

CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolonların basınç dayanımının çoklu regresyon modelleriyle tahmini

*Selim MURTAZAOĞLU¹, Kaan YETİLMEZSOY², Bilge DORAN³

¹ İş Bankası, İnşaat ve Gayrimenkul Yönetimi Bölümü, İstanbul

² Yıldız Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul

³ Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

ÖZET

Günümüzde, betonarme yapıların güçlendirilmesinde karbon lifli polimer malzemelerin (CFRP) kullanımı hızlı bir şekilde yaygınlaşmaktadır. Özellikle betonarme kolonların güçlendirmesinde; uygulama yönteminin kolay olması, hafif olması ve korozyona karşı dayanıklı olması bu yöntemi öne çıkartmaktadır. Literatürde, CFRP ile güçlendirilmiş kolonların basınç dayanımını tahmin eden birçok matematik model bulunmaktadır. Bu çalışmada ise, mevcut matematik modellere alternatif olarak çoklu regresyon modelleri oluşturulmuştur.

Anahtar

Kelimeler:

Betonarme
Kolonlar, Lifli
Polimer, Çoklu
Regresyon
Modeli.

Prediction of confined compressive stress in rc columns strengthened with CFRP using multiple regression modelling approach

ABSTRACT

Nowadays, the use of carbon fiber reinforced polymers (CFRP) in the reinforcement of concrete structures is rapidly spreading. In particular; ease of handling and application, their light weight and corrosion resistance are some factors that are advantageous in the strengthening of reinforced concrete columns. There are many mathematical models that predict the compressive strength of the reinforced column with CFRP in the literature. In this study, multiple regression models were created and the usability of these models researched.

Key Words:

Reinforced
Concrete
Columns, Fiber
Reinforced
Polymers,
Multiple
Regression
Analysis

1. Giriş

Depremselliğin önemli olduğu yerleşim bölgelerinde, özellikle deprem sonrası hasar görmüş yapıların onarılması ve hasarsız kusurlu binaların güçlendirilmesi araştırmacı akademisyenlerin oldukça ilgisini çekmektedir. Betonarme elemanların karbon lifli polimer (CFRP) malzeme ile güçlendirilmesi, birçok bakımdan iyi sonuçlar ortaya koymaktadır. CFRP malzemenin betonarme elemana sarılmasıyla, betonarme elemanın basınç dayanımı ve sünekliliği sargısız betona nazaran önemli oranda artmaktadır. CFRP ile sargılı kolonun basınç dayanımını veren pek çok bağıntı mevcuttur [1]-[3]. Ancak bu bağıntıların bağlı oldukları geometrik ve/veya mekanik değişkenler dikkate alınacak olursa, bunların kısıtlı bir süreçte yorumlanması pratik uygulamalarda zor ve zaman alıcı bir işlemdir. Bu açıdan mevcut iş gücü, finansal durum ve özellikle zaman faktörü gibi temel parametreler göz önüne alındığında, spesifik bir çıktının veya çıktıların mevcut yapı stoğunu temsil edici yüksek performanslı bir matematiksel model ile yeterli hassasiyetle tahmin edilmesi, mühendislik pratiğinde oldukça önemlidir. Ancak, çok sayıda bağımsız değişkene karşılık gelen bir veya birden fazla çıktı ile girdiler arasındaki matematiksel ilişki, gerçek uygulamalarda çoğunlukla karmaşık ve doğrusal olmayan bir formülasyon ortaya koymaktadır. Bu maksatla, mevcut bir olay için geliştirilen matematiksel modeller, gerçek olayların bir temsilcisi olup, söz konusu çıktı parametresini belirli bir hassasiyetle tahmin etmekte kullanılmaktadır. Dolayısıyla, yüksek korelasyonlu (düşük istatistiksel hatalara sahip) bir model geliştirilmesi, anılan konu ile ilgili farklı senaryoların değerlendirilmesi ve deney maliyetinin minimize edilmesi açısından oldukça önemlidir. Ancak, geliştirilen modelin çalışma sınırlarının ortaya koyulması söz konusu modelin pratikte kullanılabilirliği açısından önemli ve gerekli bir koşuldur [4].

2. Mevcut matematik modeller

Çalışma kapsamında, CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolonların basınç dayanımı tahmin eden dört adet matematik model incelenmiştir. Bu modeller birbirine bağlı birçok denklem ve değişkenden oluşmaktadır. Bu da tasarımcılar için pratik ve hızlı sonuçlar üretme zorluğu yaratmaktadır. Mevcut matematik modeller, CFRP ile güçlendirilmiş kolonların basınç dayanımının (f'_{cc}), kuşatılmamış betonarme kolonların basınç dayanımına (f'_{co}) oranı şeklinde düzenlenmiştir. Bu orana bu çalışma kapsamında "yanal kuşatma katsayısı (k_s)" adı verilmiştir.

2.1. ACI 440'da önerilen model

Önerilen modelde, kuşatılmış betona ait etkin alanın köşelerden 45 derece ile belirlenen 4 parabolde oluşacağı kabulü ile (Şekil 1) şekil faktörü:

$$k_s = \frac{A_e}{A_c} = 1 - \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3A_g(1-\rho_s)} \quad (1)$$

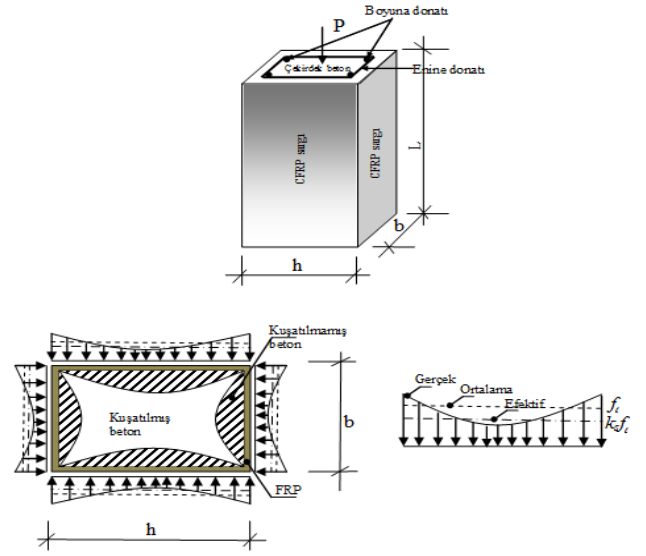
olarak tanımlıdır [5]. Burada A_g bürüt beton kesit alanı, ve ρ_s boyuna donatı yüzdesini ifade etmektedir. (1) nolu bağıntıda $A_g = bh - (4-\pi)r^2$ 'dir. Önerilen modelde ayrıca dikdörtgen kolon için belirlenen aynı CFRP hacimsel orana sahip eşdeğer dairesel kolon tanımından yararlanılmıştır. Buradan hareketle

eş değer dairesel kolon çapı, h ve b sırasıyla dikdörtgen kolonun uzun ve kısa kenarları olmak üzere, $D = 2bh/(b+h)$ şeklinde belirlenecektir. CFRP malzemenin yırtılma birim deformasyonu ϵ_j , ϵ_{fe} ile tanımlanan etkin deformasyona eşit alınmıştır; $\epsilon_{fe} = 0.004 < 0.75\epsilon_{FRP}$. Sonuç olarak, kolonda eşdeğer kuşatma basıncı (Şekil 1) ve gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi:

$$f'_i = k_s \frac{2tE_{FRP}\epsilon_j}{D} = \left\{ 1 - \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3A_g(1-\rho_s)} \right\} \frac{2tE_{FRP} \cdot 0.004}{2bh/(b+h)} \quad (2)$$

$$f'_i = k_s \frac{2tE_{FRP}\epsilon_j}{D} = \left\{ 1 - \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3A_g(1-\rho_s)} \right\} \frac{2tE_{FRP} \cdot 0.004}{2bh/(b+h)} \quad (3)$$

şeklinde tanımlanır.



Şekil 1. Kuşatılmış beton

1.1. Lam ve tang tarafından önerilen model

CFRP ile kuşatılmış betona ait gerilme-birim deformasyon ilişkisini tarifeden bağıntı, k_{s1} ile tanımlanan şekil katsayısına bağlı olarak:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 k_{s1} \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (4)$$

şeklinde verilmiştir [6]. Burada k_1 etkin kuşatma katsayısını ifade etmektedir ($k_1 = 3.3$) ve

$$k_{s1} = \left(\frac{h}{b} \right)^2 \frac{A_e}{A_c} \quad (5)$$

$$\frac{A_e}{A_c} = 1 - \frac{(h/b)(b-2r)^2 + (b/h)(h-2r)^2}{3A_g(1-\rho_s)} \quad (6)$$

olarak tanımlıdır. Bağıntı (7)'de, f_l kuşatma basıncı, t FRP malzemenin kalınlığı, D eşdeğer kolon çapı ($D = \sqrt{b^2 + h^2}$), E_{FRP} CFRP malzemenin elastisite modülü ve ϵ_j yırtılma birim deformasyonu ($\epsilon_j = k_e \epsilon_{FRP}$) olmak üzere:

$$f_l = \frac{2tE_{FRP}\varepsilon_j}{D} \quad (7)$$

şeklinde. Yukarıdaki bağıntılarda k_e 'in değeri kullanılan FRP malzemenin türüne göre değişmektedir ve CFRP için yaklaşık olarak 0.586 alınabilir. ε_{FRP} ise son limit çekme birim deformasyonudur ve deneysel elde edilecektir.

2.3. Youssef tarafından önerilen model

Bu modelde, kuşatılmış beton basınç dayanımı çok sayıda regresyon analizi yardımıyla aşağıdaki bağıntı kullanılarak tahmin edilmektedir [7]:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \left[0.5 + 1.225 \left(\frac{f'_l}{f'_{co}} \right)^{3/5} \right] \quad (8)$$

Burada f'_l , FRP tarafından betona uygulanan etkin yanal kuşatma basıncıdır ve biçim katsayısı k_s ye bağlı olarak (9):

$$f'_l = k_s \left(\frac{1}{2} \rho_{FRP} f_{FRP} \right) \quad (9)$$

şeklinde ifade edilmiştir.

2.4 Chaallal vd. tarafından önerilen model

Chaallal vd. (2003) [8], çalışmalarında deneysel verilere dayalı üç boyutlu gerilme-birim şekil değiştirme bağıntısını

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 72 \frac{k}{f'_{co}} \quad (10)$$

şeklinde vermişlerdir. Bu bağıntıda, k etkin kuşatma katsayısıdır ve

$$k = \frac{E_{FRP} A_j}{E_{co} A_{co}}$$

olarak tanımlıdır. Burada A_j , 1 m genişliğe tekabül eden kuşatılmış kesitin alanını ($A_j = t \times l$ m), E_{co} kuşatılmamış beton kesitin elastisite modülünü ve A_{co} ise kuşatılmamış bürüt beton kesit alanını ifade etmektedir.

Dört modelden de anlaşılacağı gibi yanal kuşatma katsayılarına ulaşmak için birçok değişken ve birbirine bağlı bağıntıların kullanılması gerekmektedir.

3. Çoklu regresyon modeli (çrm)

3.1. Çoklu regresyon modeli

Regresyon analizi bağımlı değişken ile bir veya daha çok bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla kullanılan istatistiksel analiz yöntemidir. Tek bağımsızdeğişkenin kullanıldığı regresyon tek değişkenli regresyon analizi, birden fazla bağımsız değişkenin kullanıldığı regresyon analizi de çoklu regresyon analizi olarak adlandırılmaktadır.

Çoklu regresyon analizinde bağımsız değişkenler eş zamanlı olarak bağımlı değişken üzerindeki değişimin etkisini açıklamaya çalışmaktadır. Çoklu regresyon analizi sosyal bilimlerin (pazarlama, sosyoloji ve psikoloji) yanında birçok mühendislik dalında da kullanım alanı bulmaktadır. Sosyal bilim dallarında davranışsal hareketlerin belirlenmesinde, ekonomide zaman serisi türü ekonomik değişkenleri etkileyen faktörlerin tespiti ve geleceğe yönelik tahmininde kullanım alanı bulmaktadır. Mühendislik alanlarında ise şekillendirme proseslerinde, maliyet analizlerinde ve optimizasyon alanlarında başarıyla uygulanmıştır [9]-[11].

3.2. Çoklu regresyon model değişkenlerinin belirlenmesi

Mevcut matematik modellerin incelenmesi ve yapılan ön çalışmalar neticesinde oluşturulacak çoklu regresyon modellerinde kolonun eni, kolonun boyu, CFRP malzemesinin elastisite modülü, CFRP malzemesinin kalınlığı ve kuşatılmamış kesitin basınç dayanımı değişken olarak seçilmiştir.

3.3. Veri tabanının oluşturulması

Çoklu regresyon modeli oluşturulurken kullanılan veritabanı literatürdeki çalışmalardan elde edilen 100 adet deneysel veriden oluşturulmuştur [12]-[24]. Tablo 1'de oluşturulan veri tabanındaki mevcut verilerinin tanımlayıcı istatistiksel analizi yapılmıştır.

3.4. Çoklu regresyon modelinin oluşturulması

Oluşturulan veri tabanı, 298 adet iki boyutlu (2D) ve 242 adet üç boyutlu (3D) regresyon modeli içeren DataFit® bilimsel programı (Copyright© 1995-2008 Oakdale Engineering V9.0.59) tarafından değerlendirilmiştir. Regresyon modelleri çözüldükçe, elde edilen modeller en uygundan başlayarak kendi içinde otomatik olarak sıralanmıştır. Deneysel veriler, açık veri kaynağı olarak kullanılan Microsoft® Excel veritabanı bağlantısından alınmış ve regresyon analizi gerçekleştirilmiştir.

3.5. DataFit® programıyla elde edilen çok değişkenli regresyon modelleri

DataFit® programı yardımıyla yanal kuşatma katsayılarının tahmini için yapılan çalışma neticesinde, biri eksponansiyel ikisi lineer denklemden oluşan üç farklı çoklu regresyon modeli elde edilmiştir. Tablo 2'de veri seti için DataFit® tarafından uygun görülen bu denklemlere ve regresyon analizinde hesaplanan bazı istatistiksel değerlere yer verilmiştir.

Deneysel sonuçlarla en iyi uyum sağlayan çoklu regresyon modeli (eksponansiyel model) formülasyon şeklinde ifade edilmek istenirse;

$$k_s = \exp \left[(7.157 \times 10^{-4}) b + (-2.30 \times 10^{-3}) h + (0.493) t + (-2.233 \times 10^{-2}) f_{co} + (2.421 \times 10^{-6}) E_{CFRP} + 0.652 \right] \quad (11)$$

şeklinde.

Tablo 3'de t oranı ve p değeri üzerinden model hakkında yorum yapılması mümkündür. Elde edilen sonuçlarda t oranının yüksek ve p değerinin düşük olduğu değişkenler, model için etkin girdileri ifade etmektedir [25],[26].

Tablo 1. Model verisinin tanımlayıcı istatistiksel analizi.

Parametre	Birim	Maks. Değer	Min. Değer	Stand. Sapma
Kolonun Eni (b)	mm	457	79	67,06
Kolonun Boyu (h)	mm	457	108	50,36
CFRP Malzemesinin Kalınlığı (t)	mm	3	0,056	0,46
Kuşatılmamış Kesitin Basınç Dayanımı (f_{co})	MPa	55,36	10,83	11,65
CFRP Malzemesinin Elastisite Modülü (E_{CFRP})	MPa	439000	10500	79516,81
Yanal Kuşatma Katsayısı (k_s)	-	4,79	0,99	0,61

Tablo 2. Yanal kuşatma katsayısı tahmininde Datafit® ile elde edilen çok değişkenli regresyon modelleri ve regresyon analizinde hesaplanan bazı istatistiksel değerler.

Model	$\exp(a \cdot x_1 + b \cdot x_2 + c \cdot x_3 + d \cdot x_4 + e \cdot x_5 + f)$	$a \cdot x_1 + b \cdot x_2 + c \cdot x_3 + d \cdot x_4 + e \cdot x_5 + f$	$a \cdot x_1 + b \cdot x_2 + c \cdot x_3 + d \cdot x_4 + e \cdot x_5 + f$
SEE	0,41	0,44	0,54
SR	0,88	$8,26 \times 10^{-13}$	4,93
AR	0,01	$8,26 \times 10^{-15}$	0,05
RSS	15,74	18,50	27,48
R^2	0,56	0,48	0,23
R_a^2	0,53	0,45	0,2

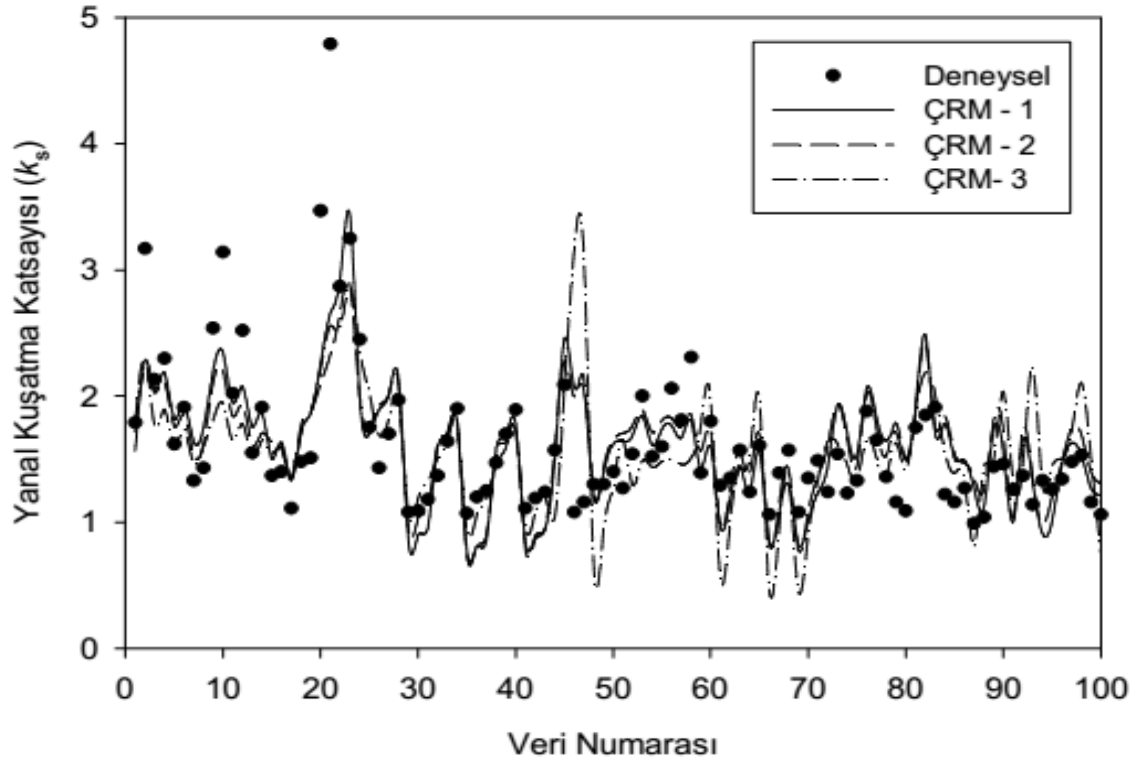
(SEE: Tahmindeki standart hata, SR: Hataların toplamı, AR: Ortalama bakiye hata, RSS: Hataların kareleri toplamı, R^2 : Determinasyon katsayısı, R_a^2 : Ayarlanmış çoklu determinasyon katsayısı)

Tablo 2. Yanal kuşatma katsayısı tahmininde deneysel sonuçlarla en iyi uyum sağlayan çoklu regresyon modelinin (eksponansiyel model) katsayıları ve modele ait bazı istatistiksel sonuçlar.

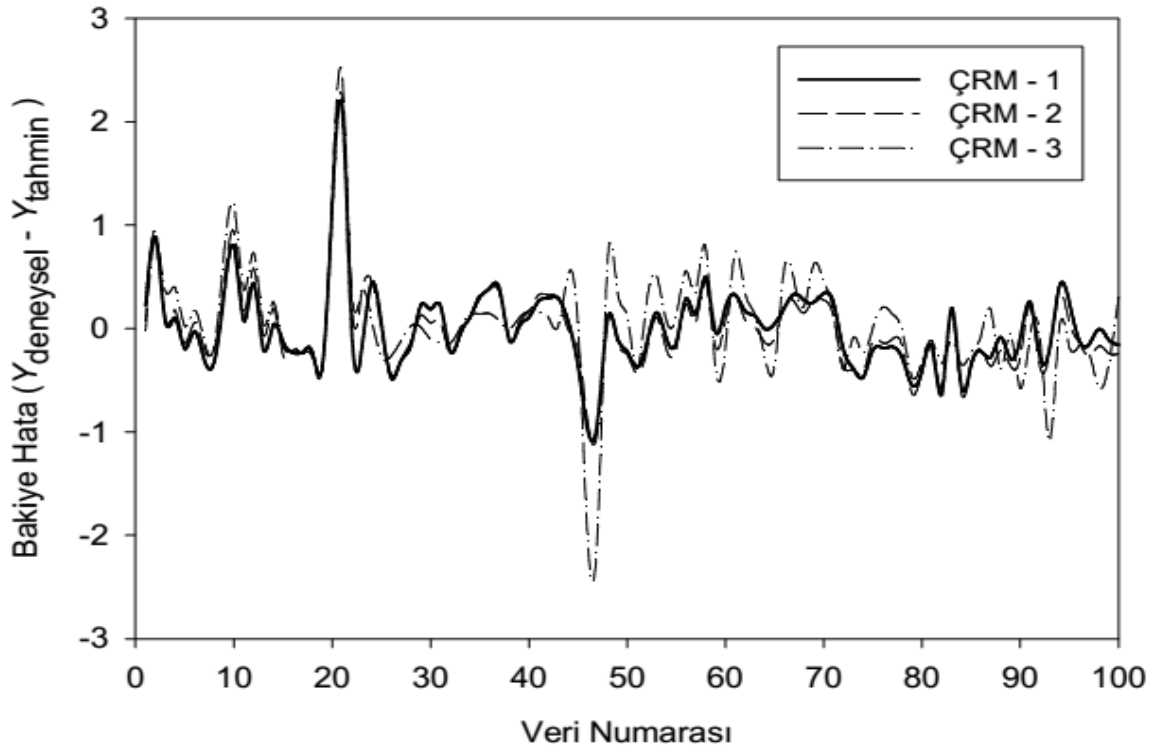
Katsayılar ve Sabit Terim (i)	Girdi Değişkenleri	t Oranı	P Değeri
$a = 7,157 \times 10^{-4}$	Kolonun Eni (mm)	1,691	0,094
$b = -2,30 \times 10^{-3}$	Kolonun Boyu (mm)	-4,126	0,00008
$c = 0,493$	CFRP Malzemesinin Kalınlığı (mm)	5,56	0
$d = -2,233 \times 10^{-2}$	Kuşatılmamış Kesitin Basınç Dayanımı (MPa)	-8,219	0
$e = 2,421 \times 10^{-6}$	CFRP Malzemesinin Elastisite Modülü (MPa)	4,886	0
$f = 0,652$	Sabit Terim	4,3	0,00004

3.6. Tahmin sonuçlarının validasyonu/verifikasyonu

Model sonuçlarının doğrulanması model geliştirmenin en önemli unsurudur. Bunun için görsel ve sayısal yöntemler mevcuttur. Görsel yöntemler, model performansını sezgisel bir şekilde ortaya koymaktadır. Sayısal yöntemler ise matematiksel ifadelerle yer verdiğinden modelin doğrulanması için daha sağlam bir zemin sağlamaktadır [25],[26]. Bu çalışmada ortaya konan çoklu regresyon modellerinin validasyonu/verifikasyonu hem görsel hem sayısal yöntemler ile ortaya konmuştur. Şekil 2'de deneysel yanal kuşatma katsayılarının, çoklu regresyon modelleri yardımıyla elde edilen yanal kuşatma katsayılarıyla karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 3'te çoklu regresyon modellerinin bakiye hata grafiklerine yer verilmiştir. Tablo 4'te ise oluşturulan üç çoklu regresyon modelinin determinasyon katsayısı, ortalama mutlak hata ve ortalama karesel hata değerlerine yer verilmiştir.



Şekil 2. Regresyon sonucu elde edilen yanıl kuşatma katsayılarının deneysel verilerle karşılaştırılması.



Şekil 3. Regresyon modellerinin bakiye hata grafiği.

Tablo 2. Mukayese maksatlı kullanılan istatistiksel performans indikatörleri.

Performans İndikatörü	Matematiksel İfadeler	ÇRM-1	ÇRM-2	ÇRM-3
Determinasyon Katsayısı	$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(Y_i - Y_m) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_m)^2}$	0,56	0,48	0,23
Ortalama Mutlak Hata	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i - O_i $	0,28	0,29	0,34
Ortalama Karesel Hata	$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P_i - O_i]^2 \right)^{0.5}$	0,40	0,43	0,52

4. Sonuçlar ve tartışma

Bu çalışmada, CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolonların basınç dayanımlarının tahmini için DataFit® programı yardımıyla üç adet çoklu regresyon modeli oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Bu çalışma sayesinde yanal kuşatma katsayısı hesabında matematiksel bir metodolojiye sahip çoklu regresyon yöntemi kullanılmıştır.

2. Çalışma kapsamında, birbirine bağlı çok sayıda denklem yerine tek bir ampirik denklem ile yanal kuşatma katsayısı tahmin edilmiştir.

3. Tek denklemin mevcut olması yanal kuşatma katsayısına ulaşmak için zaman, maliyet ve hesap sırasındaki hata yapma olasılığını azaltmaktadır.

4. Mevcut problemin çözümü için aynı veritabanı kullanılarak oluşturulan farklı modeller ortaya konulduğunda, yeni modelin başarısının anlaşılabilirliği için regresyon modeli bir karşılaştırma parametresi olarak kullanılabilir.

Bu çalışma geliştirilmeye açık olup;

a. Veri tabanına eklenecek yeni deneysel veriler ile elde edilen korelasyon değeri artırılabilir ve daha etkin bir model yapısının oluşturulması sağlanabilir.

b. Farklı türde matematiksel formülasyona sahip regresyon modellerinin mevcut problemde uygulanmasıyla daha yüksek korelasyonlu modeller üretilebilir.

c. Konvansiyonel regresyon modellerine alternatif olarak yüksek kapasiteli yapay zekâ modellerinin (yapay sinir ağları, bulanık mantık, uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sistemi, vb.) mevcut probleme entegre edilmesi neticesinde tahmin performansının üst seviyelere çıkarılması sağlanabilir.

Teşekkürler

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün 2013-05-01-YL01 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

1. Doran, B., Koksal, H.O., ve Turgay, T., "Nonlinear finite element modeling of rectangular/square concrete columns confined with FRP", J Mater Design, 30(8): 3066-3075, 2008.
2. Turgay, T., Polat, Z., Koksal, H.O., Doran, B ve Karakoç, C., "Compressive behavior of large-scale square RC columns confined with CFRP jackets", J Mater Design, 31(1): 357-364, 2010.
3. Köksal, H.O. ve Doran, B., "Stress-strain model of rectangular/square concrete columns confined with FRP sheets", Proceedings of ICE-Structures and Buildings, 164(6): 391-408, 2011.
4. Yetilmezsoy, K., "Treatability of Poultry Manure Wastewater Using Anaerobic Sludge Bed Reactor", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008
5. ACI Committee 440, Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-02). American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, 2002.
6. Lam, L. ve Teng, J.G. "Strength Models for Fiber-Reinforced-Plastic-Confined Concrete", Journal of Structural Engineering, 128(5): 612-23, 2002.
7. Youssef, M.N. "Stress-Strain Model for Concrete Confined by FRP Composites", Doctor of Philosophy in Civil Engineering, University of California, Irvine, 2003.
8. Chaallal O., Hassan M. ve Shahawy, M., "Confinement model for axially loaded short rectangular columns strengthened with fiber-reinforced polymer wrapping", ACI Structural Journal 100(2): 215-221, 2003a.
9. Lowe, D., Emsley, M., and Harding, A. "Predicting Construction Cost Using Multiple Regression Techniques." J. Constr. Eng. Manage., 132(7), 750-758, 2006.
10. Chang, H., Park, D., Lee, Y. ve Yoon, B., "Multiple time period imputation technique for multiple missing traffic variables: nonparametric regression approach", Canadian Journal of Civil Engineering, 39(4): 448-459, 2012.

11. Mata J, "Interpretation of concrete dam behaviour with artificial neural network and multiple linear regression models", *Engineering Structures*, 33(3): 903-910, 2011.
12. Al-Salloum Y.A., "Influence of edge sharpness on the strength of square concrete columns confined with FRP composite laminates", *Composites Part B* 38(5-6): 640-650, 2006.
13. Chaallal O., Shahawy M. ve Hassan M., "Performance of axially loaded short rectangular columns strengthened with carbon fiber-reinforced polymer wrapping." *ASCE Journal of Composites for Construction* 7(3): 200-208, 2003b.
14. Demers M. ve Neale K.W., "Strengthening of concrete columns with unidirectional composite sheets.", *Proceedings of the 4th International Conference on Short and Medium Span Bridges, Canadian Society Of Civil Engineering, Montreal, 895-905, 1994.*
15. Feng, P., Lu, X.Z. ve Ye L.P., "Experimental research and finite element analysis of square concrete columns confined by FRP sheets under uniaxial compression.", *Proc. 17th Australasian Conference on the Mechanics of Structures, Gold Coast, Australia, 71-76, 2002.*
16. Harajli M.H., Hantouche E. ve Soudki K., "Stress-strain model for fiber-reinforced polymer jacketed concrete columns." *ACI Structural Journal*, 103(5): 672-82, 2006.
17. Hosotani M., Kawashima K., ve Hoshikuma J., "A study on confinement effect of concrete cylinders by carbon fiber sheets." In: *Proceedings of the 3rd non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures, 209-16, 1997.*
18. İlki, A., Peker, O., Karamuk, E., Demir, C. ve Kumbasar, N. "FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular reinforced concrete columns." *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE* 20(2): 169-188, 2008.
19. Lam L. ve Teng J.G., "Design-oriented stress-strain model for FRP confined concrete in rectangular columns". *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 22(13): 1149-86, 2003.
20. Parvin, A. ve Wang, W., "Behavior of FRP jacketed concrete columns under eccentric loading", *Journal of Composites for Construction*, ASCE 5(3): 146-152, 2001.
21. Pessiki, S., Harries, K.A., Kestner, J.T., Sause, R. ve Ricles, J.M., "Axial behavior of reinforced concrete columns confined with FRP jackets", *Journal of Composites for Construction*, ASCE 5(4): 237-245, 2001.
22. Rousakis, T.C., Karabinis, A.I. ve Kioussis, P.D., "FRP-confined concrete members: Axial compression experiments and plasticity modeling." *Engineering Structures*, 29(7): 1343-53, 2007.
23. Shehata, IAEM., Carneiro, LAV. ve Shehata, LCD., "Strength of short concrete columns confined with CFRP sheet". *Materials and Structures* 35(1): 50-58, 2002.
24. Turgay, T., "FRP uygulanmış eksenel yüklü betonarme kolonların davranışı (Behaviour of RC columns confined with FRP)", *Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.*
25. Türkdoğan Aydınol, F.İ. ve Yetilmezsoy, K., "A Fuzzy-Logic- Based Model to Predict Biogas and Methane Production Rates in a Pilot- Scale Mesophilic UASB Reactor Treating Molasses Wastewater", *Journal of Hazardous Materials*, 182(1-3): 460-471., 2010.
26. Akkoyunlu, A., Yetilmezsoy, K., Ertürk, F. ve Öztemel, E., "A neural Network- Based Approach for the Prediction of Urban SO₂ Concentrations in İstanbul Metropolitan Area", *Int. J. Environment and Pollution*, 40(4): 301-321, 2010.