Betonların Güçlendirilmesinde Karbon Fiber Takviyeli Polimer Yerine Cam Fiber Takviyeli Polimer Kullanılması

[1]Ali SARIBIYIK *[2]Naci CAGLAR ve [2]Muzaffer ELMAS
[1]Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 54187 Sakarya, Türkiye
*[2]Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 54187 Sakarya, Türkiye

Özet

Mevcut yapı elemanlarının olası depremler sonucunda veya kullanım sırasında zamanla güçlendirme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu ihtiyaç yapıların kullanım amacı, servis yüklerinin değişmesi, depremlerin vermiş olduğu zararlar, yapının zamanla dayanıklılığını kaybetmesi sonucunda olabilmektedir. Bir başka güçlendirme ihtiyacı yönetmeliklerin değişmesi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada ortalama 20 MPa dayanıma sahip silindirik beton numuneler tek doğrultulu karbon ve cam kumaş ile sarılmıştır. Söz konusu malzemelerin tekdüze ve tekrarlı yüklemeler altında test edilmesiyle, betonun basınç dayanımına ve sünekliğine etkileri araştırılmıştır. Aynı şartlar altında üretilen betonlar tek doğrultulu karbon ve cam kumaş ile bir veya iki kat enine sarılarak güçlendirilmiştir. CFRP ve GFRP kullanılarak güçlendirilen betonlar tekdüze ve tekrarlı yükler altında test edilen betonlarının basınç dayanımlarında ve şekil değiştirme kapasitelerinde önemli artışlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: CFRP, GFRP, güçlendirme, beton silindir numune, süneklik.

Abstract

During utilization period or after earthquake effects existing structural members may be required to be retrofitting. That requirement may be caused by aim of usage, change of service loads, damages of earthquakes, decreasing of structural strength in time and modifications of specifications. In this study, cylindrical concrete specimens whose strengths are around 20 MPa are confined by one directional carbon and glass fiber reinforced plastics. Effects of those materials to strength and ductility of concrete were investigated under uniform and hysteretic loading. It has been showed CFRP and GFRP increase the strength and ductility capacity of concrete dramatically.

Key words: CFRP, GFRP, retrofit, concrete cylindrical specimen, ductility.

1. Giriş

Son yıllarda meydana gelen depremlerdeki can ve mal kayıpları, betonarme yapıların önemli bir kısmının yapısal olarak yetersiz olduğunu ortaya koymuştur [1-3]. Mevcut yapı stokunun depreme karşı güvenli hale getirilebilmesi için yapıların betonarme kolon, kiriş ve döşeme gibi taşıyıcı elemanların güçlendirilmesi gerekmektedir. Dolayısı ile düşük standartlara sahip yapıların onarım ve güçlendirilme gereksinimi bütün dünyada yapı endüstrilerinin üzerinde çalıştığı en önemli konulardan birisi haline gelmiştir. Betonarme yapı elemanlarının onarım ve güçlendirmesinde değişik yöntemler kullanılmakta olup, yaygın olarak zayıf taşıyıcı elemanları sisteme yeni ilave edilecek betonarme elemanlar ile güçlendirmek veya mevcut yapı elemanlarını

*Corresponding author: Address: Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering Sakarya University, 54187, Sakarya TURKEY. E-mail address: caglar@sakarya.edu.tr, Phone: +902642955752 Fax: +902642955601

betonarme ile mantolanması, kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Ancak bu yöntemler ile yapılan güçlendirmenin yapı ağırlığını önemli ölçüde arttırdığı, temel sisteminde ilave düzenlemelere ihtiyaç duyulduğu ve ekstra maliyet artışlarına neden olduğu bilinmektedir. Ayrıca güçlendirme sırasında yapının kullanımı mümkün olmamaktadır. Bu nedenlerden dolayı yapı ağırlığını artırmayan, hızlı ve kolay uygulanabilen, elemanların taşıma kapasitelerini önemli ölçüde arttıran, güçlendirme sırasında yapının kullanımına olanak sağlayan Elyaf Takviyeli Polimer (Fiber Reinforced Polymer-FRP) kompozitler alternatif güçlendirme elemanları olarak öne çıkmaktadır. Bu amaçla geliştirilen FRP kompozitler 1990'lı yıllardan beri sürekli araştırılıp geliştirilmiş ve günümüzde betonarme yapıların onarımı ve güçlendirilmesinde kullanılır hale gelmiştir. FRP malzemelerin yüksek dayanım özellikleri, her bölgeye kolayca uygulanabilmesi ve hafifliği betonarme yapı elemanlarının onarım ve güçlendirilmesinde kullanımının önünü açmıştır. Birçok araştırma FRP ile yapılan güçlendirme neticesinde yapı elemanların yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde arttırdığını ortaya koymuştur [5-12]. Son 25 yıldır, kolonların FRP kompozitlerle sarılarak dayanımının ve sünekliğinin artırılması üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar beton basınç dayanımı yüksek betonlar üzerinde betonun gevreklik sorununu gidermek maksatlı olmaktadır. Dolayısı ile çalışmalar yüksek dayanımlı betonlar üzerine yoğunlaşmıştır.

Betonların güçlendirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda karbon ve cam elyaflar kullanılmış ancak eş zamanlı karşılaştırmalar yapılmamıştır. Bu çalışmada Deprem yönetmeliği öncesinde üretilen beton kalitesine yakın olacak şekilde üretilen betonlarının Karbon Elyaf Takviyeli Plastik (Carbon Fiber Reinforced plastik-CFRP) ve Cam Elyaf Takviyeli Plastik (Glass Fiber Reinforced plastik-GFRP) ile güçlendirilerek beton basınç dayanımına ve deformasyon yapma kapasitelerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla standart silindir betonlar tek doğrultulu elyaflar ile enine sarılarak betonun basınç dayanımına ve sünekliğine etkileri araştırılmıştır. Aynı şartlar altında üretilen betonlar tek doğrultulu CFRP ve GFRP ile enine sarılarak güçlendirilmiştir. Cam ve karbon kullanılarak güçlendirilen betonlar tekdüze ve tekrarlı yükler altında test edilerek betonlarının basınç dayanım ve şekil değiştirme kapasitelerinin karşılaştırmalı analizleri yapılmıştır.

2. Malzemeler ve Metot

Karbon ve Cam elyaf ile sargılamanın betonun basınç dayanımına ve sünekliğine etkilerini araştırmak için aynı şartlar altında 22 adet 150 mm çapında 300 mm yüksekliğinde silindir beton numuneler üretilmiştir. Aynı şartlar altında üretilen silindir betonlar tek doğrultulu CFRP ve GFRP ile enine sarılarak güçlendirilmiştir. Üretilen betonlar dört gruba ayrılmıştır. Birinci grupta; dört adet referans numunesi (S1), ikinci grupta; altı adet CFRP ile tek katlı ve tek doğrultulu (CFRP1), üçüncü grupta; altı adet GFRP ile tek katlı ve tek doğrultulu (GFRP1) ve dördüncü grupta; altı adet GFRP ile iki katlı ve tek doğrultulu (GFRP2) olarak sarılmıştır. Beton yüzeyinden FRP kumaşın sıyrılmaması için ürün şartlarına uygun olarak 130 mm bindirme yapılmıştır.

2.1. Güçlendirme Malzemeleri

Betonların güçlendirilmesinde eşit hacim oranlarına sahip tek doğrultulu karbon ve cam kumaşlar kullanılmıştır. Tek doğrultulu karbon ve cam kumaşlar; betonarme, tuğla ve ahşap yapı elemanlarının taşıma kapasitelerinin artırılması, yapı hasarlarının tamiri, deprem nedeniyle oluşan hasarların onarımı ve güçlendirilmesi, standartların değişmesi sonucu yapıların buna uyum amacıyla güçlendirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Kumaşların beton yüzeyine iyice yapışması ve beton yüzeylerinden sıyrılmaması için çift bileşenli epoksi tercih edilmiştir.
Karbon kumaşlar; betonarme, tuğla ve ahşap yapı elemanlarının taşıma kapasitelerinin artırılması, yapı hasarlarının onarımı ve güçlendirilmesi, standartların değişmesi sebebi ile uyumun gerçekleştirilmesi amaçlarıyla kullanılmaktadır. Üretilen betonların güçlendirilmesinde tek doğrultulu karbon lifli dokuma olarak Sika Wrap -300 C/60 ürünü kullanılmıştır. Karbon kumaşın karakteristik bazı özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Üretilen betonların güçlendirilmesinde tek doğrultulu alkali dayanıklı Cam lifli dokuma olarak Sika Wrap-430 G/25 ürünü kullanılmıştır. Cam elyaf; kolay temin edilebilir olması, karbon elyafa göre çok daha ucuz olması, deformasyon yapma kabiliyetinin yüksek olması, üretiminin karbon elyafa göre kıyaslandığında daha kolay ve yaygın olması, karbon elyafın kullanıldığı alanlarda kolaylıkla kullanılabilmesi gibi birçok avantajı vardır. Cam kumaşın karakteristik bazı özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Cam ve Karbon elyafın silindir numunelerin yüzeylerine yapıştırılmasında çift bileşenli epoksi esaslı doyurma reçinesi olan Sikadur 330 kullanılmıştır. Uygulaması kolay olan Sikadur 330'un beton, taş, metal, ağaç ve yapı malzemelerinin için uygun bir yapıştırıcı malzemedir. 4 kg A bileşeni (reçine), 1 kg B bileşeni (sertleştirici) hazır setler halinde ambalajlanan Sikadur 330 epoksi reçinesi 4/1 oranında karıştırılarak beton yüzeylerine mala, fırça, rulo yardımı ile kolaylıkla uygulanabilmektedir. Yüksek mukavemete sahip ve devamlı yükler altında yüksek bir sünme dayanımı göstermektedir. Epoksinin karakteristik bazı özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Güçlendirmede kullanılan malzemelerin genel özellikleri

Malzeme özellikleri	**Karbon lifli dokuma Sika Wrap -300 C/60**	**Cam lifli dokuma Sika Wrap -430 G/25**	**Epoksi reçine Sikadur 330**
Yoğunluk (g/cm^3)	1.79	2.56	1.31
Çekme dayanımı (MPa)	3900	2300	30
Çekme elastik modülü (MPa)	230000	76000	4500
Kopma uzaması (%)	1.5	2.8	0.9
Kokuma kalınlığı (mm)	0.166	0.172	

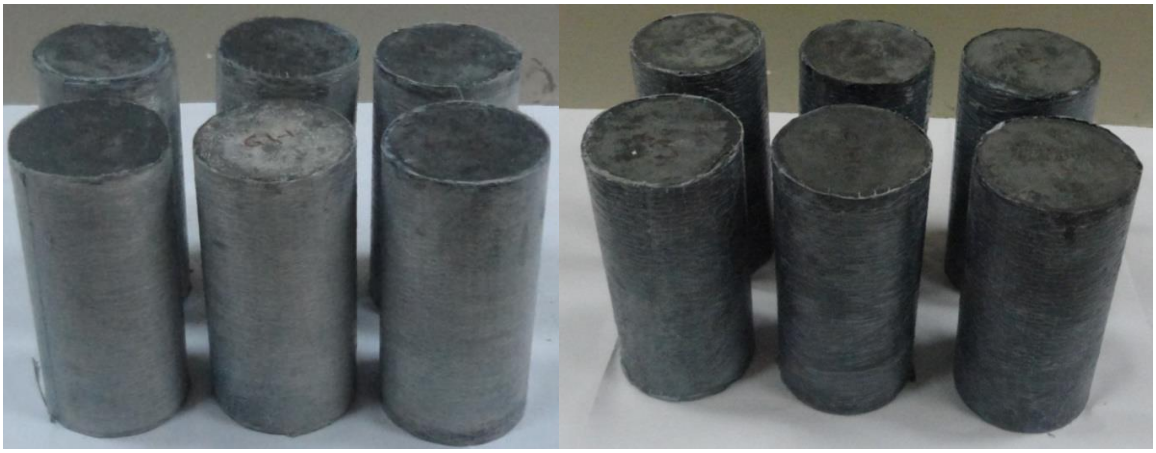
2.2. Numune Yüzeylerinin Sarılması

Beton silindir numuneler kür havuzundan alınarak kurutulduktan sonra yüklemenin üniform olması için numunelere başlık yapılmıştır. Başlık işleminden sonrasında çapaklardan arındırılan

numunelerin sarma yüzeyleri tel fırça ile fırçalanarak yapışmaya engel teşkil edecek bozukluklardan arındırılmıştır.

Beton ve elyaf arasında aderansı iyi olan çift bileşenli Sikadur 330 epoksi reçine sertleştirici 4/1 oranında karıştırılarak rulo ve fırça yardımı ile beton yan yüzeylerini tamamen kaplayacak şekilde bir kat sürülmüştür (Şekil 1). Tek doğrultulu Karbon ve Cam elyaf kumaşlar 600 mm uzunluğunda 300 mm yüksekliğinde kesilerek hazırlanmış ve test sırasında sıyrılma olmaması için ürün şartnamesine uygun olarak 130 mm bindirme boyu olacak şekilde beton yüzeylerine enine sarılmıştır. Sarılan kumaşlar lifler doğrultusunda baskı uygulayarak rulo yardımı ile epoksiye doyurulmuştur. Kumaşların dış etkilerden korunması için üzerine bir kat reçine sürülecek kumaşlar tamamen reçine içerisinde kalması sağlanmıştır(Şekil 2).

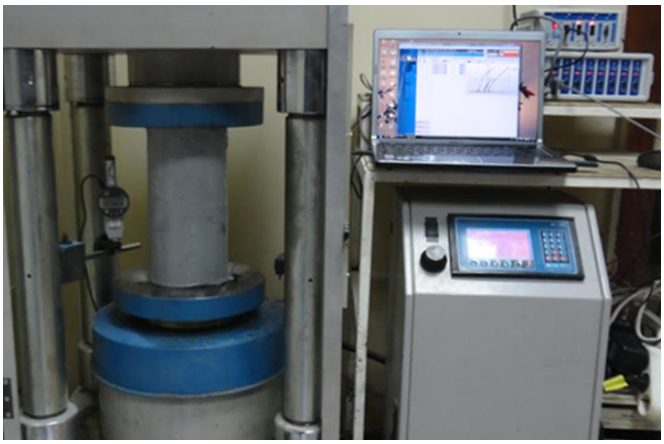
Şekil 1. Beton yüzeylerine epoksi reçine sürülmesi ve FRP'ler ile sarılması



Şekil 2. FRP'ler ile sarılan beton numuneleri

2.3. Deney Düzeneği

Üretilen betonlar Sakarya Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Laboratuvarında basınç deney setinde test edilmiştir. Basınç test cihazının düşey doğrultuda hareket eden düzlemine yerleştirilen uzunluk ölçüm cihazı yardımı ile zamana bağlı olarak yüke karşılık gelen boy değişimleri ve deney cihazından alınan yük değerleri aynı anda data loggerler yardımı ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır (Şekil 3). Bilgisayar ortamında numunelerin gerilme deformasyon grafikleri çizilerek ortalama basınç dayanımları hesaplanmış ve deformasyon yapma kabiliyetleri tespit edilmiştir.

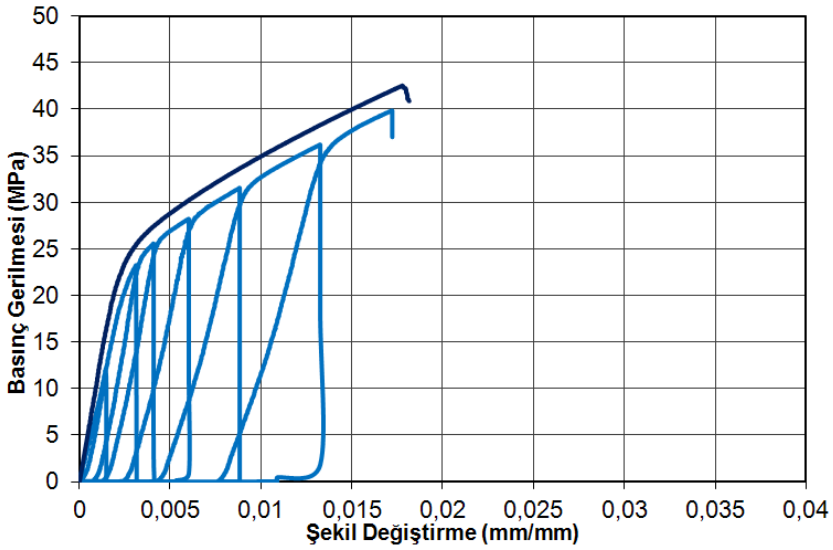


Şekil 3. Basınç deney düzeneği

3. Basınç Deneyi Sonuçları

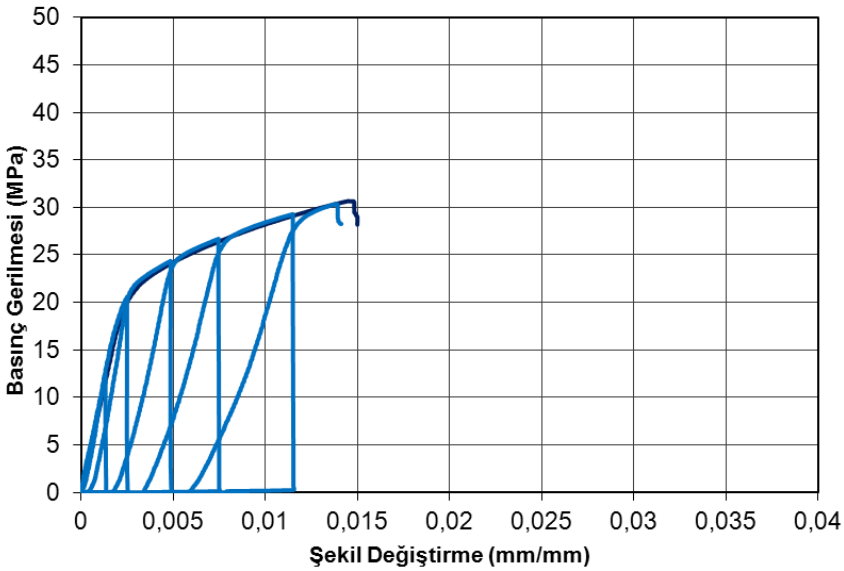
Betonlardan seçilen dört adet kontrol numunesi beton preste eksenel yükleme altında kırılmış ortalama basınç dayanımı 20.82 MPa, maksimum dayanıma karşılık gelen ortalama şekil değiştirme ise 0.0029 olarak tespit edilmiştir (Tablo 2).

Bu betondan altı adet numune bir kat Karbon kumaşla enine sarılmış ve ortalama basınç dayanımı 41.3 MPa, maksimum dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme ise 0.0185 olarak bulunmuştur. Bir kat CFRP ile güçlendirilen betonun dayanımı ortalama % 98 artmıştır. ortalama 20.48 MPa'a tekamül eden artış neticesinde deformasyon yapma kapasitesi % 538 artmıştır (Tablo 2). CFRP Numunelerden İki adedi üzerinde yaklaşık 5 MPa artışlarla yükleme-boşaltma yapılmıştır. Tekrarlı yükleme durumunda grafik değeri bir önceki eğrinin bittiği yerden devam ettiği görülmüştür. Tekdüze yükleme durumundaki basınç dayanım değeri ve şekil değiştirme kapasiteleri yakın çıkmıştır. Tekrarlı yükleme durumunda da kırılma anına kadar beton bütünlüğünü koruduğu tespit edilmiştir. (Şekil 4).



Şekil 4. CFRP1 betonlarından örnek gerilme – şekil değiştirme grafiği

Aynı seri betondan altı adet numune bir kat enine GFRP ile sarılmış ve test edilmiştir. GFRP kompozit betonun ortalama basınç dayanımı 29.54 MPa, maksimum dayanıma karşılık gelen ortalama şekil değiştirme ise 0.0139 olarak bulunmuştur. Kontrol betonuna kıyasla bir kat GFRP sargılı kompozit betonun dayanımında ortalama % 42 artmıştır. Ortalama 8.72 MPa'a tekamül eden artış neticesinde deformasyon yapma kapasitesi % 379 artmıştır (Tablo 2). GFRP numunelerden İki adedi üzerinde yapılan yükleme boşatma deneylerinde gerilme-deformasyon eğrisinin bir önceki eğrinin bittiği yerden devam ettiği görülmüştür. Tekdüze yükleme durumundaki basınç dayanım değeri ve deformasyon yapma kapasitesi yakın çıkmıştır. Tekrarlı yükleme durumunda da kırılma anına kadar beton bütünlüğünü koruduğu tespit edilmiştir (Şekil 5).



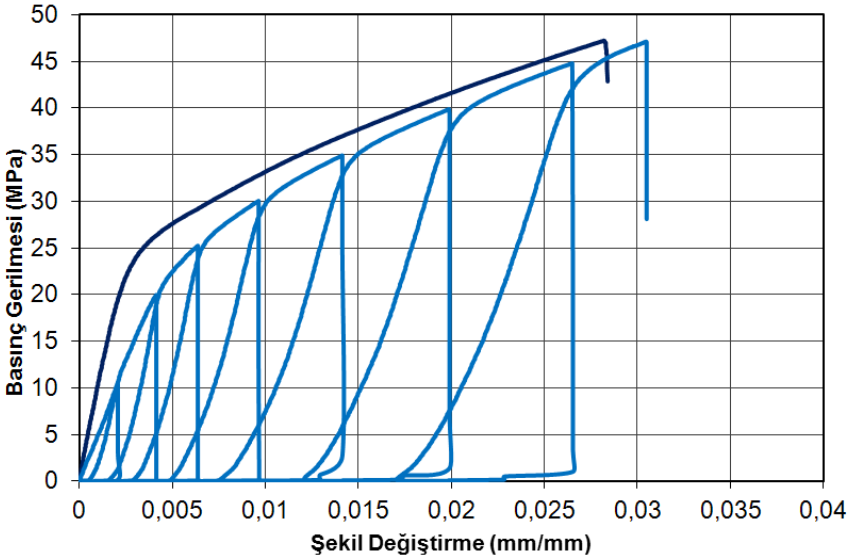
Şekil 5. GFRP1 betonlarından örnek gerilme – şekil değiştirme grafiği

GRFP1 ile CFRP1 şeklinde güçlendirilen betonlar kıyaslandığında, GFRP1 betonunun dayanımı CFRP1 betonuna göre ortalama % 29 daha düşük çıkmıştır. GFRP betonunun deformasyon yapma kapasitesi ortalama % 25 daha düşük çıkmıştır. Bu sonuçlardan hareketle GFRP ile güçlendirilen numunelerde çift kat cam elyaf sarılarak basınç dayanımının yükseltilmesi ve şekil değiştirme kapasitesinin artırılması hedeflenmiştir.

Aynı seri betondan altı adet numune iki kat enine GFRP ile sarılmış ve test edilmiştir. GFRP kompozit betonun ortalama basınç dayanımı 45.21 MPa, maksimum dayanıma karşılık gelen ortalama şekil değiştirme ise 0.0251olarak bulunmuştur (Şekil 6). Kontrol betonuna kıyasla bir kat GFRP sargılı kompozit betonun dayanımında ortalama % 117 artmıştır. Ortalama 24.39 MPa'a karşılık gelen artış neticesinde deformason yapma kapasitesi % 766 artmıştır. (Tablo 2). İki kat GFRP sargılı beton ile bir kat GFRP sargı beton karşılaştırıldığında ortalama basınç dayanımında %53 artış olmuştur. Ortalama 15.67 MPa karşılık gelen bu artış ile deformasyon yapma kapasitesi % 81 artmıştır (Tablo 2).

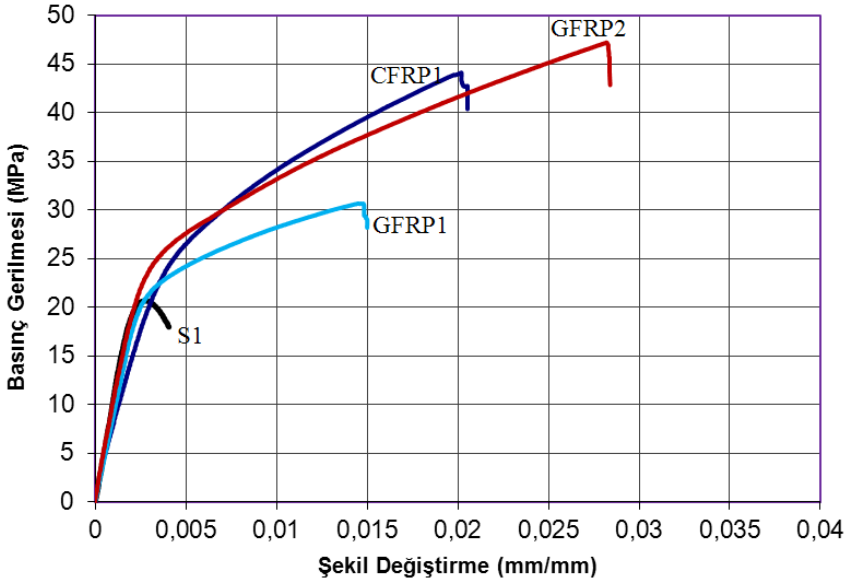
Tablo 2. Betonlarının Gerilme - şekil değiştirme ve kontrol betonuna kıyasla artış oranları

Numune ismi	No	Yükleme durumu	Basınç dayanımı MPa	Artış oranı %	Şekil değiştirme	Artış oranı %
S1	1	Tekdüze	20.73			
	2		20.67			
	3		20.89			
	4		20.98			
Ortalama			**20.82**	**-**	**0.0029**	**-**
CFRP1	1	Tekdüze	44.11		0.0202	
	2		42.52		0.0179	
	3		40.11		0.0183	
	4		41.01		0.0196	
CFRP1	5	Tekrarlı	40.17		0.0179	
	6		39.85		0.0172	
Ortalama			**41.30**	**98**	**0.0185**	**538**
GFRP1	1	Tekdüze	30.66		0.0145	
	2		29.60		0.0149	
	3		28.66		0.0134	
	4		27.90		0.0109	
GFRP1	5	Tekrarlı	30.07		0.0153	
	6		30.37		0.0139	
Ortalama			**29.54**	**42**	**0.0139**	**379**
GFRP2	1	Tekdüze	44.78		0.0243	
	2		44.11		0.0237	
	3		43.30		0.0233	
	4		47.22		0.0222	
GFRP2	5	Tekrarlı	44.71		0.0265	
	6		47.11		0.0305	
Ortalama			**45.21**	**117**	**0.0251**	**766**



Şekil 6. GFRP2 betonlarından örnek gerilme – şekil değiştirme grafiği

İki kat GRFP sarılarak güçlendirilen betonlarla bir kat CFRP sarılarak güçlendirilen kıyaslandığında, GFRP betonunun dayanımı CFRP betonuna göre % 10 daha yüksek çıkmıştır. GFRP betonunun deformasyon yapma kapasitesi ortalama % 36 daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlardan hareketle güçlendirilen betonların basınç dayanımlarının yakın olması ve deformasyon yapma kabiliyetinin daha fazla olması dolayısıyla bir kat CFRP ile güçlendirmek yerine iki kat GFRP ile bu dayanıma yakın betonlar güçlendirilebilir. Bu sonuçlar dikkate alındığında alkali dayanıklı olan Cam elyafın daha ekonomik olması ve kolaca temin edilebilmesi dolayısıyla karbon elyaf yerine tercih edilebilir.



Şekil 7. Güçlendirilen betonlarından örnek gerilme - şekil değiştirme grafikleri

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, ortalama 20 Mpa basınç dayanımlarına sahip standart boyuta silindir beton numuneler tek doğrultulu Karbon ve Cam elyaf ile sarılarak tekdüze ve tekrarlı yüklemeler altında betonun basınç dayanımına ve sünekliğine etkilerini araştırılmıştır. Aynı şartlar altında üretilen betonlar tek doğrultulu CFRP ve GFRP ile bir veya iki kat enine sarılarak güçlendirilmiştir. Tekdüze ve tekrarlı yükler altında test edilen betonlarının basınç dayanımlarında ve süneklik kapasitelerinde önemli artışlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre;

1. CFRP ve GFRP ile güçlendirilen betonlar yükleme durumunda göçme yüküne erişinceye kadar bütünlüğünü korumuştur. Karbon ve cam liflerin beton yüzeylerinden sıyrılmamış, betonlar lifler kopmaya başladıktan sonra kırılmıştır.

2. Üretilen numunelerin basınç dayanımı ve şekil değiştirme kapasiteleri referans numuneye kıyasla; CFRP1 betonların mukavemetindeki artış % 98 şekil değiştirme kapasitesindeki artış % 536 olarak, GFRP1 betonların mukavemetindeki artış % 42, şekil değiştirme kapasitesindeki artış %379 olarak, GFRP2 betonların mukavemetindeki artış % 117, şekil değiştirme kapasitesindeki artış %766 olarak bulunmuştur.

3. GFRP2 betonunun dayanımı CFRP1 betonuna göre % 19 daha yüksek çıkmıştır. GFRP betonunun deformasyon yapma kapasitesi ortalama % 42 daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlardan hareketle GFRP2 şeklinde güçlendirilen betonların basınç dayanımlarının yüksek olması ve deformasyon yapma kabiliyetinin daha fazla olması dolayısıyla bir kat CFRP ile güçlendirmek yerine iki kat GFRP ile bu dayanıma yakın betonlar güçlendirilebilir. Bu sonuçlar dikkate alındığında Cam elyafın daha ucuz olması ve kolaca temin edilebilmesi dolayısıyla karbon elyaf yerine tercih edilebilir.

4. Yaygın olarak kullanılan mantolama yöntemi ile karşılaştırıldığında; basın dayanımı açısından beton eleman boyutunda ve yapı ağırlığında önemli bir değişiklik olmaksızın yüksek oranda güçlendirme sağlanabilmektedir. Ayrıca FRP kompozitlerle güçlendirme yapılırken yapıyı terk etmeye gerek kalmayacaktır.

5. CFRP ve GFRP ile güçlendirilen betonlar üzerinde yapılan yükleme boşatma deneylerinde gerilme-şekil değiştirme eğrisinin bir önceki eğrinin bittiği yerden devam ettiği görülmüştür. Tekdüze yükleme durumundaki basınç dayanım değeri ve deformasyon yapma kapasitelerinin benzer olduğu tespit edilmiştir. Her iki durumunda da kırılma anına kadar betonların bütünlüğünü koruduğu tespit edilmiştir.

6. Deprem yönetmeliği öncesinde inşa edilen ve Etriye sıkılaştırmasına gerekli özen gösterilmeyen betonarme yapı elemanlarının basınç yüklerine karşı GFRP ile güvenli bir şekilde güçlendirilebileceği tespit edilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, "Betonarme Kirişlerin Güçlendirilmesinde Cam Elyaf ile Karbon Elyaf Malzemelerin Karşılaştırılması" başlıklı ve 2010-01-04-012 nolu Sakarya Üniversitesi BAPK projesi ile desteklenmiştir. Verdiği destek için teşekkürlerimizi sunarız.

Referanslar

[1] Aschheim M, Gulkan P, Sezen H. Performance of Buildings, in Kocaeli, Turkey earthquake of August 17, 1999, Reconnaissance Report, Earthquake Spectra, Volume 16, Chapter 11, 2000, pp. 237–279.

[2] Sezen H, Whittake AS, Elwood KJ and Mosalam K M, Performance of reinforced concrete buildings during the August 17, 1999 Kocaeli, Turkey earthquake, and seismic design and construction practise in Turkey, Engineering Structures, Volume 25, Issue 1, 2003, pp. 103-114.

[3] Sarıbıyık M, Sumer M, Fırat S and Aydın F. Investigation of Concrete Quality of Collapsed–Heavily Damaged Structures During the Marmara Earthquake, 8th International Conference on Inspection, Appraisal, Repairs, and Maintenance of Structures, 2003,18-20 December, Singapore.

[4] Karbhari VM, Gao Y. Composite jacketed concrete under uniaxial compression-verification of simple design equations. J Mater Civil Eng ASCE 1997;9(4):185–93.

[5] Ilki A, Kumbasar N. Compressive behavior of carbon fiber composite jacketed concrete with circular and non-circular cross sections. J Earthquake Eng 2003;7(3):381–406.

[6] Lam L, Teng JG. Ultimate condition of fiber reinforced polymer-confined concrete. J Compos Constr 2004;8(6):539-48.

[7] Lam L, Teng JG, Cheung CH, Xiao Y. FRP-confined concrete under axial cyclic compression. Cement & Concrete Composites 28 2006 949–58.

[8] Youssef MN, Feng MQ, Mosallam AS. Stress–strain model for concrete confined by FRP composites. J Compos: Part B 2007;38:614–28.

[9] Al-Salloum YA, Elsanadedy HM, Abadel AA. Behavior of FRP-confined concrete after high temperature exposure. Constr Build Mater 2011;25(2):838–50.

[10] Luke B, Michael R. Axial–flexural interaction in circular FRP-confined reinforced concrete columns. Const Build Mater 24 2010 1672–168.

[11] Xiong GJ, Wu XY, Li FF, Yan Z. Load carrying capacity and ductility of circular concrete columns confined by ferrocement including steel bars. Const Build Mater 25 20112263–2268.

[12] Hussein ME, Yousef AS, Saleh HA, Rizwan AI. Experimental and numerical investigation of size effects in FRP-wrapped concrete columns. Const Build Mater 29 2012 56–72.