
GFPR DONATI-BETON ARASINDAKİ ADERANS GERİLMESİNİN SIYRILMA GÖÇME TİPİ İLE SONUÇLANAN ÇEKİP ÇIKARMA DENEYLERİ İLE TESPİTİ

*Boğaçhan BAŞARAN **
*Saruhan KARTAL ***
*İlker KALKAN****

Alınma: 24.07.2018; düzeltme: 26.09.2018; kabul: 13.05.2019

Öz: Lif takviyeli polimer donatılar (FRP) özellikle korozyona uğramama ve yüksek çekme dayanımları nedeniyle betonarme yapılarda çelik donatıya alternatif olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ancak, mekanik ve fiziksel özelliklerinin çelik donatıya göre farklı olmasından dolayı, FRP donatıların beton ile olan aderans davranışları çelikten farklıdır. FRP donatının beton ile olan aderans davranışı, beton basınç dayanımına, pas payına, donatı gömülme boyuna, donatı çapına, donatının konumuna ve donatı yüzey özelliği gibi daha birçok değişkene bağlıdır. Farklı uluslararası FRP donatılı beton yönetmelikleri, donatı aderansının tahmininde kullanılacak çeşitli bağıntılar önermişlerdir. Bu bağıntılar, donatının betondan ayrışması ile sonuçlanan deneylerin sonuçları kullanılarak oluşturulmuştur. Ancak, ayrışma ile sonuçlanan numunelerde, betonun çatlamasından doğan aderans kaybı neticesinde maksimum aderans belirlenemeyeceği için aderansı etkileyen değişkenler tam olarak tespit edilemez. Bu nedenle ayrışma göçme tipi ile sonuçlanan deneyler ile ortaya konan bağıntıların geçerliliği tartışmalıdır. Bu çalışmada, literatürde mevcut donatı sıyrılması ile sonuçlanan 243 adet çekip çıkarma deneyinden yararlanılarak, çoklu doğrusal regresyon analizi ile cam takviyeli polimer donatıların (GFPR) beton ile aralarındaki aderans bağıntısının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda önerilen bağıntı kullanılarak tahmin edilen aderans gerilmesi değerlerinin, uluslararası yönetmeliklerde geçen bağıntılar ile elde edilen değerlerden daha tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: GFPR donatı, donatı aderansı, cam takviyeli polimer donatı

Determination of the GFPR Reinforcement-Concrete Bond Strength from Pull-Out Tests Resulting in the Debonding Failure

Abstract: Fiber reinforced polymer (FRP) bars have begun to be used as an alternative to conventional steel reinforcing bars in reinforced concrete structures, especially due to their high resistance to corrosion and high tensile strength. However, their bond behavior with concrete is different than steel because of their different mechanical and physical properties compared to steel reinforcing bars. The bond behavior of FRP bars with concrete depends on many parameters such as concrete compressive strength, clear cover, embedment length, bar diameter, location of the bar, bar surface properties. Different international FRP-reinforced concrete codes recommended various equations for estimating the FRP-concrete bond strength. These equations were established using experimental results that resulted in splitting concrete failure. However, the maximum bond strength cannot be determined from the loss of bond strength due to the fracture of concrete and the parameters affecting the bond strength cannot be fully determined from the specimens failed in splitting. For this reason, the validity of the equations originating from the

* Amasya Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, 05100, Amasya, Türkiye

** Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, Türkiye

İletişim Yazarı: Boğaçhan BAŞARAN (bogachan.basaran@amasya.edu.tr)

experiments ended up in the splitting failure must be discussed. The present study aimed at developing a bond strength equation between concrete and glass reinforced polymer (GFRP) by using multiple linear regression analysis on a total of 243 pull-out experiments from the literature that resulted in pullout failure. The proposed bond strength equation was observed to yield to more consistent values with the experimental results compared to the respective values from the international code equations.

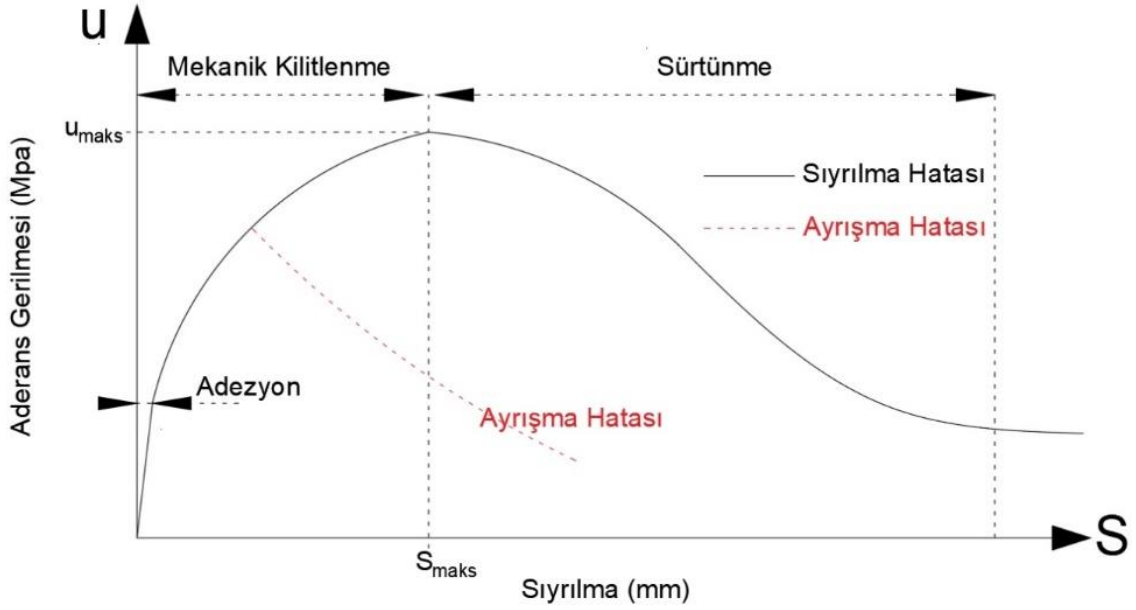
Keywords: GFRP rebar, bond strength, glass fiber reinforced polymer rebar

1. GİRİŞ

Beton ile çeliğin bir araya gelmesiyle oluşan kompozit bir yapı malzemesi olan betonarme, ekonomik olması, yüksek rijitliği, bakımının yok denecek kadar az olması, kolay işlenebilirliği vb. nedenler ile dünyada, en sık kullanılan yapı malzemelerinin başında gelmektedir. Bu nedenlerle, günümüzde konut, yol, köprü, liman yapıları, tüneller vb. birçok yapıda kullanılmaktadır. Ancak, betonarme malzemeyi oluşturan çelik donatının zamanla korozyona uğraması ile betonarme yapılar zaman içinde kullanım koşullarını yerine getirememektedirler. Bu nedenle, bu yapılarda bakıma ve yenileme çalışmalarına ihtiyaç duyulmakta, bu bakım ve yenileme çalışmaları yüksek maliyetli olmakta, büyük zaman almakta ve de kalıcı olmayan geçici çözümler sunmaktadır. Ayrıca bu yapıların bakımı sırasında işlevlerini yerine getirememesinden (yolun trafiğe kapatılması vb.) doğan sorunlar için farklı planlamalar (trafik, alternatif güzergah vb.) yapılması gerekmektedir.

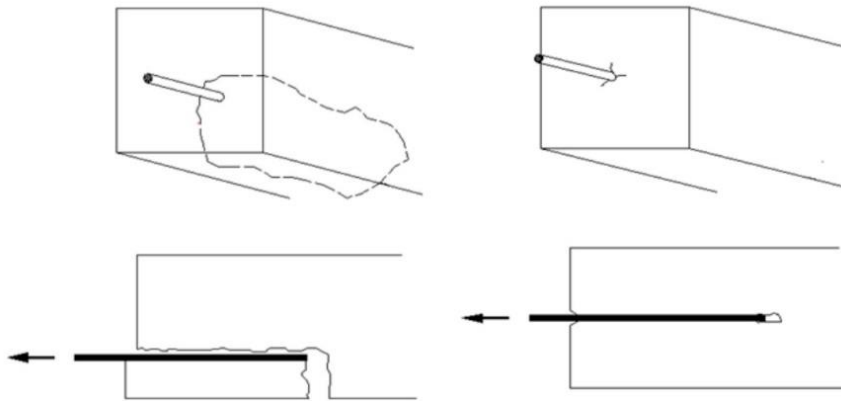
Çelik donatıların korozyon sorununa karşı çelik donatıyı epoksi ile kaplama, katodik koruma, galvanizleme gibi çeşitli çözümler sunulmasına karşın bazı durumlar haricinde çelik donatının paslanması sorununa nihai çözüm bulunamamıştır (Kessler ve Powers, 1998). Son zamanlarda, lif takviyeli polimer (FRP) donatılar, korozyona karşı dayanıklı olmaları, yüksek çekme ve yorulma dayanımları, hafiflik ve kolay işlenebilirlikleri, manyetik olmamaları ve yalıtkan olmaları gibi çeşitli avantajları nedeniyle çelik donatılara alternatif olarak yaygınlık kazanmaya başlamıştır. Ancak bu avantajlarına rağmen FRP donatılar, çelik donatılar ile karşılaştırıldığında, ilk maliyetlerinin daha yüksek oluşu, gevrek çekme davranışları, düşük basınç dayanımları, düşük elastisite modülü değerleri, üretimlerinin sınırlı olması gibi, dezavantajlara da sahiptirler (ACI 440 1R, 2015).

FRP donatılar, basınç dayanımlarından ziyade yüksek çekme dayanımlarına sahip oldukları için genellikle eğilme elemanlarında (döşeme, giriş vb.) kullanılmaktadırlar. FRP donatılı beton eğilme elemanlarının eğilme davranışlarını, malzemelerin mekanik özellikleri kadar, FRP donatı-beton arasındaki aderans da önemli bir ölçüde etkilemektedir. FRP donatıların betonla olan aderanslarını sağlayan mekanizmalar, çelik donatılarla aynıdır. FRP donatı ile beton arasındaki aderans gerilmesi, adezyon, mekanik kilitleme ve sürtünme olmak üzere 3 farklı mekanizmanın sonucu olarak ortaya çıkar (Islam ve diğ., 2015).



Şekil 1:
FRP Donatı-beton arasındaki aderans gerilmesi-sıyrılma ilişkisi

Ancak, FRP donatıların mekanik özelliklerinin çelikten farklı olması sebebiyle, aderans gerilmesi değerleri çelik donatılardan farklılık gösterir. FRP donatıların beton ile olan aderans dayanımları çelik donatıların ilgili değerlerine göre çok daha düşüktür (Mosley ve diğ., 2008). FRP donatıların beton ile aderans dayanımları, FRP donatının lif türüne, reçine türüne, elastisite modülüne, yüzey deformasyon şekillerine, donatının beton içindeki kenetlenme boyuna, betonun basınç dayanımına, lif katkısına, donatı pas payı ve donatı aralığı gibi daha birçok değişkene bağlıdır. FRP donatılarda gerekli aderansın sağlanması için, bu değişkenlerin tümünün belli sınır değerler arasında olması gereklidir. Eğer gerekli sınır şartlar sağlanamaz ise, beton ayrışması (çatlama) ve donatının beton içinden sıyrılması neticesinde aderans tam olarak sağlanamaz (Şekil 2).



Şekil 2:
Beton ayrışma hatası (solda) ve sıyrılma hatası (sağda) (Huang ve diğ., 1996: Sulaiman ve diğ., 2017)

Bu kırılma şekillerinden beton ayrışması, genellikle pas payının yetersiz olmasından kaynaklanırken, sıyrılma, donatının beton içine yeterli uzunlukta gömülmemesinden

kaynaklanmaktadır (Achillides, 1998). Yetersiz kenetlenme boylarında ya da donatının yüzey özelliğinin kötü olması durumunda donatı sıyırılması, beton ayrışma göçme tipinden önce de gerçekleşebilmektedir. FRP donatı-beton arasında maksimum aderans gerilmesinin tam olarak tespit edilebilmesi için deneylerin sıyırılma göçme şeklini esas alacak şekilde düzenlenmesi gerekir. Ayrışma ile sonuçlanan numunelerde, betonun çatlamasından doğan aderans kaybı neticesinde nihai aderans belirlenemeyeceği için aderansı etkileyen değişkenler de tam olarak tespit edilemez. Bu nedenle ayrışma ile sonuçlanan deneyler ile ortaya konan bağıntıların geçerliliği tartışmalıdır.

ACI 440 1R-15'de pas payının $3,5d_b$ ve kenetlenme boyunun $19d_b$ 'den daha büyük kullanılması durumunda göçmenin sıyırılma sonucu gerçekleşeceği belirtilmiştir ve gömülme derinliğinin $20d_b$ 'den daha küçük alınmaması gerektiği de ifade edilmektedir. Yeterli pas payı ($3,5d_b$) bırakılan tüm elemanlarda göçmenin sıyırılma sonucu gerçekleşeceği düşünülerek geliştirilen yönetmelik aderans bağıntısının, beton ayrışma modu ile sonuçlanan deneysel veriler kullanılarak geliştirilmesinin hatalı olduğu açıktır. JSCE 1997'de geçen aderans bağıntısı için de aynı durum söz konusudur.

Bu çalışmada, literatürde mevcut sıyırılma sonucu göçmeye ulaşmış 243 adet çekip çıkarma deneyinden yararlanılarak, çoklu doğrusal regresyon analizi ile cam takviyeli polimer donatıların (GFRP) beton ile aralarındaki aderans gerilmesi bağıntısının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Betonun deney sonuna kadar bütünlüğünü korumasına bağlı olarak, sıyırılma göçme modu ile sonuçlanan deneylerin, betonla FRP donatı arasındaki aderans hakkında, ayrışma göçme modu ile sonuçlanan deneylere göre daha sağlıklı sonuçlara vereceği düşünülmüştür. Bu çalışma sonunda elde edilen bağıntı, dört farklı FRP donatılı beton yönetmeliğinin [ACI 440 1R-15, CSA S806-12, CSA S6-10 ve JSCE 1997] aderans gerilmesi bağıntıları ile karşılaştırılmış ve mevcut bağıntının GFRP-beton aderansını tahmin etmede daha başarılı olduğu görülmüştür.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Uluslararası Yönetmeliklerde Geçen Aderans Bağıntıları

Farklı uluslararası FRP donatılı beton yönetmelikleri ACI 440 1R-15, CSA S6-10, CSA S806-12, JSCE 1997'de aderans gerilmesi ve kenetlenme boyu ile ilgili bağıntılara yer vermişlerdir.

2.1.1. ACI 440 1R-15 Yönetmeliğinde Geçen Aderans Bağıntısı

$$u = \frac{\sqrt{f_c}(0,332 + 0,025 \frac{C}{d_b} + 8,3 \frac{d_b}{l_e}}{\alpha} \quad (1)$$

Burada, u =aderans gerilmesi(MPa); $\sqrt{f_c}$ =beton basınç dayanımının karekökü (Mpa); C =en küçük, pas payı yada donatı aralığının yarısı(mm); l_e =FRP donatının gömülme boyu (mm); α =donatı yerleştirme faktörü (300mm'den daha yüksekte konumlandırılan donatılar için 1,5, diğer tüm durumlarda 1,0; d_b =donatı çapı (mm); ayrıca $\frac{C}{d_b} = 3,5$ 'den büyük olmamalıdır.

2.1.2. CSA S6-10 Yönetmeliğinde Geçen Aderans Bağıntısı

$$\tau_b = \frac{\left[d_{cs} + K_{tr} \frac{E_{frp}}{E_s} \right] f_{cr}}{0,45(K_1 K_4) \pi d_b} \quad (2)$$

Burada, d_b =donatı çapı (mm); f_{cr} = Betonun çatlama dayanımı(MPa) (Normal beton için $0.4\sqrt{f_c}$, yarı hafif beton için $0,34\sqrt{f_c}$, hafif beton için $0,3\sqrt{f_c}$); K_1 =donatı yerleştirme faktörü (300mm'den daha yüksekte konumlandırılan donatılar için 1,3, diğer tüm durumlarda 1,0); K_4 =Donatı yüzey şekli faktörü (Aderans dayanımının deneysel verisi mevcut ise aynı kesit alanlı FRP donatı ile çelik donatının aderans dayanımı oranı, 1'den büyük olamaz, mevcut değil ise, 0,8 alınır.), E_{FRP} = FRP donatının elastisite modülü; E_s = çelik donatının elastisite modülü; d_{cs} =en küçük, pas payı yada donatı aralığının üçte ikisi (mm), $d_{cs} \leq 2,5d_b$; K_{tr} =Enine donatı indeksi; $\left[d_{cs} + K_{tr} \frac{E_{frp}}{E_s} \right] \leq 2,5d_b$.

2.1.3. CSA S806-12 Yönetmeliğinde Geçen Aderans Bağıntısı

$$\tau_b = \frac{d_{cs}\sqrt{f'_c}}{1,15(K_1K_2K_3K_4K_5)\pi d_b} \quad (3)$$

Burada, d_b =donatı çapı (mm); d_{cs} =en küçük, pas payı yada donatı aralığının üçte ikisi (mm), $d_{cs} \leq 2,5d_b$; $\sqrt{f'_c}$ =beton basınç dayanımının karekökü (Mpa)(Maksimum değeri 8); K_1 =donatı yerleştirme faktörü (300mm'den daha yüksekte konumlandırılan donatılar için 1,3, diğer tüm durumlarda 1,0); K_2 = Beton ağırlık faktörü (Normal beton için 1, yarı hafif beton için 1,2, hafif beton için 1,3); K_3 =Donatı kesit alanı faktörü ($A_b < 300\text{mm}^2$ için 0,8, $A_b > 300\text{mm}^2$ için 1); K_4 =Donatı lif faktörü (CFRP ve GFRP için 1, AFRP için 1,25); K_5 =Donatı yüzey şekli faktörü (Aderans dayanımının deneysel verisi mevcut ise 1'den daha küçük değer alınabilir ancak 0,5'den daha küçük alınmaz, mevcut değil ise, yüzeyi pürüzlü veya kumlanmış veya örgülü yüzeyli donatılar için 1, oluklu yüzeyli veya nervürlü donatılar için 1,05, dişli donatılar için 1,8 alınmalıdır)

2.1.4. JSCE 1997 Yönetmeliğinde Geçen Aderans Bağıntısı

$$f_{bod} = \frac{0,28\alpha_2 f_{ck}^{2/3}}{\gamma_c} \leq 3,2 \quad (4)$$

$$\tau = \frac{f_{bod}}{\alpha_1} \quad (5)$$

Burada, α_2 =Aderans dayanım değiştirme katsayısı: aderans dayanımı çelik donatıyla aynı yada daha büyükse 1,0'dır, aksi halde deney sonucuna göre azaltılır; f_{ck} =beton basınç dayanımı (MPa); γ_c =beton basınç dayanımı için karakteristik değer 1,3 alınabilir. α_1 ise etriye varlığına ve paspayına bağlı bir katsayıdır.

Ancak yönetmeliklerde geçen bu bağıntılardan ACI 440 1R-15 ve JSCE 1997'de yer alan bağıntılar beton ayrışma göçme tipi esas alınarak elde edilmiştir. CSA S6-10 ve CSA S806-12 yönetmeliklerindeki bağıntıların ise hangi göçme şekli esas alınarak elde edildikleri açık değildir. Ayrıca, literatürde yapılan çalışmalarda bu formüllerden elde edilen değerlerin aşırı güvenli tarafta kalan sonuçlar verdiği belirtilmektedir. 32 adet kiriş deneyi yapan Thamrin ve Kaku (2005), elde ettikleri sonuçları JSCE 1997'de verilen kenetlenme boyu bağıntısı ile karşılaştırarak benzer çıkarımlar yapmıştır. Pay ve diğ. (2014), 41 adet GFRP donatılı bindirme ekli kiriş deneyleri sonucunda elde edilen aderans dayanımı değerlerinin, ACI 440.1R-06 formülünden elde edilen analitik değerlerle önemli derecede tutarsız olduğu sonucuna varmıştır. Newman ve diğ. (2010), literatürdeki 48 adet GFRP ve CFRP donatılı kirişin deney sonuçlarını derleyerek korelasyon analizini yapmış ve ACI 440.1R-06'da geçen aderans bağıntısının çok fazla güvenli olduğunu gözlemlemişlerdir. Benzer şekilde, Ametrano (2011), yaptığı 72 adet çekip çıkarma ve 32 adet kiriş deneyinin sonuçlarına dayanarak, ACI 440.1R-06, CSA S6-06,

CSA S806-02 ve JSCE 1997'de verilen kenetlenme boyu bağıntılarının büyük bir güvenlik payı olduğunu belirtmiştir. Hossain ve diğ., (2014, 2017), GFRP donatılı 96 adet çekip çıkarma deneyi ve 144 mafsalı giriş deneyi yaparak elde ettikleri aderans dayanımı değerlerinin, yönetmeliklerdeki denklemler kullanılarak elde edilen değerlerden daha yüksek çıktıklarını belirtmektedir. Rakhshanimehr ve diğ. (2018) çalışmalarında benzer sonuçlara ulaşmıştır. Yönetmelikler ile ilgili aderans değerlerini tahmin etmede çok güvenli tarafta kalmalarından dolayı da yönetmeliklerde geçen aderans bağıntılarının revize edilmesi gerektiği açıktır.

2.2. Değişkenler ve Veri Tabanı Sınırlamaları

Çalışmada kullanılan çekip çıkarma deney değişkenleri ve sonuçları için literatürden derlenen çeşitli çalışmalardan yararlanılmıştır (Larralde ve Silva-Rodriguez, 1993; Ehsani ve diğ., 1997; Achillides ve Pilakoutas, 2004; Esfahani ve diğ., 2004; Aiello ve diğ., 2007; Choi ve diğ., 2007; Lee ve diğ., 2008; Ha ve Choi, 2010; Jung ve diğ., 2011; Arias ve diğ., 2012; Kang ve diğ., 2012; Khederzadeh ve Sennah, 2014; Islam ve diğ., 2015; Lu, 2015; Tekle ve diğ., 2015; Park ve diğ., 2016; Shen ve diğ., 2016;). Bu çalışma kapsamında oluşturulan veri tabanı donatı sıyırılması ile sonuçlanan 243 adet çekip çıkarma deneyinin sonuçlarını içermektedir. Veri tabanındaki her deneysel veri, beton basınç dayanımı, pas payı, donatı yüzey özelliği, donatı çapı, donatı pozisyonu ve donatı gömülme derinliği olmak üzere toplam 6 değişken ve 1 adet deneysel aderans gerilmesi sonucu içermektedir. Aderansa etkisi incelenen bu 6 değişkenin mevcut veri tabanında ki aralıkları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Veri tabanında bulunan değişkenlerin ve çıktıların aralıkları

Parametre	Min.	Maks.	Ort.	S. Sapma
Yüzey Özelliği	1	3	1,49	0,65
d_b (mm)	8,50	27,40	13,90	3,06
$\sqrt{f_c}$	3,49	9,61	6,40	1,48
C/d_b	0,50	14,17	4,79	2,16
L/d_b	2,00	46,06	8,05	6,55
Pozisyon	0	1	0,88	0,32
u (MPa)	1,14	30,88	12,05	6,70

Veri tabanında kullanılan ve Tablo 1'de gösterilen deney değişkenlerinden yüzey özelliği, veri tabanında kumlanmış donatılar için 1, harici sargılı donatılar için 2, nervürlü donatılar için 3 sayısı ile belirtilmiştir. Pozisyon ise, 225mm'den yüksekte konumlanan donatılar için 1, altında konumlanan donatılar için ise 0 sayısal değeriyle belirtilmiştir.

2.3. Çalışmada Kullanılan Hata Ölçütleri

Çalışmada kullanılan yöntemlerin performanslarını değerlendirmek için r , RMSE, MAPE gibi istatistiksel değerlendirme ölçütleri kullanılmıştır. Çalışmada deneysel çekip çıkarma deney sonucu verileri ile modellerden elde edilen tahmini aderans değerleri arasındaki ilişkinin varlığını, şiddetini ve yönünü ölçmek maksadı ile korelasyon analizi yapılmıştır (Eşitlik 6).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

Burada, r : değişkenler arasındaki ilişki düzeyi (- 1 ise mükemmel negatif doğrusal ilişki; 0 ise ilişki yok; +1 ise mükemmel pozitif doğrusal ilişki); x_i : x i'inci değeri; \bar{x} : x verilerinin ortalaması; y_i : y i'inci değeri; \bar{y} : y verilerinin ortalaması; n : deney sayısı

DeneySEL aderans değerleri ile modellerden elde edilen tahmini aderans değerleri arasındaki hataların ortalama büyüklüğünü ölçmek için “Hata Kareleri Ortalamasının Karekökü” (Root Mean Square Error-RMSE) istatistiği kullanılmıştır:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_f - y_e)^2} \quad (7)$$

Burada, y_f :Tahmin edilen değerler; y_e :deneysel değerler; n :deney sayısıdır.

DeneySEL aderans değerleri ile modellerden elde edilen tahmini aderans değerleri arasındaki hataları yüzdesel olarak gösterebilmek maksadı ile “Ortalama Mutlak Yüzde Hata” (Mean Absolute Percentage Error-MAPE) istatistiği kullanılmıştır.

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_f - y_e}{y_e} \right| \quad (8)$$

Burada, y_f :Tahmin edilen değerler; y_e :deneysel değerler; n :deney sayısıdır.

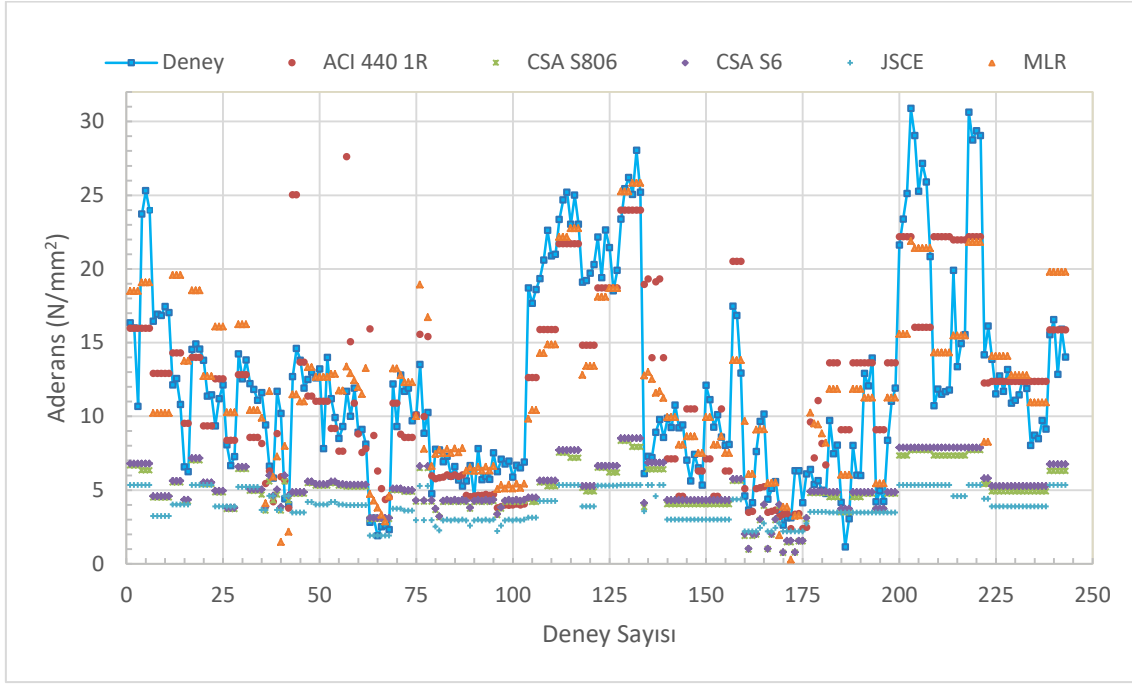
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında deneySEL sonuçlar ile yapılan çoklu doğrusal regresyon analizi neticesinde sıyırılma göçme şeklinde FRP donatı-beton arasındaki aderans gerilmesi için aşağıdaki eşitlik türetilmiştir:

$$u = -8,51 + 3,388\sqrt{f_c} + 0,035 \frac{C}{d_b} - 0,2340 \frac{L}{d_b} - 0,3047d_b + 0,01Kum - 0,601Sar - 6,24Ner + 5,811Poz \quad (9)$$

Burada; u =aderans gerilmesi(MPa); $\sqrt{f_c}$ =beton basınç dayanımının karekökü (Mpa); C =pas payı (mm); L =FRP donatının gömülme boyu (mm); d_b =donatı çapı (mm); Donatı yüzey faktörü (örneğin; donatı kumlanmış ise kumlanmış="1", sargılı="0", nervürlü="0"); Poz=donatı yerleştirme faktörü (225mm'den daha yüksekte konumlandırılan donatılar için "0", aşağıda konumlandırılan durumlarda "1" olmalıdır.

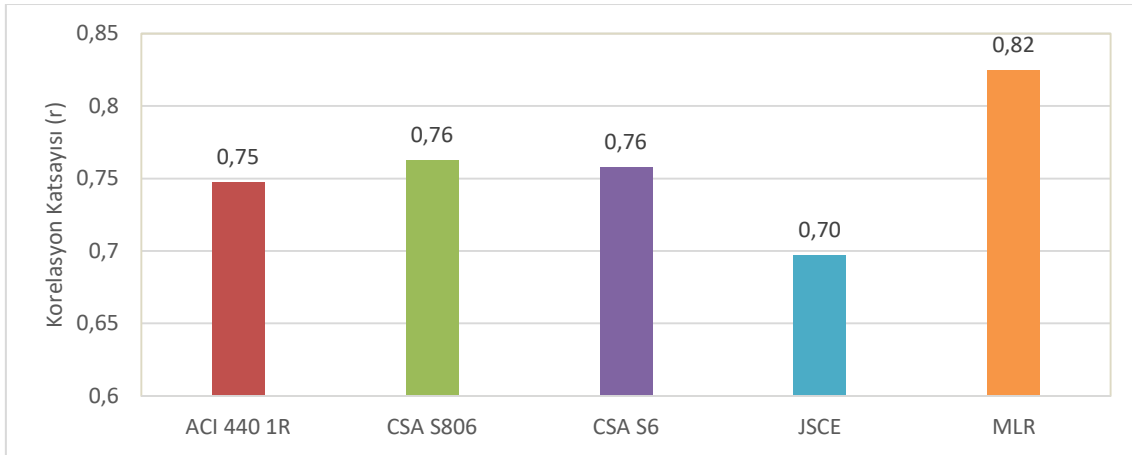
Sıyırılma göçme şekline sahip çekip çıkarma deney sonuçları ile bu deneylerin değişkenleri kullanılarak, önerilen eşitlik ve diğer uluslararası yönetmeliklerdeki eşitlikler kullanılarak bulunan aderans gerilmesi sonuçları Şekil 3'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 3:

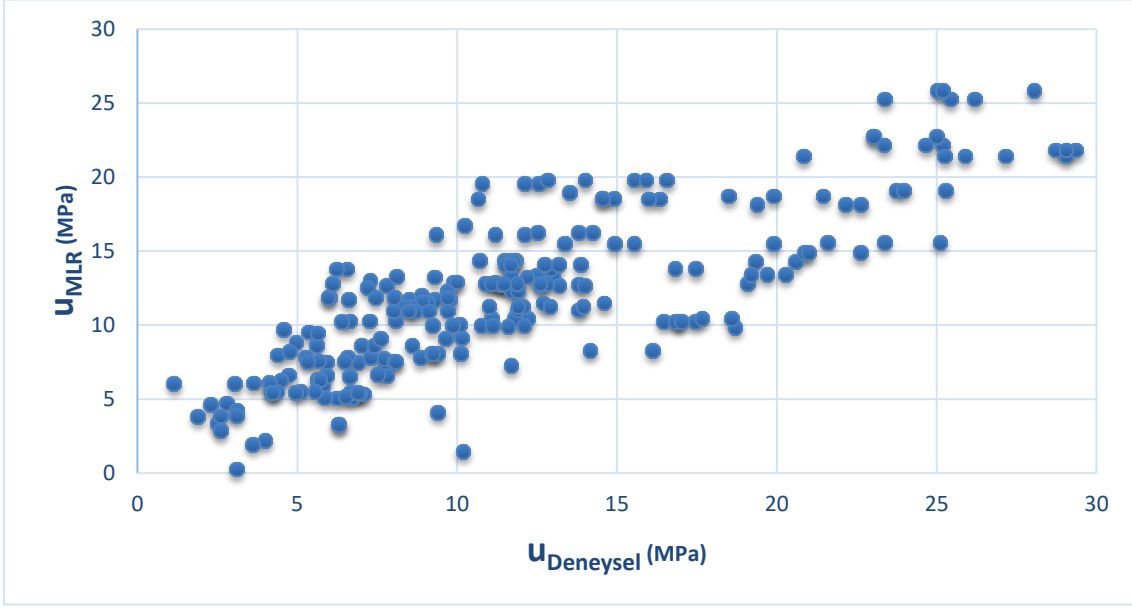
Çekip çıkarma deney sonuçlarının diğer bağıntılarla bulunan sonuçlar ile kıyaslanması

Veri tabanında bulunan deneysel değişkenler Eşitlik (9)'da kullanılarak elde edilen aderans gerilmeleri ile deney sonuçları arasında yüksek bir doğrusal ilişki (korelasyon) bulunmuştur ($r=0.82$). Diğer uluslararası yönetmeliklerdeki aderans eşitliklerinden elde edilen aderans gerilmeleri, deneysel sonuçlar ile ilişkilendirildiğinde aralarındaki korelasyonun nispeten daha düşük olduğu gözükmemektedir (Şekil 4). Deneysel aderans gerilmesi değerlerinin, önerilen bağıntıyla bulunan aderans gerilmesi değerleri ile karşılaştırılması ise Şekil 5'de verilmiştir.



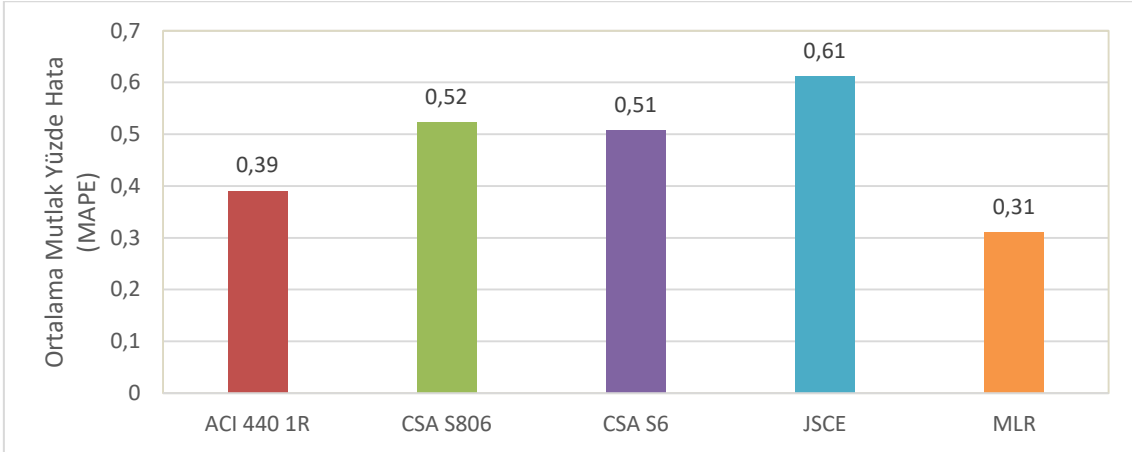
Şekil 4:

Deneysel aderans gerilmelerinin, mevcut bağıntılar ile bulunan gerilmeler arasındaki korelasyon



Şekil 5:
Deneysel aderans gerilmesi değerlerinin, önerilen bağıntıyla bulunan aderans gerilmesi değerleri ile karşılaştırılması

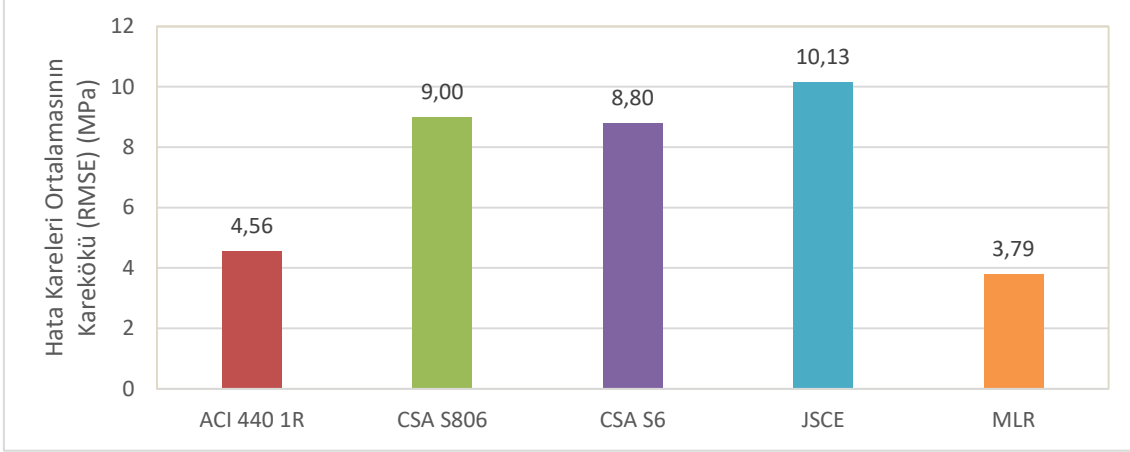
Hem önerilen bağıntı kullanılarak bulunan hem de uluslararası yönetmeliklerden elde edilen aderans gerilmeleri ile deneysel sonuçlar arasındaki ortalama mutlak yüzde hatalar (MAPE) incelendiğinde, en düşük hataya sahip aderans bağıntısı modeli, sıyrılma hata moduna göre düzenlenen Eşitlik (9) olmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6:
Deneysel aderans gerilmelerinin, mevcut bağıntılar ile bulunan gerilmeler arasındaki MAPE oranları

Hem korelasyon katsayılarına hem de MAPE oranlarına benzer şekilde bağıntılardan tahmin edilen aderans gerilmelerinin, deneysel sonuçlara göre hatalarının ortalama büyüklüğü incelendiğinde en küçük hataya sahip modelin yine Eşitlik (9) olduğu Şekil 7'den açıkça görülmektedir. Önerilen bağıntıda ortalama hata değeri 3,79MPa olurken, ACI 440 1R-15 (ACI 2015) dışındaki diğer tüm bağıntılarda hata değerleri, önerilen bağıntı ile tespit edilen hata

değerlerinden yaklaşık 2,5 kat fazla olmuştur. Ayrıca CSA S806-12 ve CSA S6-10 eşitliklerinin korelasyon değerleri, ACI 440 1R-15 eşitliğinin korelasyon değerinden çok az da olsa yüksek çıkmıştır. Buna karşın, CSA S806-12 ve CSA S6-10 ile tahmin edilen aderans gerilmesi değerlerinde ACI 440 1R-15 bağıntısına göre elde edilen değerlere göre neredeyse 2 kat fazla ortalama hata değeri çıkmıştır.



Şekil 7:

DeneySEL aderans gerilmelerinin, mevcut bağıntılar ile bulunan gerilmeler arasındaki RMSE değerleri

4. SONUÇ

Bu çalışmada, literatürde sıyırılma modu sonucu göçmeye ulaşan 243 adet çekip çıkarma deneyinden yararlanılarak, çoklu doğrusal regresyon analizi ile cam takviyeli polimer donatıların (GFRP) beton ile aralarındaki aderans bağıntısı tespit edilmiştir. Elde edilen aderans gerilmesi bağıntısı, çeşitli uluslararası FRP donatılı beton yönetmeliklerindeki aderans gerilmesi bağıntıları ile karşılaştırılmış ve aşağıdaki önemli sonuçlara ulaşılmıştır:

- GFRP donatı-beton aderansını tahmin etmek için önerilen aderans bağıntısı ile ACI 440 1R-15, CSA S806-12, CSA S6-10 ve JSCE 1997 yönetmeliklerindeki aderans bağıntıları istatistiksel olarak karşılaştırıldığında, önerilen bağıntının aderansı tahmin etmede daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Önerilen bağıntı ile bulunan aderans gerilmesi ile deney sonuçları arasında yüksek bir ilişki ($r=0,82$) bulunmuştur. Ayrıca önerilen bağıntının, hem ortalama hata değerlerine (3,79MPa) hem de ortalama mutlak yüzde hata değerlerine (0,31) göre diğer bağıntılara kıyasla, deneysel sonuçlara daha yakın değerler verdiği görülmüştür.
- Yönetmeliklerdeki bağıntılardan elde edilen sonuçlar kendi aralarında karşılaştırıldığında ise, CSA S806-12, CSA S6-10 yönetmelikleriyle tahmin edilen değerler, ACI 440 1R-15 ve JSCE 1997 yönetmeliklerinden elde edilen değerlere göre daha iyi korelasyon değerlerine sahiptir. Ancak, ACI 440 1R-15 bağıntısından elde edilen değerler, diğer yönetmeliklerden elde edilen değerlere göre daha sınırlı hata aralığına ve oranına sahip olduğundan, ACI 440 1R-15 bağıntısı deneysel sonuçları tahmin etmekte daha başarılıdır.

Bu çalışma kapsamında sadece GFRP donatıların doğrudan çekip çıkarma deneylerinin sonuçları kullanılmıştır. Gelecekte yapılacak çalışmalarla geliştirilen bağıntının, farklı deney yöntemlerinden elde edilen sonuçlarla uyumunun araştırılması faydalı olacaktır. Ayrıca, farklı FRP donatı tipleri (BFRP, AFRP, CFRP) için de gelecekte benzer çalışmaların yapılması ve

bağıntının diğer FRP donatılar için de güvenli ve deneysel verilerle uyumlu sonuçlar verip vermediğinin araştırılması da gereklidir.

Yönetmeliklerde, eğilmede çekme taşıyan donatıların betona tutunma özelliklerinin belirlenmesi için farklı deney yöntemleri (bindirme ekli kiriş deneyleri, mafsallı kiriş deneyleri, kiriş ucundan çekip çıkarma deneyi, basit kiriş deneyleri, konsol kiriş deneyleri vb.) önerilmiştir. Bu deneysel yöntemler arasındaki farklardan dolayı, farklı yöntemlerden elde edilen deney sonuçlarına dayalı bir korelasyon mümkün değildir. Literatürde doğrudan çekip-çıkarma (direct pullout) haricindeki deney yöntemleri ile ilgili deneysel çalışma sayısı çok sınırlı ve diğer yöntemlerle ilgili deneysel veri çok yetersizdir. Bu sebeple, kiriş içerisindeki donatı koşullarını doğru yansıtmadığı bilinen doğrudan çekip-çıkarma deney verileri kullanılmak durumunda kalmıştır. Üstelik bu çalışmada kullanılan deneyler, donatının sıyrılması sonucu göçmeye ulaşan numunelerle ilgili deneylerdir ve bilindiği üzere sıyrılan donatılarda başlıklarla donatı çubukları arasındaki rijitlik farkları deney sonuçları fazla etkilememektedir.

KAYNAKLAR

1. Achillides, Z. (1998) *Bond behaviour of FRP bars in concrete, PhD Thesis*, The University of Sheffield.
2. Achillides, Z. and Pilakoutas, K. (2004) Bond Behavior of Fiber Reinforced Polymer Bars under Direct Pullout Conditions, *Journal of Composites for Construction*, 8(2), 173–181. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:2(173)
3. ACI 440 1R-06, (2006) Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars, American Concrete Institute (ACI).
4. ACI 440 1R-15, (2015) Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars, American Concrete Institute (ACI).
5. Aiello, M. A., Leone, M. and Pecce, M. (2007) Bond Performances of FRP Rebars-Reinforced Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(3), 205–213. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:3(205)
6. Ametrano, D. (2011) *Bond Characteristics of Glass Fibre Reinforced Polymer Bars Embedded in High Performance And Ultra-High Performance Concrete*, Master Thesis, Ryerson University.
7. Arias, J. P. M., Vazquez, A. and Escobar, M. M. (2012) Use of sand coating to improve bonding between GFRP bars and concrete, *Journal of Composite Materials*, 46(18), 2271–2278. doi:10.1177/0021998311431994
8. Choi, D.-U., Ha, S.-S. and Lee, C.-H. (2007) Development Length of GFRP Rebars Based on Pullout Test, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 19(3), 323–331. doi:10.4334/JKCI.2007.19.3.323
9. CSA S6-06, (2006) Canadian highway bridge design code, Canadian Standards Association.
10. CSA S6-10, (2010) Canadian highway bridge design code, Canadian Standards Association.
11. CSA S806-02, (2002) Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers. Canadian Standards Association.
12. CSA S806-12, (2012) Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers, Canadian Standards Association.
13. Ehsani, M. R., Saadatmanesh, H. and Tao, S. (1997) Bond Behavior of Deformed GFRP Rebars, *Journal of Composite Materials*, 31(14), 1413–1430.

14. Esfahani, M. R., Kianoush, M. R. and Lachemi, M. (2004) A Comparison Between Bond Strength of Steel and GFRP Bars in Self-Consolidating Concrete (SCC), *International Journal of Civil Engineering*, 2(3), 193–200.
15. Ha, S.-S. and Choi, D.-U. (2010) Development Length of GFRP Bars, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 22(1), 131–141. doi:10.4334/JKCI.2010.22.1.131
16. Hossain, K. M. A., Ametrano, D. and Lachemi, M. (2014) Bond Strength of Standard and High-Modulus GFRP Bars in High-Strength Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(3), 449–456. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000758
17. Hossain, K. M. A., Ametrano, D., Lachemi, M. (2017) Bond Strength of GFRP Bars in Ultra-High Strength Concrete Using RILEM Beam Tests, *Journal of Building Engineering*, 10, 69–79. doi:10.1016/j.jobbe.2017.02.005
18. Huang, Z., Engström, B. and Magnusson, J. (1996) Experimental and Analytical Studies of the Bond Behaviour of Deformed Bars in High Strength Concrete, *In Fourth International Symposium at the Utilization of High Strength/High Performance Concrete*, Paris, France.
19. Islam, S., Afefy, H. M., Sennah, K. and Azimi, H. (2015) Bond characteristics of straight-and headed-end, ribbed-surface, GFRP bars embedded in high-strength concrete, *Construction and Building Materials*, 83(2), 283–298. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.025
20. JSCE, 1997 Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials, Japan Society of Civil Engineers.
21. Jung, W. T., Park, Y. H. and Park, J. S. (2011) An Experimental Study on Bond Characteristics of FRP Reinforcements with Various Surface-type, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 31(4a), 279–286. doi:10.12652/Ksce.2011.31.4A.279
22. Kang, J., Kim, B., Park, J. and Lee, J. (2012) Influence Evaluation of Fiber on the Bond Behavior of GFRP Bars Embedded in Fiber Reinforced Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 24(1), 79–86. doi:10.4334/JKCI.2012.24.1.079
23. Kessler, R. J. and Powers, R. G. (1998) Corrosion of epoxy-coated rebars—Keys segmental bridge—Monroe County. *Florida Department of Transportation, Materials Office*, Rep. No. 88-8A.
24. Khederzadeh, H. R. and Sennah, K. (2014) Pullout Strength of Pre-installed Sand-coated GFRP Bars for Bridge Barrier Construction, *4th International Structural Specialty Conference (CSCE 2014)* (ss. 1–10), Halifax, NS.
25. Larralde, J. and Silva-Rodriguez, R. (1993) Bond and Slip of FRP Rebars in Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5(1), 30–40. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(1993)5:1(30)
26. Lee, J.-Y., Kim, T.-Y., Kim, T.-J., Yi, C.-K., Park, J.-S., You, Y.-C. and Park, Y.-H. (2008) Interfacial bond strength of glass fiber reinforced polymer bars in high-strength concrete, *Composites Part B: Engineering*, 39(2), 258–270. doi:10.1016/j.compositesb.2007.03.008
27. Lu, J. (2015) *Investigation of Pullout Strength of Pre-Installed Glass Fibre Reinforced Polymer Bars In High-Performance Concrete*, Master Thesis, Ryerson University.
28. Mosley, C. P., Tureyen, A. K. and Frosch, R.J. (2008) Bond Strength of Nonmetallic Reinforcing Bars, *ACI Structural Journal*, 105 (5), 634-642.

29. Newman, N., Ayoub, A. and Belarbi, A. (2010) Development Length of Straight FRP Composite Bars Embedded in Concrete, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(4), 571–589. doi:10.1177/0731684408100262
30. Park, J.-S., Lim, A.-R., Kim, J. and 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
31. Pay, A. C., Canbay, E. and Frosch, R.J. (2014) Bond Strength of Spliced Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement, *ACI Structural Journal*, 111 (2), 257-266. doi:10.14359/51686519
32. Rakhshanimehr, M., Mousavi, S. R., Esfahani, M. R., & Shahri, S. F. (2018) Establishment and Experimental Validation of an Updated Predictive Equation for the Development and Lap-Spliced Length of GFRP Bars in Concrete, *Materials and Structures*, 51(1), 15. doi:10.1617/s11527-018-1137-8
33. Shen, D., Ojha, B., Shi, X., Zhang, H. and Shen, J. (2016) Bond stress–slip relationship between basalt fiber-reinforced polymer bars and concrete using a pull-out test, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35(9), 747–763. doi:10.1177/0731684415627504
34. Sulaiman, M. F., Ma, C.-K., Apandi, N. M., Chin, S., Awang, A. Z., Mansur, S. A. and Omar, W. (2017) A Review on Bond and Anchorage of Confined High-strength Concrete, *Structures*, 11, 97–109. doi:10.1016/j.istruc.2017.04.004
35. Tekle, B. H., Khennane, A. and Kayali, O. (2015) Bond Properties of Glass Fibre Reinforced Polymer Bars With Fly-Ash Based Geopolymer Concrete, *10th International Conference on Composite Science and Technology (IDMEC 2015)* (ss. 1–8), Lisboa, Portugal.
36. Thamrin, R., and Kaku, T. (2005) Development Length Evaluation of Reinforced Concrete Beam with CFRP Bars, *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005)* (ss. 385–392), Hong Kong.

