



Epoksi Emdirilmiş Karbon Lifi Sargılı Çelik Donatıların Aderans Dayanımı

Bond Strength of Epoxy Impregnated Carbon Fiber Wrapped Steel Reinforcement

Erkan Türkmen Dönmez¹, Boğaçhan Başaran²

¹Amasya Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Tasarım Bölümü, 05100, Amasya, TÜRKİYE

²Amasya Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, İnşaat Bölümü, 05100, Amasya, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 15/03/2021

Kabul / Accepted: 29/04/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 02/06/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz

Çelik donatıların korozyon sorunu ile FRP donatıların düşük elastisite modülü ve gevrek gerilme-şekil değiştirme davranışlarına karşı geliştirilen çelik-FRP kompozit donatıların beton yapı elemanlarında kullanılmalarının araştırılması çok sınırlı kalmıştır. Özellikle de yapı elemanlarının sünekliğini, enerji sönümleme ve taşıma kapasitesini önemli oranda etkileyen donatı-beton aderansı konusunda daha fazla araştırma yapılması gereklidir. Çünkü çelik-FRP kompozit donatılar, sertliği ve sünekliği birbirlerinden çok farklı iki malzemeden üretildiği için malzemenin kendi içindeki uyumu bu donatıların aderans davranışlarını etkilemektedir. Bu kapsamda, bu çalışmada, epoksi emdirilmiş karbon lifinin çelik donatı üzerine filaman sarım tekniğiyle 30 derece sarılmasıyla üretilen ve yüzeyine herhangi bir deformasyon işlemi uygulanmış kompozit donatıların beton ile aralarındaki aderans dayanımları çekip çıkarma deneyleriyle araştırılmıştır. Elde edilen bulgular literatürdeki salt çelik donatıların, salt karbon FRP donatıların ve çelik-bazalt, çelik-karbon, çelik-cam FRP donatıların aderans dayanımları ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda karbon FRP sargılı çelik kompozit donatıların yüzeyinde herhangi bir deformasyon işlemi olmamasına rağmen ortalama bir aderans dayanımına ve düz, kumlanmış, demet ve örgülü yüzey özelliğine sahip donatılardan da daha iyi bir aderans dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Karbon lifi, karbon lifi takviyeli çelik donatı, hibrit donatı, kompozit, çekip çıkarma deneyi, FRP donatı, CTP, Aderans dayanımı”

Abstract

The use of steel-FRP composite reinforcement developed against the corrosion problem of steel reinforcements and the low elastic modulus and brittle stress-strain behavior of FRP reinforcement in concrete structural members has been investigated rather limitedly in the literature. More research is needed especially on the bond behavior of reinforcement in concrete which significantly affects the ductility, energy absorption capacity and load-bearing capacity values of structural members. Because steel-FRP composite reinforcing bars are produced from two materials whose hardness and ductility values are very different from each other, the compatibility of the material within itself affects the bonding behavior of this reinforcement. In this context, the bond strengths of composite reinforcing bars produced by wrapping epoxy-impregnated carbon fibers on steel reinforcement with filament winding technique at 30 degrees and without any deformation process on the surface were investigated through pullout tests. The test results of these bars were compared with the bond strengths of steel, CFRP and steel-basalt, steel-carbon, steel-glass FRP reinforcing bars in the literature. The study showed that the carbon FRP wrapped steel composite bars have better bond strength values than the reinforcing bars with smooth, sand-coated, strand and braided surface textures, although there is no deformation on the surface of these new bars.

Key Words

“Carbon fibre, Carbon fibre reinforced steel bar, hybrid rebar, composite, pull-out test, FRP reinforcement bar, GFRP, bond strength”

1. Giriş

Günümüzde inşaat, otomotiv, havacılık, savunma vb. birçok sektörde kompozit malzemelerin kullanımları mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin istenilen şekilde ayarlanabilmesinden dolayı gittikçe yaygınlaşmakta ve geleneksel tek bileşenden oluşan malzemelerin yerlerini almaktadırlar. Bu malzemelerden biriside lif takviyeli polimerlerdir (FRP). FRP malzemeler, lif (cam, karbon, bazalt, aramid) ve reçine (epoksi, polyester, vinil ester) olmak üzere iki bileşenden meydana gelmektedir. Dolayısıyla içerisinde kullanılan lif ve reçine özelliklerine göre mekanik özellikleri ve dayanıklılıkları tasarım şartlarına göre düzenlenebilmektedir. FRP malzemeler betonarme yapı elemanlarında genellikle donatı, plaka, ve kumaş formunda kullanılmaktadır. Bu formlardan FRP kumaş ve plakalar genellikle yapı elemanlarının onarım ve güçlendirilmesinde yapı elemanlarının kesme ve eğilme dayanımlarını artırmak için kullanılırlar (Gemi vd., 2019; Aksoylu vd., 2020). FRP donatılar ise betonarme elemanlarda genellikle çekme donatısı olarak betonun çekme dayanımını güçlendirmek amacıyla kullanılmaktadırlar (Kartal, 2020). FRP donatılar çelik donatılara göre, korozyona karşı dayanıklı olmaları, hafif olmaları, çekme dayanımlarının yüksek olması vb. nedenlerden dolayı tercih edilmektedirler. Ancak düşük elastisite modülü ile kesme dayanımları yanında gevrek davranışlarından dolayı bazı dezavantajlara sahiptirler. Buna karşın, her ne kadar çelik donatılar FRP donatılara kıyasla düşük korozyon dayanımı gösterse de süneklik, yüksek çekme ve basınç elastisite modülü ve dayanımı gibi özellikler sergilemesinden dolayı önemli avantajlara sahiptir. (ACI 440.1R-15, 2015; ACI 440R-07, 2007; Design Manual No. 3, 2007).

Son zamanlarda araştırmacılar, bu iki malzemenin birbirlerine göre mevcut olan dezavantajlarını avantaja dönüştürebilmek için çeşitli oranlarda ve çaplarda kullanıp farklı üretim tekniklerini deneyerek yeni çelik-FRP kompozit donatılar geliştirmişlerdir. Bu geliştirilen kompozit donatılarda kullanılan FRP kaplama ile çeliğin korozyon dayanımının artırılması, çekirdekte kullanılan çelik ile de FRP donatıların gevrek davranışlarının ve elastisite modüllerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır (Basaran & Donmez, 2020; Cheung & Tsang, 2010; Ju vd., 2017; Seo vd., 2016; Wang vd., 2020). Ancak geliştirilen kompozit donatıların beton yapı elemanları içinde kullanılmasına yönelik yapılan araştırmaların sayısı çok sınırlı kalmıştır. Özellikle de yapı elemanlarının sünekliğini, enerji sönümleme ve taşıma kapasitesini önemli oranda etkileyen donatı-beton aderansı (tutunma) konusunda çok daha fazla araştırma yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır (Lin & Zhang, 2013; Soric vd., 2010). Çünkü bu donatıların dış katmanı çelik donatı üzerine FRP'nin sarılması/örülmesi/çekilmesi ile üretilmektedir. Dolayısıyla salt FRP donatılar ile beton arasındaki aderansın paspayı, beton basınç dayanımı, donatı çapı, lif türü, yüzey deformasyon şekli vb. birçok faktöre bağlı olduğu düşünüldüğünde (Basaran & Kalkan, 2020; Yan vd., 2016), çelik-FRP donatıların üzerinde FRP'nin bulunmasından ötürü bu donatıların aderans davranışlarının da benzer birçok faktöre bağlı olacağı söylenebilir. Ancak bu donatılar, sertliği ve sünekliği birbirinden çok farklı iki malzemenin üretilmesi için bu kompozit donatının beton içindeki aderans davranışı ayrıca incelenmesi gereklidir.

Beton ile çelik-FRP donatı arasındaki aderans davranışı çok az sayıda araştırmacı tarafından çekip çıkarma deneyleri yapılarak incelenmiştir. Ju vd. 2017 yaptıkları çalışmada kumlanmış ve nervürlü yüzeye sahip çelik-cam FRP donatıların aderans dayanımının çelik donatı dayanımının yaklaşık %90,5'i (yaklaşık 20MPa) olduğunu belirtmişlerdir. Wang vd. (2020) ve Wu vd. (2012) spiral sargılı ve kumlanmış yüzeye sahip çelik-karbon FRP donatıların aderans dayanımlarının sırasıyla yaklaşık ortalama 7-11 MPa ve 15,02 MPa olduğunu, Wu vd. (2012) ve Ma vd. (2019) ise spiral sargılı ve kumlanmış yüzeye sahip çelik-bazalt FRP donatıların aderans dayanımlarının sırasıyla ortalama 15,38 ve 15,57 MPa olduğunu belirtmişlerdir. Ancak araştırmacıların inceledikleri donatılar genellikle çelik donatı üzerine FRP'nin çekilmesinden (pultrüzyon) sonra yüzey deformasyon uygulaması (sargı, kumlama vb.) yapılarak üretilmiştir. Pultrüzyon yöntemi termoset reçine banyosundan geçirilen filament liflerin sürekli çekilmesi yöntemine dayanmaktadır (Madenci vd., 2020a). Bu yöntem ekonomik, hızlı ve kolay olmasından dolayı FRP üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır (Madenci vd., 2020b). Ancak bu yöntem ile üretilen FRP donatıların süneklikleri sınırlı olmaktadır. Bu çalışmada ise epoksi emdirilmiş karbon lifinin çelik donatı üzerine 30 derece sarılmasıyla (filaman sarım) üretilen ve yüzeyine herhangi bir deformasyon işlemi uygulanmamış kompozit donatıların beton ile aralarındaki aderans dayanımları 9 adet çekip çıkarma deneyi ile araştırılmıştır. Araştırma sonucunda elde edilen bulgular literatürdeki çelik donatı, karbon FRP donatı ve çelik-FRP (bazalt, karbon, cam FRP) donatıların beton ile aralarındaki aderans dayanımları ile karşılaştırılmıştır.

2. Deneysel Çalışma

2.1. Malzemelerin Özellikleri

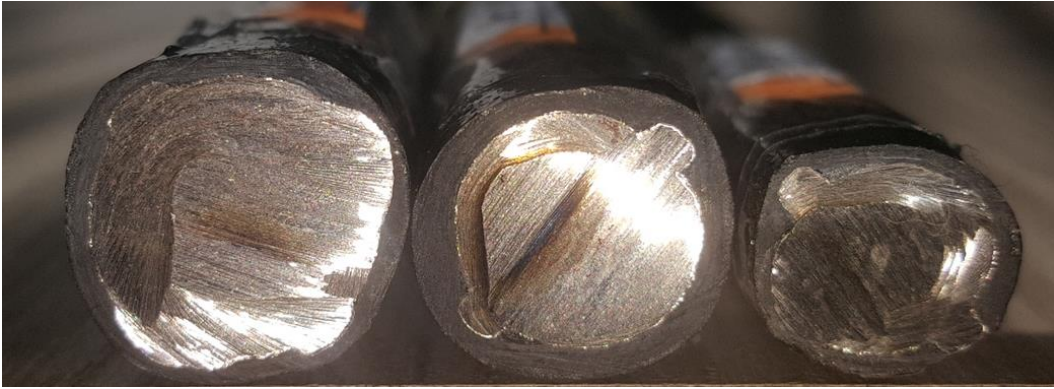
Donatılar

Çalışmada kullanılan kompozit donatıların üretilmesi için genellikle kompozit boru üretiminde sıklıkla kullanılan filament sarım (filament winding) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, reçine emdirilmiş fitillerin sabit bir hızda dönen mandrele açılı olarak sarılması yöntemine dayanmaktadır. Bu çalışmada ise epoksi emdirilmiş 0,3 mm çapındaki karbon fitiller, mandrel yerine nervürlü çelik donatı üzerine açılı bir şekilde iki katman sarılarak donatılar üretilmiştir. FRP'lerin gevrek gerilme-birim deformasyon davranışının engellenebilmesi ve donatının çekme sünekliğinin artırılabilmesi için filament lifler çelik donatıya 30 derecelik açıyla sarılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Donatıların üretimi

Sarımı tamamlanan donatılar kürlleme fırınında 2 saat 80°C'de ve ardından 2 saat 120°C'de iki kademeli kürlleme işlemine tabi tutulmuştur. Çalışmada kullanılan karbon fitillerini oluşturan karbon lifler ile epoksi reçinenin fiziksel ve mekanik özellikleri üretici firmaların katalog verilerinden temin edilmiş olup sırasıyla Tablo 1 ve 2'de sunulmuştur. Üretimi tamamlanan donatılar ise Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Karbon FRP sargılı çelik donatılar

Tablo 1. Epoksi reçinenin fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellik	Değer
Çekme dayanımı (MPa)	61
Kopma uzaması (%)	2,00
Elastisite modülü (GPa)	3,64
Yoğunluk (g/cm ³)	1,18
Shore D sertliği	76
Camsı geçiş sıcaklığı (°C)	123

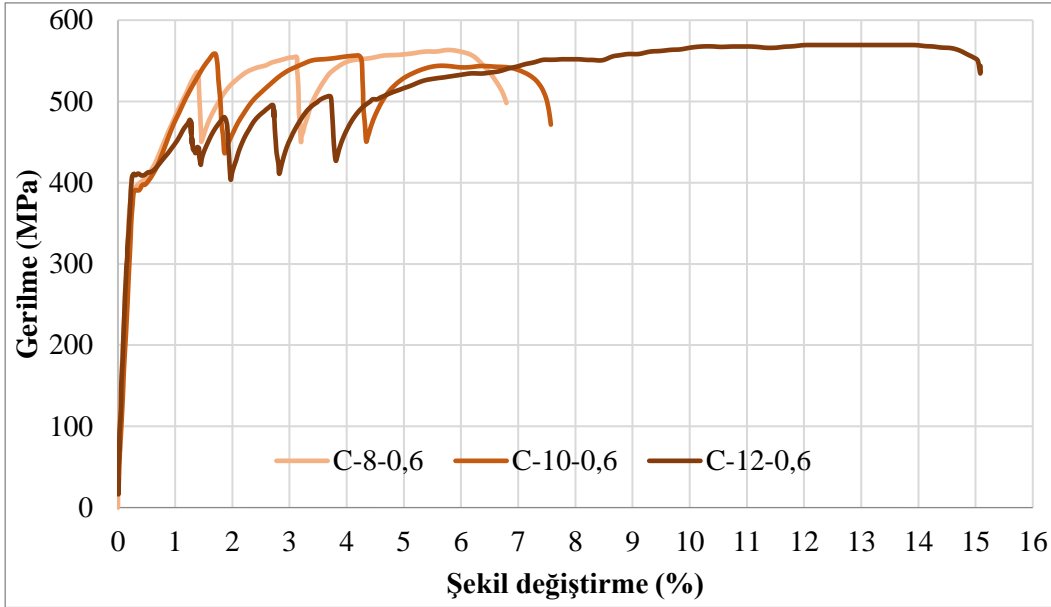
Tablo 2. Karbon lifinin fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellik	Değer
Çekme dayanımı (MPa)	3500
Kopma uzaması (%)	1,50
Elastisite modülü (GPa)	230
Elyaf çapı (µm)	7±2
Yoğunluk (g/cm ³)	1,85

Çalışma için üretilen donatıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla karbon FRP sargılı çelik donatılar çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme deneyleri, deney çekme hızı dakikada 2,5 mm olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan donatıların fiziksel özellikleri ile çekme testleri sonuçları Tablo 3'de sunulmuştur. Çekme testleri sonucunda karbon FRP sargılı çelik donatılar, karbon FRP'nin katkısı nedeniyle oluşan çeliğin akma sahanlığındaki azalmadan dolayı yalancı-sünek (pseudeu-ductile) davranış göstermişlerdir (Şekil 3). Donatının yalancı sünek davranış göstermesiyle donatı FRP'nin bölgesel kopma yük düşüşüne kadar bir bütün davranış göstermiş ve nihai kopmadan önce ani bir gevrek kopma yerine FRP'nin bölgesel kopmalarıyla net uyarı gösteren aşamalı hasar görmüştür. Donatıların yalancı-sünek davranış göstermelerinden dolayı akma dayanımları bulunurken yalancı sünek malzemelerde kullanılan %0,1 öteleme (ofset) yönteminden yararlanılmıştır (Wisnom, 2016).

Tablo 3. Üretilen donatıların fiziksel ve mekanik özellikleri

Deney Numunesi	Lif türü	Nervürlü donatı dış çapı (mm)	Lif sarma kalınlığı (mm)	Kompozit donatı dış çapı, Φ (mm)	Akma Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
C-8-0.6	Karbon	8,17	0,60	9,37	398,96	111,75
C-10-0.6	Karbon	10,16	0,60	11,36	391,28	104,06
C-12-0.6	Karbon	12,28	0,60	13,48	410,84	117,60

**Şekil 3.** Karbon FRP sargılı çelik donatıların gerilme-şekil değiştirme davranışları

Beton

Çekip çıkarma deney numunelerinde kullanılan tüm betonların karışım hesapları TS 802 (2016) standardına göre, maksimum agrega çapı 16mm olan kırmataş kullanılarak, C25/30 sınıfı beton için karışım tasarımı yapılmıştır. Buna ilaveten beton karışımında CEM I 42.5N tipi çimento, S/Ç oranı 0,60 olarak seçilmiştir. Çalışma kapsamında, üretilen beton numuneleri ve numunelerin karışım hesaplarında kullanılan malzeme miktarları ve oranları Tablo 4'de sunulmuştur.

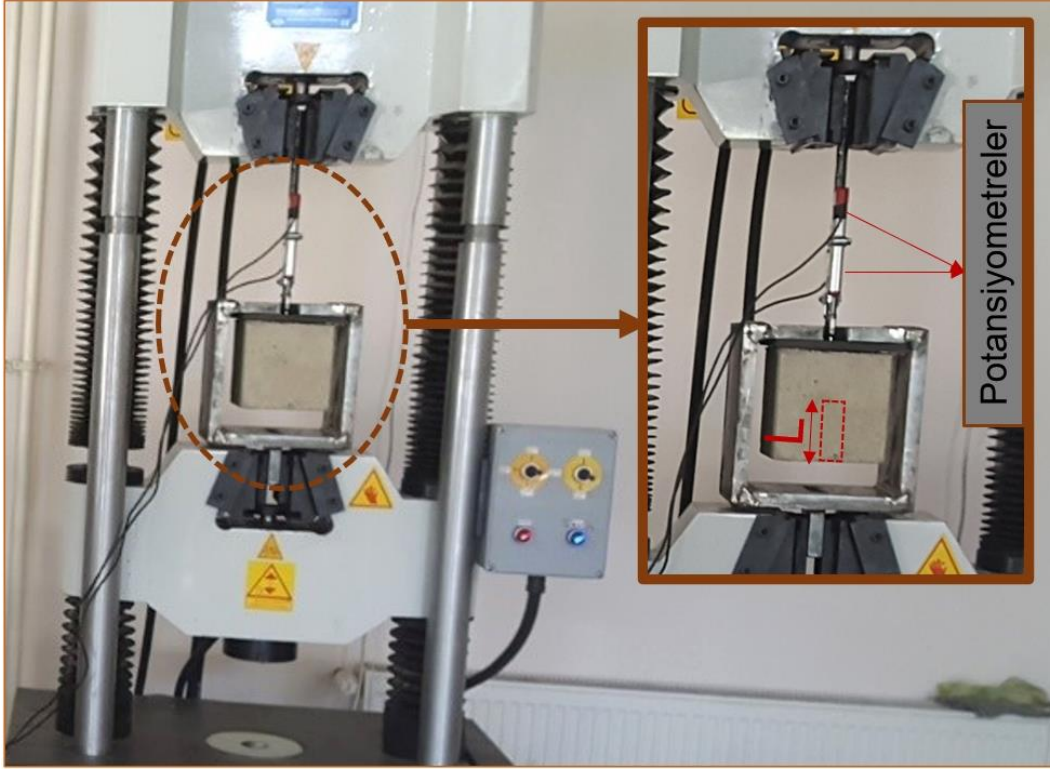
Tablo 4. 1 m³ hacmindeki betonun karışım oranları (kg/m³)

İri agrega (5-15 mm)	İnce agrega (0-5 mm)	Su (kg)	Çimento (kg)	Birim hacim kütle (kg/m ³)
550	1300	180	300	2330

Deneylerde kullanılan 150x150x150 mm³'lük betonlar EN 12390-2 (2009) standardına göre en az 28 gün kürlenmişlerdir. Kürünü tamamlayan numunelerin beton basınç dayanım testleri TS EN 12390-3 (2009) standardına göre yapılarak ortalama küp beton basınç dayanımları yaklaşık 31 MPa olarak belirlenmiştir.

2.2. Yöntem

Çalışmada çekip çıkarma deney numunelerinin hazırlanabilmesi ve daha önce yapılan çalışmalar ile karşılaştırmaların daha doğru yapılabilmesi için 150x150x150 mm³'lük boyutlara sahip kalıplar kullanılmıştır. Donatılar bu kalıplara beton temas boyu 5 Φ (L) olacak şekilde merkezlendikten sonra, hazırlanan beton karışımları kalıplara dökülmüştür. Çalışmada çekip çıkarma deney numuneleri hazırlanırken her deney değişkeni için üç adet olmak üzere toplamda 9 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan deney numuneleri 28 gün laboratuvar şartlarında bekletildikten sonra deneylere başlanmıştır. Deneylerde 600 kN kapasiteli çekme cihazı yeniden düzenlendikten sonra kullanılmıştır. Çekme cihazının alt çenesinin numuneyi tutabilmesi için cihazın alt çenesinin tutabileceği bir şekilde çelik kafes yapılmıştır. Çelik kafes deneyler sırasında herhangi bir deformasyona uğramayacak şekilde tasarlanmıştır. Deneyler donatı çekme hızı dakikada 2 mm olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında karbon FRP sargılı çelik donatıların betondan sıyrılma uzunluğu ise numunelerin yüklemeye ucuna takılan iki adet 0,01 mm hassasiyete ve sırasıyla 50 ve 100 mm ölçüm uzunluğuna sahip potansiyometreler ile ölçülmüştür. Deneyler sırasında potansiyometre ve çekme cihazının yük hüccesinde oluşan gerilim değişimleri yüksek çözünürlüklü bir veri toplama sistemi (16 bit) ile toplanarak sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Deney düzeneğinin bir görüntüsü Şekil 4'de sunulmuştur.



Şekil 4. Deney düzeneği

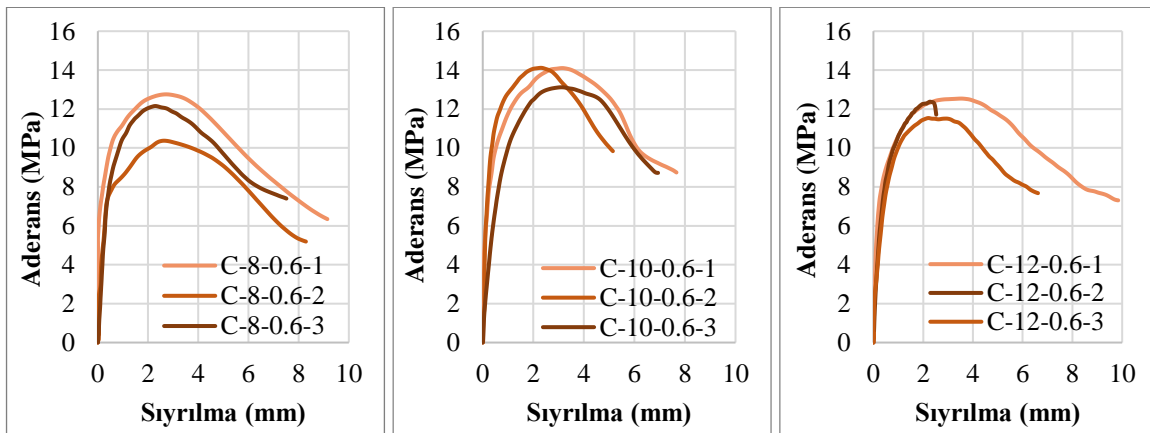
Deneyler sonucunda aderans gerilmesinin belirlenebilmesi için donatıya gelen çekme kuvveti değerleri donatının beton ile temas yüzey alanına bölünerek Denklem (1) ile hesaplanmıştır. Denklem (1)'de aderans gerilmelerinin aderans boyu uzunluğunca homojen yayıldığı varsayılmıştır.

$$u = \frac{F_{\zeta}}{\pi\Phi L} \quad (1)$$

Burada, F_{ζ} = donatıya gelen çekme kuvveti (N); Φ = donatı dış çapı (mm); L =aderans boyu (mm); u = donatı ile beton arasında oluşan aderans gerilmesidir (MPa).

3. Deney Sonuçları

Bu çalışmada karbon FRP sargılı çelik donatılar kullanılarak hazırlanan çekip çıkarma deney numuneleri ile donatı-beton aderansının incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca beton-donatı aderansına donatı çapının ve kompozit donatı içindeki FRP'nin tüm donatıya oranının etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda 9 adet çekip çıkarma deneyi yapılmıştır. Deneylerden elde edilen aderans gerilmesi-sıyırılma eğrileri Şekil 5'de sunulmuştur.



Şekil 5. Donatıların aderans gerilmesi-sıyırılma davranışları

Çekip çıkarma deneyleri sonucunda elde edilen maksimum aderans kuvveti, maksimum aderans dayanım değerleri ve numune göçme şekilleri ise Tablo 5’de sunulmuştur.

Tablo 5. Deney sonuçları

Deney Numunesi	Φ (mm)	A_{FRP}/A	L (mm)	$F_{maks.}$ (N)	$U_{maks.}$ (MPa)	$U_{ort.}$ (MPa)	Göçme Tipi
C-8-0.6-1	9,37	0,24	46,9	17590	12,75	11,76	Sıyırılma
C-8-0.6-2	“	“	“	14303	10,37		Sıyırılma
C-8-0.6-3	“	“	“	16761	12,15		Sıyırılma
C-10-0.6-1	11,36	0,20	56,8	28589	14,10	13,78	Sıyırılma
C-10-0.6-2	“	“	“	28616	14,12		Sıyırılma
C-10-0.6-3	“	“	“	26590	13,12		Sıyırılma
C-12-0.6-1	13,48	0,17	67,4	35786	12,54	12,15	Sıyırılma
C-12-0.6-2	“	“	“	35324	12,38		Yarılma
C-12-0.6-3	“	“	“	32922	11,53		Sıyırılma
Ortalama						12,56	

Deneyler sırasında maksimum aderans gerilmesini ölçebilmek adına donatı ile beton arasındaki temas boyunun kısa bırakılmasından dolayı bir numune haricinde diğer tüm deney numunelerinde sıyırılma göçmesi meydana gelmiştir (Şekil 6.a). Ancak C-12-0.6-1 numaralı numunenin taşıyabildiği çekme kuvvetinin C-12-0.6-2 deney numaralı numuneden daha fazla olmasına rağmen, C-12-0.6-2 deney numaralı numunede yarılma göçmesi oluşmuştur (Şekil 6.b). Bu durumun iki numune arasındaki kuvvet farkının çok az olmasından dolayı, betonun homojenliğinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Hem sıyırılma göçmesiyle hem de betonun yarılma göçmesiyle sonuçlanmış tüm numunelerde karbon FRP sargılı çelik donatıların yüzeyinde gözle görülür herhangi bir deformasyona rastlanmamıştır (Şekil 6.a). Ayrıca donatılar içinde karbon FRP sargı ile çelik donatı arasında herhangi bir deformasyon gözlemlenmemiştir. Bu nedenle çelik donatı ile karbon FRP arasında (sıyırılma olan numunelerde) tam aderans olduğu söylenebilir. Buna ilaveten çekip çıkarma deneyleri esnasında donatılar betondan akma dayanımlarına ulaşmadan sıyırıldıkları için donatı poisson etkilerinin, donatının betondan sıyırılma davranışına etkileri sınırlı kalmıştır.









Şekil 6. (a) Sıyırılma göçmesiyle sonuçlanan deney numunesi; (b) Yarılma göçmesiyle sonuçlanan deney numunesi

3.1. Karbon FRP Sargılı Çelik Kompozit Donatılar İle Salt Karbon FRP Ve Salt Çelik Donatıların Aderans Dayanımlarının Karşılaştırılması

Yüzeyi herhangi bir deformasyon işlemine maruz bırakılmamış karbon FRP sargılı çelik donatıların aderans dayanım değerlerini, çeşitli yüzey özelliğine sahip salt karbon FRP (CFRP) donatılar ile karşılaştırabilmek için Tablo 6 kullanılmıştır. Tablo 6 literatürdeki çeşitli çalışmalarda çekip çıkarma deneylerinden derlenmiştir. Buna ilaveten Tablo 6’da donatıların ortalama aderans dayanımları verilmiştir.

Tablo 6’da da görüleceği üzere karbon FRP sargılı çelik donatıların aderans dayanımları, yüzeyine herhangi bir deformasyon işlemi uygulanmamasına rağmen düz CFRP donatıların aderans dayanımlarından yaklaşık %740 ile %867, kumlanmış, demet ve örgütlü yüzeyli salt CFRP donatıların aderans dayanımlarından da yaklaşık %16 ile %310 daha yüksek bir aderans dayanımına sahiptir. Karbon FRP sargılı çelik donatıların aderans dayanımları, yüzey deformasyon işlemi nervürlü, oluklu ve sargılı olan donatılar ile kıyaslandığında ise aderans dayanımı bu donatıların %45’i ile %96’sı arasında değiştiği görülmektedir. Benzer şekilde karbon FRP sargılı çelik donatıların aderans dayanımları salt çelik donatıların aderans dayanımlarının %47’si ile %137’si arasında değişmektedir. Tüm bu karşılaştırmalara bakılarak karbon FRP sargılı çelik donatıların ortalama bir aderans dayanımına sahip olduğu sonucu çıkarılabilir. Bu nedenle bu donatılar, herhangi bir ek yüzey deformasyonu uygulamasına gerek kalmadan beton temas boylarının bir miktar artırılması halinde bile çok iyi bir aderans performansı sergileyebilecekleri düşünülmektedir.

Tablo 6. Salt karbon FRP ve salt çelik donatıların aderans dayanımları

Araştırmacı	Yüzey deformasyon türü ve donatı türü	Donatı yüzey deformasyon şekli	Φ (mm)	L (mm)	Beton basınç dayanımı (MPa)	Göçme Tipi*	$u_{ort.}$ (MPa)
Hamad vd. (2017)	Kumlanmış CFRP		10	100,00	40	C	8,33
“	Nervürlü çelik	-	10	“	“	S	11,31
Park vd. (2016)	Örgülü CFRP		12,7	51,00	30	P	10,10
“	CFRP demeti		12,5	“	“	P	4,45
“	Nervürlü çelik	-	12,7	“	“	“	17,75
Wilson vd. (2003)	Oluklu CFRP		8	88,00	65	S	18,71
“	“	“	10	“	“	S	16,36
“	“	“	12	“	“	S	14,36
“	Düz CFRP	“	-	“	“	-	1,59
“	Nervürlü çelik	-	12,7	“	“	S	23,84
Wei vd. (2019)	Sargılı CFRP		9,3	~47,00	33	P	26,00
Okelo & Yuan (2005)	Nervürlü CFRP		10	42,70	43	P	22,80
“	Nervürlü çelik	“	14	42,80	40	P	24,40
Basaran & Donmez (2020)	Nervürlü çelik	-	8,17	40,85	31	P	25,10
“	“	-	10,16	50,80	“	P	22,51
“	“	-	12,28	61,40	“	P+S	20,74






*C= Konik kopma; P= Sıyrıma; S= Yarıma, P+S= Aynı seri deneyler içinde iki türlü göçme

3.2. Karbon FRP Sargılı Çelik Kompozit Donatılar İle Çelik-FRP Kompozit Donatıların Aderans Gerilmelerinin Karşılaştırılması

Karbon FRP sargılı çelik donatıların aderans dayanım değerlerini, çelik-cam FRP kompozit ve çelik-bazalt FRP kompozit donatılar ile karşılaştırabilmek için Tablo 7 kullanılmıştır. Tablo 7’de literatürdeki çeşitli çalışmalarda çekip çıkarma deneylerinden derlenmiştir. Tablo 7 hazırlanırken donatıların ortalama fiziksel özelliklerinden ve aderans dayanım değerlerinden yararlanılmıştır.

Yüzeyinde herhangi bir deformasyon işlemi olmamasına rağmen karbon FRP sargılı çelik donatıların maksimum aderans dayanımları, sargılı yüzey özelliğine sahip çelik-bazalt FRP kompozit donatıların yaklaşık %76’sı ile %118’si arasında, sargılı yüzey özelliğine sahip çelik-karbon FRP kompozit donatıların ise %78’i ile %92’si arasında değişmektedir. Ancak sargılı yüzey özelliğine sahip çelik-bazalt FRP kompozit donatılara kumlama yapılmasıyla bu donatıların aderans dayanımları %34’e kadar artırılabilir. Karbon FRP sargılı çelik donatıların maksimum aderans dayanımları, kumlanmış ve nervürlü yüzeye sahip çelik-cam FRP kompozit donatıların ise %57’si ile %73’ü arasında değişmektedir. Son olarak karbon FRP sargılı çelik donatıların maksimum aderans dayanımları, yüzey deformasyon işlemi uygulanmamış çelik-cam FRP kompozit donatıların ise %104’ü ile %133’ü arasında değişmektedir.

Tablo 7. Çelik-cam FRP ve çelik-bazalt FRP kompozit donatıların aderans dayanımları

Araştırmacı	Yüzey deformasyon türü ve donatı türü	Donatı yüzey deformasyon şekli	Φ (mm)	L (mm)	Beton basınç dayanımı (MPa)	Göçme Tipi*	u_{ort} (MPa)
Ma vd. (2019)	Sargılı yüzeyli Çelik-bazalt FRP		16	80	35	P	11,63
“	Sargılı ve kumlanmış yüzeyli Çelik-bazalt FRP		16	“	“	“	15,57
Wu vd. (2012)	Sargılı yüzeyli Çelik-bazalt FRP		~14	70	-	P	15,38
“	Sargılı yüzeyli Çelik-karbon FRP	“	~13	-	-	“	15,02
Ju vd. (2017)	Kumlanmış ve nervürlü yüzeyli Çelik-cam FRP		18,9	~95	25	P+S	18,9-20,7
Basaran & Donmez (2020)	Ek yüzey deformasyon işlemi olmayan Çelik-cam FRP		11,77	58,85	30,96	P	10,37
“	“	“	13,76	68,80	“	“	10,84
“	“	“	15,88	79,40	“	P+S	13,26

*P= Sıyırılma; S= Yarıлма, P+S= Aynı seri deneyler içinde iki türlü göçme

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada çeliğin korozyon sorununa karşı epoksi emdirilmiş karbon lifinin çelik donatı üzerine donatı çekme sünekliğinin artırılabilmesi için 30 derece sarılmasıyla üretilen ve yüzeyine herhangi bir deformasyon işlemi uygulanmamış kompozit donatıların beton ile aralarındaki aderans dayanımları çekip çıkarma deneyleri ile incelenmiştir. Araştırma sonucunda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Deneylerin çoğunda (bir numune hariç) aderans boyunun kısa olmasından ötürü (5Φ) sıyırılma göçmesi gözlemlenmiştir. Ancak sıyırılma göçmesiyle sonuçlanan deneylerde donatıların yüzeyinde makro düzeyde herhangi bir deformasyon gözlenmemiştir.
- Çekip çıkarma deneylerinde donatıların betondan akma dayanımlarına ulaşmadan sıyırılmalarından dolayı donatı poisson etkisinin aderans davranışına etkisi sınırlı kalmıştır. Ancak kompozit donatılarda donatı poisson etkisinin (özellikle akma dayanımının ötesinde) aderans davranışına etkisinin incelenmesi gerekmektedir.
- Karbon FRP sargılı çelik donatılar, salt çelik donatıların en az %47'si kadar aderans dayanımına sahiptirler.
- Karbon FRP sargılı çelik donatıların aderans dayanımları kumlanmış, demet ve örgülü yüzeye sahip salt CFRP donatılara göre en az %16 daha yüksek olmasına rağmen yüzey deformasyonu nervürlü, oluklu ve sargılı olan CFRP donatılar ile kıyaslandığında aderans dayanımı bu donatıların %45'i ile %96'sı arasında değiştiği gözlemlenmiştir.
- Karbon FRP sargılı çelik donatıların aderans dayanımları yüzey deformasyonu sargılı olan diğer kompozit donatıların en az %76'sı olmasına rağmen sargıya ilaveten kumlama yapılması kompozit donatıların aderansını arttırmış ve bu oran %57'ye düşmüştür.

Tüm bu karşılaştırmalara bakılarak karbon FRP sargılı çelik donatıların ortalama bir aderans dayanımına sahip olduğu sonucu çıkarılabilir. Bu nedenle bu donatılar, herhangi bir ek yüzey deformasyonu uygulamasına gerek kalmadan beton temas boylarının bir miktar artırılması halinde bile çok iyi bir aderans performansı sergileyebilecekleri düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Amasya Üniversitesinde FMB-BAP 19-0429 nolu BAP projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Projeye vermiş olduğu destekten dolayı Amasya Üniversitesi Rektörlüğü BAP Koordinasyon Birimine teşekkür ederiz.

Referanslar

- ACI 440.1R-15, Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP)Bars. (2015). American Concrete Institute (ACI).
- ACI 440R-07, Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. (2007). American Concrete Institute (ACI).
- Aksoylu, C., Yazman, Ş., Özkılıç, Y. O., Gemi, L. & Arslan, M. H. (2020). Experimental analysis of reinforced concrete shear deficient beams with circular web openings strengthened by CFRP composite. *Composite Structures*, 249, 112561. doi:10.1016/j.compstruct.2020.112561
- Basaran, B. & Donmez, E. T. (2020). Investigation of Bond Strength Between GFRP Wrapped Steel Reinforcement and Concrete with Pullout Test. *Hittite Journal of Science & Engineering*, 7(4), 321–327. doi:10.17350/HJSE19030000201
- Basaran, B. & Kalkan, I. (2020). Investigation on variables affecting bond strength between FRP reinforcing bar and concrete by modified hinged beam tests. *Composite Structures*, 242(March), 112185. doi:10.1016/j.compstruct.2020.112185
- Cheung, M. M. S. & Tsang, T. K. C. (2010). Behaviour of Concrete Beams Reinforced with Hybrid FRP Composite Rebar. *Advances in Structural Engineering*, 13(1), 81–93. doi:10.1260/1369-4332.13.1.81
- Design Manual No.3 Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers. (2007). ISIS Canada Research Network.
- EN 12390-2:2009, Testing hardened concrete-Part 2: Making and curing specimens for strength tests. (2009). European Committee For Standardization.
- EN 12390-3:2009, Testing hardened concrete-Part 3: Compressive strength of test specimens. (2009). European Committee For Standardization.
- Gemi, L., Aksoylu, C., Yazman, Ş., Özkılıç, Y. O. & Arslan, M. H. (2019). Experimental investigation of shear capacity and damage analysis of thinned end prefabricated concrete purlins strengthened by CFRP composite. *Composite Structures*, 229, 111399. doi:10.1016/j.compstruct.2019.111399
- Hamad, R. J. A., Megat Johari, M. A. & Haddad, R. H. (2017). Mechanical properties and bond characteristics of different fiber reinforced polymer rebars at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 142, 521–535. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.113
- Ju, M., Park, G., Lee, S. & Park, C. (2017). Bond performance of GFRP and deformed steel hybrid bar with sand coating to concrete. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 36(6), 464–475. doi:10.1177/0731684416684209
- Kartal, S. (2020). Lifli polimer donatı oranının hibrit FRP-çelik donatılı beton kirişlerin eğilme davranışı üzerindeki etkileri. Doktora Tezi. Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.
- Lin, X. & Zhang, Y. X. (2013). Bond–slip behaviour of FRP-reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 44, 110–117. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.03.023
- Ma, G., Huang, Y., Aslani, F. & Kim, T. (2019). Tensile and bonding behaviours of hybridized BFRP–steel bars as concrete reinforcement. *Construction and Building Materials*, 201, 62–71. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.196
- Madenci, E., Özkılıç, Y. O. & Gemi, L. (2020a). Theoretical investigation on static analysis of pultruded GFRP composite beams. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 8(3), 483-490. doi:10.21541/apjes.734770
- Madenci, E., Özkılıç, Y. O. & Gemi, L. (2020b). Experimental and theoretical investigation on flexure performance of pultruded GFRP composite beams with damage analyses. *Composite Structures*, 242, 112162. doi:10.1016/j.compstruct.2020.112162
- Okelo, R. & Yuan, R. L. (2005). Bond Strength of Fiber Reinforced Polymer Rebars in Normal Strength Concrete. *Journal of Composites for Construction*, 9(3), 203–213. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9:3(203)
- Park, J.-S., Lim, A.-R., Kim, J. & Lee, J.-Y. (2016). Bond performance of fiber reinforced polymer rebars in different casting positions. *Polymer Composites*, 37(7), 2098–2108. doi:10.1002/pc.23388

- Seo, D.-W., Park, K.-T., You, Y.-J. & Lee, S.-Y. (2016). Experimental Investigation for Tensile Performance of GFRP-Steel Hybridized Rebar. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1–12. doi:10.1155/2016/9401427
- Soric, Z., Kisicek, T. & Galic, J. (2010). Deflections of concrete beams reinforced with FRP bars. *Materials and Structures*, 43(S1), 73–90. doi:10.1617/s11527-010-9600-1
- TS 802, Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları. (2016). Türk Standartları Enstitüsü.
- Wang, L., Shen, N., Zhang, M., Fu, F. & Qian, K. (2020). Bond performance of Steel-CFRP bar reinforced coral concrete beams. *Construction and Building Materials*, 245, 118456. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118456
- Wei, W., Liu, F., Xiong, Z., Lu, Z. & Li, L. (2019). Bond performance between fibre-reinforced polymer bars and concrete under pull-out tests. *Construction and Building Materials*, 227, 116803. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.116803
- Wilson, A. F., Tsiatas, G., Taggart, D. G., Nair, A. U. & Kim, T. J. (2003). Investigation of CFRP Reinforced Concrete Interfacial Load Transfer. *Proceedings of the TRB 2003 Annual Meeting*.
- Wisnom, M. R. (2016). Mechanisms to create high performance pseudo-ductile composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 139(1). doi:10.1088/1757-899X/139/1/012010
- Wu, G., Sun, Z. Y., Wu, Z. S. & Luo, Y. B. (2012). Mechanical Properties of Steel-FRP Composite Bars (SFCBs) and Performance of SFCB Reinforced Concrete Structures. *Advances in Structural Engineering*, 15(4), 625–635. doi:10.1260/1369-4332.15.4.625
- Yan, F., Lin, Z. & Yang, M. (2016). Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete: A review. *Composites Part B: Engineering*, 98, 56–69. doi:10.1016/j.compositesb.2016.04.068