



Comparison of different FRP reinforcement-concrete bond test methods according to parameters affecting this bond

Boğaçhan Başaran¹ , İlker Kalkan^{2*}

¹Department of Construction, Vocational School of Technical Sciences, Amasya University, Amasya 05100, Turkey

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Kırıkkale University, 71450 Kırıkkale, Turkey

Highlights:

- FRP-concrete bond strength depends primarily on the bond test method.
- A parameter may have different and sometimes completely opposite effects on bond strength in different methods.
- Gauss Process Regression is an effective method in estimating the bond strengths of FRP bars in concrete.

Keywords:

- Machine learning
- FRP-concrete bond
- Mechanical interlocking
- Adherence
- Surface texture

Article Info:

Research Article
Received: 08.12.2019
Accepted: 20.02.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.656823

Correspondence:

Author: İlker Kalkan
e-mail:
ilkerkalkan@kku.edu.tr
phone: +90 318 357 4242 /
1254

Graphical/Tabular Abstract

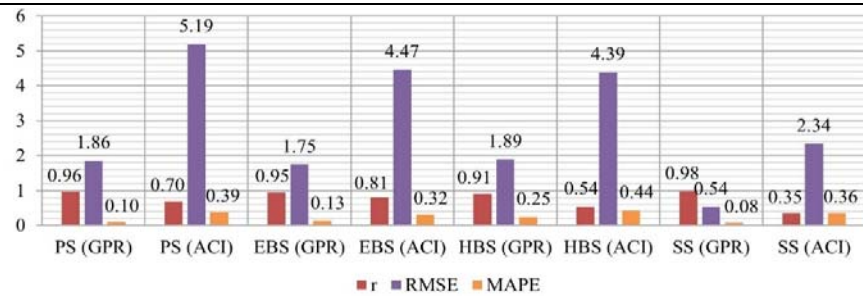


Figure A. r, RMSE and MAPE values of the predicted and experimental results

The present study is dedicated to investigating the effects of various parameters on concrete-FRP bond strength in different test methods. In this respect, four common test methods, hinged beam, end beam, spliced beam and pull-out, were adopted. The effects of eight parameters (the diameter, fiber type, surface texture, embedment length, location and clear cover of reinforcement, concrete strength and confinement from transverse reinforcement) were examined for each test. The analyses showed the same parameter can have varying and even opposite effects on bond strength in different methods.

Purpose: The present study aimed at establishing the effects of different parameters on FRP-concrete bond strength. These effects were aimed to be evaluated for each bond test method, which differ from each other in the stress and loading conditions of the bar.

Theory and Methods:

A database, comprising the results in the literature, was formed for each test method. 70% of the test results in each dataset was used for training of a Gauss Process Regression (GPR) model. Later, 15% of the test database was used for verification and the remaining 15% for comparing the analytical estimates to the experimental results. The accuracy was evaluated in terms of three criteria, Correlation Coefficient (r), Mean Absolute Percentage Error (MAPE) and Root Mean Square Error (RMSE). All these criteria indicated that the GPR model was able to provide estimates much closer to the test results, compared to the ACI 440.1R-15 bond strength equation. Upon reaching satisfactory performance and close agreement with the available results, the models were used to evaluate the effect of each of the eight parameters on concrete-FRP bond strength. For this purpose, a new dataset, made up of 56 tests, was generated in a way that a single parameter changes in a group of tests while keeping the remaining parameters constant. Sand coated (SC), spirally wrapped (SW), helically lugged (HL) and spirally wrapped & sand-coated (SW+SC) surface texture and CFRP, GFRP, AFRP and BFRP bars were considered in the study.

Results:

The analyses conducted within this study showed that the highest bond strength values are achieved in the hinged beam tests, which is followed by the beam-end, pull-out and splice beam tests. The bond strength values in the hinged beam tests are as high as about 2.5 times the respective values in the splice beam tests. The effect of each parameter on bond strength depends primarily on the test method. For instance, the pull-out results are highly affected by surface texture, since a bar is subjected to direct tension in this method. The bars with SW+SC surface had bond strengths as high as 65% of the strengths of bars with HL surface in PS method. Similarly, the bond strength increases with increasing concrete strength up to 35 MPa in HBS test, while it keeps increasing in PS and SS methods even when the concrete strength is above 35 MPa. Similar results were reported in the study for the remaining six variables.

Conclusion:

The degree of influence of each parameter on bond strength depends on the test method and the same parameter may even have opposite effects in different methods. GPR is an effective method in estimating concrete-FRP bond strength, if trained sufficiently. GPR can be used to generate new estimates for certain parameters so that more accurate analytical bond strength equations can be developed.



FRP donatı-beton aderansı deney yöntemlerinin aderansı etkileyen değişkenlere göre karşılaştırılması

Boğaçhan Başaran¹ , İlker Kalkan^{2*} 

¹Amasya Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, İnşaat Bölümü, 05100 Amasya, Türkiye

²Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- FRP donatı-beton aderansı deney yöntemlerinin karşılaştırılması
- Gauss Süreci Regresyonu (GPR)
- Aderansı etkileyen değişkenler

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 08.12.2019
Kabul: 20.02.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.656823

Anahtar Kelimeler:

Aderans deneyleri,
FRP donatı aderansı,
lif takviyeli polimer donatı,
FRP donatılı beton,
mekanik kilitlenme,
donatı sıyrılması

ÖZ

FRP donatı-beton aderansını belirlemek için uluslararası deney yönetmeliklerinde birçok deney yöntemi bulunmaktadır. Ancak, bu deney yöntemlerinin deney şartlarındaki farklılıklar FRP donatı-beton aderansını etkilemektedir. Dolayısıyla değişkenlerin aynı değerlerine göre yapılan deneylerde bile deneysel farklılıklardan ötürü farklı aderans gerilmeleri oluşmaktadır. Bu çalışmada, gauss süreci regresyonu (GPR) kullanılarak aderansı etkileyen faktörler deney yöntemlerine (mafsallı kiriş, kiriş ucundan çekip çıkarma, bindirme eki ve çekip çıkarma) göre ayrı ayrı belirlenmiştir. Çalışmada, donatı çapı, lif türü, yüzey özelliği, gömülme boyu, donatının beton içindeki konumu, pas payı ile beton basınç dayanımı ve enine donatı etkisi gibi sekiz değişken göz önüne alınmıştır. Bu sayede hem FRP donatı-beton aderansını etkileyen her değişkenin deneysel yöntemlerden ne kadar etkilendiği araştırılmış hem de aderans deney yöntemlerinin bu değişkenlere göre karşılaştırılması yapılmıştır. Dört aderans deney yönteminin aynı değişkenlere göre yapılan analizleri, deney yöntemlerine göre gerilme değerleri arasında dört kata varan farklar olduğunu göstermiştir. Mafsallı kiriş deneylerinden elde edilen ortalama aderans gerilmesi değerleri, çekip çıkarma deneylerinden elde edilen değerlerden %31, kiriş ucundan çekip çıkarma değerlerinden %3 ve bindirme eki değerlerinden %146 yüksek çıkmıştır. Aynı zamanda bu faktörlerin aderansa etki oranlarının deneysel yöntemlere göre değiştiği ve hatta aynı değişkenin farklı deneysel yöntemlerde zıt etkilere neden olabileceği gözlemlenmiştir.

Comparison of different FRP reinforcement-concrete bond test methods according to parameters affecting this bond

H I G H L I G H T S

- Comparison of FRP reinforcement-concrete bond test methods
- Gaussian process regression (GPR) analysis
- Parameters affecting bond

Article Info

Research Article
Received: 08.12.2019
Accepted: 20.02.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.656823

Keywords:

Bond test methods,
bond of FRP reinforcement,
fiber reinforced polymer
reinforcement,
FRP reinforced concrete,
mechanical interlocking,
debonding failure

ABSTRACT

There are many test methods in the international testing standards for the evaluation of FRP reinforcement-concrete bond. However, differences in test conditions of these methods affect FRP reinforcement-concrete bond. Therefore, even in the tests with identical test parameters, different bond strength values are attained due to experimental differences. In this study, the factors affecting FRP reinforcement-concrete bond were determined individually for four different test methods (hinged beam, beam-end, spliced beam and pullout tests) by using the gauss process regression (GPR) method. Accordingly, eight parameters affecting the bond strength, namely the diameter, fiber type, surface texture, embedment length, location in concrete and clear cover of reinforcement, the concrete compressive strength and the presence and degree of confining by means of transverse reinforcement were adopted as test parameters. In this way, the effects of each variable on bond strength were investigated for each test method and the methods were compared in terms of each parameter. The analyses on the four methods for identical test parameters depicted that there were differences in bond strength values as great as four times from one test method to another. The average bond strength values from the hinged beam tests were about 31, 3 and 146 % higher than the respective values from the pullout tests, beam-end tests and spliced beam tests, respectively. The degree of influence of each parameter on bond strength was established to depend on the test method and the same parameter was found to even have opposite effects on bond strength in different test methods.

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

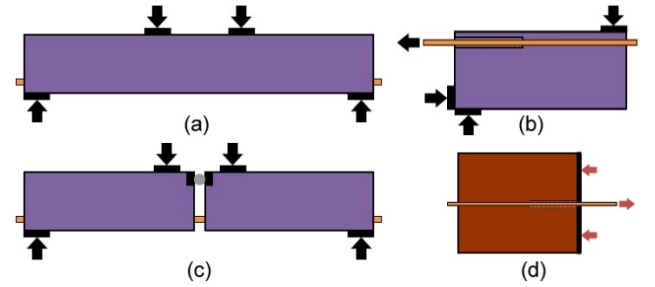
FRP donatılı beton elemanların mekanik davranışlarını, malzemelerin mekanik özellikleri kadar, FRP donatı ile beton arasındaki aderans da önemli bir ölçüde etkilemektedir. FRP donatı-beton aderansı, adezyon, mekanik kenetlenme ve sürtünme olmak üzere üç farklı mekanizma sonucu ortaya çıkmaktadır [1]. FRP donatının betonla olan aderansı birçok değişkene bağlıdır. Bu değişkenler, donatı lif türü (Aramid, bazalt, cam, karbon), donatı reçine türü (epoksi, polyester, vinilester), donatı elastisite modülü, donatı yüzey deformasyon şekli (nervürlü, kumlanmış, sargılı, oluklu vb.), donatı çapı, donatı gömülme boyu, donatı konumu, pas payı, donatı aralığı, beton basınç dayanımı, donatının maruz kaldığı çevre şartları ve betondaki sargılama etkisi (enine donatı varlığı) olarak sıralanabilir. Donatı ile beton arasında yeterli aderansın sağlanabilmesi için aderans boyunun ya da bindirme eki boyunun yeterli olması gerekir. Uluslararası FRP donatılı beton yönetmelik ve şartnameleri [2-5], aderans gerilmesinin tahmini için bu bahsedilen değişkenlerden bazılarını yer vererek, bu değişkenlere bağlı aderans gerilmesi ve kenetlenme boyu bağıntıları sunmuşlardır. Fakat, yönetmelik ve standartlarda yer alan bu bağıntıların beton-FRP aderansını etkileyen değişkenlerden sadece bazılarını dikkate aldığı ve değişkenlerden büyük kısmını ihmal ettiği görülmektedir. Ayrıca, bu bağıntılar genellikle aşırı güvenli sonuçlar vererek, gerçekte ihtiyaç duyulan kenetlenme boylarından çok daha büyük değerlerin kullanımını öngörmektedir.

Her ne kadar aderans boylarının belirlenebilmesi için bağıntılar geliştirilmiş olsa da aderans ve bindirme eki boyu deneylerine her zaman ihtiyaç duyulmaktadır. FRP donatı ile beton arasındaki aderans gerilmesinin belirlenmesinde çelik donatı ile beton arasındaki aderansı tespit etmek için kullanılan deneysel yöntemlerden faydalanılmaktadır. Bu deneyler, EN 10080-2005 [6], RILEM RC5 [7] ve RC6 [8] standartlarında çekip çıkarma ile mafsallı kiriş deneyleri ve ASTM A944-10 [9] yönetmeliğinde kiriş ucunda çekip çıkarma deneyleridir. FRP-donatı beton aderansı tespitinde kullanılacak yöntemlere yer veren birkaç yönetmelik de bulunmaktadır. Fakat, bu yönetmeliklerde geçen deney yöntemleri sınırlıdır. Bu bahsedilen yönetmeliklerden, ACI 440 3R-12 [10], JSCE-E539-1995 [11], ISO10406-1 [12] ve ASTM D7913 [13] yönetmelik ve standartları sadece çekip çıkarma deneyine yer vermektedir.

Araştırmacılar, bahsedilen bu deneysel yöntemlerden çekip çıkarma deneyini testin basitliğinden ve kolay yapılabilmesinden dolayı tercih etmektedir [14]. Fakat bu deneyin daha çok aderansı etkileyen değişkenlerin birbirleriyle karşılaştırılması için kullanılması gerektiği literatürde ve yönetmeliklerde belirtilmektedir [10]. Aderans kiriş deneylerinin eğilme etkisindeki elemanların davranışını daha iyi yansıttığı açıktır. Bu nedenle, bu deneylerin çekip çıkarma deneylerine göre daha gerçekçi sonuçlar verdiği de bilinmektedir [14]. Çekip-çıkarma deneylerinde donatı doğrudan çekme kuvvetlerine maruz kalırken, donatıyı çevreleyen beton çekme tesirinde değildir. Kiriş deneylerinde ise hem beton hem de donatı, eğilme etkisiyle

ortaya çıkan dolaylı çekmeye maruz kalmaktadır. Betonun çekmeye maruz kalmaması ve genellikle çatlamaması sebebiyle, çekip çıkarma deneylerinde elde edilen aderans değerlerinin kiriş deneylerinden daha yüksek olması beklenmektedir. Literatürde özdeş deneysel değişkenler kullanılarak yapılan kiriş deneylerinden elde edilen aderans gerilmesi değerlerinin çekip çıkarma deneylerinden elde edilen değerlerden genellikle daha düşük olduğu belirtilmektedir. Tighiouart vd. [15], kiriş deneylerinde donatıyı kuşatan betonun çekme etkisi altında olmasından ötürü çatlakların düşük gerilmelerde bile artarak aderans dayanımını düşürdüğünü belirlemiştir. Benzer olarak, Gudonis vd. [16] çalışmasında mafsallı kiriş deneylerinden elde edilen aderans gerilmesi değerlerinin çekip çıkarma deneylerindeki ilgili değerlerden daha düşük olduğunu bildirmiştir. Veljkovic vd. [17], merkezi çekip çıkarma deneylerinin dış merkezli deneylere göre daha düşük aderans gerilmesi değerleri verdiğini göstermiştir.

Geçmişte yapılmış olan bu çalışmalar, deneysel yöntem farklılıklarının FRP donatı aderansını ne ölçüde etkilediğini açıkça göstermektedir. Bu deneysel yöntemlerin deney şartlarındaki farklılıklar FRP donatının betona tutunması üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Dolayısıyla değişkenlerin özdeş değerleri için yapılan deneysel ölçümlerde bile deneysel farklılıklardan ötürü farklı aderans gerilmesi değerleri ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, makine öğrenmesi yöntemlerinden gauss süreci regresyon (GPR) yöntemi kullanılarak FRP donatı-beton aderansını etkileyen değişkenler, dört aderans deney yöntemine göre ayrı ayrı incelenmiştir. Çalışmada bindirme eki boyu ("Splice Specimen – SS"), kiriş ucundan çekip çıkarma ("End Beam Specimen – EBS"), mafsallı kiriş ("Hinged Beam Specimen – HBS") ve çekip çıkarma ("Pull-out Specimen – PS") deneyi olmak üzere dört aderans deney yöntemi kullanılmıştır (Şekil 1). Çalışma kapsamında, donatı çapı, donatı lif türü, donatı yüzey özelliği, donatı gömülme boyu, donatının beton içindeki konumu, net beton örtüsü kalınlığı, beton basınç dayanımı ve enine donatı etkisi gibi aderansı etkileyen sekiz değişken kullanılmıştır. Bu sayede FRP donatı-beton aderansını etkileyen her bir değişkenin deneysel yöntemlerden ne kadar etkilendiği araştırılmıştır. Buna ilaveten, deney yöntemlerinin aderansı etkileyen değişkenlere göre karşılaştırılması yapılarak, deneyler arasındaki farklılıklar her değişken açısından ortaya konmuştur.



Şekil 1. (a) Bindirme eki boyu deneyi (SS); (b) Kiriş ucundan çekip çıkarma deneyi (EBS); (c) Mafsallı kiriş deneyi (HBS); (d) Çekip çıkarma deneyi (PS) ((a) Spliced beam test; (b) Beam-end test; (c) Hinged beam test; (d) Pullout test))

2. YÖNTEM VE YÖNTEMİN DEĞERLENDİRİLMESİ (METHOD AND EVALUATION OF THE METHOD)

2.1. Yöntemin Geliştirilmesi İçin Kullanılan Veri Tabanları (Databases Used to Develop the Method)

Bu çalışmada, kiriş ucundan çekip çıkarma, mafsallı kiriş, bindirme eki boyu ve çekip çıkarma deneylerinden yararlanılarak oluşturulan dört ayrı veri tabanı kullanılmıştır. Çekip çıkarma (PO) deney veri tabanı, toplam 18 çalışma içindeki 432 deneysel çekip çıkarma deneyinden derlenerek oluşturulmuştur. Veri tabanında, kumlanmış (SC), sargılı (SW), nervürlü (HL) ve sargılı+kumlanmış (SW+SC) donatı yüzeyleri ile GFRP, CFRP, AFRP ve BFRP donatı türlerine ait deney sonuçları bulunmaktadır. Çekip çıkarma veri tabanının derlenmesinde, farklı yüzey ve donatı türlerinin yer aldığı çalışmalar [18-20]; sadece SC [21-25], sadece SW [26-28], sadece HL[1] yüzeyli GFRP çubukların test edildiği çalışmalar; SC ve SW yüzeyli [29-32] ile SC ve HL [33] yüzeyli GFRP çubukların beraber test edildiği çalışmalar ve sadece SW yüzeyli CFRP [34] çubukların test edildiği çalışmalar kullanılmıştır. Kiriş deneyleri veri tabanları ise, Quayyum'un [35] derlediği kiriş veri tabanının farklı kiriş deney yöntemlerine göre gruplandırılmasıyla elde edilmiştir. Bu derleme sonucu, kiriş ucundan çekip çıkarma (EBS) numunesi veri tabanı 203, mafsallı kiriş numunesi (HBS) veri tabanı 141 ve bindirme eki boyu (SS) numunesi kiriş deneyi veri tabanı 98 deneysel çalışmadan oluşturulmuştur.

Tüm veri tabanları, sekiz bağımsız değişken ve bir bağımlı değişkenden (aderans dayanımı, u) oluşmaktadır. FRP donatı-beton aderansı üzerinde etkisi olduğu düşünülen bu bağımsız değişkenler, donatı türü, donatı yüzey özelliği, donatı çapı (d_b), betonun silindirik basınç dayanımının karekökü ($\sqrt{f_c}$), pas payı (C), donatı gömülme boyu (L), enine donatı etkisi ($A_{tr}/(s n d_b)$) ve donatının kiriş içindeki konumu olarak sıralanabilir. Bu ifadelerde yer alan A_{tr} , toplam etriye kesit alanını; s , L boyu içindeki maksimum etriye aralığını; n ise, betona tutunması beklenen boyuna donatı çubuğu sayısını ifade etmektedir. Bu değişkenlerin veri tabanlarındaki aralıkları Tablo 1, Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4'te gösterilmiştir. Veri tabanlarında, SC, SW, HL ve SW+SC donatı yüzeyleri, sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 rakamları ile gösterilmiştir. GFRP, CFRP, AFRP ve BFRP donatı türleri ise sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 rakamları ile sembolize edilmiştir. Donatının kiriş içindeki yerleşimi gösterilirken, kiriş üst yüzeyinden 300 mm ve daha altta konumlanan donatılar için 1, 300 mm'nin üstünde konumlanan donatılar için 0 sayıları kullanılmıştır.

Bilindiği üzere, betonun çekme dayanımının hesaplanmasında kullanılan ampirik formüllerde, betonun basınç dayanımının kendisi değil, karekökü kullanılmaktadır. Kiriş aderans deneylerinde çekme donatısını çevreleyen beton, çekme gerilmelerine maruz kalmakta ve bu gerilmelerin betonun çekme dayanımını aşması durumunda eğilme çatlakları meydana gelmektedir. Bu eğilme çatlakları, beton-donatı aderansının azalmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple, beton-donatı aderansını belirleyen etkenlerden biri de betonun çekme dayanımıdır.

Dolayısıyla, betonun çekme dayanımını belirleyen basınç dayanımının karekökü ifadesi, bu çalışma kapsamında incelenen bağımsız deney değişkenlerinden biri olarak tercih edilmiştir.

Tablo 1. Çekip çıkarma deneyi veri tabanında girdi ve çıktı değişkenlerinin aralıkları
(Ranges of input and output parameters in pullout test database)

Değişkenler	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
Donatı Türü	1,000	4,000	1,159	0,455
Donatı yüzeyi	1,000	4,000	1,649	0,852
d_b (mm)	7,500	27,400	14,102	3,446
$\sqrt{f_c}$	3,487	9,612	6,843	1,665
C/d_b	0,500	15,464	4,691	2,689
L/d_b	2,000	46,063	8,520	7,773
$A_{tr}/(s n d_b)$	0,000	0,000	0,000	0,000
Donatı konumu	0,000	1,000	0,894	0,308
u (MPa)	1,140	34,418	13,063	7,062

Tablo 2. Kiriş ucundan çekip çıkarma deney veri tabanında girdi ve çıktı değişkenlerinin aralıkları
(Ranges of input and output parameters in beam-end test database)

Değişkenler	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
Donatı Türü	1,000	3,000	1,063	0,296
Donatı yüzeyi	1,000	3,000	2,259	0,636
d_b (mm)	6,350	27,407	16,484	4,572
$\sqrt{f_c}$	4,840	8,08	6,264	0,676
C/d_b	1,000	12,000	3,158	1,577
L/d_b	3,940	75,81	19,577	14,837
$A_{tr}/(s n d_b)$	0,000	0,118	0,007	0,018
Donatı konumu	0,000	1,000	0,762	0,427
u (MPa)	0,841	24,856	8,226	5,561

Tablo 3. Mafsallı kiriş deney veri tabanında girdi ve çıktı değişkenlerinin aralıkları
(Ranges of input and output parameters in hinged beam test database)

Değişkenler	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
Donatı Türü	1,000	3,000	1,273	0,550
Donatı yüzeyi	2,000	3,000	2,667	0,474
d_b (mm)	6,350	28,575	15,833	6,524
$\sqrt{f_c}$	5,010	7,420	5,961	0,616
C/d_b	1,000	9,340	3,790	2,091
L/d_b	3,560	78,000	14,878	9,895
$A_{tr}/(s n d_b)$	0,000	0,314	0,068	0,108
Donatı konumu	0,000	1,000	0,838	0,370
u (MPa)	0,802	25,484	9,264	4,518

Tablo 4. Bindirme eki boyu deneyi veri tabanında girdi ve çıktı değişkenlerinin aralıkları
(Ranges of input and output parameters in spliced beam test database)

Değişkenler	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
Donatı Türü	1,000	3,000	1,544	0,633
Donatı yüzeyi	1,000	3,000	2,088	0,958
d_b (mm)	8,000	19,100	13,588	3,450
$\sqrt{f_c}$	5,200	7,000	5,987	0,473
C/d_b	1,310	5,000	2,779	0,940
L/d_b	10,000	147,370	52,464	29,705
$A_n/(s d_b)$	0,018	0,393	0,062	0,095
Donatı konumu	0,000	1,000	0,882	0,325
u (MPa)	1,632	12,505	3,879	2,299

2.2. Gauss Süreci Regresyonu (GPR)(Gauss Process Regression)

Gauss süreci, sınıflandırma ve regresyon modellerinde temel olarak kullanılan, parametrik olmayan güçlü bir yöntemdir. Bu süreç parametrik olmadığı için, seçilen temel fonksiyonun değişkenlerine uymak yerine, tüm ölçülen veriler arasındaki korelasyonu anlamaya çalışır. Gauss süreci, her bir alt kümesi ortak Gauss dağılımlı, rassal değişkenlerin bir birleşimidir. Gauss dağılımı, çan eğrisi şekline sahip, ortalama ve kovaryans ile tanımlanan sürekli bir olasılık dağılımıdır [36]. Tek değişkenli Gauss dağılımı, μ : ortalama ve σ : kovaryans olmak üzere Eş. 1’de verilen fonksiyon ile tanımlanabilir [37].

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

Bir Gauss süreci, bir Gauss rassal fonksiyondur. Bu rassal fonksiyonun ortalama fonksiyonu ($m(x)$) ve kovaryans fonksiyonu ($k(x, x')$) ile Eş 2. kullanılarak tanımlanır [38-39].

$$f(x) \sim GP(m(x), k(x, x')) \quad (2)$$

Birçok uygulamada, verilen Gauss sürecinin ortalama fonksiyonuyla ilgili ön bilgi yoktur. Gauss süreçleri normal dağılımlı rassal değişkenlerin doğrusal kombinasyonları oldukları için, ortalama fonksiyon basitçe sıfır kabul edilir. Modellenen süreç hakkında yeterli bilginin olduğu durumlar için ortalama fonksiyon sıfırdan farklı olmalıdır. Mümkün olan kovaryans fonksiyonlarından en sık kullanılanı olan karesel üstel kovaryans fonksiyonu Eş.3’te verilmiştir [36-38].

$$k(x, x') = \sigma_f^2 \exp\left(-\frac{1}{2l^2} |x - x'|^2\right) \quad (3)$$

Bu kovaryans fonksiyonu, radyal tabanlı fonksiyon olarak isimlendirilir. Eşitlikten, girdiler birbirine yaklaştıkça ve girdi artışları arasındaki mesafe üstel olarak azaldıkça, iki girdi arasındaki kovaryansın bire yaklaşıcağı görülmektedir. Burada σ_f ve l , temel olarak bir sinir ağının hiper değişkenlerine benzedikleri için hiper değişkenler olarak adlandırılmaktadır. Çoğu durumda değişken seçimi, Gauss sürecinin performansını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Kovaryans fonksiyonu olarak karesel üstel fonksiyon

kullanılan durum için regresyonun, sonsuz sayıda Gauss şekilli temel fonksiyon kullanılarak elde edilen regresyona eşdeğer olduğu görülebilir. Gauss süreci, model çıktısı ortalama ve varyans cinsinden ifade edilen bir normal dağılımdır. Ortalama değer, en yüksek olasılıklı çıktıyı temsil ederken, varyans ile güvenilirlik ölçüsü yorumlanabilir [36].

2.3. Performans Ölçütleri (Performance Criteria)

Bu çalışmada, Gauss süreci regresyon yönteminin tahmin performansını değerlendirmek için Korelasyon Katsayısı (“Correlation Coefficient- r ”), Ortalama Mutlak Yüzde Hata (“Mean Absolute Percentage Error- MAPE”), Hataların Karelerinin Ortalamasının Karekökü (“Root Mean Square Error – RMSE”) gibi istatistiksel değerlendirme ölçütleri kullanılmıştır. Çalışmada deneysel aderans değerleri ile yöntemden elde edilen tahmini aderans değerleri arasındaki ilişkinin varlığını, yönünü ve şiddetini ölçmek maksadı ile Eş. 4 kullanılarak korelasyon analizi yapılmıştır.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

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

Deneysel aderans değerleri ile yöntemden elde edilen tahmini aderans değerleri arasındaki hataları yüzdesel olarak gösterebilmek maksadı ile Ortalama Mutlak Yüzde Hata (Mean Absolute Percentage Error-MAPE) Eş 5. kullanılarak hesaplanmıştır.

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_f - y_e}{y_e} \right| \quad (5)$$

Burada, y_f =tahmin edilen değerler; y_e =deneysel değerler; n =deney sayısıdır.

Deneysel aderans değerleri ile yöntemden elde edilen tahmini aderans değerleri arasındaki hataların ortalama büyüklüğünü ölçmek için ise Hata Kareleri Ortalamasının Karekökü (Root Mean Square Error-RMSE) Eş 6. kullanılarak hesaplanmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_f - y_e)^2} \quad (6)$$

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

2.4. Kullanılan Yöntemin Tahmin Performansının Değerlendirilmesi

(Evaluation of Estimated Performance of the Method Used)

Veri tabanlarında kullanılan deneylerin rastgele olarak %70’i gauss süreci regresyon yönteminin eğitimi için, deneylerin %15’i bulunan sonuçların doğrulanması için ve deneylerin

%15'i ise yöntemin testi için kullanılmıştır. Her bir kiriş veri tabanı için ayrı ayrı GPR yöntemi kullanılarak elde edilen tahmini aderans dayanımları, deneysel aderans dayanımları ile karşılaştırılmıştır. Buna ilaveten, her bir kiriş veri tabanı için ACI 440.1R-15 [5] yönetmeliğindeki aderans bağıntısından (Eş.7) elde edilen aderans dayanımları da deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. GPR yöntemi ve aderans bağıntısı (Eş.7) kullanılarak tahmin edilen dayanımlar ile deneysel dayanımlar arasında ilişkinin düzeyi (r) ve değerler arasındaki hataların ölçütleri (RMSE ve MAPE) her bir deney modeli için Şekil 2'de gösterilmiştir.

$$u = \frac{\sqrt{f_c}(0.332 + 0.025 \frac{C}{d_b} + 8.3 \frac{d_b}{l_e})}{\alpha} \quad (7)$$

Burada, u = aderans gerilmesi (MPa); l_e = FRP donatının gömülme boyu (mm); α = donatı yerleşim faktörü (kiriş alt yüzünden 305mm'den daha yüksekte konumlandırılan donatılar için 1,5, diğer tüm durumlarda 1,0); $\sqrt{f_c}$ = beton basınç dayanımının karekökü (Mpa); C = pas payı ya da donatı aralığının yarısı değerlerinden küçük olanı (mm); d_b =donatı çapı (mm); $C/d_b=3,5$ 'den büyük olmamalıdır. Eş. 7'ye kıyasla, GPR yöntemi kullanılarak elde edilen tahmini aderans dayanımları ile deneysel aderans dayanımları arasında tüm kiriş modellerinde çok yüksek bir doğrusal ilişki (r) olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 2). Buna ilaveten, GPR yöntemi, aderans dayanımlarını Eş. 7'ye göre çok düşük hata değeri ve oranıyla tahmin edebilmektedir. Analiz sonuçlarına göre, PS deneylerinde GPR yöntemi %10, Eş. 7 ise %36; EBS deneylerinde GPR yöntemi %13, Eş. 7 ise %32; HBS deneylerinde GPR yöntemi %25, Eş. 7 ise %44; ve SS deneylerinde GPR yöntemi %8, Eş. 7 ise %36 ortalama mutlak yüzde hatayla tahmin yapabilmektedir. Özellikle FRP donatıların aderanslarını etkileyen birçok değişken olmasına karşın GPR modellerinin deneysel dayanımlara çok yakın sonuçlar üretebildiği gözükmektedir. Ayrıca, GPR yönteminin Eş. 7'ye kıyasla da tüm deneysel sonuçları tahmin etmede çok daha üstün bir performans sergilediği belirlenmiştir.

2.5. Karşılaştırma Veri Tabanı ve Tahmini Sonuçlar (Comparison Database and Estimated Results)

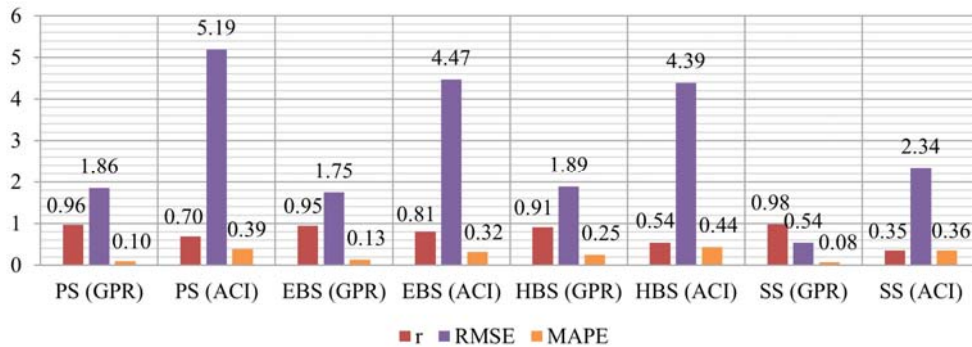
Bölüm 2.1'de her deney yöntemine göre ayrı ayrı verilen dört deneysel veri tabanı kullanılarak, her deneysel yöntem için bir GPR modeli oluşturulmuştur. Bu şekilde hem

deneysel yöntemlere göre hem de aderansı etkileyen değişkenlere göre aderans tahmininde bulunan bir model kurulmuştur. Bu modelin tahmin performansı Bölüm 2.4'de değerlendirilmiştir. Çalışmada, FRP donatı-beton aderansını etkileyen faktörlerin deneysel yöntemlere göre tespiti için karşılaştırma veri tabanı (Tablo 5) kullanılmıştır. Bu veri tabanı, yalnızca bir deney değişkeninin etkisini incelemek üzere diğer deney değişkenlerinin sabit tutulması (bir deney değişkeninin izole edilmesi) esasına göre tasarlanmıştır. Bu şekilde veri tabanı, donatı çapı, donatı lif türü, donatı yüzey özelliği, donatı gömülme boyu, donatının beton içindeki konumu, pas payı, beton basınç dayanımı ve enine donatı etkisi gibi aderansı etkileyen sekiz değişkenden her birinin etkisinin birbirinden bağımsız şekilde incelenebilmesine olanak sağlamıştır. Her deney yöntemi için oluşturulan GPR modelinde, veri tabanında bulunan 56 adet karşılaştırma deneyine ait donatı çapı, donatı lif türü, donatı yüzey özelliği, donatı gömülme boyu, donatının beton içindeki konumu, pas payı, beton basınç dayanımı ve enine donatı değişkenleri girdi olarak kullanılmıştır. Ancak BFRP donatının çekip çıkarma deneyleri haricinde kullanılmamasından ötürü bu donatı türüne Tablo 5'de yer verilmemiştir. Deneysel yöntemlere göre oluşturulan GPR modellerinden tahmini aderans gerilmesi değerleri çıktı olarak alınmıştır. Bununla beraber, 56 karşılaştırma deneyine ait deneysel değişkenlerden Eş. 7'ye göre de analitik aderans gerilmesi elde edilmiştir.

3. DENEY YÖNTEMLERİNİN ADERANSI ETKİLEYEN DEĞİŞKENLERE GÖRE KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF EXPERIMENTAL METHODS ACCORDING TO PARAMETERS AFFECTING BOND STRENGTH)

Bu bölümde, her deney için ayrı kurulan GPR modellerine dayanarak elde edilen 56 adet aderans dayanımı karşılaştırılmıştır. Elde edilen bu sonuçlar, FRP donatı-beton aderansını etkileyen faktörlerin etkilerinin deneysel yöntemlere göre ayrı ayrı değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Buna ilaveten, bu bölümde deney yöntemlerinin aderansı etkileyen değişkenlere göre karşılaştırılması yapılmıştır.

Şekil 3'ten de görüleceği üzere, neredeyse tüm aderans deney yöntemlerinde donatı çapı arttıkça aderans gerilmesi azalmıştır. Bu durumun, daha büyük donatı çaplarında beton



Şekil 2. Tahmin edilen sonuçlarla deneysel sonuçlar arasındaki r , RMSE ve MAPE değerleri
(r , RMSE and MAPE values of the predicted and experimental results)

Tablo 5. Karşılaştırma veri tabanı ve tahmini sonuçlar (Comprasion database and estimated results)

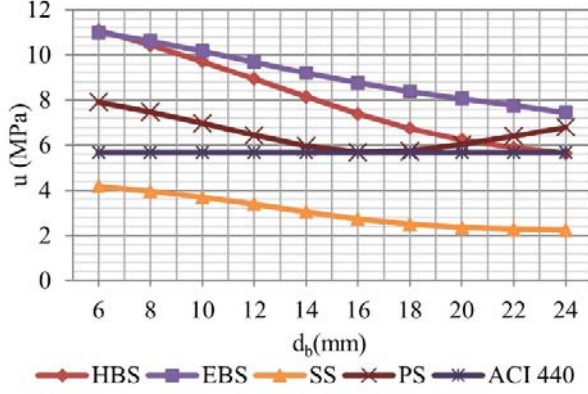
Karşılaştırma Deney Değişkenleri										Deney Yöntemine Göre Elde Edilen Aderans Değerleri (MPa)				
No	Donatı Türü ¹	Pozisyon ²	Yüzey Özelliği ³	d _b (mm)	√f _c	C/d _b	L/d _b	A _m /(s d _b)	HBS ⁴	EBS ⁴	SS ⁴	PS ⁴	ACI 440 ⁴	
1	1	1	3	6	5,91	3	15	0	11,08	10,99	4,19	7,91	5,67	
2	1	1	3	8	5,91	3	15	0	10,43	10,62	3,95	7,48	5,67	
3	1	1	3	10	5,91	3	15	0	9,71	10,18	3,69	6,97	5,67	
4	1	1	3	12	5,91	3	15	0	8,93	9,69	3,38	6,44	5,67	
5	1	1	3	14	5,91	3	15	0	8,14	9,2	3,05	5,96	5,67	
6	1	1	3	16	5,91	3	15	0	7,39	8,75	2,73	5,68	5,67	
7	1	1	3	18	5,91	3	15	0	6,74	8,37	2,5	5,73	5,67	
8	1	1	3	20	5,91	3	15	0	6,24	8,05	2,35	6,02	5,67	
9	1	1	3	22	5,91	3	15	0	5,88	7,75	2,27	6,4	5,67	
10	1	1	3	24	5,91	3	15	0	5,64	7,45	2,24	6,79	5,67	
11	1	1	3	12	5,48	3	15	0	9,33	11	3,11	6,27	5,26	
12	1	1	3	12	5,92	3	15	0	8,93	9,67	3,39	6,44	5,68	
13	1	1	3	12	6,32	3	15	0	8,95	8,45	3,61	6,65	6,07	
14	1	1	3	12	6,71	3	15	0	9,03	7,55	3,86	6,94	6,44	
15	1	1	3	12	7,07	3	15	0	9,04	7,03	4,1	7,3	6,79	
16	1	1	3	12	7,75	3	15	0	8,91	6,56	4,47	8,27	7,44	
17	1	1	3	12	8,37	3	15	0	8,84	6,29	4,67	9,45	8,03	
18	1	1	3	12	8,94	3	15	0	8,83	6,06	4,74	10,65	8,59	
19	1	1	3	12	9,49	3	15	0	8,84	5,88	4,76	11,67	9,11	
20	1	1	3	12	5,91	1	15	0	8,92	9,2	3,21	5,66	5,38	
21	1	1	3	12	5,91	1,5	15	0	8,85	9,26	3,25	5,78	5,45	
22	1	1	3	12	5,91	2	15	0	8,82	9,36	3,29	5,95	5,53	
23	1	1	3	12	5,91	2,5	15	0	8,84	9,5	3,33	6,17	5,6	
24	1	1	3	12	5,91	3	15	0	8,93	9,69	3,38	6,44	5,67	
25	1	1	3	12	5,91	3,5	15	0	9,07	9,91	3,47	6,74	5,75	
26	1	1	3	12	5,91	4	15	0	9,26	10,13	3,59	7,07	5,75	
27	1	1	3	12	5,91	4,5	15	0	9,46	10,35	3,74	7,43	5,75	
28	1	1	3	12	5,91	5	15	0	9,67	10,56	3,9	7,79	5,75	
29	1	1	3	12	5,91	3	8	0	11,21	10,99	3,42	6,7	8,54	
30	1	1	3	12	5,91	3	10	0	10,52	10,62	3,41	6,58	7,31	
31	1	1	3	12	5,91	3	12	0	9,86	10,25	3,4	6,5	6,49	
32	1	1	3	12	5,91	3	14	0	9,23	9,87	3,39	6,45	5,91	
33	1	1	3	12	5,91	3	15	0	8,93	9,69	3,38	6,44	5,67	
34	1	1	3	12	5,91	3	16	0	8,64	9,51	3,38	6,42	5,47	
35	1	1	3	12	5,91	3	18	0	8,08	9,14	3,37	6,4	5,13	
36	1	1	3	12	5,91	3	40	0	4,13	5,87	3,17	6,52	3,63	
37	1	1	3	12	5,91	3	15	0	8,93	9,69	3,38	6,44	5,67	
38	1	1	3	12	5,91	3	15	0,05	9,15	9,55	3,64	6,44	5,67	
39	1	1	3	12	5,91	3	15	0,1	9,49	8,32	3,91	6,44	5,67	
40	1	1	3	12	5,91	3	15	0,15	9,87	7,74	4,21	6,45	5,67	
41	1	1	3	12	5,91	3	15	0,2	10,23	7,62	4,54	6,46	5,67	
42	1	1	3	12	5,91	3	15	0,25	10,57	7,62	4,87	6,47	5,67	
43	1	1	3	12	5,91	3	15	0,3	10,86	7,65	5,19	6,48	5,67	
44	1	1	3	12	5,91	3	15	0,35	11,1	7,69	5,48	6,5	5,67	
45	1	1	3	12	5,91	3	15	0,4	11,31	7,73	5,73	6,51	5,67	
46	1	1	3	12	5,91	3	15	0,45	11,47	7,77	5,93	6,53	5,67	
47	1	1	3	12	5,91	3	15	0,5	11,6	7,82	6,08	6,55	5,67	
48	1	0	3	12	5,91	3	15	0	10,28	10,13	2,67	6,82	3,78	
49	1	1	3	12	5,91	3	15	0	8,93	9,69	3,38	6,44	5,67	
50	1	1	1	12	5,91	3	15	0	9,77	10,52	3,79	9,51	5,67	
51	1	1	2	12	5,91	3	15	0	10,14	9,49	3,32	8,72	5,67	
52	1	1	3	12	5,91	3	15	0	8,93	9,69	3,38	6,44	5,67	
53	1	1	4	12	5,91	3	15	0	9,77	10,06	3,53	10,45	5,67	
54	1	1	3	12	5,91	3	15	0	8,93	9,69	3,38	6,44	5,67	
55	2	1	3	12	5,91	3	15	0	9,97	7,45	4,53	8,69	5,67	
56	3	1	3	12	5,91	3	15	0	10,68	8,81	3,17	8,87	5,67	

¹Donatı türü: GFRP için 1; CFRP için 2; AFRP için 3²Donatı pozisyonu: 300mm yüksekte konumlanan donatılar için 0; alçakta konumlananlar için 1³Donatı yüzey özelliği: Kumlanmış için 1; sargılı için 2; nervürlü için 3; sargılı+kumlanmış için 4⁴Deney türü: HBS=Mafsallı kiriş deneyi; EBS=Kiriş ucundan çekip çıkarma deneyi; SS=Bindirme eki boyu deneyi; PS=Çekip çıkarma deneyi; ACI 440=ACI 440.1R-15 yönetmeliğinden bulunan aderans bağıntısı

karişim suyunun donatı altına birikmesinden dolayı büyük boşlukların oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [40, 41]. Ancak çekip çıkarma deneyinde donatı çapının arttırılmasıyla aderans gerilmesi önce düşmüş, ancak 18 mm

donatı çapının aşılmasıyla beklenmedik bir şekilde artmıştır. Donatı çapındaki artışlardan en fazla etkilenen deney yönteminin ise mafsallı kiriş deney yöntemi (HBS) olduğu görülmektedir. ACI 440.1R-15'in [5] önerdiği aderans

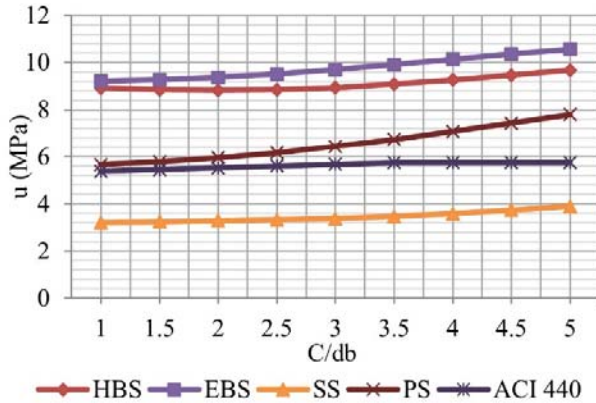
bağıntısında (Eş. 7) donatı çapı değişkeni bulunmasına rağmen, donatı çapındaki değişim aderansı etkilememiştir. Çünkü bağıntıda (Eş. 7) pas payı ve gömülme boyu, donatı çapına göre normalize edilmiştir.



Şekil 3. Donatı çapının aderansa etkisi
(The effect of reinforcement diameter on bond strength)

Donatı çapı değişimine göre elde edilmiş tüm aderans gerilmesi değerlerinin ortalamaları karşılaştırıldığında, en büyük aderans gerilmesi ortalamaları sırasıyla EBS (9,10 MPa), HBS (8,02 MPa), PS (6,54 MPa) ve SS (3,03 MPa) deneylerinde görülmektedir.

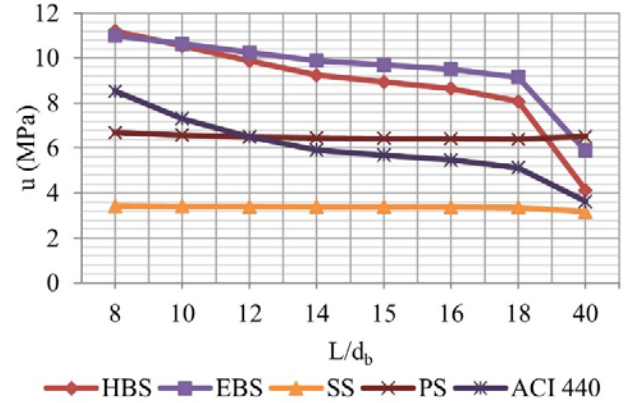
Şekil 4'ten de görüleceği üzere, neredeyse tüm aderans deney yöntemlerinde pas payı arttıkça aderans gerilmesi değeri de artmıştır. $2d_b$ pas payı kalınlığından $5d_b$ pas payı kalınlığına kadar aderans dayanımı EBS deneyinde %13, HB deneyinde %10, PS deneyinde %31 ve SS deneyinde ise %19 artmıştır. Bu durumun C/d_b oranı 2'den büyük numunelerde göçme tipinin beton yarıma göçmesinden sıyrılmaya göçmesine dönmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [42, 43] Pas payı artışlarından en fazla etkilenen deney yöntemi ise çekip çıkarma deneyi olmuştur. ACI 440.1R-15 [5] yönetmeliğinin önerdiği aderans bağıntısından hesaplanan dayanım değerleri (Eş. 7), $3,5d_b$ pas payı kalınlığının ötesinde pas payı artışından etkilenmemektedir.



Şekil 4. Pas payının aderansa etkisi
(The effect of concrete cover on bond strength)

Pas payı değişimine göre elde edilmiş tüm aderans gerilmesi değerlerinin ortalamaları karşılaştırıldığında, en büyük aderans gerilmeleri sırasıyla EBS (9,77 MPa), HBS (9,09 MPa), PS (6,56 MPa) ve SS (3,46 MPa) deneyleri için elde edilmiştir.

Şekil 5'ten de görüleceği üzere, neredeyse tüm aderans deney yöntemlerinde gömülme derinliği arttıkça aderans gerilmesi değeri düşmüştür. Bu durumun, FRP donatının gömülme derinliğinin artırılmasıyla, tekdüze olmayan aderans gerilmesi dağılımları nedeniyle maksimum aderans dayanımlarının azalmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır [41, 44-47]. Ancak çekip çıkarma (PS) ve bindirme eki boyu (SS) deneylerinde aderans gerilme değerlerindeki düşüş önemsiz boyutlardadır. Bu durumun, çekip çıkarma deneylerinin genellikle $5d_b$ ile $10d_b$ gömülme boylarında yapılmasından dolayı, GPR modelinin eğitilmesinde kullanılan verinin bu sınırlar arasında kalması ve bu sınırlar dışında modelin etkili tahminler yapamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Gömülme boyu değişikliklerinden en fazla etkilenen deney yöntemi ise mafsallı kiriş deneyi olmuştur. ACI 440.1R-15'in [5] önerdiği aderans bağıntısından (Eş. 7) hesaplanan aderans değerleri de gömülme boyu etkisinden en az mafsallı kiriş değerleri kadar etkilenmiştir.

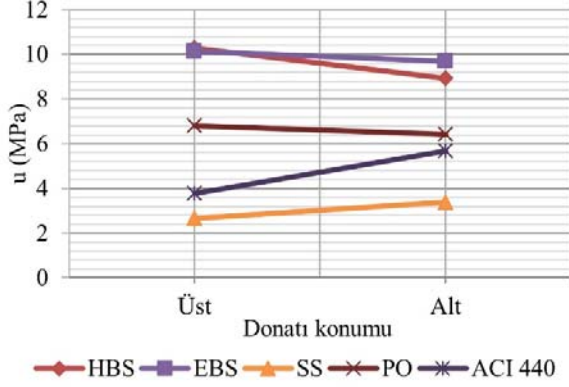


Şekil 5. Gömülme boyunun aderansa etkisi
(The effect of reinforcement embedment length on bond strength)

Gömülme boyu değişimine göre elde edilmiş tüm aderans gerilmesi değerlerinin ortalamaları karşılaştırıldığında, en büyük aderans gerilmeleri sırasıyla EBS (9,49MPa), HBS (8,82 MPa), PS (6,50 MPa) ve SS (3,36 MPa) deneylerinde ortaya çıkmıştır.

Literatürde, deney numunelerinde numune yüksekliğinin 300 mm'den daha büyük olması durumunda, numune üst bölgesine yerleştirilmiş donatıların, alt bölgeye yerleştirilenlere göre daha düşük aderans gerilmesi değerlerine sahip olduklarından bahsedilmiştir [35, 15] Bu durumun, kalıba yerleştirilme esnasında beton içerisindeki hava, su ve ince agreganın betonun üst kısmına doğru hareket etmesi ile üst yatay donatıyı çevreleyen katmanın, dayanımının düşük bir karışımından meydana gelmesinden kaynaklandığını düşünülmektedir [48]. Ancak GPR

yöntemiyle bulunan tahmini dayanımlar incelendiğinde EBS, HBS ve PS deneylerinde donatı konumunun zıt etkileri olduğu görülmektedir (Şekil 6). Bununla beraber, SS deney yöntemi için elde edilen sonuçlar ile ve ACI 440.1R-15 [5] yönetmeliğinin önerdiği aderans bağıntısından (Eş. 7) elde edilen analitik değerlerin literatürdeki deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir.



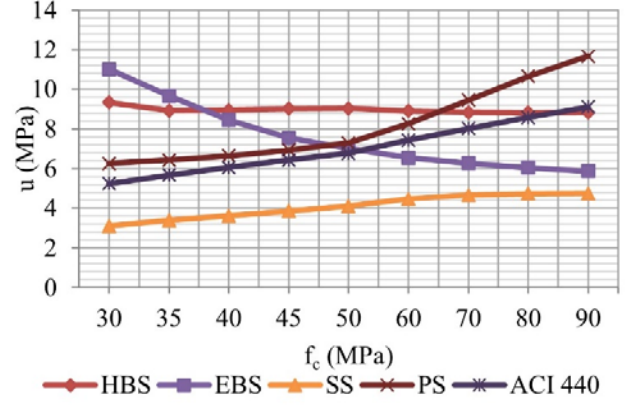
Şekil 6. Donatı konumunun aderansa etkisi
(The effect of reinforcement position on bond strength)

Donatı konumu değişimine göre elde edilmiş tüm aderans gerilmesi değerlerinin ortalamaları karşılaştırıldığında ise, en büyük aderans gerilmeleri sırasıyla EBS (9,91MPa), HBS (9,61 MPa), PS (6,63 MPa) ve SS (3,03 MPa) deneylerinde görülmektedir.

Beton basınç dayanımı değişimi, farklı aderans deneylerinde aderans dayanımı üzerinde farklı etkilere sahiptir (Şekil 7). Buna göre, Çekip çıkarma (PS) ve bindirme eki boyu deneylerinde (SS), beton basınç dayanımı arttıkça aderans dayanımının arttığı, hatta 50 MPa dayanım değerinin ötesinde beton basınç dayanımının aderansa etkisinin arttığı görülmektedir. Ancak, mafsallı kiriş deneylerinde beton basınç dayanımının aderansa etkisi 35MPa'dan sonra çok sınırlı kalmıştır. Kiriş ucundan çıkarma deneylerinde ise beton basınç dayanımı artışı aderansı olumsuz olarak etkilemiştir. ACI 440.1R-15'in [5] önerdiği aderans bağıntısından (Eş. 7) elde edilen değerler, dayanım artışından olumlu yönde etkilenmektedir ve bu olumlu etki yönetmelik bağıntısının deney tabanlı olmasından kaynaklanmaktadır. Literatürde de beton basınç dayanımının aderansa etkisi üzerinde farklı sonuçlara ulaşılmıştır. 30 MPa'dan daha büyük beton basınç dayanımlarında aderans göçmesinin donatının yüzeyindeki soyulmadan dolayı ortaya çıktığı [49] ve FRP donatıyı oluşturan reçine ve lif arasındaki katmanlar arası ('interlaminar') kesme kuvvetinin aderans gerilmelerini etkilediği belirtilmiştir [19]. Fakat bu çalışmaların aksine, Veljkovic vd. [17], aderans gerilmesindeki artışın beton basınç dayanımındaki artışla beraber betondaki çatlakların gecikmesinden dolayı ortaya çıktığı sonucuna varmıştır.

Beton basınç dayanımı değişimine göre elde edilmiş tüm aderans gerilmesi değerlerinin ortalamaları

karşılaştırıldığında ise en büyük aderans gerilmeleri sırasıyla HBS (8,96 MPa), PS (8,18 MPa), EBS (7,61 MPa) ve SS (4,08 MPa) deneylerinde görülmektedir.



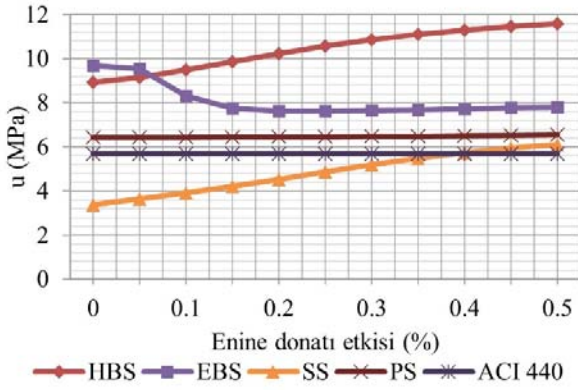
Şekil 7. Beton basınç dayanımının aderansa etkisi
(The effect of concrete compressive strength on bond strength)

Bu çalışma kapsamında ele alınan farklı deneysel metotlara göre, enine donatı varlığının ve bu donatının oranının aderans dayanımı üzerindeki etkileri, Şekil 8'de gösterilmiştir. Bu şekilden de görüleceği üzere, mafsallı kiriş ve bindirme eki boyu deneylerinde enine donatı oranının artmasıyla aderans dayanımı sürekli olarak artmaktadır. Literatürde de, enine donatının, aderans dayanımını %10-15 arasında arttırdığı belirtilmektedir [50]. Bu durum, özellikle dikmelerinde dahi etriye bulunması öngörülen [51] ve donatının korozyona açık olması sebebiyle FRP donatının olası kullanım alanlarından biri olarak düşünülebilecek boşluklu betonarme kirişler açısından da önem arz etmektedir. Benzer şekilde, Jiang vd. [47], enine donatı oranının artmasının göçme tipini önemli derecede etkileyen çatlakları engelleyerek, aderans dayanımını arttırdığını belirtmiştir. Ancak, beton basınç dayanımının aderansa etkisinde olduğu gibi, enine donatının aderans dayanımına katkısı da tartışmalıdır. ACI 440.1R-15 [5], FRP donatıların çelik donatılara göre daha küçük dış alanlarına sahip olmalarından dolayı, enine donatı varlığının aderans dayanımını arttırmayabileceğini belirtmektedir. Nitekim bu durum, çekip çıkarma deneyinden ve çekip çıkarma deneyi tabanlı ACI 440.1R-15 [5] bağıntısına göre (Eş. 7) elde edilen aderans sonuçlarında da görülmektedir (Şekil 8). Kiriş ucundan çekip çıkarma deneylerinde ise, özellikle %0,05 enine donatı oranının ötesinde aderansın ciddi bir şekilde azaldığı sonucuna ulaşılmaktadır.

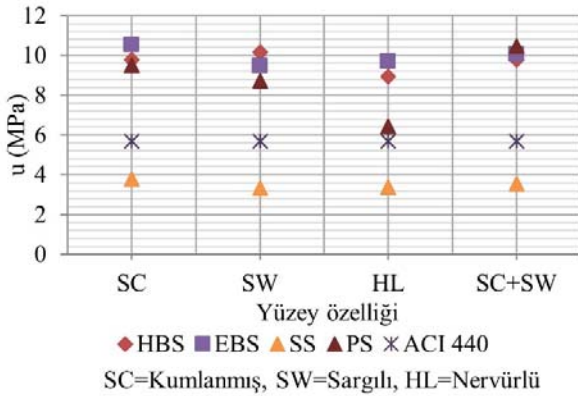
Enine donatı oranının değişimine göre elde edilmiş tüm aderans gerilmesi değerlerinin ortalamaları karşılaştırıldığında, en büyük aderans gerilmeleri sırasıyla HBS (10,41 MPa), EBS (8,11 MPa), PS (6,48 MPa), ve SS (4,82 MPa) deneylerinden elde edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında aderans dayanımı üzerindeki etkileri araştırılan değişkenlerden birisi de çubuk yüzey özelliğidir (Şekil 9). Bu analizlerin sonuçlarına göre, bindirme eki boyu

deneylerinden elde edilen aderans dayanımı, donatı yüzey deformasyon şekillerinden neredeyse hiç etkilenmemiştir. Oysaki çekip çıkarma deneylerinden elde edilen aderans dayanımları arasında yüzey deformasyon şekillerine bağlı olarak büyük farklar (%63) ortaya çıkmıştır. Ancak, çekip çıkarma deneyi tabanlı ACI 440.1R-15 [5] yönetmeliğinde geçen aderans bağıntısında (Eş. 7) yüzey deformasyon şekillerinin etkisi göz önüne alınmamıştır. Mafsallı kiriş ile kiriş ucundan çekip çıkarma deneylerinde aderans dayanımları yüzey özelliği değişimlerinden küçük oranlarda (%10-14) etkilenmişlerdir. Mafsallı kiriş (HBS), kiriş ucundan çekip çıkarma (EBS) ve çekip çıkarma (PS) deneylerine göre kalın kumlamaya (SC) ve spiral sargı (SW) yüzey işlemlerinin beraber uygulandığı donatı çubukları, en yüksek aderans gerilmesi değerlerine ulaşmıştır.



Şekil 8. Enine donatı oranının aderansa etkisi
(The effect of transverse reinforcement ratio on bond strength)

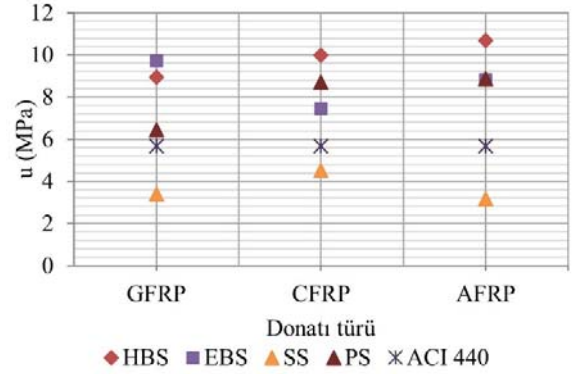


Şekil 9. Donatı yüzey özelliğinin aderansa etkisi
(The effect of reinforcement surface properties on bond strength)

Donatı yüzey özelliği değişimine göre elde edilmiş tüm aderans gerilmesi değerlerinin ortalamaları karşılaştırıldığında en büyük aderans gerilmeleri sırasıyla EBS (9,94 MPa), HBS (9,66 MPa), PS (8,78 MPa), ve SS (3,51 MPa) deneylerinde görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında son olarak donatı lif türünün aderans dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır (Şekil 10). Donatı

lif türleri arasındaki farklar aderans gerilme değerlerini %30'a kadar etkilemiştir. Ancak deneysel yöntemler arasında bir karşılaştırma yapıldığında, donatı lif türünün aderansa etkisi çok çeşitli düzeylerde gerçekleşmiştir. Kiriş ucundan çekip çıkarma deneyinde elde edilen büyük aderans gerilmesi GFRP donatılı numunede ve en düşük değer CFRP donatılı numunede ölçülmüş ve AFRP donatılı numune ise bu iki numune arasında bir aderans dayanımı göstermiştir. Ancak bindirme eki boyu deneylerinde en büyük aderans gerilmeleri sırasıyla CFRP, GFRP ve AFRP donatılı numunelerde ölçülmüştür. Son olarak, mafsallı kiriş ve çekip çıkarma deneylerinde birbirlerine benzer fakat diğer deneylerden farklı bir sıralama ortaya çıkmış ve en büyük aderans gerilmeleri sırasıyla GFRP, CFRP ve AFRP donatılı numunelerde ölçülmüştür. Ancak, çekip çıkarma deneyi tabanlı ACI 440.1R-15 [5] yönetmeliğinde geçen aderans bağıntısında (Eş. 7) donatı lif türü etkisi göz önünde bulundurulmamıştır.



Şekil 10. Donatı lif türünün aderansa etkisi
(The effect of reinforcement fiber type on bond strength)

Donatı lif türü değişimine göre elde edilmiş tüm aderans gerilmesi değerlerinin ortalamaları karşılaştırıldığında, en büyük aderans gerilmeleri sırasıyla HBS (9,86 MPa), EBS (8,65 MPa), PS (8,00 MPa), ve SS (3,69 MPa) deneylerinde görülmektedir.

Bu bölümde, donatı çapı, donatı pas payı, donatı gömülme boyu, donatı konumu, beton basınç dayanımı, enine donatı oranı, donatı yüzey özelliği ve donatı lif türü olmak üzere toplam sekiz deney değişkeninin aderans dayanımı üzerindeki etkileri, dört farklı deney yöntemine ve ACI 440.1R-15 [5] yönetmelik bağıntısına göre araştırılmıştır. Ancak, deney yöntemlerinin ve deney verilerinde kullanılan karşılaştırma değişkenlerinin çokluğu ile bazı değerlerin deneysel yöntemlere göre çok farklı eğilimler göstermesi, deneyler arasında genel bir değerlendirme yapılmasını güçleştirmektedir. Her deney yöntemine göre elde edilen 56 adet aderans gerilmesi değerinin ortalaması alındığında, deney yöntemlerine göre belirlenen aderans dayanımları arasındaki ilişki tespit edilebilir. Buna göre, mafsallı kiriş deneylerinden bulunan ortalama aderans gerilmesi değerleri çekip çıkarma deneylerinden yaklaşık %31, kiriş ucundan çekip çıkarma deneylerinden yaklaşık %3, bindirme eki boyu deneylerinden yaklaşık %146 yüksektir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, Gauss süreci regresyonu (GPR) yöntemi kullanılarak FRP donatı-beton aderansını etkileyen faktörlerin dayanım üzerindeki etkileri, aderans deney yöntemlerine (mafsallı kiriş, kiriş ucundan çekip çıkarma, bindirme eki boyu ve çekip çıkarma deneyi) göre ayrı ayrı belirlenmiştir. Çalışmada, donatı çapı, donatı lif türü, donatı yüzey özelliği, donatı gömülme boyu, donatının beton içindeki konumu, pas payı, beton basınç dayanımı ve enine donatı gibi aderansını etkileyen sekiz değişken göz önüne alınmıştır. Bu sayede hem FRP donatı-beton aderansını etkileyen her bir değişkenin deneysel yöntemlerden ne kadar etkilendiği araştırılmış hem de aderans deney yöntemlerinin aderansını etkileyen değişkenlere göre karşılaştırılması yapılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Donatı çapının ve gömülme boyunun aderansa etkisi tüm deneysel yöntemlere göre özdeştir. Donatı çapı ve gömülme boyu arttıkça aderans gerilmesi tüm deneylerde azalmıştır. Donatı çapı ve gömülme boyu artışıyla aderans dayanımında en büyük düşüşler, mafsallı kiriş ve kiriş ucundan çekip çıkarma deneylerinde ortaya çıkmıştır. Çekip çıkarma deneyinde aderans gerilmesi, gömülme boyundan etkilenmemekte, donatı çapı artışından ise 16 mm çapa kadar olumsuz, 16 mm'nin ötesinde olumlu yönde etkilenmektedir.
- Pas payının aderansa etkisi tüm deneysel yöntemlere göre özdeştir. Pas payı arttıkça aderans gerilmesi tüm deneylerde artmıştır ve en büyük artışlar çekip çıkarma deney metodunda gözlemlenmiştir.
- Donatı konumu, deneysel yöntemlere göre aderans gerilmesi üzerinde zıt etkilere sahip olabilmektedir. Donatının kiriş üst yüzünden 300 mm'den daha alta konumlanması, bindirme eki boyu ve çekip çıkarma deneylerinden elde edilen aderans gerilmesi değerlerine olumlu etki yapsa da, mafsallı kiriş ile kiriş ucundan çekip çıkarma deneylerinde olumsuz etki ortaya çıkarmaktadır. Ancak bu sonuçlar literatür ile çelişmektedir.
- Beton basınç dayanımının artmasıyla, çekip çıkarma ve bindirme eki boyu deneylerinde aderans gerilmesi artarken kiriş ucundan çekip çıkarma deneylerinde aderans gerilmesi azalmaktadır. Mafsallı kiriş deneylerinde ise 35MPa beton basınç dayanımının ötesinde aderans gerilmesi dayanım artışından neredeyse etkilenmemiştir. Bu durum, beton basınç dayanımı etkisinin deneysel yöntemlere göre değiştiğini ve literatürde beton basınç dayanımının aderansa etkisi ile ilgili yapılan çalışmalarda ortaya çıkan çelişkili sonuçları açıklamaktadır.
- Enine donatı oranının artmasıyla, mafsallı kiriş ve bindirme eki boyu deneylerinde aderans gerilmesinin artmasına rağmen kiriş ucundan çekip çıkarma deneylerinde aderans gerilmesi düşmüştür. Çekip çıkarma deneylerinde ise enine donatı oranının etkisi yoktur.
- Donatı yüzey özelliklerinin aderansa etkisi kiriş deneylerinde %14 dolaylarında olsa da çekip çıkarma deneylerinde %63'ler gibi yüksek bir orana ulaşmıştır. Çekip çıkarma deneyleri, donatı yüzey özelliklerinden daha yüksek derecelerde etkilenmektedir. Bu durumun, çekip çıkarma deneyindeki çekme kuvvetinin doğrudan

çekme olması ve doğrudan çekmede donatı yüzeyinin kiriş deneylerindeki dolaylı çekmeye göre daha aktif çalışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

- Donatı lif türleri arasındaki farklar aderans gerilme değerlerini tüm deney yöntemlerinde en fazla %30 oranında etkilemiştir.
- Aderans deney yöntemlerinde deney şartlarındaki farklılıklardan dolayı, aynı değişkenler kullanılarak yapılan ölçümlerde bile farklı aderans gerilmesi değerleri ortaya çıkmaktadır. Dört aderans deney yönteminde aynı deneysel değişkenler kullanılarak tasarlanan deneylerin aderans gerilmesi değerleri arasında neredeyse dört kata varan farklar olduğu tespit edilmiştir.
- Aderans deneyleri arasında mafsallı kiriş deneylerinden bulunan ortalama aderans gerilmesi değerleri çekip çıkarma deneylerinden yaklaşık %31, kiriş ucundan çekip çıkarma deneylerinden yaklaşık %3, bindirme eki boyu deneylerinden yaklaşık %146 yüksek olarak bulunmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Islam, S., Afefy, H. M., Sennah, K., Azimi, H., Bond characteristics of straight- and headed-end, ribbed-surface, GFRP bars embedded in high-strength concrete, *Constr. Build. Mater.*, 83 (2), 283–298, 2015.
2. JSCE 1997 Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials, Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Japan, 1997.
3. CAN/CSA S6-10 Canadian Highway Bridge Design Code, Canadian Standards Association (CSA), Ontario, Canada, 2010.
4. CAN/CSA S806-12 Design and Construction of Building Structures with Fibre-Reinforced Polymers, Canadian Standards Association (CSA), Canada, 2012.
5. ACI 440.1R-15 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars, American Concrete Institute (ACI), MI, USA, 2015.
6. EN 10080 Steel for the Reinforcement of Concrete - Weldable Reinforcing Steel - General, European Committee For Standardization, Brussels, Belgium, 2005.
7. RC 5 Bond Test for Reinforcement Steel. 1. Beam Test, 1982, RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials, Paris, France, 1982.
8. RC 6 Bond Test for Reinforcement Steel. Part 2. Pull-out Test, RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials, Paris, France, 1983.
9. ASTM A944-10 Standard Test Method for Comparing Bond Strength of Steel Reinforcing Bars to Concrete Using Beam-End Specimens, ASTM International, USA, 2015.
10. ACI 440.3R-12 Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structures, American Concrete Institute (ACI), MI, USA, 2012.
11. JSCE-E 539-1995 Test Method For Bond Strength of Continuous Fiber Reinforcing Materials By Pull-Out

- Testing, Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Japan, 1995.
12. ISO 10406-1 Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Methods-Reinforcement of Concrete-Test Part 1: FRP Bars and Grids, International Organization for Standardization (ISO), Switzerland, 2015.
 13. ASTM D7913/D7913M-14 Standard Test Method for Bond Strength of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Bars to Concrete by Pullout Testing, ASTM International, USA, 2014.
 14. ACI 408R-03 Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension, American Concrete Institute (ACI), MI, USA, 2003.
 15. Tighiouart, B., Benmokrane, B., Gao, D., Investigation of bond in concrete member with fibre reinforced polymer (FRP) bars, *Constr. Build. Mater.*, 12 (8), 453–462, 1998.
 16. Gudonis, E., Kacianauskas, R., Gribniak, V., Weber, A., Jakubovskis, R., Kaklauskas, G., Mechanical Properties of the Bond Between GFRP Reinforcing Bars and Concrete, *Mech. Compos. Mater.*, 50 (4), 457–466, 2014.
 17. Veljkovic, A., Carvelli, V., Haffke, M. M., Pahn, M., Concrete cover effect on the bond of GFRP bar and concrete under static loading, *Compos. Part B Eng.*, 124, 40–53, 2017.
 18. Aiello, M. A., Leone, M., Pecce, M., Bond Performances of FRP Rebars-Reinforced Concrete, *J. Mater. Civ. Eng.*, 19 (3), 205–213, 2007.
 19. Achillides, Z., Pilakoutas, K., Bond Behavior of Fiber Reinforced Polymer Bars under Direct Pullout Conditions, *J. Compos. Constr.*, 8 (2), 173–181, 2004.
 20. Jung, W. T., Park, Y. H., Park, J. S., An Experimental Study on Bond Characteristics of FRP Reinforcements with Various Surface-type, *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, 31(4a), 279–286, 2011.
 21. Esfahani, M. R., Kianoush, M. R., Lachemi, M., A Comparison Between Bond Strength of Steel and GFRP Bars in Self-Consolidating Concrete (SCC), *Int. J. Civ. Eng.*, 2 (3), 193–200, 2004.
 22. Choi, D. U., Ha, S. S., Lee, C. H., Development Length of GFRP Rebars Based on Pullout Test, *J. Korea Concr. Inst.*, 19 (3), 323–331, 2007.
 23. Arias, J. P. M., Vazquez, A., Escobar, M. M., Use of sand coating to improve bonding between GFRP bars and concrete, *J. Compos. Mater.*, 46 (18), 2271–2278, 2012.
 24. Tekle, B. H., Khennane, A., Kayali, O., Bond Properties of Glass Fibre Reinforced Polymer Bars With Fly-Ash Based Geopolymer Concrete, 10th International Conference on Composite Science and Technology (ICCST/10), Lisboa, Portugal, 1–8, 2015.
 25. Khederzadeh, H. R., Sennah, K., Pullout Strength of Pre-installed Sand-coated GFRP Bars for Bridge Barrier Construction, 4th International Structural Specialty Conference (CSCE 2014), Halifax, NS, 1–10, 2014.
 26. Ehsani, M. R., Saadatmanesh, H., Tao, S., Bond Behavior of Deformed GFRP Rebars, *J. Compos. Mater.*, 31 (14), 1413–1430, 1997.
 27. Shen, D., Ojha, B., Shi, X., Zhang, H., Shen, J., Bond stress–slip relationship between basalt fiber-reinforced polymer bars and concrete using a pull-out test, *J. Reinf. Plast. Compos.*, 35 (9), 747–763, 2016.
 28. Larralde, J., Silva-Rodriguez, R., Bond and Slip of FRP Rebars in Concrete, *J. Mater. Civ. Eng.*, 5 (1), 30–40, 1993.
 29. Kang, J. E., Kim, B. I., Park, J. S., Lee, J. Y., Influence Evaluation of Fiber on the Bond Behavior of GFRP Bars Embedded in Fiber Reinforced Concrete, *J. Korea Concr. Inst.*, 24 (1), 79–86, 2012.
 30. Lee, J. Y., Kim, T. Y., Kim, T. J., Yi, C. K., Park, J. S., You, Y. C., Park, Y. H., Interfacial bond strength of glass fiber reinforced polymer bars in high-strength concrete, *Compos. Part B Eng.*, 39 (2), 258–270, 2008.
 31. Park, J. S., Lim, A. R., Kim, J., Lee, J. Y., Bond performance of fiber reinforced polymer rebars in different casting positions, *Polym. Compos.*, 37 (7), 2098–2108, 2016.
 32. Ha, S. S., Choi, D. U., Development Length of GFRP Bars, *J. Korea Concr. Inst.*, 22 (1), 131–141, 2010.
 33. Lu, J., Investigation of Pullout Strength of Pre-Installed Glass Fibre Reinforced Polymer Bars In High-Performance Concrete, Master Thesis, Ryerson University, Toronto, Ontario, Canada, 2015.
 34. Akbas, T. T., Celik, O. C., Yalcin, C., Experimental Bond Behaviour of Deformed CFRP Rebars in High Strength Concrete, *Concrete – Innovation and Design, fib Symposium, Copenhagen, Denmark*, 1–9, 2015.
 35. Quayyum, S., Bond Behaviour of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Rebars in Concrete, MS Thesis, The University of British Columbia, Canada, 2010.
 36. Melo, J., Gaussian Processes for Regression: A Tutorial, Technical Report, 2011.
 37. Wilson, A. G., Adams, R. P., Gaussian Process Kernels for Pattern Discovery and Extrapolation, 30th International Conference on Machine Learning, Atlanta, Georgia, USA, 2013.
 38. Schulz, E., Speekenbrink, M., Krause, A., A tutorial on Gaussian process regression with a focus on exploration-exploitation scenarios. *bioRxiv*, 2017.
 39. Rasmussen, C. E., Williams, C. K. I., *Gaussian Processes for Machine Learning*, The MIT Press, 2006.
 40. Bi, Q. W., Wang, Q. X., Wang, H., Study on Bond Properties of BFRP Bars to Basalt Fiber Reinforced Concrete, *Adv. Mater. Res.*, 163–167, 1251–1256, 2011.
 41. Bi, Q., Wang, H., Bond Strength of BFRP Bars to Basalt Fiber Reinforced High-Strength Concrete, *Advances in FRP Composites in Civil Engineering*, Springer, Berlin, Heidelberg, 576–580, 2011.
 42. Krem, S., Soudki, K., Development Length of Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Bars in Self-Consolidating Concrete. *Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete*, Springer, Dordrecht, 379–391, 2010.
 43. Ehsani, M. R., Saadatmanesh, H., Tao, S., Design Recommendations for Bond of GFRP Rebars to Concrete, *J. Struct. Eng.*, 122 (3), 247–254, 1996.

44. Xue, W., Zheng, Q., Yang, Y., Fang, Z., Bond behavior of sand-coated deformed glass fiber reinforced polymer rebars, *J. Reinf. Plast. Compos.*, 33 (10), 895–910, 2014.
45. Yu, N. H., Fan, J. J., Experimental Study of Bond Stress between Concrete and FRP Rebars, *Appl. Mech. Mater.*, 488–489, 774–777, 2014.
46. Yan, F., Lin, Z., Yang, M., Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete: A review, *Compos. Part B Eng.*, 98, 56–69, 2016.
47. Jiang, S. Y., Ye, Y., Fei, W., Experiment on the Bonding Performance of BFRP Bars Reinforced Concrete, *Appl. Mech. Mater.*, 174–177, 993–998, 2012.
48. ACI 440.1R-06 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars, American Concrete Institute (ACI), MI, USA, 2006.
49. Baena, M., Torres, L., Turon, A., Barris, C., Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test, *Compos. Part B Eng.*, 40 (8), 784–797, 2009.
50. Quayyum, S., Rteil, A., Bond Strength of FRP Rebar to Concrete : Effect of Concrete Confinement, *Proceedings of the 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2010)*, Beijing, China, 581–584, 2010.
51. Aykac, B., Aykac, S., Kalkan, I., Dundar, B., Can, H., Flexural behavior and strength of reinforced concrete beams with multiple transverse openings, *ACI Struct. J.*, 111 (2), 267-278, 2014.

