

## Karbon lifli polimer sargılı standart silindir beton numunelerin eksenel yük altındaki davranışlarının incelenmesi

### Investigation of the behavior of carbon fiber reinforced polymer confined standard cylinder concrete specimens under axial load

Duygu ERTÜRKMEN<sup>1\*</sup>, Cengiz DÜNDAR<sup>2</sup>, Serkan TOKGÖZ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Mersin Üniversitesi, Mersin, Türkiye.

dbasli@cu.edu.tr

<sup>2</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye.

dundar@cu.edu.tr

<sup>3</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Adana, Türkiye.

stokgoz@adanabtu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 09.05.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 12.07.2016

doi: 10.5505/pajes.2016.43815

\* Yazışılan yazar/Corresponding author

Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Lif takviyeli polimer kompozitlerin betonarme yapılarda güçlendirme amaçlı olarak kullanımı son yıllarda oldukça yaygınlaşmıştır. Özellikle yüksek dayanımlı beton kullanılarak üretilen yapı elemanlarının yük etkisi altında sünek davranmasını sağlamak için, dışarıdan lifli polimer malzemeler kullanılarak sarılması alternatif bir güçlendirme yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Yüksek çekme dayanımına sahip olan bu malzemeler, kolay uygulanabilmeleri ve hafif olmaları sebebiyle sıklıkla tercih edilmektedir. Bu çalışmada dayanımı 53.13-74.87 MPa arasında değişen silindir şeklindeki beton numuneler (tek veya çift kat) çift yönlü karbon lifli kumaş (CFRP) kullanılarak sarılmıştır. Söz konusu numunelerin eksenel basınç altında test edilmesiyle CFRP sargısının betonun basınç dayanımına ve sünekliğine olan etkileri araştırılmıştır. Ayrıca test edilen numunelere ait elde edilen gerilme-deformasyon ilişkileri literatürde mevcut olan CFRP ile güçlendirilmiş silindir numunelere ait modellerin sonuçları ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak CFRP sargılı numunelerin basınç dayanımlarında ve şekil değiştirme kapasitelerinde önemli artışlar elde edilmiştir. Özellikle çift kat CFRP sargılı durumda elde edilen gerilme-deformasyon değerlerinin, modellerden elde edilen değerler ile oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Yüksek dayanımlı beton, Karbon lifli polimer, Gerilme-deformasyon ilişkisi, Eksenel basınç, Dayanım, Süneklik

#### Abstract

The use of fiber reinforced polymer composites for strengthening in concrete structures has become quite prevalent in recent years. Especially, to provide ductile behavior from the structural elements that produced by using the high strength concrete under the load effects, the externally wrapping of these elements with using the fiber reinforced polymer materials comes into prominence as an alternative method for strengthening. These materials with high tensile strength can often be preferred due to their lightweight and easy to apply. In this study, cylinder-shaped concrete specimens with compressive strengths range between 53.13~74.87 MPa, are wrapped one or two layer with using bi-directional carbon fiber reinforced fabric (CFRP). These wrapped specimens were tested under the axial compressive loads and the effects of the CFRP wrapping on concrete strength and ductility was investigated. In addition, stress-strain relations obtained from the tested specimens were compared with the results of existing models for strengthened cylindrical specimen with CFRP in literature. As a result, a significant increase was obtained in the compressive strength and deformation capacity of CFRP wrapped specimens. Especially, it was observed that the stress-strain values obtained from the two layers CFRP wrapped specimens show good agreement with the values obtained from the models.

**Keywords:** High strength concrete, Carbon fiber polymer, Stress-strain relations, Axial compressive, Strength, Ductility

## 1 Giriş

Lifli polimer kompozit (FRP) malzemeler, kolay uygulanabilir olmaları, hafif olmaları ve buna karşın oldukça yüksek çekme dayanımına sahip olmaları nedeniyle son yıllarda betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesinde sıklıkla tercih edilmektedir. Bugüne kadar yapılan birçok araştırma, FRP malzemeleri kullanılarak güçlendirilen yapı elemanlarının yük taşıma kapasitelerinin ve sünekliklerinin arttığını göstermektedir [1]-[13]. Özellikle deprem etkisine maruz kalan yapılarda sünek davranış sağlanması yapı güvenliği açısından oldukça büyük önem taşımaktadır. Ayrıca yüksek dayanımlı beton kullanılarak üretilen yapı elemanlarının yük etkisi altında gevrek davranmasını önlemek amacıyla çeşitli yöntemlerle dışarıdan güçlendirilmeleri gerekmektedir.

FRP kompozitlerin bir türü olan karbon lifli polimer (CFRP) malzeme, yüksek çekme dayanımına sahip olup elastisite modülü çeliğe oranla oldukça da yüksek olan bir malzemedir.

CFRP malzemesinin gerek beton basınç dayanımına ve deformasyon yapma kapasitesine olan etkilerinin araştırılması gerek ise CFRP sargılı durumda numunelerden elde edilen eksenel gerilme-eksenel deformasyon eğrilerinin literatürde mevcut olan bazı modellere ait eğrilerle kıyaslanması amacıyla yapılan bu çalışmada, toplamda 30 adet sargılı silindir numuneye ait deneysel sonuçlar ele alınmıştır.

CFRP kumaş ile tek kat veya çift kat olacak şekilde dıştan tamamen sarılan silindir numuneler, eksenel basınç altında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar sargısız silindirlerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sargılı numunelerde sargısız numunelere kıyasla betonun dayanım ve sünekliğinin arttığı gözlenmiştir.

Yapılan deneyler sırasında silindirlerin üzerine yerleştirilen düzenekte bulunan komparatör sayesinde elemana gelen yüke karşılık elemanda meydana gelen boy değişimleri de belirlenerek her silindire ait gerilme-deformasyon ( $\sigma - \epsilon$ )

eğrileri de elde edilmiştir. Deneysel sonuçlardan elde edilen ( $\sigma - \epsilon$ ) eğrileri, literatürde sargılı beton davranışı için çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen ( $\sigma - \epsilon$ ) modelleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Modellere ait ( $\sigma - \epsilon$ ) ilişkilerinin saptanması amacıyla verilen ifadeler, deneylerde kullanılan silindir numunelerin özellikleri kullanılarak irdelenmiş ve her numune için modellere ait ( $\sigma - \epsilon$ ) eğrileri belirlenmiştir. Özellikle çift kat CFRP sargılı durumda elde edilen gerilme-deformasyon değerlerinin, modellerden elde edilen değerler ile oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir.

## 2 Malzeme ve metot

Karbon lifli polimer sargılamanın betonun basınç dayanımına ve sünekliğine olan etkilerinin araştırılması ve elde edilen deneysel ( $\sigma - \epsilon$ ) eğrilerinin, literatürde mevcut modeller ile karşılaştırılması amacıyla yapılan bu çalışma kapsamında 30 adet CFRP sargılı silindir şeklindeki beton numunenin aksel basınç altındaki davranışları incelenmiştir.

Numunelerin hazırlanmasında iki farklı beton karışımı kullanılmıştır. Her karışımdan çelik lifli ve lifsiz olacak şekilde iki alt karışım oluşturulmuştur. Toplam 4 farklı karışım planlanmış ve her bir karışımdan farklı zamanlarda 4 adet kısa kolon numune ve her kolon için 6 adet silindir numune üretilmiştir. Her bir karışımdan üretilen kolon numunelerin 3 adedi tek veya çift kat CFRP kumaş ile sarılmış ve çift kat sargı durumunda uygulanan eksantrite değeri değiştirilerek tek kat CFRP sargılı olacak şekilde bir adet, çift kat CFRP sargılı olacak şekilde ise iki adet numune oluşturulmuştur. Sargılı ve sargısız eksantrik olarak test edilen kolon numunelerine ait sonuçlar Dündar, Ertürkmen ve Tokgöz [1] tarafından yapılan çalışmada yer almaktadır.

Bahsedilen bu 4 karışıma sırasıyla; C1, C1-SF, C2 ve C2-SF isimleri verilmiş olup SF kısaltması ile simgelenen karışımların çelik lif içerdiği belirtilmek istenmiştir. Çelik lifli olarak hazırlanan beton karışımlarda RC 65/35 BN isimli çelik lif türü kullanılmıştır. Çelik lifler 35 mm uzunluğunda, 0.55 mm çapında (uzunluk/çap oranı:64) ve  $7850 \text{ kg/m}^3$  özgül ağırlığındadır. Sunulan çalışmada C1-SF isimli beton karışımında  $50 \text{ kg/m}^3$  ağırlığında, C2-SF isimli beton karışımında ise  $60 \text{ kg/m}^3$  ağırlığında çelik lif kullanılmıştır [1]. Çalışmada kullanılan çelik lif tipi ve kabul edilmiş olan çelik lifin ağırlıkça miktarı, beton içerisinde uygun karışım elde edilebilir ve betonun süneklik düzeyinin artırılması bakımından bu şekilde seçilmiştir. Söz konusu çelik lif türü ve miktarı pratikte kolonlar ve kirişler için özellikle sünekliğin artırılması açısından etkili sonuç sağlamaktadır [2]. Her bir karışımdan farklı zamanlarda üretilmiş olan 4 numune ve alınan silindir örnekleri için; 0 kodu numunenin sargısız olduğunu, I kodu numunenin tek kat, II ve III kodu ise numunenin çift kat CFRP sargılı olduğunu belirtecek şekilde isimlendirilme yapılmıştır.

CFRP sargısının beton davranışı üzerindeki etkilerinin araştırılması amacıyla yapılan bu çalışma kapsamında ise, hazırlanan karışımlardan alınan silindir numunelere ait sonuçlara yer verilecektir. Hazırlanan karışımlardan alınan çapı 150 mm, yüksekliği 300 mm olan standart silindir numunelerin 3 adedi, sargısız şekilde aksel basınç altında test edilerek numunelere ait ortalama sargısız silindir basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Kalan 3 adedi ise, tek veya çift kat, çift yönlü lif içeren CFRP kumaşla sarılmak üzere ayrılmıştır.

Karbon lifli bu kumaşlar, her türlü betonarme, ahşap yapı elemanlarının taşıma kapasitelerinin artırılmasında ve yapıların onarım ve güçlendirilmesinde kolaylıkla kullanılabilir. Diğer lifli kumaşlara göre uygulandığı elemanlara, özellikle daha yüksek çekme dayanımı sağlaması ve korozyona oldukça dayanıklı olması nedeni ile çoğu yapısal uygulamada sıklıkla tercih edilmektedir.

Yapılan bu çalışmada numunelerin sarılmasında çift yönde lif içeren Sika Wrap Hex 300C 0/90 isimli karbon lifli polimer malzeme ile Sikadur 330 isimli epoksi yapıştırıcısı kullanılmıştır. Uygulaması oldukça kolay olan Sikadur 330 yapıştırıcısı beton, taş, metal ve diğer tüm yapı malzemeleri için uygun bir yapıştırıcıdır. 4 kg reçine, 1 kg sertleştirici olmak üzere iki ayrı ambalajda bulunan bileşenlerden oluşmaktadır. Bu bileşenler 4/1 oranında karıştırılarak beton yüzeylerine mala, fırça veya rulo vasıtası ile kolaylıkla uygulanabilmektedir. Bir yapıştırıcı olarak yüksek mukavemete sahiptir ve devamlı yükler altında yüksek bir sünme dayanımı göstermektedir. Karbon kumaşın ve epoksinin karakteristik bazı özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Güçlendirmede kullanılan malzemelerin genel özellikleri [3].

Malzeme Özellikleri	Karbon Lifli Dokuma (Sika Wrap Hex 300C 0/90)	Epoksi Reçine (Sikadur 330)
Yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )	1.79	1.31
Çekme dayanımı (MPa)	3900	30
Çekme elastisite modülü (MPa)	230000	4500
Kopma uzaması (%)	1.5	0.9
Dokuma kalınlığı (mm)	0.166	-

### 2.1 Numune yüzeylerinin sarılması

Beton silindir numuneler kür havuzundan alınıp kurutulduktan sonra yüklemenin üniform olması amacıyla numunelere kükürt ve parafin içerikli başlıklar yapılmıştır. Başlık yapımından sonra numunelerin sarılacak olan yüzeyleri tel bir fırça vasıtasıyla fırçalanarak yapışmayı engelleyebilecek olan pürüzler yok edilmiştir.

Beton yüzeyi ile karbon lifli kumaş arasında aderansı oldukça iyi olan çift bileşenli Sikadur 330 epoksi reçine ve sertleştiricisi, standardına uygun olarak 4/1 oranında karıştırılarak rulo ve fırça yardımıyla beton silindirin tüm yan yüzeylerini tamamen kaplayacak şekilde bir kat sürülmüştür.

600 mm eninde ve 300 mm yüksekliğinde silindir numunelerin boyutlarına uygun olacak şekilde kesilen karbon lifli polimer kumaş, kullanılan malzemenin standartlarına uygun biçimde 130 mm'lik bindirme payı bırakılarak enine doğrultuda silindirlere tamamen sarılarak yapılandırılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1: Numunelerin sarılması için hazırlanan epoksi karışımı ve numunelere uygun ölçüde kesilen CFRP kumaşı.

Sarılan kumaşlara enine lifler doğrultusunda bir rulo yardımı ile baskı uygulayarak kumaşların tamamen epoksi-reçine karışımına doyurulması sağlanmıştır. Çift kat CFRP sargısının uygulanacağı silindir numuneler için ikinci kat kumaş, hazırlanan yapıştırıcının miktarı %50 oranda azaltılarak yarım saat içinde tekrar numune yüzeylerine yapıştırılmıştır.

Bu şekilde tek veya çift kat CFRP sargılı, toplamda 30 adet silindirik numune eksenel basınç altında test edilmek üzere hazır edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2: Hazırlanan bazı silindir numune örnekleri.

## 2.2 Deney düzeneği

Hazırlanan CFRP sargılı standart silindir (150x300 mm) beton numuneler, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarında bulunan standart basınç deney aletinde eksenel yük altında test edilmiştir. Numuneler test edilmeden önce numunelere, daha evvel laboratuvarında silindir numuneler için özel olarak imal edilmiş alt kısmı sabit, üst kısmı ise hareketli olan ve üzerine yerleştirilen  $10^{-2}$  mm hassasiyetle okuma alan komparatör sayesinde numunede oluşan boy değişimlerini ölçebilen bir yüklemeye çerçevesi geçirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3: Deney düzeneği ve düzeneğe yerleştirilen bazı silindir numune örnekleri.

Numunede alınan boy değişimi okumaları numunenin kenar kısmında alındığı için hesaplamalarda bu değerlerin yarısı alınarak numune ortasındaki boy değişimi değerleri elde edilmiştir. Deney sırasında uygulanan yük değerlerine karşılık oluşan boy değişimleri bilgisayar ortamında kaydedilerek sargılı numunelere ait  $(\sigma - \epsilon)$  eğrileri oluşturulmuştur.

## 3 Sargılı beton için bazı $(\sigma - \epsilon)$ eğrileri

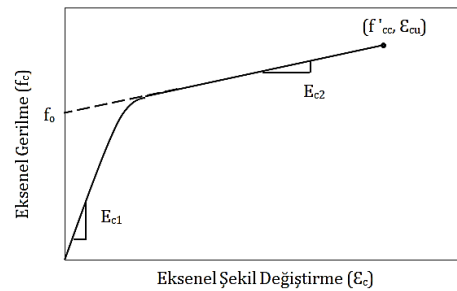
Çalışma kapsamında  $(\sigma - \epsilon)$  eğrileri ve basınç dayanımları deneysel olarak elde edilmiş olan CFRP sargılı silindirik beton numuneler, literatürde çeşitli araştırmacılar tarafından sargılı beton davranışı ve  $(\sigma - \epsilon)$  ilişkisi için önerilen modellerden bazıları göz önüne alınarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada ele alınan modeller, modellemede sargılı beton davranışını temsil eden iki farklı  $(\sigma - \epsilon)$  eğrisini temel almaktadır. Modellemede kullanılan bu eğriler, ilki parabolik, ikincisi ise yaklaşık olarak lineer olan iki eğrinin birleşiminden oluşmakta olup Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmektedir.

Söz konusu iki eğri kullanılarak tanımlanan modelleri belirten denklemlerde kullanılan ifadelerle ait açıklamalar aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

- $f_o$  = İkinci eğrinin başlangıç noktasındaki gerilme (MPa),
- $f'_{co}$  = Sargısız betonun maksimum basınç dayanımı (MPa),
- $f'_{c1}$  = İlk eğrinin maksimum olduğu noktada sargılı beton eksenel basınç dayanımı (MPa),
- $f_{1u}$  = FRP 'ye ait kopma anındaki yanal sargı basıncı (MPa),
- $f_{1u,a}$  = FRP 'ye ait kopma anındaki etkin yanal sargı basıncı (MPa),
- $k_\epsilon$  = FRP halkasında oluşan yanal şekil değiştirmeyi azaltma katsayısı,
- $n$  = Eğri şekil parametresi,
- $E_{frp}$  = FRP malzemesinin elastisite modülü (MPa),
- $t_{frp}$  = FRP malzemesinin kalınlığı (mm),
- $D$  = Betonun çapı (mm),
- $f'_{cc}$  = Sargılı betonun maksimum basınç dayanımı (MPa),
- $\epsilon_{cu}$  = FRP' nin koptuğu andaki maksimum dayanıma karşılık gelen eksenel şekil değiştirme değeri,
- $\epsilon_{h,rup}$  = FRP halkasının kopma şekil değiştirme değeri,
- $\epsilon_{1u}$  = FRP' nin kopma anındaki yanal şekil değiştirme,
- $\epsilon_{co}$  = Sargısız beton dayanımına karşılık gelen noktadaki eksenel şekil değiştirme değeri,
- $\epsilon_{c1}$  = İlk eğrinin maksimum olduğu noktadaki gerilmeye karşılık gelen eksenel şekil değiştirme değeri,
- $E_1$  = FRP' ye ait yanal sargı rijitliği (MPa),
- $E_{c1}$  = Sargılı betonun başlangıç eğimi (MPa),
- $E_{c2}$  = İkinci doğrunun eğimi (MPa),
- $E'_{c2}$  = Toutanji modelinde ikinci doğrunun eğimi (MPa).

### 3.1 Richard ve Abbott (1975) tarafından önerilen $(\sigma - \epsilon)$ eğrisi



Şekil 4: Richard ve Abbott tarafından önerilen  $(\sigma - \epsilon)$  eğrisi [4].

Şekil 4'te görülen 4 parametrelili bu eğri Richard ve Abbott [4] tarafından önerilmiştir. Sargılı betonun gerilme şekil değiştirme davranışı, iki eğri ile tanımlanmış olup ilk eğri eğrilerin elastik kısmı olarak adlandırılan artan bir eğriden ( $E_{c1}$ ), ikinci eğri ise yine taşıma gücüne erişilene dek yaklaşık lineer olarak artış gösteren başka bir eğriden ( $E_{c2}$ ) oluşmaktadır. Burada, iki eğri arasındaki geçişi tanımlamak için polinomal bir sabit ( $n$ ) belirlenmiştir. Eğriyi genel olarak ifade eden denklemler aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$f_c = \frac{(E_{c1} - E_{c2})\varepsilon_c}{\left\{1 + \left[\frac{(E_{c1} - E_{c2})\varepsilon_c}{f_o}\right]^n\right\}^{\frac{1}{n}}} + E_{c2}\varepsilon_c \quad (1)$$

$$f_o = f'_{cc} - E_{c2}\varepsilon_{cu} \quad (2)$$

$$n = 1 + \frac{1}{\frac{E_{c1}}{E_{c2}} - 1} \quad (3)$$

Bu eğri tipine uyan, literatürde tanımlı çoğu model için betonun elastisite modülünün hesabında, ACI 318-95 yönetmeliğinde belirtilen (4) denklemi kullanılmaktadır.

$$E_{c1} = E_c = 4730\sqrt{f'_{co}} \quad (4)$$

### 3.1.1 Richard ve Abbott (1975) tarafından önerilen ( $\sigma - \varepsilon$ ) eğrisini temel alan bazı modeller

Çalışmanın bu kısmında sargılı beton davranışı için Richard ve Abbott [4] tarafından önerilen ( $\sigma - \varepsilon$ ) eğrisini temel alarak çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen bazı modellere yer verilecektir.

#### 3.1.1.1 Samaan ve diğ. (1998)

Önerdikleri modelde eğriyi tanımlayan ifadeler aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$f_o = 0.872f'_{co} + 0.371f_{lu} + 6.258 \quad n = 1.5 \quad (5)$$

$$f_{lu} = \frac{2E_{frp}t_{frp}}{D} \varepsilon_{frp} \quad (6)$$

$$E_{c1} = 3950\sqrt{f'_{co}} \quad (7)$$

$$E_{c2} = 245.61f'_{co}{}^{0.2} + 1.3456\left(\frac{E_{frp}t_{frp}}{D}\right) \quad (8)$$

Modelde taşıma gücüne ulaşıldığı andaki dayanım ve şekil değiştirme değerleri ise (9) ve (10)'da verilen denklemler ile tanımlanmaktadır.

$$f'_{cc} = f'_{co} + 6.0(f_{lu})^{0.7} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{cu} = \frac{f'_{cc} - f_o}{E_{c2}} \quad (10)$$

#### 3.1.1.2 Lam ve Teng (2003)

Önerdikleri modelde eğriyi tanımlayan ifadeler aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$f_c = E_{c1}\varepsilon_c - \frac{(E_{c1} - E_{c2})^2}{4f_o} \varepsilon_c^2 \quad (0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c1}) \quad (11)$$

$$f_o = f'_{co} \quad f_c = f'_{co} + E_{c2}\varepsilon_c \quad (\varepsilon_{c1} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}) \quad (12)$$

$$E_{c1} = \frac{2f'_{co}}{(E_{c1} - E_{c2})} \quad (13)$$

$$E_{c2} = \frac{f'_{cc} - f'_{co}}{\varepsilon_{cu}} \quad (14)$$

$$E_{c1} = E_c = 4730\sqrt{f'_{co}} \quad (15)$$

Modelde taşıma gücüne ulaşıldığı andaki dayanım ve şekil değiştirmeyi ifade eden denklemler aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.3 \frac{f_{lu,a}}{f'_{co}} \quad (16)$$

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 1.75 + 5.53 \left(\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}}\right) \left(\frac{\varepsilon_{frp}}{\varepsilon_{co}}\right)^{0.45} \quad (17)$$

$$f_{lu,a} = \frac{2E_{frp}t_{frp}}{D} \varepsilon_{h,rup} \quad (18)$$

$$\varepsilon_{h,rup} = k_\varepsilon \varepsilon_{frp} \quad k_\varepsilon = 0.586 \text{ (CFRP)} \quad (19)$$

#### 3.1.1.3 Jiang ve Teng (2006)

Modelde eğri Lam ve Teng [6] tarafından önerilen ifadeler kullanılarak tanımlanmıştır.

Modelde taşıma gücüne ulaşıldığı andaki dayanım ve şekil değiştirmeyi ifade eden denklemler ise aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$\frac{E_1}{(f'_{co}/\varepsilon_{co})} \geq 0.01 \text{ ise;}$$

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.5 \left(\frac{E_1}{(f'_{co}/\varepsilon_{co})} - 0.01\right) \left(\frac{\varepsilon_{h,rup}}{\varepsilon_{co}}\right) \quad (20)$$

$$\frac{E_1}{(f'_{co}/\varepsilon_{co})} < 0.01 \text{ ise;}$$

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 \quad (21)$$

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 1.65 + 6.5 \left(\frac{E_1}{(f'_{co}/\varepsilon_{co})}\right)^{0.8} \left(\frac{\varepsilon_{h,rup}}{\varepsilon_{co}}\right)^{1.45} \quad (22)$$

$$\varepsilon_{h,rup} = k_\varepsilon \varepsilon_{frp} \quad k_\varepsilon = 0.5 \text{ (CFRP)} \quad (23)$$

$$E_1 = \frac{2E_{frp}t_{frp}}{D} \quad (24)$$

#### 3.1.1.4 Fahmy ve Wu (2010)

Önerdikleri modelde eğriyi tanımlayan ifadeler aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$E_{c1} = E_c = 4730\sqrt{f'_{co}} \quad (25)$$

$$E_{c2} = m_2(245.61(f'_{co})^{m_1} + 0.6728E_1)$$

$$m_1 = 0.5, \quad m_2 = 0.83 \quad f'_{co} \leq 40 \text{ MPa} \quad (26)$$

$$m_1 = 0.2, \quad m_2 = 1.73 \quad f'_{co} > 40 \text{ MPa}$$

$$E_1 = \frac{2E_{frp}t_{frp}}{D} \quad (27)$$



Modelde taşıma gücüne ulaşıldığı andaki dayanım ve şekil değiştirmeyi ifade eden denklemler ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_{lu} \quad (28)$$

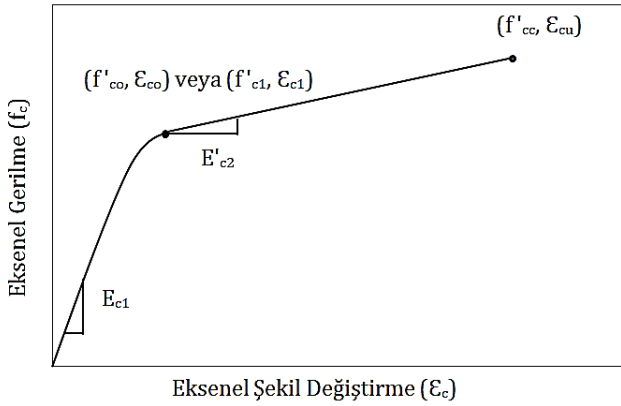
$$k_1 = 4.5 f_{lu}^{-0.3} \quad f'_{co} \leq 40 \text{ MPa}$$

$$k_1 = 3.75 f_{lu}^{-0.3} \quad f'_{co} > 40 \text{ MPa}$$

$$f_{lu} = \frac{2E_{frp}t_{frp}}{D} \epsilon_{frp} \quad (29)$$

$$\epsilon_{cu} = \frac{f'_{cc} - f'_{co}}{E_{c2}} \quad (30)$$

### 3.2 Toutanji (1999) tarafından önerilen ( $\sigma - \epsilon$ ) eğrisi



Şekil 5: Toutanji tarafından önerilen ( $\sigma - \epsilon$ ) eğrisi [9].

FRP sargılı beton için önerilen bir diğer model olan Şekil 5'te görülen eğri yine iki farklı eğri ile tanımlanmış olup ilk eğrinin eğimi elastik olarak artan kısmın elastisite modülünü ( $E_{c1}$ ), ikinci eğrinin eğimi ise daha az eğimle yine artan ve taşıma gücüne erişilen kısmın elastisite modülünü ( $E'_{c2}$ ) vermektedir. Bu tip modellerde ikinci kısmın elastisite modülü olan ( $E'_{c2}$ ), başlangıçtaki eğrinin maksimum olduğu noktadaki gerilme değeri ( $f'_{c1}$ ) aşıldıktan sonraki kısmın tanjant eğimi olarak tanımlanmaktadır. Eğriyi genel olarak ifade eden denklemler ise aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$f_c = \frac{A_j \epsilon_c}{1 + C_j \epsilon_c + D_j \epsilon_c^2} \quad (31)$$

$$A_j = E_{c1} \quad (32)$$

$$C_j = \frac{E_{c1}}{f'_{c1}} - \frac{2}{\epsilon_{c1}} + \frac{E_{c1} E'_{c2} \epsilon_{c1}}{f'_{c1}{}^2} \quad (33)$$

$$D_j = \frac{1}{\epsilon_{c1}{}^2} - \frac{E_{c1} E'_{c2}}{f'_{c1}{}^2} \quad (34)$$

#### 3.2.1 Toutanji (1999) tarafından önerilen model

Önerilen modelde eğriyi tanımlayan ifadeler aşağıda verildiği gibi yer almaktadır.

$$f'_{c1} = f'_{co} \left[ 1 + 0.0178 \left( \frac{E_1}{f'_{co}} \right)^{0.85} \right] \quad (35)$$

$$\epsilon_{c1} = \epsilon_{co} \left[ 1 + 0.0448 \left( \frac{E_1}{f'_{co}} \right)^{0.85} \right] \quad (36)$$

$$E_{c1} = 10200 (f'_{co})^{\frac{1}{3}} \quad (37)$$

$$E'_{c2} = 0.3075 \left( \frac{f'_{co}}{E_{co}} \right) \quad (38)$$

$$E_1 = \frac{2E_{frp}t_{frp}}{D} \quad (39)$$

Modelde taşıma gücüne ulaşıldığı andaki dayanım ve şekil değiştirmeyi ifade eden denklemler ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_{lu} \quad (40)$$

$$k_1 = 3.5 \left( \frac{f_{lu}}{f'_{co}} \right)^{0.15} \quad (41)$$

$$f_{lu} = \frac{2E_{frp}t_{frp}}{D} \epsilon_{frp} \quad (42)$$

$$\epsilon_{cu} = \epsilon_{co} \left[ 1 + k_2 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (43)$$

$$k_2 = 310.57 \epsilon_{lu} + 1.9 \quad (44)$$

## 4 CFRP sargılı ve sargısız beton silindir numunelerinin basınç deney sonuçları

Çalışmanın bu kısmında eksenel basınç altında test edilen sargısız ve karbon lifli polimer sargılı silindir numunelerden bazıları için elde edilen ortalama basınç dayanımı değerlerine ve maksimum dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme değerlerine yer verilmiş ve CFRP sargılı durumda betonun dayanım ve deformasyon yapma kapasitesinin ne kadar değiştiği yorumlanmıştır. Tablo 2'de sargılı ve sargısız olarak hazırlanan bazı silindir numunelerine ait test sonuçları verilmektedir.

Çalışma kapsamında test edilen numunelere ait Tablo 2'de verilen dayanım ve şekil değiştirme değerlerinin yüzdesel artış oranları incelendiğinde; tek kat sargılı beton silindir numunelerin dayanım değerlerinin ve buna karşılık oluşan şekil değiştirme değerlerinin sargısız hale göre artış gösterdiği görülmektedir. Ancak bu artışın çift kat sargılı numunelerde tek kat sargılı numunelere göre çok daha fazla olduğu gözlenmektedir.

Ayrıca; tabloya bakıldığında çelik lif içeren sargılı beton silindir numunelerin, gerek dayanım gerekse süneklik bakımından sargısız duruma göre çok daha iyi bir davranış sergiledikleri anlaşılmaktadır. Örneğin; C2-II-SF numunesinin sargısız haldeki dayanım ve şekil değiştirme değerleri, çift kat sargılı hale göre sırasıyla %22.91 ve %91.4 oranında artış göstermiştir.

Bununla birlikte, çelik lif içeren tek kat CFRP sargılı C2-I-SF numunesine bakıldığında, sargısız hale göre numunenin şekil değiştirme değerinde meydana gelen artışın, çelik lif içermeyen tek kat CFRP sargılı C2-I numunesine kıyasla daha fazla olduğu gözlenmektedir. C2-I numunesinde şekil değiştirme değeri sargılı halde %20 oranında artış gösterirken, C2-I-SF numunesinde %96 oranında artış göstermiştir. Bahsedilen numunenin şekil değiştirme değerinde oluşan bu artış bize, çelik lif ilavesinin betonun deformasyon yapma kapasitesine, dolayısı ile de sünekliğine katkı sağladığını göstermektedir.

Tablo 2: Bazı silindir numunelere ait dayanım ve şekil değiştirme değerleri.

Numune Adı	(Sargsız) Dayanım	Şekil Değ.	CFRP Sargısı (kat)	(Sargılı) Dayanım	Şekil Değ.	Gerilme Artış(%)	Şekil Değ. Artış (%)
C1-I	58.98	0.0025	Tek	59.86	0.0030	1.50	20
C1-II	57.72	0.0030	Çift	58.74	0.0032	1.77	6.7
C1-III	61.34	0.0020	Çift	69.00	0.0024	12.49	20
C1-III-SF	65.48	0.0025	Çift	78.66	0.0037	20.13	48
C2-I	74.87	0.0025	Tek	77.88	0.0030	4.02	20
C2-II	61.91	0.0022	Çift	73.65	0.0031	18.96	40.9
C2-III	63.62	0.0021	Çift	78.27	0.0029	23.03	38.1
C2-I-SF	63.30	0.0025	Tek	65.55	0.0049	3.55	96
C2-II-SF	53.13	0.0035	Çift	65.30	0.0067	22.91	91.4
C2-III-SF	57.53	0.0034	Çift	69.59	0.0045	20.96	32.4

Tablo 2’de yer alan veriler genel olarak göz önüne alındığında; sargsız durumdaki beton basınç dayanımı ve bu dayanımlara karşılık gelen şekil değiştirme değerlerinin, sargılı durumda artış gösterdiği ve özellikle de bu artışın çift kat CFRP sargılı durumda, tek kat sargılı hale göre çok daha fazla olduğu sonucuna varılmaktadır.

Sargsız olarak test edilen bazı silindir numunelerine ait deney sonrası görüntüler ve kırılma biçimleri sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7’de; CFRP sargılı olarak test edilen bazı silindir numunelerin deney sonrasında ki görüntüleri ve kırılma biçimleri ise sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9’da görülmektedir. Şekil 9’da görülen sargılı silindir numunelerinde, taşıma gücüne ulaşıldığı anda kırılmanın CFRP kumaşının aniden kopması sonucunda meydana geldiği gözlenmiştir. Numuneler detaylı bir şekilde incelendiğinde CFRP kumaşının çevrelediği göbek betonun da parçalanmış olduğu görülmüştür. Ancak sargsız olan numunelere kıyasla, numune deformasyon yapmaya devam etmiş ve dağılmayarak bütünlüğünü korumuştur. Bu da bize karbon lifli polimer kumaş (CFRP) sargısının, parçalanmış olan göbek betonuna rağmen numunenin deformasyon yapmasına olanak sağladığını göstermiştir.



Şekil 6: Sargsız silindir numunelerin deney sonrası görüntüleri.



Şekil 7: Sargsız bazı silindir numunelerine ait kırılma biçimleri.



Şekil 8: CFRP sargılı silindir numunelerin deney sonrası görüntüleri.



Şekil 9: CFRP sargılı bazı silindir numunelerine ait kırılma biçimleri.

## 5 CFRP sargılı beton silindir numunelerden elde edilen ( $\sigma - \epsilon$ ) eğrilerinin mevcut ( $\sigma - \epsilon$ ) modelleri ile karşılaştırılması

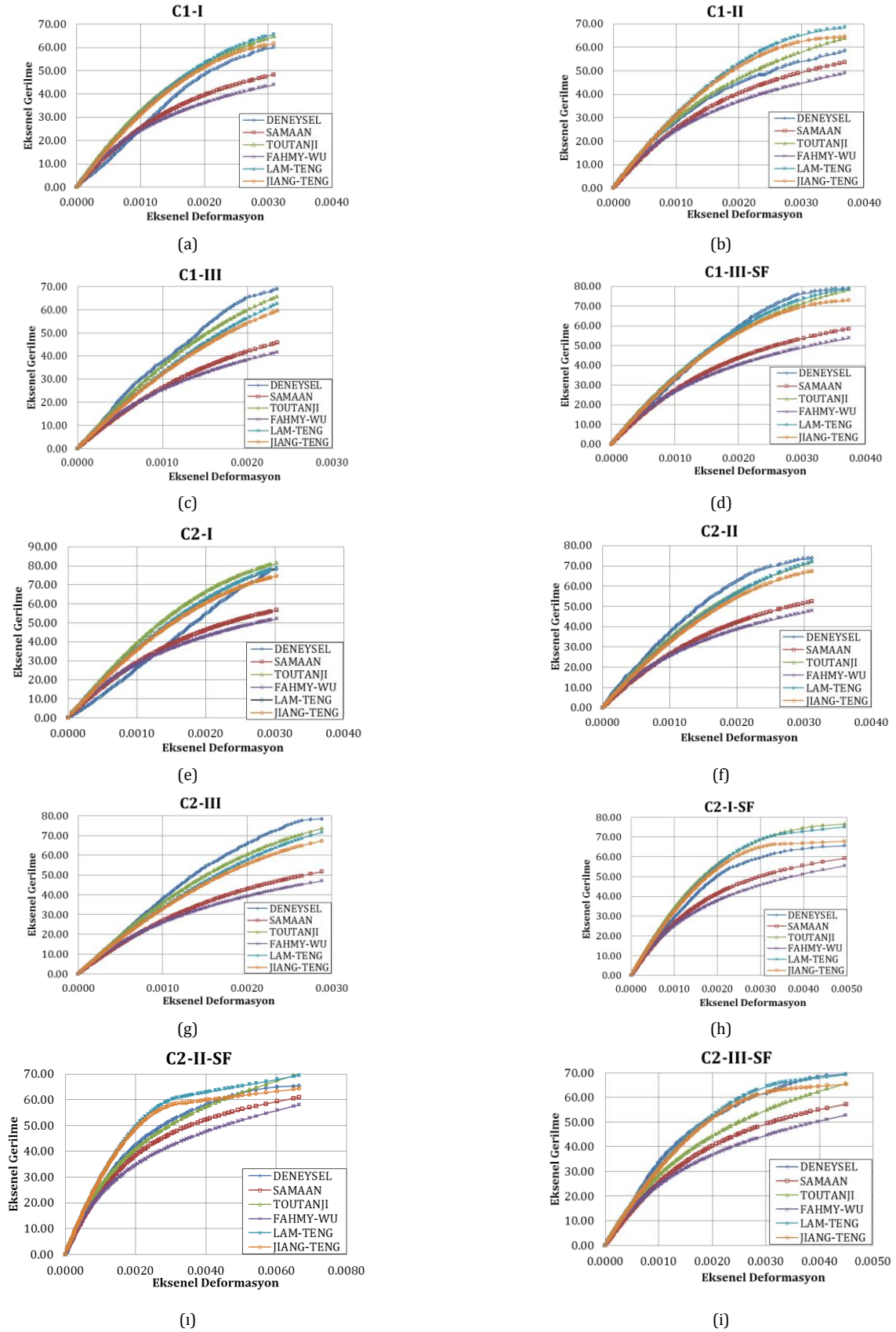
Eksenel basınç altında test edilen tek veya çift kat CFRP sargılı bazı beton silindir numunelerine ait deneysel olarak elde edilen gerilme-deformasyon ilişkileri, CFRP ile güçlendirilmiş silindir numunelerin gerilme-deformasyon davranışlarının tahmini için farklı araştırmacılar tarafından önerilen, literatürde mevcut bir takım ( $\sigma - \epsilon$ ) modellerinden elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır.

Toplam 10 adet CFRP sargılı silindir numuneye ait deneysel olarak elde edilen ( $\sigma - \epsilon$ ) eğrileri mevcut modeller kullanılarak elde edilen ( $\sigma - \epsilon$ ) eğrileri ile karşılaştırmalı olarak Şekil 10(a-i)’de verilmektedir.

Şekil 10(a)’da verilen eğrilere bakıldığında; tek kat CFRP sargılı durumda, C1-I numunesinden elde edilen deneysel ( $\sigma - \epsilon$ ) eğrisinin, Jiang ve Teng [10] tarafından önerilen sargılı beton ( $\sigma - \epsilon$ ) davranışını ifade eden modelden elde edilen eğriye çok daha yakın olduğu görülmektedir.

Benzer şekilde farklı bir karışımdan imal edilmiş olan Şekil 10(e)’de yer alan, tek kat CFRP sargılı C2-I ve Şekil 10(h)’da yer alan çelik lif içeren C2-I-SF numunelerine ait deneysel ( $\sigma - \epsilon$ ) eğrileri ile modellerden elde edilen eğriler karşılaştırıldığında, deneysel eğrilerin Jiang ve Teng [7] tarafından önerilen modelden elde edilen eğri ile uyumlu olduğu gözlenmektedir. Göze çarpan diğer bir nokta ise çelik lif içeren numunenin, lifsiz numuneye göre yük etkisi altında çok daha sünek bir davranış sergilediği ve bu sayede numunenin daha fazla deformasyon yapmasına olanak sağladığıdır.

Çift kat CFRP sargılı durumda C1-II numunesi için verilen Şekil 10(b)’ye ve C1-III için verilen Şekil 10(c)’ye bakıldığında; deneysel olarak elde edilen eğrilerin her iki durum için de Toutanji [9] tarafından önerilen modelle elde edilen eğriyle uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 10: (a-i): Sargılı beton için karşılaştırmalı ( $\sigma - \epsilon$ ) eğrileri.

Yine çift kat CFRP sargılı olarak test edilen, ancak farklı karışımdan imal edilmiş olan Şekil 10(f) ve Şekil 10(g)'de yer alan, C2-II ve C2-III numunelerinden elde edilen deneysel eğrilerin, Lam ve Teng [6] ve Toutanji [9] tarafından önerilen modellerle elde edilen her iki eğri ile de oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir.

C2-II ve C2-III numunelerinin çelik lifli versiyonları olan Şekil 10(i) ve Şekil 10(i)'de görülen C2-II-SF ve C2-III-SF numuneleri için ise sırasıyla, Toutanji [9] ve Lam ve Teng [6] modellerinden elde edilen eğrilerin deneysel eğrilere diğer modellere göre çok daha uyumlu olduğu saptanmıştır. Benzer şekilde verilen eğriler dikkate alındığında çelik lifin, numunelerin sünekliğine olan katkısının burada da oldukça dikkat çekici olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak Şekil 10(a-i)'de verilen eğrilere genel anlamda bakıldığında; çift kat CFRP sargılı ve çelik lif içeren karışımdan imal edilmiş olan numunelerin gerek sargılı beton davranışını yansıtmaya bakımından mevcut modellere uyum açısından, gerekse çelik lifsiz numunelere kıyasla numunenin yük altında daha fazla deformasyon yapmasına imkân sağlaması bakımından çok daha başarılı ve etkin olduğu görülebilmektedir.

## 6 Sonuçlar

CFRP sargılı beton davranışının incelendiği bu çalışmada yapılan deneyler sonucunda tek veya çift kat CFRP sargılamanın betonun dayanım ve deformasyon yapma kapasitesini önemli ölçüde arttırdığı ve özellikle içerisinde çelik lif bulunan betonun sünekliğinin, bulunmayanlara göre daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Bununla birlikte; deneysel sonuçlardan elde edilen ( $\sigma - \epsilon$ ) eğrileri incelendiğinde, çift kat CFRP sargılı ve çelik lifli betondan üretilmiş olan numunelerden elde edilen eğrilerin sargılı beton için önerilen literatürde mevcut olan ( $\sigma - \epsilon$ ) modellerinden elde edilen eğrilere oldukça benzer bir davranış sergilediği gözlenmiştir.

Sonuç olarak; çift kat CFRP sargılamanın betonun basınç dayanımını ve sünekliğini, tek kat CFRP sargılamaya göre daha fazla arttırdığı, özellikle de çelik lif içeren çift kat CFRP sargılı beton silindirik numunelerin dayanım ve süneklik bakımından diğer numunelere kıyasla daha üstün olduğu belirlenmiştir.

## 7 Kaynaklar

- [1] Dündar C, Ertürkmen D, Tokgöz S. "Studies on carbon fiber confined slender plain and steel fiber reinforced concrete columns". *Engineering Structures*, 102, 31-39, 2015.
- [2] Tokgöz S. "Effects of steel fiber addition on the behaviour of biaxially loaded high strength concrete columns". *Materials and Structures*, 42(8), 1125-1138, 2009.
- [3] Sika Yapı Kimyasalları AŞ. "SikaWrap® Sistemleriyle Yapısal Güçlendirme"  
<https://tur.sika.com/dms/getdocument.get/7437a203-7300-3798-9bda-571262ff49b4/sika%20wrap%20sis.%20yap.%20g%C3%BC%A7.pdf> (14.02.2016).
- [4] Richard RM, Abbott BJ. "Versatile elastic-plastic stress-strain formula". *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 101(4), 511-515, 1975.
- [5] Samaan M, Mirmiran A, Shahawy M. "Model of concrete confined by fiber composites". *Journal of Structural Engineering*, 124(9), 1025-1031, 1998.
- [6] Lam L, Teng JG. "Design-Oriented stress-strain model for FRP-confined concrete". *Construction and Building Materials*, 17(6-7), 471-489, 2003.
- [7] Jiang T, Teng JG. "Strengthening of Short Circular RC Columns with FRP Jackets: A Design Proposal". *3rd International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Miami, Florida, USA, 13-15 December 2006.
- [8] Fahmy M, Wu Z. "Evaluating and proposing models of circular concrete columns confined with different FRP composites". *Composites Part B: Engineering*, 41(3), 199-213, 2010.
- [9] Toutanji HA. "Stress-Strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets". *ACI Materials Journal*, 96(3), 397-404, 1999.
- [10] Jiang T, Teng JG. "Analysis-Oriented stress-strain models for FRP-confined concrete". *Engineering Structures*, 29(11), 2968-2986, 2007.
- [11] Ozbakkaloglu T, Lim JC, Vincent T. "FRP-confined concrete in circular sections: review and assessment of stress-strain models". *Engineering Structures*, 49, 1068-1088, 2013.
- [12] Ozbakkaloglu T, Akin E. "Behavior of FRP-Confined normal and high-strength concrete under cyclic axial compression". *Journal of Composites for Construction, ASCE*, 16(4), 451-463, 2012.
- [13] Vincent T, Ozbakkaloglu T. "Influence of concrete strength and confinement method on axial compressive behavior of FRP-confined high and ultra high-strength concrete". *Composites Part B: Engineering*, 50, 413-428, 2013.