .

Zeng vd. (2020) PET LP ile sınırlandırılmış betonun gerilme-şekildeğiştirme davranışına yönelik çalışmaların yetersiz sayıda olduğu düşüncesiyle farklı mukavemet değerlerine sahip beton silindirlerin şekildeğiştirme davranışlarını test etmek amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı beton numuneler ile yapılan deneyler sonucunda sınırlandırılmış yüksek dayanımlı ve ultra yüksek dayanımlı beton numunelerin gerinim sertleşmesi yumuşama sertleşme davranışı gösterirken normal dayanımlı numunelerin çoğunlukla monoton bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir .

Han vd. (2020) bu çalışmada geri dönüştürülmüş agregalı dairesel beton (RAC) numunelerin LRS LP ile sargılanması sonucunda numunenin davranışına olan etkisinin incelenmesi amacıyla monoton artan yüklemeler altında test edilmiştir. LP'lerin yanal sınırlandırılmasıyla RAC'lerin düşük mukavemeti iyileştirilmeye çalışılmıştır. LP'nin hapsedme sertliği parametre olarak değerlendirilmiş ve RAC'nin basınç dayanımı ve sertliğinin artmasında esas olarak bu parametrenin etkilediği tespit

edilmiştir. Bir diğer parametre geri dönüştürülmüş agreganın değiştirme oranı olup basınç dayanımı ve sertlik üzerindeki etkisi ilk parametre kadar güçlü olmamıştır. Yazarın aynı yıl yayınlanan bir başka çalışmasında Han vd. (2020) LRS LP sargılı kare ve dairesel kolonların sıkıştırma davranışı incelenmiştir. Beton numuneler monoton artan eksenel basınç altında test edilerek gerilme-şekildeğiştirme davranışı ve basınç dayanımı sistemsel olarak belirlenmiştir. Sınırlandırma sertliği ve köşe yarıçapları parametre olarak ele alınmış ve kolonların davranışlarının bu parametrelerle doğrudan ilişkili olduğu belirlenmiştir. Kare kolonlar tepe mukavemetinde hafif bir artış gösterirken nihai gerilmede daha belirgin artışlar göstermiştir. Kolonların köşe yarıçaplarının artmasıyla mukavemetlerinin arttığı tespit edilmiştir. Gerilme-şekildeğiştirme eğrileri üç parçalı davranış sergilemiştir. Bu çalışma sonucunda çoğu modelin deneysel verilerle kıyaslandığında iyi tahminler ortaya koyduğu gösterilmektedir (Han vd., 2020) .

Zeng vd. (2020) dıştaki PET LP ile içteki dairesel yüksek mukavemetli çeliğin arasının beton ile doldurulduğu kolonların (FCSSC) eksenel döngüsel sıkıştırma davranışını incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda FCSSC'nin eksenel yük taşıma kapasitesinin beton dolgulu LP boru ve çelik borunun toplamından çok daha fazla olduğu görülmüştür. Numuneler yüksek süneklilik değerlerine ulaşmıştır. FCSSC'nin tekrarlı artan yükler altındaki eksenel davranışı mevcut literatürde bulunan gerilme-şekildeğiştirme modeli ile tahmin edilememiştir .

Zhou vd. (2020) LRS LP ile güçlendirilmiş korozyonlu ve korozyonsuz kolonların yanal yükleme ile eksenel basınç yüküne maruz bırakıldığı deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Boyuna donatının korozyonlu olup olmaması, eksenel kuvvet oranı ve LP kalınlığının kolonların sismik davranışına etkisinin araştırıldığı deneyler sonucunda donatısız kolonlarda boyuna donatı korozyonunun sismik davranışa önemli oranda etki ettiği tespit edilmiştir. LRP LP ile güçlendirme yapılan kolonların güçlendirme yapılmayan kolonlarla karşılaştırıldığında süneklilikleri ve enerji yayma kapasitelerinin kayda değer biçimde arttığı görülmüştür .

Bai vd. (2021) LRS LP ve geleneksel LP sargılı beton numuneler analiz edilerek LRS LP sargılı beton için yeni bir döngüsel gerilme-şekildeğiştirme modeli önerilmiştir. Elde edilen modellerle somut hasar ve hapsedme arasındaki ilişkinin daha doğru şekilde tespit edilmesi ve eksenel rijitliğin doğru şekilde tahmin edilmesi sağlanmıştır. LRP LP sargılı betonun döngüsel davranışını plastik şekildeğiştirme ve gerilme bozulmasını büyük miktarda etkilediği görülmüştür ve yeni model önerilirken bu iki

parametre kullanılmıştır. Önerilen modelde eksenel rijitlik esas alınarak LRS LP ile güçlendirilen yapının sismik analizinde önemli olan noktanın eksenel rijitliği doğru bir şekilde tahmin etmek olduğu vurgulanmıştır. Bu çalışma dairesel kesitler üzerinde yapıldığından üniform dağılım göstermeyen dairesel olmayan kesitler için sonuçlar yetersizdir. Yazarın ekibi tarafından bu tip kesitler için çalışmalar devam etmektedir. Bai (2022) tekrarlı artan yükler altında LRS LP ile sargılanmış beton için hasar modeli önerilmiştir. Bu model önerilen mevcut modele kıyasla daha basit ifadeler içermekte olup pratik mühendislik uygulamasında kullanılmaya uygundur. Boşaltma ve yeniden yükleme eğrilerindeki sapmayı azaltmak amacıyla plastik şekildeğiştirme önerilmiştir. Sadeliği nedeniyle modelin hem LRS LP hem de geleneksel LP ile güçlendirilmiş yapıların sismik analizinde kullanılmasının uygun olduğu düşünülmektedir (Y. L. Bai vd., 2022).

Choi ve Hong (2021) tarafından betonarme dairesel kolonların üç farklı fiber (karbon fiber, cam fiber ve PET fiber) tipi ile sargılanmasının yapısal sismik güçlendirmeye etkisi deneysel çalışmalarla araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre PET fiber diğer iki fiber tipine kıyasla çok daha düşük bir elastite modülüne sahiptir. PET fiber ile sargılı kolonların nihai moment değerleri ve yerdeğiştirme süneklikleri daha büyüktür. Araştırmalar sonucunda sünek davranış sergileyen PET fiberin uygulanabilir olduğu tespit edilmiştir.

Yan vd. (2021) LRS LP ile sarılı beton numunelerinin farklı gerinim oranları ve tekrarlanan darbeler için basınç davranışları üzerinde çalışılmıştır. Split Hopkinson Basınç Çubuğu testi ile numuneler üzerindeki gerinim hızının etkisi araştırılmıştır. Numuneler tek bir darbeye maruz bırakıldığında üstün darbe direnci davranışı göstermişlerdir. Tekrarlanan darbeler altında tek katlı PET LP ile sargılı beton çekirdeği ciddi bir hasara maruz kalırken dış LP ceketlerde yırtılma olmamıştır. Darbe sayısının artmasıyla birlikte kritik basınç şekildeğiştirmesi artarken tokluk azalmıştır. Wang vd. (2021) tarafından CFRP, GFRP ve LRS FRP sarılı dikdörtgen beton numunelerin eksenel basınç davranışları deneysel olarak test edilmiştir. LP kalınlığı, enine kesitin en boy oranı ve LP'nin kopma geriliminin başlıca parametreler olduğu deneyler sonucunda PET LP sargılı kolonların diğerlerine kıyasla daha büyük nihai eksenel şekildeğiştirmeye sahip olduğu görülmüştür. Enine kesitin en boy oranındaki azalma ile birlikte kolonların yük taşıma kapasitesi artmıştır. Deneylerle elde edilen sonuçların farklı beton dayanımlarına sahip beton türleri için geçerli olup olmadığı yapılan çalışmalar sonucunda saptanamamıştır (Wang vd., 2021).

İspir vd. (2021) iç kısımda karbon LP, dış kısımda PET LP kullanılarak hibrit olarak sargılanmış betonun eksenel davranışını belirlemek amacıyla tekrarlı artan yükler altında birtakım deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda LP ile sargılanmış beton için geçerli daha büyük hapsedme gerilmesi gibi genel kuralların hibrit sargılanmış numuneler için geçerli olmadığı tespit edilmiştir .

Sirach (2021) farklı beton dayanımlarına (normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı) sahip betondan üretilmiş 66 adet dairesel numune, farklı tipte (PEN, PET, karbon, cam ve aramid) ve sargı tabaka sayısındaki fiber malzemeler ile sargılanarak monoton artan yükler altında test edilmiştir. Numune boyutları sırasıyla çap ve yükseklik 150x300 mm'dir. Deneyler sonucunda sıkıştırılan beton silindirlerin sargılandığı lif tipinden bağımsız olarak gerilme-şekildeğiştirme davranışı çift doğrusaldır. Beton çekirdeği yeterli bir şekilde sınırlanmadığında LRS LP numunelerde daha belirgin olacak şekilde trilineer tepki oluşmuştur. Bunun nedeni olarak geleneksel LP'lere kıyasla LRS LP'lerin hapsedilme sertliğinin daha küçük olması gösterilmiştir. LP tabaka sayısının artmasıyla ilk beton çatlamasının ardından gerçekleşen dayanım kaybındaki azalma miktarının düşmesine neden olmuştur. LRS LP, geleneksel LP ile kıyaslandığında basınç dayanımında daha az artış olması ile birlikte sünekliği büyük ölçüde artırmıştır. Sargısız betonun dayanımı artıkça betonu sargılamak için gerekli olan tutma seviyesi artar. Gerilme verimliliği geleneksel LP için daha yüksek olmakla birlikte geleneksel LP'lere kıyasla daha düşük güç geliştirmesine sahiptir. Nihai şekildeğiştirme artışı LRS LP için daha yüksektir ve sargı tabaka sayısının artması numune davranışı üzerinde iyileştirici bir etkiye sahiptir (Sirach vd., 2021).

Saleem (2021) 8 adet zayıf detaylı betonarme karesel numune farklı PET LP sargı tabakası ile sargılamanın ardından monoton artan yüklere maruz bırakılarak test edilmiştir. Deneysel çalışmanın sonucunda numunelerde iç çelik donatı ile sınırlanan betonun kararsız genleşmesi kontrolünde PET LP'lerin yüksek etkinliği olduğu görülmüştür. LP levhalar çubuk burkulmasından kaynaklanan bölgesel stres konsantrasyonlarını verimli bir şekilde sürdürmüştür. Streslerden kaynaklı iç beton hasarını dağıtmasıyla sismik güçlendirme için tercih edilebilir olduğunu göstermiştir. Sargı tabaka sayısındaki artışla numunelerin genel tepkisi iyileşmiş olup yüksek eksenel deformasyonlar göstermişlerdir. Sargılama sayesinde beton hasarının etkili şekilde kontrolü sağlanmıştır (Saleem vd., 2021).

Li (2022) beton çatlakları ve demir burkulmasının sebep olduğu korozyon kaynaklı aşındırılmış 16 adet betonarme kolon elektrokimyasal yöntemle farklı derecelerde aşındırıldıktan sonra LRS LP ile güçlendirilmiştir. Farklı korozyon koşulları ve LP hapsedme rijitliklerine sahip numuneler monoton artan yükler altında test edildiklerinde LP ile sargılamanın aşınmış betonarme kolonların pik yükü ve süneklik özelliklerini etkili bir şekilde artırdığı görülmüştür. Enerji hapsedme kapasitesi karbon LP ile güçlendirilmiş betonarme kolonlarınkinden oldukça büyüktür. İnşaat demirindeki korozyon kolonların mekanik özelliklerini etkileyerek demirin burkulmasını hızlandırıp LR ile sargılanmış kolonların basınç dayanımında ve sünekliğinde azalmaya neden olmaktadır. Korozyonlu demir üniform olmayan bir çember şekildegıştırme dağılımına neden olduğu için LP kullanım verimliliğini azaltmıştır. Korozyon hızlarını içeren bir LRS LP şekildegıştırme azaltma faktörü modeli önerilmekle birlikte mevcut durumdaki modelleri doğrulamıştır (Li vd., 2022).

Yuan (2022) LRS LP ile güçlendiren beton kolonların gerilme-şekildegıştırme ilişkisini tahmin etmek için özellikle uniform bir dağılış göstermeyen ve farklı köşeyarıçapına sahip dairesel olmayan kolonların davranışını tahmin etmede kullanılmak için kapsamlı bir veri tabanı kullanılarak bir model önerilmiştir. Önerilen modelde sadece kilit noktaların belirlenmesiyle kalmayıp zirve noktasından sonra meydana gelen davranışları ayırt edebilmek amacıyla eşik sınırlama seviyesi de tanımlanmıştır. Önerilen model kare ve dairesel beton kolonların gerilme-şekildegıştırme eğrilerini tahmin etmede doğru sonuçlar vermekle birlikte nihai mukavemet ve eksenel şekildegıştırme tahmininde mevcut modellerden daha iyi sonuçlar vermiştir (Yuan vd., 2022).

Zhu (2022) hasar derecesi, hapsedilme sertliği ve yükleme oranı gibi etkiler dikkate alınarak hasarlı betonun LRS LP ile sargılanmasının numunenin performansına olan etkisi incelenmiştir. İlk hasar olması nihai dayanımda düşüşe neden olsa da PET LP ile sargılamanın yapılması nihai dayanımda ciddi ölçüde artışa neden olmuştur. Yüksek hasarlı numuneler için bile gerilme verimliliği faktörü yüksek bir değere sahip olmuştur. Yükleme oranlarının betonun ilk basınç dayanımını artırarak sınırlandırılmış betonun yansıma noktası geriliminin artmasına neden olmuştur. Önerilen model, hasarlı betonun LRS LP ile güçlendirilmesi sonucunda elde edilecek gerilme-şekildegıştırme ilişkisini tahmin etmede başarılı olmuştur (Zhu vd., 2022).

Wang (2021) yüksek dayanımlı (60 ve 70 MPa) beton ile üretilen 28 adet dikdörtgen numune farklı LP tipleri (karbon, cam ve LRS) ile sargılanarak monoton artan yükler altında test edilmiştir. LP kopma gerilmesi, kalınlığı ve enine kesit en boy oranı incelenen parametreler arasındadır. LRS LP ile sargılanan kolonlar diğer LP tiplerine kıyasla daha büyük nihai eksenel gerilme değerlerine ulaşmıştır. LP'nin azaltma faktörleri LP'lerin kopma geriliminin artmasıyla hapsetmesinin çember yönünde üniform olmayan davranış sergileme eğiliminde olmasından kaynaklı azalmıştır. LP hapsetme rijitlik oranındaki artış hapsetme etkinliğini artırarak yük taşıma kapasitesinde artışa neden olmuştur (Wang vd., 2021).

Bai (2022) LRS LP (PEN ve PET) ile sargılanmış büyük ölçekli kare kolonlar üzerinde eksenel basıncın test edildiği ilk çalışma olan bu çalışmada farklı köşe yarıçapı ve sargı tabaka sayısına sahip 24-61 MPa beton basınç dayanımına sahip 10 adet numunenin deneyleri sonucunda LP ceketin etkin hapsetme sertliği oranının kolonların eksenel sıkıştırma davranışı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Daha önce önerilen modellere göre numunelerin sıkıştırma tepkisi için daha büyük değerlerde tahmin yapıyor oluşunu ortadan kaldırmak amacıyla kontrol noktolarındaki eksenel gerilme ve şekil değiştirme için azaltma faktörleri dikkate alınarak mevcut model değiştirilmiştir. Geliştirilmiş model ile büyük ölçekli kare kolonlar için iyi tahminler elde edilmiştir (Y.L. Bai vd., 2022).

Zeng (2022) kare kolonlar üzerinde sınırlı sayıda çalışma olduğu düşüncesiyle yapılan bu çalışmada 25-40 MPa beton basınç dayanımına sahip 30 adet kolonun eksenel basınç testleri yapılmıştır. Sargı tabaka kalınlığı, köşe yarıçapı ve numune boyutu dikkate alınan başlıca parametrelerdir. Deneyler, benzer hapsetme düzeyine sahip olması koşuluyla numune boyutunun küçük ve orta boy numunelerde önem teşkil etmediğini ortaya koymuştur. Kare kolonlar için köşe bölgelerinden birinde meydana gelen lif kopması hata modu olarak tanımlanmıştır. PET LP'lerin daha ince olması beton çekirdeğinin daha şiddetli ezilmesine neden olmuştur. Sargılanmış kare kolonların çevresindeki oldukça düzensiz olan yanal şekil değiştirme dağılımı LP kalınlığı veya köşe yarıçapı artırılarak azaltılabileceği ve köşe yarıçapı oranı artırılarak numunelerin enerji emme kapasitesinin artırılacağı söylenmiştir (Zeng vd., 2022).

Literatürde sargılama için PET LP kullanılan çalışmalara ait bilgiler Çizelge 1.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1: Literatürde PET LP kullanılan çalışmaların özeti.

Kaynak	Kesit tipi	Yükleme tipi	Fiber tipi	Parametre	Beton basıncı (MPa)
Fahmy & Wu (2010)	Daire	Monoton, Tekrarlı	Aramid, Cam, Karbon, PET	Fiber tipi, LP kalınlığı	20-50
Dai vd. (2011)	Daire	Monoton	PET, PEN	Fiber tipi, LP kalınlığı	32.5-39.2
Ispir (2015)	Daire	Monoton, Tekrarlı	PET	LP kalınlığı	17.9-22.1
Saleem vd. (2020)	Dikdörtgen, Kare	Monoton	PET	LP sargı tabaka sayısı, Etriye aralığı, Enine kesit en/boy oranı	~20
Wang vd. (2021)	Dikdörtgen	Monoton	Cam, Karbon, PEN, PET	Kesit oranı, LP kalınlığı	60-70
Bai vd. (2022)	Kare	Monoton	PET, PEN	Köşe yarıçapı	24-61
Zeng vd. (2022)	Kare	Monoton	PET	Köşe yarıçapı, LP kalınlığı, Numune boyutu	25-40

2. NUMUNE ÖZELLİKLERİ VE HAZIRLANIŞI

2.1 Giriş

Geleneksel lifli polimer malzemelerin yükleme anında aniden kopmasının ve gevrek davranış sergilemesinin önüne geçebilmek amacıyla yapıların sünekliliğine olumlu katkı sağlayan PET LP kullanılmaktadır(J.G. Dai vd., 2011; Ispir, 2015). PET lifli polimerler ile sargılanarak gerçekleştirilen deneysel çalışmaların büyük bir kısmı normal ya da yüksek beton basınç dayanımına sahip numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir (Y. L. Bai vd., 2022; Wang vd., 2021; Zeng vd., 2022). Yapılan bu çalışmalar mevcut yapı stoğunda bulunan düşük dayanımlı beton basıncına sahip binaları temsil etmekte yetersiz kalmaktadır. Sınırlı sayıda da olsa düşük beton basınç dayanımına sahip numuneler üzerinde güçlendirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Ilki & Kumbasar, 2003). Bu çalışmalardan PET LP ile sargılanan çalışma sayısı oldukça kısıtlıdır. Bu nedenle bu tezde düşük beton basınç dayanımına sahip silindirlerin PET LP ile güçlendirilmesinin ardından, sargılamanın silindirin davranışına olan etkisinin tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Davranışa olan katkısının yanında, lastik olarak kullanılmak için gerekli koşulları sağlamayan atık PET liflerin geri kazandırılmasıyla elde edilmesinden dolayı sargılamada bu malzemenin kullanılması sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Deneyler sonucunda elde edilen verilere göre, sargılama malzemesinin uygun mekanik özelliklere sahip olması halinde uygulanabilirliğine katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Malzemelerin tedariği ve numunelerin hazırlanışı KORDSA tarafından gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu deneysel çalışmada, 150 mm çapına ve 300 mm yüksekliğe sahip beton silindirler enine doğrultuda PET LP ile güçlendirilmelerinin ardından monoton ve tekrarlı artan yüklere maruz bırakılarak davranışları incelenmiştir. Deneyler İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada referans olarak kullanılması amacıyla sargısız olarak üretilen 3 adet numune ile birlikte toplamda 17 adet numune üretilmiştir. LP sargı tabaka sayısı (tek

ve çift katlı), lif yoğunluğu (düşük ve yüksek yoğunluklu) ve yükleme tipi (monoton ve tekrarlı artan) olacak şekilde üç farklı parametre dikkate alınmıştır. Türkiye’deki mevcut yapı stokuna uygun olması amacıyla numuneler çok düşük dayanımlı (ELCS) betonlardan imal edilmiştir. 28 günlük beton basınç dayanımı 3,2 MPa’dır.

Sargılama bölgesinde sargılama boyunun yetersiz olmasından kaynaklı sıyrılma oluşmaması için yaklaşık 260 mm bindirme boyu seçilmiştir. PET LP karbona kıyasla daha kalın olduğundan bindirme mevcut çalışmalarda karbon için belirlenenden daha büyüktür. Monoton artan yükler altında test edilen numunelerin bazılarında sıyrılmalar meydana gelmiştir. Bunun nedeni PET kumaşların kalın olmasından kaynaklı epoksiyi yeterince absorbe edememesinin olduğu düşünülmektedir.

Numuneler adlandırılırken X-Y-m-n formunda bir sıralama yapılmıştır. X, ELCS (çok düşük dayanımlı) olmak üzere beton dayanımını temsil ederken; Y, PHD (high density) ve PLD (low density) lifli polimer kumaşın lif yoğunluğunu temsil etmektedir. LP sargı tabaka sayısı ve aynı örneğe ait numara sırasıyla m ve n harfleriyle gösterilmiştir.

2.2 Numune Üretimi

Numuneler Kordsa tarafından hazırlanan hazır beton karışımı kullanılarak hazırlanmıştır. Hazır silindir kalıp kullanılarak numunelere silindir form kazandırılmıştır. İstenilen formu kazanan numunelerin üst ve alt ucuna, deney anında numuneye eksenel doğrultuda gelen yüklerin numune yüzeyine eşit bir şekilde dağıtılması amacıyla başlık yapılmıştır.

2.3 Numunelerin LP ile Güçlendirilmesi

Düşük dayanımlı olarak üretilen beton silindirler, üretimden 300 gün sonra PET lifli polimer kumaşlar ile sargılanmıştır. Sargılama işlemi sırasında kullanılan Kratos Prime Resin iki bileşenden oluşan epoksi esaslı bir reçinedir. Kolay karıştırılmasıyla uygulama kolaylığı sağlamakla birlikte elle doyurmaya uygundur. Yüksek mekanik özelliklere sahip reçine 73/27 (solvent) karışım oranına sahip olacak şekilde, reçine ve solvent homojen bir dağılıma ulaşana kadar mikser yardımıyla karıştırılmıştır. Numunelerin yüzeyi toz, kir gibi bütün yabancı maddelerden arındırıldıktan sonra ince uçlu fırça ile yüzeye epoksi reçine sürülmüştür. Yüzey ve PET levhalar ayrı ayrı epoksi ile doyurulduktan sonra yapıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.1).

PET levhalar yapıştırma işlemi öncesinde 500 mm genişliğinde ve 300 mm eninde olacak boyutlarda kesilerek laboratuvarda hazırlanmıştır. Levhalar numunelerin yüzeyine epoksi karışımının sürülmesiyle elle yapıştırılmıştır. Bindirme payının yapılan hesaplar sonucunda yaklaşık olarak 260 mm uzunluğuna sahip olduğu hesaplanmıştır. Bindirme boyu, silindirin çevresinin yarısı olacak şekilde belirlenmiştir (Y. L. Bai vd., 2019). PET levhalar ıslak döşeme tekniği ile numunelerin yüzeyine uygulanmıştır. Liflerin yüzeye yapıştırılması sırasında liflerin doğrultuları önem arz ettiğinden yapıştırma sırasında liflerin doğrultularının bozulmamasına özen gösterilmiştir.

Mevcut çalışmalardan bilindiği üzere yükleme esnasında numunelerin üst ve alt uçlarında lifli polimer malzeme yüzeyden ayrılacaktır. Hasarların numunenin orta bölgesinde meydana gelmesi istenmektedir. Bu amaçla PET levhalar ile sargılamanın ardından numunenin üst ve alt uçları 32 mm genişliğinde karbon LP levhalar ile ekstra güçlendirilmiştir. Bu ilave güçlendirmeyeyle erken meydana gelebilecek arızalarının önlenmesi amaçlanmıştır (Ispir, 2015). Numunenin üst ve alt yüzeyi, deney anında uygulanan sıkıştırma yükünün yüzeye eşit bir şekilde dağılabilmesi amacıyla yüksek dayanımlı çimento ile düzgün bir yüzey haline getirilmiştir.

Numunelere yükleme yapıldıktan sonra deney sırasında az sayıdaki numunenin yüzeyindeki LP'lerin bindirme bölgesinden ayrıldığı gözlemlenmiştir. Bu durumun, PET lifli polimerin kalın olmasından kaynaklı levhaların yapıştırılması sırasında kullanılan epoksi reçine ile yeterli miktarda doyurulamamasından kaynaklanabileceği düşünülerek oluşan sıyrılmaların önüne geçebilmek amacıyla sonraki numunelerde bindirme bölgesine ekstra epoksi uygulaması yapılmıştır.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 2.1: Numunelerin ıslak döşeme tekniği ile sargılanması: (a) Epoksinin mikser kullanılarak homojen hale gelinceye kadar karıştırılması; (b) PET liflerin 300 mm x 500 mm boyutlarında kesilmesi; (c) Numune yüzeyinin epoksi ile doyurulması; (d) PET lifin epoksi ile doyurulması; (e) Lifin numune yüzeyine yapıştırılması; (f) Numunenin alt ve üst uçlarının CFRP ile sarılması.

3. MALZEME ÖZELLİKLERİ

3.1 Giriş

Türkiye’deki mevcut yapıların sahip olduğu düşük beton basınç dayanımına uygun olması amacıyla numunelerin 28 günlük silindir dayanımları ELCS için 3.2 MPa olacak şekilde üretilmiştir. Bu bölümde numune imalatında kullanılan malzemelerin özellikleri açıklanmıştır.

3.2 Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler

3.2.1 Beton

Çok düşük dayanımlı beton kullanılarak toplam 17 adet silindir numune üretilmiştir. Beton karışım oranları Çizelge 3.1’de gösterilmiştir. 1.14 su/çimento oranına sahip olan karışımda CEM I 42.5R sahip Portland çimentosu kullanılmıştır.

Çizelge 3.1: Beton karışım oranları .

Karışım Bileşenleri	ELCS
Doğal Kum (kg)	341
Çakıl 1 (kg)	765
Çakıl 0 (kg)	732
Su (kg)	217
CEM I 42.5R (kg)	190
Su/Çimento Oranı	1.142

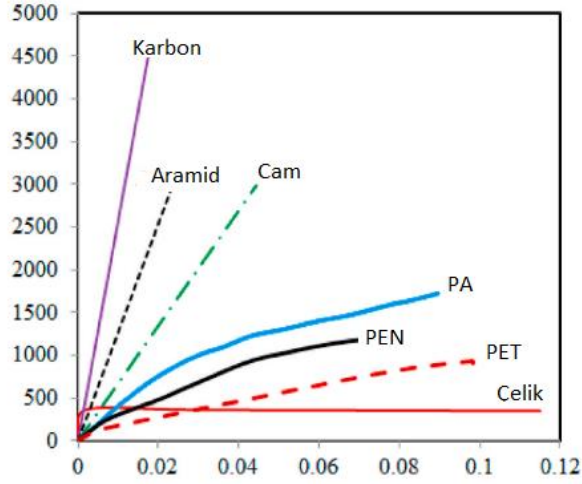
Sertleşmemiş betonun kıvamını belirlemek amacıyla beton çökme testleri yapılmıştır. Taze beton 3 aşamada çökme konisine doldurulmuştur. Her aşamanın sonrasında demir çubukla 25 defa şişlenerek koniye iyice yerleşmesi sağlanmıştır. Koni tamamen doldurulduktan sonra yavaşça çekilmesinin ardından oluşan çökme miktarı şerit metre kullanılarak ölçülmüştür. Çökme deneyinin ardından ulaşılan sonuçlar Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2: Slump testi sonuçları .

	ELCS
Birim Ağırlık (kg/m ³)	2327
Slump (cm)	20
Hava Oranı	0,90%

3.2.1 Güçlendirme malzemeleri

Günümüzde yapıların taşıyıcı elemanlarının mukavemet ve süneklilik değerlerinin artırılması amacıyla yapıların güçlendirilmesinde kullanılan sargılama yöntemi, çok tercih edilen bir uygulama haline gelmiştir. Bunun nedeni bu uygulamayla mevcut yapıların yıkılıp yeniden inşa edilmesi için harcanan zaman ve maliyetin önüne geçilmesi gösterilebilir. Mevcut yapılarda uygulanabilirliği kolaydır ve uygulama sırasında üretimin durmasına sebep olmamaktadır. Sargılama yöntemi ile yapıların, korozyon ve nem gibi çevre koşullarına karşı direnci artmaktadır (Sulyman vd., 2016). Yapıların dıştan sargılanarak güçlendirilmesinde lifli polimer malzemeler kullanılmaktadır. Bu amaçla kullanılan malzemelerin başında geleneksel LP olarak bilinen karbon, cam ve bazalt gelmektedir. Geleneksel ve LRS LP türleri ile geleneksel çeliğin tipik çekme gerilmesi şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Lifli polimer malzemeler, çelik ile karşılaştırıldığında daha yüksek dayanıma sahiptir. Sağladıkları yüksek dayanım değerleriyle deprem bölgesindeki yapıların deprem yüküne maruz kaldıklarında sergiledikleri davranışını iyileştirmektedir.



Şekil 3.1: FRP lifli polimer tiplerinin çekme gerilmesi-şekildeğiştirme tepkilerinin karşılaştırılması (Ye vd., 2021) .

LRS LP kompozitler aynı geleneksel LP'lerde olduğu gibi elyafların reçine matrisine gömülmesiyle elde edilir. Açığa çıkan yüklerin taşınmasında fiziksel durumu kontrol eden en önemli bileşen lifler olmakla birlikte, matrisler liflerin birlikte hareket etmesini sağlar. LRS LP kompozitlerinde PA, PEN ve PET lifleri bulunmaktadır (J.G. Dai vd., 2011).

LP kompozitlerin mekanik özelliklerini aslında içerdikleri lifler belirliyor olsa da matris, liflerin birlikte hareket etmesini sağladığından kompozitler için önem teşkil etmektedir. En yaygın kullanılan termoplastik polimer reçinesi olan PET'ler sahip oldukları düzenli molekül yapıları sayesinde iyi bir kristallik sergiler. LRS LP kompozitlerin sahip oldukları büyük uzamalarına rağmen elastik modülü düşüktür. Geleneksel LP'den farklı olarak çift doğrusal gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi (E1 başlangıç elastik modülü ve E2 ikinci aşama elastik modülü) sergilemektedir. Geleneksel LP kompozitin dayanıklılık özellikleri ile ilgili çalışmalar yapılmıştır (Liu 2020) ve bununla birlikte alkaliliğe karşı direncinin cam lifli polimerlerden daha büyük olduğu bilinmektedir (Ye vd., 2021).

Yapı elemanlarının güçlendirilmesi amacıyla LRS LP kullanılmaktadır. Bununla beraber farklı lifli polimer tiplerin sahip olduğu güçlü özellikleri ön plana çıkarılarak farklı tip polimerlerin kullanıldığı hibrit çalışmalar yapılmaktadır (İspir, 2021).

PET LP'lerin geleneksel LP malzemelerle karşılaştırıldığında çok daha yüksek şekildeğiştirme kapasitelerine sahip olmaları bu çalışmada kullanılmasının

sebeplerinden biridir. Çizelge 3.3’de deneysel çalışmalar sırasında kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerine yer verilmiştir.

Çizelge 3.3: Deneyde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri .

Fiber	Karbon	PET PLD	PET PHD
Çekme Dayanımı (MPa)	3430	477	322
Elastisite Modülü (MPa)	230000	13062/5175	8929/2912
Kopmada uzama şekildeğiştirme (%)	1,49	7,53	8,49
Kalınlık (mm)	0,165	0,65	1,30

3.3 Malzeme Testleri

3.3.1 Kupon çekme testleri

Kupon testleri yapılmak üzere 250x300 mm boyutlarında PET LP şeritler kesilmiştir. Hazırlanan 300 gr epoksi reçine, asetat (polyester tipi olan termoplastik malzeme) yüzeyine sürüldükten sonra PET LP yapıştırılarak epoksi ile doyurulmuştur. Kuponların sertleşmesi için birkaç gün beklenildikten sonra 15x250 mm boyutlarında şeritler halinde kesilmiştir. Kupon şeritlerinin üzerindeki asetat plaka yüzeydeki liflere zarar vermeyecek şekilde çıkartıldıktan sonra daha öncesinde hazırlanan metal parçalar şeritlerin her iki ucuna yapıştırılmıştır. Metal parçaların yapıştırılmasının amacı deney anında şeritlerin en çok basınca maruz kaldığı uçlarından kopmasının önüne geçilmesidir. Kuponlardaki kopmanın orta bölgelerde oluşması istendiğinden uç kısımlarının ekstra güçlü olması için metal parçalar yapıştırılmıştır. Kuponların hazırlanışı ve testlerine ait görsellere Şekil 3.2’de yer verilmiştir. MTS marka çekme cihazı (60 ton kapasiteli) kullanılarak kuponların çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kupon çekme deneyleri ASTM D3039 Standartına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

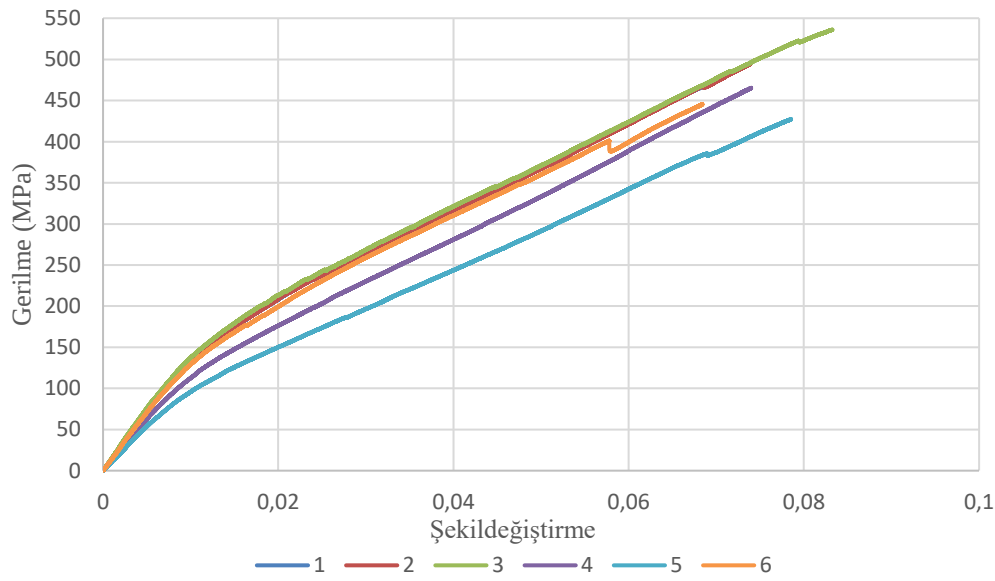


(i)

Şekil 3.2: PET LP kupon testi: (a) Pet levhaların kesilmesi; (b) Asetat yüzeyine epoksi sürülmesi; (c) Asetat yüzeye yapıştırılan PET levhanın epoksi ile doyurulması; (d) Epoksinin donmasının ardından levhanın istenilen boyutlara getirilmesi; (f) Levhaların uçlarına metal tabakaların yapıştırılması; (g) PET levhaların yüzeyine şekildeğiştirmeölçer yapıştırılmasının ardından düzeneğe

yerleştirilmesi; (h) Levhaların çekme etkisine maruz bırakılması; (ı) Çekme testleri sonrası levhaların son hali .

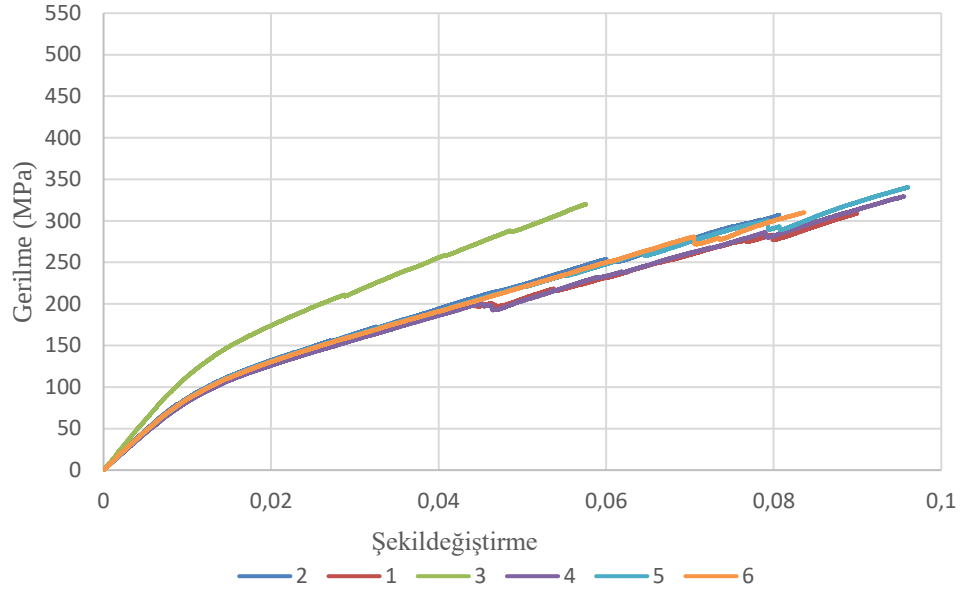
Numunelerin düzlem gerilme özelliklerini belirlemek amacıyla 15 mm genişliğinde ve 250 mm uzunluğunda altı adet özdeş PET LP düz kupon üretilmiştir. Üretilen PET levhaların ASTM D3039 standardına uygun olarak kupon testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan kupon testi sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Düşük yoğunluklu lifli polimerler için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi .

Çizelge 3.4: PLD liflerin kupon testi sonuçları .

Numune	Dayanım	Kopma uzama	E1 (MPa)	E2 (MPa)
1	485,7	0,0724	12654	5271
2	497,2	0,0744	14296	5259
3	536,3	0,0833	14490	5173
4	466,1	0,0742	12279	5334
5	427,6	0,0787	10443	4786
6	447,1	0,0688	14211	5227
ort	476,7	0,0753	13062	5175



Şekil 3.4: Yüksek yoğunluklu lifli polimerler için gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi .

Çizelge 3.5: PHD liflerin kupon testi sonuçları .

Numune	Dayanım	Kopma uzama	E1 (MPa)	E2 (MPa)
1	312	0,0912	8523	2532
2	309,9	0,0817	9469	2870
3	320,3	0,0577	9186	3919
4	332,4	0,0967	8379	2619
5	343,5	0,0972	9078	2696
6	313,1	0,0847	8940	2835
ort	321,8	0,0849	8929	2912

4. DENEY DÜZENEGİ

4.1 Giriş

Hazırlanan numunelerin tamamına ait deneyler, İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Deney anında, cihazdan gelen yükün numuneye tam merkezden gelecek şekilde aktarılması için numunenin, numunenin üst kısmında konumlandırılan levhanın ve datalogger ölçüm aletinin test cihazının tam merkezinde bulunmasına dikkat edilmiştir. Deney aletinin üst tablası hareketli olduğundan deney, numune sabit kalacak şekilde sıkıştırıldıktan sonra başlatılmıştır.

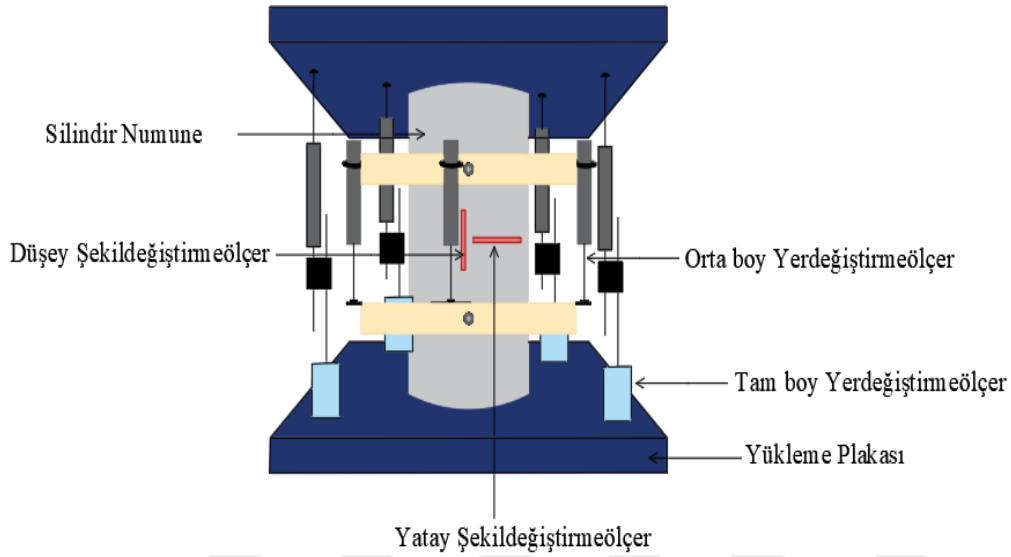
Monoton ve tekrarlı artan yüklemeler için 5000 kN yük kapasitesine sahip Instron test cihazı kullanılmıştır. Yükleme hızı 0,01 mm/s'dir. Yüklemeler, tüm numuneler için numuneler yapı bütünlüğünü kaybedene kadar devam ettirilmiştir. Deneylerde yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme ölçerlerden alınan veriler öncelikle Switch box'a ardından datalogger ile bilgisayara bağlanmıştır. Kullanılan Switch box'ın ve dataloggerin modeli sırasıyla TML-ASW-50C ve TMLTDS-303'dür.

Numunelerde yükleme anında enine ve boyuna doğrultuda meydana gelebilecek şekildeğiştirmeleri ölçmek amacıyla şekildeğiştirmeölçerler (straingage) kullanılmıştır. 60 mm uzunluğa sahip olan şekildeğiştirmeölçerler deney öncesinde numune yüzeyine çok amaçlı yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmıştır. Yapıştırma işlemi gerçekleştirilmeden önce numune yüzeyi zımpara yardımıyla pürüzsüz hale getirilmiştir. Şekildeğiştirmeölçerler bindirme bölgesine olabildiğince uzak olacak şekilde yaklaşık olarak 8'er cm/ 120° aralıklar ile yapıştırılmıştır. Toplamda 4 adet şekildeğiştirmeölçerden yarısı dikey doğrultuda diğer yarısı yatay doğrultuda konumlandırılmıştır.

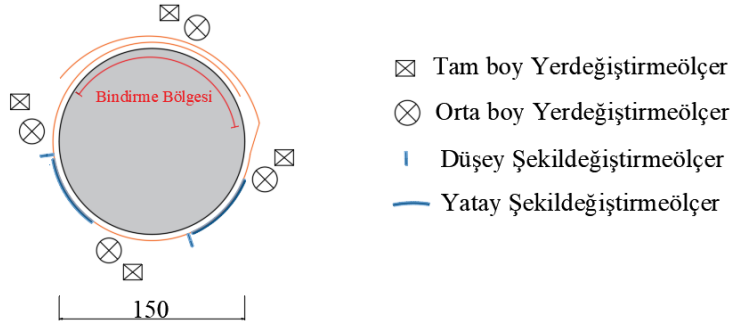
Eksenel şekildeğiştirmeler, 50 mm kapasiteli LVDT'ler (lineer değişken deplasmanlı transdüserler)/yerdeğiştirmeölçer kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümler hem numunenin orta yüksekliğinde (150 mm ölçü uzunluğu ile) hem de tam yüksekliğinde yapılmıştır.

Orta yükseklikteki ölçüm boyunun tam olarak 15 cm olması için ara mesafeli çerçeveler kullanılmıştır (Şekil 1). LVDT'ler dışında düşey ve yatay olarak yapıştırılan şekildeğiştirmeölçerlerle de ölçümler yapılmıştır.

Yüklemelerin ardından yerdeğiştirmeölçerlerden (transdüserlerden) okunan veriler ölçüm boylarına bölünüp boyutsuz hale getirildikten sonra değerlendirilmiştir.



Şekil 4.1: Deney düzeneğinin şematik gösterimi .



Şekil 4.2: Yerdeğiştirme ve şekildeğiştirmeölçerlerin konumlandırılması .

4.2 Deney Düzeneğinin Kurulması

Sargılanmış numunelerin üzerine şekildeğiştirmeölçerler yapıştırıldıktan sonra yüzeye olabildiğince düzgün yapışması amacıyla bir süre beklenildikten sonra deney düzeneği kurulmuştur. Numune deney cihazına yerleştirilmeden önce ilk olarak istenildiği şekilde orta boyun düzgün ayarlanabilmesi için kare kesitli çerçeveler numunenin orta

bölgesine yerleştirilmiştir. Numune tam merkezinde kalacak şekilde deney cihazına yerleştirildikten sonra 4 adet yerdeğiştirmeölçer çerçeve yüzeyine ve bunlar dışında kalan 4 adet yerdeğiştirmeölçer de tam boyda ölçüm yapabilmesi için ayarlanabilir miktanatlara yerleştirilmiştir. Yerdeğiştirmeölçer’lerden gelen 8 adet ve şekildeğiştirmeölçerlerden gelen 4 adet olmak üzere toplamda 12 adet kablo Switch box cihazına bağlanmıştır. Su terazisi kullanarak bütün aletlerin dengede olduğu kesinleştirildikten sonra deney başlatılmıştır.



Şekil 4.3: Ölçüm düzeneği .



Şekil 4.4: Deney düzeneğinin genel görünümü .



5. DENEY SONUÇLARI

5.1 Giriş

Çok düşük dayanımlı beton kullanılarak üretilen toplam 17 adet silindir numuneye ait deney sonuçları bu bölümde sunulmuştur. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ve göçme mekanizmaları değerlendirilirken lifli polimer sargı tabaka sayısına göre numuneler ayrı başlıklar altında verilmiştir. Grafiklerde düşey eksen MPa cinsinden gerilmeyi temsil ederken yatay eksen şekildeğiştirmeyi temsil etmektedir.

28 günlük standart silindir basınç dayanımı 3,2 MPa'lık betondan üretilen 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğindeki 17 adet silindir numune eksenel basınç etkisi altında test edilmiştir. Referans numune olarak adlandırılan lifli polimer kumaş ile sargılanmamış 3 adet numune haricindeki 17 adet numune 1 ve 2 kat PET lifli polimer kumaş ile sargılanarak güçlendirilmiştir. Numunelere ait özet bilgiler Çizelge 5.1'de özet halinde sunulmuştur. Numunelere ait yerdeğiştirme miktarları değerlendirilirken sadece orta boyda yer alan yerdeğiştirmeölçerler dikkate alınmıştır.

Çizelge 5.1: Numunelere ait özet bilgiler.

Numune Adı	Çap (mm)	Yükseklik (mm)	f_{cc} (MPa)	Yükleme	LP Sargı Tabaka Sayısı
ELCS-PHD-M-1-1	158,6	311	3,2	M	1
ELCS-PHD-M-1-2	159,2	303	3,2	M	1
ELCS-PLD-M-1-1	155	310	3,2	M	1
ELCS-PLD-M-1-2	157	306	3,2	M	1
ELCS-PHD-M-2-1	162	304	3,2	M	2
ELCS-PHD-M-2-2	162	305	3,2	M	2
REF-ELCS-M-1	151	306	3,2	M	0
REF-ELCS-M-2	151,5	307	3,2	M	0
ELCS-PLD-C-1-1	156	312,3	3,2	C	1
ELCS-PLD-C -1-2	156	310	3,2	C	1
ELCS-PLD-C-2-1	158,8	307,5	3,2	C	2
ELCS-PLD-C-2-2	158,7	308	3,2	C	2
ELCS-PLD-C-2-3	159,7	312	3,2	C	2
ELCS-PLD-C-2-4	158	311	3,2	C	2
REF-ELCS-C-1	152	298,3	3,2	C	0

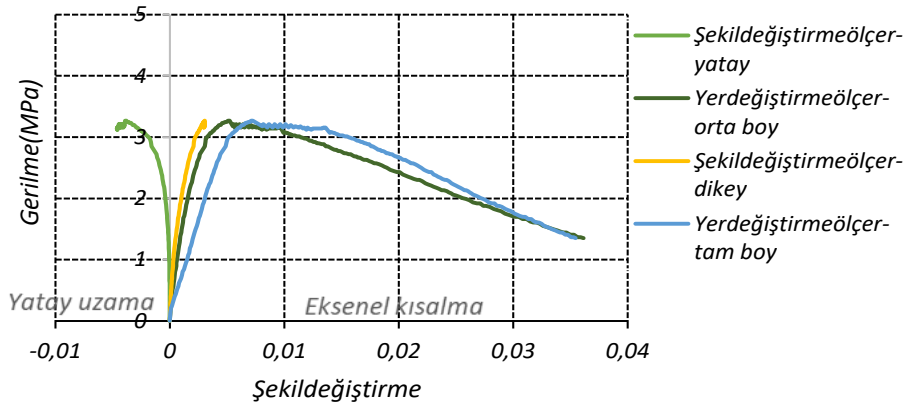
M: Monoton artan yüklenme; C: Tekrarlı artan yüklenme.

5.2 Monoton Artan Yüklemler için Deney Sonuçları

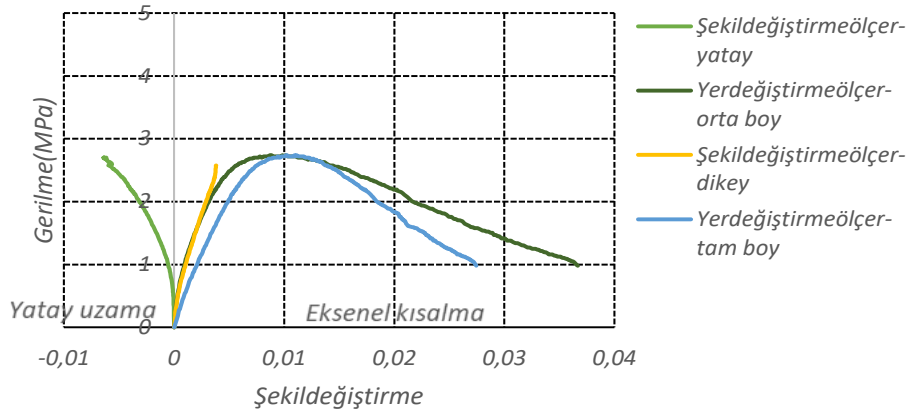
5.2.1 Referans numunelere ait deney sonuçları

REF-ELCS-M-1 ve REF-ELCS-M-2

Çok düşük dayanımlı betondan üretilen numunelerin 28 günlük standart silindir basınç dayanımı 3,2 MPa değerine sahiptir. Çok düşük dayanımlı numunelerden iki tanesi referans eleman olarak sargılama yapılmaksızın monoton artan yükler altında deneyleri gerçekleştirilmiştir. Referans elemana ait gerilme-eksenel şekil değiştirme ilişkisi Şekil 5.1’de verilmiştir. Referans numuneler birbirleriyle uyumlu bir davranış sergilemiş olup sargılamanın davranışa olan etkisini incelemek adına bu iki numune monoton artan yükler altında test edilen tüm numuneler için referans olarak değerlendirilmiştir. Deney sırasında gerilme değeri yaklaşık olarak 2,5 MPa’a ulaştığında o ana kadar ki en belirgin çatlama sesleri duyulmuştur. Betonun maksimum dayanıma ulaşmasının ardından yüzeyde dökülmeler meydana gelmiştir. Yüzeydeki dökülme ile beraber şekil değiştirme ölçerler yüzeyden ayrıldığından yer değiştirme ölçerlerden’lerden elde edildiği kadar veri şekil değiştirme ölçerlerden alınamamıştır. Deney sonrasında elde edilen veriler Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5. 1: REF-ELCS-M numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme ilişkisi .



Şekil 5.1 (devam): REF-ELCS-M numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi .

Numunenin ulaşabildiği maksimum basınç değeri ortalama 3 MPa'a karşılık ulaştığı orta boyda konumlandırılmış yerdeğiştirmeölçerden elde edilen eksenel kısılma 0,0051 değerine sahiptir. Bu basınç değerine karşılık dikey şekildeğiştirmeölçerlerden elde edilen eksenel kısılma değeri 0,0030 iken yataydaki şekildeğiştirmeölçerlerden elde edilen enine uzama değeri 0,038'dir. Referans numunenin bütünlüğünü kaybetmeden taşıyabildiği maksimum yük değeri REF-ELCS-M-1 için 58,5 kN'dur. REF-ELCS-M-1 numunesinde her iki şekildeğiştirmeölçerde 3,3 MPa değerine kadar düzgün çalışmıştır. Grafikte bu değerden sonraki kısım kesilmiştir. Referans numunelerin sahip olduğu poisson oranlarının ortalaması 2,28 değerine sahiptir. Numunelerin yükleme sonrasına ait görünümleri Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2: REF-ELCS-M numunelerinin deney sonrası görünüşleri .

Çizelge 5. 2: REF-ELCS-M numunelerine ait deney sonucunda elde edilen veriler .

Numune	P_{maks} (ton)	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{cc}
REF-ELCS-M-1	58,5	3,3	0,005
REF-ELCS-M-2	49	2,7	0,009

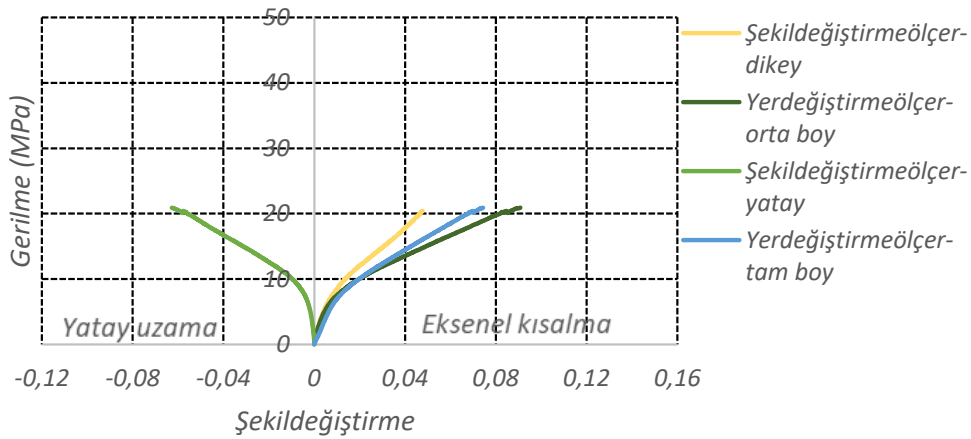
P_{maks} : En büyük yük değeri; σ_{maks} : En büyük gerilme değeri;
 ϵ_{cc} : En büyük gerilme anında orta boydaki şekil değiştirme değeri

5.2.2 Sargılı numunelere ait deney sonuçları

5.2.2.1 Tek kat sargılı numuneler

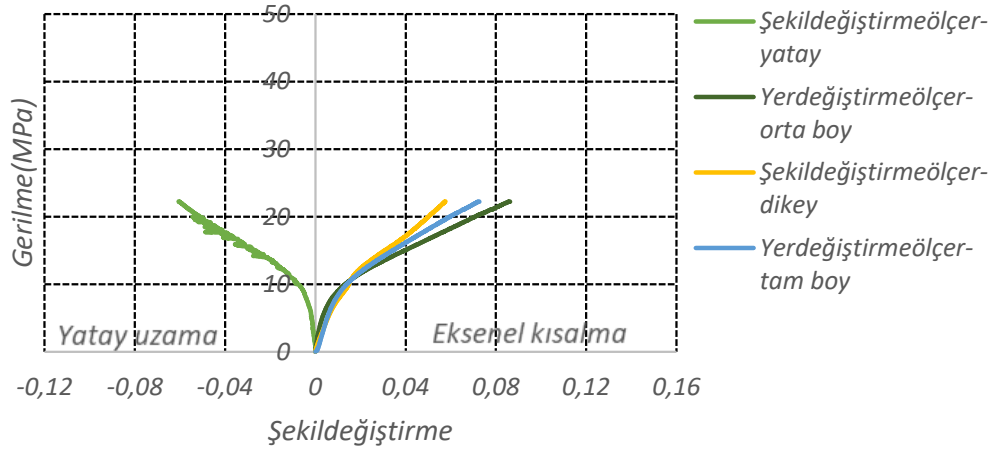
- ELCS-PLD-M-1-1 ve ELCS-PLD-M-1-2

Düşük lif yoğunluğuna sahip lifli polimer kumaş ile tek katlı olarak sargılanmış numunelere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 5.3'te verilmiştir. PLD (low density) lifli polimer levhanın düşük lif yoğunluğunda olduğunu temsil etmektedir. Referans numuneler ile karşılaştırıldığında her iki numunede de hem gerilme değerleri hem de şekil değiştirme kapasiteleri büyük ölçüde artış göstermiştir. Aynı özelliklere sahip iki numune birbirleriyle benzer davranış sergilemiştir.



a)

Şekil 5.3: ELCS-PLD-M-1 numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme ilişkisi:
a)ELCS-PLD-M-1-1; b)ELCS-PLD-M-1-2 .



b)

Şekil 5.3 (devam): ELCS-PLD-M-1 numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi: a)ELCS-PLD-M-1-1; b)ELCS-PLD-M-1-2 .

Grafiklerde tüm boydaki (300 mm) ve çerçeveler kullanılarak ölçüm yapılan orta boydaki (150 mm) yerdeğiştirmeölçerden elde edilen verilerin yanısıra 60 mm ölçüm boyuna sahip şekildeğiştirmeölçerler kullanılarak veriler elde edilmiştir. Grafiklerde boyuna ve enine doğrultudaki davranışlar birlikte gösterilmiştir. Numunelerin yükleme sonrasındaki görünümüne Şekil 5.4'te ve numunelere ait deney sonucunda elde edilen veriler Çizelge 5.3'te yer verilmiştir.



Şekil 5.4: ELCS-PLD-M-1 numunelerinin yükleme sonrasındaki görünümü .

ELCS-PLD-M-1-1 numunesin maksimum taşıyabildiği yük kapasitesine karşılık basınç değeri 20,9 MPa'dır. Bu basınç değerine karşılık orta boydaki yerdeğiştirmeölçerlerden ölçülen eksenel kısılma değeri 0,0909 ve yataydaki

şekildeğiştirmeölçerlerden elde edilen eksenel uzama 0,0628'dir. Şekildeğiştirmeölçerler en büyük basınç dayanımına ulaşmadan numunenin yüzeyinden ayrıldığından, ayrılma anına kadar ölçebildiği en büyük değer 0,0477 dikkate alınmıştır. Poisson oranı 1,21 değerine sahiptir. Dikeydeki şekildeğiştirmeölçer 20,4 MPa'a ulaştığında diğer üçü ise 20,9 MPa dayanıma ulaşmış olup bu andan sonra doğru ölçüm yapamadığından kesilmiştir.

ELCS-PLD-M-1-2 numunesin maksimum taşıyabildiği yük kapasitesine karşılık gelen basınç değeri 22,3 MPa'dır. Bu basınç değerine karşılık orta boydaki yerdeğiştirmeölçerlerden ölçülen eksenel kısalma değeri 0,0861 ve yataydaki şekildeğiştirmeölçerlerden elde edilen eksenel uzama 0,0606'dir. Poisson oranı 1,15 değerine sahiptir.

Çizelge 5.3: ELCS-PLD-M-1 numunelerine ait deney sonucunda elde edilen veriler .

Numune	P _{maks} (ton)	σ _{maks} (MPa)	ε _{cc}	ε _{rup, hoop} / ε _{f, u} (k _e)
ELCS-PLD-1-1	394,5	20,9	0,091	0,84
ELCS-PLD-1-2	431,8	22,3	0,086	0,81

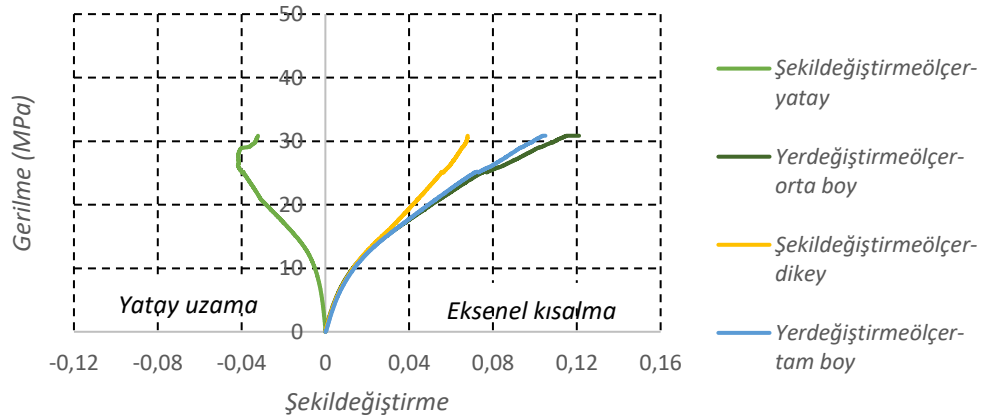
ε_{rup,hoop}: maksimum kopma şekildeğiştirmesi, ε_{f,u}: kupon testi sonucunda PET LP için elde edilen çekme gerilmesi değeri

- ELCS-PHD-M-1-1 ve ELCS-PHD-M-1-2

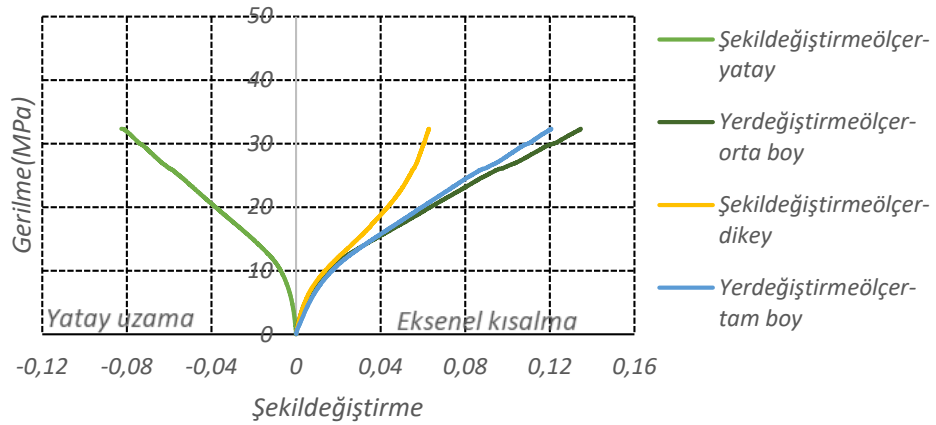
Yüksek lif yoğunluğuna sahip PHD lifli polimer kumaş ile tek kat sargılanarak güçlendirilmiş numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme grafiği Şekil 5.5'te verilmiştir. PHD (high density) lifli polimer kumaşın yüksek lif yoğunluğuna sahip olduğunu temsil etmektedir. Referans numuneler ile karşılaştırıldığında her iki numunede de hem dayanım değerleri hem de şekildeğiştirme kapasiteleri büyük ölçüde artış göstermiştir. Aynı özelliklere sahip iki numune birbirleriyle benzer davranış sergilememiştir. Bu nedenle daha büyük dayanım değerine ve daha fazla şekildeğiştirme kapasitesine ulaşan ELCS-PHD-M-1-4 numunesi karşılaştırılmalarda esas alınmıştır. ELCS-PHD-M-1-1 numunesi yükleme sırasında 18,6 MPa basınç değerine ulaştığında PET LP bindirme bölgesinden ayrılmaya başlamıştır. Muadili kadar yüksek kapasiteye ulaşamamasının nedeninin bindirme bölgesinde oluşan bu ayrılma olabileceği düşünülmüştür. 10-15 sn devam eden ayrılmanın ardından

numunenin alt kısmında yaklaşık 25 cm yırtılma gözlemlenmiştir. Deney sürecinde numunedeki en belirgin sesler basınç gerilmesi değeri 20,8 MPa seviyelerine ulaştığında duyulmuştur. Bu seslerin sonrasında orta bölgede 15 cm yüksekliğinde lifli polimer yırtılmıştır. Bu andan itibaren numunede dayanım kaybı başlamıştır.

ELCS-PHD-M-1-2 numunesinde deney boyunca ilk belirgin ses basınç dayanımı 25 MPa değerine ulaştığında duyulmuştur. Basınç dayanımı 33,2 MPa ulaşıldığında şiddetli bir sesle beraber numunede patlama gerçekleşmiştir.



a)



b)

Şekil 5.5: ELCS-PHD-M-1 numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi:

a)ELCS-PHD-M-1-1; b)ELCS-PHD-M-1-2 .

Grafiklerde tüm boydaki (300 mm) ve çerçeveler sayesinde orta boydaki (150 mm) yerdeğiştirmeölçerden elde edilen verilerin yanısıra 60 mm ölçüm boyuna sahip şekildeğiştirmeölçerler kullanılarak elde edilen veriler de kullanılmıştır. Grafiklerde

boyuna ve enine doğrultudaki davranışlar birlikte gösterilmiştir. ELCS-PHD-M-1-1 ve ELCS-PHD-M-1-2 numunelerinin deneyden sonraki görüntüleri Şekil 5.6’da ve deney sonrasında elde edilen verileri içeren özet bilgiler Çizelge 5.4’te verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.6: ELCS-PHD-M -1 numunelerinin yükleme sonrasındaki görünüşleri:

a) ELCS-PHD-M-1-1; b) ELCS-PHD-M-1-2 .

ELCS-PHD-M-1-1 numunesi maksimum 30,9 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır ve bu değere karşılık ulaştığı eksenel şekildeğiştirme değeri 0,1211’dir. Numunenin yüzeyindeki şekildeğiştirmeölçerlerden elde edilen enine şekildeğiştirme değeri 0,0639 olmak ile birlikte poisson oranı 1,31 değerine sahiptir. Aynı özelliklere sahip iki numune değerlendirildiğinde numunelerin bütünlüğünü kaybetmeden ulaşabildiği en büyük yük değeri 614 kN’dur.

ELCS-PHD-M-1-2 numunesi maksimum 33,9 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır ve bu değere karşılık ulaştığı eksenel şekildeğiştirme değeri 0,1444'dür. Numunenin yüzeyindeki şekildeğiştirmeölçerlerden elde edilen enine şekildeğiştirme değeri 0,0639 olmak ile birlikte poisson oranı 1,31 değerine sahiptir. 32,3 MPa'dan sonraki ölçümler düzgün olmadığından bu değerden sonraki değerlere kesilip grafikte yer verilmemiştir. Aynı özelliklere sahip iki numune değerlendirildiğinde numunelerin bütünlüğünü kaybetmeden ulaşabildiği en büyük yük değeri 675 kN'dur.

Çizelge 5.4: ELCS-M-PHD-1 numunelerine ait deney sonucunda elde edilen veriler.

Numune	P_{maks} (ton)	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{cc}	$\epsilon_{rup, hoop}/\epsilon_{f, u}$ (k_{ϵ})
ELCS-PHD-M -1-1	614	30,9	0,121	0,49
ELCS-PHD-M-1-2	675	33,9	0,144	0,97

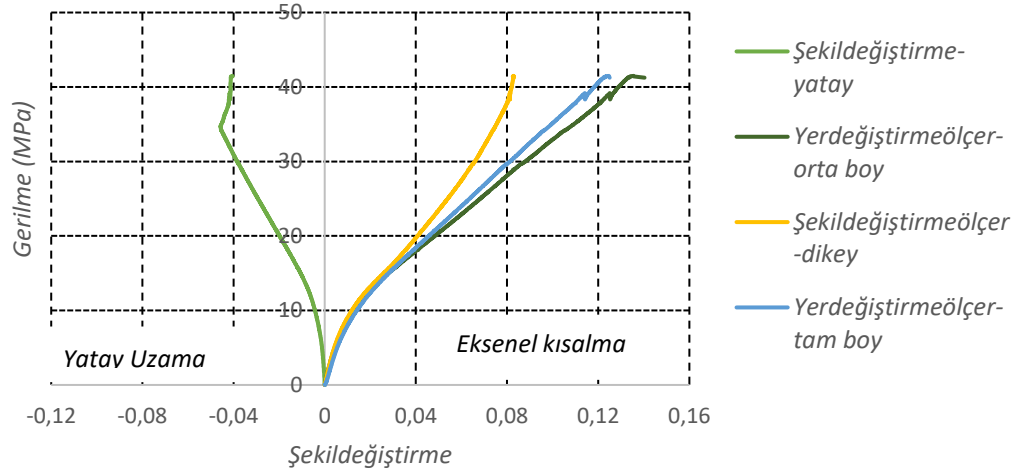
5.2.2.2 Çift kat sargılı numuneler

- ELCS-PHD-M-2-1 ve ELCS-PHD-M-2-2

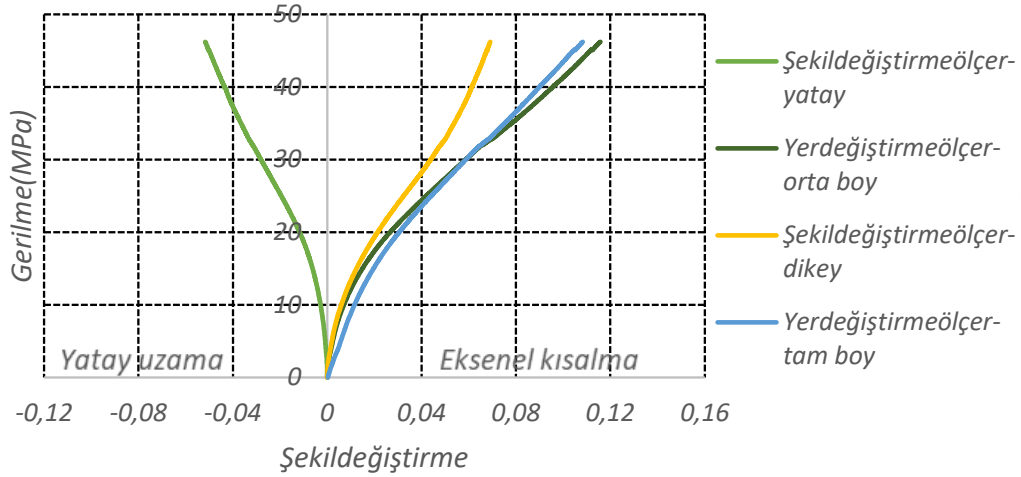
Yüksek lif yoğunluğuna sahip PHD lifli polimer kumaş ile iki kat sargılanarak güçlendirilmiş numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme grafiği Şekil 5.9'da verilmiştir. PHD (high density) yüksek lif yoğunluğunu temsil etmektedir. Referans numuneler ile karşılaştırıldığında her iki numunede de hem dayanım değerleri hem de şekildeğiştirme kapasiteleri büyük ölçüde artış göstermiştir. Aynı özelliklere sahip tek kat LP ile güçlendirilmiş numune ile karşılaştırıldığında dayanım değerleri yaklaşık olarak %50 artış göstermiştir. Aynı özelliklere sahip iki numune birbirleriyle benzer davranış sergilemektedir. Numunelerinin deneyden sonraki görüntüleri Şekil 5.8'de verilmiştir.

ELCS-PHD-M-2-2 numunesi 42,2 MPa gerilme kapasitesine ulaşmıştır ve bu değere karşılık ulaştığı eksenel şekildeğiştirme değeri orta bölgede 0,0156'dür. Numunenin yüzeyindeki şekildeğiştirmeölçerlerden elde edilen enine şekildeğiştirme değeri 0,0226 ve eksenel kısalma değeri 0,0126 iken poisson oranı 1,88'dir. Şekildeğiştirmeölçerden elde edilen ölçümlerden hatalı ölçmeye başladığı andan itibaren veriler grafikte kesilmiştir. Grafikte şekildeğiştirmeölçerlerden yatayda konumlandırılardan ölçülen gerilme değeri 40,7 MPa ve dikeyde konumlandırılardan

ölçülen gerilme değeri 40,9 MPa ulaştıktan sonraki ölçümler düzgün olmadığından kesilip grafikte yer verilmemiştir.



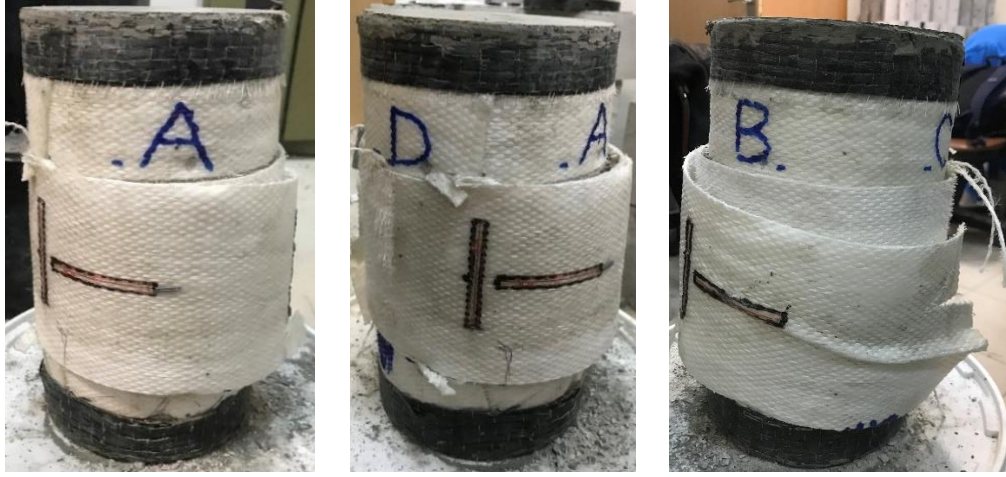
(a)



(b)

Şekil 5.7: ELCS-PHD-M-2 numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi:

a)ELCS-PHD-M-2-2; b) ELCS-PHD-M-2-3 .



Şekil 5.8: ELCS-PHD-M-2 numunelerinin yükleme sonrasındaki görünüşleri .

ELCS-PHD-M-2-1 numunesi basınç dayanımı değeri 31,9 MPa ulaştığında ilk defa belirgin bir çatlama sonucunda numunede kopmalar meydana gelmiştir. ELCS-PHD-M-2-1 çift kat sargılanmış numunenin taşıyabildiği maksimum yük kapasitesine ulaştığında basınç dayanımı değeri 41,5 MPa'dır. Bu basınç dayanımı değerine ulaştığında sahip olduğu eksenel şekildeğiştirme değeri 0,135'tir. Şekildeğiştirmeölçerlerden elde edilen enine şekildeğiştirme değeri 0,0691 iken poisson oranı 0,61'dir. Numunelerinin deney sonrasında elde edilen verileri içeren özet bilgiler Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.5: ELCS-PHD-M-2 numunelerine ait deney sonucunda elde edilen veriler .

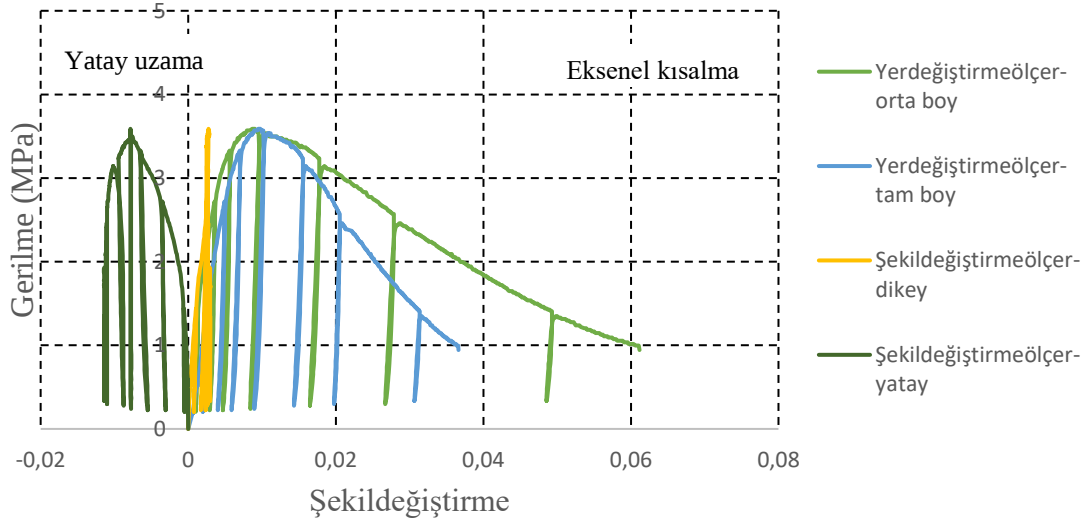
Numune	P_{maks} (ton)	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{cc}	$\epsilon_{rup, hoop}/\epsilon_{f, u}$ (k_{ϵ})
ELCS-PHD-M -2-1	855,5	41,5	0,135	0,61
ELCS-PHD-M -2-2	870	42,2	0,157	0,61

5.3 Tekrarlı Yüklemler için Deney Sonuçları

5.3.1 Referans numunelere ait deney sonuçları

Referans numune taşıyabildiği maksimum yük değerine ulaştığında sahip olduğu gerilme kapasitesi 3,6 MPa'dır. Numunenin sahip olduğu en büyük gerilme değerine karşılık yerdeğiştirmeölçerlerden elde edilen eksenel şekildeğiştirme değeri orta bölge için 0,0091'dir.

- REF-ELCS-C-1 ve REF-ELCS-C-2



Şekil 5.9: REF-ELCS-C numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi .

Sargılama yapılmamış numune yüzeyine yapıştırılan şekildeğiştirmeölçerlerden elde edilen sonuçlara göre enine şekildeğiştirme değeri 0,0073 iken eksenel kısılma değeri 0,0027'dir. Numuneye ait poisson oranı 3,10'dur. Referans numunelerinin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 5.9'da ve deney sonrasında elde edilen verileri içeren özet bilgiler Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.6: REF-ELCS-C numunelerine ait deney sonucunda elde edilen veriler .

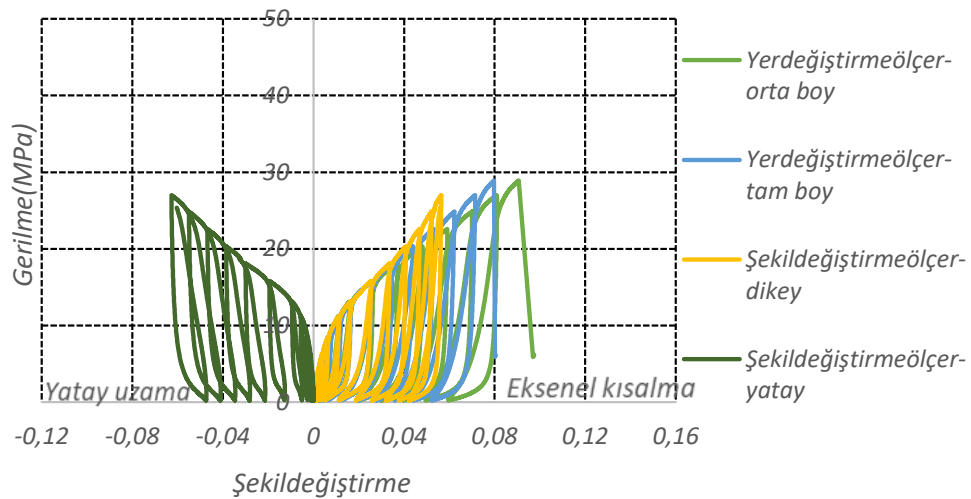
Numune	P _{maks} (ton)	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{cc}
REF-ELCS-C-1	63	3,6	0,009

5.3.2 Sargılı numunelere ait deney sonuçları

5.3.2.1 Tek kat sargılı numuneler

- ELCS-PLD-C-1-1 ve ELCS-PLD-C-1-2

Düşük lif yoğunluğuna sahip PLD lifli polimer kumaş ile tek kat sargılanarak güçlendirilmiş numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme grafiği Şekil 5.10'da verilmiştir. PLD (low density) düşük lif yoğunluğunu temsil etmektedir. Tekrarlı artan eksenel yüklere maruz bırakılan numuneye ait deney sonuçları referans numuneler ile karşılaştırıldığında her iki numunede de hem dayanım değerleri hem de şekildeğiştirme kapasiteleri büyük ölçüde artış göstermiştir. Aynı özelliklere sahip monoton eksenel yükler altında test edilmiş tek katlı LP ile güçlendirilmiş numune ile karşılaştırıldığında şekildeğiştirme kapasitesi aynı değerlere sahip olsa da dayanım değerleri tek katlı numunelere kıyasla daha büyüktür. Aynı özelliklere sahip iki numune birbirleriyle benzer davranış sergilemektedir.



Şekil 5.10: ELCS-PLD-C-1 numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi .

ELCS-PLD-C-1-2 numunesi maksimum yüke ulaştığında sahip olduğu gerilme değeri 28,9 MPa'dır. Tek kat sargılı numunenin ulaştığı gerilme değerine karşılık eksenel şekildeğiştirme değeri orta bölgede 0,0906'dır. Numune yüzeyine yapıştırılan şekildeğiştirmeölçerlerden elde edilen sonuçlara göre eksenel şekildeğiştirme değeri 0,0601 ve poisson oranı 0,57'dir. Maksimum gerilme değerine karşılık gelen enine uzama değeri bu noktada hatalı ölçüldüğünde en yakın değer olan 0,0604 alınmıştır. ELCS-PLD-C-1-1 numunesi 29 MPa basınç dayanımına ulaştığında sahip olduğu eksenel şekildeğiştirme değeri 0,0865 ve poisson oranı 0,93'tür. ELCS-PLD-C-1-1 ve

ELCS-PLD-C-1-2 numunelerinin deney sonrasında elde edilen verileri içeren özet bilgiler Çizelge 5.8’de verilmiştir.

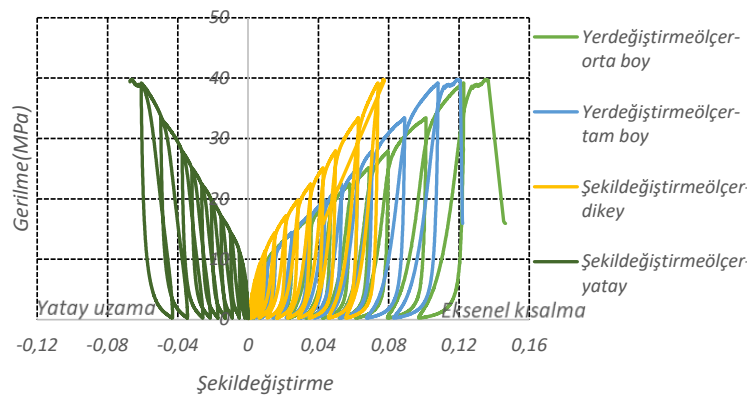
Çizelge 5.7: ELCS-PLD-C-1 numunelerine ait deney sonucunda elde edilen veriler .

Numune	P_{maks} (ton)	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{cc}	$\epsilon_{rup, hoop}/\epsilon_{f, u}$ (k_e)
ELCS-PLD-C-1-1	512	29	0,087	1,10
ELCS-PLD-C-1-2	511	28,9	0,091	0,81

5.3.2.2 Çift kat sargılı numuneler

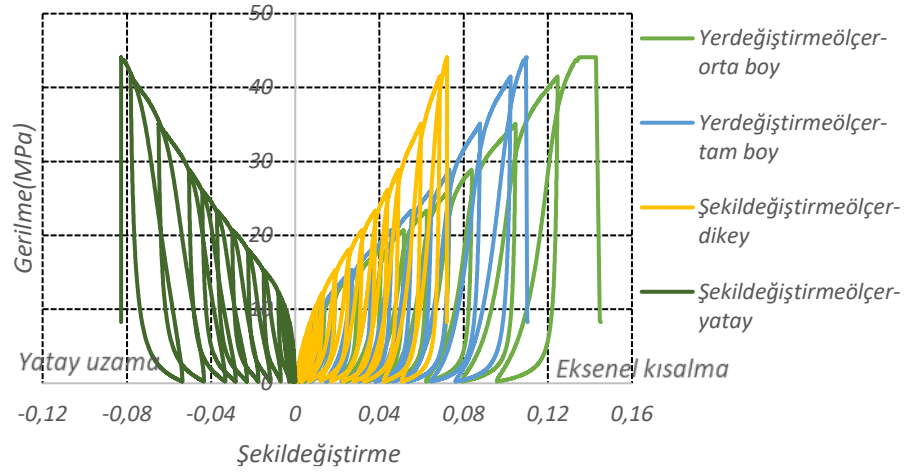
- ELCS-PLD-C-2-2 ve ELCS-PLD-C-2-4

Düşük lif yoğunluğuna sahip PLD lifli polimer kumaş ile çift kat sargılanarak güçlendirilmiş numunelere ait gerilme-şekildeğiştirme grafiği Şekil 5.13’te verilmiştir. PLD (low density) lifli polimer kumaş için düşük lif yoğunluğunu temsil etmektedir. Tekrarlı artan eksenel yüklere maruz bırakılan numuneye ait deney sonuçları referans numuneler ile karşılaştırıldığında her iki numune içinde hem dayanım değerleri hem de şekildeğiştirme kapasiteleri büyük ölçüde artış göstermiştir. Aynı özelliklere sahip monoton artan eksenel yükler altında test edilmiş çift katlı LP ile güçlendirilmiş numune ile karşılaştırıldığında dayanım değerleri aynı değerlere sahip olsa da şekildeğiştirme kapasitesi daha büyük değerlere ulaşmıştır. Aynı özelliklere sahip iki numune birbirleriyle benzer davranış sergilemektedir. Tekrarlı artan eksenel yüklere maruz bırakılan tek katlı LP numuneler ile karşılaştırıldığında hem dayanım değerleri hem de şekildeğiştirme kapasitesi daha büyüktür. Aynı özelliklere özdeş dört numuneden birbirine en yakın sonuçları veren iki numune kullanılmıştır.



Şekil 5.11: ELCS-PLD-C-2 numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi:

a)ELCS-PLD-C-2-2; b)ELCS-PLD-C-2-4 .



b)

Şekil 5.11 (devam) : ELCS-PLD-C-2 numunelerine ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi:

a)ELCS-PLD-C-2-2; b)ELCS-PLD-C-2-4 .

ELCS-PLD-C-2-2 numunesi için 8. döngüyü tamamlamadan yüklemenin 575 kN'a ulaştığı anda bindirme bölgesinin orta kısmının alt taraflarında LP'de katlanma meydana gelmiştir. Son döngüde 680 kN yüke ulaşıldığında numuneden duyulan sesler sıklaşma göstermiştir. Yük taşıma kapasitesi 700 kN'a ulaşana kadar şekildeğiştirmeye devam etmiştir. Maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştığında numunenin orta bölgesinde patlama gerçekleşmiştir.



Şekil 5.12: ELCS-PLD-2-C numunelerinin yükleme sonrasındaki görünüşleri .

ELCS-PLD-C-2-2 numunesi 39,8 MPa basınç dayanımına ulaştığında sahip olduğu eksenel şekildeğiştirme değeri 0,135'tir. Numune yüzeyine yapıştırılan şekildeğiştirmeölçerlerden elde edilen sonuçlara göre enine şekildeğiştirme değeri 0,0769 olmakla birlikte poisson oranı 0,87'dir. ELCS-PLD-C-1-1 numunesi 44 MPa basınç dayanımına ulaştığında sahip olduğu eksenel şekildeğiştirme değeri 0,1429 olmakla birlikte enine şekildeğiştirme 0,0721 değerine sahiptir. Numuneye ait poisson oranı değeri 1,15'dir. ELCS-PLD-C-2-2 ve ELCS-PLD-C-2-4 numunelerinin deneyden sonraki görüntüleri Şekil 5.12'de ve deney sonrasında elde edilen verileri içeren özet bilgiler Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.8: ELCS-PLD-C-2 numunelerine ait deney sonucunda elde edilen veriler .

Numune	P _{maks} (ton)	σ_{maks} (MPa)	ϵ_{cc}	$\epsilon_{rup, hoop}/\epsilon_{f, u}$ (k_e)
ELCS-PLD-C-2-2	703	39,8	0,135	0,88
ELCS-PLD-C -2-4	779,6	41	0,143	1,10

5.4 Göçme Mekanizmaları

Çoğunlukla kopmalar, numuneler yüksek deformasyon kapasitesine ulaştıktan sonra PET LP'lerin kırılıp numunelerin ani dayanım kaybına uğraması ile meydana gelmiştir. Tek kat LP ile sargılanmış numuneler bozulma ile birlikte dayanımının büyük bir kısmını kaybetmiştir. Çift katlı LP ile sargılanmış numunelerde ise durum böyle olmamıştır ve dayanım kaybı kademeli olacak şekilde birden çok adımda gerçekleşmiştir. Genel olarak numunelerin orta bölgesinde kopmalar meydana gelmiştir. Deney sırasında öncelikle orta bölgelerde yatay kopmalar oluştuktan sonra 30-40 mm yüksekliğine sahip dikey kopmalar açığa çıkmıştır. Yükleme devam edilmesiyle oluşan yatay ve dikey kopmalar, numune bütünlüğünü kaybedene kadar genişlemeye devam etmiştir.

Monoton artan yükler altında numuneler için göçme mekanizmaları şu şekilde gerçekleşmiştir: Tek katlı düşük lif yoğunluğuna sahip lifli fiber kumaş numunenin orta bölgesinde 80-100 mm yüksekliğinde tek bir düşey yırtık oluşmuştur. Oluşan yırtık bindirme bölgesinin 2-3 cm uzaklığındadır. 2 katlı lifli kumaş için yine tek bir düşey yırtık oluşmakla birlikte 100-150 mm yüksekliğine sahiptir. Bununla birlikte

bindirme bölgesinden daha uzakta bir bölgede birkaç adet daha yatay yırtık açığa çıkmıştır.

Tek katlı yüksek lif yoğunluğuna sahip lifli fiber kumaştaki ayrılma yere daha yakın olacak şekilde gerçekleşmiştir. Bindirme bölgesinden yaklaşık 60-70 mm uzaklıkta ve 100-150 mm yükseklikte açığa çıkan düşey yırtık çok parçalı bir görünüme sahiptir. Düşey yırtıklara ek olarak 5-6 cm sahip yatay yırtıklar da oluşmuştur.

Tekrarlı artan yükler altında numuneler için göçme mekanizmaları şu şekilde gerçekleşmiştir: Çift katlı yüksek lif yoğunluğuna sahip lifli fiberde dikey yırtılmaya ek olarak çok parçalı yatay yırtıklar da açığa çıkmıştır.

Az sayıda numunede (ELCS-PHD-M-2-3) bindirme bölgesinde başlayan sıyrılmalardan dolayı beton silindirlerde beklenen mukavemet değerlerine ulaşamamıştır. Bozulmaların yapıştırırmada kullanılan epoksi reçinenin PET LP'lerin kalın olmasından kaynaklı iyice emilememesi ile ilişkili olabileceği gerekçesiyle birkaç numunenin deneyi tamamlandıktan sonra bindirme bölgesine ekstra epoksi uygulaması yapılmıştır. Bu uygulamanın ardından deney anında meydana gelen sıyrılmaların bir miktar önüne geçilmiştir. Yükleme sonrasında numunelerde açığa çıkan kopmalara ait görüntüler Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



(a)



(b)



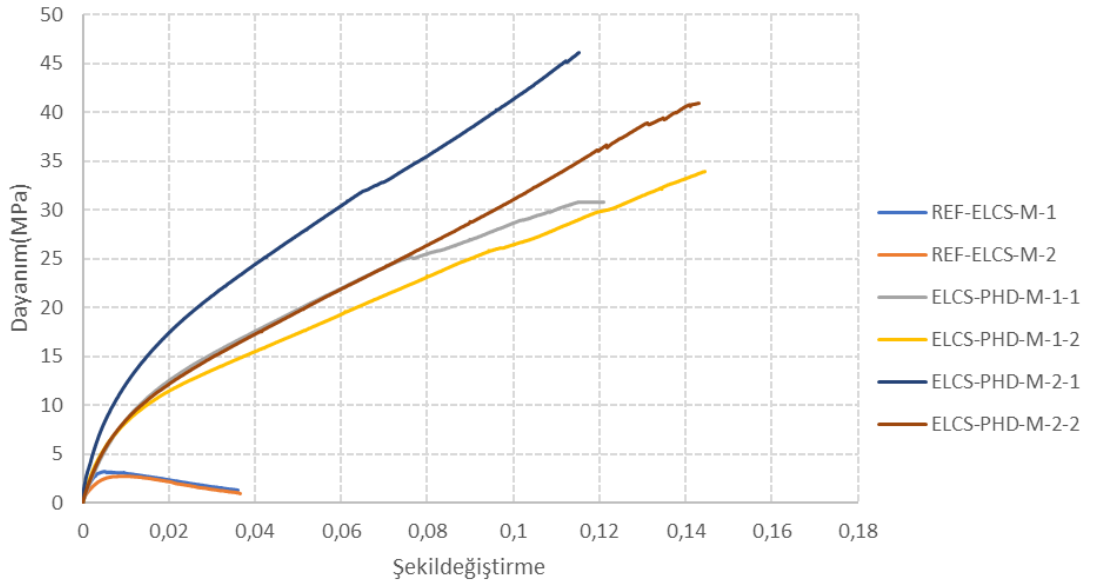
(c)

Şekil 5.13: Deney anında numunelerde oluşan bozulmalar:
a) ELCS-PLD-1-2; (b) ELCS-PHD-1-1; (c) ELCS-PHD-2-4 .

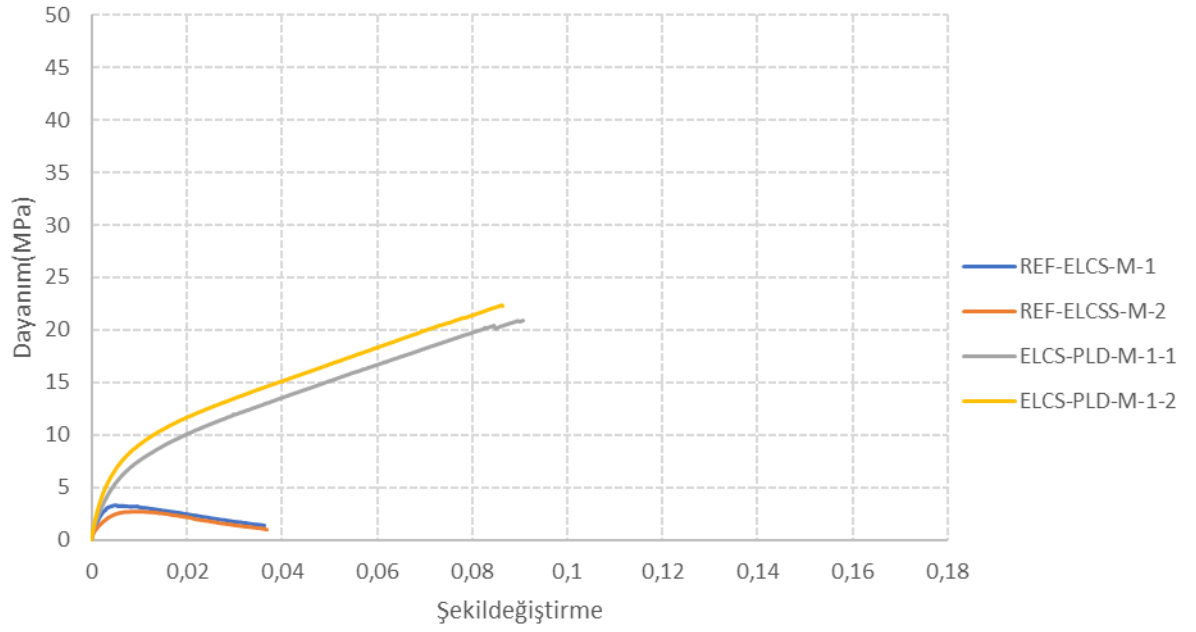
5.5 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Deneysel çalışmalar sırasında test edilen elemanlara ait değişkenlerin malzemeye olan etkisini tespit edebilmek amacıyla bu bölümde karşılaştırma grafiklerine yer verilmiştir. Deneyler sonucunda asıl olarak ulaşılması hedeflenen orta boydaki yerdeğiştirmeler için karşılaştırmalarda orta boyda konumlandırılan yerdeğiştirmeölçerlerden elde edilen değerler kullanılmıştır. Güvenilir sonuçlar elde edebilmek amacıyla her bir numuneden ikişer adet numune test edilmiştir. Grafikler farklı yükleme biçimine göre değerlendirilmiştir. Şekil 5.14'te monoton artan yüklemeler altında eksenel gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi gösterilirken Şekil 5.15'te tekrarlı artan yüklemeler altındaki ilişkisi gösterilmiştir. Numunelerde incelenen değişkenler:

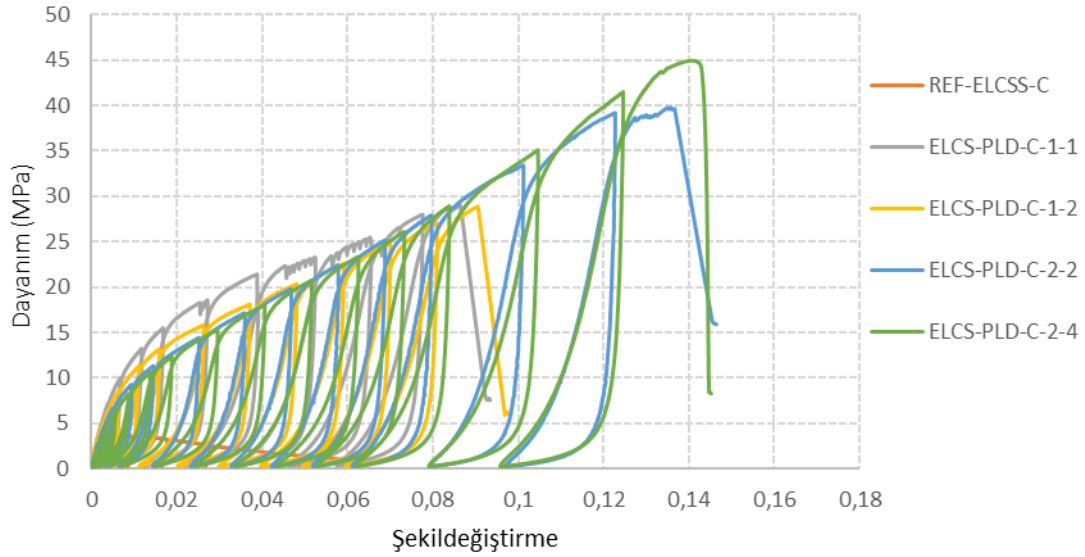
- Yükleme biçimi (Monoton veya Tekrarlı artan yüklemeler)
- LP sargı tabaka sayısı (Tek veya Çift katlı sargı)
- LP lif yoğunluğu (PHD veya PLD)



Şekil 5.14: Numunelerin monoton yüklemeler altında eksenel gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi .



Şekil 5.14 (devam): Numunelerin monoton yüklemeler altında eksenel gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi .

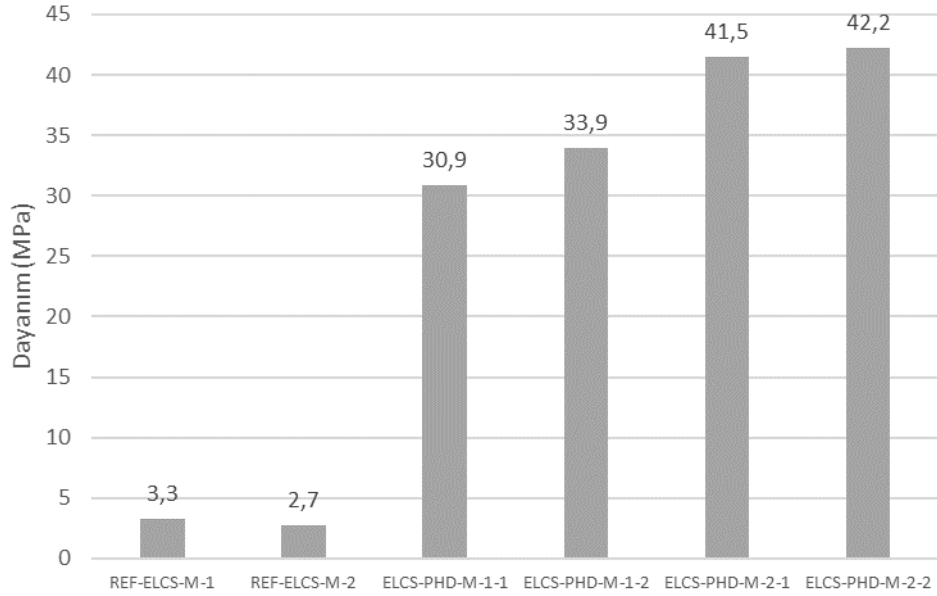


Şekil 5.15: Numunelerin tekrarlı yüklemeler altında gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi .

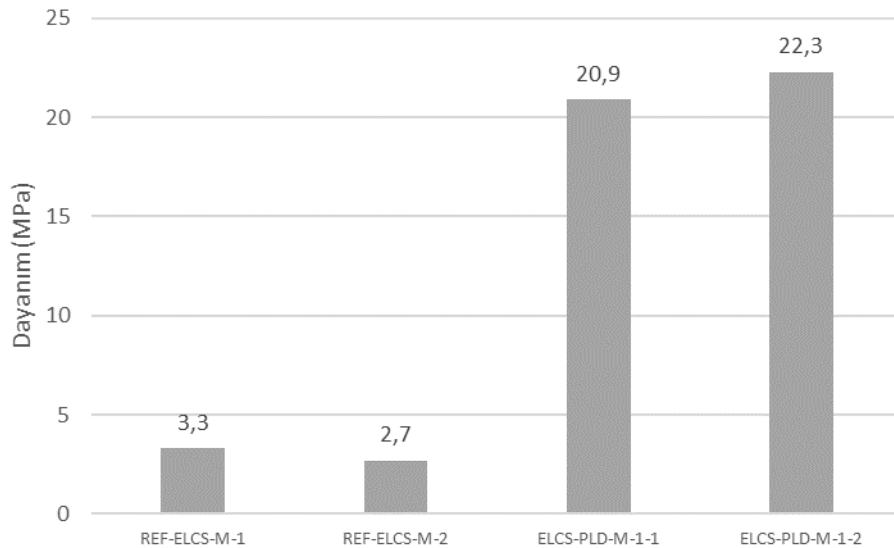
5.5.1 Numunelerin monoton yükler altında parametrelerinin karşılaştırılması

- Lif yoğunluğunun sargılama üzerindeki etkisi

Farklı lif yoğunluğuna sahip LP kumaşların çok düşük dayanımlı silindir numunelerin basınç dayanımına olan etkisi Şekil 5.16'da gösterilirken şekildeğiştirme kapasitesi üzerindeki etkisi Şekil 5.18'de gösterilmiştir. Ortalama 3 MPa basınç dayanımına sahip referans numune ile farklı parametrelere sahip LP ile güçlendirilmiş sargılı numuneler karşılaştırıldığında sargılamanın basınç dayanımını önemli miktarda artırdığı görülmüştür.



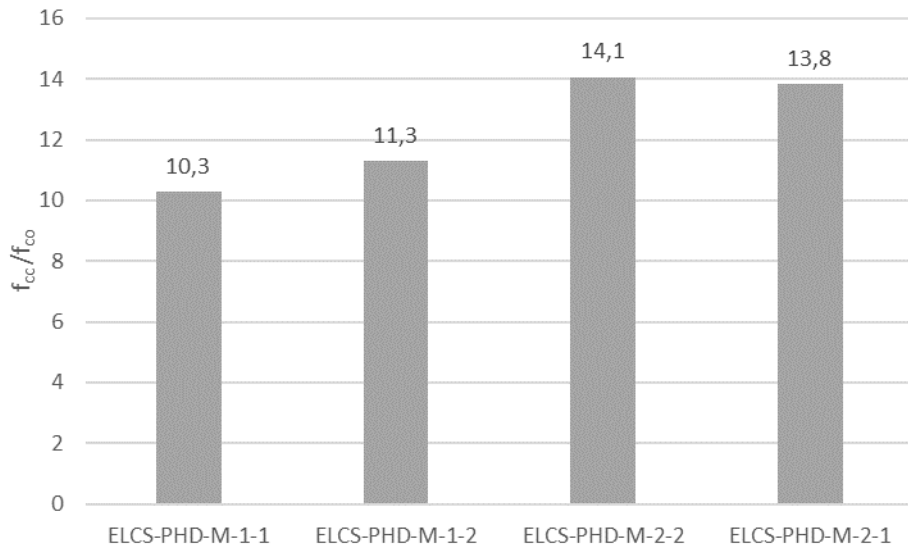
(a)



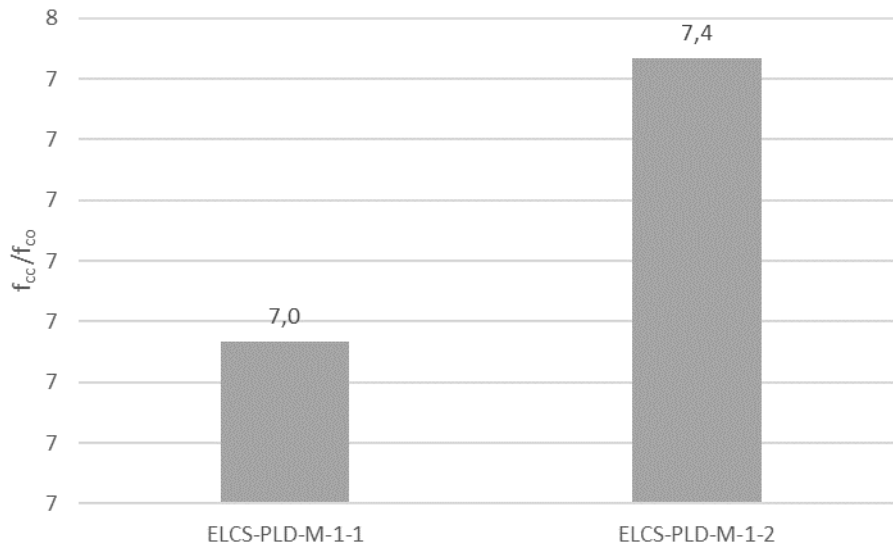
(b)

Şekil 5.16: Monoton artan yükler altında farklı lif yoğunluğuna sahip LP ile güçlendirmenin basınç dayanımına etkisi: a) ELCS-PHD-M numuneleri; b) ELCS-PLD-M numuneleri .

Başlıca karşılaştırma parametrelerinden biri olan sargılamada kullanılan polimer malzemenin lif yoğunluğu dikkate alındığında yüksek lif yoğunluğuna sahip PHD kumaşların düşük lif yoğunluğuna sahip olanlara kıyasla hem dayanım hem de eksenel uzama kapasitesine katkısını daha yüksek olduğu görülmüştür. Monoton artan yükler altında test edildiğinde, numunelerin sargılamamanın ardından ulaştıkları dayanım değerleri Şekil 5.16’da verilmiştir.



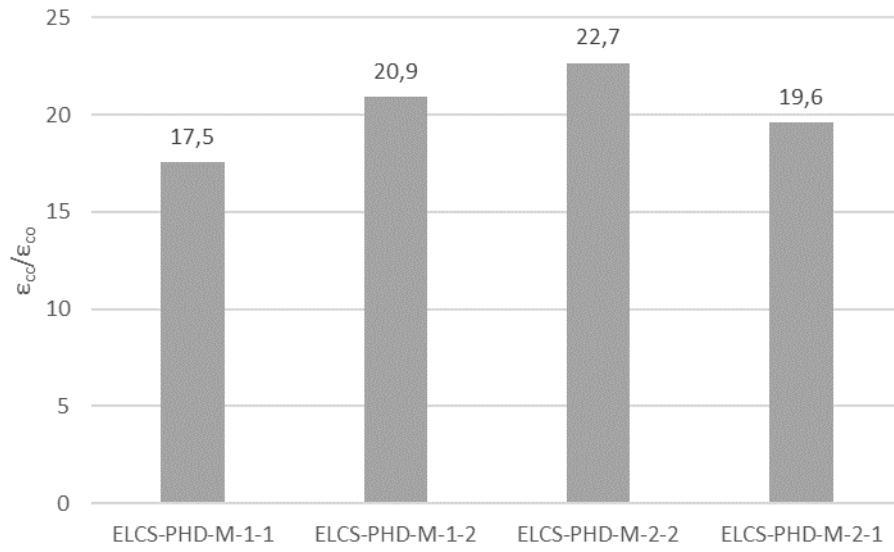
(a)



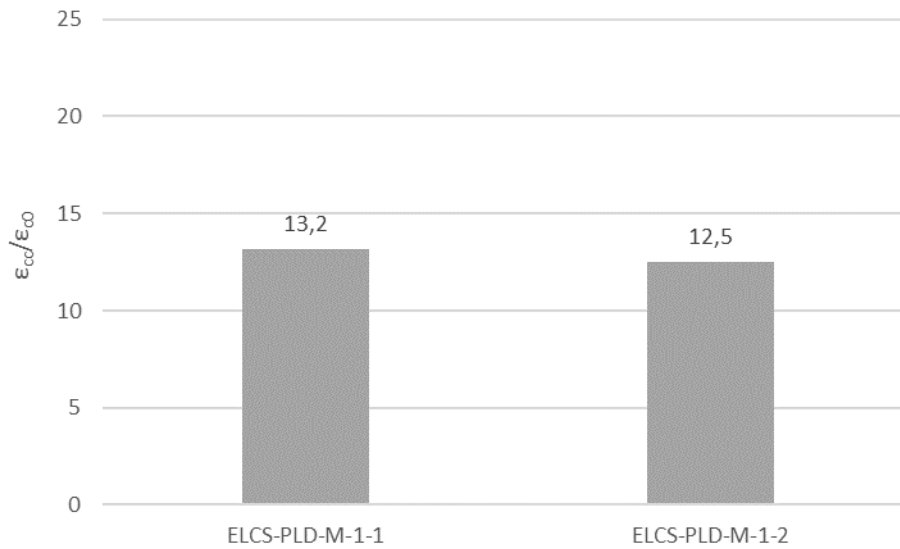
(b)

Şekil 5.17: Monoton artan yükler altında farklı lif yoğunluğuna sahip LP ile güçlendirmenin f_{cc}/f_{co} oranına etkisi: a) ELCS-PHD-M numuneleri; b) ELCS-PLD-M numuneleri .

Farklı lif yoğunluğuna sahip lifli polimer kumaşlar ile güçlendirmenin dayanım kapasitesine olan katkısını açıkça görebilmek amacıyla numunelerin sargılamanın ardından ulaştıkları dayanım değerleri referans elemanın sahip olduğu değere oranlanarak Şekil 5.17’de gösterilmiştir. Dayanım kapasitesindeki ortalama artış düşük lif yoğunluklu PLD numuneler için tek katlı olarak sargılanması halinde sırasıyla %620 iken yüksek lif yoğunluklu PHD numuneler için tek katlı ve çift katlı olarak sargılanması halinde sırasıyla %980 ve %1295’tir.



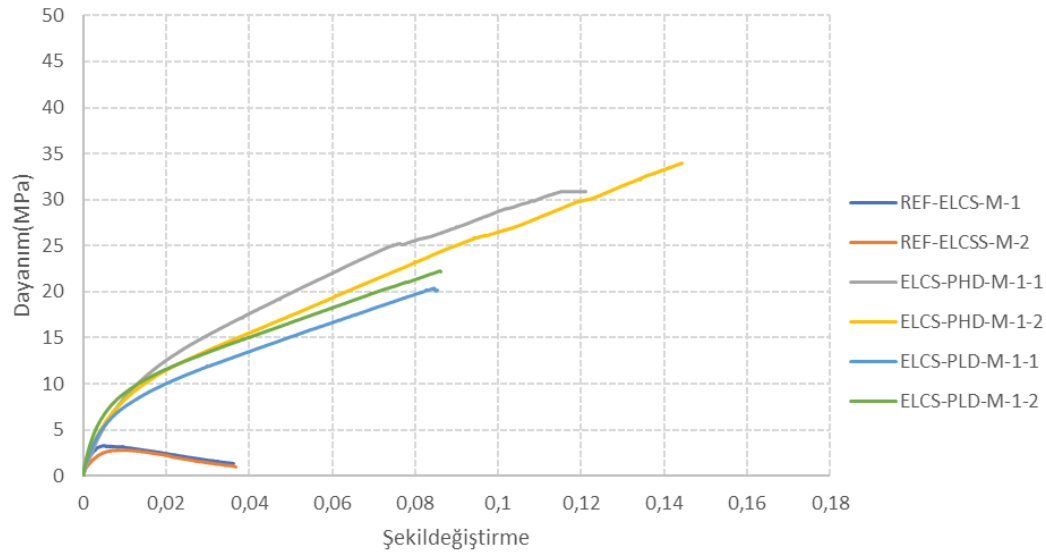
(a)



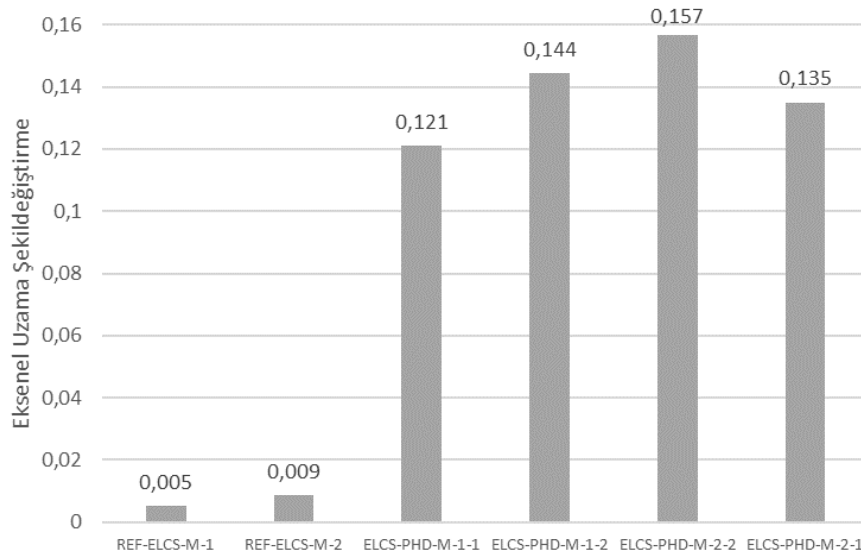
(b)

Şekil 5.18: Monoton artan yükler altında farklı lif yoğunluğuna sahip LP ile güçlendirmenin $\epsilon_{cd}/\epsilon_{co}$ oranına etkisi: a) ELCS-PHD-M numuneleri; b) ELCS-PLD-M numuneleri .

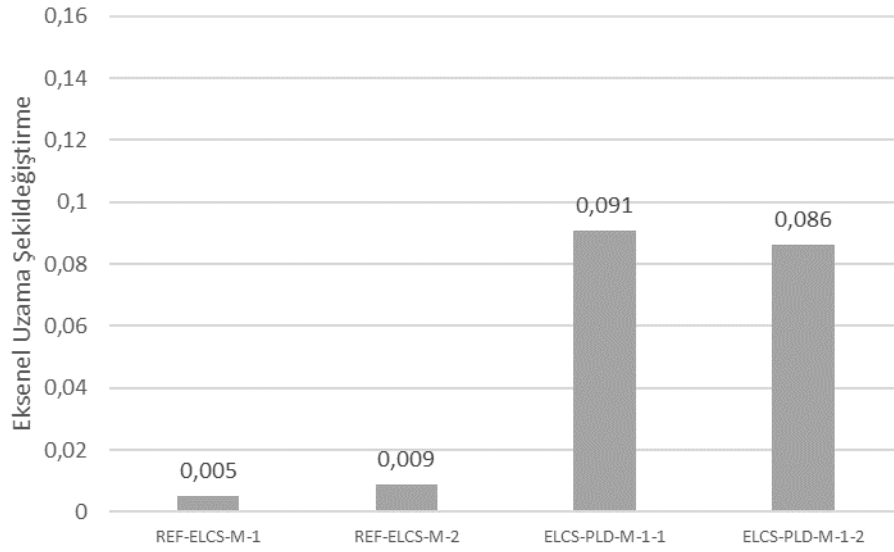
Yüksek lif yoğunluklu polimer kumaş referans numuneler ile karşılaştırıldığında şekil değiştirme kapasitesini aynı kat sargılamaya sahip düşük yoğunluklu liflere kıyasla daha çok artırmıştır. PHD numuneler sargılamadan sonra tek kat sargılı numuneler için ortalama şekil değiştirme kapasitesini % 1793, çift kat sargılı numuneler için ise % 1986 kadar artırırken, ortalama şekil değiştirme kapasitesindeki artış miktarı tek katlı PLD numuneleri için %1165'tir. Sargılanmış numunelerin sahip olduğu eksenel şekil değiştirme kapasitesi referans numunenin şekil değiştirme kapasitesine oranlanarak Şekil 5.20'de verilmiştir.



Şekil 5.19: Monotonik yüklemeler altında tek katlı ve çift katlı numunelerde polimer yoğunluğunun davranışa etkisi .



Şekil 5.20: LP ile güçlendirmenin monoton artan yükler altında şekil değiştirme kapasitesine etkisi: a) ELCS-PHD-M numuneleri; b) ELCS-PLD-M numuneleri .



b)

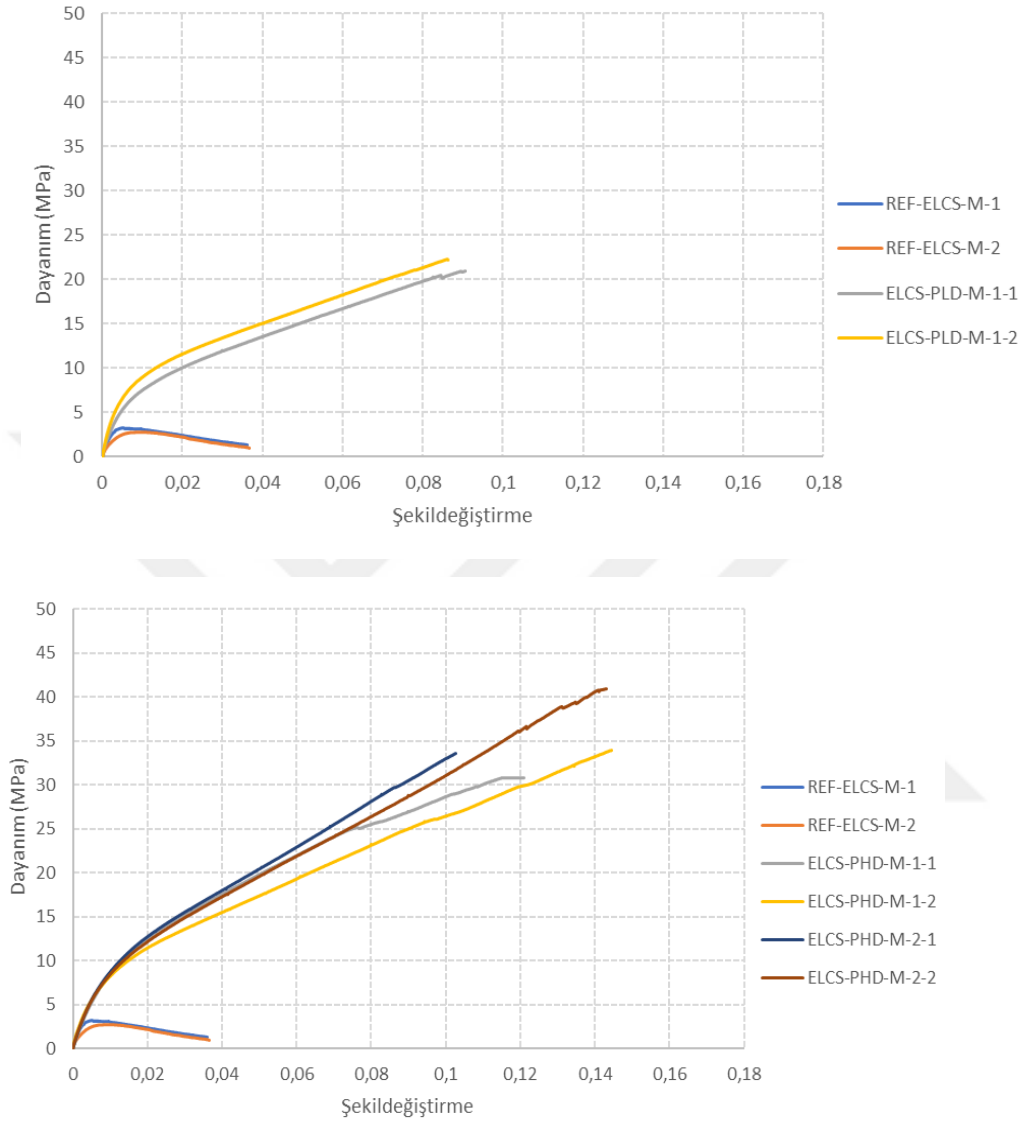
Şekil 5.20 (devam): LP ile güçlendirmenin monoton artan yükler altında şekildeğiştirme kapasitesine etkisi: a)ELCS-PHD-M numuneleri; b) ELCS-PLD-M numuneleri .

- LP sargı tabaka sayısının sargılama üzerindeki etkisi

Monoton artan yükleme altında test edilen numunelere ait dayanım-şekildeğiştirme grafikleri aynı lif yoğunluğuna sahip LP kumaşlar ile sargılanmış olmalarına göre iki farklı grafik halinde Şekil 5.21’de gösterilmiştir. LP sargı tabaka sayısının hem gerilme kapasitesi hem de şekildeğiştirme kapasitesi üzerinde doğrudan etkisi olduğu görülmüştür. Düşük lif yoğunluğuna sahip LP kumaşlar, numunenin basınç dayanımını tek katlı sargılamada yaklaşık olarak %620 artırmıştır. Dayanım kapasitesindeki artış miktarı PHD numunelerinde tek katlı sargılanmışlar için %980 iken çift katlı sargılanmış numuneler için ortalama %1295’tir.

Sargı tabaka sayısının şekildeğiştirme kapasitesi üzerindeki etkisine bakıldığında PHD tek katlı kumaş ile sargılanmış numunelerin ortalama ulaştıkları eksenel şekildeğiştirme değeri 0,0965 iken çift katlı PHD lifli polimer kumaş ile sargılanmış numuneler için ortalama şekildeğiştirme kapasitesi 0,136’dır. PHD yoğunluklu lifler ile sarılı numunelerde eksenel uzama şekildeğiştirme kapasitesindeki artış miktarı tek katlılara kıyasla çift kat sarılı numuneler için daha yüksektir. Sargı tabaka sayısının artması PLD lifli polimer kumaş ile sarılmış numuneler için de benzer sonuçlara sahip olup tek

katlı numunelerin sahip olduğu aksenal şekildeğiştirme kapasitesi değeri 0,088'dir.



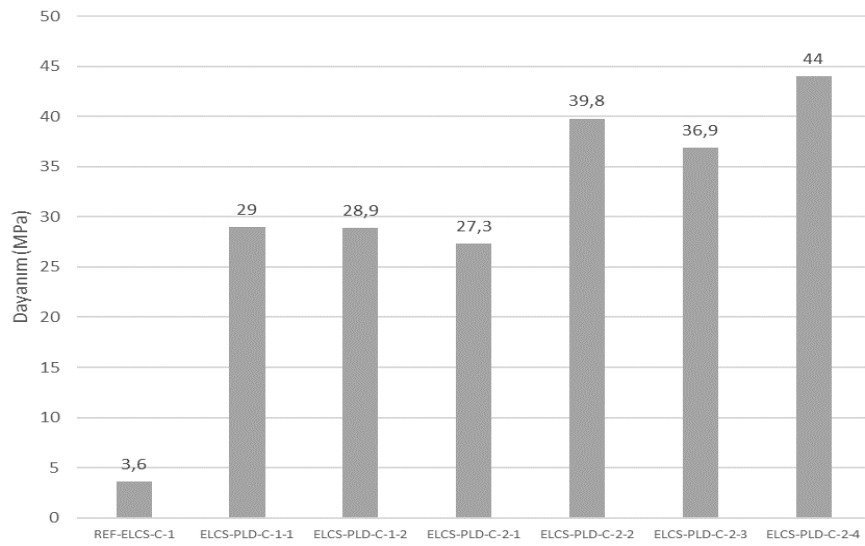
Şekil 5.21: Monoton artan yüklemeler altında LP sargı tabaka sayısının davranışa etkisi .

5.5.2 Tekrarlı artan yükler altında parametrelerin karşılaştırılması

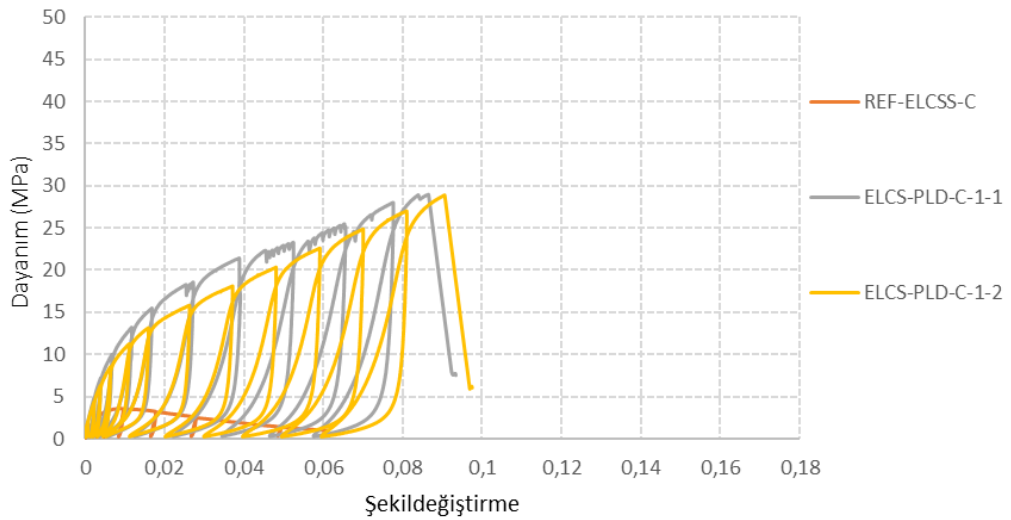
- LP sargı tabaka sayısının sargılama üzerindeki etkisi

Tekrarlı artan yükler altında test edilen numuneler ile monoton artan yüklemeye uygulanarak test edilen numuneler arasında kayda değer bir farklılık olmamakla birlikte tekrarlı yüklemelerde diğerlerine kıyasla daha büyük gerilme değerlerine ulaşılmıştır. Bu yüklemeye tipinde tek bir lif yoğunluğuna sahip lifler kullanıldığından lif yoğunluğunun numune üzerindeki etkisi bilinmemektedir. Bununla birlikte aynı

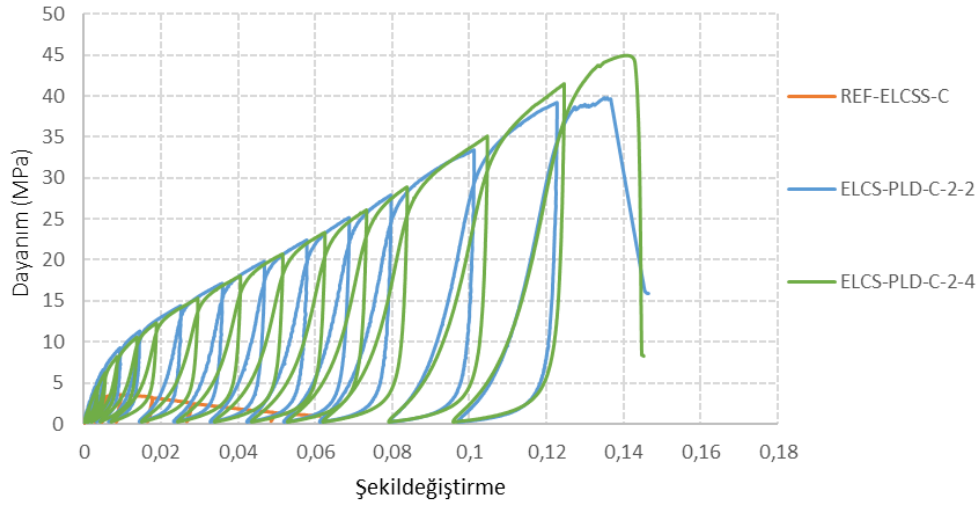
monoton artan yüklemelerde olduğu gibi tekrarlı yüklemeler için de LP sargı sayısı artıkça numunenin gerilme ve şekildeğiştirme kapasitesi önemli oranda artış göstermiştir. Referans numune ile karşılaştırıldığında tek kat sargı tabakası gerilme kapasitesini ortalama %705 artırırken, çift kat sargı tabakası gerilme kapasitesini yaklaşık %1064 artırmıştır. Tek ve çift kat sargı tabaka sayısına sahip numunelerin sargılama ile birlikte ulaşabildikleri dayanım değerleri Şekil 5.22’de gösterilmiştir. Şekil 5.23’te görüldüğü üzere tek katlı numuneler 30 MPa civarlarına yaklaşırken çift katlı numuneler birbirine en yakın sonuçları veren iki numune değerlendirildiğinde ortalama 42 MPa değerine ulaşmıştır.



Şekil 5.22: LP ile güçlendirmenin tekrarlı artan yükler altında basınç dayanımına etkisi .

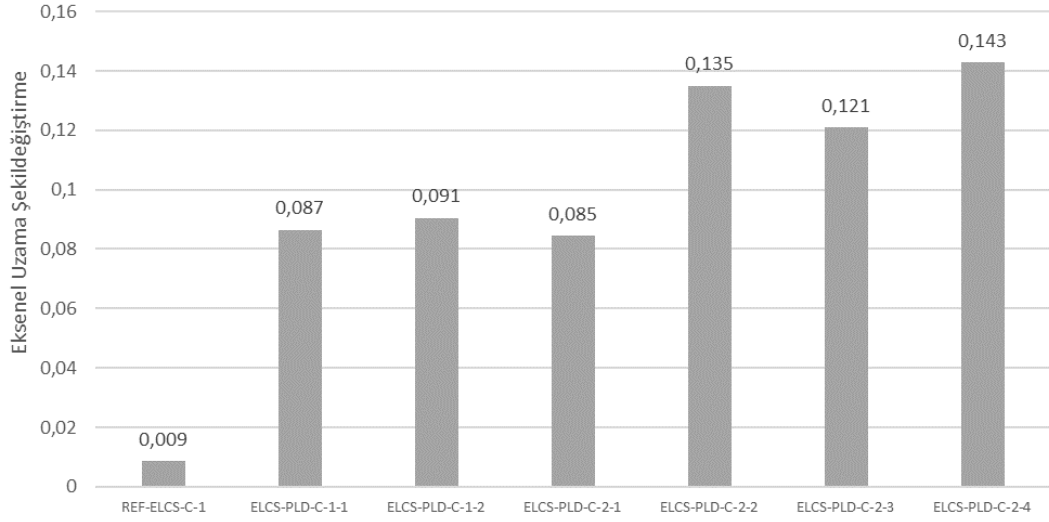


Şekil 5.23: Tekrarlı yüklemeler altında PLD polimer yoğunluğundaki LP sargı tabaka sayısının davranışa etkisi .



Şekil 5.23 (devam): Tekrarlı yüklemeler altında PLD polimer yoğunluğundaki LP sargı tabaka sayısının davranışa etkisi .

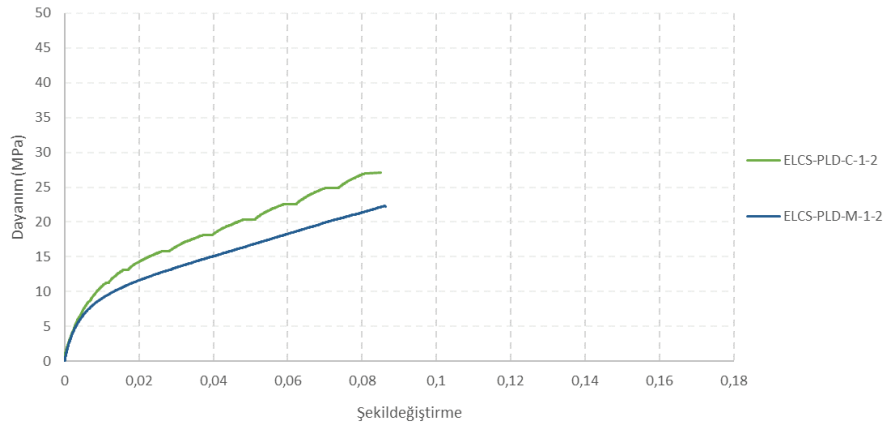
Tekrarlı yükleme altında test edilen PLD sargılı numuneler, monoton artan yüklemedeki davranışa benzer davranış sergilemiş olup şekildeğiştirme kapasitesini artırmıştır. Referans numune ile kıyaslandığında tek kat sargı eksenel uzama şekildeğiştirme kapasitesini ortalama %889 kadar artırırken, çift kat sargı eksenel uzama şekildeğiştirme kapasitesini ortalama %1444 artırmıştır. Şekil 5.24'te sargılanmaksızın bırakılan referans numunenin ve farklı sargı tabaka sayısına sahip sargılı numunelerin eksenel şekildeğiştirme kapasite değerleri verilmiştir.



Şekil 5.24: Tekrarlı yüklemeler altında PLD polimer yoğunluğundaki LP sargı tabaka sayısının davranışa etkisi .

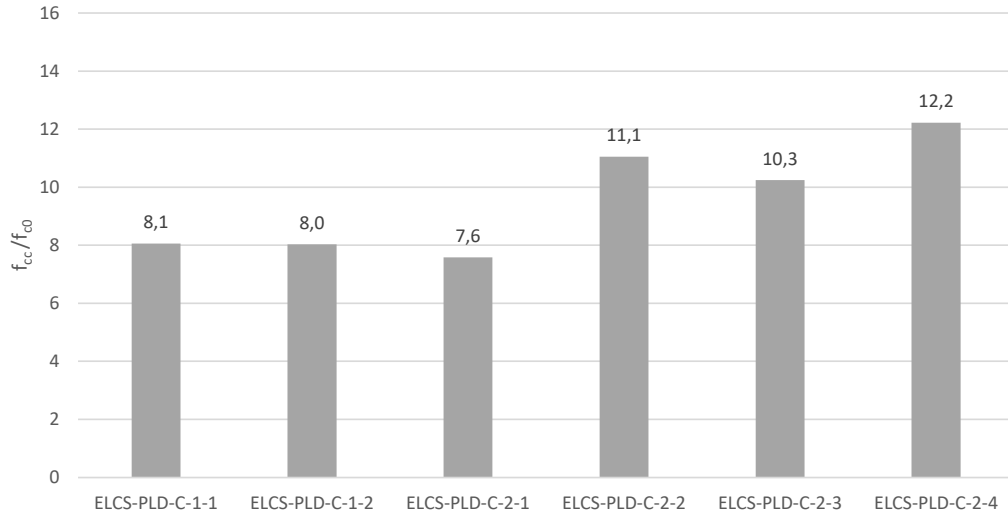
- Yükleme tipinin sargılama üzerindeki etkisi

Aynı özelliklere sahip PLD lifli polimer kumaş ile tek katlı olarak sargılanmış numuneler ayrı ayrı tekrarlı artan yükler altında ve monoton artan yükler altında test edildiğinde güçlendirilmiş iki eleman birbirine yakın davranış göstermiştir. Farklı yükleme tipine maruz bırakılan benzer özellikli elemanlara ait dayanım-şekildeğiştirme ilişkisi tek katlı sargılama içi Şekil 5.25’te gösterilmiştir. Bununla beraber, benzer özelliklere sahip numuneler aynı şekildeğiştirme değerine sahip olduklarında tekrarlı artan yükler altında denenen numune monoton artan yükleme altında test edilen numunelere kıyasla daha büyük gerilme değerlerine ulaşmıştır.

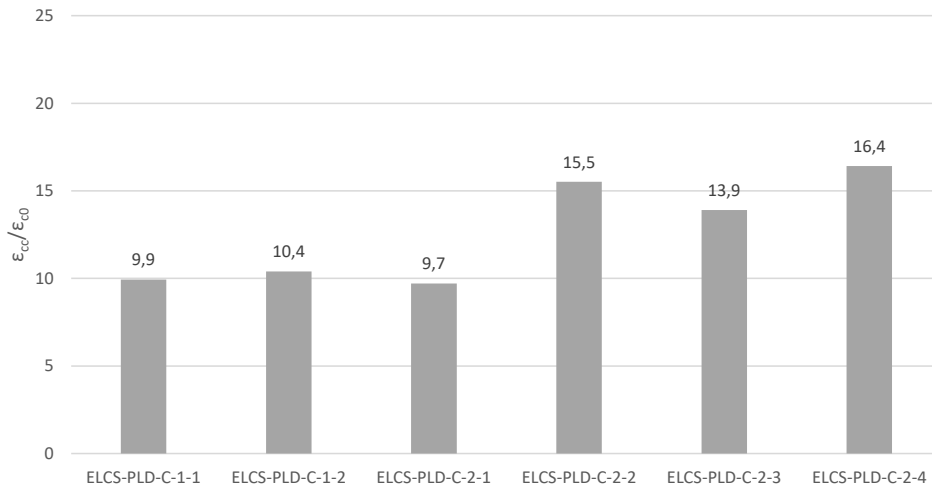


Şekil 5.25: Tek katlı PLD lifli kumaş sarılı numunelerde yükleme biçiminin davranışa etkisi .

Aynı özelliğe sahip lifli kumaş ile çift katlı olarak sargılanmış numuneler ayrı ayrı tekrarlı artan yükler altında ve monoton artan yükler altında test edildiğinde monoton artan yükler etkisinde numuneler daha fazla dayanıma ulaşırken tekrarlı artan yükler altında daha sünek davranış göstermiştir. Monoton yüklemede ELCS-PLD-C-1 numuneleri dayanım kapasitesini % 620 kadar artırırken tekrarlı yükler altında %705 kadar artırmıştır.



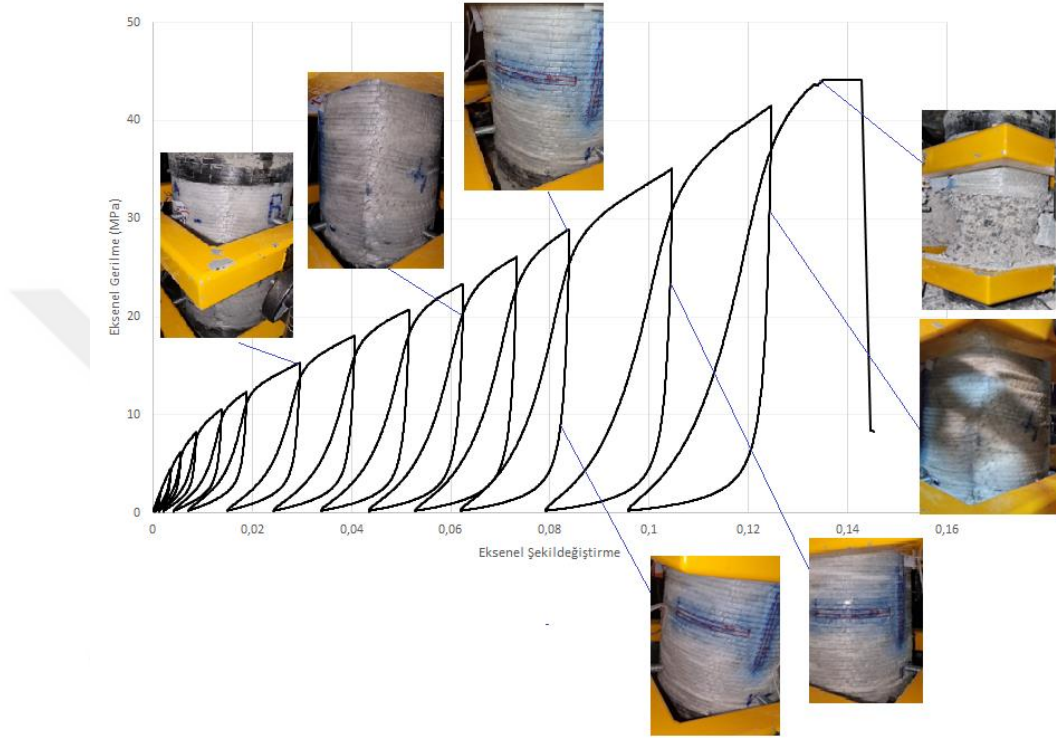
Şekil 5.26: Tekrarlı artan yükler altında farklı sargı tabaka sayısına sahip LP ile güçlendirmenin f_{cc}/f_{c0} oranına etkisi .



Şekil 5. 27: Tekrarlı artan yükler altında farklı sargı tabaka sayısına sahip LP ile güçlendirmenin $\epsilon_{cc}/\epsilon_{c0}$ oranına etkisi .

5.6 Hasar Gelişimi

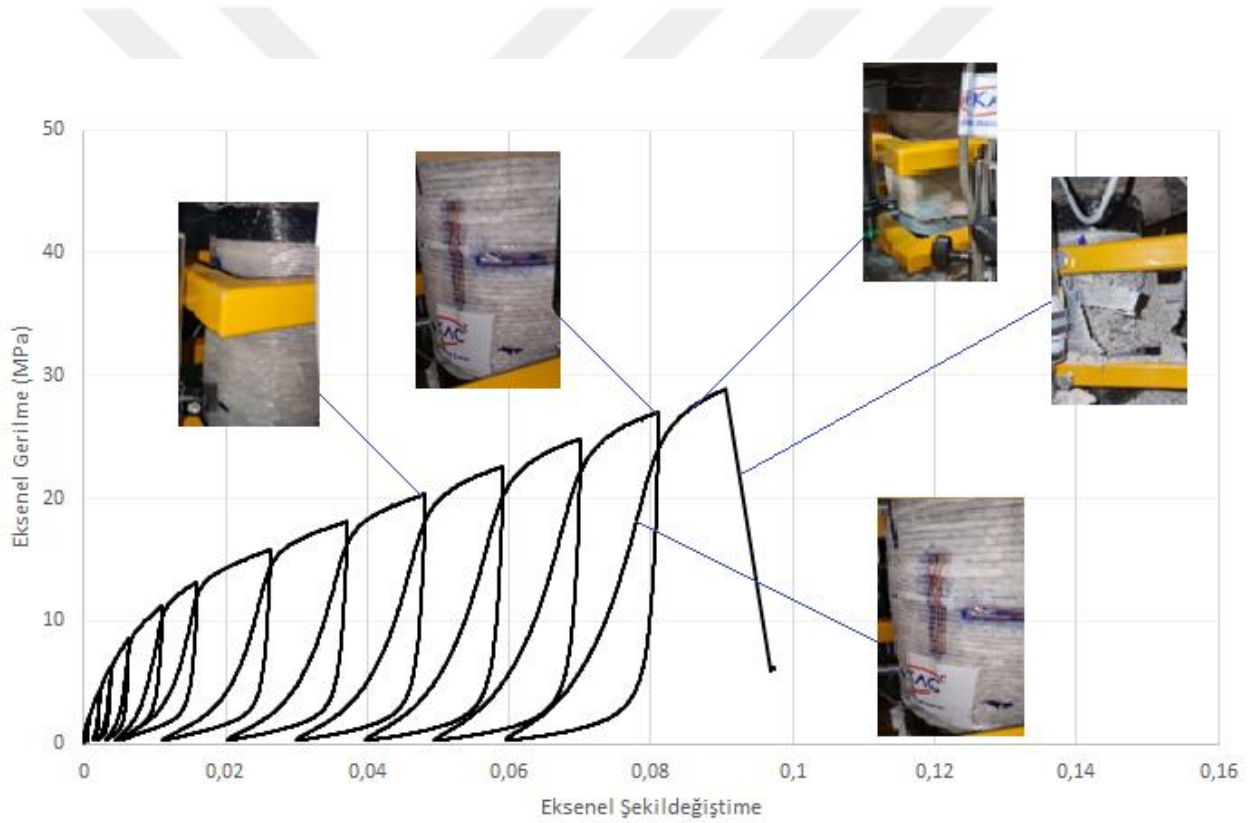
Çalışmanın bu bölümünde, yükleme boyunca numune yüzeyinde açığa çıkan hasarın gelişimi adım adım gösterilmiştir. Şekil 5.31’de ELCS-PLD-C-2-4 ve Şekil 5.32’de ELCS-PLD-C-1-2 numunesine ait gerilme-şekildeğiştirme grafiği üzerinde işaretlenen şekildeğiştirme seviyesinde numunede oluşan hasar fotoğraflarla birlikte verilmiştir.



Şekil 5.28: ELCS-PLD-C-2-4 numunesi hasar gelişim grafiği .

1. Numune 0,03 eksenel şekildeğiştirme seviyesine geldiğinde deney anında ilk defa kayda değer sesler duyulmaya başlanmıştır. Bununla beraber, henüz numune yüzeyinde gözle görülür bir değişiklik oluşmamıştır.
2. 0,06 eksenel şekildeğiştirme seviyesine ulaşıldığında ilk defa PET lifli polimer kumaşta hasar gelişmiştir. Oluşan hasar numunenin yere yakın kısımlarında oluşmuştur.
3. 0,08 eksenel şekildeğiştirme seviyesine ulaşıldığında lifli polimer kumaştaki hasar aynı bölgede artmaya devam ederek büyümüştür.
4. Numune yüzeyinde gözlemlenen hasarlı bölgelerin hasar seviyesi artış göstermiştir.

5. 0,10 eksenel şekildeğiştirme seviyesine ulaşıldığında öncesinde numunenin yere yakın kısımlarında tespit edildiği şekilde şekildeğiştirmeölçerlerin bulunduğu bölgenin üstünde de hasarlar oluşmaya başlamıştır.
6. 0,12 eksenel şekildeğiştirme seviyesine ulaşıldığında bindirme bölgesi yakınlarında yatay hasarın gelişim gösterdiği belirlenmiştir. Hasarlar artış göstermeye devam etmiştir.
7. 0,14 eksenel şekildeğiştirme seviyesine ulaşıldığında şiddetli sesle beraber patlama oluşmuştur. Patlamanın ardından numunenin orta bölgesinde yatay yırtıklarla beraber tek parçalı kopma meydana gelmiştir. Numunenin bütünlüğünü kaybetmesiyle beraber ani bir dayanım kaybı oluşmuştur.



Şekil 5.29: ELCS-PLD-C-1-2 numunesi hasar gelişim grafiği .

1. Numune 0,05 eksenel şekildeğiştirme seviyesine geldiğinde deney anında ilk defa kayda değer sesler duyulmaya başlanmıştır. Bununla beraber, henüz numune yüzeyinde gözle görülür bir değişiklik oluşmamıştır.
2. 0,08 eksenel şekildeğiştirme seviyesine ulaşıldığında ilk defa PET lifli polimer kumaşta hasar gelişmiştir. Oluşan hasar dikey olarak konumlandırılmış

şekildeğiştirmeölçerin orta kısımlarında meydana gelmiştir. Bu hasarlar numunenin yere yakın kısımlarında oluşmuştur.

3. 0,08 eksenel şekildeğiştirme seviyesine çıkan ikinci döngüye ulaşıldığında şekildeğiştirmeölçerin orta kısımlarındaki bölgede lifli polimer kumaşta oluşan hasar artarak devam etmiştir.
4. 0,9 eksenel şekildeğiştirme seviyesine ulaşıldığında numunenin orta bölgesinin etrafında yatay yırtıklar oluşmuştur. Yükleme devam edilmesiyle yatay yırtıklar genişlemiştir.
5. 0,9 eksenel şekildeğiştirme seviyesinden daha büyük değere ulaşıldığında numune orta bölgesinde PET LP kumaş çok parçalı olacak şekilde kopmuştur. Bu andan itibaren dayanım kaybı ile numune parça bütünlüğünü kaybetmiştir.



6. MEVCUT ANALİTİK MODELLERİN TAHMİNİ

Çalışmanın bu kısmında PET LP ile enine doğrultuda sargılama yapılarak güçlendirilen silindirik numunelerin deney sonucunda elde edilen en büyük dayanım ve buna karşılık gelen şekildeğiştirme değerleri, mevcut çalışmalardan bilinen ampirik bağıntılarda yerine koyularak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Literatürdeki Samaan vd. (1998), İlki ve Kumbasar (2003), Lam ve Teng (2003), Fahmy ve Wu (2010) ve Dai vd. (2011) ait çalışmalar kullanılmıştır.

İlki (2003) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar dairesel ve dairesel olmayan kesitler üzerinde çalışırken diğerleri sadece dairesel kesitli numuneler üzerinde çalışmışlardır. Çalışmaların genelinde LP kalınlığı ortak parameter olarak dikkate alınmıştır. Çok sayıda numune kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda orta ve yüksek beton basınç dayanımına sahip numuneler monoton ya da tekrarlı artan yükler altında test edilmiştir. Kullanılan analitik modellerden sadece ikisi PET LP içeren çalışmalar içermektedir. Kullanılan bağıntılara ait mevcut çalışmaların özet bilgisi Çizelge 6.1’da gösterilmiştir.

Çizelge 6.1: Mevcut çalışmaların özet bilgisi .

Kaynak	Kesit tipi	Yükleme tipi	Fiber tipi	Parametre	Beton basıncı (MPa)	Numune sayısı
Samaan vd. (1998)	Daire	Monoton, tekrarlı	Cam ve karbon	Beton dayanımı, LP kalınlığı	29.6-31.9	30
İlki ve Kumbasar (2003)	Daire, kare, dikdörtgen	Monoton, tekrarlı	Karbon	Kesit tipi, LP kalınlığı	21-34.6	43
Lam ve Teng (2003)	Daire	Monoton	Aramid, cam, karbon	Fiber tipi	26.2-55.2	76
Fahmy ve Wu (2010)	Daire	Monoton, tekrarlı	Aramid, cam, karbon ve PET	Fiber tipi, LP kalınlığı	20-50	257
Dai vd. (2011)	Daire	Monoton	PET ve PEN	Fiber tipi, LP kalınlığı	32.5-39.2	42

Çizelge 6.2: Çalışmalara ait bağıntılar.

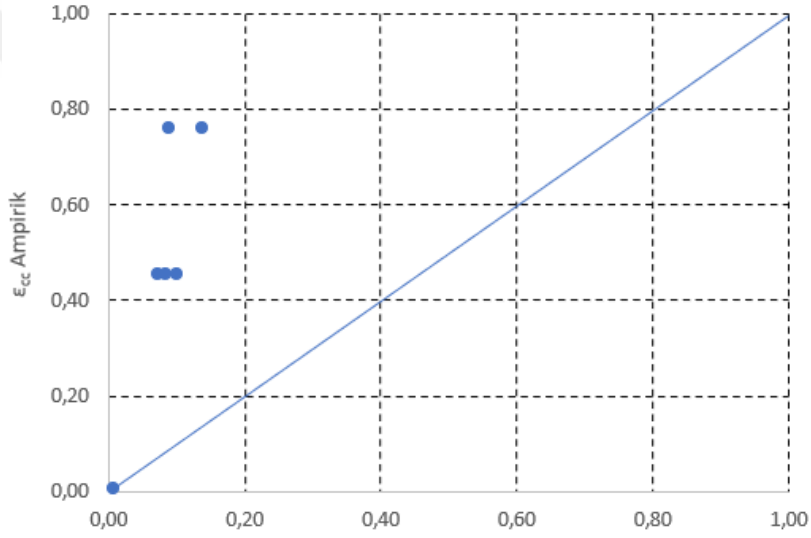
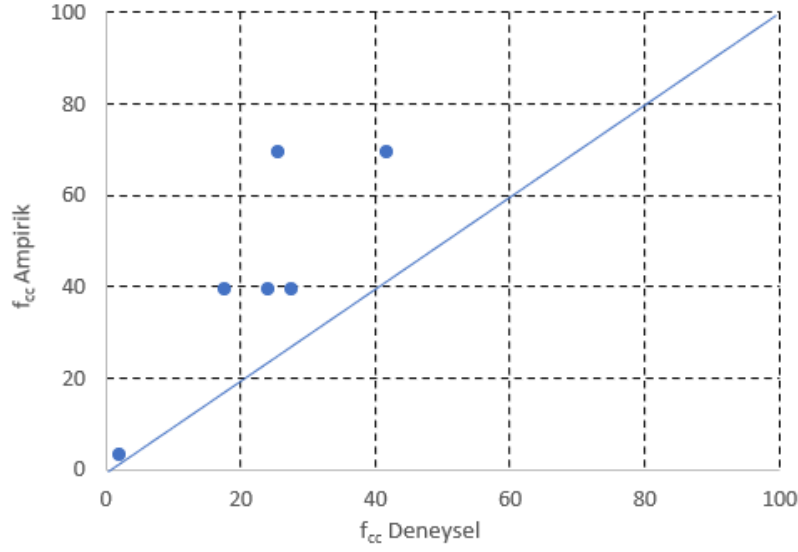
Model	Gerilme	Şekildeğiştirme	Notlar
Samaan (1998)	$f_{cc} = f_{c0} + 6 f_{lu}^{0.7}$	$\varepsilon_{cc} = \frac{f_{cc} - f_{c0}}{E_2}$	$f_{lu} = \frac{2 f_{ju} n t_f}{d}$ $f_{c0} = 0.872 f_{cc} + 0.371 f_{lu} + 6.258 \text{ [MPa]}$
İlki (2003)	$\frac{f_{cc}}{f_{c0}} = 1 + 2.23 \frac{f_{lu}}{f_{c0}}$	$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = 1 + 15 \left(\frac{f_{lu}}{f_{c0}} \right)^{0.75}$	$f_{lu} = \frac{\kappa \rho_f 0.7 \varepsilon_{fu} E_{frp}}{2}$
Lam ve Teng (2003)	$\frac{f_{cc}}{f_{c0}} = 1 + 3.3 \frac{f_{lu}}{f_{c0}}$	$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = 1.75 + 12 \left(\frac{f_{lu}}{f_{c0}} \right) \left(\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} \right)^{0.45}$	$f_{lu} = \frac{\varepsilon_{fu} E_{frp} n t_f}{R}$
Fahmy (2010)	$f_{cc} = f_{c0} + 4.5 f_{lu}^{0.7}$ ($f_{c0} \leq 40 \text{ MPa}$)	$\varepsilon_{cc} = \frac{f_{cc} - f_{c0}}{E_2}$	$f_{lu} = \frac{2 f_{ju} n t_f}{d} \quad ; \quad E_l = \frac{2 E_j n t_f}{d}$ $E_2 = 0.83(245.61 f_{c0}^{0.5} + 0.6728 E_l)$
Dai (2011)	$f_{cc} = f_{c0} + 3.5 f_{lu}$	$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = 1 + 17.5 \left(\frac{f_{lu}}{f_{c0}} \right)^{1.2}$	$f_{lu} = \frac{\varepsilon_l E_{frp} (\varepsilon_l) t_f}{R}$

Çizelge 6.2’de gösterilen denklemlerdeki f_{co} ve ϵ_{co} sırasıyla sargısız numunenin basınç dayanımını ve eksenel şekildeğiştirmesini temsil ederken f_{cc} ve ϵ_{cc} sırasıyla sargılanmış numunenin basınç dayanımını ve eksenel şekildeğiştirmesini temsil etmektedir. Bununla birlikte f_{lu} maksimum yanal sargı basıncı değerini sembolize etmektedir. E_2 çekme testleri sonucunda elde edilen grafikte ikinci aşama elastik modülü temsil etmektedir.

İlki (2003) ait bağıntıdaki K (dairesel kesitler için 1) kesit şekline bağlı etki faktörünü, p_f LP’nin hacimsel oranını, f_t lifli polimer kumaşın gerilme direncini ve t_f lifli polimer kumaşın kalınlığını temsil etmektedir. LP tabaka sargı sayısı denklemlerde n ile sembolize edilirken numune çapı D ile sembolize edilmiştir.

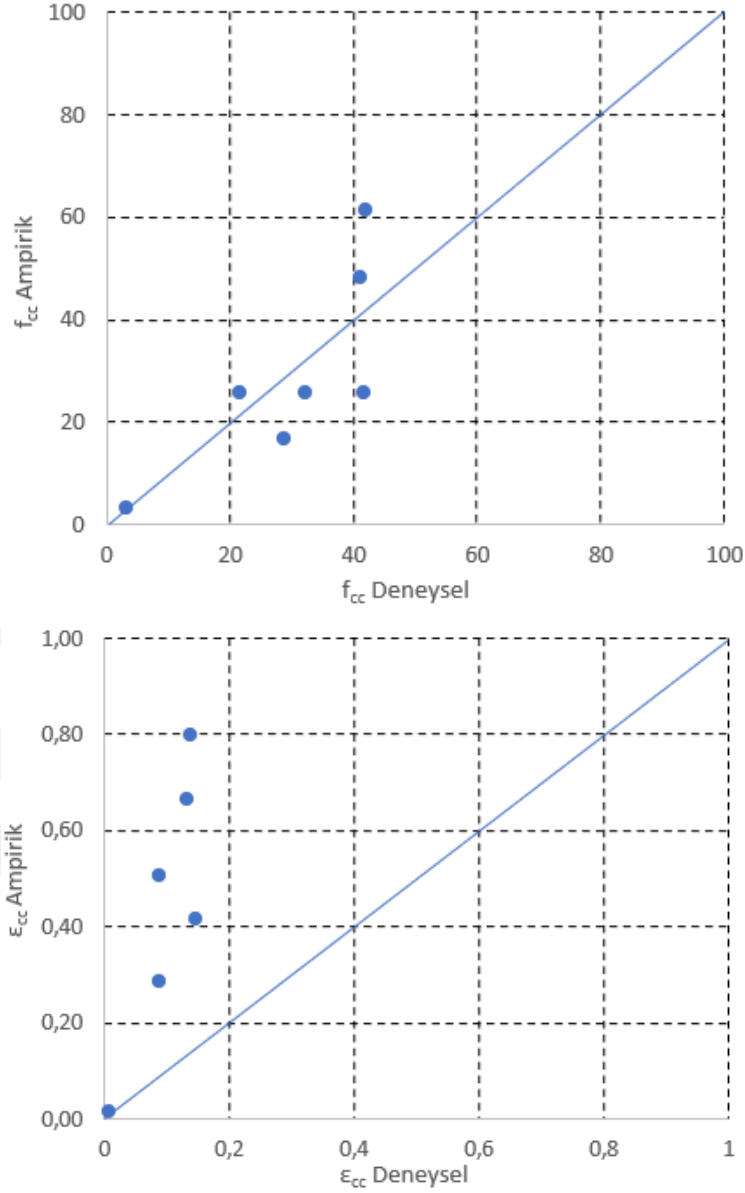
Maksimum yanal sargı basıncı değerini hesaplamak için kullanılan bağıntıdaki f_t gerilme direnci için İlki deneylerinde literatürdeki birçok çalışmadan farklı olarak kupon testinden elde edilen gerilme direnci yerine üretici tarafından verilen değerleri kullanmıştır (İlki & Kumbasar, 2003). Bu nedenle bağıntılardan sonuçlara ulaşabilmek için üretici tarafından sağlanan değerler kullanılmıştır.

İlki (2003) bağıntılarından elde edilen sargılanmış beton basınç dayanımı ve eksenel şekildeğiştirme değerleri deneysel çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar ile Çizelge 6.3’te karşılaştırılmıştır. Karbon lifli polimer kullanılarak güçlendirilen beton numunelerin testleri sonucunda oluşturulan bağıntılar beklendiği üzere PET LP kullanılarak güçlendirilen numunelerin deneysel çalışma sonucunda elde edilen değerlere yakınlıkta sonuçlar vermemiştir. Öyle ki bağıntılardan elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlardan daha büyük sonuçlar vererek güvenli tarafta olmayan sonuçlar üretmiştir. Şekil 6.1’de İlki modeline göre elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışmayla elde edilen sonuçların karşılaştırma grafikleri verilmiştir.



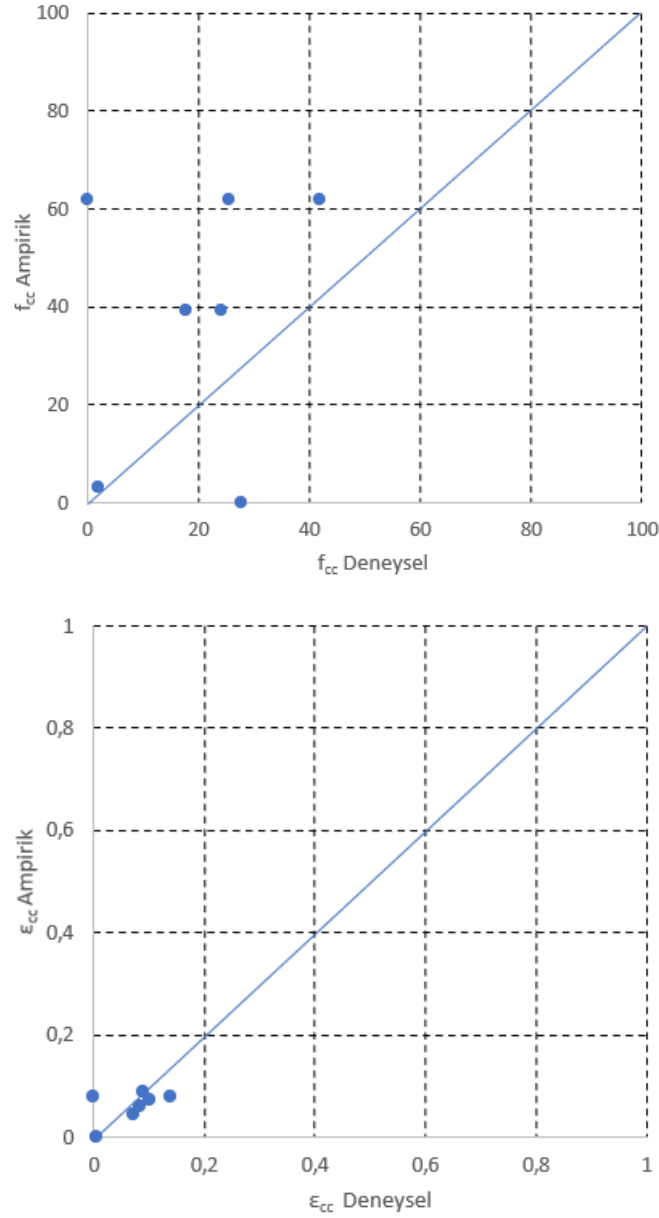
Şekil 6.1: İlki modeline göre analitik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması .

Lam ve Teng (2003) bağıntılarından elde edilen sargılanmış beton basınç dayanımı ve eksenel şekildeğiştirme değerleri deneysel çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar ile Çizelge 6.4'te karşılaştırılmıştır. Karbon LP ile güçlendirilen malzemeler için elde edilen bağıntıların kullanıldığı karşılaştırmada beklendiği üzere sonuçlar, deneylerde elde edilen değerlere kabul edilebilir yakınlıkta olamamıştır. Öte yandan bağıntılardan elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlardan daha küçük sonuçlar vererek güvenli tarafta kalan sonuçlar üretmiştir. Şekil 6.2'de Lam ve Teng modeline göre elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışmayla elde edilen sonuçların karşılaştırma grafikleri verilmiştir.



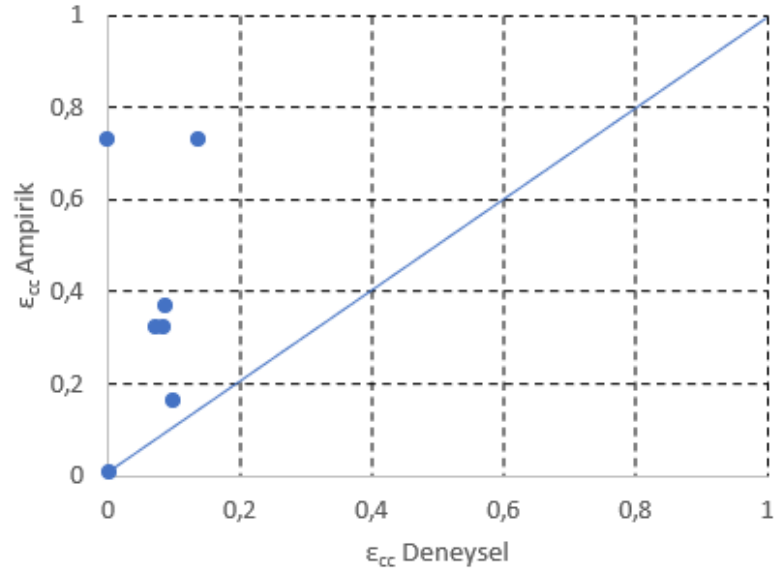
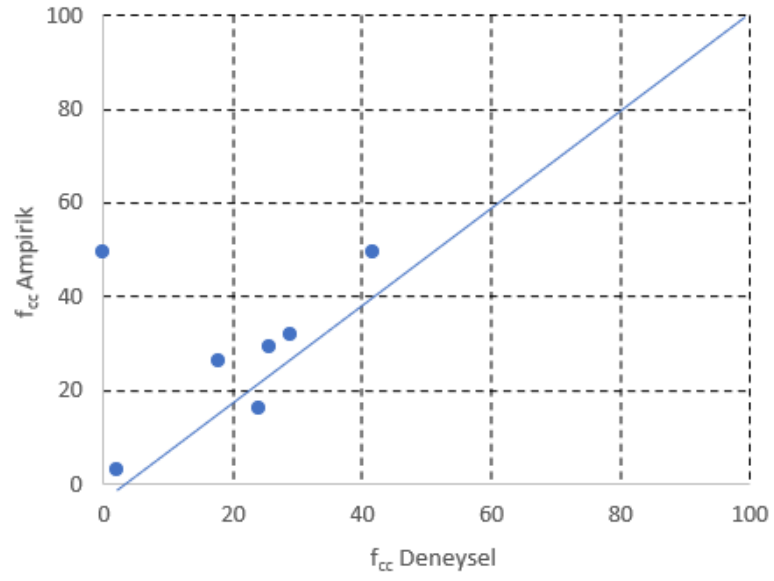
Şekil 6.2: Lam ve Teng modeline göre analitik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması .

(Fahmy & Wu, 2010) bağıntılarına göre elde edilen dayanım kapasitesi değerleri diğer modellere kıyasla deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara daha yakın değerler vermiştir. Bunun nedeni bu bağıntılar oluşturulurken içerisinde PET LP'lerin de bulunduğu lif tiplerinin dikkate alınmasının olabileceği düşünülmektedir. Şekil 6.3'de Fahmy ve Wu modeline göre elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışmayla elde edilen sonuçların karşılaştırma grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.3: Fahmy ve Wu modeline göre analitik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması .

Daha önceki bağıntıların alındığı çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada içinde PET LP de olduğu farklı tip polimerler kullanılarak bağıntılar elde edilmiştir. Farklı beton basınç dayanımına göre farklı bağıntılar tanımlanmıştır. Dayanım kapasitesinin tahmin ederken gerçeğe çok yakın sonuçlar verememiş olsa da şekildeğiştirme kapasitesi için daha doğru sonuçlar vermiştir. Şekil 6.4’de Dai modeline göre elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışmayla elde edilen sonuçların karşılaştırma grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.4: Dai modeline göre analitik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması .

Birbirinden farklı modeller kullanılarak hesaplanan tahmin değerlerinden Fahmy modeli dayanım kapasitesi değerini tahmini etme de başarılı olurken Dai modeli şekildeğiştirme kapasitesni tahmin etmede başarılıdır.

Çizelge 6.3: İlki (2003)'deki bağıntılara göre numunelerin analitik ve deneysel sonuçları

Numune	Deneysel						Ampirik		$f_{cc}(\text{ampirik})/f_{cc}(\text{deney})$	$\varepsilon_{cc}(\text{ampirik})/\varepsilon_{cc}(\text{deney})$
	f_{cc}	ε_{cc}	$f_{cc,ort}$	$\varepsilon_{cc,ort}$	$f_{cc,ort}/f_{c0}$	$\varepsilon_{cc,ort}/\varepsilon_{c0}$	$f_{cc,ort}/f_{c0}$	$\varepsilon_{cc,ort}/\varepsilon_{c0}$		
ELCS-PHD-M-1-1	15,2	0,059	24,0	0,100	8,0	14,4	13,2	65,874	1,64	4,56
ELCS-PHD-M-1-2	32,9	0,140								
ELCS-PLD-M-1-1	17,5	0,076	17,8	0,073	5,9	10,6	13,2	65,874	2,23	6,24
ELCS-PLD-M-1-2	18,0	0,070								
ELCS-PHD-M-2-2	25,8	0,096	41,9	0,089	14,0	12,9	23,2	110,045	1,66	8,53
ELCS-PHD-M-2-1	25,2	0,082								
ELCS-PLD-C-1-1	32,0	0,095	29,0	0,084	9,7	12,2	13,2	65,874	1,36	5,40
ELCS-PLD-C-1-2	23,3	0,073								
ELCS-PLD-C-2-1	18,8	0,058	41,8	0,138	13,9	20,0	23,2	110,045	1,66	5,49
ELCS-PLD-C-2-2	35,0	0,119								
ELCS-PLD-C-2-3	29,6	0,097								
ELCS-PLD-C-2-4	48,6	0,158								

Çizelge 6.4: Lam ve Teng (2003)'deki bağıntılara göre numunelerin analitik ve deneysel sonuçları .

Numune	Deneysel		Ampirik				$f_{cc}(\text{ampirik})/f_{cc}(\text{deney})$	$\varepsilon_{cc}(\text{ampirik})/\varepsilon_{cc}(\text{deney})$
	$f_{cc, \text{ort}}$	$\varepsilon_{cc, \text{ort}}$	$f_{cc, \text{ort}}$	$\varepsilon_{cc, \text{ort}}$	$f_{cc, \text{ort}}/f_{co}$	$\varepsilon_{cc, \text{ort}}/\varepsilon_{cc}$		
ELCS-PHD-M-1-1 ELCS-PHD-M-1-4	24,0	0,100	25,6	0,564	1,1	81,74	1,06	5,66
ELCS-PLD-M-1-1 ELCS-PLD-M-1-2	17,8	0,073	25,5	0,247	8,5	35,75	1,44	3,39
ELCS-PHD-M-2-3 ELCS-PHD-M-2-4	41,9	0,089	25,5	0,247	8,5	35,85	0,61	2,78
ELCS-PLD-C-1-1 ELCS-PLD-C-1-2	29,0	0,084	16,6	0,142	5,5	20,61	0,57	1,69
ELCS-PLD-C-2-1 ELCS-PLD-C-2-2 ELCS-PLD-C-2-3 ELCS-PLD-C-2-4	41,8	0,138	61,2	0,443	20,4	64,19	1,46	3,20

Çizelge 6.5: Fahmy (2010)'daki bağıntılara göre numunelerin analitik ve deneysel sonuçları .

Numune	Deneysel				Ampirik		$f_{cc}(\text{ampirik})/f_{cc}(\text{deney})$	$\varepsilon_{cc}(\text{ampirik})/\varepsilon_{cc}(\text{deney})$
	$f_{cc, \text{ort}}$	$\varepsilon_{cc, \text{ort}}$	$f_{cc, \text{ort}}$	$\varepsilon_{cc, \text{ort}}$	$f_{cc, \text{ort}}/f_{c0}$	$\varepsilon_{cc, \text{ort}}/\varepsilon_{cc}$		
ELCS-PHD-M-1-1 ELCS-PHD-M-1-4	24,0	0,100	39,3	0,073	13,1	10,60	1,63	0,73
ELCS-PLD-M-1-1 ELCS-PLD-M-1-2	17,8	0,073	39,3	0,043	13,1	6,26	2,21	0,59
ELCS-PHD-M-2-3 ELCS-PHD-M-2-4	41,9	0,089	61,8	0,089	20,6	12,92	1,48	1,00
ELCS-PLD-C-1-1 ELCS-PLD-C-1-2	29,0	0,084	39,3	0,060	13,1	8,76	1,36	0,72
ELCS-PLD-C-2-1 ELCS-PLD-C-2-2 ELCS-PLD-C-2-3 ELCS-PLD-C-2-4	41,8	0,138	61,8	0,079	20,6	11,51	1,48	0,57

Çizelge 6.6: Dai (2011)'deki bağıntılara göre numunelerin analitik ve deneysel sonuçları .

Numune	Deneysel				Ampirik		$f_{cc}(\text{ampirik})/f_{cc}(\text{deney})$	$\varepsilon_{cc}(\text{ampirik})/\varepsilon_{cc}(\text{deney})$
	$f_{cc, \text{ort}}$	$\varepsilon_{cc, \text{ort}}$	$f_{cc, \text{ort}}$	$\varepsilon_{cc, \text{ort}}$	$f_{cc, \text{ort}}/f_{co}$	$\varepsilon_{cc, \text{ort}}/\varepsilon_c$		
ELCS-PHD-M-1-1	24,0	0,100	16,2	0,165	5,4	23,888	0,67	1,65
ELCS-PHD-M-1-4								
ELCS-PLD-M-1-1	17,8	0,073	26,3	0,321	8,8	46,547	1,48	4,41
ELCS-PLD-M-1-2								
ELCS-PHD-M-2-3	41,9	0,089	29,3	0,369	9,8	53,471	0,70	4,15
ELCS-PHD-M-2-4								
ELCS-PLD-C-1-1	29,0	0,084	26,3	0,321	8,8	46,547	0,91	0,26
ELCS-PLD-C-1-2								
ELCS-PLD-C-2-1	41,8	0,138	49,5	0,728	16,5	105,526	1,18	5,26
ELCS-PLD-C-2-2								
ELCS-PLD-C-2-3								
ELCS-PLD-C-2-4								



7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, atıkların geri kazandırılmasından elde edilen PET lifli polimer kumaş kullanılarak düşük beton basınç dayanımına sahip beton silindirlerin sargılanmasının davranışa olan etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Deneyssel olarak gerçekleştirilen bu çalışmada, düşük beton basınç dayanımına sahip dairesel kesitli numuneler farklı sargı tabaka sayısına sahip olacak şekilde PET LP kullanılarak dıştan sargılama yöntemi ile güçlendirilmiştir. Güçlendirmenin ardından monoton ve tekrarlı artan yükler altında test edilerek güçlendirmenin beton silindirlerin davranışına olan etkisi incelenmiştir. LP malzemenin lif yoğunluğu, sargı tabaka sayısı ve yükleme tipi dikkate alınan başlıca parametrelerdir. Referans eleman olarak sargılanmaksızın test edilen 3 adet numune ile birlikte toplamda 17 adet ve 150x300 boyutlarındaki numune test edilerek gerilme ve şekildeğiştirme değişimleri incelenmiştir. Tam boy ve orta boydaki eksenel kısalma değerleri LVDT ile ölçülürken numune yüzeyine yapıştırılan şekildeğiştirmeölçerlerden yatay uzama ve eksenel şekildeğiştirme değerleri belirlenmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen veriler mevcut bağıntılarda yerine koyularak modellere uygunluğu incelenmiştir.

Deneyler sonucunda elde edilen verilerin sonuçları şu şekilde özetlenmiştir:

- Farklı parametrelere sahip her bir numune için sonuçların güvenilirliğini test edebilmek amacıyla kendisiyle aynı özelliklere sahip olarak üretilen numunelerin test sonuçları özdeş numuneler ile yakın davranışlar göstermiştir. Bu durum deney düzeneklerinin düzgün kurulduğunun ve elde edilen verilerin sağlıklı olduğunun göstergesidir.
- Düşük beton basınç dayanımına sahip beton silindirlerin PET LP ile güçlendirilmesi numune davranışına büyük oranda katkı sağlamıştır. PET LP sargı tabaka sayısının artması lif yoğunluğunun düşük ya da yüksek olmasıyla ilişkili olmaksızın dayanım ve şekildeğiştirme kapasitesi üzerinde geliştirici etkiye neden olmuştur. Referans numuneler ile kıyaslandığında sargılamanın numunenin enerji yutma kapasitesine katlı sağladığı görülmüştür.

- Tek katlı ve çift katlı olarak sargılanan numuneler karşılaştırıldığında, sargı tabaka sayısının artması hem dayanım hem de şekildeğiştirme kapasitesi üzerinde daha çok etkili olmuştur.

Çizelge 7.1: Ortalama dayanım ve şekildeğiştirme kapasitesi artış miktarı .

Numune	Dayanım Artışı (%)	Şekildeğiştirme Kapasitesi Artışı (%)
ELCS-PLD-M-1	620	1165
ELCS-PHD-M-1	980	1793
ELCS-PLD-M-2	1270	1243
ELCS-PHD-M-2	1295	1986
ELCS-PLD-C-1	704	889
ELCS-PLD-C-2	1064	1444

- Dairesel kesitli silindirler üzerine yapılan yüklemeler sonucunda, yükleme tipinin davranış üzerinde kayda değer bir değişikliğe sebep olmadığı görülmüştür. Bununla beraber, monoton ve tekrarlı artan yükler numunelerin dayanım kapasitesinde değişikliğe sebep olmazken tekrarlı artan yükler altında test edilen silindirler monoton yükler altında test edilenlere kıyasla daha büyük şekildeğiştirme kapasitesine sahip olmuştur.
- Lastik atıklarının geri kazandırılmasıyla elde edilen PET LP, numunelerin davranışında iyileşmeye katkı sağlamıştır. Bu da mevcut lastik atıkların güçlendirmede kullanılmaya uygun bir malzeme olmasıyla atıkların eritilmesi açısından sürdürülebilirlik üzerinde etkili bir çözüm olabilir. Geleneksel LP malzemelerle karşılaştırıldığında üretimi için ekstra bir hammadde ihtiyacı doğurmaması malzemeyi hem oldukça çevresel hem de ekonomik hale getirmektedir.
- Mevcut modeller deneysel çalışma sonucunda elde edilen verileri tahmin etmede yetersiz kaldığından düşük dayanımlı betonlar için yeni bir model önerilmesi tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

- Bai, Y. L., Dai, J. G., Mohammadi, M., Lin, G., & Mei, S. J.** (2019). Stiffness-based design-oriented compressive stress-strain model for large-rupture-strain (LRS) FRP-confined concrete. *Composite Structures*, 223.
- Bai, Y. L., Zhang, Y. F., Jia, J. F., Mei, S. J., Han, Q., & Dai, J. G.** (2022). Simplified plasticity damage model for large rupture strain (LRS) FRP-confined concrete. *Composite Structures*, 280.
- Bai, Y. L., Dai, J.G., & Teng, J. G.** (2014). Cyclic Compressive Behavior of Concrete Confined with Large Rupture Strain FRP Composites. *Journal of Composites for Construction*, 18(1).
- Bai, Y. L., Zhang, Y. F., Jia, J. F., Han, Q., Du, X.-L., & Ozbakkaloglu, T.** (2022). Compressive Behavior of Large-Scale PEN and PET FRP–Confined RC Columns with Square Cross Sections. *Journal of Composites for Construction*, 26(4).
- Dai, J. G., Lam, L., & Ueda, T.** (2012). Seismic retrofit of square RC columns with polyethylene terephthalate (PET) fibre reinforced polymer composites. *Construction and Building Materials*, 27(1), 206-217.
- Dai, J. G., Bai, Y. L., & Teng, J. G.** (2011). Behavior and Modeling of Concrete Confined with FRP Composites of Large Deformability. *Journal of Composites for Construction*, 15(6), 963-973.
- Dalgic, K. D., Ispir, M., & Ilki, A.** (2016). Cyclic and Monotonic Compression Behavior of CFRP-Jacketed Damaged Noncircular Concrete Prisms. *Journal of Composites for Construction*, 20(1).
- Fahmy, M. F. M., & Wu, Z.** (2010). Evaluating and proposing models of circular concrete columns confined with different FRP composites. *Composites Part B: Engineering*, 41(3), 199-213.
- Han, Q., Yuan, W., Bai, Y., & Du, X.** (2020). Compressive behavior of large rupture strain (LRS) FRP-confined square concrete columns: experimental study and model evaluation. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 53(4).
- Ilki, A., & Kumbasar, N.** (2003). Compressive behaviour of carbon fibre composite jacketed concrete with circular and non-circular cross-sections. *Journal of Earthquake Engineering*, 7(3), 381-406.
- Ilki, A., Peker, ; Onder, Karamuk, ; Emre, Cem Demir, ; & Kumbasar, N.** (2008). *FRP Retrofit of Low and Medium Strength Circular and Rectangular Reinforced Concrete Columns*.

- Ispir, M.** (2015). Monotonic and Cyclic Compression Tests on Concrete Confined with PET-FRP. *Journal of Composites for Construction*, 19(1).
- Lam, L., & Teng, J. G.** (2003). Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete. *Construction and Building Materials*, 17(6-7), 471-489.
- Li, P., Ren, Y., Zhou, Y., Zhu, Z., & Chen, Y.** (2022). Experimental study on the mechanical properties of corroded RC columns repaired with large rupture strain FRP. *Journal of Building Engineering*, 54.
- Michel Samaan, B., Mirmiran, A., & Shahawy, M.** (1998). *MODEL OF CONCRETE CONFINED BY FIBER COMPOSITES*.
- Pimanmas, A., & Saleem, S.** (2019). Evaluation of Existing Stress–Strain Models and Modeling of PET FRP–Confined Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(12).
- Saleem, S., Pimanmas, A., Qureshi, M. I., & Rattanapitikon, W.** (2021). Axial Behavior of PET FRP-Confined Reinforced Concrete. *Journal of Composites for Construction*, 25(1).
- Sirach, N., Smith, S. T., Yu, T., & Mostafa, A.** (2021). Experimental Study on the Confinement of Concrete Cylinders with Large Rupture-Strain FRP Composites. *Journal of Composites for Construction*, 25(4).
- Sulyman, M., Haponiuk, J., & Formela, K.** (2016). Utilization of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) in Engineering Materials: A Review. *International Journal of Environmental Science and Development*, 7(2), 100-108.
- Wang, Y., Liu, P., Cao, Q., Chen, G., Wan, B., Wei, Z., & Bai, Y. L.** (2021). Comparison of monotonic axial compressive behavior of rectangular concrete confined by FRP with different rupture strains. *Construction and Building Materials*, 299.
- Ye, Y. Y., Liang, S. Da, Feng, P., & Zeng, J. J.** (2021). Recyclable LRS FRP composites for engineering structures: Current status and future opportunities. *Içinde Composites Part B: Engineering* (C. 212). Elsevier Ltd.
- Yuan, W. Y., Han, Q., & Bai, Y. L.** (2022). A unified stress-strain model for LRS FRP-confined concrete columns with square and circular cross-sections. *Engineering Structures*, 255.
- Zeng, J. J., Zhu, D. H., Liao, J. J., Zhuge, Y., Bai, Y. L., & Zhang, L.** (2022). Large-rupture-strain (LRS) FRP-confined concrete in square stub columns: Effects of specimen size and assessments of existing models. *Construction and Building Materials*, 326.
- Zhang, D., Zhao, Y., Jin, W., Ueda, T., & Nakai, H.** (2017). Shear strengthening of corroded reinforced concrete columns using pet fiber based composites. *Engineering Structures*, 153, 757-765.
- Zhu, Z., Zhou, Y., Zhu, Z., Sui, L., & Li, P.** (2022). Effect of ultra-high lateral strain capability on the performance of damaged concrete strengthening with PET-FRP: Test and modeling. *Construction and Building Materials*, 350.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Neslihan Aslan

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2021, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakülte, İnşaat Mühendisliği Bölümü

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- *The axial behavior of the low and extremely low strength concrete confined with large-rupture-strain PET-FRPs made of production wastes*, Ali Gürkan Genç, Ömer Faruk Eskicumali, Neslihan Aslan, Tuluhan Ergin, Uğur Alparslan, Medine İspir Arslan, Alper İlki. Current Perspectives and New Directions in Mechanics, Modelling and Design of Structural Systems (pp.1546-1551)