

Karbon Lifli Polimer Sargılı Narin Betonarme Kolonların Moment Büyütme Yöntemi ile Analizi

Duygu ERTÜRKMEN^{*1}, Cengiz DÜNDAR¹, Serkan TOKGÖZ²

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana

²Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mersin

Geliş tarihi: 02.12.2015

Kabul tarihi: 07.03.2016

Özet

Bu çalışmada, karbon lifli polimer sargılı yüksek dayanımlı çelik lifli ve lifsiz betonarme kolonların davranışları incelenmiştir. Bu amaçla hazırlanan 8 adet çelik lifli ve lifsiz karbon fiber sargılı betonarme kolon numuneler iki eksenli eğilme ve eksenel yük altında test edilerek taşıma gücü kapasiteleri ve yük-deplasman eğrileri belirlenmiş ve aynı kolon numunelerinin teorik olarak da analizi gerçekleştirilmiştir. Analizde beton basınç bölgesi için literatürde yer alan sargılı beton gerilme-şekil değiştirme modeli kullanılmıştır. Ele alınan kolon numunelerin beton basınç dayanımı 53,13~76,76 MPa arasında değişmektedir. Test edilen kolon numunelerine ait dayanım, dış merkezlik, karbon lifli polimer malzeme özellikleri ve narinlik etkisi parametreleri yapılan analizlerde incelenmiştir. Analizde, narinlik etkisi ACI-318 yönetmeliği tarafından önerilen Moment Büyütme Yöntemi' ne göre ele alınmıştır. Kolon numunelerin analizinden elde edilen sonuçların deneysel olarak elde edilen sonuçlarla uyum içinde olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Süneklik, Çelik lifli beton, Karbon lifli polimer, Sargılı beton, İki eksenli eğilme

Analysis of Carbon Fiber Polymer Confined Slender Reinforced Concrete Columns by Using Moment Magnification Method

Abstract

In this study, the behavior of carbon fiber polymer confined plain and steel fiber reinforced concrete columns were examined. For this purpose, carbon fiber polymer confined plain and steel fiber reinforced concrete column specimens were prepared and analyzed to determine the ultimate strength capacity and the load-deflection curves of columns. In the analysis, a stress-strain model for confined concrete was used for the concrete compression zone. Compressive strength of reinforced concrete column specimens are range from 53,13~76,76 MPa. In the analysis compressive strength, eccentricity, carbon fiber polymer

* Yazışmaların yapılacağı yazar: Duygu ERTÜRKMEN, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana. dbasli@cu.edu.tr

material properties and parameters of slenderness effect were examined. In the analysis, slenderness effect of the column is taken into account by using Moment Magnification Method suggested by ACI-318 building code requirements for structural concrete. In conclusion the analysis and experimental results of carbon fiber reinforced polymer confined plain and steel fiber reinforced concrete columns have been achieved in good accuracy.

Keywords: Ductility, Steel fiber concrete, Carbon fiber polymer, Confined concrete, Biaxial bending

1. GİRİŞ

Betonarme yapılarda düşey elemanlardan olan kolonlar, yapının dayanımı ve taşıma kapasitesi bakımından önemli elemanlardır. Söz konusu elemanlar yüksek dayanımlı beton ile de üretilebilmektedir. Ancak yüksek dayanımlı beton gevrek davranış gösterdiğinden bu şekilde hazırlanan kolonlar maksimum taşıma kapasitelerine ulaştığında ani olarak kırılmaktadır. Bu tür kolonların süneklik düzeyini arttırmak için beton içerisine belirli oranda çelik lif katılmaktadır. Bunların yanında, taşıma gücü kapasitesini ve sargı etkisini daha da arttırmak amacıyla kolonlar karbon lifli polimer malzeme (CFRP) ile dıştan sarılmaktadır. Böylece betonarme bir kolonla kıyaslandığında aynı özellikteki karbon lifli polimer malzeme sargılı kolonun taşıma gücü kapasitesi ve sünekliği, önemli düzeyde artış göstermektedir.

CFRP malzemesi betonarme elemanlara oldukça kolay ve hızlı bir şekilde uygulanabilmektedir. CFRP malzemesinin mekanik özellikleri, türü, elastisite modülü, dayanımı, kalınlığı, elemana uygulanan kat sayısı, malzemedeki liflerin yerleşimi ve yönü, CFRP sargılı elemanların yapısal davranışlarını büyük ölçüde etkilemekte ve değiştirmektedir.

Bilindiği gibi betonarme yapılarda genellikle köşe kolonlar düşey yükler, rüzgar yükleri veya deprem yükleri nedeniyle eksantrik yüklemelere maruz kalabilmektedir [1]. Gerek CFRP malzemesi ile sarılı eksantrik yüklü narin betonarme kolonların davranışlarının belirlenmesine gerekse lifli polimer sargılı betonarme elemanların mekanik davranışlarının belirlenmesine ilişkin pek çok

sayıda teorik ve deneysel araştırma yapılmıştır. Mirmiran ve Shahawy (1997), Toutanji ve Balaguru (1998), Teng ve Lam (2002), lifli polimer malzeme ile sarılı kolonların yapısal davranışları üzerinde çalışmışlardır [2-4]. Samaan ve arkadaşları (1998), eksenli doğrultusunda ve yanal yönde lifli polimer sargılı betonarme elemanların davranışlarının belirlenmesi için bir sargı modeli önermişlerdir [5]. Hadi (2006), lifli polimer malzeme ile sarılı normal dayanımlı betonarme kolonların eksantrik yük etkisindeki davranışlarının belirlenmesi için deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Elde ettiği deneysel sonuçlara göre lifli polimer malzeme ile sarılı betonarme kolonların daha yüksek dayanım, süneklik ve enerji yutma kapasitesi özelliklerine sahip olduğunu gözlemlemiştir [6]. Zaki (2011), karbon lifli polimer malzeme kullanılarak güçlendirilmiş eksantrik yüklü betonarme kolonlara ilişkin bir analiz ve tasarım yöntemi önermiştir [7]. Vincent ve Özbakkaloğlu (2013), lifli polimer sargı malzemesindeki liflerin dağılım ve yönlerinin betonarme kolonların davranışına olan etkilerini incelemiştir. Ayrıca sargılı betonarme kolonların sarılmasının kolonun basınç altındaki davranışına olan etkilerini araştırmışlardır [8]. Punurai, Hsu ve arkadaşları (2013), iki eksenli eğilmeye maruz karbon lifli polimer malzeme ile kaplı narin betonarme kolonların deneysel ve teorik davranışlarını incelemiştir [9].

Literatürde karbon lifli polimer sargılı çelik lifli narin betonarme kolonların davranışlarını konu alan çalışmalar oldukça sınırlı kalmıştır. Sunulan çalışmada, karbon lifli polimer sargılı çelik lifli ve lifsiz yüksek dayanımlı betonarme kolonların davranışının belirlenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmaya ek olarak bir de analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Analizde, narinlik etkisi ACI-318 yönetmeliğinde önerilen Moment Büyütme Yöntemi' ne göre ele alınmıştır.

Analizlerde beton basınç bölgesi için literatürde yer alan karbon lifli sargılı ve sargısız çelik lifli ve lifsiz beton davranışını tanımlayan gerilme-şekil değiştirme modelleri kullanılmıştır. Analizler sonucunda elde edilen kolon taşıma gücü kapasitesi değerlerinin deneysel olarak elde edilen değerlerle uyumlu olduğu belirlenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Sunulan çalışmada, çelik lifsiz ve lifli, sargısız ve karbon lifli sargılı olarak tasarlanan 8 adet kolon numunenin iki eksenli eğilme ve eksenel basınç altındaki davranışını simgeleyen sonuçlar, deneysel ve analitik olarak verilmiştir.

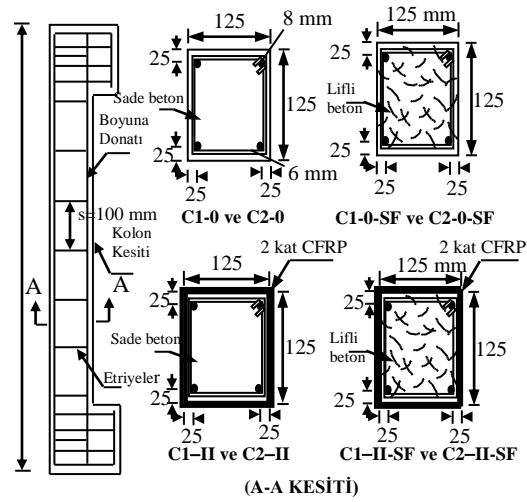
Test edilen kolon numunelerinin hazırlanmasında iki farklı beton karışımı kullanılmıştır. İlk beton karışımı C1, ikinci beton karışımı C2 serisi olarak adlandırılmış ve çelik lif ilave edilen serilere çelik lif katkısını simgeleyen SF kısaltması eklenmiştir. C1 serisi çelik lif kullanılmayan seri olup C1-0 sargısız, C1-II çift kat CFRP sargılı numunelerdir. C1-SF serisi bunların çelik lif katkılı olanları olup yine C1-0-SF sargısız, C1-II-SF çift kat CFRP sargılı numunelerdir. İkinci beton karışımı olan C2 serisi ve C2-SF serisi içinde C2-0 sargısız, C2-II çift kat sargılı, C2-0-SF sargısız ve C2-II-SF yine çift kat sargılı olan numunelerdir. Belirtilen serilerde yer alan numuneler için 1 m³ hacimde kullanılan beton karışım oranları Çizelge 1'de görülmektedir. Söz konusu numunelerde sargılı ve sargısız silindirik basınç dayanımı değerleri 53,13~76,76 MPa aralığında elde edilmiştir.

Çizelge 1. Numunelere ait beton karışım oranları (1 m³ hacim için)

Malzeme	C1	C1-SF	C2	C2-SF
Çakıl (kg)	1120	1110	1100	1090
Kum (kg)	725	720	640	630
Çimento (kg)	400	400	400	400
Su (l)	150	150	120	120
Kimyasal (kg)	5	5	15	15
Lif (kg)	-	50	-	60

Hazırlanan kolon numuneler 1300 mm uzunluğunda ve 125×125 mm kesitinde

tasarlanmıştır. Kolon numunelerde gerek iki eksenli eğilme ve eksenel basıncı sağlamak gerekse kolon uçlarında oluşabilecek yerel kırılmaları önlemek üzere numunelerin iki ucunda 200×200 mm başlık oluşturulmuştur. Kolon köşelerinde 8 mm çapında, akma dayanımı 550 MPa olan boyuna donatı kullanılmıştır. 6 mm çapındaki akma dayanımı 630 MPa olan etriyeler, kolon boyunca 100 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Kolon numunelerine ait detaylar Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Sargılı ve sargısız kolon numunelerine ait kesit detayları ve donatı düzeni

Numunelere ait beton karışımlarında PÇ42,5 dayanımlı çimento, maksimum dane boyutu 20 mm olan agrega malzemesi ve RC 65/35 BN kodlu çelik lif kullanılmıştır. Numuneler prizlerini aldıktan sonra çift yönlü lif içeren Sika Wrap Hex 300C 0/90 olarak adlandırılan karbon lifli polimer malzeme ile Sikadur-330 isimli epoksi yapıştırıcısı kullanılarak sarılmıştır. CFRP sargılı ve sargısız olarak hazırlanan deney numunelerine ait örnekler Şekil 2'de görülmektedir.

Karbon lifli polimer sargısının kolonların davranışları üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için hazırlanan 8 numuneden dört tanesi çift kat malzeme kullanılarak sarılmıştır.



Şekil 2. Sargılı ve sargısız kolon numune örnekleri



Şekil 3. Deney düzeneği

Kalan dört tanesi ise sargı yapılmayan lifsiz ve lifli beton karışımları ile imal edilen referans numuneleridir. Numunelere ait basınç dayanımı değerleri, numuneler hazırlanırken alınmış olan silindirik numune örneklerinin numunelerin test edildiği gün içerisinde eksenel basınç altında denenmesi ile elde edilmiştir. Numune isimleri, numunelere ait beton basınç dayanımı değerleri, deneylerde numunelere uygulanan yükün eksantrisite değerleri ve numune hazırlığında kullanılan sargı miktarı bilgileri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Numunelere ait dayanım ve eksantrisite değerleri ile kullanılan CFRP sargı miktarı

Numune	f_{cd} (kN/cm ²)	$e_x=e_y$ (cm)	Lifli Kumaş
C1-0	6,466	4	yok
C1-II	5,772	4	çift kat
C1-0-SF	6,520	4	yok
C1-II-SF	6,759	4	çift kat
C2-0	7,676	5	yok
C2-II	6,191	5	çift kat
C2-0-SF	6,437	5	yok
C2-II-SF	5,313	5	çift kat

Hazırlanan kolon numuneler elemanların yük taşıma gücü kapasitelerinin, yük-deplasman eğrilerinin ve karbon lifli polimer malzeme sargısının kolon davranışı üzerine olan etkilerinin incelenmesi amacıyla seçilen eksantrisite değerlerinde yüklemeye tabi tutulmuştur.

Deneylerde kullanılan düzenek Şekil 3'de verilmiş olup yanal deplasmanların ölçümü için lineer deplasman ölçerler, yükün kaydedilmesi için veri toplama sistemi, yükün numuneye eksenel yönde aktarımı için hidrolik silindirik sistemi ve deney sırasında elemana etkiyen yükü tespit etmek için ise 500 kN kapasiteli yük hücresi kullanılmıştır. Kullanılan yük hücresi ve deplasman ölçerler deneyden önce kalibre edilmiştir. Yük 1 kN/sn artımla numuneye verilmiş olup bu şekilde ortaya çıkacak yük-yanal deplasman eğrilerinin gerçek davranışı daha uygun ve düzgün bir şekilde yansıtması sağlanmıştır. Deney boyunca gerek yüklemdeki artım gerekse her iki eksen (x ve y) yönünde oluşan yanal deplasmanlar, veri toplama sistemi ile kaydedilmiştir. Çalışma kapsamında ele alınan kolon numunelerine ait deneysel sonuçlar Dündar, Ertürkmen ve Tokgöz (2015) tarafından yapılan çalışmada detaylı olarak verilmektedir [10].

2.2. Metot

Bu çalışmada karbon lifli polimer sargılı sade veya lifli narin betonarme kolonların davranışlarının belirlenmesi için analitik bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem iki eksenli eğilme ve eksenel yüke maruz kolonlar için Tokgöz, Dündar ve Tanrıku (2008) tarafından geliştirilen programın, karbon lifli polimer sargılı betonarme kolonlara uygun olarak yeniden düzenlenmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Önerilen yöntemde, beton basınç bölgesi bu bölgede oluşan gerilmelerin hesaplanabilmesi için küçük elemanlara ayrılmıştır. Karbon lifli polimer malzemenin herhangi bir basınç kuvvetini karşılamadığı ve sadece boyuna doğrultuda

oluşacak çekme kuvvetinin taşınmasına katkı sağladığı kabul edilmiştir. Bu nedenle karbon lifli malzeme, çekme bölgesinde de küçük elemanlara ayrılarak malzemede oluşan çekme gerilmeleri belirlenmiştir.

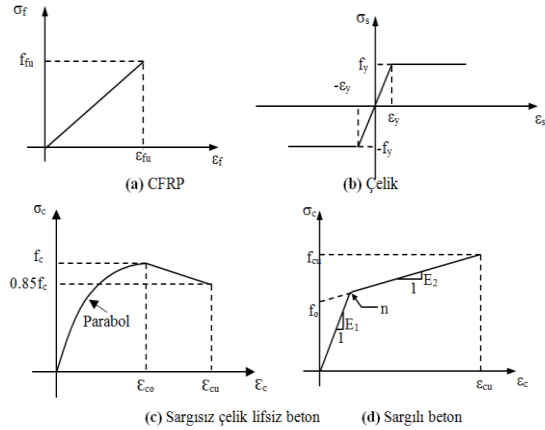
Önerilen analiz yönteminde yapılan varsayımlar: (1) eğilmeden önce düzlem olan kesitler, eğilmeden sonrada düzlem kalırlar. (2) malzemenin doğrusal olmayan davranışı esas alınır. (3) beton basınç bölgesi için literatürde mevcut sargılı ve sargısız beton gerilme-şekil değiştirme modelleri kullanılmıştır. (4) çelik için malzemenin elasto-plastik davranışını göz önüne alan gerilme-şekil değiştirme ilişkisi kullanılır. (5) betonun çekme dayanımına katkısı ihmal edilir. (6) sünme ve büzülme etkisi ihmal edilip beton, çelik ve CFRP malzemesi arasında tam bir aderans olduğu kabul edilmiştir. (7) eksenel ve kesme deformasyonları ihmal edilmiştir.

Analizlerde kullanılan malzemelere yönelik gerilme-birim deformasyon eğrileri Şekil 4 (a-d)'de görülmektedir. CFRP malzemesi için malzeme davranışının kopma anına kadar lineer elastik olduğunu varsayan, donatı çeliği için elasto-plastik davranışı esas alan gerilme-birim deformasyon modelleri kullanılmıştır. Sargısız çelik lifsiz beton için Hognestad (1955) tarafından önerilen ve literatürde Hognestad Modeli olarak bilinen beton modeli dikkate alınırken; sargısız çelik lifli beton için Hsu ve Hsu (1994) tarafından, sargılı beton için ise Punurai ve Hsu (2013) tarafından önerilen gerilme-birim deformasyon modelleri kullanılmıştır. Şekil 4 (a)'da verilen CFRP malzemesine ait gerilme şekil değiştirme diyagramında σ_f ve ϵ_f CFRP' nin gerilme ve şekil değiştirme değerleri olup; f_{fu} ve ϵ_{fu} malzemeye ait maksimum gerilme ve şekil değiştirme değerleridir.

$$\sigma_f = E_f \epsilon_f \leq f_{fu} \quad 0 \leq \epsilon_f \leq \epsilon_{fu} \quad (1)$$

Burada E_f malzemeye ait elastisite modülü olup aşağıdaki ifade ile hesaplanmaktadır.

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\epsilon_{fu}} \quad (2)$$



Şekil 4 (a-d). CFRP, çelik, sargısız ve sargılı beton gerilme-şekil değiştirme eğrileri

Şekil 4 (b)'de çelik için verilen gerilme şekil değiştirme diyagramı malzemenin elasto-plastik davranışını temel almakta olup diyagramda görülen σ_s ve ϵ_s donatı çeliğinin gerilme ve şekil değiştirme değerleri olup; f_y ve E_s sırasıyla malzemeye ait akma dayanımı ve elastisite modülü değerleridir.

$$\sigma_s = E_s \epsilon_s \leq f_y \quad (3)$$

Şekil 4 (c)'de sargısız numuneler için beton basınç bölgesinin tanımında kullanılan Hognestad modeli yer almaktadır. Modelde, betonun (σ - ϵ) ilişkisi tanımlanırken (σ - ϵ) ilişkisinin, eğrinin tepe noktasına kadar ikinci dereceden parabol olduğu, tepe noktasından sonraki azalan kısmının ise doğrusal olduğu varsayılmıştır. Modelde maksimum gerilmenin genelde beton silindirik basınç dayanımının %85'i olduğu kabul edilmiştir ($f_c=0,85f_{ck}$). Maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalma değeri, $\epsilon_{co}=2f_c/E_c$ olarak verilmiş ise de bu değer, basit bir yaklaşımla 0,002 olarak da alınabilmektedir. Kırılmaya karşılık gelen maksimum birim deformasyon değeri $\epsilon_{cu}=0,0038$ olarak kabul edilmektedir. Betonun elastisite modülü için ise (4) denklemi önerilmektedir.

$$E_c = \tan \alpha = 12680 + 460 f_c \quad (\text{MPa}) \quad (4)$$

Modelde yer alan parabolik ve doğrusal kısmı ifade eden denklemler sırasıyla (5) ve (6) ifadelerinde yer almaktadır.

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

$$\sigma_c = f_c \left[1 - 0,15 \left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{co}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co}} \right) \right] \quad (6)$$

Burada f_c beton basınç dayanımını; ε_{co} maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalmayı; ε_{cu} kırılma anındaki birim kısalmayı ve ε_c betondaki birim kısalmayı simgelemektedir.

Yapılan analizlerde sargısız çelik lifli numuneler için ise Hsu ve Hsu (1994) tarafından tanımlanan ve aşağıda denklemleri verilen gerilme-birim deformasyon ilişkisi kullanılmıştır.

$$\sigma_c = \left[\frac{n_1 \beta \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)}{n_1 \beta - 1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^{n_1 \beta}} \right] f_c \quad (7)$$

Burada; $\left(0 \leq \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \leq x_d \right)$ olmalıdır.

$$\sigma_c = 0,6 \exp \left[-0,7 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - x_d \right)^{0,8} \right] f_c \quad (8)$$

Burada; $\left(x_d \leq \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)$ olmalıdır.

İfadelerde yer alan n_1 ve β , malzeme parametreleri olup n_1 , malzeme dayanımına; β ise gerilme-birim deformasyon eğrisinin şekline bağlıdır. Değerleri karışımda bulunan çelik lif miktarının hacimsel oranına göre değişmekte olan bu parametrelere ait kullanılan ifadeler ise Hsu ve Hsu (1994)

tarafından yapılan çalışmada detaylı olarak verilmektedir.

Yine yukarıda belirtilen denklemlerde yer alan σ_c değeri, beton basınç gerilmesini, f_c değeri ise maksimum beton basınç gerilmesine karşılık gelen gerilmeyi simgelemektedir. Bununla birlikte, ε_0 maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalmanın değerini, x_d ise eğrinin azalan kısmını temsil eden bölümünde $0.6f_c$ gerilmesine karşılık gelen birim kısalma değerini temsil etmektedir.

Şekil 4 (d)'de sargılı beton için verilen gerilme şekil değiştirme modelinde eğriler farklı eğime sahip iki artan doğrunun birleşmesi ile temsil edilmiş olup burada σ_c ve ε_c sırasıyla, CFRP sargılı betonun gerilme ve birim deformasyon değerleridir. E_1 ve E_2 ifadeleri ise verilen bu iki artan doğruya ait eğim yani elastisite modülü değerleridir. f_0 ikinci doğruya ait başlangıç gerilmesi olup bu noktadan itibaren oluşan gerilmeler plastik haldeki gerilmelerdir. n ise şekil faktörünü ifade etmektedir. Ayrıca ε_{cu} lifte oluşacak olan maksimum şekil değiştirmeyi, f_{cu} ise CFRP sargılı betonda oluşacak olan maksimum gerilmeyi temsil etmektedir.

CFRP sargılı betonun gerilme-birim deformasyon davranışını belirleyen ifade Punurai ve Hsu (2013) tarafından önerilen (9) denkleminde yer almaktadır.

$$\sigma_c = \frac{(E_1 - E_2)\varepsilon_c}{\left[1 + \left(\frac{(E_1 - E_2)\varepsilon_c}{f_0} \right)^n \right]^{1/n}} + E_2\varepsilon_c \quad (9)$$

Bu ifadede görülen ilk doğrunun eğimi olan E_1 ifadesi ACI 318-08 (2008) tarafından önerilen denklem (10) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$E_1 = 4730\sqrt{f_c} \quad (10)$$

Yine verilen ifadede yer alan ve ikinci doğrunun eğimi olan E_2 denklem (11)'deki ifade kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu ifadede yer alan E_f CFRP kumaşının kuru haldeki etkili elastisite modülü

$$E_2 = 189,21f_c^{0.2} + 1.345 \frac{E_f t_f}{D} \quad (11)$$

değeridir; t_f CFRP kumaşının kalınlığı; D ise göbek betonun çapıdır.

f_0 ikinci doğruya ait başlangıç gerilmesi olup denklem (12) ile hesaplanmaktadır.

$$f_0 = 0,85f_c + 1,9f_r + 6,89 \quad (12)$$

Burada f_r CFRP kumaşının sargılama basıncı olup denklem (13) ile elde edilmektedir.

$$f_r = \frac{2f_f t_f}{D} \quad (13)$$

Burada yer alan f_f ise halka gerilmesidir.

CFRP sargılı betona ait maksimum gerilme olan (f_{cu}) ve ona karşılık gelen birim deformasyon (ε_{cu}) değerleri ise aşağıda verilen ifadelerle elde edilebilmektedir:

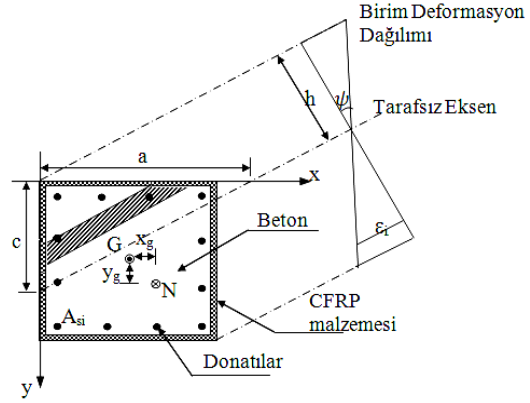
$$f_{cu} = f_c + 6,14f_r^{0.75} \quad (14)$$

$$\varepsilon_{cu} = \frac{f_{cu} - f_0}{E_2} \quad (15)$$

3. ANALİTİK YÖNTEM İÇİN FORMÜLASYONLAR

İki eksenli eğilme ve eksenel basınca maruz CFRP sargılı kolon kesiti ve birim deformasyon dağılımı Şekil 5’de görülmektedir.

Analizde karbon fiber polimer malzeme çekme bölgesinde, beton malzeme basınç bölgesinde tarafsız eksen konumuna paralel olarak şeritlere ayrılmaktadır. Bu şeritlerin ağırlık merkezindeki birim deformasyon değerleri Denklem (16) yardımıyla hesaplanmaktadır. Hesaplanan birim deformasyonlara karşılık gelen gerilmeler her bir malzemenin gerilme-birim deformasyon modelinden belirlenmektedir.



Şekil 5. CFRP sargılı kolon kesiti ve birim deformasyon dağılımı

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{cu} \left[\left(\frac{y_i}{c} + \frac{x_i}{a} \right) - 1 \right] \quad (16)$$

Burada a ve c ifadeleri sırasıyla x - y eksenlerinin orijin noktasından tarafsız eksene olan mesafeleridir. ε_{cu} betonda oluşan maksimum birim deformasyon değeridir. Oluşacak eğrilik aşağıdaki ifade ile saptanmaktadır.

$$\psi = \frac{\varepsilon_c}{h} \quad (17)$$

Burada ε_c betonda oluşan birim deformasyon değeri olup h maksimum basınç lifi ile tarafsız eksen arasındaki mesafedir.

CFRP sargılı kesitin içinde oluşan eksenel kuvvet ve kuvvetin uygulandığı eksantrisite nedeniyle kesitin x ve y eksenleri yönünde oluşan eğilme momenti değerleri statik olarak dıştan uygulanan eksenel kuvvet ve yükün uygulandığı eksantrisiteden doğan eğilme momentlerine eşit olacaktır. Kesitin içinde oluşacak olan eksenel kuvvet ve momentler betonda, donatı çeliğinde ve CFRP kumaşında meydana gelen kuvvet, gerilme ve şekil değiştirmelerin ortak etkisiyle aşağıda verilen denge denklemleri kullanılarak hesaplanacaktır.

$$N = \sum A_c \sigma_c + \sum A_s \sigma_s + \sum A_{fp} \sigma_{fp} \quad (18)$$

$$M_x = \sum A_c \sigma_c y_c + \sum A_s \sigma_s y_s + \sum A_{fp} \sigma_{fp} y_{fp} \quad (19)$$

$$M_y = \sum A_c \sigma_c x_c + \sum A_s \sigma_s x_s + \sum A_{fp} \sigma_{fp} x_{fp} \quad (20)$$

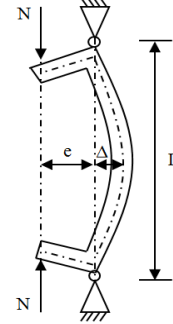
Burada A_c , A_s ve A_{fp} sırasıyla betonun, çeliğin ve CFRP kumaşının kesit alanlarıdır. σ_c , σ_s ve σ_{fp} sırasıyla betonun, çeliğin ve CFRP kumaşının gerilme değerleridir. (x_c, y_c) , (x_s, y_s) ve (x_{fp}, y_{fp}) yine sırasıyla betonun, donatı çeliğinin ve CFRP kumaşının kesit ağırlık merkezine olan mesafeleridir. CFRP kumaşında meydana gelecek kuvvetler kumaşın elemana boyuna yönde uygulanması hali için hesaba alınmıştır.

Sargısız ve sargılı kolon numunelerinin analizinde, oluşacak olan eksenel yük ve moment taşıma kapasitesi değerlerinin hesabı için narinlik etkisini göz önüne alan ACI-318 yönetmeliği tarafından önerilen Moment Büyütme Yöntemi kullanılmıştır.

4. MOMENT BÜYÜTME YÖNTEMİ

Betonarme yapılarda mevcut bulunan kolon elemanlarının kesit boyutları, boylarına oranla küçük olduğundan kolonlar genelde narin eleman olarak davranırlar. Eğilme etkisine maruz narin bir kolonda, yer değiştirmeden dolayı ilave bir moment meydana gelmektedir. İkinci mertebe momenti olarak adlandırılan bu ilave moment $N(\Delta)$ mertebesinde ve genellikle kolon ortasında maksimum olmaktadır (Şekil 6).

İkinci mertebe momentler çoğunlukla ihmal edilemeyecek boyutta olabilmektedir. Bu nedenle hesaplara dahil edilmeleri gerekir. Bu amaçla kolonlarda meydana gelen yer değiştirme değerlerinin de doğru olarak saptanması önemli olmaktadır. Ancak, kolonların karmaşık sınır koşullarına sahip olması, betonarmenin doğrusal- elastik olmayan bir malzeme olması, davranışın zamana ve yük geçmişine bağlı olması gibi nedenlerden dolayı yer değiştirmelerin kesin olarak elde edilmesi mümkün olamamaktadır. Bu



Şekil 6. Eksantrik yük altında kolonda oluşan deplasman

nedenle hesaplarda bir takım kabuller yaparak sonuca gidilmektedir.

$$M_{\max} = N(e) + N(\Delta) \quad (21)$$

Kolonlarda narinlik etkisini hesaplara katmak için ACI yönetmeliğinde öngörülen ve TS 500-2000 tarafından da kabul edilen "Moment Büyütme Yöntemi" kullanılmaktadır. Yöntemin kullanılabilmesi için narinlik oranının denklem (22)'de verilen ifadeyi sağlaması gerekmektedir.

$$\frac{L_k}{i} \leq 100 \quad \left(i = \sqrt{\frac{I}{A}} \right) \quad (22)$$

Burada L_k kolon etkili boyunu; i ise kesit atalet yarıçapını göstermektedir. Bu yöntemde narinlik etkisinden meydana gelen ikinci mertebe momentlerinin de dahil edildiği moment değeri (M_{\max}), birinci mertebe momentinin $N(e)$, moment büyütme katsayısı (δ) ile çarpılmasıyla elde edilmektedir.

$$\delta = \frac{C_m}{1 - 1,33 \frac{N_u}{N_{cr}}} \geq 1.0 \quad (23)$$

$$C_m = 0,6 + 0,4 \frac{M_{u1}}{M_{u2}} \geq 0,4 \quad M_{u1} \leq M_{u2} \quad (24)$$

İki ucu mafsallı kolonlarda $C_m=1,0$ alınmaktadır. N_{cr} kolon burkulma yükü olup aşağıdaki ifade ile tanımlanmaktadır.

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(kL)^2} \quad (25)$$

Burada (kL) kolon etkili boyu; EI ise kolonun etkili eğilme rijitliğini göstermektedir. Betonarme kolonlar için eğilme rijitliği, TS 500-2000 tarafından önerilen aşağıdaki ifade ile ele alınmaktadır.

$$EI = \frac{0,4E_c I_c}{1 + \beta_d} \quad (26)$$

Burada E_c beton elastisite modülünü, I_c kesit atalet momentini ve β_d sünme oranını göstermektedir. Kısa süreli yüklemeye maruz elemanlarda $\beta_d=0$ alınmaktadır.

Eğik eğilmeye maruz betonarme kolonların narinlik hesabında moment büyütme çarpanı (δ_x , δ_y) iki yönde ayrı ayrı hesaplanarak ilgili momentlerle çarpılmak suretiyle hesaplara yansıtılmaktadır.

$$M_{ux} = \delta_x N_u e_y \quad M_{uy} = \delta_y N_u e_x \quad (27)$$

Narinlik hesabında, analiz ve tasarımda oluşturulan denge denklemleri sağlanıncaya kadar her iterasyonda iki yönde moment büyütme çarpanı (δ_x , δ_y) değeri hesaplanarak işlemlere katılmaktadır.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Yapılan bu çalışma kapsamında, iki eksenli eğilme ve eksenel basınç altında deneysel olarak test edilen kolonlar, narinlik hesabında Moment Büyütme Yöntemi göz önüne alınarak geliştirilmiş olan bilgisayar programı kullanılarak analiz edilmiştir. Analizde beton basınç bölgesi için sargısız çelik lifsiz numuneler için Hognestad modeli (1955), sargısız çelik lifli numuneler için Hsu ve Hsu (1994) tarafından önerilen model ve

sargılı numuneler için ise Punurai ve Hsu (2013) tarafından önerilen sargılı beton gerilme-birim deformasyon modeli kullanılmıştır.

Analiz sonucunda elde edilen moment ve eksenel yük taşıma gücü değerleri, deneysel olarak elde edilen değerler ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. Kolon numunelerine ait deneysel ve analitik taşıma gücü değerleri

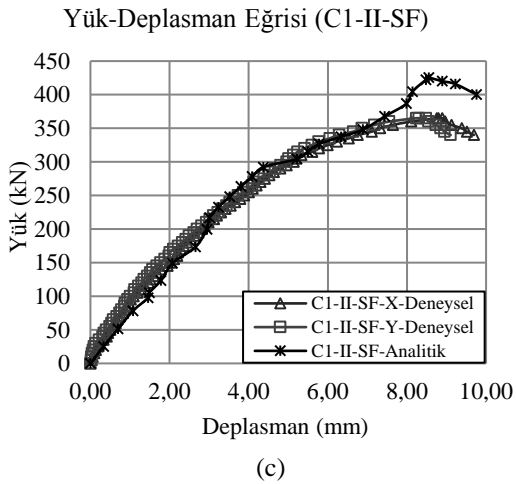
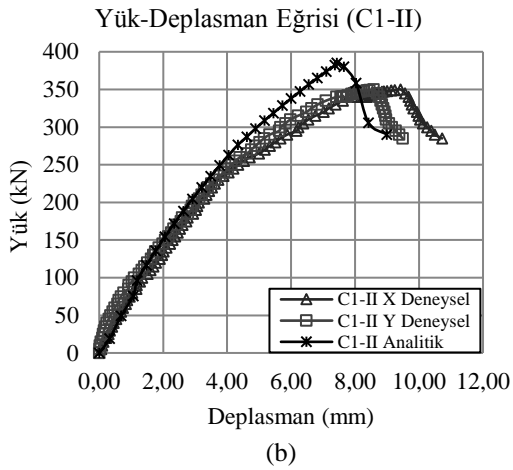
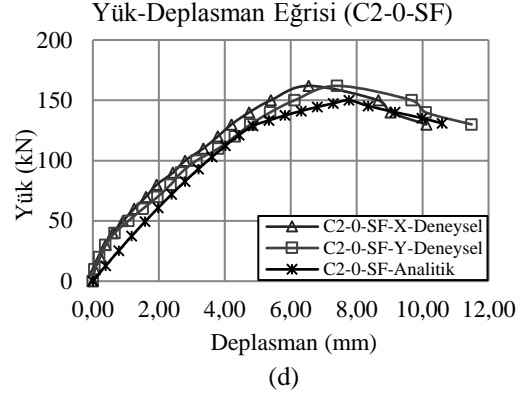
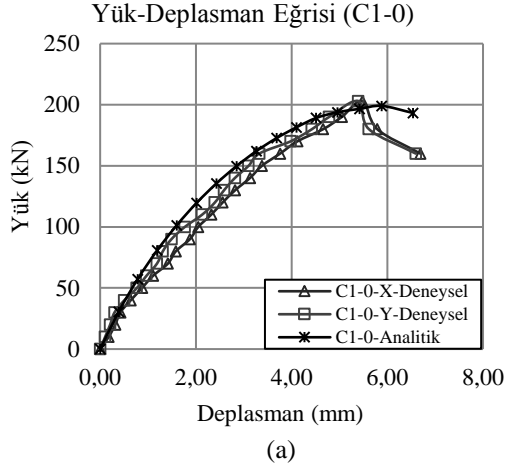
Numune	N_d (kN)	N_{test} (kN)	$M_x \& M_y$ (kNcm)	N_d / N_{test}
C1-0	199,03	203	932,57	0,980
C1-II	385,31	350	1531,10	1,100
C1-0-SF	198,62	220	929,63	0,903
C1-II-SF	425,24	365	1699,47	1,165
C2-0	165,72	155	932,88	1,069
C2-II	333,95	283	1669,52	1,180
C2-0-SF	150,02	162	843,35	0,926
C2-II-SF	305,29	267	1529,92	1,143
				1,058

C1-0, C1-II, C1-II-SF ve C2-0-SF numunelerine ait deneysel ve analitik olarak elde edilen yük-deplasman eğrileri ise karşılaştırmalı olarak Şekil 6 (a-d)'de sunulmuştur.

6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Sunulan çalışmada lifli ve lifsiz, çift kat CFRP sargılı ve sargısız, yüksek dayanımlı beton kullanılarak hazırlanmış 8 adet kare kesitli kolon numunesi, iki eksenli eğilme ve eksenel basınç altında deneye tabi tutulmuş ve analiz için analitik bir yöntem geliştirilmiştir.

Yapılan deneylerde lifsiz karışıma sahip olan C1-0 ve C2-0 olarak adlandırılan numuneler, yüksek dayanımlı beton kullanılarak hazırlandıkları için oldukça gevrek bir davranış sergilemişlerdir. C1-0-SF ve C2-0-SF olarak adlandırılan lifli numuneler ise yük etkisinde lifsiz olan numunelere kıyasla çok daha fazla deformasyon yapma özelliği göstermişlerdir. Bu da yüksek dayanımlı betona ilave edilen çelik lifin, betonun sünekliğini önemli ölçüde arttırdığı sonucunu doğrulamaktadır [13].



Şekil 6 (a-d). Bazı numunelere ait karşılaştırmalı yük-deplasman eğrileri

Kolonlarda meydana gelen göçme veya çatlamların genelde numunenin orta kısımlarında meydana geldiği gözlenmiştir. CFRP malzemesi ile sarılan gerek lifli gerek lifsiz kolon numunelerinde, sargı malzemesinde enine yönde bulunan liflerin numunelerin yanal rijitliğini arttırdığı görülmüştür. Test edilen kolonlarda önce kolonun çekme bölgesinde, çekme çatlaklarının oluşumu gözlenmiş sonra basınç bölgesinde betonun kırılması ile numunenin taşıma gücüne eriştiği belirlenmiştir. Çift yönlü lif içeren CFRP sargısının, eğilme çatlağı oluşumunu ertelediği sonucuna varılmıştır. Moment Büyütme Yöntemi kullanılarak yapılan analizler sonucunda elde edilen taşıma gücü değerlerinin deneysel değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür.

Yapılan deneylerden ve analizlerden elde edilen sonuçlara göre, eksantrik yüklemeye maruz kalan yüksek dayanımlı betonarme kolonların gevrek kırılmasını önlemek ve sünek davranmasını sağlamak için; bu kolonlara çelik lif ilave edilmesi, aynı zamanda burkulmaları azaltmak, süneklik ve dayanımı arttırmak için de CFRP ile sarılması önerilmektedir.

7. TEŞEKKÜR

Bu çalışma Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje no: MMF2013D22).

8. KAYNAKLAR

1. Dundar C., Tokgoz S., Tanrikulu A.K., Baran T., 2008. Behaviour of Reinforced and Concrete-Encased Composite Columns Subjected to Biaxial Bending and Axial Load, *Building and Environment*, 43(6): 1109-20.
2. Mirmiran, A., Shahawy, M., 1997. Behavior of Concrete Columns Confined by Fiber Composite, *Journal of Structural Engineering ASCE*, 123(5):583-590.
3. Toutanji, H., Balaguru, P., 1998. Durability Characteristics of Concrete Columns Wrapped with FRP Tow Sheets, *Journal of Materials Civil Engineering ASCE*, 10(1):52-57.
4. Teng, J.G., Lam, L., 2002. Compressive Behavior of CFRP-Confined Elliptical Concrete Columns, *Journal of Structural Engineering ASCE*, 128(12):1535-1543.
5. Samaan, M., Mirmiran, A., Shahawy, M., 1998. Model of Concrete Confined by Fiber Composites, *Journal of Structural Engineering ASCE*, 124(9):1025-1031.
6. Hadi, M.N.S., 2006. Behaviour of FRP Wrapped Normal Strength Concrete Columns under Eccentric Loading, *Composite Structures*, 72(4):503-511.
7. Zaki, M.K., 2011. Investigation of FRP Strengthened Circular Columns under Biaxial Bending, *Engineering Structures*, 33:1666-1679.
8. Vincent, T., Ozbakkaloglu, T., 2013. Influence of Fiber Orientation and Specimen end Condition on Axial Compressive Behavior of FRP-Confined Concrete, *Construction and Building Materials*, 47:814-826.
9. Punurai, W., Hsu, C.T.T., Punurai, S., Chen, J., 2013. Biaxially Loaded RC Slender Columns Strengthened by CFRP composite Fabrics, *Engineering Structures*, 46:311-321.
10. Dundar C., Erturkmen D., Tokgoz S., 2015. Studies on Carbon Fiber Polymer Confined Slender Plain and Steel Fiber Reinforced Concrete Columns, *Engineering Structures*, 102:31-39.
11. Hognestad, E., Hanson, N.W., Mchenry, D., 1955. Concrete Stress Distribution in Ultimate Stress Design, *ACI Journal*, 27(4), 455-479.
12. Hsu L.S.M., Hsu C.T.T., 1994. Stress-Strain Behavior of Steel Fiber High-Strength Concrete under Compression, *ACI Structural Journal*, 91(4):448-457.
13. Tokgoz, S., 2009. Effects of Steel Fiber Addition on the Behaviour of Biaxially Loaded High Strength Concrete Columns, *Materials and Structures*, 42(8):1125-1138.
14. ACI 318, 2008. Building Code Requirements for Structural Concrete, Detroit (MI), American Concrete Institute.

