



Tahribatsız Yöntem Verileri Kullanılarak Yapay Sinir Ağı ve Regresyon Yöntemi ile Beton Basınç Dayanımının Tahmin Edilmesi

By Using Non-Destructive Method Data Estimation of the Concrete Compressive Strength with Artificial Neural Network and Regression Method

Serap Yörübulut*¹  Orhan Doğan²  Funda Erdugan¹  Suat Yörübulut³ 

¹Kırıkkale Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, İstatistik Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

²Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

³Kırıkkale Üniversitesi, Rektörlük, Yapı İşleri ve Teknik Dairesi Başkanlığı, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 09/05/2020

Kabul / Accepted: 16/06/2020

Çevrimiçi Basım / Published Online: 30/06/2020

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2020

Öz

Yapay zeka (YZ) yöntemlerinden yapay sinir ağı (YSA) ve istatistiksel tahmin yöntemi olan regresyon analizi kullanılarak, yapı elemanlarına zarar vermeyen tahribatsız yöntemlerden, beton test çekici ve ultrasonik test cihazı ile kısa sürede ve düşük maliyetle elde edilen veriler ile beton basınç dayanımının tahmin edilmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçla, 117 adet karot numunesi için tahribatsız yöntemlerle elde edilen veriler kullanılarak yapay sinir ağı ve regresyon modelleri oluşturulmuş ve bu iki modelden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tahribatsız deney verileri kullanılarak yapay sinir ağı ve regresyon yöntemleriyle tahmin edilen beton basınç dayanımları ile tahribatlı yöntem olan karot numunelerinin basınç dayanımlarının birbirlerine oldukça yakın sonuçlar veren modeller olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

“Yapay Sinir Ağı, Regresyon Analizi, Beton Basınç Dayanımı, Tahribatsız Yöntem, Beton Test Çekici, Ultrasonik Test Cihazı”

Abstract

In this study it is aimed to estimate the concrete compressive strength by using non-destructive concrete test hammer and ultrasonic test which are applied without destroying structural members and are time and cost saving methods in accordance with artificial neural network (ANN) and regression analysis which is a statistical estimation method parts of artificial intelligence (AI).

For this purpose, artificial neural network and regression models were created using data obtained with non-destructive methods for 117 core samples and the results of these two models were compared.

Using the non-destructive test data, the compressive strengths estimated by artificial neural network and regression methods and the core strength samples of the destructive method have been found very close to each other.

Key Words

“Artificial Neural Network, Regression Analysis, Concrete Compressive Strength, Non-Destructive Method, Concrete Test Hammer, Ultrasonic Tester”

1. Giriş

Mevcut bir betonarme yapının veya yapı elemanının kalitesinin belirlenmesinde genellikle betonun basınç dayanımı ön plana çıkmaktadır. Ülkemizdeki yapıların hemen hemen tamamının deprem kuşağında yer alması, bu yapıların deprem performanslarına ilişkin beton basınç dayanımlarının hızlı değerlendirilmesinin önemini artırmıştır. Mevcut yapılarda beton basınç dayanımının belirlenmesi için yaygın olarak karot yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem, yapı elemanının kesitini zayıflamakta, taşıma kapasitesini azaltmakta olup aynı zamanda malzeme, iş gücü ve zaman kaybına da neden olmaktadır. Bu dezavantajlar nedeni ile son yıllarda tahribatsız deney yöntemleri ile beton basınç dayanımının belirlenmesi önemli hale gelmiştir (Topçu vd 2010; Erdal ve Şimşek 2006).

Nisan 2010'da yürürlüğe giren TS EN 13791 standardı, mevcut yapıların ve yapı bileşenlerinin beton basınç dayanımının yerinde tahmin edilmesi ve değerlendirilmesinde, kalibre edilmek şartıyla beton test çekici ve ultrases geçiş hızı gibi tahribatsız deneylerin kullanılmasını tavsiye etmektedir.

Son zamanlarda, beton basınç dayanımının yaklaşık olarak belirlenmesinde kullanılan en etkin ve güvenilir yöntem, beton test çekici ile ultrases geçiş hızının birlikte kullanıldığı ve değerlendirildiği SONREB bileşik yöntemdir (Cristofaro vd, 2020; Topçu, 1993; Yüksel, 2003; Erdoğan, 2003).

Günümüzde, özellikle yapıya hasar verici deneylerden kaçınmak ve aynı zamanda ekonomik kayıpları önlemek amacıyla bir takım yapay zeka teknikleri ve istatistiksel analizler kullanılmaktadır. Bu yöntemler, bazı durumlarda deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında diğer ampirik modellere göre çok daha iyi sonuçlar vermiştir (Hong-Guang ve Ji-Zong, 2000; Hola ve Schabowicz, 2005).

Bu çalışmada 117 adet karot numunesine ait beton basınç dayanımı değerlerini tahmin etmek için bu numunelere ait tahribatsız yöntemler olan beton test çekici ve ultrasonik test cihazı ile ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler kullanılarak beton basınç dayanımının tahmin edilmesi için YSA ve regresyon yöntemleri kullanılarak yeni modeller ortaya konulmuş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. Gereç ve Yöntemler

Ülkemizin aktif ve riskli deprem kuşağında olmasından dolayı malzeme kalitesi ve dayanıklılığı son derece önemli hale gelmiştir. Yapının durumu hakkında bilgi edinmenin ilk şartlarından biri beton basınç dayanımının belirlenmesidir. Beton basınç dayanımı, tek eksenel basınç yükü altında betonun ezilmemek için gösterebildiği direnme kabiliyeti olup, genel olarak beton kalitesinin belirlenmesinde ve sınıflandırılmasında kullanılır.

Beton basınç dayanımı, tahribatlı-tahribatsız yöntemler ile belirlenmektedir. Mevcut yapı elemanından alınan karot örneklerinin kırılması ile elde edilen basınç dayanımı güvenilir sonuçlar vermesine karşın, yapı elemanı kesitinin azalmasına ve taşıma kapasitesinin düşmesine neden olmaktadır. Ayrıca daha yüksek maliyet ve iş gücü gerektirdiğinden, yapıya zarar vermeden daha kısa sürede ve düşük maliyet ile yaklaşık sonuçlar veren tahribatsız yöntemlerin kullanılması son yıllarda önemli hale gelmiştir.

Literatüre bakıldığında bazı araştırmacılar beton basınç dayanımının tahmininde tahribatsız yöntemlerden yapay zeka yöntemleri ve istatistiksel analizler kullanılarak çeşitli modeller ortaya koymuşlardır. Özellikle SONREB yöntemi ile beton basınç dayanımını belirlemek için birçok modeller öne sürülmüştür. Cristofaro vd (2020) ultrases geçiş hızı ve beton test çekicinin birlikte değerlendirilmesi prensibine dayanan bilimselliği test edilmiş mevcut SONREB tahmin modellerinin etkinliğini araştırmış ve yeni sonuçlar ortaya koymuşlardır. Bazı araştırmacıların birbirinden farklı olarak önermiş oldukları bu bağıntılardan ikisi aşağıda verilmiştir.

$$f_{ck} = 0,0286 \cdot R^{1,246} \cdot V^{1,85} \quad (\text{Gasparik 1992}) \quad (1)$$

$$f_{ck} = 4,40 \cdot 10^{-7} \cdot (R^2 \cdot V^3)^{0,5634} \quad (\text{Del Monte vd. 2004}) \quad (2)$$

Buradaki eşitliklerde f_{ck} beton basınç dayanımı (Mpa), V ultrases geçiş hızı (m/s) ve R Schmidt çekici okumalarını ifade etmektedir.

Sarıdemir (2008) doktora tezi çalışmasında, farklı agregalarla üretilmiş betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini YSA ve bulanık mantık yöntemleri kullanılarak tahmin etmeye çalışmıştır. Subaşı ve Beycioğlu (2008) çalışmasında kırma taş kalker agregalı betonların basınç dayanımlarının belirlenmesi amacıyla çoklu doğrusal regresyon tekniği ve YSA yöntemiyle iki farklı tahmin modeli geliştirmiştir. Yaprak vd. (2013) çalışmasında betonun basınç dayanımını tahmin etmek için YSA geliştirmiş, YSA'nın farklı çimento, yaş ve kür koşullarının girdi parametreleri olarak kullanıldığı ve mevcut basınç dayanımı tahmin yöntemlerine iyi bir alternatif sağladığı sonucuna varmışlardır.

Murtazaoğlu vd. (2015) çalışmasında CFRP (karbon lifli polimer malzeme) ile güçlendirilmiş betonarme kolonların basınç dayanımının tahmini için mevcut olan matematiksel modellere alternatif olarak çoklu regresyon modelleri oluşturmuşlardır. Özbakır ve Nasuf (2016) çalışmasında agregaların fiziksel özelliklerinden yola çıkarak beton dayanımlarının YSA ile tahmin etmiştir. Yapay sinir ağı ile yapılan

tahminlerin regresyondan daha iyi olduğunu göstermiştir. Chopra vd. (2016) çalışmasında betonun basınç dayanımını YSA ve genetik programlama ile tahmin etmişlerdir. Bu iki modeli kıyaslayarak ve yapay sinir ağı kullanılarak, yapılan tahminin basınç dayanımını daha iyi tahmin ettiği sonucuna varmışlardır.

Bu çalışmada ise, SONREB metodu kullanılarak, YSA modelleri ve regresyon analizi ile beton basınç dayanımını tahmin etmek için modeller geliştirilecek, yapılan analizler sonucunda en uygun model belirlenmeye çalışılacaktır. Çalışmanın neticesinde elde edilen modellerin kullanılması durumunda da beton basınç dayanımının belirlenmesi çalışmalarında zaman, iş gücü ve maliyet açısından tasarruf edilmesi sağlanmış olacaktır.

3.Bulgular

Çalışmada Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiş olan 2018/001 numaralı proje kapsamında, Kırıkkale’de 5 farklı binadan alınan toplam 117 adet karot numunesi ile birlikte tahribatsız yöntemler olarak bilinen, beton test çekici ve ultrasonik test cihazları ile elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu veriler Yörübulut (2019)’de çizelge 5.1.a-e’de yer almaktadır. Karot numunesine ait beton basınç dayanımı (f_{ck}), karot numunelerinin alındığı yapı elemanlarından alınan 15 adet beton test çekici ortalama değeri (R) ve ultrases geçiş hızı (V) verilerine ait tanımlayıcı istatistikler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Beton karot numunesine ait tanımlayıcı istatistikler

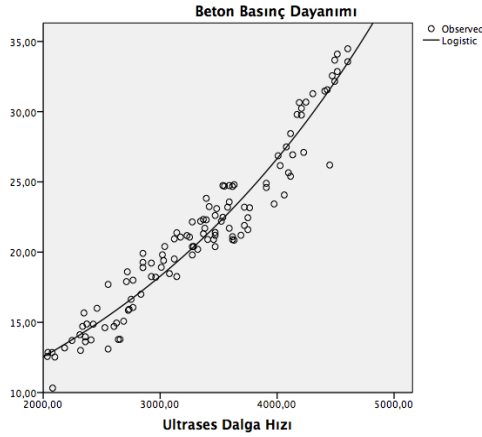
	n	En Küçük	En Büyük	Ortalama	Std. Sapma
R	117	14,00	40,00	22,15	5,53
V (m/s)	117	2035,01	4603,96	3319,41	689,91
f_{ck} (Mpa)	117	10,32	34,48	21,37	5,68

3.1 Regresyon Yöntemi ile Beton Basınç Dayanımının Tahmini

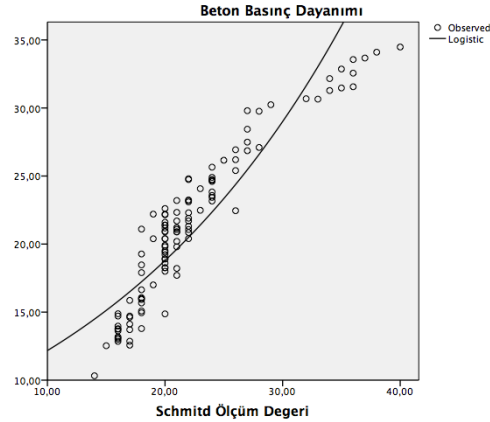
Beton basınç dayanımı değerlerinin ultrases geçiş hızı ve beton test çekici değerinin tek tek ele alındığı basit lineer regresyon modelleri ile birlikte kullanıldığı ve değerlendirildiği SONREB bileşik yöntemi için çoklu lineer regresyon modelleri ortaya konmuştur.

Öncelikle regresyon analizinin yapılması için bağımlı değişken olarak ele alınacak beton basınç dayanımı f_{ck} ’ların normal dağılım gösterip göstermediği Kolmogorov Smirnov-Z normallik testi ile incelenmiştir. Veriler normal dağılım varsayımını sağladığı için regresyon modellerinin oluşturulabileceği belirlenmiştir. ($p = 0,200 > 0,05$).

Kurulacak olan regresyon modellerinde beton basınç dayanımının ultrases geçiş hızı ve beton test çekici değerleri ile arasındaki bağıntıyı belirleyebilmek için Şekil 1. ve Şekil 2.’deki eğri tahminlerinden yararlanılmıştır.



Şekil 1. f_{ck} ve V arasındaki bağıntı



Şekil 2 f_{ck} ve R arasındaki bağıntı

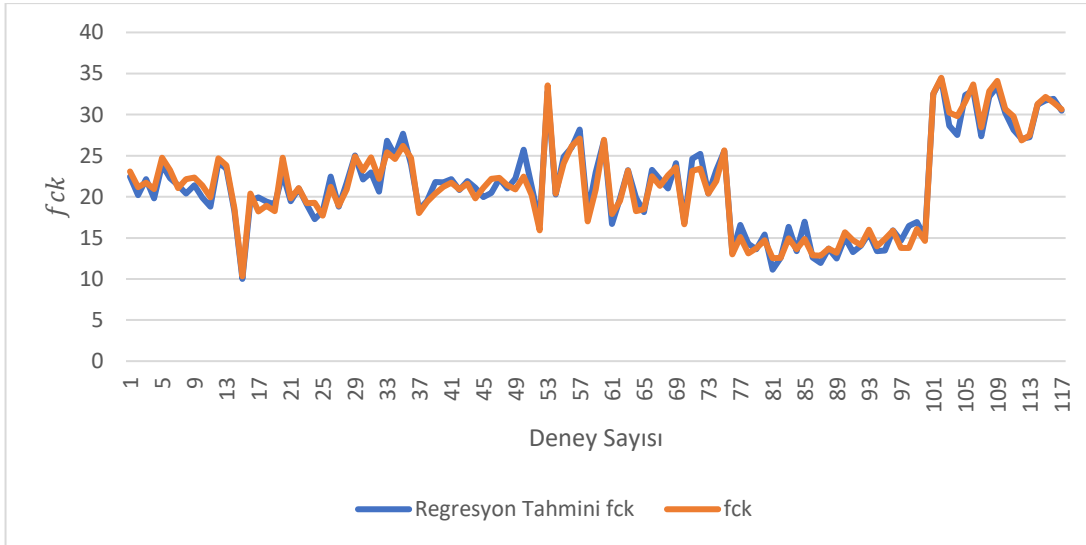
Şekil 1 ve Şekil 2 ile f_{ck} ’nın V ve R arasındaki bağıntının logaritmik olduğu görülmüştür. Değişkenler arasındaki bu logaritmik ilişki göz önüne alınarak oluşturulan modeller Tablo 2’de verilmiştir. Regresyon modellerinin anlamlılığı F -test değeri ve p - anlamlılık düzeyine bakılarak ($p < 0,05$) karar verilir. Beton basınç dayanımı için oluşturulan 4 ayrı model istatistiksel olarak anlamlıdır ($p < 0,05$).

Tablo 2. Beton Basınç Dayanımı Tahmini için Oluşturulan Regresyon Modelleri

Tahmini Modeller	F - Testi	R ²	Anlamlılık Düzeyi (p)
1 $\widehat{Inf}_{f_{ck}} = -0,391 + 1,113 \ln R$ $\widehat{f}_{ck} = 67,63 \times 10^{-4} R^{1,113}$	F = 738,4	%86,5	0,00
2 $\widehat{Inf}_{f_{ck}} = -4,730 + 1,207 \ln V$ $\widehat{f}_{ck} = 11,94 \times 10^{-4} V^{1,207}$	F = 1505,56	%92,9	0,00
3 $Inf_{f_{ck}} = -4,834 + 0,808 \ln V + 0,432 \ln R$ $\widehat{f}_{ck} = 79,54 \times 10^{-4} V^{0,808} R^{0,432}$	F = 1303,399	%95,8	0,00
4 $\widehat{f}_{ck} = -115,554 + 11,400 \ln V + 14,574 \ln R$	F = 1595,399	%96,6	0,00

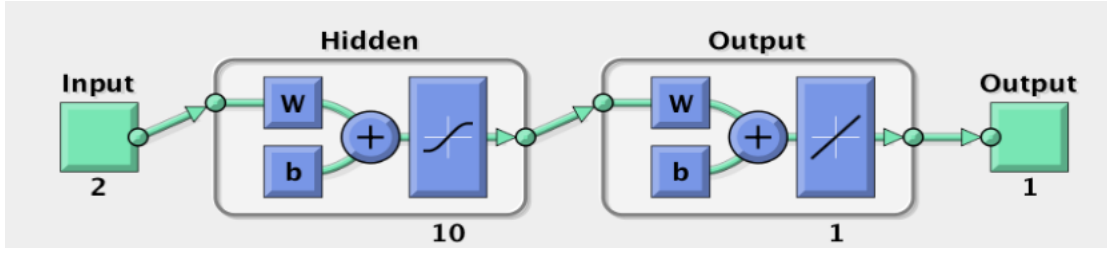
Yapılan basit regresyon analizi ile beton basınç dayanımı tahmininde; beton test çekici değeri ile açıklayıcılık oranı %86,5; ultrases geçiş hızı ile %92,9 ile yüksek derecededir. SONREB bileşik yöntemi için oluşturulan çoklu lineer regresyon analizi ile elde edilen iki yönlü logaritmik modelin açıklayıcılık oranı %95,8 iken, tek yönlü logaritmik modelin açıklayıcılık oranı %96,6 ile en yüksek olarak bulunmuştur.

En yüksek açıklayıcılık oranına sahip olan ve Tablo 2’de verilen 4. tahmini regresyon modeli kullanılarak elde edilen tahmini f_{ck} değeri ile gerçek f_{ck} ’lar arasındaki ilişki Şekil 3’de verilmiştir. Kurulan modelin anlamlı ve R^2 ’nin yüksek olması sonucunda tahmin edilen f_{ck} değeri, gerçek f_{ck} ’ya oldukça yakın olduğu görülmüştür.

**Şekil 3.** Regresyon modeli f_{ck} ile gerçek f_{ck} grafiği

3.2. Yapay Sinir Ağı ile Beton Basınç Dayanımının Tahmini

YSA ile karot numunelerinin beton basınç dayanımlarını tahribatsız yöntemler ile tahmin etmek için bu numunelere ait olan 117 adet ultrases geçiş hızı ve beton test çekici değerlerinin 81’i (verilerin %70’i) eğitim, 18’i (verilerin %15) test ve kalan 18 (verilerin %15) veri ise doğrulama için kullanılmıştır. Çalışma için Şekil 4’te gösterilen ultrases geçiş hızı ve beton test çekici değerleri girdi parametresi beton basınç dayanımı çıktı parametresi olarak iki tabakalı bir model ele alınmıştır.



Şekil 4. Geliştirilen YSA modelinin yapısı

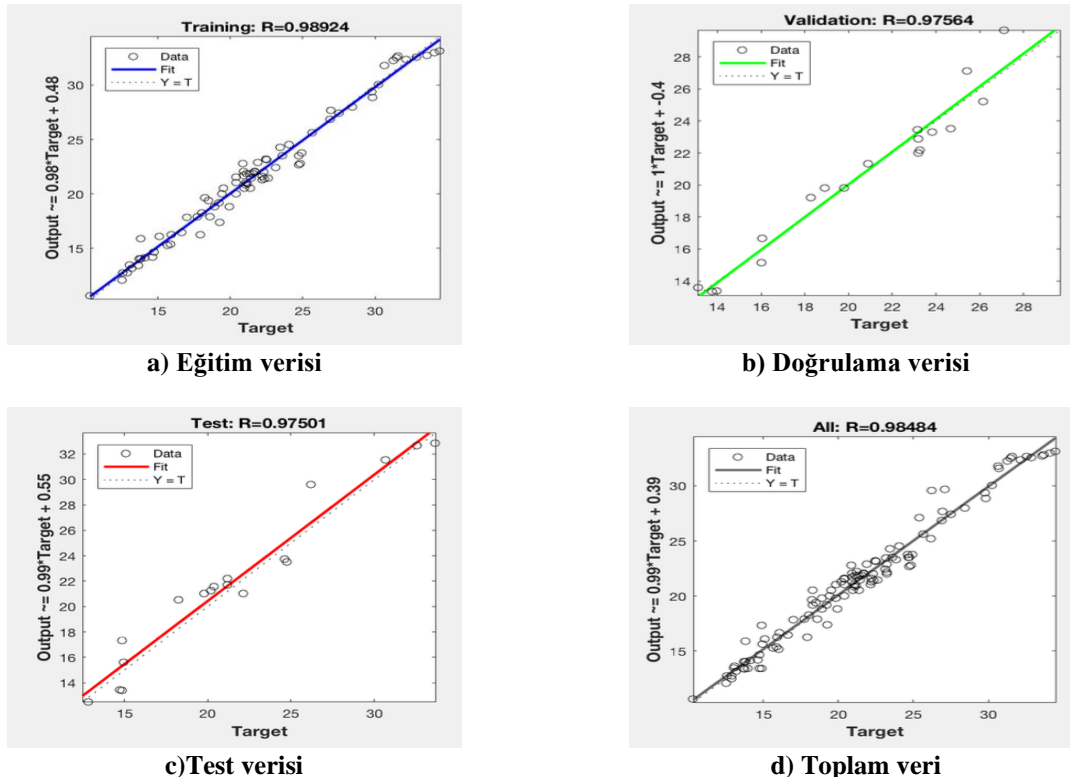
YSA(i,j,n) ağ mimarisi ile gösterilebilen YSA modelinde i girdi tabakasındaki hücre sayısını, j gizli tabakadaki hücre sayısını, n ise çıktı tabakasındaki hücre sayısını ifade etmektedir. Çalışmada, girdi tabakasındaki hücre sayısı $i=2$, gizli tabaka hücre sayısı beton basınç dayanımı tahminini en iyi temsil edebilecek hücre sayıları deneyerek $j=10$ ve çıktı tabaka hücre sayısı ise $n=1$ olarak belirlenmiştir.

Çalışmada iki tabakalı ıleri beslemeli YSA modeli ve aktivasyon fonksiyonu olarak Sigmoid fonksiyonu kullanılmıştır. İterasyon sayısı ise 1000 ile sınırlanmıştır.

Results			
	Samples	MSE	R
Training:	81	7.15835e-1	9.89241e-1
Validation:	18	1.03235e-0	9.75641e-1
Testing:	18	2.07956e-0	9.75012e-1

Şekil 5. YSA modeli için hataların kareleri ortalaması ve ilişkiler

Şekil 5.'e bakıldığında, YSA ile beton basınç dayanımı tahmininde, gerçek f_{ck} 'lar ile tahmin edilen f_{ck} 'lar arasındaki ilişkiyi gösteren R değerleri; eğitim için %99, test için %97 ve doğrulama sınavında %97 ile oldukça yüksek elde edilmiştir.

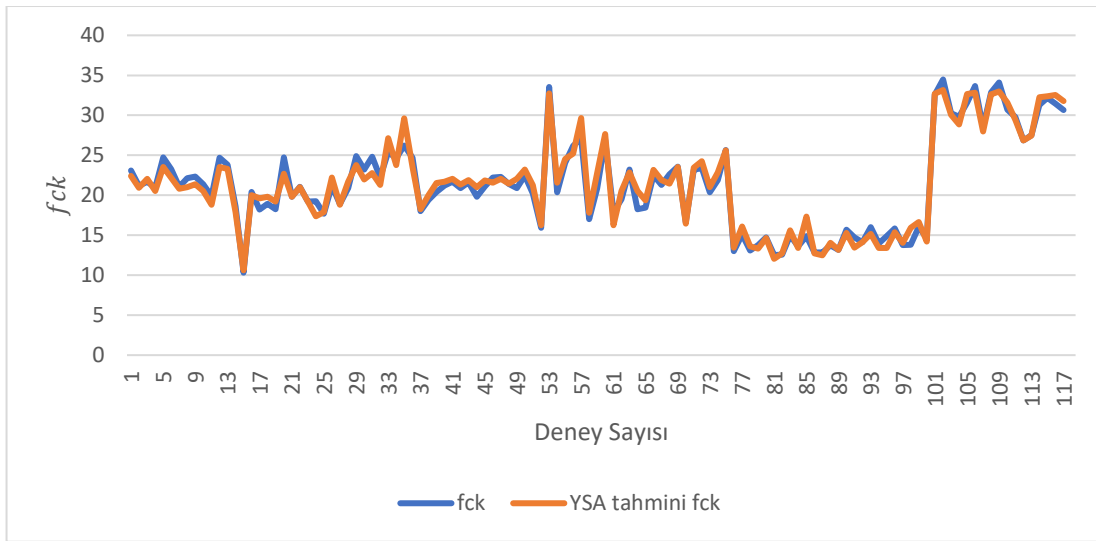
Şekil 6 a-d. YSA modelinde eğitim, test, doğrulama ve tüm veri seti için tahmin edilen f_{ck} değerleri ile gerçek f_{ck} değerleri arasındaki ilişkiler

Şekil 6'da görüldüğü üzere, YSA modelinde eğitim, test, doğrulama ve tüm veri seti için tahmin edilen f_{ck} değerleri ile gerçek f_{ck} değerleri arasındaki ilişkilerin 0.9'un üzerinde çıkması sonuçların istenilen seviyede olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. YSA ile beton basınç dayanım tahminleri ve performans değerleri

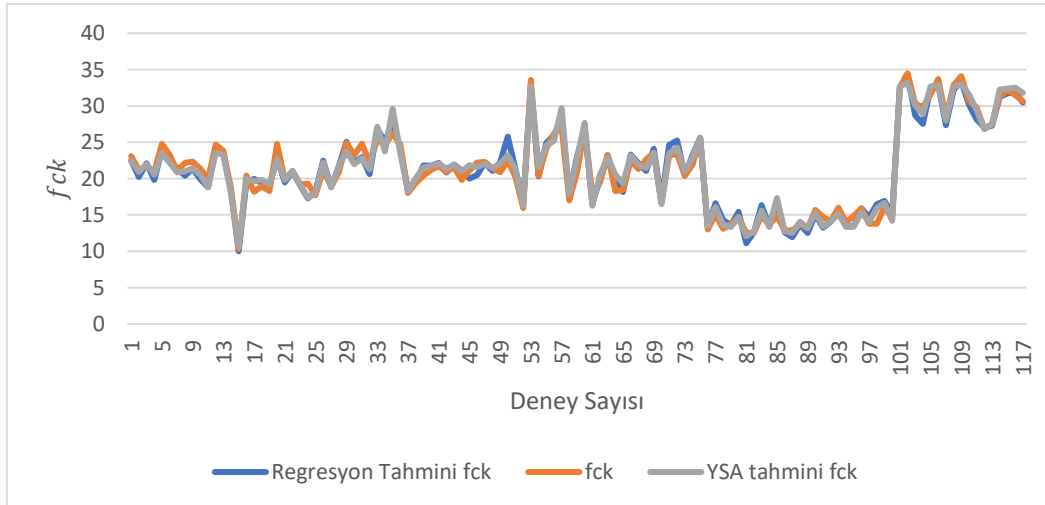
	Model	R	R ²
Eğitim	$y = 0,98x+0,48$	0,989	%97,8
Doğrulama	$y = x+0,4$	0,975	%95
Test	$y = 0,99x+0,55$	0,975	%95
Genel	$y = 0,99x+0,39$	0,984	%96,8

YSA modeli ile tahmin edilen f_{ck} değerleri ve gerçek f_{ck} değerleri arasındaki ilişki Şekil 7'de görülmektedir. Tüm R değerlerinin yüksek olması sonucunda tahmin edilen f_{ck} değeri, gerçek f_{ck} 'ya oldukça yakın çıkmıştır. Bu da Şekil 7.'de gösterilmektedir.



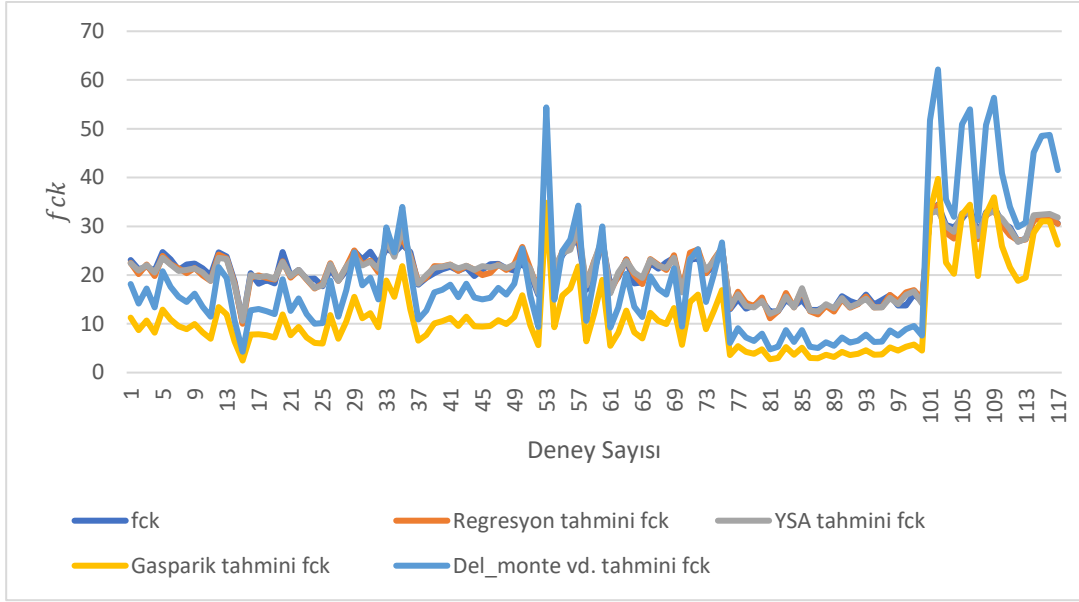
Şekil 7. YSA tahmini f_{ck} ile gerçek f_{ck} grafiği

Tahribatsız yöntemler ile tahmin yapabilmek için YSA ve regresyon analizleri ile elde edilen f_{ck} ve gerçek f_{ck} 'ların grafiği Şekil 8.'de verilmiştir. Bu grafiğe bakıldığında regresyon ve YSA'dan elde edilen tahminlerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Dolayısıyla bu tahmin modelleri birbirlerine alternatif olarak kullanılabilir.



Şekil 8. YSA ve Regresyon modeli ile tahmini f_{ck} ve gerçek f_{ck}

Bu çalışmada elde edilen tahmin sonuçları ile Gasparik (1992) ve Del Monte vd. (2004) tahmin sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 9 ile verilmiştir.



Şekil 9. Tahmin modellerinin karşılaştırılması

Şekil 9. incelendiğinde YSA ve regresyon yöntemleri ile tahmin edilen basınç dayanımlarının Gasparik (1992) ve Del Monte vd. (2004) modelleri ile tahmin edilen basınç dayanıma göre gerçek basınç dayanımlarını daha iyi tahmin edebildiği ortaya konulmuştur.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma ile 117 adet karot alınarak elde edilmiş betonun basınç dayanımları ile alternatif yollar olan YSA ve regresyon yöntemleri kullanılarak tahmin modelleri geliştirilmiştir. Her iki tahmin yöntemi ile kurulan modeller anlamlı ve açıklayıcılık oranları da yüksek olması ile tahmin edilen basınç dayanımı ile karot numuneleri basınç dayanımı sonuçları arasında yüksek oranda uyumluluk olduğu belirlenmiştir.

Oluşturulan modellerde açıklayıcılık oranları göz önüne alındığında ultrases ve Schmidt çekiçi okumalarının tek tek ele alındığı modeller yerine her iki parametrenin birlikte değerlendirildiği SONREB metodunun daha güvenilir olacağı ortaya konulmuştur. Ayrıca YSA ve regresyon modellerinde veri setleri artırılarak açıklayıcılık oranı daha yüksek hata payı daha düşük modellerin elde edilebilirliği gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, ülkemizdeki deprem durumu da dikkat alındığında, mevcut yapıların deprem performanslarının daha hızlı ve ekonomik belirlenebilmesi için beton basınç dayanımlarının tahmin edilmesi, tahribatlı yöntemler yerine tahribatsız yöntemlerle alınan veriler kullanılarak, kurulan bu YSA yöntemi ve regresyon analizi modelleri ile tahmin edilebilecektir. Böylece yüksek maliyet, bina kullanıcılarına ve çevreye verdiği rahatsızlık, zaman ve iş gücü kaybı ile yapının/yapı elemanın zayıflaması vb. gibi birçok dezavantajlı durumlar bertaraf edilmiş olacaktır.

Referanslar

Arioglu, E., & Köylüoğlu, O. (1996). Discussion of prediction of concrete strength by destructive and nondestructive methods by Ramyar and Kol. *Cement and Concrete World*, 3, 33-34.

Chopra, P., Kumar Sharma, R. & Kumar, M. (2016). Prediction of compressive strength of concrete using artificial neural network and genetic programming. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-10.

Cristofaro, M. T., Viti, S., & Tanganelli, M. (2020). New predictive models to evaluate concrete compressive strength using the SonReb method. *Journal of Building Engineering*, 27, 100962.

Del Monte, E., Lavacchini, G., & Vignoli, A. (2004). Modelli per la previsione della resistenza a compressione del calcestruzzo in opera. *Ingegneria Sismica*, 21(3), 30.

- Erdal, M. & Simsek, O. (2006). Bazı hasarsız deney metodlarının vakum uygulanmış betonların basınç dayanımlarının belirlenmesindeki performanslarının incelenmesi. Gazi Üniv. Müh.-Mim. Fak. Dergisi, 21(1), 65-73.
- Erdogan, T.Y. (2003). Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara.
- Gasparik, J. (1992). Prove non distruttive nell'edilizia. Quaderno didattico AIPn.D. Brescia, in Italian.
- Hola, J. & Schabowicz, K. (2005). New technique of nondestructive assessment of concrete strength using artificial intelligence. NDT&E International 38(4) 251-259.
- Ni, H. G., & Wang, J. Z. (2000). Prediction of compressive strength of concrete by neural networks. Cement and Concrete Research, 30(8), 1245-1250.
- Küçük, Ö.F. (2006). Ultrasonik Yüzey Dalgaları-Schmidt Yöntemi Yardımıyla Beton Dayanımının Bulunması. Yüksek Lisans Tezi. Harran Üniversitesi, Şanlıurfa.
- McCulloch, W.S. and Pitts, W.A., 1943, A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, Bull. Math. Biophysics, Vol. 5, 115-133 p.
- McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. The Bulletin of Mathematical Biophysics, 5(4), 115-133.
- Meynink, P., & Samarin, A. (1979). Assessment of compressive strength of concrete by cylinders, cores, and non destructive tests. In Quality Control of Concrete Structures, Rilem Symposium, 1979, Stockholm, Sweden (Vol. 1) 127-134.
- Murtazaoğlu, S., Yetilmezsoy, K. & Doran B. (2015). CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kolonların basınç dayanımının çoklu regresyon modelleriyle tahmini. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 31(3), 172-178.
- Özbakır O. & Nasuf S.E. (2016). Agregaların fiziksel özelliklerinden yola çıkılarak beton dayanımlarının yapay sinir ağları ile kestirilmesi. Selçuk Üniversitesi Journal of Engineering Science&Technology, 4(3).
- Sarıdemir, M. (2008). Farklı Agregalarla Üretilmiş Beton Özelliklerinin Yapay Sinir Ağları ve Bulanık Mantık ile Tahmin Edilmesi. Doktora Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Subaşı, S., & Beycioğlu, A., (2008). Farklı tahmin yöntemleri kullanılarak kırmataş kalker agregalı betonların basınç dayanımının belirlenmesi. e-Journal of New World Sciences Academy 2008, Volume: 3, Number: 4 Article Number: A0099.
- Tanigawa, Y., Baba, K., & Mori, H. (1984). Estimation of concrete strength by combined nondestructive testing method. Special Publication, 82, 57-76.
- Topçu, İ. B., & Sarıdemir, M. (2008). Prediction of rubberized mortar properties using artificial neural network and fuzzy logic. Journal of Materials Processing Technology, 199(1-3), 108-118.
- Topçu, İ.B., Uygunoğlu, T., & İnce, H. H. (2010). Hafif beton basınç dayanımının yapay sinir ağlarıyla tahmini. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6(1), 19-29.
- Topçu, İ.B. (1993). Volkanik Cürüflü Betonlarda Sonreb Yöntemi Uygulaması. 5. Malzeme Semp., Pamukkale Üniv., Müh. Fak., 7-8-9 Nisan 1993, Denizli, Cilt 2, 770-779.
- TS EN 13791, Basınç dayanımının yapılar ve öndökümlü beton bileşenlerde yerinde tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Nisan 2010.
- Yaprak, H., Karacı, A., & Demir, İ. (2013). Prediction of the effect of varying cure conditions and w/c ratio on the compressive strength of concrete using artificial neural networks. Neural Computing and Applications, 22(1), 133-141.
- Yörübulut, S. (2019). Tahribatsız yöntem verileri kullanılarak yapay sinir ağı ve regresyon yöntemi ile betonun basınç dayanımının tahmin edilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.
- Yüksel, İ. (2003). Bileşik yıkıntısız yöntemle yerinde beton dayanımının tahmini. Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(2), 231-235.