

(Araştırma Makalesi)**Ferrokrom Baca Tozu İkameli Çimentoların Basınç Dayanımlarının ANFIS ile Tahmini****Selcan KAYA¹, Serkan SUBAŞI², Yılmaz KOÇAK^{*3}**¹Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 81600, Düzce.ORCID No: <http://orcid.org/0009-0003-3786-0880>²Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 81600, Düzce.ORCID No: <http://orcid.org/0000-0001-7826-1348>³Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 81600, Düzce.ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-5281-5450>**Anahtar Kelimeler:**Portland çimento,
Ferrokrom baca tozu,
Basınç dayanımı,
ANFIS

Özet: Ülkemizde ve dünyada ekonomik ve ekolojik nedenlerden dolayı gerek doğal gerekse yapay mineral katkıları çimento ve beton teknolojisi alanında akademik birçok araştırmaya konu olmaktadır. Özellikle endüstriyel atıklar çevreye olumsuz etkileri nedeniyle daha fazla dikkat çekmektedir. Bu nedenle, ekolojik sorunlar oluşturan ve yüksek düzeyde toksik elementlerin kaynaklarından biri olarak dikkat çeken ve endüstriyel bir atık olan ferrokrom baca tozunun çimento teknolojisinde kullanımı oldukça faydalı olacaktır. Bu çalışma, farklı oranlarda ve farklı hidratasyon yaşlarındaki ferrokrom baca tozu ikameli harçların basınç dayanımlarının üç farklı ANFIS modeli ile tahmin edilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, Portland çimentosuna %0, %2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarında ferrokrom baca tozu ikame edilmiş ve bu harçların basınç dayanımları belirlenmiştir. İkinci aşamada, ANFIS editöründe yer alan “üçgen”, “yamuk” ve “gauss” üyelik fonksiyonu ile üç farklı model oluşturularak harçların basınç dayanımları tahmin edilmiştir. Son bölümde tahmin sonuçları, gerçek değerlerle ve R^2 , MAPE ve RMSE istatistiksel yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen verilere göre “gauss” üyelik fonksiyonu ile tahmin edilen basınç dayanımı değerlerinin yaklaşık %98 doğrulukla tahmin edildiği görülmüştür.

(Research Article)**Prediction of Compressive Strength of Ferrochrome Flue Dust Substituted Cements via ANFIS****Keywords:**Portland cement,
Ferrochrome flue dust,
Compressive strength,
ANFIS

Abstract: Due to economic and ecological reasons in our country and the world, both natural and artificial mineral admixtures are the subject of many academic researchers in the field of cement and concrete technology. Especially industrial wastes attract more attention due to their negative effects on the environment. Therefore, the use of ferrochrome flue dust, which is an industrial waste that creates ecological problems and draws attention as one of the sources of highly toxic elements, will be very useful in cement technology. This study was carried out to predict the compressive strength of ferrochrome flue dust substituted mortars at different ratios and hydration ages by three different ANFIS models. In the first stage of the study, ferrochrome flue dust was substituted into Portland cement at 0, 2.5, 5, 7.5 and 10% ratios, and the compressive strengths of these mortars were determined. In the second stage, the compressive strengths of the mortars were predicted by creating three different models with the ‘triangle’, ‘trapezoid’ and ‘gauss’ membership functions in the ANFIS editor. In the last stage, the prediction results were compared with the actual values and statistical methods of R^2 , MAPE and RMSE. According to the data obtained, it was seen that the compressive strength values predicted with the ‘gauss’ membership function were predicted with approximately 98% accuracy.

1. GİRİŞ

Portland çımentosu (PÇ), kalker, kil ve/veya marn gibi hammadde karışımlarının ısıl işlemleri sonucunda elde edilen ve klinker olarak isimlendirilen malzemelerin %3-6 oranlarında alçı taşı ile öğütölmesiyle elde edilen; suyla karıştırıldığında prosesler ve hidratasyon reaksiyonları sonucunda sertleşen bir hamur oluşturan, bu sertleşme sonucunda suyun altında dahi dayanımını koruyan ince öğütölmiş gri renkte hidrolik bir bağlayıcıdır [1]. 1 ton PÇ, 0.8-1 ton CO₂ ürettiği için yüksek düzeyde karbondioksit (CO₂) emisyonuna sahip olan ve küresel endüstriyel enerjinin yaklaşık %5'ini kullanan bir bağlayıcı malzemedir [2, 3] PÇ üretiminde atmosfere büyük miktarda CO₂ salındığı ve iklimsel değışikliklere neden olduğu için çevreye dost bir malzeme olarak değerdendirilmediği söylenebilir [3]. Bu nedenle hem üretimindeki klinker miktarını azaltmak hem de geri dönüşümü sayesinde çevreye zararlarını önlemek amacıyla yapay mineral katkı sınıfındaki silis dumanı, ucucu kül, yüksek fırın curufu gibi endüstriyel yan ürünler çımento içerisine katılmaktadır. Bu malzemelerden bir de son zamanlarda üzerinde durulan ferrokrom baca tozudur.

Ferrokrom baca tozu (FBT), Ferrokrom sanayi tesislerinde özel filtrelı toz tutucularla toplanan baca tozlarıdır. Dünyadaki kromit ürünlerinin çoğu (%95) metalurji endüstrisinde ferrokrom alaşımlarının elde edilmesi için kullanılmaktadır. Bunlar esas olarak çok daha düşük miktarlarda karbon ve silikon içeren demir ve krom alaşımlarıdır ve miktarlar alaşımların derecesine veya türüne bağlıdır. Ferrokrom, kromitin yüksek sıcaklıkta ark fırınlarında indirgenmesi (eritme) ile üretilmektedir [4]. Ferrokrom üretim sırasında oluşan cüruf ve baca tozu (fırın tozu) gibi atıkları geri dönüştürmek ve/veya kullanmak için dünya çapında birçok araştırma faaliyeti devam etmektedir. Ferrokrom üretim sürecinde çevreye salınan bu baca tozu parçacıkları, ekolojik sorunlar oluşturan yüksek düzeyde toksik elementlerin kaynaklarından biri olarak dikkat çekmektedir [4, 5].

Dolayısı ile çevresel sorunları azaltmak ve bu malzemelerin çımento içerisindeki davranışlarını tespit edebilmek amacıyla literatürde birçok çalışmaya rastlanmaktadır. Bu çalışmalarda özellikle çımento harçlarının basınç dayanımları laboratuvarında yapılan deneylerle tespit edilmeye çalışılmaktadır. Ancak standart çımento deneyleri içerisinde yer alan basınç dayanımının tespiti, zahmetli, enerji maliyetine yol açan ve zaman alıcı çalışmalar olarak değerdendirilmektedir. Bu nedenle çımento harçlarının basınç dayanımlarının tespit edilebilmesi için araştırmalarda farklı yapay zeka tabanlı uygulamalara yer verilmektedir. Bu uygulamalardan biri de yüksek tahmin sonuçlarına ulaşılabilen uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) olup, betonların veya çımento harçlarının basınç dayanımlarının tahmininde yoğun olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmalar arasında yer alan bir araştırmada Ozcan vd., Portland çımento içerisine zeolit ve diatomit ikame ederek katkılı betonlar üretmiş ve bu betonların basınç dayanımlarını oluşturdukları ANFIS ve Yapay sinir ağları

(YSA) ile tahmin etmişlerdir. Sonuçları istatistiksel verilerle (R², MAPE gibi) karşılaştırmışlar ve ANFIS ile belirlenen sonuçların yaklaşık %98 doğrulukta olduğunu bu modelin kullanılmasının zaman ve ekonomik açıdan faydalı olabileceğini ifade etmişlerdir [6]. Bir başka araştırmada Güvenç ve Koçak, çımento içerisine pomza ve diatomit katarak elde edilen çımentoların basınç dayanımlarını ANFIS ile tahmin etmişlerdir. R² değerinin 0.97, MAPE değerinin %6.66 ve RMSE değerinin ise 2.55 olarak hesaplandığı ve ANFIS ile yapılan basınç dayanımı tahminlerinin oldukça iyi olduğu sonucuna varmışlardır [7]. Bir diğer çalışmada Vakhshouri ve Nejadi, ANFIS modelleri ile kendiliğinden yerleşen betonun basınç dayanımlarını tahmin etmeye çalışmışlardır. Bu amaçla on sekiz giriş parametresi kombinasyonu ile basınç dayanımı ile çökme akışı ve karışım oranları arasındaki ilişkiyi kurmak için 55 deneysel çalışmadan faydalanarak ANFIS modelleri tasarlamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre tüm giriş verilerini (çökme akışı ve karışım oranları) içeren modelin basınç dayanımının tahminine en iyi sonucu verdiğini belirlemişlerdir [8]. Gkountakou ve Papadopoulos yaptıkları bir başka çalışmada bulanık doğrusal regresyon (FLR) ve ANFIS yöntemleri kullanılarak çımento harçlarının 28. gündeki basınç dayanımlarını tahmini etmişlerdir. Girdi olarak çımentonun fiziksel ve kimyasal özelliklerinden olan C₃S, SO₃, Blaine inceliği ve alkali değerlerini esas almışlardır. Elde ettikleri verilere göre ANFIS yönteminin çımento basınç dayanımını tahmin etmedeki belirsizlik seviyesini başarılı bir şekilde azalttığı ve istatistiksel olarak hesapladıkları MAPE verilerine göre %99.7 doğrulukta küçük sapmalarla başarılı bir şekilde tahmin edebildiklerini belirtmişlerdir [9]. Ayrıca çımento harçlarının ve betonun basınç dayanımlarını tahmin etmek için literatürde ANFIS ile oluşturulan modellerle birçok başarılı sonuca ulaşıldığı ifade edilebilir [10-14].

Dolayısı ile literatür araştırmasından görüleceği üzere ANFIS'in teorik veya ampirik değerleri tahmininde etkili yapay zeka tabanlı bir uygulama olduğu ve yapılacak tahminler için zaman ve maliyet açısından faydalı olabileceği söylenebilir. Bu çalışmada da ekolojik dengenin korunması ve çımento üretimindeki klinker miktarının azaltılması açısından üzerinde yoğun araştırmaların yapıldığı bir malzeme olan FBT ile üretilen çımento harçlarının basınç dayanımları, ANFIS ile tahmin edilmeye çalışılacaktır. Çalışmanın ilk aşamasında PÇ'ye %0, %2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarında FBT ikame edilerek 5 tip çımento üretilmiş ve bu çımentoların 1, 2, 7 ve 28. günlerdeki basınç dayanımları belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise, ANFIS editöründe yer alan "üçgen", "yamuk" ve "gauss" üyelik fonksiyonu ile üç farklı model oluşturulmuştur. Bu modellerin giriş değışkenlerini Portland çımento, ferrokrom baca tozu ve hidratasyon günü oluştururken, çıkış değışkenlerini ise harçların basınç dayanımı oluşturmaktadır. Modellerin eğitiminde 120 veri, testinde ise 20 veri kullanılmıştır. Son bölümde tahmin edilen bu sonuçların doğruluğunu tespit edebilmek için hem gerçek değerlerle tahmin değerleri karşılaştırılmış hem de istatistiksel yöntemler (R², MAPE ve RMSE) kullanılarak sonuçlar birbiriyle kıyaslanmıştır.

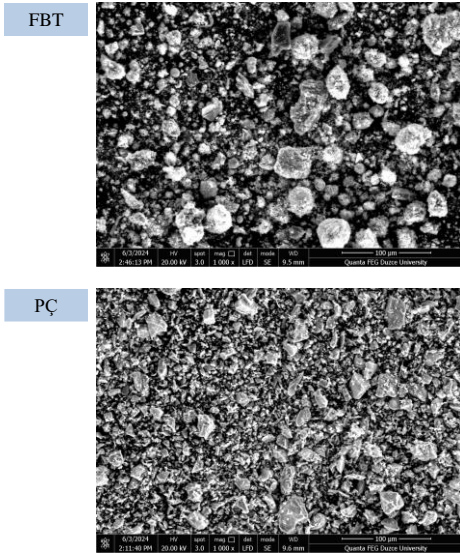
2. MALZEME VE YÖNTEM

Basınç dayanımlarının belirlenmesinde kullanılacak olan harç numunelerinin üretiminde PÇ, FBT, su ve standart kum kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan bağlayıcı malzeme olan PÇ (CEM I 42.5 R), Düzce ili Yığılca ilçesinde bulunan Marmara Çimento fabrikasına aittir. FBT ise Elazığ İlinde bulunan Eti Krom A.Ş. Ferrokrom Üretim Tesisinden elde sağlanmıştır. Harçların hazırlanmasında Yığılca ilçesine ait şebeke suyu kullanılmıştır. FBT ve PÇ'nin kimyasal özellikleri Tablo 1'de, numunelere ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ise Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 1. FBT ve PÇ'ye ait kimyasal özellikler

Malzeme	FBT	PÇ
SiO ₂	21.82	18.31
Al ₂ O ₃	3.82	5.14
Fe ₂ O ₃	4.70	3.14
CaO	0.19	64.28
MgO	13.62	1.77
SO ₃	0.47	3.22
Na ₂ O	5.86	0.71
K ₂ O	6.93	0.26
Mn ₂ O ₃	0.70	0.11
Cr ₂ O ₃	7.23	0.03
P ₂ O ₅	0.00	-
TiO ₂	0.10	0.22
ZnO	14.12	-
Cl ⁻	-	0.0064
Kızdırma kaybı	20.30	2.86

Tablo 1'e göre göre; PÇ'nin ağırlıkça CaO ve SiO₂ ana bileşenlerinden oluştuğu görülürken FBT'nin SiO₂, MgO, Cr₂O₃, K₂O, Na₂O, Fe₂O₃ ve Al₂O₃ şeklinde sıralandığı görülmektedir (Tablo 1). Elde edilen kimyasal analiz sonuçlarına göre PÇ'nin kimyasal özelliklerinin (SO₃, MgO, Cl⁻, kızdırma kaybı) TS EN 197-1'deki sınır değerler arasındadır [15].



Şekil 1. FBT ve PÇ'nin SEM görüntüleri

PÇ'nin taramalı elektron mikroskop görüntüsüne göre farklı şekil ve boyutlarda düzensiz yapıya sahip olduğu görülürken; FBT'nin ise genel olarak küresel tanelerden

oluştugu ve yine PÇ gibi farklı şekil ve boyutlarda düzensiz yapıda olduğu izlenmektedir (Şekil 1).

Harçlarının hazırlanması için %0, %2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarında FBT ikame edilerek üretilen beş tip çimento kullanılmış ve bu çimentola için tercih edilen kodlar Tablo 2'de belirtilmiştir.

Tablo 2. Çimento kodları

No	Çimento	İsmi
1	Referans çimento (PÇ)	R
2	%2.5 FBT ile ikame edilen çimento	2.5FBT
3	%5 FBT ile ikame edilen çimento	5FBT
4	%7.5 FBT ile ikame edilen çimento	7.5FBT
5	%10 FBT ile ikame edilen çimento	10FBT

Çimento harçlarının basınç dayanımları TS EN 196-1'deki esaslara göre tespit edilmektedir [16]. Çalışmamızda bağlayıcı (Çimento veya katkılı çimento), kum, su laboratuvar sıcaklığında olacak şekilde sırasıyla 450 g, 1350 g ve 225 g olarak tartılmıştır. Karıştırıcı düşük hızda çalışır durumdayken karıştırma kabına önce su ve çimento eklenmiş ve 30 saniye sonra kum, 30 saniye içinde sürekli olarak eklenmiştir. Daha sonra karıştırıcı yüksek hıza ayarlanmış ve karıştırmaya 30 saniye daha devam edilmiştir. Akabinde karıştırıcı, 90 saniye sonra durdurulmuştur. Bir lastik sıyrıcı yardımıyla ilk 15 saniye kabın yan yüzlerine ve altına yapışan harç sıyrılarak kabın ortasına toplanmıştır. Daha sonra karıştırılmaya 60 saniye daha yüksek hızda devam edilmiştir. Harçlar hazırlandıktan hemen sonra ilk tabaka 40x40x160 mm boyutlardaki üç gözden oluşan kalıba, bir kalıp başlığı yardımıyla yerleştirilmiş ve 60 sarsma ile sıkıştırılmıştır. Buna müteakip ikinci tabaka harç, kalıba yerleştirilmiş ve küçük yayıcı ile üzeri itina ile düzeltilerek ikinci kez 60 sarsma ile sıkıştırılmıştır. Daha sonra kalıp itina ile sarsma tablasından alınarak kalıp başlığı çıkarılmış, fazla harç özenle düzeltilmiştir. Örnekler etiketlenerek 20±1 °C ve %90 neme sahip bir laboratuvarında 24 saat bekletilmiştir. 1 günlük numuneler bu süre sonunda uygun olarak ikiye bölünmüş ve yarım prizmalar üzerinde basınç dayanımı gerçekleştirilmiştir. Diğer numuneler 2, 7, 28. hidratasyon günleri için 20 °C sıcaklıktaki kür havuzlarına yerleştirilmiştir. Üç gözlü kalıptan çıkarılan bu numuneler aynı şekilde ikiye bölünmüş ve elde edilen yarım numunelerin basınç dayanımı değeri belirlenmiştir [16]. Standartlar gereği nihai basınç dayanımları, her bir harç için 6 numunenin ortalaması alınarak belirlenmektedir.

3. ANFIS

ANFIS, verimli modelleme ve çıkarım yetenekleri sağlamak için bulanık mantık ve sinir ağlarını entegre eden hibrit bir hesaplama modeli olup, bulanık sistemler ve sinir ağlarının avantajlarını birleştirerek karmaşık ve doğrusal olmayan sistemleri etkili bir şekilde ele alma yeteneği nedeniyle çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılabilir [17, 18]. ANFIS'in çekirdek yapısı, öncül ve soncul kısımlar olmak üzere iki ana aşamadan oluşan Takagi-Sugeno bulanık sistemine dayanmaktadır [19]. ANFIS'te If-Then bulanık kuralları olarak

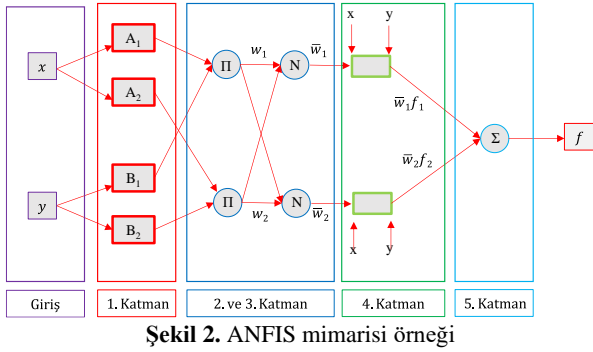
tanımlanan girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki bilgiler, Denklem 1 ve 2’de verilmiştir [20].

$$1: \text{If } x \text{ is } A_1, \text{ and } y \text{ is } B_1 \text{ Then } f_1 = p_1x + q_1y + r_1 \quad (1)$$

$$2: \text{If } x \text{ is } A_2, \text{ and } y \text{ is } B_2 \text{ Then } f_2 = p_2x + q_2y + r_2 \quad (2)$$

Denklemlerdeki x girişleri için A_i , y girişleri için ise B_i , üyelik fonksiyonları ifade edilmektedir. Çıkış fonksiyonu olarak f_1 ve f_2 temsil edilmektedir. Sonuç parametreleri ise p_i , q_i ve r_i olarak belirtilmekte ve bu değerler her kural için bir çıktı değeri sağlamaktadır [20].

Giriş değişkeni iki olan ve 5 katmandan oluşan bir ANFIS mimarisi Şekil 2’de verilmektedir [20].



Şekil 2. ANFIS mimarisi örneği

Bulanıklaştırma katmanı olarak belirtilen 1. katmandaki nöronlar, öncül parametreleri bulunan uyarlanabilir düğümler olarak ifade edilir. Uygulama katmanı olarak adlandırılan 2. katman nöronlar II olarak ifade edilir Bu katmandaki çıkış düğümü, gelen sinyallere göre şekillenir. Buradaki w_i ile temsil edilen çıkış düğümü, bir kurala ait ateşleme gücünü belirtir. Normalleştirme katmanı olarak isimlendirilen 3. katmanda bulunan her nöron, N olarak etiketlenen sabit bir nörondur. Burada çıktı; i’inci kuraldaki ateşleme gücünün, tüm kurallardaki ateşleme gücünün toplamına oranlanarak belirlenir. Arındırma katmanı olarak değerlendirilen 4. katmanda bulunan adaptif nöronlar, sonuç parametrelerini içermektedir. Birleştirme katmanı olarak belirtilen 5. katman ise tüm girdileri toplayan tek bir nörondan oluşmaktadır [20].

4. ANFIS TASARIMI VE MODEL PARAMETRELERİ

ANFIS modellerinin eğitimi ve testlerinde girdi olarak Portland çimento, ferrokrom baca tozu ve hidrasyon yaşı oluştururken, çıkış değişkenlerini ise harçların basınç dayanımları oluşturmaktadır. Bu verilere ait min. ve max. değerler Tablo 3’te verilmiştir.

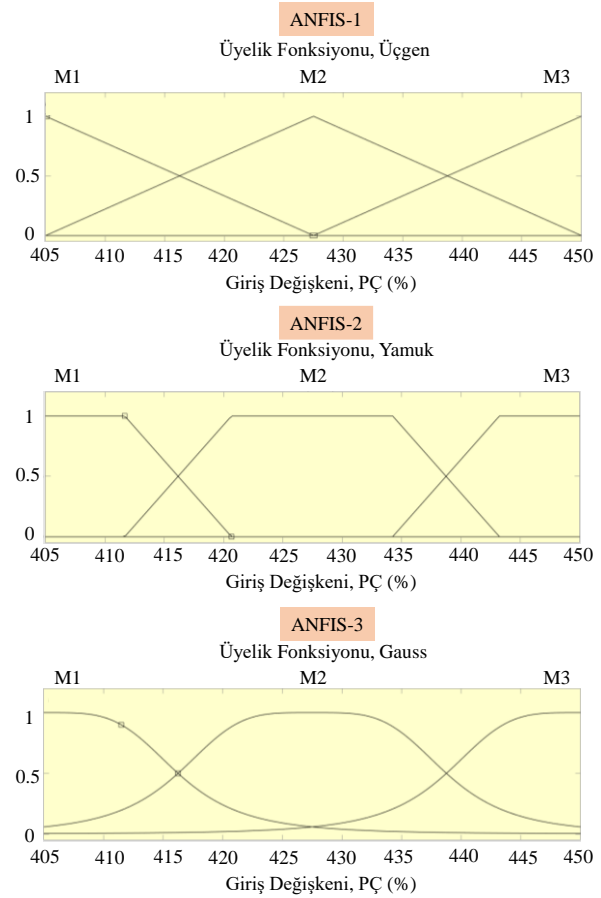
Tablo 3. ANFIS modellerinde kullanılan girdi ve çıktı değerleri

		Girdi ve çıktı değerleri	
		Min.	Max.
Giriş değerleri	PC, g	405	450
	FBT, g	11.25	45
	Hidrasyon yaşı, gün	1	28
Çıktı değerleri	Basınç dayanımı, MPa	15.4	57.2

FBT ikameli çimento hamurlarının basınç dayanımlarını tahmin etmek için MATLAB programındaki bulanık mantık araç kutusu içerisindeki ANFIS editöründe yer alan “üçgen”, “yamuk” ve “gauss” üyelik fonksiyonu tercih edilmiş ve bu üyelik fonksiyonları sırasıyla ANFIS-1, 2 ve 3 modelleri olarak isimlendirilmiştir. Bu modellere ait parametre değerleri Tablo 4’te verilmiştir. Ayrıca basınç dayanımlarına ait örnek olarak seçilen PÇ’ye ait giriş değişkeninin üyelik fonksiyonları Şekil 3’te gösterilmiştir.

Tablo 4. ANFIS modellerinin parametre değerleri ve yapısal özellikleri

Parametreler	ANFIS-1	ANFIS-2	ANFIS-3
Düğüm sayısı	78	78	78
Doğrusal parametre sayısı	27	27	27
Doğrusal olmayan parametre sayısı	27	36	27
Toplam parametre sayısı	54	63	54
Eğitim veri çifti sayısı	120	120	120
Veri çifti kontrol sayısı	0	0	0
Toplam bulanık kural sayısı	27	27	27
Epoch sayısı	300	300	300



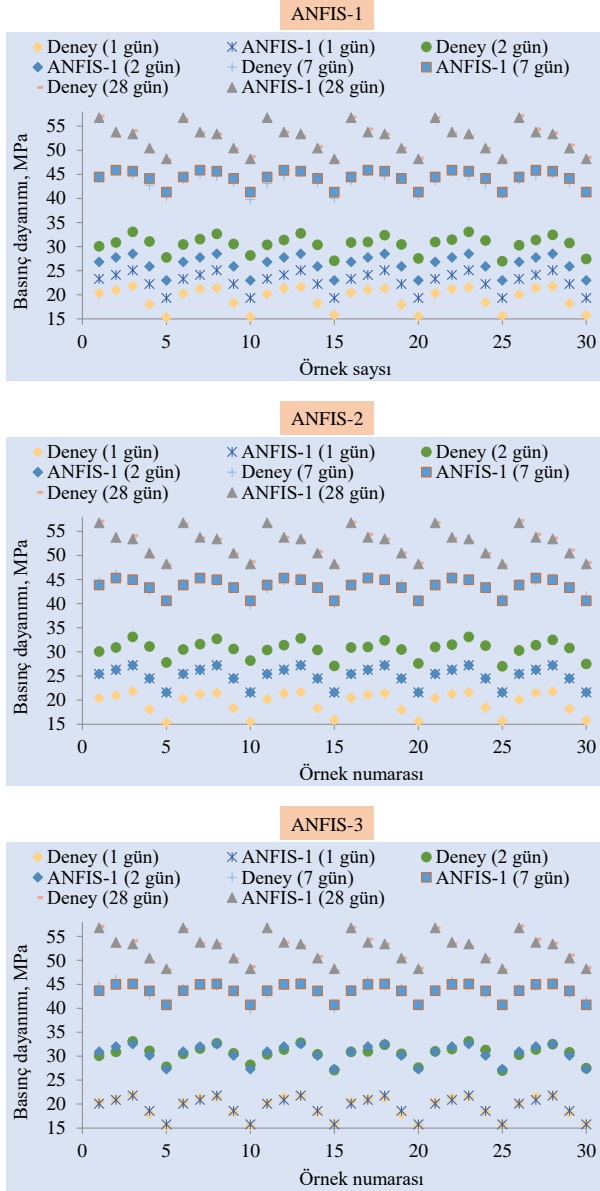
Şekil 3. ANFIS modelleri PÇ giriş değişkenlerinin üyelik fonksiyonları

Burada, standartlar gereği her çimento ve hidrasyon yaşı için 6 adet basınç dayanımı sonucundan elde edilen toplam 120 veri modelin eğitimi için kullanılmıştır. Yine

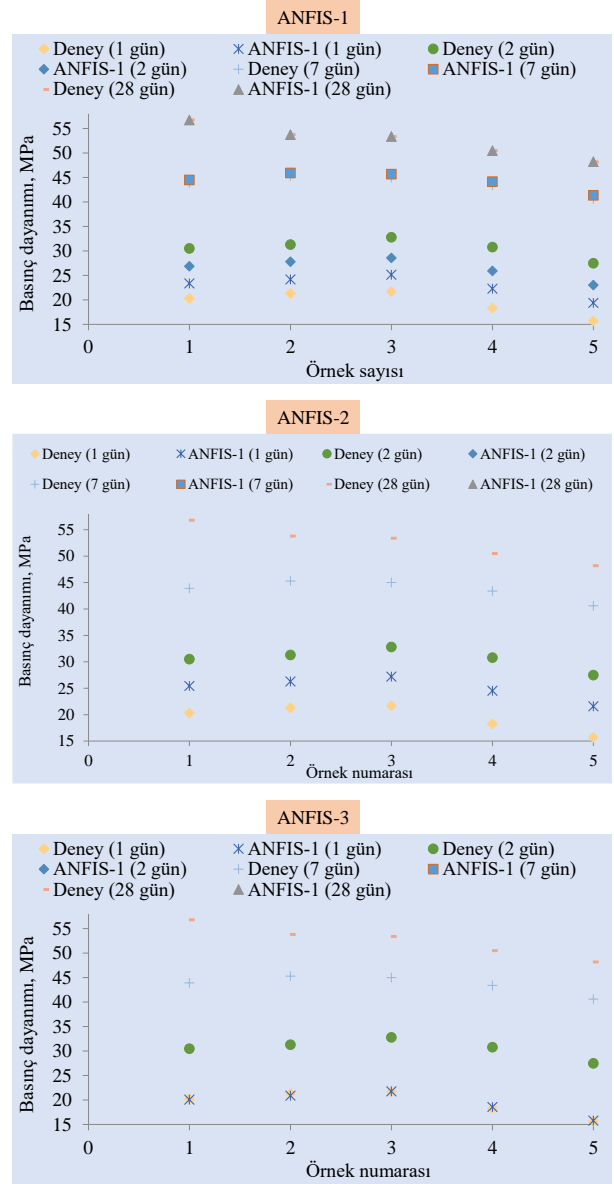
standartların belirttiği üzere bu 6 adet basınç dayanımı sonucunun ortalaması alınarak elde edilen ve harçların basınç dayanımı olarak ifade edilecek olan 20 veri ise test için kullanılmıştır.

5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Eğitim ve test sürecinde laboratuvar deneylerinden belirlenen basınç dayanımı değerleri ve ANFIS modellerinden tespit edilen tahmin verileri arasındaki kıyaslama sırasıyla Şekil 4 ve 5'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Eğitim aşamasındaki veriler



Şekil 5. Test aşamasındaki veriler

Deneylerden elde edilen ve eğitim aşamasında kullanılan basınç dayanımı sonuçları, 1. hidrasyon günü için 15.4 MPa ile 21.9 MPa, 2. hidrasyon günü için 27.0 MPa ile 33.1 MPa, 7. hidrasyon günü için 39.8 MPa ile 46.0 MPa, 28. hidrasyon günü için 47.8 MPa ile 57.2 MPa arasında farklılıklar göstermektedir.

ANFIS modellerinin oluşturulmasında yararlanılan girdi değerleri, deneysel sonuçlar ve modellerden elde edilen tahmin değerleri Tablo 5'te sunulmuştur. Ayrıca modellerden elde edilen tahmin değerleri ile deneysel sonuçlar arasındaki hata oranlarının daha net incelenmesi için yapılan hesaplama sonucunda belirlenen değerler Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 5. Girdi değerleri, deneysel sonuçlar ve tahmin edilen değerler

Kodlar	Girdiler			Basınç dayanımı, MPa			
	Gün	PÇ, g	BT, g	Deney	ANFİS-1	ANFİS-2	ANFİS-3
PÇ	1	450	0	20.3	23.4	25.4	20.1
2.5FBT	1	438.75	11.25	21.3	24.2	26.3	20.9
5FBT	1	427.5	22.5	21.7	25.1	27.2	21.8
7.5FBT	1	416.25	33.75	18.3	22.3	24.5	18.6
10FBT	1	405	45	15.7	19.4	21.6	15.8
PÇ	2	450	0	30.5	26.9	25.4	31.0
2.5FBT	2	438.75	11.25	31.3	27.8	26.3	32.0
5FBT	2	427.5	22.5	32.8	28.6	27.2	32.5
7.5FBT	2	416.25	33.75	30.8	25.9	24.5	30.1
10FBT	2	405	45	27.5	23.0	21.6	27.3
PÇ	7	450	0	43.9	44.5	43.9	43.7
2.5FBT	7	438.75	11.25	45.3	45.9	45.3	45.0
5FBT	7	427.5	22.5	45.0	45.7	45.0	45.1
7.5FBT	7	416.25	33.75	43.4	44.2	43.3	43.6
10FBT	7	405	45	40.6	41.3	40.6	40.7
PÇ	28	450	0	56.8	56.8	56.8	56.8
2.5FBT	28	438.75	11.25	53.8	53.8	53.8	53.8
5FBT	28	427.5	22.5	53.4	53.4	53.4	53.4
7.5FBT	28	416.25	33.75	50.5	50.5	50.5	50.5
10FBT	28	405	45	48.2	48.2	48.2	48.2

Tablo 6. Modellerden elde edilen tahmin değerleri ile deneysel sonuçlar arasındaki hata oranlarının karşılaştırması

Gün	Modeller	R	2.5FBT	5FBT	7.5FBT	10FBT	
1 gün	ANFİS-1	Hata, MPa	-3.06	-2.88	-3.45	-3.99	-3.69
		Hata, %	-13.10	-11.92	-13.71	-17.90	-19.02
	ANFİS-2	Hata, MPa	-5.13	-4.98	-5.51	-6.22	-5.89
		Hata, %	-20.16	-18.96	-20.25	-25.36	-27.29
	ANFİS-3	Hata, MPa	0.21	0.41	-0.08	-0.29	-0.09
		Hata, %	1.03	1.96	-0.36	-1.57	-0.54
2 gün	ANFİS-1	Hata, MPa	3.62	3.50	4.23	4.87	4.45
		Hata, %	13.47	12.58	14.81	18.76	19.32
	ANFİS-2	Hata, MPa	5.07	5.02	5.59	6.28	5.91
		Hata, %	19.96	19.09	20.55	25.63	27.36
	ANFİS-3	Hata, MPa	-0.45	-0.70	0.27	0.65	0.22
		Hata, %	-1.46	-2.19	0.84	2.16	0.80
7 gün	ANFİS-1	Hata, MPa	-0.58	-0.60	-0.68	-0.76	-0.75
		Hata, %	-1.29	-1.31	-1.49	-1.72	-1.81
	ANFİS-2	Hata, MPa	0.03	-0.02	0.02	0.05	0.00
		Hata, %	0.08	-0.04	0.04	0.12	0.00
	ANFİS-3	Hata, MPa	0.23	0.31	-0.09	-0.24	-0.12
		Hata, %	0.52	0.69	-0.21	-0.56	-0.29
28 gün	ANFİS-1	Hata, MPa	0.03	0.03	0.00	0.03	-0.03
		Hata, %	0.06	0.06	0.00	0.07	-0.07
	ANFİS-2	Hata, MPa	0.03	0.03	0.00	0.03	-0.03
		Hata, %	0.06	0.06	0.00	0.07	-0.07
	ANFİS-3	Hata, MPa	0.03	0.03	0.00	0.04	-0.03
		Hata, %	0.06	0.06	0.00	0.07	-0.07

*Tablo 6'da en büyük ve küçük hata oranları koyu renkli olarak belirtilmiştir.

Referans ve FBT ikameli çimento harçlarının basınç dayanımlarını belirlemek için yapılan deneyler sonucunda 1. hidrasyon günündeki en büyük değerin 21.7 MPa ile 5FBT kodlu harçta elde edildiği görülürken, en küçük değerin 15.7 MPa ile 10FBT kodlu harçta elde edildiği görülmektedir (Tablo 5). 1. hidrasyon gününde modellerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde ANFIS-2 modeli ile belirlenen basınç dayanımı değeri referans harç ile karşılaştırıldığında, çimentolar içerisindeki en fazla hatanın -5.89 MPa fark ve %27.29 hata oranı ile 10FBT kodlu harçta olduğu belirlenirken, en az değişimin ANFIS-3 modelinde -0.08 MPa fark ve -%0.36 hata oranıyla 5FBT kodlu harçta olduğu tespit edilmiştir (Tablo 6).

2. hidrasyon günündeki en büyük değerin 32.8 MPa ile 5FBT kodlu harçta elde edildiği görülürken, en küçük değerin 27.5 MPa ile 10FBT kodlu harçta elde edildiği görülmektedir (Tablo 5). 2. hidrasyon gününde modellerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde ANFIS-2 modeli ile belirlenen basınç dayanımı değeri referans harç ile karşılaştırıldığında, çimentolar içerisindeki en fazla hatanın 5.91 MPa fark ve %27.36 hata oranıyla 10FBT kodlu harçta olduğu belirlenirken, en az değişimin ANFIS-3 modelinde 0.22 MPa fark ve %0.80 hata oranı ile 10FBT kodlu harçta olduğu tespit edilmiştir (Tablo 6).

7. hidrasyon günündeki en büyük değerin 45.3 MPa ile 2.5FBT kodlu harçta elde edildiği görülürken, en küçük değerin 40.6 MPa ile 10FBT kodlu harçta elde edildiği görülmektedir (Tablo 5). 7. hidrasyon gününde modellerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde ANFIS-1 modeli ile belirlenen basınç dayanımı değeri referans harç ile karşılaştırıldığında, çimentolar içerisindeki en fazla hatanın -0.75 MPa fark ve %27.4 hata oranıyla 10FBT kodlu harçta olduğu belirlenirken, en az değişimin ANFIS-2 modelinde 0.2 MPa fark ve %0.8 hata oranı ile 10FBT kodlu harçta olduğu tespit edilmiştir (Tablo 6).

28. hidrasyon günündeki en büyük değerin 56.8 MPa ile R kodlu harçta elde edildiği görülürken, en küçük değerin 48.2 MPa ile 10FBT kodlu harçta elde edildiği görülmektedir (Tablo 5). 28. hidrasyon gününde modellerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde ANFIS-1 modeli ile belirlenen basınç dayanımı değeri referans harç ile karşılaştırıldığında, çimentolar içerisindeki en fazla hatanın 0.03 MPa fark ve %0.07 hata oranıyla 7.5 ve 10FBT kodlu harçta olduğu belirlenirken, en az değişimin ANFIS-2 ve 3 modelinde 0.0 MPa fark ve %0.0 hata oranı ile 5FBT kodlu harçta olduğu tespit edilmiştir (Tablo 6).

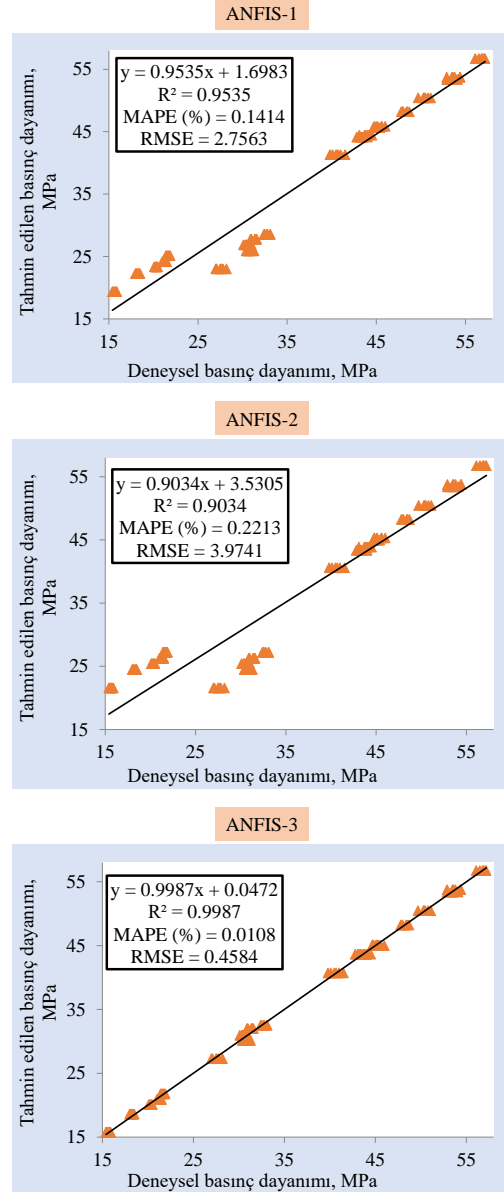
Bunun yanı sıra deneylerden ve modellerden tespit edilen sonuçlar, R^2 (regresyon analiz), MAPE (ortalama mutlak yüzde hata) ve RMSE (hata kareleri ortalamasının karekökü) gibi istatistiksel yöntemlerle kıyaslanmış ve bu kıyaslanmanın yapılabilmesi için kullanılan formüller sırasıyla Denklem 3, 4 ve 5'te verilmiştir [6, 20].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - r_i)^2}{\sum_{i=1}^N (r_i - y_m)^2} \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^N \left| \frac{r_i - y_i}{r_i} \right| \quad (4)$$

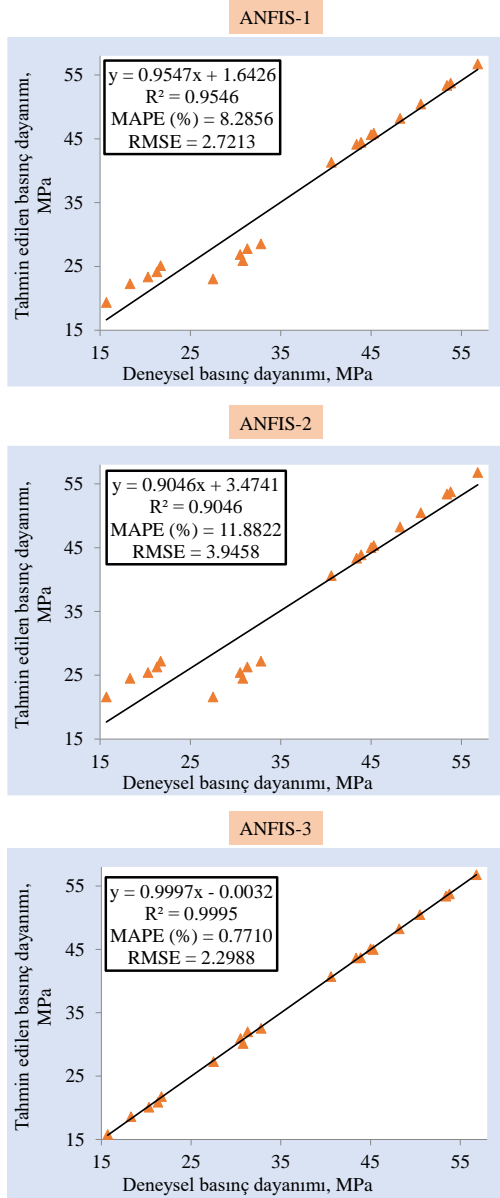
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - r_i)^2} \quad (5)$$

ANFIS modellerinden eğitim aşamasında hesaplanan istatistiksel veriler Şekil 6'da, test sürecindeki istatistiksel veriler ise Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 6. Eğitim aşamasındaki verilerin istatistiksel özellikleri

Eğitim aşamasında ANFIS-1, 2 ve 3 modellerinden elde edilen R^2 değerleri sırasıyla (0.9535-0.9034-0.9987), MAPE değerleri sırasıyla (%0.1414-%0.2213-%0.0108), ve RMSE değerleri (2.7563-3.9741-0.4584) olarak hesaplanmıştır (Şekil 6). Test aşamasında ise ANFIS-1, 2 ve 3 modellerinden elde edilen R^2 değerleri sırasıyla (0.9546-0.9046-0.9995), MAPE değerleri sırasıyla (%8.2856-%11.8822-%0.7710), ve RMSE değerleri (2.7213-3.9458-2.2988) olarak hesaplanmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. Test aşamasındaki verilerin istatistiksel özellikleri

R^2 değerinin tüm modellerde bire çok yakın olduğu ve her üç ANFIS modelinin de yakın değerlerde tahmin edebildiğini göstermektedir. MAPE sonuçları dikkate alındığında ise eğitim aşamasında tüm modellerde hata oranının %10'un altında olduğu görülürken test aşamasında ANFIS-1 ve 2 modelinde %10'un üstüne çıktığı ANFIS-3 modelinde ise %10'un altında olduğu görülmektedir. RMSE değerlendirmelerine göre de tüm modellerin 0'a yakın olduğu görülmektedir. Her üç modelden elde edilen veriler bir bütün olarak değerlendirilirse, kabul edilebilir hata oranlarıyla basınç dayanımı değerlerinin sağlanabildiği söylenebilir. Ancak bu modeller arasında en iyi sonucu veren hem istatistiksel analizlere hem de gerçek değerlere göre en iyi tahmin değerlerine ulaştığımız ANFIS-3 modeli diyebiliriz. Bu modelden tüm hidratasyon günleri için gerçek değerlerle yapılan kıyaslamaya göre en kötü basınç dayanımı tahmininin bile test aşamasında belirlenen 2. hidratasyon gününde %97.81 oranında 2.5FBT kodlu harçta olduğu (Tablo 6). İstatistiksel analiz sonuçlarına göre ise hem MAPE hem de R^2 değerlerine göre %99'un üzerinde bir doğrulukla tahmin edilebildiği görülmektedir. Bu değerler

de, Gauss üyelik fonksiyonu ile oluşturulan ANFIS-3 modelinin gerçek değerlere çok yakın doğrulukla basınç dayanımlarının tahmin edilebileceğini göstermektedir.

6. SONUÇLAR

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre;

- Referans ve FBT ikameli çimento harçlarının basınç dayanımlarını belirlemek için laboratuvarında yapılan deneyler sonucunda 1. ve 2. hidratasyon günündeki en büyük değerlerin sırası ile 21.7, 32.8 MPa ile 5FBT kodlu harçta, 7. günde 45.3 MPa ile 2.5FBT kodlu harçta, 28. günde ise 56.8 MPa ile R kodlu harçta elde edildiği;
- Modellerden elde edilen sonuçların gerçek değerler ile karşılaştırılması sonucunda 1. ve 2. hidratasyon günündeki en büyük hata oranının yamuk üyelik fonksiyonları ile oluşturulan ANFIS-2 modelindeki 10FBT kodlu harçta, 7. ve 28. günde ise üçgen üyelik fonksiyonları ile oluşturulan ANFIS-1 modelinde 10FBT kodlu harçta olduğu;
- En küçük hata oranının 1. ve 2. hidratasyon gününde gauss üyelik fonksiyonları ile oluşturulan ANFIS-3 modelindeki sırasıyla 5 ve 10FBT kodlu harçta, 7. günde yamuk üyelik fonksiyonları ile oluşturulan ANFIS-2 modelinde 10FBT kodlu harçta, 28. günde ise yamuk ve gauss üyelik fonksiyonları ile oluşturulan ANFIS-2 ve 3 modelinde 5FBT kodlu harçta olduğu;
- Eğitim aşamasında üçgen, yamuk ve gauss üyelik fonksiyonları oluşturulan modellerden elde edilen R^2 değerleri sırasıyla (0.9535-0.9034-0.9987), MAPE değerleri sırasıyla (%0.1414-%0.2213-%0.0108), ve RMSE değerleri (2.7563-3.9741-0.4584) olarak hesaplandı;
- Test aşamasında üçgen, yamuk ve gauss üyelik fonksiyonları oluşturulan modellerden elde edilen R^2 değerleri sırasıyla (0.9546-0.9046-0.9995), MAPE değerleri sırasıyla (%8.2856-%11.8822-%0.7710), ve RMSE değerleri (2.7213-3.9458-2.2988) olarak hesaplandı;
- Her üç modelden elde edilen veriler bir bütün olarak değerlendirilirse, ANFIS-3 modelinin kabul edilebilir hata oranıyla basınç dayanımı değerlerini tahmin edebildiği söylenebilir.

Bu verilere dayanarak tercih edilen her üç modelinde güçlü ve faydalı modeller olduğu; ancak tüm hidratasyon günleri için gerçeğe yakın sonuçlara ulaşabildiğimiz gauss üyelik fonksiyonlarıyla oluşturulan tahmin modelinin tercihinin daha uygun olacağı ifade edilebilir.

Etik Hususlar

Etik kurallara uyum

Yazarlar etik görev ve sorumluluklara uyduklarını ve çalışmanın özgün olduğunu beyan eder.

Finansman

Çimento deney ve analizleri için Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Komisyon Başkanlığı (Proje kod numarası: 2024.06.05.1461) destek sağlamıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar bu çalışmada herhangi bir kişiyle ya da kurumla çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Teşekkür

Yazarlar, çimento deney ve analizlerinin gerçekleştirilmesinde katkı sağlayan Düzce ili Yığılca ilçesinde bulunan Marmara Çimento Fabrikası yetkilileri ve çalışanları ile Finansal destekleri için (Proje kod numarası: 2024.06.05.1461) Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Komisyon Başkanlığı'na teşekkürlerini sunarlar.

KAYNAKÇA

- [1] Erdoğan, T. Y. 2010. Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim AŞ., Ankara, 11s.
- [2] Okoji, A. I., Anozie, A. N., Omoleye, J. A. 2022. Evaluating the thermodynamic efficiency of the cement grate clinker cooler process using artificial neural networks and ANFIS. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(5), 101704. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101704>
- [3] Singh, N. B., Middendorf, B. 2020. Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 237, 117455. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117455>
- [4] Rao, D. S., Angadi, S. I., Muduli, S. D., Nayak, B. D. 2010. Valuable waste. *Res Dev Miner Process Engl Ed*, 51(5), 2-6.
- [5] Angadi, S. I., Rao, D. S., Prasad, A. R., Rao, R. B. 2011. Recovery of ferrochrome values from flue dust generated in ferroalloy production—a case study. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 120(1), 61-63.
- [6] Ozcan, G., Kocak, Y., Gulbandilar, E. 2018. Compressive strength estimation of concrete containing zeolite and diatomite: an expert system implementation. *Computers and Concrete, An International Journal*, 21(1), 21-30.
- [7] Güvenç, U., Koçak, B. 2022. Pomza ve Diatomitin Portland Çimentosunun Basınç Dayanımına Etkilerinin ANFIS ile Tahmini. *Eskişehir Türk Dünyası Uygulama ve Araştırma Merkezi Bilişim Dergisi*, 3(1), 18-25. <https://doi.org/10.53608/estudambilisim.1051136>
- [8] Vakhshouri, B., Nejadi, S. 2018. Prediction of compressive strength of self-compacting concrete by ANFIS models. *Neurocomputing*, 280, 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.09.099>
- [9] Gkoutakou, F., Papadopoulos, B. 2020. The use of fuzzy linear regression and ANFIS methods to predict the compressive strength of cement. *Symmetry* 12, 1295. <https://doi.org/10.3390/sym12081295>
- [10] Chang, W., Zheng, W. 2022. Compressive strength evaluation of concrete confined with spiral stirrups by using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Soft Computing*, 26(21), 11873-11889. <https://doi.org/10.1007/s00500-022-07001-2>
- [11] Kocak, B., Pınarcı, İ., Güvenç, U., Kocak, Y. 2023. Prediction of compressive strengths of pumice-and diatomite-containing cement mortars with artificial intelligence-based applications. *Construction and Building Materials*, 385, 131516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131516>
- [12] Al-Haidari, H. S. J., Al-Haydari, I. S. 2022. Artificial intelligence-based compressive strength prediction of medium to high strength concrete. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(2), 951-964. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00717-5>
- [13] Ly, H. B., Pham, B. T., Dao, D. V., Le, V. M., Le, L. M., Le, T. T. 2019. Improvement of ANFIS model for prediction of compressive strength of manufactured sand concrete. *Applied Sciences*, 9(18), 3841. <https://doi.org/10.3390/app9183841>
- [14] Nafees, A., Javed, M. F., Khan, S., Nazir, K., Farooq, F., Aslam, F., ... Vatin, N. I. 2021. Predictive modeling of mechanical properties of silica fume-based green concrete using artificial intelligence approaches: MLPNN, ANFIS, and GEP. *Materials*, 14(24), 7531. <https://doi.org/10.3390/ma14247531>
- [15] TS EN 197-1, 2012. Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları, Ankara, Türkiye.
- [16] TS EN-196-1, 2016. Çimento deney metodları- Bölüm 1: Dayanım tayini. Türk Standartları, Ankara, Türkiye.
- [17] Akiner, M. E., Ghasri, M. 2024. Comparative assessment of deep belief network and hybrid adaptive neuro-fuzzy inference system model based on a meta-heuristic optimization algorithm for precise predictions of the potential evapotranspiration. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(30), 42719-42749. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33987-3>
- [18] Jang, J. S. 1993. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 23(3), 665-685. <https://doi.org/10.1109/21.256541>
- [19] Jithendra, T., Sharief Basha, S., Das, R., Gajjala, R. 2024. Modeling and optimization of WEDM of monel 400 alloy using ANFIS and snake optimizer: A comparative study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of*

Mechanical Engineering Science, 238(5), 1573-1589. <https://doi.org/10.1177/09544062231187207>

- [20] Erdem, Y., Koçak, Y. 2024. Silis Dumanı İkameli Çimentoların Priz Sürelerinin ANFIS ile Tahmini. Eskişehir Türk Dünyası Uygulama ve Araştırma Merkezi Bilişim Dergisi, 5(1), 45-52. <https://doi.org/10.53608/estudambilisim.1460831>