## <u>İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ</u>

## LP SARGILI BETON İÇİN ÖNERİLMİŞ OLAN DAYANIM VE ŞEKİLDEĞİŞTİRME MODELLERİNİN FARKLI BOYUTLAR ÜZERİNDEKİ PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALPER TURGUT

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

AĞUSTOS 2021



## <u>İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ</u>

### LP SARGILI BETON İÇİN ÖNERİLMİŞ OLAN DAYANIM VE ŞEKİLDEĞİŞTİRME MODELLERİNİN FARKLI BOYUTLAR ÜZERİNDEKİ PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alper TURGUT (501181006)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Alper İLKİ

**AĞUSTOS 2021** 



İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501181006 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Alper TURGUT, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "LP SARGILI BETON İÇİN ÖNERİLMİŞ OLAN DAYANIM VE ŞEKİLDEĞİŞTİRME MODELLERİNİN FARKLI BOYUTLAR ÜZERİNDEKİ PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :

**Prof. Dr. Alper İLKİ** İstanbul Teknik Üniversitesi

.....

Jüri Üyeleri :

**Prof. Dr. Kutlu DARILMAZ** İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Bilge DORAN** Yıldız Teknik Üniversitesi

.....

Teslim Tarihi: 28 Temmuz 2021Savunma Tarihi: 16 Ağustos 2021





Anneanneme,



## ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim boyunca, çalışkanlığıyla bana örnek olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, güvenini ve desteğini esirgemeyen, değerli hocam, Prof. Dr. Alper İLKİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam boyunca bana yol gösteren, tecrubelerini esirgemeyen değerli meslektaşlarım Abdullah CENGİZ, Yavuz ÇAVUNT ve Derya ÇAVUNT'a, teşekkürlerimi sunurum.

Yaşamım boyunca hiçbir koşulda desteklerini esirgemeyen, bana her zaman güvenen ve her koşulda arkamda duran çok sevgili anneme ve babama en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ağustos 2021

Alper Turgut İnşaat Mühendisi



# İÇİNDEKİLER

## <u>Sayfa</u>

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	XV
SEKIL LISTESI	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	
1.1 Tezin Amacı	5
1.2 Literatür Araştırması	5
2. MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DENEY HAZIRLIĞI	
2.1 Malzeme Özellikleri	11
2.1.1 Beton	11
2.1.2 Lifli polimer	
2.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması	
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	
3.1 Deney Sonuçları	
3.1.1 C-15-A numunesi	
3.1.2 C-15-B numunesi	
3.1.3 C-15-C numunesi	
3.1.4 C-15-A-1 numunesi	
3.1.5 C-15-B-1 numunesi	
3.1.6 C-15-C-1 numunesi	
3.1.7 C-15-A-2 numunesi	
3.1.8 C-15-B-2 numunesi	
3.1.9 C-15-C-2 numunesi	
3.1.10 C-30-A numunesi	
3.1.11 C-30-B numunesi	
3.1.12 C-30-C numunesi	
3.1.13 C-30-A-1 numunesi	
3.1.14 C-30-B-1 numunesi	
3.1.15 C-30-C-1 numunesi	
3.1.16 C-30-A-2 numunesi	
3.1.17 C-30-B-2 numunesi	51
3.1.18 C-30-C-2 numunesi	
3.2 Numunelerin Idealize edilmesi	55
3.2.1 Sargısız numuneler	57
3.2.2 150 mm çaplı sargılı numuneler	60

3.2.3 300 mm çaplı sargılı numuneler	64
3.3 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	64
4. MODELLERİN KARŞILAŞTIRILMASI	69
4.1 Modeller	69
4.1.1 Lam ve Teng modeli	69
4.1.2 İlki ve Kumbasar modeli	70
4.1.3 Youssef modeli	71
4.1.4 Benzaid modeli	71
4.1.5 Pour modeli	72
4.1.6 TBDY 2018 modeli	73
4.2 Model Sonuçları ile Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	74
4.2.1 Dayanımların karşılaştırılması	74
4.2.2 Dayanıma karşı gelen şekildeğiştirmelerin karşılaştırılması	77
5. SONUCLAR	83
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	87

#### KISALTMALAR

- LP : Lifli Polimer
- **FRP** : Fiber Reinforced Polymer
- **CFRP** : Carbon Fiber Reinforced Polymer
- **LVDT** : Linear Variable Differential Transformer
- **TBDY 2018** : Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018



### SEMBOLLER

$f_f$	: Lifli polimerin çekme dayanımı
$t_f$	: Bir kat lifli polimer için etkili kalınlık
n <sub>f</sub>	: Lifli polimer sarım sayısı
f'ı	: Etkili yanal sargı basıncı
$E_f$	: Lifli polimerin elastisite modulü
$\mathcal{E}_{f}$	: Lifli polimerin kopma anındaki şekildeğiştirmesi
D	: Numune çapı
$\sigma_1$	: Numuneye etkiyen eksenel gerilme
$\sigma_2, \sigma_3$	: Numuneye etkiyen yanal gerilmeler
$k_1, k_2$	: Dayanım ve şekildeğiştirme denklemlerinde kullanılan katsayılar
$f'_{cc}$	: Lifli polimer ile sargılanmış betonun basınç dayanımı
f'co	: Sargısız beton basınç dayanımı
ε <sub>cc</sub>	: Sargılanmış beton basınç dayanımına karşı gelen şekildeğiştirme
ε <sub>co</sub>	: Sargısız beton basınç dayanımına karşı gelen şekildeğiştirme
Н	: Numune yüksekliği
$\varepsilon_{h,rup}$	: Lifli polimerin etkin kopma şekildeğiştirme sınırı
α, β, γ	: Modeli kalibre etmek için kullanılan sabit değerler
$f_c$	: Betonun gerilme değeri
ε <sub>c</sub>	: Betonun şekildeğiştirme değeri
$\beta_1$	: Yang modeline göre grafik eğimini belirleyen parametre
<b>E</b> <sub>0.5</sub>	: Yang modeline göre gerilme- şekildeğiştirme grafiğinin azalan bölgesindeki dayanımını yarısına karşı gelen şekildeğiştirme
$f_0$	: Yang modeline göre referans dayanım
<i>w</i> <sub>0</sub>	: Yang modeline göre referans yoğunluk
w <sub>c</sub>	: Betonun yoğunluğu
$f'_{SE}$	: Yang modeline göre boyut etkisini göz önüne alan dayanım
€ <sub>SE</sub>	: Yang modeline göre boyut etkisini göz önüne alan dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme
d <sub>eq</sub>	: Yang modeline göre eşdeğer numune çapı
$\varepsilon_{yanal}$	: Yanal şekildeğiştirme

- $f_{ccp}$ : Lai modeline göre sargılanmış betondaki maksimum gerilme
- ε<sub>ccp</sub> : Lai modeline göre sargılanmış betondaki maksimum gerilmeye karşı gelen şekildeğiştirme
- *A*, *B* : Lai modeline göre gerilme-şekildeğiştirme grafiğinin şeklini ayarlayan parametreler.



# ÇİZELGE LİSTESİ

### <u>Sayfa</u>

Çizelge 2.1: 1m3 beton karışımı için düzeltilmiş ağırlıklar.	. 12
Çizelge 2.2: Agrega gradasyonu	. 12
Çizelge 2.3: Lifli polimerin mekanik özellikleri.	. 13
Çizelge 2.4: Numune özellikleri.	. 14
Cizelge 3.1: 150 mm çaplı numunelerin deney sonuçları.	. 64
Cizelge 3.2: 300 mm çaplı numunelerin deney sonuçları.	. 65
Cizelge 3.3: Maksimum yatay şekildeğiştirmeler ve LP verimlilik katsayıları	. 65
Cizelge 3.4: Ortalama deney sonuçları	. 66
Çizelge 4.1: 150 mm çaplı numunelerin modellerle hesaplanan dayanımları	.75
Cizelge 4.2: 300 mm çaplı numunelerin modellerle hesaplanan dayanımları	.75
Çizelge 4.3: 150 mm çaplı numunelerin modellerle hesaplanan dayanıma karşı ge	elen
şekildeğiştirme değerleri	. 78
Çizelge 4.4: 300 mm çaplı numunelerin modellerle hesaplanan dayanıma karşı ge	elen
şekildeğiştirme değerleri	. 80
Çizelge 4.5: Modellerin bütün durumlardaki performansları	. 81



# ŞEKİL LİSTESİ

<b>G</b> .	C.
Say	vra
Du	14

Şekil 1.1: Elâzığ 2020 depreminde hasar almış bir kolon (Çağlar ve diğ, 2020)	1
Şekil 1.2: Kolonun dıştan LP ile sargılanması	
(https://www.structuraltechnologies.com).	3
Şekil 1.3: Eksenel yük altında LP sargılı beton davranışı.	4
Şekil 1.4: Sargılı betona ait serbest cisim diyagramı	4
Şekil 1.5: Üç eksenli gerilme hali	6
Şekil 2.1: Kullanılan çift komponentli epoksi.	. 13
Şekil 2.2: Deney numuneleri.	. 14
Sekil 2.3: Numunelerin karbon LP ile sargılanması.	. 15
Şekil 2.4: Numunelerin başlık bölgeleri.	. 16
Şekil 2.5: Bindirme bölgesinin ve şekildeğiştirmeölçerlerin konumu	. 17
Şekil 2.6: Şekildeğiştirmeölçerlerin yapıştırılması.	. 17
Sekil 2.7: Sekildeğiştirmeölçerlerin yapıştırılması sonrası 150 mm çaplı numunele	er.
	. 18
Şekil 2.8: Tij bölgelerinin tahta çubuk ile açılması.	. 18
Sekil 2.9: Başlık yapımı uygulaması.	. 19
Sekil 2.10: Tij ekimi uvgulaması	. 19
Sekil 2.11: Yerdeğiştirmeölçerlerin yerleştirildiği ölçüm sistemi.	. 20
Şekil 2.12: Deneylerde kullanılan yerdeğiştirmeölçerler.	. 20
Şekil 2.13: Deney düzeneği	. 21
Şekil 3.1: C-15-A numunesinin deney öncesi ve sonrası fotoğrafi.	. 23
Şekil 3.2: C-15-A numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-	
şekildeğiştirme grafiği.	. 24
Şekil 3.3: C-15-A numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-	
şekildeğiştirme grafiği.	. 24
Şekil 3.4: C-15-B numunesine ait deney sonrası fotoğraf	. 25
Şekil 3.5: C-15-B numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-	
şekildeğiştirme grafiği	. 25
Şekil 3.6: C-15-B numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-	
şekildeğiştirme grafiği	. 26
Şekil 3.7: C-15-C numunesine ait deney öncesi ve sonrası fotoğraf	. 26
Şekil 3.8: C-15-C numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-	
şekildeğiştirme grafiği	. 27
Şekil 3.9: C-15-C numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-	
şekildeğiştirme grafiği	. 27
Şekil 3.10: C-15-A-1 numunesinin deney öncesi ve sonrası fotoğrafi	. 28
Şekil 3.11: C-15-A-1 numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-	
şekildeğiştirme grafiği	. 28
Şekil 3.12: C-15-A-1 numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-	
şekildeğiştirme grafiği	. 29
Şekil 3.13: C-15-B-1 numunesinin deney sonrası fotoğrafı	. 30

Şekil	3.14:	C-15-B-1 numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-	
		şekildeğiştirme grafiği	30
Şekil	3.15:	C-15-B-1 numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-	
		şekildeğiştirme grafiği	. 31
Şekil	3.16:	C-15-C-1 numunesinin deney sonrası fotoğrafı.	32
Şekil	3.17:	C-15-C-1 numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-	
		şekildeğiştirme grafiği	32
Şekil	3.18:	C-15-C-1 numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-	
		şekildeğiştirme grafiği	33
Şekil	3.19:	C-15-A-2 numunesinin deney öncesi ve sonrası fotoğrafı	34
Şekil	3.20:	C-15-A-2 numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-	
		şekildeğiştirme grafiği.	34
Şekil	3.21:	C-15-A-2 numunesine ait sekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-	
,		sekildeğiştirme grafiği.	. 35
Sekil	3.22:	C-15-B-2 numunesine ait deney sonrası fotoğraf	36
, Sekil	3.23:	C-15-B-2 numunesine ait verdeğistirmeölcerlerle ölcülen gerilme-	
,		sekildeğistirme grafiği.	36
Sekil	3.24:	C-15-B-2 numunesine ait sekildeğistirmeölcerlerle ölcülen gerilme-	
		sekildeğistirme grafiği	
Sekil	3.25:	C-15-C-2 numunesine ait denev sonrası fotoğraf	. 38
Şekil	3.26:	C-15-C-2 numunesine ait verdeğistirmeölcerlerle ölcülen gerilme-	
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		sekildeğistirme grafiği	. 38
Sekil	3.27:	C-15-C-2 numunesine ait sekildeğistirmeölcerlerle ölcülen gerilme-	
şenn		sekildeğistirme grafiği	39
Sekil	3 28.	C-30-A numunesine ait denev öncesi ve sonrası fotoğraf	39
Şekil	3.29:	C-30-A numunesine ait verdeğistirmeölcerlerle ölcülen gerilme-	
şenn	0.271	sekildeğiştirme grafiği	40
Sekil	3.30:	C-30-A numunesine ait sekildeğistirmeölcerlerle ölcülen gerilme-	
şenn	0.001	sekildeğistirme grafiği	40
Sekil	3.31.	C-30-B numunesine ait denev öncesi ve sonrası fotoğraf	41
Şekil	3.32.	C-30-B numunesine ait verdeğiştirmeölcerlerle ölcülen gerilme-	
şenn	0.021	sekildeğistirme grafiği	42
Sekil	3 33.	C-30-B numunesine ait sekildeğistirmeölcerlerle ölcülen gerilme-	
şekii	0.001	sekildeğiştirme orafiği	42
Sekil	3 34.	C-30-C numunesine denev öncesi ve sonrası fotoğraf	43
Şekil	3.35:	C-30-C numunesine ait sekildeğistirmeölcerlerle ölcülen gerilme-	
şenn	0.001	sekildeğistirme grafiği	43
Sekil	3.36.	C-30-A-1 numunesinin denev öncesi ve sonrası fotoğrafı	44
Şekil	3 37.	C-30-A-1 numunesine ait verdeğistirmeölcerlerle ölcülen gerilme-	
şenn	0.07.	sekildeğiştirme grafiği	45
Sekil	3 38.	C-30-A-1 numunesine ait sekildeŏistirmeölcerlerle ölcülen gerilme-	40
şenn	0.001	sekildeğiştirme grafiği	45
Sekil	3 39.	$C_{-30}$ -B-1 numunesine ait denev sonrası fotoğraf	46
Sobil	3 40.	C-30-B-1 numunesine ait verdeğistirmeğilçerlerle ölçülen gerilme	TU
ŞUNII	J.TV.	sekildeğiştirme grafiği	46
Salril	3 /1.	C 30 B 1 numunasina ait sakildağistirmağlaşılarla ölgülen gerilme	40
ŞCKII	J. <del>4</del> 1;	sekildeğiştirme grafiği	<b>17</b>
Salril	3 17.	$C_{20}$ $C_{-1}$ numunesine ait deney sonrast fotograf	/ <del>-</del> /Q
ŞCKII Sal-il	3.42:	$C_{20} = 1$ numunosine ait vordožistirmožlovilorilo žlovilor govilego	40
ŞEKII	5.45:	c-50-C-1 numunesine an yerdegiştirmeoiçerlerle oiçulen gerilme-	10
		şekndegiştirine grangi	4ð

Şekil 3.44	C-30-C-1 numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-	
-	şekildeğiştirme grafiği4	49
Şekil 3.45	C-30-A-2 numunesine ait deney öncesi ve sonrası fotoğraf	50
Şekil 3.46	C-30-A-2 numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-	
	șekildeğiştirme grafiği	50
Şekil 3.47	C-30-A-2 numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-	
	șekildeğiştirme grafiği	51
Şekil 3.48	C-30-B-2 numunesine ait deney sonrası fotoğraf	52
Şekil 3.49	C-30-B-2 numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-	
	şekildeğiştirme grafiği	52
Şekil 3.50	C-30-B-2 numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-	
	șekildeğiştirme grafiği.	53
Şekil 3.51	C-30-C-2 numunesine ait deney sonrası fotoğraf.	54
Şekil 3.52	C-30-C-2 numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-	
a 1 1 <b>2 5</b> 2	şekildeğiştirme grafiği.	54
Şekil 3.53	C-30-C-2 numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-	
G 1 1 2 54	şekildegiştirme grafigi.	55
Şekii 3.54	C-15-A-1 numunesine ait farkli olçum sistemleriyle çizilen gerilme-	-
Colvil 2 55	Sekildegiştirme grangi.	50
Şekii 3.55 Salvil 3.56	150 mm ganly sorgistz numunalarin taarik garilma sakildağistirma grafi	57 Xi
ŞEKII J.JU	, 150 min çaplı sargısız numunelerin teorik gerinne-şekndegiştirme granş	gr
		50
Sekil 3 57	2 Lai ve diğ (2020) modeli akış diyagramı	59 61
Şekil 3.57 Sekil 3 58	Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı.	59 61 63
Şekil 3.57 Şekil 3.58 Şekil 3.59	Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı.	59 61 63 67
Şekil 3.57 Şekil 3.58 Şekil 3.59 Şekil 3.60	Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı. Numunelerin idealize edilişi	59 61 63 67 67
Şekil 3.57 Şekil 3.58 Şekil 3.59 Şekil 3.60 Şekil 4.1:	Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı. Numunelerin idealize edilişi 150 mm çaplı numunelerin gerilme-şekildeğiştirme grafiği 300 mm çaplı numunelerin gerilme-şekildeğiştirme grafiği 150 mm çaplı numunelerin gerilme-şekildeğiştirme grafiği	59 61 63 67 67 e
Şekil 3.57 Şekil 3.58 Şekil 3.59 Şekil 3.60 Şekil 4.1:	Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı. Numunelerin idealize edilişi	59 61 63 67 67 e
Şekil 3.57 Şekil 3.58 Şekil 3.59 Şekil 3.60 Şekil 4.1:	Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı. Numunelerin idealize edilişi 150 mm çaplı numunelerin gerilme-şekildeğiştirme grafiği 300 mm çaplı numunelerin gerilme-şekildeğiştirme grafiği 150 mm çaplı numunelerde deneylerden elde edilen dayanım sonuçları ile modellerin öngördükleri dayanım sonuçlarının karşılaştırılması. (Daire sembolü tek kat sargılı, kare sembolü cift kat sargılı numuneleri temsil	59 61 63 67 67 e
Şekil 3.57 Şekil 3.58 Şekil 3.59 Şekil 3.60 Şekil 4.1:	Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı. Numunelerin idealize edilişi 150 mm çaplı numunelerin gerilme-şekildeğiştirme grafiği 300 mm çaplı numunelerin gerilme-şekildeğiştirme grafiği 150 mm çaplı numunelerde deneylerden elde edilen dayanım sonuçları ild modellerin öngördükleri dayanım sonuçlarının karşılaştırılması. (Daire sembolü tek kat sargılı, kare sembolü çift kat sargılı numuneleri temsil eder.)	59 61 63 67 67 e
Şekil 3.57 Şekil 3.58 Şekil 3.59 Şekil 3.60 Şekil 4.1: Şekil 4.2:	Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı. Numunelerin idealize edilişi	59 61 63 67 67 e
Şekil 3.57 Şekil 3.58 Şekil 3.59 Şekil 3.60 Şekil 4.1: Şekil 4.2:	Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı. Numunelerin idealize edilişi	59 61 63 67 67 e
Şekil 3.57 Şekil 3.58 Şekil 3.59 Şekil 3.60 Şekil 4.1: Şekil 4.2:	<ul> <li>Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı.</li> <li>Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı.</li> <li>Numunelerin idealize edilişi.</li> <li>150 mm çaplı numunelerin gerilme-şekildeğiştirme grafiği.</li> <li>300 mm çaplı numunelerin gerilme-şekildeğiştirme grafiği.</li> <li>150 mm çaplı numunelerde deneylerden elde edilen dayanım sonuçları ile</li> <li>modellerin öngördükleri dayanım sonuçlarının karşılaştırılması. (Daire</li> <li>sembolü tek kat sargılı, kare sembolü çift kat sargılı numuneleri temsil</li> <li>eder.).</li> <li>300 mm çaplı numunelerde deneylerden elde edilen dayanım sonuçları ile</li> <li>modellerin öngördükleri dayanım sonuçlarının karşılaştırılması. (Daire</li> </ul>	59 61 63 67 67 e
Şekil 3.57 Şekil 3.58 Şekil 3.59 Şekil 3.60 Şekil 4.1: Şekil 4.2:	Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı. Numunelerin idealize edilişi	59 61 63 67 67 e 75 e
Şekil 3.57 Şekil 3.58 Şekil 3.59 Şekil 3.60 Şekil 4.1: Şekil 4.2: Şekil 4.3:	Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı. Numunelerin idealize edilişi	59 61 63 67 67 e 75 e 76
Şekil 3.57 Şekil 3.58 Şekil 3.59 Şekil 3.60 Şekil 4.1: Şekil 4.2: Şekil 4.2:	Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı. Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı. Numunelerin idealize edilişi	59 61 63 67 67 67 67 67 75 e 75
Şekil 3.57 Şekil 3.58 Şekil 3.59 Şekil 3.60 Şekil 4.1: Şekil 4.2: Şekil 4.3:	Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı. Numunelerin idealize edilişi	59 61 63 67 67 e 75 e 76
Şekil 3.57 Şekil 3.58 Şekil 3.59 Şekil 3.60 Şekil 4.1: Şekil 4.2: Şekil 4.3:	E Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı. Numunelerin idealize edilişi	59 61 63 67 67 67 67 67 75 e 75 e 76
Şekil 3.57 Şekil 3.58 Şekil 3.59 Şekil 3.60 Şekil 4.1: Şekil 4.2: Şekil 4.3: Şekil 4.3:	<ul> <li>Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı.</li> <li>Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı.</li> <li>Numunelerin idealize edilişi.</li> <li>150 mm çaplı numunelerin gerilme-şekildeğiştirme grafiği.</li> <li>300 mm çaplı numunelerin gerilme-şekildeğiştirme grafiği.</li> <li>150 mm çaplı numunelerde deneylerden elde edilen dayanım sonuçları ile modellerin öngördükleri dayanım sonuçlarının karşılaştırılması. (Daire sembolü tek kat sargılı, kare sembolü çift kat sargılı numuneleri temsil eder.).</li> <li>300 mm çaplı numunelerde deneylerden elde edilen dayanım sonuçları ile modellerin öngördükleri dayanım sonuçlarının karşılaştırılması. (Daire sembolü tek kat sargılı, kare sembolü çift kat sargılı numuneleri temsil eder.).</li> <li>150 mm çaplı numunelerde deneylerden elde edilen dayanım sonuçları ile modellerin öngördükleri dayanım sonuçlarının karşılaştırılması. (Daire sembolü tek kat sargılı, kare sembolü çift kat sargılı numuneleri temsil eder.).</li> <li>300 mm çaplı numunelerde deneylerden elde edilen dayanıma karşı geler şekildeğiştirme sonuçları ile modellerin öngördüklerinin karşılaştırılması</li> <li>300 mm çaplı numunelerde deneylerden elde edilen dayanıma karşı geler şekildeğiştirme sonuçları ile modellerin öngördüklerinin karşılaştırılması</li> <li>300 mm çaplı numunelerde deneylerden elde edilen dayanıma karşı geler şekildeğiştirme sonuçları ile modellerin öngördüklerinin karşılaştırılması</li> </ul>	59 61 63 67 67 e 75 e 76 1 · 78
Şekil 3.57 Şekil 3.58 Şekil 3.59 Şekil 3.60 Şekil 4.1: Şekil 4.2: Şekil 4.3: Şekil 4.3:	Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı.     Numunelerin idealize edilişi	<b>59</b> <b>61</b> <b>63</b> <b>67</b> <b>67</b> <b>6</b> <b>75</b> <b>76</b> <b>76</b> <b>76</b> <b>78</b> <b>51</b> .
Şekil 3.57 Şekil 3.58 Şekil 3.59 Şekil 3.60 Şekil 4.1: Şekil 4.2: Şekil 4.3: Şekil 4.3:	Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı.     Numunelerin idealize edilişi	59 61 63 67 67 67 67 67 75 75 76 76 1



#### LP İLE SARGILI BETON İÇİN ÖNERİLMİŞ OLAN DAYANIM VE ŞEKİL DEĞİŞTİRME MODELLERİNİN FARKLI BOYUTLAR ÜZERİNDEKİ PERFORMANSLARININ İNCELENESİ

#### ÖZET

Geçmişten günümüze, dünyada oluşan depremler birçok kez betonarme binaların toptan göçmesine veya ağır hasar görmesine yol açmışlardır. Günümüzde mevcut yapıların önemli bir kısmı güncel yönetmeliklerin istediği sınır şartları karşılayamamaktadır. Bu yapılar olası bir depremde göçme ya da ağır hasar görme tehlikesiyle karşılaşacaklardır. Mevcut yetersiz yapıların yıkılıp baştan yapılması, yüksek maliyet, kullanıma kapanma gibi birçok nedenden ötürü her koşulda uygulanamamaktadır. Bu soruna çözüm olarak çeşitli güçlendirme yöntemleri önerilmiştir. Bir binanın yeniden yapılması yerine çeşitli güçlendirme yöntemleri ile yönetmelik şartlarını sağlar hale getirilmesi, olası bir depremde oluşacak maddi ve manevi kayıpların önüne geçmek için önemli bir uygulama halini almıştır. Yetersiz bir yapı güçlendirilirken, zaman, maliyet, uygulanabilirlik gibi birçok parametre göz önüne alınıp o yapı için en uygun güçlendirme yöntemi belirlenir. Bu güçlendirme yöntemlerinden bir tanesi son yıllarda popülerite kazanan lifli polimer ile dıştan sargılama yöntemidir. Lif doğrultusunda çekme dayanımının çok yüksek olmasının yanında oldukça hafif bir malzeme olması, korozyon gibi çevresel etkilere karşı dayanıklı olması, şekil verilebilir olması, uygulama sırasında yapının kullanımı engellememesi gibi özellikler LP ile sargılama yöntemini popüler yapan bazı özelliklerdir. Bu yöntem; kolon, kiriş, yığma duvar, döşeme gibi yapı elemanlarında farklı şekillerde uygulanabilir.

LP ile dıştan sargılama yönteminin en etkili olduğu yapı elemanlarından bir tanesi kolonlardır. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda LP ile sargılanan kolonlarda, önemli ölçüde dayanım ve süneklik artışı olduğu gözlemlenmiştir. LP ile sargılanan kolonlarda dayanımın ve şekildeğiştirme kapasitesinin ne kadar artacağını teorik olarak hesaplamak için çeşitli modeller önerilmiştir. Bu modeller sayesinde bir yapıdaki kolonların LP ile ne kadar sargılanırsa yeterli dayanım ve şekildeğiştirme kapasitesine ulaşacağını hesaplamak mümkün olmuştur. Ancak bu modellerin önemli bir çoğunluğu 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde olan kolon numunelerinin deneyleri sonucunda elde edilmiştir.

Bu çalışmada, önde gelen 6 LP ile sargılama modeli, 2 farklı boyutaki kolon deneylerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve modellerin farklı boyutlar için güvenilirliği test edilmiştir.

Çalışma kapsamında yükseklik/çap oranı 2 olan, 150 mm ve 300 mm olarak iki farklı çaptaki numuneler test edilmiştir. Iki boyutta da 3'er numune LP ile sargılanmayıp referans numune olarak kabul edilirken, 3'er numune tek kat, 3'er numune ise çift kat karbon LP ile sargılanmıştır. Çalışma kapsamında toplam 18 adet eksenel basınç deneyi yapılmıştır.

Deney sonuçları incelendiğinde, modellerin boyuttan bağımsız olarak dayanım hesabında deneysel sonuçlara yakın sonuçlar verdiği, şekildeğiştirme hesabında ise kendi içlerinde bile oldukça farklı sonuçlar verdiği saptanmıştır.

150 mm çaplı tek kat sargılı numune ile 300 mm çaplı çift kat sargılı numune sargı oranı olarak aynıdır. Bu iki numune arasındaki tek parametre farklı boyutlardır. Bu iki numune incelendiğinde sargılamanın dayanıma ve dayanıma karşı gelen şekildeğiştirmeye sağladığı artış birbirine oldukça yakındır. Dolayısıyla LP ile sargılamada boyut etkisine neden olan bölgesel kusurların, bu ölçekteki numunelerde etkisinin azaldığı, hatta ortadan kalktığı sonucuna varılmıştır.

#### INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF PROPOSED MODELS OF STRENGTH AND STRAIN FOR FRP WRAPPED CONCRETE ON DIFFERENT SIZES

#### SUMMARY

Reinforced concrete structures constitute a significant part of the building stock in the world. In many parts of the world, existing reinforced concrete structures cannot meet the requirements of building codes and standards. It is known that many old buildings are not suitable for the conditions required by the current codes and are insufficient for reasons such as active updating of codes and inadequate technology in the years when the structure was produced. Various types of damage have been observed in reinforced concrete structural elements in previous earthquakes. Although there are various reasons why buildings are damaged in earthquakes, low concrete strength and insufficient ductility stand out as two important reasons. This situation created a need for reinforcement in existing structures.

When strengthening an existing structure, the most appropriate method is determined, taking into account parameters such as time, cost, and applicability. One of these methods is the external wrapping of a building element with a fiber polymer composite material, which has gained popularity in recent years as an alternative to traditional methods. This method has many unique advantages, such as its low weight and very high tensile strength in the fiber direction, resistance to environmental effects, such as corrosion, malleability, and allowing the structure to be used during application.

Fiber polymer composite materials are used with a combination of very small diameter fibers and polymer matrices. Fibers are generally based on carbon, glass or aramid, which gives strength and rigidity to the material. The polymer matrix transfers the stress to the fibers and enables the fibers to work together. The polymer matrix, usually epoxy-based, allows the fiber polymer composite material to work effectively and provides full adherence between the material and the concrete.

One of the areas where the FRP wrapping method is most effective is the external wrapping of existing columns. Wrapping columns with FRP gives the columns a significant increase in strength, ductility, shear capacity and bending capacity.

Various models have been proposed to predict the increase in strength and strain in FRP-wrapped columns. However, the proposed models are generally obtained by using experimental results of the column specimens with a diameter of 150 mm and a height of 300 mm. Studies investigating the performance of these models in different dimensions are quite limited.

This study aims to investigate the performance of existing FRP-wrapped concrete models in different sizes.

In this study, 18 short concrete columns with circular cross-sections were tested under uniaxial compression. The test specimens were divided into two series (C-15 and C-30) based on cross-sectional size. The test program included 9 cylinder columns with a diameter of 150 mm and 9 cylinder columns with a diameter of 300 mm. For all

specimens, the height-to-width ratio (h/d, where h= height of specimens; and d=diameter of specimens) was equal to 2. Both dimension groups consisted of 3 unconfined specimens, three 1 ply CFRP jacketed specimens and three 2 ply CFRP jacketed specimens.

CEM-I 42.5R was chosen as the cement class for the concrete specimens used in this experimental study. Blast furnace slag was used as a mineral additive. GRACE 554 was used as the plasticizer. Concrete compressive strength is aimed to be approximately 20 MPa. However, after the specimens were taken out of the mold, they waited for more than two years and gained strength.

The fiber polymer used in the study was produced by Dowaksa Advanced Composites Holdings B.V. The interaction between the fiber polymer and the concrete is provided by the CARBONWRAP Resin 530+, a two-component epoxy of the same company. Fiber polymer's mechanical properties are obtained from the company. The tensile strength, elasticity modulus, ultimate rupture strain, nominal thickness of FRP were 4900 MPa, 250 GPA, 2%, and 0.166 mm, respectively.

Three different measurement devices were used to measure the average axial strains. Four longitudinally oriented linear variable differential transformers (LVDTs) were fixed on the columns by two steel frames that were spaced half of the column height at the column midheight region. For specimens with 150 mm diameter, one vertically bonded strain gauge was used, and for specimens with 300 mm diameter, three vertically bonded strain gauges were used. These strain gauges were bonded on the midheight region of concretes with a gauge length of 60 mm. In addition to these two measurement devices, the test setup had its own transducer that measured displacement between the bottom and the top of specimens.

Transverse strains in the jackets were measured with strain gauges with a gauge length of 60 mm. For specimens with 150 mm diameter, two horizontally bonded strain gauges were used, and for specimens with 300 mm diameter, three horizontally bonded strain gauges were used.

Specimens were tested to failure under uniaxial load in the 5000 MPa capacity Instron testing machine located in the ITU Building Materials Laboratory. The testing rate was 0.01 mm/sec.

As a result of examining the test results, it was determined that the CDP-25 type LVDTs used in specimens with a diameter of 150 mm were not sensitive enough to be used in measuring the displacement of specimens with a diameter of 150 mm. Since only one strain gauge is used in 150 mm diameter specimens, it was decided that the strain gauge measurement didn't show the true values either. To solve this problem, an idealized measurement method is proposed, a combination of all the measurement device results. For the specimens with 150 mm diameter, the linear part of the stress-strain curve was obtained from a theoretical stress-strain model. After the unconfined concrete peak strain is reached, full-height transducer data was used to obtain the rest of the curve. For the specimens with 300 mm diameter, mid-height LVDT and strain gauge measurements were used for the linear part of the stress-strain curve. After the unconfined concrete peak strain is reached, full-height transducer data was used to obtain the rest of the curve.

From the test results, in specimens with 150 mm diameter, the average strength of the unconfined, one-layer CFRP wrapped and two-layer CFRP wrapped specimens were obtained as 38.6 MPa, 64.3 MPa, and 76 MPa, respectively. Average strain ratios of

these specimens were obtained as 0.0021, 0.013 and 0.016, respectively. On the other hand, in specimens with 300 mm diameter, the average strength of the unconfined, one-layer CFRP wrapped and two-layer CFRP wrapped specimens were obtained as 35.9 MPa, 44.7 MPa, and 58.5 MPa, respectively. The average strain ratios of these specimens were obtained as 0.0021, 0.009 and 0.013, respectively.

150 mm diameter specimens with a single CFRP wrap have the same confinement ratio as 300 mm diameter specimens with a double CFRP wrap. There is no significant difference between the experimental results of these two specimens. Thus, it can be said that the size effect does not play a significant role in both the strength and strain enhancement of FRP-confined concrete for these specimen sizes.



## 1. GİRİŞ

Beton; agrega, çimento ve suyun karışımından üretilen, kalıplara dökülüp yayılabilen, sertleştiğinde ise taşa benzer bir kütle oluşturan, davranış tipi bakımından gevrek bir yapı malzemesidir. 19. yüzyıldan itibaren beton, çelik donatılar ile birlikte kullanılmaya başlamış ve betonarme adı verilen, günümüzdeki yapı stoğunun önemli bir bölümünü oluşturan yapı malzemesine evrimleşmiştir. Dünyanın birçok bölgesinde mevcut betonarme yapılar, yapı yönetmeliklerinin ve standartların gereklerini sağlayamamaktadır. Özellikle yönetmeliklerin aktif olarak güncellenmesi, yapının üretildiği yıllardaki teknolojinin yetersizliği gibi sebeplerle birçok eski yapının güncel yönetmeliklerin getirdiği şartlara uygun olmadığı ve yetersiz kaldığı bilinmektedir. Daha önce yaşanmış depremlerde betonarme yapı elemanlarında çeşitli hasarlar gözlemlenmiştir. Şekil 1.1'de bir kolon hasarı örneği gösterilmiştir. Bu davranışın çeşitli sebepleri olmakla birlikte düşük beton dayanımı ve yetersiz süneklik iki önemli sebep olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, mevcut yapılarda bir güçlendirme ihtiyacı doğurmuştur.



Şekil 1.1: Elâzığ 2020 depreminde hasar almış bir kolon (Çağlar ve diğ, 2020).

Geçmişten bugüne, bazı mevcut yapılardaki düşük deprem performansına çözüm olarak çeşitli güçlendirme yöntemleri önerilmiş ve uygulanmıştır. Mevcut bir yapı güçlendirilirken, bu yöntemlerden zaman, maliyet, uygulanabilirlik gibi parametreler göze alınılarak güçlendirilecek yapı özelinde en uygun yöntem belirlenerek güçlendirme işlemi uygulanır. Bu yöntemlerden bir tanesi, geleneksel yöntemlere alternatif olarak son yıllarda popülerite kazanan lifli polimer kompozit malzeme ile yapı elemanının dıştan sargılanmasıdır. Lif doğrultusunda çekme dayanımının çok yüksek olmasının yanında oldukça hafif bir malzeme olması, korozyon gibi çevresel etkilere karşı dayanıklı olması, şekil verilebilir olması, uygulama sırasında yapının kullanımı engellememesi gibi özellikler LP ile sargılama yöntemini popüler yapan bazı özelliklerdir. Bu yöntem; kolon, kiriş, yığma duvar, döşeme gibi yapı elemanlarında farklı şekillerde uygulanabilir.

Lifli polimer kompozit malzemeler, çok küçük çaptaki lifler ile polimer matrisin birleşimiyle kullanılır. Lifler genellikle karbon cam veya aramid esaslı olup malzemeye dayanım ve rijitlik kazandırır. Polimer matris ise liflere yük aktarır ve liflerin birlikte çalışmasını sağlar. LP malzemenin etkin çalışması için, malzeme ile beton arasındaki tam aderansı sağlamak genellikle epoksi esaslı olan polimer matrisin görevidir.

LP ile sargılama yönteminin en etkili olduğu alanlardan biri mevcut kolonların dıştan sargılanmasıdır. Bu yöntemle mevcut kolonlarda, eksenel basınç dayanımı, süneklik, kesme kapasitesi, eğilme kapasitesi artışı sağlanır. Kolonların enine doğrultuda LP ile sargılanması, bir yanal basınç sağlar. Tek eksenli basınç durumu altında kalan kolonlarda, üç eksenli gerilme durumu oluşur ve tıpkı enine donatı sargılamasında olduğu gibi dıştan LP ile sargılama durumunda önemli ölçüde basınç dayanımı ve süneklik artışı sağlanır. Şekil 1.2'de bir kolonun dıştan sargılanması gösterilmiştir.



**Şekil 1.2:** Kolonun dıştan LP ile sargılanması (https://www.structuraltechnologies.com).

Monotonik olarak eksenel yükle yüklenen kolonlar, sargısız beton dayanımına erişene kadar lifli polimer çalışmaya başlamaz ve davranış sargısız beton davranışına benzer. Sargısız beton dayanımına ulaşılmasından sonra, lifli polimer etkin hale gelir ve numunenin güç tükenmesi yaşamasını engeller. Bu aşamadan sonra lifli polimer malzemenin özelliklerine göre değişebilen bir süneklik ve eksenel yük kapasitesi artışı gözlemlenir. Numune kısaldıkça yanal bir genişleme olacağından lifli polimer malzeme uzamaya başlar. Bu uzama numunenin boyu boyunca eşit dağılmaz. Teorik olarak en yüksek gerilmeler numune ortasında oluşurken en düşük gerilmeler numune alt ve üst başlıklarında oluşur. Bu sebeple ilk olarak numunenin orta bölgesinde lifli polimer malzeme maksimum uzama değerine ulaşır ve koparak güç tükenmesine sebep olur. Bu davranış şekli Şekil 1.3'te gösterilmiştir. Şekil 1.4'te ise LP ile sargılanmış ve eksenel yük altındaki bir kolona ait serbest cisim diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 1.3: Eksenel yük altında LP sargılı beton davranışı.



Şekil 1.4: Sargılı betona ait serbest cisim diyagramı.

Sargılı beton üzerindeki maksimum yanal sargı basıncını hesaplamak için denge denklemi yazılır. Burada  $f_f$  lifli polimerin oluşturduğu çekme gerilmelerini,  $t_f$  lifli

polimer malzemenin kalınlığını,  $n_f$  lifli polimer sarım sayısını, D numune çapını ifade eder.  $f_f$  değerini bulmak için denklem 1.1 kullanılır. Denge denkleminin çözümlenmesi sonucunda ise etkili yanal sargı basıncı olan  $f'_i$  değeri denklem 1.2 yardımıyla hesaplanır.

$$f_f = E_f \varepsilon_f \tag{1.1}$$

$$f'_{l} = \frac{2t_{f}n_{f}f_{f}}{D} \tag{1.2}$$

Burada  $E_f$ , lifli polimerin elastisite modülü  $\varepsilon_f$ , ise lifli polimere ait kopma anındaki şekildeğiştirme değeridir.

#### 1.1 Tezin Amacı

Betonarme taşıyıcı sistemlerin en önemli yapısal elemanlarından biri olan kolonlarda, eksenel basınç dayanımı, kesme kapasitesi ve süneklik gibi istemlerin karşılanamaması sonucu yapıda toptan göçmeye varan büyük hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu çalışma ile karbon LP ile güçlendirme yönteminde, numune boyutu etkisi deneysel olarak araştırılacak ve mevcut LP ile güçlendirme modellerinin farklı boyutlardaki performansı incelenecektir. Çalışma kapsamında; LP ile dıştan sargılanmış daire en kesitli iki farklı boyuttaki kolonların, tek kat ve çift kat sargılanması durumunda dayanım ve süneklik artışının deneysel olarak incelenmesi ve literatürden alınmış 6 farklı modelin bu boyutlardaki teorik sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması amaçlanmıştır.

#### 1.2 Literatür Araştırması

Geçmişten bugüne, betonun LP malzeme ile sargılanarak dayanım ve süneklik artışını inceleyen birçok çalışma yapılmıştır. Ancak farklı boyutta numuneler kullanılarak LP ile sargılamada boyut etkisini inceleyen çalışmalar son derece sınırlıdır.

Richart ve diğ. (1928), sargı etkisinin temelini atan deneyleri yapmışlardır. Eksenel yük altındaki numunelere ek olarak bir yanal kuvvet uygulamışlardır ve tek eksenli gerilmeleri üç eksenli hale getirmişlerdir. Şekil 1.5'te üç eksenli gerilme hali gösterilmiştir.



Şekil 1.5: Üç eksenli gerilme hali.

Deneyler, silindir en kesitli numuner ile yapılmış olup tüm yüzey boyunca belirli bir gerilme uygulanmıştır. Deneylerde,  $\sigma_2 = \sigma_3$  tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre önemli ölçüde bir dayanım ve süneklik artışı gözlemlenmiştir. Çalışmada, yanal sargı basıncına bağlı maksimum dayanım ve buna karşı gelen şekildeğiştirme değerleri için denklem 1.3 ve denklem 1.4'teki genel formüller önerilmiştir.

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 \sigma_2 \tag{1.3}$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left( 1 + k_2 \frac{\sigma_2}{f'_{co}} \right) \tag{1.4}$$

Yapılan deneylere göre  $k_1 = 4.1$  ve  $k_2 = 5k_1$  sonuçlarına varılmıştır. Önerilen yanal sargı basıncına bağlı dayanım ve şekildeğiştirme bağlantıları uzun yıllar boyunca temel alınmıştır. Bu ifadelerde  $f'_{cc}$  betonun nihai basınç dayanımını,  $f'_{co}$  sargısız beton basınç dayanımını  $\sigma_2 = \sigma_3$  yanal sargı basıncını  $\varepsilon_{cc}$  sargılı betonun dayanımına karşı gelen şekildeğiştirmeyi  $\varepsilon_{co}$  sargısız beton basınç dayanımına karşı gelen şekildeğiştirmeyi ifade eder.

Saadatmanesh ve diğ. (1994) son yıllardaki depremlerde, güncel yönetmeliklerden önce yapılmış köprü kolonlarının yeterli deprem dayanımı gösterememesi üzerine yeni bir depreme karşı güçlendirme yöntemi sunmuşlardır. Mander ve diğ. (1988) tarafından sunulan betonarme modelini LP sargılı betona uyarlayarak yaptıkları bu çalışmada, LP ile sargılı kolonlarda önemli ölçüde dayanım ve süneklik artışı gözlemlemişlerdir.

Mirmiran ve Shahawy (1997a) 24 adet LP sargılı daire enkesitli numunede eksenel basınç altında deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmadaki numuneler; 6, 10 ve 14 kat LP ile sargılanmıştır. Deney sonuçlarında numunelerde önemli ölçüde dayanım ve süneklik artışı gözlemlenmesine rağmen çelik için kullanılan modellerin LP ile sargılanmış numunelere uygulanmasının sağlıklı bir sonuç vermediği ve gerçek dayanım ve süneklik artışından çok daha fazla artış öngördüğü sonucuna varılmıştır.

Samaan ve diğ. (1998), çelik donatı ile sargılanmış kolon için kullanılan modellerin uzantısı olarak kullanılan modellerin aksine Mirmiran ve Shahawy (1997a) çalışmasındaki deney numunelerini kullanarak direkt olarak LP ile sargılanmış kolon için analitik bir model önermişlerdir.

Rochette ve Labossiere (2000), yaptıkları deneysel çalışmada; kare, dikdörtgen ve daire enkesitli küçük boyutlu kolonları karbon ve aramid LP ile sargılayarak eksenel yük altında dayanım ve süneklik artışını incelemişlerdir. Bu çalışma sonucunda sargılama etkisinin numunenin şekliyle doğrudan ilişkili olduğu ve daire enkesitli kolonlarda dıştan sargılamanın daha etkili olduğu ortaya çıkmıştır.

Shahawy ve diğ. (2000), normal ve yüksek dayanımlı betonlardan oluşan, 1 kattan 5 kata kadar karbon LP sargılı 45 adet kolon üzerinde eksenel basınç deneyleri yapmışlardır. Esasen içi beton dolgulu cam LP tüpler için geliştirilmiş olan bir model ve geliştirdikleri doğrusal olmayan sonlu elemanlar modeli ile sonuçlar karşılaştırılmıştır ve iki model de tutarlı sonuçlar vermiştir. Bu çalışmada beton ile LP arasındaki yapışmanın, LP sargılı beton davranışına önemli bir etkisi olmadığı ve cam LP için kullanılan bazı modellerin karbon için de kullanılabileceği ortaya çıkmıştır.

Lam ve Teng (2003), yaptıkları çalışmada, daha önce yapılmış olan çalışmalardan 76 adet LP sargılı numunenin deney verilerini kullanarak yeni bir model önermişlerdir. Mevcut test verilerine baktıklarında, LP malzemenin tek başına denendiği test olan kupon testindeki kopma uzamasının, betona sargılı haldeki LP kopma uzamasından daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu gözlem doğrultusunda LP sargılı beton modeli için kullanılan LP maksimum uzamasının doğru sonuç vermeyeceğini, betona sargılı haldeki gerçek maksimum uzamanın kullanılmasının doğru olacağını söylemişlerdir. LP malzeme testlerinde elde edilen maksimum kopma ile betona sarılmış haldeki LP maksimum uzaması arasında bir oran oluşturulması gerektiğini söylemişlerdir. LP verimlilik faktörü adını verdikleri bu oranı karbon LP için mevcut çalışmalardan yola çıkarak oluşturmuş olmalarına rağmen farklı türdeki LP verimlilik oranları için yeterli test verisi yoktur.

Theriault ve diğ. (2004), bugüne kadar önerilen modellerin genellikle küçük ölçekli kolonlar üzerinde yapılan deneyler doğrultusunda önerildiğini söyleyip kısa kolonlar ve tam ölçekli kolonlar üzerinde deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmanın amacı LP ile sargılanmış kolon davranışındaki narinlik ve ölçek etkisini gözlemlemektir. Çalışmada 3 farklı çap ve 2 farklı narinlik oranına sahip silindir enkesitli kolon deneyleri yapılmıştır. Çalışmada, boyut etkisinin incelendiği numunelerde LP kat sayısı eşit olmadığından ötürü direkt olarak boyut etkisi gözlemlenemesine rağmen en küçük numuneler hariç boyut ve narinlik etkisinin önemli bir etki sağlamadığı sonucuna varılmıştır.

İlki ve diğ. (2008), 68 adet donatılı numuneyi karbon LP ile sargılayarak yaptıkları eksenel basınç deneyleri sonucunda yeni bir davranış modeli önermişlerdir. Bu numunelerin 40'ı düşük dayanımlı betondan, 28'i ise normal dayanımlı betondan oluşmaktadır. Çalışmada daire, kare ve dikdörtgen enkesitli numuneler kullanışmıştır. Deneysel çalışmaya ek olarak, daha önce yapılmış çalışmalardan alınan deneysel bir veritabanı üzerinde önerilen model uygulanmıştır. Çalışmada; düşük dayanımlı numunelerdeki dayanım ve süneklik artışının, normal dayanımlı numunelerdeki artışa göre çok daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca LP ile sargılama, boyuna donatıların burkulmasını engellemiştir.

Wang YF ve Wu HL (2011) yaptıkları deneysel çalışmada, 99 aramid LP ile sargılı kısa kolon ve 36 sargısız kısa kolonu eksenel basınç altında test ederek boyut etkisini incelemişlerdir. Çalışmada daire ve kare enkesitli kolonlar kullanılmış olup iki şekilden de 3'er farklı boyut kullanılmıştır. LP sargı olarak 6 farklı tip aramid LP kullanılırken bütün numuneler tek kat sarılmıştır. Çalışma sonucunda, sargılama oranının az olduğu durumlarda boyut etkisinin dayanımı etkilediği sonucuna varılırken, süneklik üzerinde önemli bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır.

Elsanadedy ve diğ. (2012) literatürdeki modellerin, standart silindir numuneler ve bazı karışık boyuttaki numunelerin deneysel sonuçlarından elde edilmesi dolaysıyla farklı boyutlarda doğru sonuçlar veremeyeceğini düşünüp modellere ek olarak bir boyut
parametresinin gerekli olup olmadığını araştırmışlardır. Bu çalışmada, 3 farklı boyuta sahip 37 daire enkesitli numune deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel incelemeye ek olarak da LS-DYNA yazılımı kullanılarak bir doğrusal olmayan sonlu elemenlar analizi yapılmıştır. Çalışmada 13 numune sargısız iken 24 numune karbon LP ile sargılanarak test edilmiştir. Çalışmada sargılama oranı sabit tutulduğu zaman boyut etkisinin dayanım ve süneklik artışında önemli bir parametre olmadığı sonucuna varılmıştır.





# 2. MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DENEY HAZIRLIĞI

## 2.1 Malzeme Özellikleri

#### 2.1.1 Beton

Çalışma kapsamında toplam 18 adet silindir enkesitli numune üretilmiştir. Bu numunelerin tamamında yükseklik/çap oranı 2'dir. 9 numune 300 mm yüksekliğinde ve 150 mm çapında olup diğer 9 numune 600 mm yüksekliğinde ve 300 mm çapındadır. 150 mm çaplı numune üretiminde standart silindir enkesitli numune kalıbı kullanılmıştır. 300 mm çaplı numune üretiminde ise 300 mm çaplı plastik borular kullanılmıştır. Beton kalıpları, beton dökümünden önce kalıp yağı ile yağlanmışlardır. Beton dökümünün ardından, numunlere 1 gün oda sıcaklığında bekletilmiştir. Numune üretiminin ardından, oluşabilecek su kayıplarını engellemek ve hidratasyon reaksiyonlarının uygun şekilde ve zamanda gerçekleşmesini sağlamak amacıyla betona kür işlemi uygulanmıştır. Numuneler, 1 hafta boyunca sürekli olarak su püskürtülerek kür işleminden geçmişlerdir. Beton yüzeyleri ıslak tutulmuştur ve ıslak kalması sağlanmıştır. Kür işleminin ardından numuneler laboratuvar ortamında soğumaya bırakılmışlardır. Beton karışımında, doğal kum, kırma kum ve iki çeşit kırmataş kullanılmıştır. Çimento sınıfı olarak CEM-I 42.5R seçilmiştir. Çimento, Traçim Çimento A.Ş. fabrikasında üretilmiştir. Mineral katkı olarak yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcı olarak ise GRACE 554 kullanılmıştr. Çalışmada kullanılan betonun karışım oranları Çizelge 2.1'de gösterilmiştir. Beton, 2017 senesinde dökülmüştür. Beton basınç dayanımının yaklaşık 20 MPa olması hedeflenmiştir. Fakat numuneler kalıptan çıkartıldıktan sonra 2 seneyi aşkın bir süre beklemişler ve dayanım kazanmışlardır. Kazanılan dayanım, deneysel çalışmadaki referans numunelerinin eksenel yük altındaki deneyleri sonucunda gözlemlenmiştir. Karışımın su/çimento oranı 0.66'dır. Çizelge 2.2'de, agrega bileşenlerinin elekten geçen yüzdelik oranları olan elek analizi gösterilmiştir.

Malzeme	Karışım	Birim
Çimento	245	kg/m <sup>3</sup>
Su	162	kg/m <sup>3</sup>
Akışkanlaştırıcı	2.70	kg/m <sup>3</sup>
Doğal kum	384	kg/m <sup>3</sup>
Kırma kum	608	kg/m <sup>3</sup>
Kırmataş 1	335	kg/m <sup>3</sup>
Kırmataş 2	630	kg/m <sup>3</sup>
Toplam	2367	kg/m <sup>3</sup>

**Çizelge 2.1:** 1m<sup>3</sup> beton karışımı için düzeltilmiş ağırlıklar.

Çizelge	2.2: A	Agrega	gradasyon	u.

Elek çapı (mm)	Elekten geçen doğal kum (%)	Elekten geçen kırma kum (%)	Elekten geçen kırmataş 1 (%)	Elekten geçen kırmataş 2 (%)
22.4	100	100	100	95
16.0	100	100	100	44
11.2	100	100	88	3
8.0	100	100	49	
4.0	100	98	7	
2.0	99	61	1	
1.0	98	36		
0.500	77	18		
0.250	15	11		
0.125	2	5		
0.063	1	2		

# 2.1.2 Lifli polimer

Çalışmada kullanılan lifli polimer, Dowaksa İleri Kompozit Malzemeler Sanayi Ltd. Şti. firmasından alınmıştır. Lifli polimerin ticari adı 12K A-49'dur. Firma tarafından söz konusu lifli polimer, çekme etkileri altında incelenmiş ve mekanik özellikleri Çizelge 2.3'te verilmiştir.

$f_f$ (MPa)	$E_f$ (MPa)	ε <sub>f</sub> (%)	$t_f$ (mm)
4900	250000	2	0.166

Çizelge 2.3: Lifli polimerin mekanik özellikleri.

Burada  $f_f$ ; lifli polimerin çekme dayanımın,  $E_f$ ; lifli polimerin elastisite modülünü,  $t_f$ ; lifli polimerin dokuma tasarım kalınlığını,  $\varepsilon_f$ ; lifli polimerin kopma anındaki şekildeğiştirme değerini ifade eder. Lifli polimer ile beton arasındaki etkileşim aynı firmanın Şekil 2.1'de verilen CARBONWRAP Resin 530+ isimli çift komponentli epoksisi ile sağlanmıştır. İki bileşen, firma tarafından önerildiği gibi 15 kg/4.5 kg oranına bağlı kalınarak ayrı bir kapta karıştırılarak uygulanmıştır.



Şekil 2.1: Kullanılan çift komponentli epoksi.

#### 2.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Çalışmada üretilen numuneler, her bir boyut için 3 adet referans numunesi, 3 adet tek kat karbon LP sargılı numune ve 3 adet çift kat karbon LP sargılı numune olarak tasarlanmıştır. Numune matrisi Çizelge 2.4'te gösterilmiştir. Numuneler isimlendirilirken, enkesit şekilleri, çapları ve LP ile sargılanma sayıları göz önünde bulundurulmuştur. Örneğin C-15-1 numunesinde C; silindir enkesiti, 15; 150 mm olan numune çapını, 1 ise LP ile sargılanan kat sayısını ifade eder. Şekil 2.2'de deneylerde kullanılan numunelerin 3 boyutlu modellemesi gösterilmiştir.

Numune adı	DxH (mm)	Sargılama sayısı	Adet	
C-15	150x300	0	3	_
C-15-1	150x300	1	3	
C-15-2	150x300	2	3	
C-30	300x600	0	3	
C-30-1	300x600	1	3	
C-30-2	300x600	2	3	

Çizelge 2.4: Numune özellikleri.



Şekil 2.2: Deney numuneleri.

Yerdeğiştirmeölçerlerin yerleştirilebilmesi için tij ekebilmek amacıyla numuneler her biri 10 mm çapında 8 yerden delinmiştir. Bütün numunelerde delik konumları; numune tavanından h/4 mm aşağıda karşılıklı yüzeylerde 4 tane, numune tabanından h/4 mm yukarıda karşılıklı yüzeylerde 4 tane olacak şekilde belirlenmiştir. Bu ifadelerde "h", numune yüksekliğini ifade etmektedir. Delikler, tijlerin birbirleri ile 90° açı yapabileceği şekilde konumlandırılmıştır. Delme işleminden sonra numunelerin yüzeyi zımparalama işlemi yapılarak düzleştirilmiştir. Numunelerin yüzeyleri düzleştirilip temizlendikten sonra tüm yüzeylerine uygun miktarlarda epoksi sürülüp iyice yedirilmiştir. Sonrasında iki boyuttan da 6'şar numune karbon LP ile sargılanmıştır. Şekil 2.3'te numune yüzeyine epoksi uygulanarak LP ile sargılanması gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Numunelerin karbon LP ile sargılanması.

Basınç altında lifli polimerin ezilmemesi amacıyla sargılamaya alttan ve üstten 15 mm boşluk bırakılarak başlanmıştır. Numunelerin alt ve üst başlık bölgeleri, bölgesel hasar almamaları için normal sargılamanın iki katı kadar sargılanmıştır. Tek kat sargılı numunelerde başlık bölgesi 2 kat, çift kat sargılı numunelerde başlık bölgesi dört kat sargılanmıştır. Her iki boyuttaki numunelerde de başlık bölgesi, numunenin üst ve alt ucundan itibaren h/5 mm'lik mesafe olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.4: Numunelerin başlık bölgeleri.

Eksenel yer değiştirme ölçmek amacıyla her numunede 25 mm yer değiştirme kapasiteli 4 adet CDP-25 tipi yerdeğiştirmeölçer kullanılmıştır. Buna ek olarak 150 mm çaplı numunelerde 1, 300 mm çaplı numunelerde 3 adet düşey yönde PL-60-11 tipi şekildeğiştirmeölçerler kullanılmıştır. Enine doğrultuda şekildeğiştirmeleri ölçmek için yatay yönde, 150 mm çaplı numunelerde 2, 300 mm çaplı numunelerde 3 adet PL-60-11 tipişekildeğiştirmeölçerler kullanılmıştır. Oluşturulan ölçüm sistemi haricinde, deneylerin gerçekleştirildiği Instron düzeneğinin bütün boy yer değiştirmesini ölçen kendi ölçüm sistemi de vardır. 150 mm çaplı numunelerde sargılama yapılırken 150 mm bindirme yapılmıştır. 300 mm çaplı numunelerde ise bindirme boyu, 200 mm'dir. Şekil 2.5'te bindirme bölgesi ve şekildeğiştirmeölçerlerin konumları gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Bindirme bölgesinin ve şekildeğiştirmeölçerlerin konumu.

Şekildeğiştirmeölçerler, kullanım kılavuzunda önerildiği şekilde numunelere yapıştırılmıştır. Şekil 2.6'da şekildeğiştirmeölçerlerin yapıştırılması, Şekil 2.7'de şekildeğiştirmeölçerlerin yapıştırıldığı 150 mm çaplı numune seti gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Şekildeğiştirmeölçerlerin yapıştırılması.



Şekil 2.7: Şekildeğiştirmeölçerlerin yapıştırılması sonrası 150 mm çaplı numuneler.

Yerdeğiştirmeölçerlerin yerleştirilmesi amacıyla, sargılama biter bitmez tahta bir çubuk ile epoksisi kurumamış haldeki LP delik bölgelerinden açılmış ve tijlerin LP'i delmesine gerek kalmadan girebilmesine olanak sağlanmıştır. Bu yöntem sayesinde LP delik bölgeleri açık bir şekilde kurumaya bırakılmış ve LP'nin delinmesi önlenmiştir. Şekil 2.8'de tahta çubukla deliklerin açılması gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Tij bölgelerinin tahta çubuk ile açılması.

Deney sırasında yüklenen eksenel yükün numune yüzeyi boyunca eşit olarak dağılabilmesi için bütün numunelerin alt ve üst yüzeylerine ticari ismi Ems F.1311 Dubell olan epoksi bazlı çift bileşenli yapıştırıcı kullanılarak başlık yapılmıştır. Şekil 2.9'da başlık yapımı uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 2.9: Başlık yapımı uygulaması.

Başlık işlemi tamamlandıktan sonra aynı epoksi bazlı çift bileşenli yapıştırıcı ile numunelere belirlenen 8 bölgeden tij ekilmiştir. Tij ekimi uygulaması Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10: Tij ekimi uygulaması.

Yerdeğiştirmeölçerlerin yerleştirilmesi için ayrı bir düzenek hazırlanmıştır. İki kenarlı bir metal plak üst tijlere takılmış ve bu plakla yerdeğiştirmeölçerler sabitlenmiştir. Alttaki tijlere ise düz yüzeyli plaklar yerleştirilmiştir. Şekil 2.11'de yerdeğiştirmeölçerlerin yerleştirildiği ölçüm sistemi 3 boyutlu model üzerinde gösterilmiştir. Şekil 2.12'de ise kullanılan yerdeğiştirmeölçerler gösterilmiştir.



Şekil 2.11: Yerdeğiştirmeölçerlerin yerleştirildiği ölçüm sistemi.



Şekil 2.12: Deneylerde kullanılan yerdeğiştirmeölçerler.

Deneyler İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Hazırlanan numuneler 5000 kN kapasiteli Instron deney düzeneğinde test edilmiştir. Deney düzeneğinin kendisine ait bir tam boy ölçen yerdeğiştirmeölçer de bulunmaktadır. Deney sırasında yük değerlerini bilgisayar ortamına almak için Bluehill 2 isimli yazılımdan faydalanılmıştır. Bütün yüklemeler, yer değiştirme kontrollü olarak yapılmıştır. Yükleme hızı 0.01 mm/s olarak belirlenmiştir. Yük, yer değiştirme ve şekildeğiştirme verileri her saniye için alınmıştır. Şekildeğiştirmeölçerler ve yerdeğiştirmeölçerler TDS-302 tipi veri toplayıcıya kablo ile bağlanmış ve veriler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Şekil 2.13'te deney düzeneği ve ölçüm sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.13: Deney düzeneği.



# 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 3.1 Deney Sonuçları

Deneylerde kullanılan her numune tipi 3 adet özdeş numuneden oluşmaktadır. Bu nedenle numune isimlerine A, B ve C eklenmiştir. Bu harfler, aynı özellikteki numuneleri birbirinden ayırmak için kullanılmıştır. Matematiksel hesaplarda her numune tipi için A, B ve C numunelerinin sonuç değerlerinin ortalaması alınmıştır.

# 3.1.1 C-15-A numunesi

C-15-A numunesi, 150 mm çapındaki referans numunelerin ilkidir. Taşıdığı maksimum eksenel yük 661 kN, maksimum gerilme ise 37.4 MPa'dır. Maksimum yüke karşı gelen düşey şekildeğiştirme, düşey şekildeğiştirmeölçerle 0.002 olarak ölçülmüş olup, numune orta bölgesindeki 4 adet yerdeğiştirmeölçer ölçümünün ortalamasının numune enkesit alanına bölünmesi sonucu 0.0016 olarak hesaplanmıştır. Numunenin deney öncesi ve sonrasına ait fotoğrafı Şekil 3.1'de verilmiştir. Şekil 3.2'de yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilirken Şekil 3.3'te şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilmiştir.



Şekil 3.1: C-15-A numunesinin deney öncesi ve sonrası fotoğrafı.



Şekil 3.2: C-15-A numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.



Şekil 3.3: C-15-A numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.

### 3.1.2 C-15-B numunesi

C-15-B numunesi, 150 mm çapındaki referans numunelerin ikincisidir. Taşıdığı maksimum eksenel yük 711 kN, maksimum gerilme ise 40.2 MPa'dır. Maksimum yüke karşı gelen düşey şekildeğiştirme, düşey şekildeğiştirmeölçerle 0.0022 olarak ölçülmüş olup, numune orta bölgesindeki 4 adet yerdeğiştirmeölçer ölçümünün ortalamasının numune enkesit alanına bölünmesi sonucu 0.0025 olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.4'te, C-15-B numunesine ait deney sonrası fotoğraf verilmiştir. Şekil 3.5'te

yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilirken Şekil 3.6'da şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilmiştir.



Şekil 3.4: C-15-B numunesine ait deney sonrası fotoğraf.



Şekil 3.5: C-15-B numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.



Şekil 3.6: C-15-B numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.

# 3.1.3 C-15-C numunesi

C-15-C numunesi, 150 mm çapındaki referans numunelerin üçüncsüdür. Taşıdığı maksimum eksenel yük 674 kN, maksimum gerilme ise 38.1 MPa'dır. Maksimum yüke karşı gelen düşey şekildeğiştirme, düşey şekildeğiştirmeölçerle 0.0021 olarak ölçülmüş olup, numune orta bölgesindeki 4 adet yerdeğiştirmeölçer ölçümünün ortalamasının numune enkesit alanına bölünmesi sonucu 0.0026 olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.7'de numuneye ait deney öncesi ve sonrası fotoğraf verilmiştir. Şekil 3.8'de yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilirken Şekil 3.9'da şekildeğiştirmeölçerle ölçülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilmiştir.



Şekil 3.7: C-15-C numunesine ait deney öncesi ve sonrası fotoğraf.



Şekil 3.8: C-15-C numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.



**Şekil 3.9:** C-15-C numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.

### 3.1.4 C-15-A-1 numunesi

C-15-A-1 numunesi, 150 mm çapında, tek kat LP sargılı numunelerin ilkidir. Taşıdığı maksimum eksenel yük 1169 kN, maksimum gerilme ise 66.2 MPa'dır. Düşey şekildeğiştirme, düşey şekildeğiştirmeölçer ve numune orta bölgesindeki 4 adet yerdeğiştirmeölçer ölçümünün ortalamasının numune enkesit alanına bölünmesi ile 0.01 olarak hesaplanmıştır. Numunenin maksimum yüke karşı gelen yatay şekildeğiştirme değeri ise 0.012 olarak ölçülmüştür. Referans numunelerin deney

sonuçlarının ortalaması baz alınarak yapılan ölçümlerde, numune dayanımının 1.7 kat arttığı gözlemlenmiştir. Numuneye ait deney öncesi ve sonrası fotoğrafı Şekil 3.10'da verilmiştir. Şekil 3.11'de yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilirken Şekil 3.12'de düşey şekildeğiştirmeölçerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme ilişkisi verilmiştir.



Şekil 3.10: C-15-A-1 numunesinin deney öncesi ve sonrası fotoğrafı.



**Şekil 3.11:** C-15-A-1 numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.



**Şekil 3.12:** C-15-A-1 numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.

### 3.1.5 C-15-B-1 numunesi

C-15-B-1 numunesi, 150 mm çapında, tek kat LP sargılı numunelerin ikincisidir. Taşıdığı maksimum eksenel yük 1120 kN, maksimum gerilme ise 63.4 MPa'dır. Düşey şekildeğiştirme, düşey şekildeğiştirmeölçerle 0.0092 olarak ölçülmüş olup, numune orta bölgesindeki 4 adet yerdeğiştirmeölçer ölçümünün ortalamasının numune enkesit alanına bölünmesi sonucu 0.01 olarak hesaplanmıştır. Numunenin maksimum gerilmeye karşı gelen yatay şekildeğiştirme değeri ise 0.012 olarak ölçülmüştür. Referans numunelerin deney sonuçlarının ortalaması baz alınarak yapılan ölçümlerde, numune dayanımının 1.6 kat arttığı gözlemlenmiştir. Numuneye ait deney sonrası fotoğraf Şekil 3.13'te verilmiştir. Şekil 3.14'te yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilirken Şekil 3.15'te şekildeğiştirmeölçerle ölçülen



Şekil 3.13: C-15-B-1 numunesinin deney sonrası fotoğrafı.



**Şekil 3.14:** C-15-B-1 numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.



Şekil 3.15: C-15-B-1 numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.

# 3.1.6 C-15-C-1 numunesi

C-15-C-1 numunesi, 150 mm çapında, tek kat LP sargılı numunelerin üçüncüsüdür. Taşıdığı maksimum eksenel yük 1110 kN, maksimum gerilme ise 62.8 MPa'dır. Düşey şekildeğiştirme, düşey şekildeğiştirmeölçerle 0.017 olarak ölçülmüş olup, numune orta bölgesindeki 4 adet yerdeğiştirmeölçer ölçümünün ortalamasının numune enkesit alanına bölünmesi sonucu 0.015 olarak hesaplanmıştır. Numunenin maksimum yüke karşı gelen yatay şekildeğiştirme değeri ise 0.012 olarak ölçülmüştür. Referans numunelerin deney sonuçlarının ortalaması baz alınarak yapılan ölçümlerde, numune dayanımının 1.6 kat arttığı gözlemlenmiştir. Numuneye ait deney sonrası fotoğraf Şekil 3.16'da verilmiştir. Şekil 3.17'de yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme ilişkisi verilirken Şekil 3.18'de şekildeğiştirmeölçerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme ilişkisi verilmiştir.



Şekil 3.16: C-15-C-1 numunesinin deney sonrası fotoğrafı.



**Şekil 3.17:** C-15-C-1 numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.



**Şekil 3.18:** C-15-C-1 numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.

# 3.1.7 C-15-A-2 numunesi

C-15-A-2 numunesi, 150 mm çapında, çift kat LP sargılı numunelerin ilkidir. Taşıdığı maksimum eksenel yük 1283 kN, maksimum gerilme ise 72.6 MPa'dır. LP sargılı beton davranışında bazen LP maksimum kapasitesine ulaşamadan bölgesel hasarlar alarak erken kopabilir. Bu numunede bu durum yaşanmıştır. Numunede hem yatay sekildeğiştirme, hem düşey şekildeğiştirme özdeş numunelere göre daha düşük ölçülmüştür. Düşey şekildeğiştirme, düşey şekildeğiştirmeölçerle 0.012 olarak ölçülmüş olup, numune orta bölgesindeki 4 adet yerdeğiştirmeölçer ölçümünün ortalamasının numune enkesit alanına bölünmesi sonucu 0.01 olarak hesaplanmıştır. Numunenin maksimum yüke karşı gelen yatay şekildeğiştirme değeri ise 0.0085 olarak ölçülmüştür. Referans numunelerin deney sonuçlarının ortalaması baz alınarak yapılan ölçümlerde, numune dayanımının 1.9 kat arttığı gözlemlenmiştir. Numuneye ait deney öncesi ve sonrası fotoğraf Şekil 3.19'da verilmiştir. Şekil 3.20'de yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilirken Şekil 3.21'de sekildeğistirmeölçerle ölçülen gerilme-şekildeğistirme ilişkişi verilmiştir.



Şekil 3.19: C-15-A-2 numunesinin deney öncesi ve sonrası fotoğrafı.



**Şekil 3.20:** C-15-A-2 numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.



**Şekil 3.21:** C-15-A-2 numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.

### 3.1.8 C-15-B-2 numunesi

C-15-B-2 numunesi, 150 mm çapında, çift kat LP sargılı numunelerin ikincisidir. Taşıdığı maksimum eksenel yük 1394 kN, maksimum gerilme ise 78.9 MPa'dır. Düşey şekildeğiştirme, düşey şekildeğiştirmeölçerle ve yerdeğiştirmeölçerlerden alınan verilerle 0.016 olarak hesaplanmıştır. Numunenin maksimum yüke karşı gelen yatay şekildeğiştirme değeri ise 0.011 olarak ölçülmüştür. Referans numunelerin deney sonuçlarının ortalaması baz alınarak yapılan ölçümlerde, numune dayanımının 2 kat arttığı gözlemlenmiştir. Numuneye ait deney sonrası fotoğraf Şekil 3.22'de verilmiştir. Şekil 3.23'te yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilirken Şekil 3.24'de şekildeğiştirmeölçerle ölçülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilmiştir.



Şekil 3.22: C-15-B-2 numunesine ait deney sonrası fotoğraf.



**Şekil 3.23:** C-15-B-2 numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.



**Şekil 3.24:** C-15-B-2 numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.

# 3.1.9 C-15-C-2 numunesi

C-15-C-2 numunesi, 150 mm çapında, çift kat LP sargılı numunelerin üçüncüsüdür. Taşıdığı maksimum eksenel yük 1348 kN, maksimum gerilme ise 76.3 MPa'dır. Düşey şekildeğiştirme, düşey şekildeğiştirmeölçerle 0.013 olarak ölçülmüş olup, numune orta bölgesindeki 4 adet yerdeğiştirmeölçer ölçümünün ortalamasının numune enkesit alanına bölünmesi sonucu 0.014 olarak hesaplanmıştır. Numunenin maksimum yüke karşı gelen yatay şekildeğiştirme değeri ise 0.01 olarak ölçülmüştür. Referans numunelerin deney sonuçlarının ortalaması baz alınarak yapılan ölçümlerde, numune dayanımının 2 kat arttığı gözlemlenmiştir. Numuneye ait deney sonrası fotoğraf Şekil 3.25'te verilmiştir. Şekil 3.26'da yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme ilişkisi verilirken Şekil 3.27'de şekildeğiştirmeölçerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme ilişkisi verilmiştir.



Şekil 3.25: C-15-C-2 numunesine ait deney sonrası fotoğraf.



**Şekil 3.26:** C-15-C-2 numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.



**Şekil 3.27:** C-15-C-2 numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.

### 3.1.10 C-30-A numunesi

C-30-A numunesi, 300 mm çapında, referans numunelerin ilkidir. Taşıdığı maksimum eksenel yük 1940 kN, maksimum gerilme ise 27.4 MPa'dır. Düşey şekildeğiştirme, düşey şekildeğiştirmeölçerlerle 0.0012 olarak ölçülmüş olup, numune orta bölgesindeki 4 adet yerdeğiştirmeölçer ölçümünün ortalamasının numune enkesit alanına bölünmesi sonucu 0.0016 olarak hesaplanmıştır. Numunenin deney öncesi ve sonrası fotoğrafi Şekil 3.28'de verilmiştir. Şekil 3.29'da yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilirken Şekil 3.30'da şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilmiştir.



Şekil 3.28: C-30-A numunesine ait deney öncesi ve sonrası fotoğraf.



Şekil 3.29: C-30-A numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.



**Şekil 3.30:** C-30-A numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.

#### 3.1.11 C-30-B numunesi

C-30-B numunesi, 300 mm çapında, referans numunelerin ikincisidir. Taşıdığı maksimum eksenel yük 2353 kN, maksimum gerilme ise 33.3 MPa'dır. Düşey şekildeğiştirme, düşey şekildeğiştirmeölçerlerle 0.002 olarak ölçülmüş olup, numune orta bölgesindeki 4 adet yerdeğiştirmeölçer ölçümünün ortalamasının numune enkesit alanına bölünmesi sonucu 0.0023 olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.31'de numuneye ait

deney öncesi ve sonrası fotoğrafi verilmiştir. Şekil 3.32'de yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilirken Şekil 3.33'te şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilmiştir. C-30-B numunesi, 300 mm çaplı referans numunelerde en yüksek dayanım değerine oluşan numunedir. 300 mm çaplı sargısız numunelerde donatı veya sargı olmamasından dolayı oldukça geniş bir bölgesel hasar alanı oluşmaktadır. Diğer referans numunelerde bu etki çok net bir şekilde gözlemlenebiliyorken, C-30-B numunesinde büyük bölgesel kusurlar olmamış ve numune dayanımı 33.3 MPa değerine çıkarak teorik olarak beklenen dayanım değerine oldukça yakınlaşan bir sonuç vermiştir.



Şekil 3.31: C-30-B numunesine ait deney öncesi ve sonrası fotoğraf.



Şekil 3.32: C-30-B numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.



Şekil 3.33: C-30-B numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.

### 3.1.12 C-30-C numunesi

C-30-C numunesi, 300 mm çapında, referans numunelerin üçüncüsüdür. Deney sırasında oluşan bir elektriksel arıza sebebiyle yerdeğiştirmeölçerlerden veri alınamamıştır. Maksimum yük değeri ölçümü, ölçüm sisteminden bağımsız olarak çalıştığı için gerilme ve maksimum yük ölçümünde herhangi bir problem yoktur. Şekildeğiştirme ölçümlerinde ise yalnızca düşey olarak yapıştırılmış şekildeğiştirmeölçerler baz alınmıştır. Taşıdığı maksimum eksenel yük 1982 kN,

maksimum gerilme ise 28 MPa'dır. Düşey şekildeğiştirme, düşey şekildeğiştirmeölçerlerle 0.0017 olarak ölçülmüştür.Şekil 3.34'te numuneye ait deney öncesi ve sonrası fotoğraf verilmiştir. Şekil 3.35'te şekildeğiştirmelerleölçülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilmiştir.



Şekil 3.34: C-30-C numunesine deney öncesi ve sonrası fotoğraf.



**Şekil 3.35:** C-30-C numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.

### 3.1.13 C-30-A-1 numunesi

C-30-A-1 numunesi, 300 mm çapında, tek kat sargılı numunelerin ilkidir. Taşıdığı maksimum eksenel yük 3063 kN, maksimum gerilme ise 43.3 MPa'dır. Düşey şekildeğiştirme, düşey şekildeğiştirmeölçerlerle 0.008 olarak ölçülmüş olup, numune orta bölgesindeki 4 adet yerdeğiştirmeölçer ölçümünün ortalamasının numune enkesit alanına bölünmesi sonucu 0.005 olarak hesaplanmıştır. Numunenin maksimum yüke karşı gelen yatay şekildeğiştirme değeri ise 0.012 olarak ölçülmüştür. Referans numunelerin deney sonuçlarının ortalaması baz alınarak yapılan ölçümlerde, numune dayanımının 1.4 kat arttığı gözlemlenmiştir. Numuneye ait deney öncesi ve sonrası fotoğraf Şekil 3.36'da verilmiştir. Şekil 3.37'de yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilirken Şekil 3.38'de şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilmiştir.



Şekil 3.36: C-30-A-1 numunesinin deney öncesi ve sonrası fotoğrafı.


**Şekil 3.37:** C-30-A-1 numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.



**Şekil 3.38:** C-30-A-1 numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.

### 3.1.14 C-30-B-1 numunesi

C-30-B-1 numunesi, 300 mm çapında, tek kat sargılı numunelerin ikincisidir. Taşıdığı maksimum eksenel yük 3121 kN, maksimum gerilme ise 44.1 MPa'dır. Düşey şekildeğiştirme, düşey şekildeğiştirmeölçerlerle 0.008 olarak ölçülmüş olup, numune orta bölgesindeki 4 adet yerdeğiştirmeölçer ölçümünün ortalamasının numune enkesit alanına bölünmesi sonucu 0.005 olarak hesaplanmıştır. Numunenin maksimum yüke karşı gelen yatay şekildeğiştirme değeri ise 0.012 olarak ölçülmüştür. Referans

numunelerin deney sonuçlarının ortalaması baz alınarak yapılan ölçümlerde, numune dayanımının 1.5 kat arttığı gözlemlenmiştir. Numuneye ait deney sonrası fotoğraf Şekil 3.39'da verilmiştir. Şekil 3.40'de yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme ilişkisi verilirken Şekil 3.41'de şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme ilişkisi verilmiştir.



Şekil 3.39: C-30-B-1 numunesine ait deney sonrası fotoğraf.



Şekil 3.40: C-30-B-1 numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.



Şekil 3.41: C-30-B-1 numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.

# 3.1.15 C-30-C-1 numunesi

C-30-C-1 numunesi, 300 mm çapında, tek kat sargılı numunelerin üçüncüsüdür. Deney sırasında numunenin sağ ve sol yüzündeki yerdeğiştirmeölçerler arızalanmıştır ve veri alınamamıştır. Numunenin taşıdığı maksimum eksenel yük 3266 kN, maksimum gerilme ise 46.2 MPa'dır. Düşey şekildeğiştirme, düşey şekildeğiştirmeölçerlerle 0.01 olarak ölçülmüş olup, numune orta bölgesindeki 4 adet yerdeğiştirmeölçer ölçümünün ortalamasının numune enkesit alanına bölünmesi sonucu 0.0056 olarak hesaplanmıştır. Numunenin maksimum yüke karşı gelen yatay şekildeğiştirme değeri ise 0.012 olarak ölçülmüştür. Referans numunelerin deney sonuçlarının ortalaması baz alınarak yapılan ölçümlerde, numune dayanımının 1.5 kat arttığı gözlemlenmiştir. Numuneye ait deney sonrası fotoğraf Şekil 3.42'de verilmiştir. Şekil 3.43'te yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilirken Şekil 3.44'te şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen



Şekil 3.42: C-30-C-1 numunesine ait deney sonrası fotoğraf.



**Şekil 3.43:** C-30-C-1 numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.



**Şekil 3.44:** C-30-C-1 numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.

## 3.1.16 C-30-A-2 numunesi

C-30-A-2 numunesi, 300 mm çapında, çift kat sargılı numunelerin ilkidir. Taşıdığı maksimum eksenel yük 4081 kN, maksimum gerilme ise 57.7 MPa'dır. Ön bölgedeki orta bölge yerdeğiştirmeölçer, deney sırasında çalışmayı durdurup arızalanmıştır. Bu sebeple ortalamaya dahil edilmemiştir. Düşey şekildeğiştirme, düşey şekildeğiştirmeölçerlerle 0.013 olarak ölçülmüş olup, numune orta bölgesindeki 3 adet yerdeğiştirmeölçer ölçümünün ortalamasının numune enkesit alanına bölünmesi sonucu 0.008 olarak hesaplanmıştır. Numunenin maksimum yüke karşı gelen yatay şekildeğiştirme değeri ise 0.012 olarak ölçülmüştür. Referans numunelerin deney sonuçlarının ortalaması baz alınarak yapılan ölçümlerde, numune dayanımının 1.9 kat arttığı gözlemlenmiştir. Numuneye ait deney öncesi ve sonrası fotoğraf Şekil 3.45'te verilmiştir. Şekil 3.46'da yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi verilirken Şekil 3.47'de şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme ilişkisi verilmiştir.



Şekil 3.45: C-30-A-2 numunesine ait deney öncesi ve sonrası fotoğraf.



**Şekil 3.46:** C-30-A-2 numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.



**Şekil 3.47:** C-30-A-2 numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.

# 3.1.17 C-30-B-2 numunesi

C-30-B-2 numunesi, 300 mm çapında, çift kat sargılı numunelerin ikincisidir. Taşıdığı maksimum eksenel yük 4093 kN, maksimum gerilme ise 57.9 MPa'dır. Düşey şekildeğiştirme, düşey şekildeğiştirmeölçerlerle 0.01 olarak ölçülmüş olup, numune orta bölgesindeki 4 adet yerdeğiştirmeölçer ölçümünün ortalamasının numune enkesit alanına bölünmesi sonucu 0.009 olarak hesaplanmıştır. Numunenin maksimum yüke karşı gelen yatay şekildeğiştirme değeri ise 0.013 olarak ölçülmüştür. Referans numunelerin deney sonuçlarının ortalaması baz alınarak yapılan ölçümlerde, numune dayanımının 1.9 kat arttığı gözlemlenmiştir. Numuneye ait deney sonrası fotoğraf Şekil 3.48'te verilmiştir. Şekil 3.49'da yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme ilişkisi verilirken Şekil 3.50'de şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen



Şekil 3.48: C-30-B-2 numunesine ait deney sonrası fotoğraf.



**Şekil 3.49:** C-30-B-2 numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.



**Şekil 3.50:** C-30-B-2 numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.

## 3.1.18 C-30-C-2 numunesi

C-30-C-2 numunesi, 300 mm çapında, çift kat sargılı numunelerin üçüncüsüdür. Taşıdığı maksimum eksenel yük 4229 kN, maksimum gerilme ise 59.8 MPa'dır. Düşey şekildeğiştirme, düşey şekildeğiştirmeölçerlerle 0.014 olarak ölçülmüş olup, numune orta bölgesindeki 4 adet yerdeğiştirmeölçer ölçümünün ortalamasının numune enkesit alanına bölünmesi sonucu 0.012 olarak hesaplanmıştır. Numunenin maksimum yüke karşı gelen yatay şekildeğiştirme değeri ise 0.012 olarak ölçülmüştür. Referans numunelerin deney sonuçlarının ortalaması baz alınarak yapılan ölçümlerde, numune dayanımının 2 kat arttığı gözlemlenmiştir. Numuneye ait deney sonrası fotoğraf Şekil 3.51'de verilmiştir. Şekil 3.52'de yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme ilişkisi verilirken Şekil 3.53'te şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen



Şekil 3.51: C-30-C-2 numunesine ait deney sonrası fotoğraf.



**Şekil 3.52:** C-30-C-2 numunesine ait yerdeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.



**Şekil 3.53:** C-30-C-2 numunesine ait şekildeğiştirmeölçerlerle ölçülen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.

# 3.2 Numunelerin İdealize edilmesi

Deney sonuçlarının incelenmesi sonucu, 150 mm çaplı numunelerde kullanılan CDP-25 tipi yerdeğiştirmeölçerlerin, 150 mm çaplı numunelerin yer değiştirmelerinin ölçülmesinde kullanmak için yeterli hassasiyette olmadığı saptanmıştır. Yerdeğiştirmeölçer verileri kullanıldığında sargılı numunelerde, sargısız numune dayanımına kadar olan bölgede neredeyse aynı grafiğin çizilmesi beklenirken grafik eğrileri birbirinden farklılık göstermiştir. Şekildeğiştirmeölçerler ise 150 mm çaplı numunelerde 1 adet kullanıldığı için gerçeği yansıtmayacağına karar verilmiştir. Bu sorunun üstesinden gelmek için 150 mm çaplı numunelerde, deney düzeneğinin kendisinde bulunan tüm boy yerdeğiştirmeölçerden elde edilen verilerden yararlanılmıştır. Şekil 3.54'te, C-15-A-1 numunesine ait, orta bölgedeki yerdeğiştirmeölçerlerle çizilen gerilme-şekildeğiştirme grafiği ile düzenekte bulunan tam boy yerdeğiştirmeölçerle çizilen gerilme-şekildeğişikliği grafiği karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 3.54: C-15-A-1 numunesine ait farklı ölçüm sistemleriyle çizilen gerilmeşekildeğiştirme grafiği.

Tüm düzeneğin yer değiştirme verileri kullanıldığında, grafiğin başta doğal olmayan şekilde oldukça yüksek bir şekildeğiştirme değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi deneyin başlangıcındaki başlık boşluğunun kapanmasıdır. Buradaki yer değiştirme numunenin yer değiştirmesi değil, başlığın tamamen oturması sırasında oluşan yer değiştirmedir. Bu sebeple numunelerde, sargısız beton dayanımına karşı gelen şekildeğiştirme değerine kadar olan bölgede, düzenek yerdeğiştirmeölçer verileri kullanılmamalıdır. Sargısız beton dayanımına karşı gelen şekildeğiştirme değerine neredeyse hiç çalışmaz. Bu sebeple bu değere kadar olan bölge, hemen hemen bütün gerilme-şekildeğiştirme modellerinde aynıdır. Asıl fark bu bölgeden sonra oluşmaktadır. Bu sebeple 150 mm çaplı numunelerde sargısız beton dayanımına karşı gelen şekildeğiştirme değerine kadar olan bölge teorik alınmıştır. Şekil 3.55'te 4 farklı lifli polimer sargılı numuneler için önerilen model karşılaştırılmış ve sargısız beton dayanımına karşı gelen şekildeğiştirmeye kadar olan bölgenin önemli farklar olmadan aynı kaldığı gösterilmiştir.



Şekil 3.55: Tek kat sargılı numuneye ait 4 farklı teorik model sonucu

## **3.2.1 Sargisiz numuneler**

Sargısız numunelerde, bütün numuneler teorik alınacak bölge içerisinde kaldığı için tamamen teorik alınmışlardır. 300 mm çaplı sargısız numuneler, büyük boyutlu ve donatısız olduğu için deneylerdeki gerilme sonuçları lokal hasarların çok olmasına bağlı olarak beklenenin altında sonuç vermiştir. Bu durumlar için literatürde önerilen sargısız numunelerdeki boyut etkisi formüllerinden yararlanılmıştır. Yang ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada, sargısız numuneler için farklı boyutları göz önünde bulunduran bir gerilme-şekildeğiştirme modeli önermişlerdir. Bu çalışmada sargısız numuneler için bu model kullanılmıştır. Modelin genel gerilme-şekildeğiştirme yaklaşımı;

$$\frac{f_c}{f'_{co}} = \frac{(\beta_1 + 1)\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}}}{\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}}\right)^{\beta_1 + 1} + \beta_1}$$
(3.1)

şeklindedir. Bu ifadede,  $f_c$  ve  $\varepsilon_c$ ; herhangi bir noktada birbirlerine karşı gelen sırasıyla gerilme ve şekildeğiştirme değerlerini,  $f'_{co}$  ve  $\varepsilon_{co}$ ; sırasıyla sargısız betonda oluşan maksimum gerilmeyi ve buna karşı gelen şekildeğiştirme değerini,  $\beta_1$  ise grafikteki yükseliş ve düşüş eğrilerindeki eğimi kontrol eden parametreyi ifade eder. Bu modelde  $\varepsilon_{co}$  değeri,

$$\varepsilon_{co} = 0.0016 \exp[240(f'_{co}/E_c)]$$
(3.2)

olarak önerilmiştir.  $E_c$  değeri betonun elastisite modülü olup ACI 318-19'da önerilen;

$$E_c = 4730\sqrt{f'_{co}}$$
 (3.3)

formulü ile hesaplanmıştır.

 $\beta_1$  değeri, grafiğin yükseliş ve düşüş eğrilerinde farklı değerler alır. Bu iki farklı değer için aşağıdaki denkemler önerilmiştir:

$$0.4(X_a)^{\beta_1+1} + (0.4 - X_a)\beta_1 - X_a = 0, \qquad \varepsilon_c \le \varepsilon_{co} \text{ için}$$
(3.4)

$$X_d^{\beta_1+1} + (1-2X_d)\beta_1 - 2X_d = 0, \qquad \varepsilon_c \ge \varepsilon_{co} \text{ için} \qquad (3.5)$$

Bu ifadelerde,

$$X_a = 0.4 \frac{f'_{co}}{E_c \varepsilon_{co}}$$
(3.6)

$$X_d = \frac{\varepsilon_{0.5}}{\varepsilon_{co}} \tag{3.7}$$

olarak tanımlanmıştır.  $\varepsilon_{0.5}$ , gerilme-şekildeğiştirme grafiğindeki grafiğin azalan bölgesinde numunenin maksimum gerilmesinin yarısına karşı gelen şekildeğiştirme olarak tanımlanmıştır ve,

$$\varepsilon_{0.5} = 0.0035 \exp[1.2\{(f_o / f'_{co})(w_c / w_o)\}^{1.75}]$$
(3.8)

şeklinde denklemleştirilmiştir. Burada  $f_o$ , referans dayanım olarak yanımlanmıştır ve 10 MPa olarak verilmiştir.  $w_o$  ise referans yoğunluk değeridir ve 2300 kg/m<sup>3</sup> olarak verilmiştir.  $w_c$  ise deneylerde kullanılan numunenin yoğunluğudur. 150 mm çaplı 3 farklı numune dayanımları için bu model uygulanmış ve Şekil 3.56'da gösterilmiştir.



**Şekil 3.56:** 150 mm çaplı sargısız numunelerin teorik gerilme-şekildeğiştirme grafiği Yapılan çalışma sonucu 150 mm çaplı sargısız numunelerdeki maksimum gerilme ortalaması, 38.6317 MPa, buna karşı gelen şekildeğiştirme değeri ise 0.00217 olarak hesaplanmıştır. Yang ve diğ. (2019) modeline göre, 150x300 mm boyutu dışında olan boyutlardaki maksimum gerilme,

$$f'_{SE} = \left[\frac{0.9\sqrt{(h/d_{eq})^{-0.6}}}{\left[1+0.017d_{eq}(w_c/2300)^{-1}\right]^{0.5}} + 0.63\right]f'_{co}$$
(3.9)

Olarak önerilmiştir. Bu ifadede  $f'_{sE}$ ; boyut etkisini göz önüne alan yeni dayanım değeri,  $d_{eq}$  ise eşdeğer numune çapı değeridir. Bizim numunemizde  $d_{eq}$  değeri 300 mm,  $w_c$  değeri 2367 kg/m<sup>3</sup>'tür. Maksimum dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme değeri ise,

$$\varepsilon_{se} = 0.0016 \exp[220(f'_{se}/E_c)]$$
(3.10)

Bağlantısı ile hesaplanır. Bu hesaplamalarda 150 mm çaplı sargısız numuneden elde edilen değerlerin ortalaması kullanılmıştır ve tek bir 300 mm çaplı sargısız teorik gerilme-şekildeğiştirme grafiği elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre 300 mm sargısız numunelerde maksimum gerilme, 35.91 MPa, buna karşı gelen şekildeğiştirme ise 0.0021 olarak hesaplanmıştır.

#### 3.2.2 150 mm çaplı sargılı numuneler

150 mm çaplı sargılı numunelerde, sargısız beton dayanımına karşı gelen şekildeğiştirme değeri olan 0.00217 şekildeğiştirme değerine kadar kullanılmak üzere, Lai ve diğ. (2020) modeli kullanılmıştır. Bu model, artan yanal şekildeğiştirme değerlerine karşı gelen düşey şekildeğiştirme ve gerilme değerlerine dayanmaktadır. Modele göre düşey şekildeğiştirme,

$$\varepsilon_{c} = 0.665 \left(\frac{f'_{co}}{30}\right)^{m} \left\{ \varepsilon_{co} \left[ 1 + 0.75 \left(\frac{-\varepsilon_{yanal}}{\varepsilon_{co}}\right) \right]^{0.7} - \varepsilon_{co} \exp \left[ 7 \left(\frac{\varepsilon_{yanal}}{\varepsilon_{co}}\right) \right] \right\}$$
(3.11)  
$$+ 0.07 \left( -\varepsilon_{yanal} \right)^{0.7} \left[ 1 + 26.8 \left(\frac{f'_{l}}{f'_{co}}\right) \right]$$

bağlantısı ile hesaplanır. Bu ifadede,  $\varepsilon_{yanal}$ , numunedeki yanal şekildeğiştirmedir. "m" değeri ise sargısız beton dayanımı 30'dan büyük ise -0.05, 30'dan küçük veya eşit ise 0 alınır. Modele göre gerilme değerleri ise,

$$\frac{f_c}{f_{ccp}} = \frac{A(\varepsilon_c / \varepsilon_{ccp}) + B(\varepsilon_c / \varepsilon_{ccp})^2}{1 + (A - 2)(\varepsilon_c / \varepsilon_{ccp}) + (B + 1)(\varepsilon_c / \varepsilon_{ccp})^2}$$
(3.12)

Bu ifadede  $f_{ccp}$  ve  $\varepsilon_{ccp}$  sırasıyla, sargılanmış betondaki maksimum gerilme ve buna karşı gelen şekildeğiştirmelere dair teorik değerleridir. A ve B değerleri ise gerilmeşekildeğiştirme grafiğinin şeklini ayarlayan parametrelerdir. Bu ifadeler,

$$\frac{f_{ccp}}{f'_{co}} = 1 + 4.2 \left(\frac{f'_{l}}{f'_{co}}\right)$$
(3.13)

$$\varepsilon_{ccp} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + (17.0 - 0.06f'_{c}) \frac{f'_{l}}{f'_{co}} \right]$$
(3.14)

$$A = E_c \frac{\varepsilon_{ccp}}{f_{ccp}}$$
(3.15)

$$B = \frac{(A-1)^2}{0.55} - 1 \tag{3.16}$$

bağlantılarıyla hesaplanır. Bu modele ait akış diyagramı Şekil 3.57'de verilmiştir.



Şekil 3.57: Lai ve diğ. (2020) modeli akış diyagramı.

150 mm çaplı sargılı numunelerde, heplanan sargısız numune dayanımına karşı gelen şekildeğiştirme değeri olan 0.00217 değerine kadar Lai ve diğ. (2020) modeli kullanılmıştır. Lai ve diğ. (2020) modeline göre 0.00217 şekildeğiştirme değerine karşı gelen gerilme değeri tek kat sargılı numunelerde 40.2 MPa'dır. Düzenekte bulunan yerdeğiştirmeölçer ise deney başlarında boşluk kapanmalarından dolayı büyük yer değiştirmeler yapıp numune gerilmesi 40.2 MPa değerine ulaştığında 0.0076 değerini göstermiştir. Düzenek yerdeğiştirmeölçer ölçümündeki başlık boşluğuna dair olan bütün hatalar, 0.0076 değeri ile 0.00217 değerinin farkına eşittir. Bu fark, 0.00217 şekildeğiştirme değerinden sonraki tüm değerler için düzenek yerdeğiştirmeölçer verilerinden çıkartılmış ve numunelerin idealize edilmiş gerilme-şekildeğiştirme grafiği elde edilmişitir. Uygulanan bu idealize etme yöntemi, hem düzenek yerdeğiştirmeölçer verilerinin deney başlangıcındaki hatalı sonuçlarını düzeltmeye, hem de deney sonucunda modellerin kıyaslanmasında kullanılacak dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme değerlerinin gerçeğe en yakın şekilde elde edilmesine fayda sağlar. Bu idealize yönteminin kullanılmadığı durumlar ile kullanıldığı durumlar arasında, elde edilen dayanıma karşı gelen şekildeğiştirmeler açısından çok büyük bir fark yoktur. Ortalama olarak 0.001 değerinde düzeltmeler yapılmıştır. Fakat bu yöntem ile, yeter hassasiyetteki ölçme sistemi kullanılmış olsa elde edilecek dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme değerlerine en yakın sonuçlar elde edilmiştir. Çift kat sargılı numunelerde ise, ölçüm sistemi yeterli hassasiyette olduğu için Lai ve diğ. (2020) modeli kullanılmamış, 0.0021 değerine kadar deney sırasında ölçülen şekildeğiştirme değerleri kullanılmıştır. Bu değerden sonra tıpkı tek kat sargılı numunelerde olduğu gibi düzeneğe ait yerdeğiştirmeölçer verileri idealize edilerek kullanılmıştır. Şekil 3.58'de örnek bir tek katlı numunenin idealize edilişi gösterilmiştir.



Şekil 3.58: Numunelerin idealize edilişi

## 3.2.3 300 mm çaplı sargılı numuneler

300 mm çaplı numunelerde, yerdeğiştirmeölçer hassasiyetleri numune boyutu büyük olduğu için yeterlidir. Şekildeğiştirmeölçer sayısı ise 1'den 3'e çıkartılmıştır. Özdeş numunelerin deney sonuçları birbirlerine yakın ve tutarlı sonuçlar vermiştir. Bu değişiklikler sebebiyle 300 mm çaplı numunelerdeki ölçüm sistemi kullanıma uygun bulunmuştur. Fakat 150 mm çaplı numunelerde kullanılan idealize yöntemi, parametre oluşturmaması açısından 300 mm çaplı numunelerde de kullanılmıştır. Numunelerde, dayanımına karşı gelen şekildeğiştirme değerine sarg1s1z beton kadar yerdeğiştirmeölçer ve şekildeğiştirmeölçer verilerinden yararlanılırken bu değerden sonra düzenekte bulunan yerdeğiştirmeölçer verileri kullanılmıştır. C-30-C-1 ve C-30yerdeğiştirmeölçerlerde C-2 numunelerinde yaşanan problemlerden ötürü şekildeğiştirmeölçer verileri kullanılmış olup diğer numunelerde yerdeğiştirmeölçer verileri kullanılmıştır.

# 3.3 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan idealize hesaplamaları sonucu elde edilen dayanım ve dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme değerrleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Numune	Dayanım (MPa)	Dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme ( $\varepsilon_{cc}$ )
C-15-A	37.4	0.00217
C-15-B	40.2	0.00217
C-15-C	38.1	0.00217
C-15-A-1	66.2	0.01255
C-15-B-1	63.4	0.01290
C-15-C-1	62.8	0.01356
C-15-A-2	72.6	0.01384
C-15-B-2	78.9	0.01784
C-15-C-2	76.3	0.01672

<b>Çizelge 3.1:</b> 150	mm çaplı numune	lerin deney sonuçla	ırı.
-------------------------	-----------------	---------------------	------

Numune	Dayanım (MPa)	Dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme ( $\varepsilon_{cc}$ )
C-30	35.9	0.00210
C-30-A-1	43.4	0.00871
C-30-B-1	44.2	0.00936
C-30-C-1	46.2	0.00941
C-30-A-2	57.7	0.01350
C-30-B-2	57.9	0.01313
C-30-C-2	59.8	0.01475

Çizelge 3.2: 300 mm çaplı numunelerin deney sonuçları.

Numunelerde kullanılan beton, 2 yılı aşkın süredir beklemede olduğu için belirli bir dayanım kazanmıştır. 150 mm çaplı referans numunelerin maksimum gerilme değerleri ile 300 mm çaplı referans numunelerinin maksimum gerilme değerleri farklılık göstermiştir. Uygulanacak modellerde iki boyutun referans maksimum gerilmesi ayrı ayrı hesaba katılacaktır. Beklenildiği gibi büyük boyutlu numunelerde LP'nin hem taşıma gücüne hem de sünekliğe sağladığı artış daha azdır. Maksimum yüke karşı gelen yatay şekildeğiştirme değerleri genel olarak bütün sargılı numunelerde aynıdır ve ortalama 0.012 civarındadır. Çizelge 3.3'te 4 farklı numune tipi için ortalama yanal şekildeğiştirme değerleri ve lifli polimer verimlilik katsayısı değerleri gösterilmiştir.

Numune adı	Göçme anındaki lifli polimer şekildeğiştirmesi (ε <sub>h,rup</sub> )	Lifli polimer verimlilik katsayısı $\left(\frac{\varepsilon_{h,rup}}{\varepsilon_{f}}\right)$
C-15-1	0.0122	0.651
C-15-2	0.0102	0.511
C-30-1	0.0133	0.664
C-30-2	0.0126	0.631
Ortalama	0.0120	0.604
Varyasyon katsayısı (%)	11	11

Çizelge 3.3: Maksimum yatay şekildeğiştirmeler ve LP verimlilik katsayıları

Bütün özdeş numunelerin dayanım ve dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme sonuçlarının ortalamasının alınmasıyla ortaya çıkan tablo, Çizelge 3.4'te göstermiştir.

Numune	Dayanım (f <sup>°</sup> cc)	Varyasyon katsayısı (%)	Dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme $(\varepsilon_{cc})$	Varyasyon katsayısı (%)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}}$	<u>ε<sub>cc</sub></u> ε <sub>co</sub>
C-15	38.63	3.8	0.00217	-	-	-
C-15-1	64.34	3.1	0.01301	3.9	1.66	6.00
C-15-2	75.98	4.1	0.01613	12	1.96	7.44
C-30	35.91	-	0.00210	-	-	-
C-30-1	44.68	3.0	0.00916	4.2	1.24	4.35
C-30-2	58.50	1.9	0.01379	6.1	1.63	6.56

Çizelge 3.4: Ortalama deney sonuçları.

150 mm çaplı numunelerde maksimum gerilme değeri tek kat sargılı numunelerde 1.66 kat, çift kat sargılı numunelerde ise 1.96 kat artmıştır. Bu değerlere karşılık gelen şekildeğiştirme değerleri ise tek kat sargılı numunelerde 6 kat artarken çift kat sargılı numunelerde 7.44 kat artmıştır. 300 mm çaplı numunelerde ise maksimum gerilme değeri tek kat sargılı numunelerde 1.24 kat, çift kat sargılı numunelerde 1.63 kat artmıştır. Bu değerlere karşılık gelen şekildeğiştirme değerleri ise tek kat sargılı numunelerde 1.63 kat artmıştır. Bu değerlere karşılık gelen şekildeğiştirme değerleri ise tek kat sargılı numunelerde 4.35 kat, çift kat sargılı numunelerde 6.56 kat artmıştır. Bu artış oranları incelendiğinde, bütün numunelerde tek kat sargılama oldukça etkili iken, ikinci kat sargılamada LP etkisi azalmıştır. Boyut etkisini incelemek için C-15-1 numunesi ile C-30-2 numunesi karşılaştırılmalıdır. Çünkü bu iki numunenin sargılama oranları aynıyken boyutları farklıdır. Bu numuneler incelendiğinde, dayanım ve dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme artışlarının birbirine yakın olduğu ve önemli bir boyut etkisinin oluşmadığı saptanmıştır. Şekil 3.59 ve Şekil 3.60'ta sırasıyla 150 mm çaplı



numunelerin ve 300 mm çaplı numunelerin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi gösterilmiştir.

Şekil 3.59: 150 mm çaplı numunelerin gerilme-şekildeğiştirme grafiği.



Şekil 3.60: 300 mm çaplı numunelerin gerilme-şekildeğiştirme grafiği.



## 4. MODELLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

#### 4.1 Modeller

Deney sonuçlarının karşılaştırılması için 6 farklı model seçilmiştir. Diğer 4 modelin aksine, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'de önerilen model, bir yönetmelik modelidir. Bu sebeple diğer modellerden daha güvenli bölgede kalması beklenmektedir. Lam ve Teng (2003) ve İlki ve Kumbasar (2003) modelleri, LP ile sargılı beton için önerilen modeller arasında önemli ve temel bir modellerden oldukları için seçilmişlerdir. Youssef ve diğ. (2007) modelinde farklı boyutlu numune deneyleri üzerinden gidilmiştir. Benzaid ve diğ. (2010) modeli ise farklı dayanımlı betonların deneyleri üzerinden oluşturulmuştur. Pour ve diğ. (2018) modeli ise 1000'i aşkın deney sonucundan faydalınarak oluşturulmuş bir modeldir. Kullanılan 6 model de tasarım temelli oluşturulan modeller olsa da kullanılan deney sonuçlarında odaklanılan noktalar hepsinde farklıdır.

## 4.1.1 Lam ve Teng modeli

Lam ve Teng modeli, 2003 yılında ortaya koyulmuş tasarım temelli bir modeldir (Lam ve Teng, 2003). Modelin ortaya koyulması için, literatürde bulunan 76 adet silindir en kesitli, LP sargılı numunenin deney sonuçları birleştirilerek kapsamlı bir veri tabanı oluşturulmuştur. Bu veritabanın içinde LP malzeme olarak karbon, aramid ve cam kullanılan numuneler vardır. Bu veritabanına bakıldığında; LP malzemelerin testlerinde ulaşılan kopma uzaması değerine, deneylerde ulaşılamadığı gözlemlenmiştir. Buna sebep olarak, betonda lokal çatlakların oluşmasından sonra LP üzerinde uniform olmayan bir gerilme dağılımı oluşması, LP sargı üzerindeki eğriliklerin gerilmeye etkileri gibi görüşler öne sürülmüştür. Bu çalışmada, LP'nin kopmada uzaması ( $\varepsilon_{h.rw}$ ) tanımlanmıştır. LP'nin kopmada uzama değeri, malzeme deneylerinden elde edilen kopma uzaması değerinin belirli bir verimlilik katsayısı ile çarpılmasıyla bulunur. 76 adet numunenin 52 tanesi karbon LP ile sargılanmış olup bu numunelerden elde edilen sonuçlara göre karbon için verimlilik katsayısı ortalama 0.586 olarak hesaplanmıştır. Bu yeni tanımlama sonucu, etkili yanal sargı basıncı ifadesi,

$$f'_{l} = \frac{2E_{f}t_{f}n_{f}\varepsilon_{h,rup}}{D}$$

$$\tag{4.1}$$

şekline dönüşür.

Lam ve Teng modelinde, dayanım denklemi genel forma uymaktadır. Yapılan hesaplamalara göre genel formdaki yanal sargı basıncı katsayısı, 3.3 olarak hesaplanmıştır. Bu bağlamda dayanım denklemi,

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.3 \frac{f'_{l}}{f'_{co}}$$
(4.2)

halini almıştır. Yapılan çalışma sonucu önerilen şekildeğiştirme modeli ise,

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1.75 + 12 \frac{f'_{l}}{f'_{co}} \left(\frac{\varepsilon_{h,rup}}{\varepsilon_{co}}\right)^{0.45}$$
(4.3)

şeklindedir.

## 4.1.2 İlki ve Kumbasar modeli

İlki ve Kumbasar 2003 yılında yaptıkları çalışmada; enkesit şekilleri, yükleme biçimleri, LP sargılama sayıları, hasarlı ve hasarsız olma durumu gibi birçok parametreyi barındıran 4 tanesi referans numune olmak üzere 32 adet numune deneyi yapmışlardır. Deneysel çalışmanın ardından yapılan analitik çalışmadan elde edilen dayanım denklemi,

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \alpha \left[ 1 + 2.23 \left( \frac{f'_l}{f'_{co}} \right) \right]$$
(4.2)

halini almıştır. Bu ifadede " $\alpha$ " ifadesi, bir şekil faktörüdür ve daire enkesitli numuneler için 1 alınır. Çalışma sonucu elde edilen maksimum şekildeğiştirme bağlantısı ise,

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + 15 \left( \frac{f'_{l}}{f'_{co}} \right)^{0.75} \right]$$
(4.2)

şeklinde önerilmiştir.

### 4.1.3 Youssef modeli

Youssef modeli, 2007 yılında ortaya koyulan tasarım temelli bir modeldir (Youssef ve diğ, 2007). Daha önce yapılan modellerde genellikle lifli polimerin çelik donatı gibi davrandığı varsayılmış ve çelik sargı modelleri üzerinden ilerlenmiştir. LP'nin çelik gibi davranmadığının anlaşılmasından sonra yapılan modellerde ise genelde 150x300 mm boyutundaki standart silindir numune deneyleri üzerinden modeller tasarlanmıştır. Youssef modeli; içerisinde farklı boyutlarda, sargılama oranlarında, şekillerde ve farklı LP malzemeleriyle sargılanan numuneler barındıran deneylerin sonuçlarından yola çıkılarak hazırlanmış bir modeldir.

Çalışmada 27 adet 254x381 mm enkesitli dikdörtgen, 27 adet 406 mm çaplı daire en kesitli, 27 adet 381 mm kenar uzunluklu kare en kesitli, 30 adet 150 mm çaplı daire en kesitli numune test edilmiştir. Bütün numuneler en uzun kenar uzunluğunun 2 katı yüksekliğindedir. LP malzeme olarak karbon ve cam LP kullanılmıştır. Numuneler 10 kata kadar çeşitli sargılama sayılarında test edilmiştir. Yanal sargı basıncı ifadesinde verimlilik katsayısı kullanılmamıştır. Yapılan analizler sonucunda modelin öngördüğü dayanım denklemi,

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.25 \left(\frac{f'_{l}}{f'_{co}}\right)^{1.25}$$
(4.4)

şeklindedir. Daire en kesitli numuneler için öngörülen dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme ifadesi ise,

$$\varepsilon_{cc} = 0.003368 + 0.259 \frac{f'_l}{f'_{co}} \left(\frac{f_f}{E_f}\right)^{0.5}$$
(4.5)

şeklindedir

#### 4.1.4 Benzaid modeli

Benzaid Modeli, 30 adet 160x320 mm boyutundaki daire enkesitli numunenin testi sonucunda elde edilmiş bir modeldir (Benzaid ve diğ, 2010). 26 MPa, 50 MPa ve 62 MPa olmak üzere 3 farklı beton dayanımından 10'ar adet numune test edilmiştir. Bu numuneler tek katlı ve üç katlı olarak sargılanmıştır. Ayrıca numunelerde enine ve boyuna donatı kullanılmıştır. Yapılan deneylerde, LP malzemenin, malzeme deneyleri

ile elde edilen maksimum uzaması ile deneyler sırasındaki kopmada uzaması arasında özellikle yüksek dayanımlı beton içeren numunelerde önemli farklılıklar saptanmıştır. Bu çalışmada yapılan deneylerdeki farklılıkların ortalaması alınmış ve verimlilik katsayısı olarak 0.73 değeri önerilmiştir ( $\varepsilon_{h,rup} = 0.73\varepsilon_f$ ). Bu değerle hesaplanan etkili yanal sargı basıncı ifadesi doğrultusunda önerilen yeni modelde dayanım denklemi,

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.2 \frac{f'_{l}}{f'_{co}}$$
(4.6)

şeklindedir. Dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme ifadesi ise denklem 4.7'de gösterilmiştir.

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 2 + 7.6 \frac{f'_{l}}{f'_{co}}$$
(4.7)

#### 4.1.5 Pour modeli

Pour modeli, 2018 yılında ortaya koyulmuş tasarım temelli bir modeldir (Pour ve diğ, 2018). Çalışma kapsamında literatürde bulunan 1063 adet numunenin eksenel yük altındaki deney sonuçlarından bir veri tabanı oluşturulmuştur. Bu numuneler 6.25-125 MPa arasında değişen sargısız beton dayanımına ( $f'_{co}$ ), 0.75-3.4 arasında değişen dayanım artış oranına ( $f'_{cc} / f'_{co}$ ), 1.01-15.8 arasında değişen dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme artışı oranına ( $\mathcal{E}_{cc} / \mathcal{E}_{co}$ ) ve 0.037-2.05 arasında değişen sargılama oranına ( $f_{l} / f_{co}$ ) sahiptir. Numuneler genellikle 150x300 mm boyutunda daire en kesitlidir. Yer yer daha küçük numuneler de kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda dayanım denklemi;

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 \frac{2E_f t_f \varepsilon_f}{D}$$

$$\tag{4.8}$$

şeklinde önerilmiştir. Bu ifadede  $k_1$ , dayanım arttırım katsayısıdır ve yapılan analizlere göre;

$$k_1 = 2.5 - 0.01 f'_{co} \tag{4.9}$$

şeklinde hesaplanır. Yapılan analizler sonucunda önerilen şekildeğiştirme modeli;

$$\varepsilon_{cc} = \gamma \varepsilon_{co} + k_2 \left(\frac{K_l}{f'_{co}}\right)^{\alpha} \varepsilon_f^{\ \beta}$$
(4.10)

şeklinde önerilmiştir. Bu ifadede  $K_1$  ve  $k_2$  ifadeleri sırasıyla; LP sargının yanal rijitliği ve süneklik arttırım katsayısıdır.  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  ifadeleri ise modeli kalibre etmek için kullanılan sabit değerlerdir ve sargısız beton dayanımı 10-120 MPa arasında olan numuneler için sırasıyla 0.75, 1.35, ve 1.5 olarak hesaplanmıştır. Yapılan analizler doğrultusunda  $k_2$  ifadesinin sargısız beton basınç dayanımının değişmesiyle önemli ölçüde değiştiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle  $k_2$ , sargısız beton basınç dayanımının

$$k_2 = 0.3 - 0.001 f'_{co} \tag{4.11}$$

## 4.1.6 TBDY 2018 modeli

TBDY 2018'de önerilen model, bir yönetmelik modeli olduğu için diğer modellere göre daha güvenli bölgede kalması beklenir. Bu yönetmelikte belirlenen dayanım artışı denklemi,

$$f'_{cc} = f'_{co} \Big[ 1 + 2.4 \Big( f'_l / f_{co} \Big) \Big] \ge 1.2 f_{co}$$
(4.12)

şeklindedir. LP ile sargılanmış bir kolonda sargılanmış beton dayanımına karşı gelen şekildeğiştirme ( $\mathcal{E}_{cc}$ ) denklem 4.13 ile belirlenir.

$$\varepsilon_{cc} = 0.002 \left[ 1 + 15 (f'_l / f'_{co})^{0.75} \right]$$
(4.13)

Yanal sargılama basıncı hesabında kullanılacak olan etkin birim uzama değeri  $(\varepsilon_{h,rup})$ , dayanım hesabı için denklem 4.14 ve denklem 4.15'e göre belirlenen değerlerin küçük olanı olarak alınırken dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme hesabı için denlem 4.15 ve denklem 4.16'ya göre belirlenen değerlerin küçük olanı olarak alınır.

$$\varepsilon_{h,rup} \le 0.004 \tag{4.14}$$

$$\varepsilon_{h,rup} \le 0.5\varepsilon_f \tag{4.15}$$

$$\varepsilon_{h,rup} \le 0.01 \tag{4.16}$$

### 4.2 Model Sonuçları ile Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

#### 4.2.1 Dayanımların karşılaştırılması

150 mm çaplı numunelerin eksenel yük altındaki deneyleri sonucunda; 3 adet tek kat sargılı numunenin ortalama dayanımı 64.13 MPa olarak ölçülmüştür. 3 adet çift kat sargılı numunenin ortalama dayanımı ise 75.96 MPa olarak ölçülmüştür. Tek kat sargılı numunelerin dayanım hesabında bütün modeller gerçek dayanımın altında kalmıştır. Pour modeline göre hesaplanan dayanım, gerçeğe en yakın dayanım olup 62.02 MPa olarak hesaplanmıştır. Pour modelini takiben deneysel sonuca en yakın modeller sırasıyla Lam ve Teng, İlki ve Kumbasar, Youssef, Benzaid ve TBDY şeklindedir. Tek katlı numunelerde en iyi sonucu veren Pour modeli, çift katlı numunelerde gerçek dayanımın biraz üzerinde kalarak dayanımı 85.41 MPa olarak öngörmüştür. Çift kat sargılı numunelerin dayanım hesabında Lam ve Teng, İlki ve Kumbasar ve Youssef modelleri gerçek dayanımın biraz üzerinde sonuçlar öngörörken Benzaid modeli gerçeğe yakın sonuçlar öngörmüştür. TBDY modeli beklenildiği gibi gerçek dayanımın altında, güvenli bölgede kalmıştır. Şekil 4.1'de 150 mm çaplı numunelerde modellerle hesaplanan dayanımlar, gerçek dayanımlarla grafik üzerinde karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.1'de ise modeller ile hesaplanan dayanımların ölçülen dayanımlar ile sayısal olarak karşılaştırılması gösterilmiştir.





	Tek kat sargılı numuneler		Çift kat sargılı numuneler	
	$(f'_{cc} = 64.13 \text{ MPa})$		$(f'_{cc} = 75.96 \text{ MPa})$	
	Hesaplanan	f' <sub>cc,deney</sub>	Hesaplanan	f' <sub>cc,deney</sub>
	dayanım	f' <sub>cc,model</sub>	dayanım	f' <sub>cc,model</sub>
	(MPa)		(MPa)	
Lam ve Teng	60.02	1.07	75.97	0.93
Youssef	56.84	1.13	81.95	0.93
Pour	62.02	1.04	85.41	0.89
Benzaid	56.40	1.14	74.17	1.02
İlki ve Kumbasar	59.60	1.08	80.58	0.94
TBDY	51.91	1.24	65.19	1.17

**Çizelge 4.1:** 150 mm çaplı numunelerin modellerle hesaplanan dayanımları.

300 mm çaplı numunelerin eksenel yük altındaki deneyleri sonucunda; 3 adet tek kat sargılı numunenin ortalama dayanımı 44.56 MPa olarak ölçülmüştür. 3 adet çift kat sargılı numunenin ortalama dayanımı ise 58.49 MPa olarak ölçülmüştür. Modeller genel olarak gerçekten çok uzak sonuçlar vermemişlerdir. Tek kat sargılı numunelerde Benzaid modeli, gerçek dayanımı neredeyse sıfır hata ile bularak 44.8 MPa sonucuna ulaşmıştır. Çift kat sargılı numunelerde ise Lam ve Teng ve Pour modeli sırasıyla 57.31 MPa ve 59.6 MPa değerlerini öngörerek gerçeğe oldukça yakın sonuçlar vermişlerdir. TBDY modeli beklenildiği üzere en güvenli bölgede kalan model olmuştur. Şekil 4.2'de 300 mm çaplı numunelerde modellerle hesaplanan dayanımlar, gerçek dayanımların ölçülen dayanımlar ile sayısal olarak karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 4.2: 300 mm çaplı numunelerde deneylerden elde edilen dayanım sonuçları ile modellerin öngördükleri dayanım sonuçlarının karşılaştırılması. (Daire sembolü tek kat sargılı, kare sembolü çift kat sargılı numuneleri temsil eder.)

	Tek kat sargılı numuneler		Çift kat sargılı numuneler	
	$(f'_{cc} = 44.68 \text{ MPa})$		$(f'_{cc} = 58.50 \text{ MPa})$	
	Hesaplanan	f' <sub>cc,deney</sub>	Hesaplanan	f' <sub>cc,deney</sub>
	dayanım	f'cc,model	dayanım	f'cc,model
	(MPa)		(MPa)	
Lam ve Teng	46.61	0.96	57.31	1.02
Youssef	43.71	1.02	54.46	1.07
Pour	47.75	0.94	59.60	0.98
Benzaid	44.79	1.00	53.68	1.09
İlki ve Kumbasar	48.25	0.93	60.58	0.97
TBDY	42.55	1.05	49.19	1.19

Çizelge 4.2: 300 mm çaplı numunelerin modellerle hesaplanan dayanımları.

### 4.2.2 Dayanıma karşı gelen şekildeğiştirmelerin karşılaştırılması

150 mm çaplı numunelerin eksenel yük altındaki deneyleri sonucunda; 3 adet tek kat sargılı numunenin ortalama şekildeğiştirme sonucu 0.013 olarak ölçülmüştür. 3 adet çift kat sargılı numunenin ortalama şekildeğiştirme sonucu ise 0.016 olarak ölçülmüştür. Maksimum dayanıma karşı gelen şekildeğiştirmelerinin hesabında, modeller kendi aralarında oldukça farklı sonuçlar vermişlerdir. Tek kat sargılı numunelerin şekildeğiştirmeleri hesabında en düşük sonucu veren Benzaid modeli ile en yüksek sonucu veren Youssef modeli arasında neredeyse 2 kat fark olmakla birlikte bu fark çift kat sargılı numunelerde 2 katın da üzerine çıkmıştır. Tek kat sargılı numunelerin şekildeğiştirme hesabında Pour, İlki ve Kumbasar ve Youssef modelleri gerçek şekildeğiştirme değerine yakın sonuçlar vermişlerdir.Benzaid modeli gerçeğin çok altında düşük bir şekildeğiştirme artışı öngörmüştür. Çift kat sargılı numunelerin şekildeğiştirme hesaplarında ise Youssef, Lam ve Teng, İlki ve Kumbasar ve Pour modelleri gerçek şekildeğiştirmenin üstünde bir şekildeğiştirme öngörürken TBDY ve Benzaid modeli gerçek değerin altında bir şekildeğiştirme öngörmüştür. Şekil 4.3'te 150 mm çaplı numunelerde modellerle hesaplanan dayanıma karşı gelen şekildeğiştirmeler, gerçek şekildeğiştirmeler ile grafik üzerinde karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.3'te ise modeller ile hesaplanan dayanıma karşı gelen şekildeğiştirmeler, ölçülen şekildeğiştirmeler ile sayısal olarak karşılaştırılması gösterilmiştir.





Çizelge 4.3: 150 mm çaplı numunelerin modellerle hesaplanan dayanıma	karşı	gelen
şekildeğiştirme değerleri.		

	Tek kat sargılı numuneler		Çift kat sargılı numuneler		
	$(\varepsilon'_{cc} = 0.0130)$		$(\mathcal{E}'_{cc} = 0.0161)$		
	Hesaplanan	ε' <sub>cc,deney</sub>	Hesaplanan	$\varepsilon'_{cc,deney}$	
	şekildeğiştirme	$\varepsilon'_{cc,model}$	şekildeğiştirme	$\varepsilon'_{cc,model}$	
Lam ve Teng	0.0131	0.99	0.0225	0.75	
Youssef	0.0138	0.95	0.0241	0.70	
Pour	0.0130	1.00	0.0197	0.86	
Benzaid	0.0078	1.67	0.0112	1.51	
İlki ve Kumbasar	0.0135	0.97	0.0212	0.80	
TBDY	0.0098	1.33	0.0149	1.13	

300 mm çaplı numunelerin eksenel yük altındaki deneyleri sonucunda; 3 adet tek kat sargılı numunenin ortalama şekildeğiştirme sonucu 0.0091 olarak ölçülmüştür. 3 adet çift kat sargılı numunenin ortalama şekildeğiştirme sonucu ise 0.0137 olarak ölçülmüştür. Tek kat sargılı numunelerin şekildeğiştirme hesabında, Lam ve Teng, Youssef, Pour ve İlki ve Kumbasar modelleri gerçek şekildeğiştirme değerine yakın sonuçlar verirken Benzaid modeli gerçek şekildeğiştirme değerinin çok altında kalmıştır. TBDY modeli ise beklenildiği gibi güvenli bölgede kalmıştır. Çift kat sargılı numunelerin şekildeğiştirme hesaplarında ise Lam ve Teng ve Pour modelleri gerçek şekildeğiştirme değerinin neredeyse aynısını hesaplarken Youssef ve İlki ve Kumbasar modelleri de gerçeğe yakın sonuçlar öngörmüşlerdir. Şekil 4.4'te 300 mm çaplı numunelerde modellerle hesaplanan dayanıma karşı gelen şekildeğiştirmeler, gerçek şekildeğiştirmeler ile grafik üzerinde karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.4'te ise modeller ile modeller ile hesaplanan dayanıma karşı gelen şekildeğiştirmeler, ölçülen şekildeğiştirmeler ile sayısal olarak karşılaştırılması gösterilmiştir.





	Tek kat sargılı numuneler		Çift kat sargılı numuneler		
	$(\varepsilon'_{cc} = 0.0091)$		$(\varepsilon'_{cc} = 0.0138)$		
	Hesaplanan	ε' <sub>cc,deney</sub>	Hesaplanan	ε' <sub>cc,deney</sub>	
	şekildeğiştirme	ε' <sub>cc,model</sub>	şekildeğiştirme	$\overline{\varepsilon'_{cc,model}}$	
Lam ve Teng	0.0086	1.06	0.0136	1.02	
Youssef	0.0090	1.02	0.0145	0.95	
Pour	0.0094	0.98	0.0136	1.01	
Benzaid	0.0060	1.53	0.0078	1.77	
İlki ve Kumbasar	0.0099	0.93	0.0152	0.91	
TBDY	0.0067	1.36	0.0099	1.40	

**Çizelge 4.4:** 300 mm çaplı numunelerin modellerle hesaplanan dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme değerleri.

6 farklı model, hem tek kat, çift kat sargı durumunda hem de 150 mm çap, 300 mm çap durumunda dayanım ve dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme sonuçları bakımından karşılaştırılmıştır. Modellerin genel olarak dayanım hesabında tutarlı ve gerçeği yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Lam ve Teng modeli, tüm durumların ortalaması alındığında gerçeğe en yakın dayanım sonucunu vermiştir. Diğer modeller de gerçek dayanıma oldukça yakın değerler hesaplamıştır. Şekildeğiştirme hesabında ise modeller kendi aralarında da fazla tutarlı olmamakla birlikte deneysel olarak dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme değerine de dayanım hesabında olduğu kadar başarılı bir şekilde ulaşamamışlardır. Lam ve Teng ve Pour modelleri şekildeğiştirme hesabında deneysel sonuca en yakın sonuçları vermişlerdir. TBDY modeli ise bir yönetmelik modeli olduğu için beklenilen şekilde tüm durumlarda güvenli bölgede kalmıştır. Çizelge 4.5'te modellerin bütün durumlarda sergiledikleri performans gösterilmiştir.
	Lam ve Teng		İlki ve Kumbasar		Youssef		Benzaid		Pour		TBDY	
	$rac{f'_{cc,deney}}{f'_{cc,model}}$	ε <sub>cc,deney</sub> ε <sub>cc,model</sub>	$\frac{f'_{cc,deney}}{f'_{cc,model}}$	$rac{\epsilon_{cc,deney}}{\epsilon_{cc,model}}$	$rac{f'_{cc,deney}}{f'_{cc,model}}$	$\frac{\boldsymbol{\epsilon}_{cc,deney}}{\boldsymbol{\epsilon}_{cc,model}}$	$rac{f'_{cc,deney}}{f'_{cc,model}}$	$rac{\epsilon_{cc,deney}}{\epsilon_{cc,model}}$	$\frac{f'_{cc,deney}}{f'_{cc,model}}$	$rac{\epsilon_{cc,deney}}{\epsilon_{cc,model}}$	$rac{f'_{cc,deney}}{f'_{cc,model}}$	ε <sub>cc,deney</sub> ε <sub>cc,model</sub>
C-15-1	1.07	0.99	1.08	0.97	1.13	0.95	1.14	1.67	1.04	1.00	1.24	1.33
C-15-2	0.93	0.75	0.94	0.80	0.93	0.70	1.02	1.51	0.89	0.86	1.17	1.13
C-30-1	0.96	1.06	0.93	0.93	1.02	1.02	1.00	1.53	0.94	0.98	1.05	1.36
C-30-2	1.02	1.02	0.97	0.91	1.07	0.95	1.09	1.77	0.98	1.01	1.19	1.40
Ortalama	1.00	0.96	0.98	0.90	1.04	0.90	1.06	1.62	0.96	0.96	1.16	1.31
Varyasyon katsayısı (%)	6	14	7	8	8	15	6	8	7	7	7	9

Çizelge 4.5: Modellerin bütün durumlardaki performansları.



## 5. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında, 18 adet numune test edilmiştir. Bu numunelerin 9 tanesi 150 mm çapında, 300 mm yüksekliğinde silindir enkesitli kolon numunesi olup 9 tanesi ise 300 mm çapında, 600 mm yüksekliğinde silindir enkesitli kolondur. Her bir boyut için 3 numune sargısız referans, 3 numune tek kat karbon lifli polimer sargılı, 3 numune ise çift kat karbon lifli polimer sargılı olarak üretilip eksenel yük altında test edilmiştir. Yapılan çalışma, Deneysel olarak test edilen numunelerden elde edilen maksimum gerilme ve buna karşılık gelen şekildeğiştirme değerleri, literatürde mevcut 6 farklı lifli polimer ile sargılanmış beton modeli sonuçları ile karşılaştırılmış ve modellerin farklı boyutlardaki performanslarıyla ilgili bir yargıya varılmak istenmiştir.

Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

1) Lifli polimer ile sargılanan kolonlarda dayanım ve dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme değeri artışı, küçük boyutlu numunelerde büyük boyutlu numunelere nazaran daha fazladır. Özellikle tek kat sargılı numunelerde bu fark daha belirgindir.

2) 150 mm çapındaki numunelerde, tek katı sargı ile sargılanan numunelerde referans numunelerine göre oldukça önemli ölçüde bir dayanım ve dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme artışı olmakla beraber, ikinci kat sargılamada bu artiş ilk kat kadar etkili değildir. 300 mm çapındaki numunelerde ise, tek kat sargılı numunelerin sargılama oranı düşük olduğu için, dayanım artışı ikinci kat sargılamada daha fazladır. Dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme ise tek kat sargılamada oldukça yüksek bir artış gösterip ikinci kat sargılamada daha az bir artış göstererek 150 mm çaplı numunelere benzer bir davranış göstermiştir.

3) Güç tükenmesi, bütün numunelerde yanal sargılama basıncının en yüksek değere ulaştığı *H*/2 yüksekliğinde meydana gelmiştir. Bütün numunelerde güç tükenmesi, lifli polimerin kopması ile meydana gelen bir patlama ile gerçekleşmiştir. Çift kat sargılı numunelerde patlama, tek kat sargılı numunelere göre daha şiddetlidir.

4) LP ile sargılanan betonlarda, eksenel yük altındaki davranış sargısız betona göre farklılık göstermiştir. Betonun sargısız dayanımına kadar yük artımı durumunda sargılı

betonla sargısız beton davranışı aynı olmakla beraber bu değerden sonra davranış tamamen LP etkisine girmiştir.

5) LP ile sargılamada, numune boyutunun dayanım ve dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme değerine önemli bir etkisi yoktur. Sargılama oranı aynı olduğu sürece sonuçlar benzerdir.

6) İncelenen modeller, dayanım hesabında birbirine yakın ve deney sonuçlarıyla tutarlı sonuçlar verirken, dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme hesabında en düşük sonuç veren model ile en yüksek sonuç veren model arasında 2 katı geçen farklar oluşmuştur. Lifli polimer, malzeme deneylerinde ölçülen maksimum şekildeğiştirme değerine, betona sargılanmış haldeyken ulaşamaz. Bu sebeple betona sargılanmış haldeki lifli polimerin yapacağı maksimum uzamaya dair kesin bir değer yoktur. Bazı modeller, lifli polimerin malzeme sonuçlarını belirli bir verimlilik katsayısı ile çarparak azaltırken bazıları ise bu değeri kullanmadan modellerinin içinde azaltmalar yaparak sonuca gitmeyi amaçlamışlardır. Bu bilinmezlik, modellerin şekildeğiştirme hesabında birbirinden farklı sonuç vermesindeki en önemli etkendir.

7) TBDY 2018'de önerilen model, dayanım ve dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme hesabında bir yönetmelik modelinde olması gerektiği gibi güvenli bölgede kalmaktadır.

8) Dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme sonuçlarında Youssef modeli, Pour modeli ve Lam ve Teng modeli, İlki ve Kumbasar modeli iki boyutta da tek kat sargılı numunelerde gerçek değere çok yakın sonuçlar vermiş olsalar da 150 mm çaplı çift kat sargılı numunelerde gerçekten uzaklaşan sonuçlar vermişlerdir.

9) Bütün durumlar göz önüne alındığında, dayanımda ve şekildeğiştirmede en başarılı sonuçları veren modelin Lam ve Teng modeli olduğu sonucuna varılmıştır. Benzaid modeli ise özellikle dayanıma karşı gelen şekildeğiştirme hesabında gerçekten oldukça uzak değerler vererek incelenen modeller arasındaki en düşük performanslı model olmuştur.

## KAYNAKLAR

- Benzaid R., Mesbah H., Chikh N. (2010). FRP-confined Concrete Cylinders: Axial Compression Experiments and Strength Model. J. Reinf. Plast. Compos., 29(16), 2469–2488.
- **Çağlar N., Kırtel O., Vural İ., Sümer Y., Sarıbıyık A.** (2020). 24 Ocak 2020 Mw 6.8 Elazığ-Sivrice Depremi İnceleme ve Değerlendirme Raporu.
- Elsanadedy H.M., Al-Salloum Y.A., Alsayed S.H., Iqbal R.A. (2012). Experimental and numerical investigation of size effects in FRP-wrapped concrete columns. *Constr. Build. Mater.*, 29(4), 56-72.
- Ilki A., Peker O., Karamuk E., Demir C., Kumbasar N. (2008). FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular reinforced concrete columns. J. Mater. Civ. Eng., 20(2), 169-188.
- Ilki A., ve Kumbasar N. (2003). Compressive behaviour of carbon fiber composite jacketed concrete with circular and non-circular cross sections. J. *Earthquake Eng., in press.*
- Lai M.H., Liang Y.W., Wang Q., Ren F.M., Chen M.T., Ho J.C.M. (2020). A stress-path dependent stress-strain model for FRP-confined concrete. *Eng Struct.* 2020;203:109824.
- Lam L. ve Teng J.G. (2003). Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete. *Constr. Build. Mater.*, 17(6-7), 471-489.
- Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. J. Struct. Eng., 114(8), 1804-1826.
- Mirmiran A. ve Shahawy M. (1997). Behavior of concrete columns confined by fiber composites. J. Struct. Eng., 123(5), 583–590.
- **Pour A. F., Ozbakkaloglu T., Vincent T.** (2018). Simplified designoriented axial stress–strain model for FRP-confined normal-and highstrength concrete. *Eng. Struct.* 175: 501–516.
- Richart F. E., Brandtzaeg A., Brown, R. L. (1928). A study of the failure of concrete under combined compressive stresses. *Engineering Experiment Bulletin No. 185*, University of Illinois, Urbana, Ill.
- Rochette P., Labossière P. (2000). Axial testing of rectangular column models confined with composites. J. Compos. Constr., 4(3), 129–136.
- Saadatmanesh H., Ehsani M. R., Li M. W. (1994). Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber-composite Straps. ACI Struct. J., 91(4), 434–447.
- Samaan M., Mirmiran A., Shahawy M. (1998). Model of concrete confined by fiber composites. J. Struct. Eng., 10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:9(1025), 1025–1031.

- Shahawy M., Mirmiran A., Beitelman T. (2000). Tests and modeling of carbonwrapped concrete columns. *Compos. Part B Eng.*, 31(6), 471–480.
- Teng J.G., Jiang T., Lam L., Luo Y. (2009). Refinement of a design-oriented stressstrain model for FRP-confined concrete. ASCE J Compos Constr 2009;13(4):269–78.
- Thériault M., Neale K. W., Claude S. (2004). FRP-confined circular concrete columns: Investigation of size and slenderness effects. J. Compos. Constr., 8(4), 323–331.
- **TBDY,** (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Wang Y.F. ve Wu H.L. (2011). Size effect of concrete short columns confined with aramid FRP jackets. J. Compos. Constr., 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000178, 535–544.
- Wu Y.F. ve Wei Y. (2014). General stress-strain model for steel and FRP-confined concrete. J Compos Constr 2014;19:04014069.
- Wei Y.Y. ve Wu Y.F. (2012). Unified stress-strain model of concrete for FRPconfined columns. *Constr Build Mater* 2012;26(1):381–92.
- Youssef M.N., Feng M.Q., Mosallam A.S. (2007). Stress-strain model for concrete confined by FRP composites. *Compos. Part B*, 38(5–6), 614–628.
- Yang K. H., Lee Y., Mun J.H. (2019). A Stress-Strain Model for Unconfined Concrete in Compression considering the Size Effect. Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2019, Article ID 2498916.
- Url-1 <https://www.structuraltechnologies.com>, erişim tarihi 15.01.202



Ad-Soyad	: Alper Turgut	
ÖĞRENİM DURUMU		

## **RENIM DURUMU:**

ÖZGEÇMİŞ

- : 2018, YTÜ, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Lisans
- : 2021, İTÜ, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Yüksek lisans Mühendisliği Programı