

(Araştırma Makalesi)

ANFIS Modelleri ile Farklı Sıcaklıklarda Kalsine Edilmiş Kaolin İkameli Çimentoların Priz Sürelerinin TahminiSümeyye Elif SAKALLI^{*1}, Yılmaz KOÇAK²¹Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 81600, Düzce,ORCID No: <http://orcid.org/0009-0009-9688-7358>²Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 81600, Düzce,ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-5281-5450>**Anahtar Kelimeler:**ANFIS,
Priz süresi,
Beyaz Portland çimento,
Kaolin,
Kalsine kaolin

Özet: Bu çalışmada, farklı sıcaklıklarda kalsine edilmiş kaolin ikameli çimento hamurlarının priz başlama ve priz sonu süreleri, ANFIS ile oluşturulan farklı modellerle tahmin edilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın ilk etabında ham kaolin bir kül fırını yardımıyla 600, 700, 800 ve 900 °C sıcaklıklarda ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. İkinci etapta hazırlanan bu malzemeler 52.5 R dayanım sınıfındaki beyaz Portland çimentosu içerisinde %10 oranında ikame edilmiştir. Daha sonra bu çimentolarla üretilen çimento hamurlarının priz başlama ve priz sonu süreleri üçer deney yapılarak tespit edilmiştir. Çalışmanın üçüncü etabında, deneysel sonuçlarla Üçgen, Yamuk ve Gauss üyelik fonksiyonlarıyla üçer model oluşturularak priz başlama ve priz sonu süreleri tahmin edilmiştir. Dördüncü etapta ise bu modellerle tahmin edilen sonuçların güvenilirliğini belirleyebilmek için R², MAPE ve RMSE istatistiksel yöntemleri kullanılmıştır. Sonuç olarak R², MAPE ve RMSE değerleri priz başlama ve priz sonu süreleri sırasıyla; Üçgen üyelik fonksiyonu için 0.99944-0.99935, %2.25629-2.20495 ve 2.35725-3.33346, Yamuk üyelik fonksiyonu için 0.99944-0.99935, %2.25659-2.20526 ve 2.35726-3.33345 ve Gauss üyelik fonksiyonu için ise 0.99944-0.99935, %2.25651-2.20496 ve 2.35725-3.33346 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre kalsine kaolin ikameli çimento hamurlarının hem priz başlama hem de priz sonu sürelerinin tüm modeller ile “yüksek doğrulukta” veya “çok iyi” olarak tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır.

(Research Article)

Prediction of Setting Times of Kaolin Substituted Cements Calcined at Different Temperatures with ANFIS Models**Keywords:**ANFIS,
Setting time,
White Portland cement,
Kaolin,
Calcined kaolin

Abstract: In this study, the initial and final setting times of kaolin-substituted cement pastes calcined at different temperatures were tried to be predicted by different models created with ANFIS. In the first stage of the study, raw kaolin was treated at 600, 700, 800 and 900 °C with the help of a muffle furnace. In the second stage, these prepared materials were substituted into 52.5 R strength class white Portland cement at a rate of 10% weight. Then, the initial and final setting times of the cement pastes produced with these cements were determined by conducting three experiments. In the third stage of the study, three models were created with Triangle, Trapezoidal and Gaussian membership functions using the experimental results to estimate the initial and final setting times. In the fourth stage, R², MAPE and RMSE statistical methods were used to determine the reliability of the results estimated with these models. As a result, R², MAPE and RMSE values for initial and final setting times are; for the Triangle membership function, 0.99944-0.99935, 2.25629-2.20495% and 2.35725-3.33346; for the Trapezoidal membership function, 0.99944-0.99935, 2.25659-2.20526% and 2.35726-3.33345; and for the Gaussian membership function, 0.99944-0.99935, 2.25651-2.20496% and 2.35725-3.33346. According to these results, it was concluded that both the initial and

final setting times of calcined kaolin-substituted cement pastes could be predicted with “high accuracy” or “very good” by all models.

1. GİRİŞ

Çimento endüstrisi, küresel olarak CO₂ emisyonlarının %8’ini oluşturmakta ve endüstriyel enerjinin yaklaşık %5’ini kullanmaktadır [1, 2]. Çimento üretimindeki klinker miktarını düşürerek CO₂ salınımını azaltma, enerji maliyetlerini düşürme ve çimento esaslı malzemelerin performansını iyileştirme isteği, puzolanik malzemelerin kullanımının artmasına yol açmıştır. Puzolan, çimentolu özelliklere sahip olmayan, ancak su varlığında ve normal sıcaklıkta çimentonun hidrasyon ürünleriyle (özellikle portlandit) reaksiyona girerek çimentolu özelliklere sahip yeni bileşikler oluşturan reaktif silika veya silika-alümina ve alümina içeren bir malzemedir. Puzolanların bir kaynağı da kalsine edilmiş killerdir. Çimento endüstrisi, klinker, beyaz çimento ve tamamlayıcı çimento malzemesi olarak kullanılan metakaolin üretiminde hammadde (silis ve alümina kaynağı) olarak çoğunlukla kaolin kullanmaktadır [3].

Kaolin, feldispatın doğal ayrışmasıyla oluşan yaygın olarak bulunan beyaz kildir. Ham kaolin 600 ila 900 °C civarlarında bir sıcaklığa ısıtıldığında metakaolin oluşmaktadır. Metakaolin ham kaolinin kalsinasyonundan elde edilen, susuz alüminyum silikattan oluşan beyaz, ultra ince toz halinde oldukça reaktif bir puzolandır ve metakaolinin puzolanik davranışı ekolojik ve ekonomik açıdan büyük öneme sahipken, çimentolu kompozitlerin dayanım ve dayanıklılıklarına da önemli katkılar sağlamaktadır. Ancak fiziksel ve kimyasal özellikleri büyük ölçüde kullanılan ham kaolin malzemesine, kalsinasyon sırasındaki sıcaklığa bağlıdır [4-7].

Bu işlemler sonucundaki elde edilen kalsine edilmiş kaolin ya da metakaolinin davranışları farklı deneyler ve analizlerle araştırılmaktadır. Bu deneylerden biri de priz süresi deneyleridir.

Priz süresi, çimento hamurunun su ile temas ettiği andan itibaren standart kriterlerine göre sertleştiği zamana kadarki geçen süre olarak ifade edilmektedir [8]. Çimento hamurunda meydana gelen bu sertleşme süreleri, priz başlama ve priz sonu süreleri olarak ifade edilmektedir. Priz başlama süresinin çok kısa bir zaman diliminde meydana gelmesi yani betonun gereğinden önce sertleşmesi taze betonun işlenebilirliğinde (betonun karıştırılması, yerine taşınması, yerleştirilmesi, sıkıştırılması, yüzeyinin düzeltilmesi) sorunlara neden olmaktadır. Bu işlemler sırasında meydana gelen aksaklıklar, betonun hem dayanım hem de dayanıklılık özelliklerinde olumsuzluklara neden olacaktır. Priz sonu süresinin yani betonun sertleşme süresinin gecikmesi ise betonun dayanım kazanma süresinin öteleneceği anlamına gelmektedir. Bu nedenle de betonun kalıplarının daha geç sökülmesiyle betonun daha uzun süre korunmasına ihtiyaç duyulacaktır. Bu durumda da inşaat süresi artacağı için ekonomik kayıplar yaşanacaktır. Bu nedenlerden dolayı, çimento tiplerine göre priz süreleri

TS EN 197-1 de belirli aralıklarda sınırlanmaktadır [9]. Bu nedenle priz sürelerinin işin özelliğine göre istenen şekilde gerçekleştirilebilmesi için kimyasal ya da mineral katkılar çimentolu sistemlerde yoğun olarak kullanılmaktadır. Dolayısı ile çimentolu sistemlerde meydana gelen bu tür değişiklikleri tespit edebilmek için de deneyler yapılmaktadır.

Ancak bu deneyler zahmetli, zaman alıcı ve enerji tüketimine neden olan çalışmalardır. Bu nedenle araştırmacılar, mineral katkılarının beton veya çimento özelliklerine farklı etkilerini tahmin edebilmek için farklı yapay zeka tabanlı modeller geliştirmeye çalışmaktadır. Bu modeller, veri sayısı, sistemin karmaşıklığı, elde edilmek istenen çıktılara göre farklı yapay zeka tabanlı uygulamalarla oluşturulmaktadır. Bu uygulamalardan biri geleneksel yöntemler olarak kabul edilen ve hala birçok çalışmada başarılı sonuçlar elde edilmesine katkı sağlayan uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemidir (ANFIS).

Bu çalışmalardan birinde Erdem ve Koçak (2025), %0, %2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarında silis dumanını Portland çimentosuna ikame ederek hazırladıkları çimento hamurlarının priz sürelerini ANFIS’te oluşturdukları Üçgen ve Gauss üyelik fonksiyonlarıyla tahmin edebilmek için bir araştırma yapmışlardır. Tahmin modelleriyle elde ettikleri sonuçların güvenilirliği belirtebilmek için regresyon analiz (R^2), ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) ve hata kareleri ortalamasının karekökü (RMSE) istatistiksel yöntemlerinden yararlanmış ve bu verilere dayanarak silis dumanı ikameli çimento hamurlarının hem priz başlama ve hem de priz sonu sürelerinin Üçgen ve Gauss üyelik fonksiyonlarıyla oluşturulan modellerle yüksek doğruluk derecesinde tahmin edilebileceği ifade etmişlerdir [10]. Bir diğer çalışmada Han vd. (2023), kendiliğinden yerleşen yeşil beton özelliklerini deneysel olarak değerlendirmek ve tasarım parametrelerini yapay zeka tekniğiyle incelemek için bir çalışma yapmışlardır. Bu bağlamda, çimento içerisine granüle yüksek fırın cürufu tozu, volkanik toz, uçucu kül ve mikro silika ikame ederek numuneler hazırlamışlardır. Bu numuneler üzerinde taze ve sertleşmiş beton özelliklerini belirlemek için deneyler gerçekleştirilmişler ve numunelerin basınç dayanımını etkileyen parametreleri belirlemek için yedi ANFIS modelinin girdi parametrelerini ayrı ayrı değerlendirmişlerdir. Parametrelerin ayrı ayrı incelendiği yedi ANFIS modelinin sonuçlarının, elektriksel öz direncin kendiliğinden yerleşen yeşil betonun basınç dayanımı üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu, bunun nedeni olarak da en düşük RMSE değerinin çimento ikamelerine karşılık gelen girdi için elde edilmesi olduğunu belirtmişlerdir [11]. Gülbandır vd. (2023), yaptıkları bir başka çalışmada farklı oranlarda pirinç kabuğu külü ile ikame ettikleri çimento hamurlarının priz sürelerini gauss ve üçgen üyelik fonksiyonları kullanılarak iki ANFIS modeli ile tahmin etmişlerdir. Modellerden elde ettikleri sonuçlarının güvenilirliği için kullandıkları R^2 , MAPE ve RMSE istatistiksel yöntem ile

elde ettikleri verilere göre, pirinç kabuğu külü ikameli çimento hamurlarının priz başlangıç ve priz sonu sürelerinin tahmininde hem gauss hem de üçgen üyelik fonksiyonlarıyla oluşturulan modellerin gerçek değerlere çok yakın sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir [12]. Koçak vd. (2023) tarafından yapılan bir diğer çalışmada, pomza ve/veya diatomit içeren ve içermeyen 7 farklı çimento harcı numunesinin farklı hidrasyon günlerindeki basınç dayanımını tahmin etmek için laboratuvar deneylerinden elde ettikleri toplam 168 veriden oluşan iki farklı Yapay Sinir Ağı (YSA) ve iki farklı ANFIS modeli oluşturulmuştur. Giriş değişkenleri olarak gün, PC, pomza, diatomit ve su olmak üzere beş parametre kullanılırken, çıkış değişkeni olarak basınç dayanımı kullanılmıştır. Bu dört farklı modeli karşılaştırmak için R^2 , RMSE ve MAPE gibi istatistiksel yöntemler kullanılmışlar ve elde ettikleri sonuçlarına göre hem YSA hem de ANFIS modellerinin çok iyi tahmin performansı sergilediğini ve çok küçük bir hata ile ve kısa sürede basınç dayanımlarının tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir [13]. Bunların yanı sıra çimento esaslı kompozitlerin farklı özelliklerini tahmin etmek için oluşturulan ANFIS modellerinin olduğu ve bu modellerle başarılı sonuçlar elde edildiği literatürdeki birçok çalışma ile belirtilmektedir [14-17].

Bu araştırmada, farklı sıcaklıklarda ısıtılma tabi tutulan kaolin ikameli çimento hamurlarının ANFIS ile oluşturulan farklı modellerle priz başlama ve priz sonu süreleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında kaolin bir kül fırınında 600, 700, 800 ve 900 °C sıcaklıklarda kalsine edilmiştir. İkinci aşamada kalsine edilen bu malzemeler ağırlıkça %10 oranında 52.5 R dayanım sınıfındaki beyaz Portland çimento (BPC) ikame edilmiştir. Bu çimentolar ile üretilen hamurların priz başlama ve priz sonu süreleri üçer deney yapılarak belirlenmiştir. Çalışmanın üçüncü aşamasında, Üçgen, Yamuk ve Gauss üyelik fonksiyonlarıyla oluşturulan en iyi üç ANFIS modeli ile priz başlama ve priz sonu süreleri tahmin edilmiştir. Dördüncü etapta ise bu modellerle tahmin edilen sonuçların güvenilirliği belirleyebilmek için R^2 , MAPE ve RMSE istatistiksel yöntemleri kullanılmıştır. Ayrıca gerçek sonuçların ortalaması ile tahmin edilen sonuçlardaki hata oranları kıyaslanmıştır.

Tablo 2. Malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri

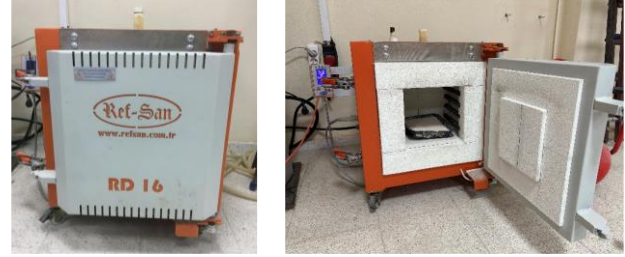
	Ham kaolin	CEM I 52.5 R	600KK	700KK	800KK	900KK
Kimyasal özellikler, %						
SiO ₂	66.55	21.33	69.46	70.75	72.67	73.11
Al ₂ O ₃	15.45	4.24	16.03	16.26	16.80	16.87
Fe ₂ O ₃	0.36	0.29	0.37	0.38	0.40	0.38
CaO	3.22	64.21	3.36	3.39	3.60	3.81
MgO	0.49	1.29	0.48	0.49	0.53	0.52
SO ₃	2.14	3.42	2.29	2.30	2.37	2.38
Na ₂ O	0.24	0.35	0.25	0.25	0.27	0.26
K ₂ O	0.75	0.21	0.80	0.82	0.83	0.83
Cl ⁻	0.140	0.0080	0.067	0.092	0.033	0.059
Kızdırma kaybı	9.36	3.24	4.90	2.57	0.99	0.62
Fiziksel özellikler						
Özgül ağırlık, g/cm ³	2.57	3.05	2.52	2.51	2.51	2.55
Özgül yüzey (Blaine), cm ² /g	7685	4348	6829	6516	6130	5196

Çimento hamurlarının priz sürelerinin deneyleri, Eskişehir Çimsa Çimento Fabrikasında TS EN 196-3

2. MALZEME VE YÖNTEM

Çalışmada Çimsa Mersin Çimento Fabrikası tarafından TS EN 197-1 standardına göre üretilen CEM I 52.5 R tipi BPC kullanılmıştır [9]. Hammadde olarak kullanılan kaolin, Eukim firmasından temin edilmiştir. Çimento hamurlarının hazırlanmasında karışım için kullanılan su Eskişehir ili şebeke suyudur.

Kalsine kaolin (KK) numuneleri, kaolinin 600, 700, 800 ve 900 °C sıcaklığa tabi tutularak Şekil 1’de görülen kül fırınında üretilmiştir. Üretim aşamasında kaolin, istenen her bir sıcaklık derecesine çıktıktan sonra 3 saat bu sıcaklıkta tutulmuş ve daha sonra numuneler uygun soğukluk derecesine gelince fırından alınmıştır. Daha sonra bu hammaddeler ağırlıkça %10 oranında BPC’ye ikame edilerek referans çimento dahil toplam beş tip çimento elde edilmiştir. Elde edilen çimentoların isimleri Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan kül fırını

Tablo 1. Çimento isimleri

No	Çimento	İsmi
1	Referans çimento (BPC)	R
2	600 °C’de kalsine edilen kaolin	600KK
3	700 °C’de kalsine edilen kaolin	700KK
4	800 °C’de kalsine edilen kaolin	800KK
5	900 °C’de kalsine edilen kaolin	900KK

Hammadde olarak kullanılan kaolinin ve hazırlanan bu çimentoların kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

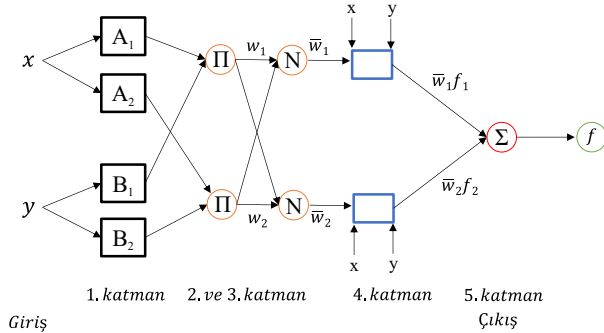
esasları dikkate alınarak ve 3’er deney ile gerçekleştirilerek tespit edilmiştir [8]. Deneyler Astek

Marka Vicat halkası ve iğnesi kullanılarak, sıcaklığı $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ve bağıl nemi %65 olan bir laboratuvar ortamında belirlenmiştir.

3. UYARLAMALI AĞ TABANLI BULANIK ÇIKARIM SİSTEMİ

ANFIS, YSA ve bulanık mantığın bir entegrasyonu olarak tanımlanmaktadır. Sistem davranışının simülasyonunu mümkün kılabilmek için YSA'nın öğrenme yetenekleri ANFIS'te verimli bir şekilde kullanılmaktadır. Diğer yandan, bulanık mantığın dahil edilmesi karmaşık davranışların sorunsuz bir şekilde taklit edilmesini de mümkün kılabilir. Çıktının doğruluğu, bulanık modellerin önemli bir avantajıdır. Bu, girdi değişiminden kaynaklanan çıktının ani ve yüksek dalgalanmaların meydana gelmemesi anlamına gelmektedir. Doğruluk, "üyelik fonksiyonu" adı verilen bir kavramın uygulanmasından kaynaklanmaktadır. Üyelik fonksiyonu, herhangi bir sayısal değer bir değişkeninin düşük, orta veya yüksek gibi belirli bir seviyesine ait olma derecesini göstermektedir [18].

ANFIS'in üyelik fonksiyonu parametreleri YSA'ya dayalı yöntemlerin kullanımıyla ayarlanmaktadır. ANFIS mimarisi, bulanık çıkarım sisteminin uyarlanabilir ağılar çerçevesine entegre edilmesiyle geliştirilmiştir. Şekil 2'de gösterildiği gibi, uyarlanabilir bir ağ, her düğümün gelen sinyaller ve düğüme özgü bir dizi değişken üzerinde özel olarak performans gösterdiği çok katmanlı, ileri beslemeli bir ağıdır. Düğüm fonksiyonlarının doğası düğümden düğüme değişmekte ve her düğüm fonksiyonunun seçimi, uyarlanabilir ağı gerçekleştirmesi gereken genel girdi-çıkış fonksiyonu tarafından belirlenmektedir [13, 14, 19].



Şekil 2. ANFIS algoritmasının temel mimarisi

Şekil 1'de örneklenen ANFIS mimarisi, 5 temel katmandan oluşmaktadır [13, 14].

- Katman 1 (Bulanıklaştırma Katmanı): Bu katmandaki nöronlar uyarlanabilir düğümler olarak

kabul edilmektedir ve öncül parametreleri içermektedir.

- Katman 2 (Uygulama Katmanı): Π olarak etiketlenen nöronlar bir daire ile gösterilmektedir. Çıkış düğümü (w_i), bir kuralın ateşleme gücünü göstermekte ve gelen sinyallere göre oluşturulmaktadır.
- Katman 3 (Normalleştirme Katmanı): Sabit bir nöron olan ve N olarak sembolize edilen bu katmandaki her nöron, bir daire ile tanımlanmaktadır. "i" inci kuralın ateşleme gücünün, tüm kuralların ateşleme gücünün toplamına oranına göre "çıkış" elde edilmektedir.
- Katman 4 (Durulaştırma Katmanı): Bu katmandaki sonuç parametrelerini içeren nöronlar, adaptif nöronlardır.
- Katman 5 (Birleştirme Katmanı): Bu katman, tüm girdileri toplayan tek bir nöron içermektedir.

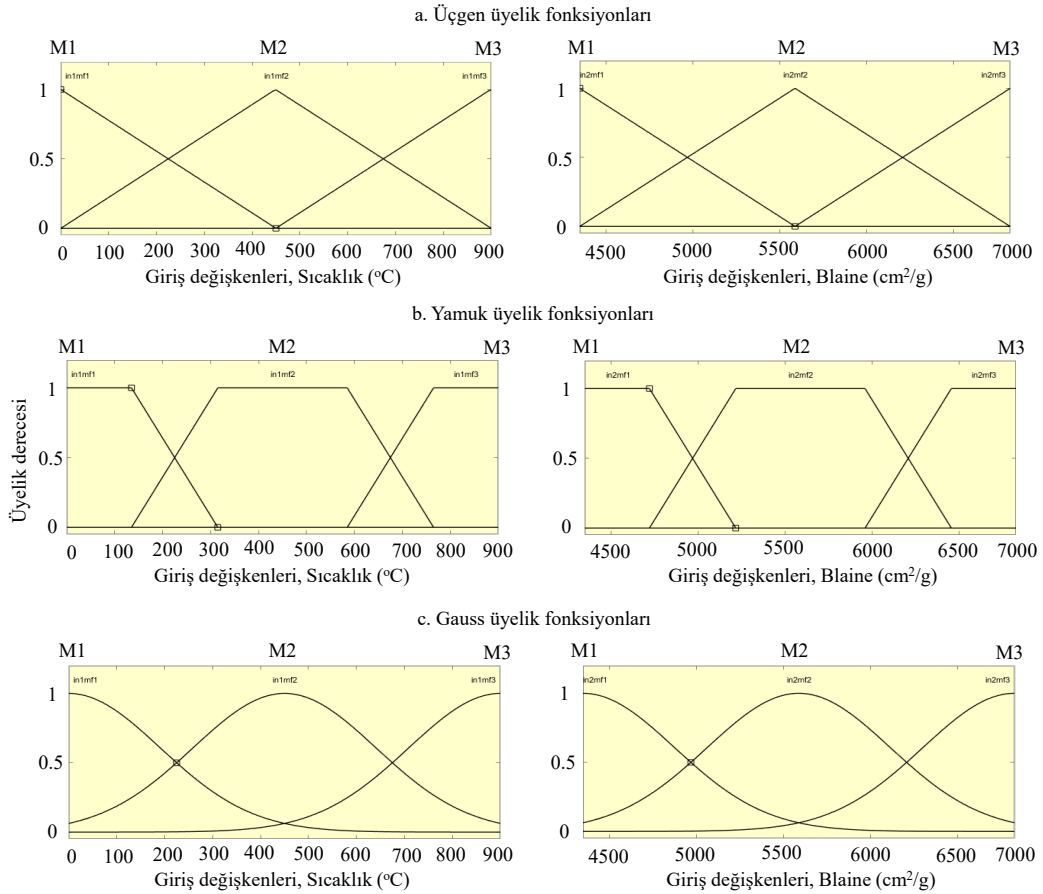
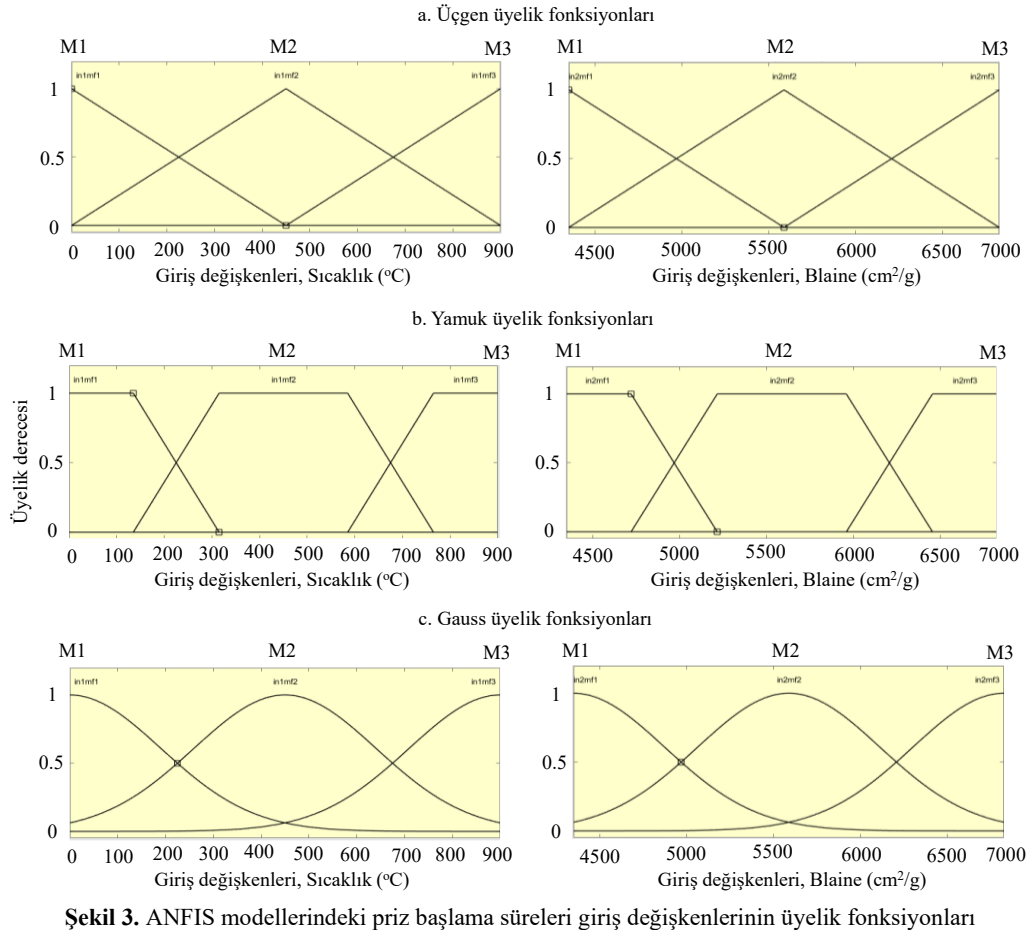
ANFIS hakkında daha fazla açıklama farklı kaynaklardan bulunabilir [20, 21].

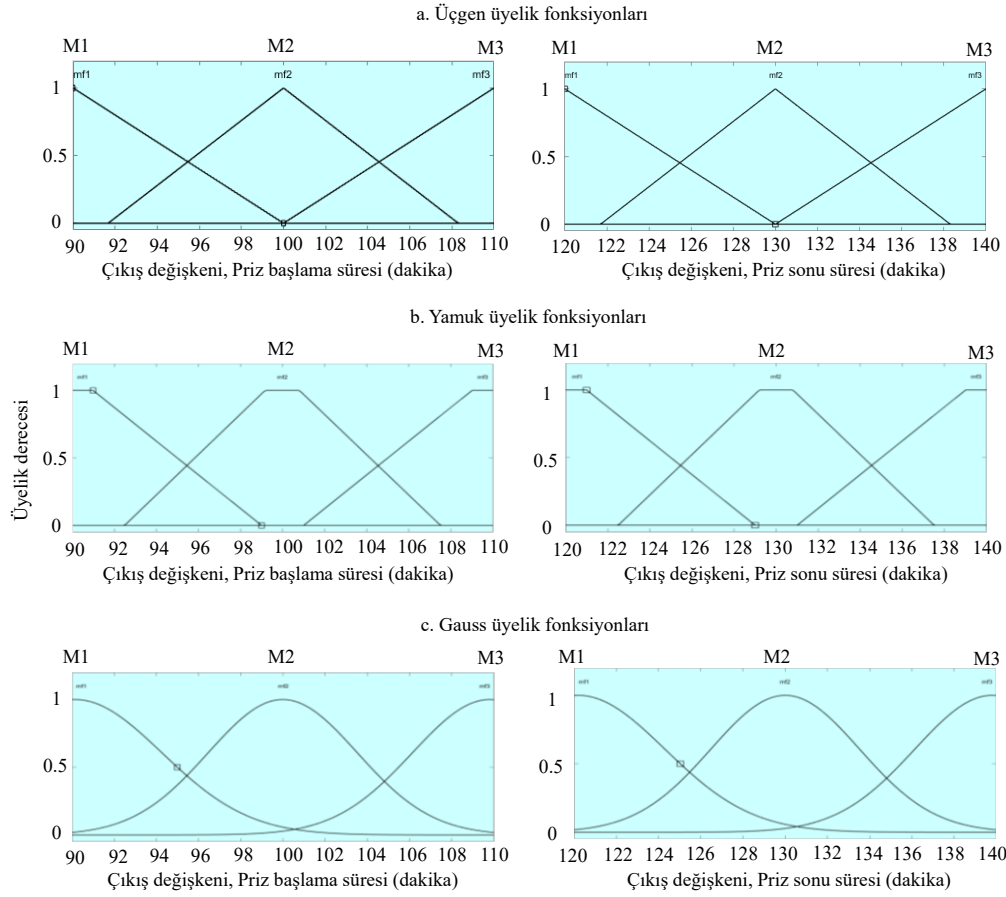
4. ANFIS TASARIMI VE MODEL PARAMETRELERİ

Farklı sıcaklıklarda kalsine edilmiş kaolin ikameli çimento hamurlarının priz sürelerinin tahmin edilmesinde ANFIS modelinin tasarımı ve eğitimi MATLAB'ın ANFIS Araç Kutusunda yer alan Üçgen, Yamuk ve Gauss üyelik fonksiyonları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu üyelik fonksiyonlarının parametreleri Tablo 3'te verilmiştir. Geliştirilen ANFIS modeli iki girdi (sıcaklık, Blaine) ve iki çıktıdan (Priz başlama süreleri ve priz sonu süreleri) oluşmaktadır. Priz başlama sürelerinin ve priz sonu sürelerinin giriş değişkenlerinin üyelik fonksiyonları sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te verilirken, priz başlama ve priz sonu sürelerinin çıkış değişkenlerinin üyelik fonksiyonları Şekil 5'te verilmiştir.

Tablo 3. ANFIS üyelik fonksiyonlarının priz sürelerinin parametreleri

Parametre	Üçgen	Yamuk	Gauss
Düğüm sayısı	35	35	35
Doğrusal parametre sayısı	9	9	9
Doğrusal olmayan parametre sayısı	24	24	12
Toplam parametre sayısı	33	33	21
Eğitim veri çifti sayısı	5	5	5
Veri çifti kontrol sayısı	0	0	0
Toplam bulanık kural sayısı	9	9	9
Epoch sayısı	90	90	90





Şekil 5. ANFIS modellerindeki priz başlama ve priz sonu süreleri çıkış değişkenlerinin üyelik fonksiyonları

5. PERFORMANS DEĞERLENDİRME PARAMETRELERİ

Priz sürelerinin tahminindeki güvenilirliğin belirlenmesi için regresyon analiz (R^2), ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) ve hata kareleri ortalamasının karekökü (RMSE) istatistiksel yöntemleri kullanılmıştır. İstatistiksel verilerin hesaplanmasında kullanılan formüller sırasıyla Denklem 1, 2 ve 3'te verilmiştir [22-24].

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

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{r_i - y_i}{r_i} \right| \quad (2)$$

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

Denklemlerde görülen N , y_i , r_i ve y_m sırasıyla veri kümesi sayısını, tahmini değerleri, gerçek değerleri ve gerçek değerlerin ortalamasını ifade etmektedir. MAPE ve

RMSE için optimum performans ölçütleri sıfırdır. R^2 için optimum değer ise birdir ve bire yakın bir değer, tahmin edilen değerlerin gerçek değerle yakın bir şekilde örtüştüğünü gösterir. Sıfıra yakın RMSE değeri, modelin tahmin edilen değerlerinin gerçek değere yakın olduğunu ve sıfır, modelin hata yapmadığını gösterir. MAPE'ye göre model performansları, $MAPE > \%50$ ise yanlış veya hatalı, $\%20 < MAPE < \%50$ ise kabul edilebilir, $\%10 < MAPE < \%20$ ise doğru veya iyi ve $MAPE < \%10$ ise yüksek doğrulukta veya çok iyi olarak kabul edilir [22, 23].

6. BULGULAR

Bu çalışmada bir kül fırınında 600, 700, 800 ve 900 °C sıcaklıklarda ısıtılarak elde edilen kalsine kaolinin %10 oranında BPC'ye ikame edilerek elde edilen referans dahil beş farklı çimento hamurunun deneylerden ve modellerden belirlenen priz başlama ve priz sonu süreleri ile dakika cinsinden farklılıkları sırasıyla Tablo 4 ve Tablo 5'te gösterilmiştir. Priz başlama ve priz sonu sürelerinin R^2 verileri Şekil 6'da verilirken, Priz sürelerinin performans değerlendirme verileri (R^2 , MAPE, RMSE) bir bütün olarak Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 4. Priz başlama süreleri (dakika)

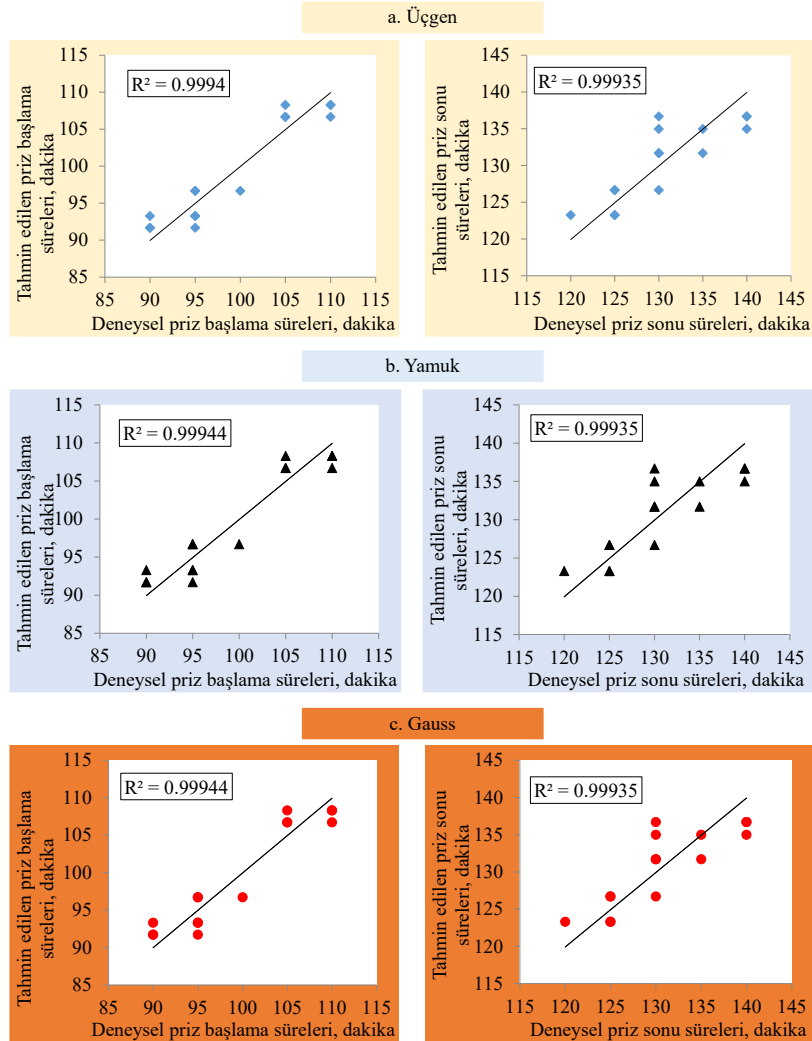
Numune no	Çimento hamurları				
	R	600KK	700KK	800KK	900KK
1	95	90	95	105	105
2	90	95	100	105	110
3	90	95	95	110	110
Ortalama	91.7	93.3	96.7	106.7	108.3
Üçgen	91.6999	93.3001	96.6994	106.7002	108.2998
Max. hata, dakika	-0.0332	0.0332	-0.0328	-0.0336	0.0336
Yamuk	91.6999	93.3003	96.6989	106.7016	108.2988
Max. hata, dakika	-0.0332	0.0330	-0.0323	-0.0350	0.0346
Gauss	91.6999	93.3001	96.6995	106.7003	108.2997
Max. hata, dakika	-0.0332	0.0333	-0.0329	-0.0336	0.0336

*Koyu ile belirtilen sayı, dakika cinsinden modellerdeki en büyük hatayı göstermektedir.

Tablo 5. Priz sonu süreleri (dakika)

Numune no	Çimento hamurları				
	R	600KK	700KK	800KK	900KK
1	125	125	130	140	130
2	120	130	130	130	140
3	125	125	135	135	140
Ortalama	123.3	126.7	131.7	135.0	136.7
Üçgen	123.2999	126.7005	131.6985	135.0009	136.6996
Max. Hata, dakika	0.0335	-0.0338	-0.0318	-0.0009	-0.0329
Yamuk	123.2999	126.7011	131.6969	135.0051	136.6963
Max. Hata, dakika	0.0335	-0.0344	-0.0303	-0.0051	-0.0296
Gauss	123.2998	126.7002	131.6990	135.0007	136.6994
Max. Hata, dakika	0.0335	-0.0336	-0.0324	-0.0007	-0.0328

*Koyu ile belirtilen sayı, dakika cinsinden modellerdeki en büyük hatayı göstermektedir.

**Şekil 6.** ANFIS modelleri ile tahmin edilen priz başlama ve priz sonu sürelerinin R^2 verileri

Tablo 6. Priz sürelerinin performans değerlendirme verileri

Priz süreleri	Modeller	R ² , %	MAPE, %	RMSE, dakika
Priz başlama süresi	Üçgen	99.944	2.25649	2.35725
	Yamuk	99.944	2.25659	2.35726
	Gauss	99.944	2.25651	2.35725
Priz sonu süresi	Üçgen	99.935	2.20495	3.33346
	Yamuk	99.935	2.20526	3.33345
	Gauss	99.935	2.20496	3.33346

Tablo 4 ve 5’te görülen sonuçlara göre farklı sıcaklıklarda kalsine edilmiş kaolin ikamesi ile elde edilen çimento hamurlarındaki hem priz başlama hem de priz sonu sürelerinde bir artış görülmektedir. Bu veriler göre en küçük priz başlama süresinin ortalama 91.7 dakika ile referans çimento hamurunda olduğu görülürken, en büyük priz başlama süresinin ortalama 108.3 dakika ile 900KK isimli çimento hamurunda olduğu görülmektedir (Tablo 4). En küçük priz sonu süresinin ise yine ortalama 123.3 dakika ile referans çimento hamurunda olduğu görülürken en büyük priz başlama süresinin ortalama 136.7 dakika ile 900KK isimli çimento hamurunda olduğu görülmektedir (Tablo 5). Priz başlama süreleri referans çimento hamuruyla kıyaslandığında, 600KK, 700KK, 800KK ve 900KK isimli çimento hamurlarında sırasıyla %1.8, %5.5, %16.4 ve %18.2 oranlarında artmaktadır (Tablo 4). Priz sonu süreleri ise, 600KK, 700KK, 800KK ve 900KK isimli çimento hamurlarında sırasıyla %2.7, %6.8, %9.5 ve %10.8 oranlarında artmaktadır (Tablo 5). Priz başlama süreleri bir bütün olarak değerlendirildiğinde, TS EN 197-1 [9] standardı esasları çerçevesinde sınırlanan 52.5 MPa çimento dayanım sınıfı için minimum süre olan 45 dakikanın ve 42.5 MPa dayanım sınıfı için minimum süre olan 60 dakikanın üzerinde olduğu ve tüm çimentolar için standartları sağladığı söylenebilir.

Çalışmada tercih edilen Üçgen, Yamuk ve Gauss üyelik fonksiyonlarıyla elde edilen priz sürelerinin, deneylerden elde edilen priz süreleriyle hemen hemen aynı olduğu söylenebilir. Gerçek sonuçlarla tahmini sonuçlar arasındaki fark değerlendirildiğinde priz başlama süresinde 800KK isimli hamurda -0.0350 dakika, priz sonu süresinde ise 600KK isimli hamurda -0.0338 dakika fark olduğu, diğerlerinde de bu değerlere çok yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Dolayısı ile tüm modellerde priz başlama ve priz sonu sürelerinin gerçek değerlerle neredeyse aynı verilerin elde edilebileceği ifade edilebilir.

Sonuçların güvenilirliğini görebilmek için kullanılan istatistiksel yöntemlerden R², MAPE ve RMSE değerlerine göre priz başlama ve priz sonu süreleri sırasıyla; Üçgen üyelik fonksiyonu için 0.99944-0.99935, %2.25629-2.20495 ve 2.35725-3.33346, Yamuk üyelik fonksiyonu için 0.99944-0.99935, %2.25659-2.20526 ve 2.35726-3.33345 ve Gauss üyelik fonksiyonu için ise 0.99944-0.99935, %2.25651-2.20496 ve 2.35725-3.33346, olarak belirlenmiştir (Tablo 6).

Bu verilere göre tüm modellerde belirlenen R²’nin 0.99 değeri ile 1’e çok yakın değerde olduğu, dolayısı ile tahmin edilen priz başlama süresinin doğruyu kuvvetli bir şekilde yansıttığı söylenebilir. MAPE için hesaplanan

değerlerin %10’un (maksimum %2.4) altında olması ise hem priz başlama hem de priz sonu sürelerinin tahmin sonuçlarının “çok iyi” ya da “yüksek doğruluk derecesine sahip” olduğunu göstermektedir. RMSE değerine göre her iki modelin sıfır değerine yakınlığı, tahmin sonuçlarının iyi olduğunu göstermektedir. Dolayısı ile istatistiksel endeksler göz önüne alındığında tahmin edilen priz başlama ve priz sonu sürelerinin gerçek değerlere çok yakın olduğu değerlendirilebilir.

7. SONUÇLAR

CEM I 52.5 R tip beyaz Portland çimentoya 600, 700, 800 ve 900 °C sıcaklıkta kalsine edilmiş %10 oranında kaolin ikameli biri referans olmak üzere toplam beş tip çimentonun priz başlama ve priz sonu sürelerinin verileri ve ANFIS ile tahmininden elde edilen bulgularına göre;

- Tüm çimento hamurlarında TS EN 197-1 standardı esasları çerçevesinde sınırlanan 52.5 MPa çimento dayanım sınıfı için minimum süre olan 45 dakikanın ve 42.5 MPa dayanım sınıfı için minimum süre olan 60 dakikanın üzerinde olduğu ve priz süresi açısından bir sorun olmadığı,
 - Gerçek sonuçlarla tahmin sonuçlarının kıyaslanmasında Üçgen, Yamuk ve Gauss üyelik fonksiyonuna göre belirlenen en kötü tahminin bile yaklaşık 0.04 dakika ile belirlenerek hemen hemen gerçek priz başlama ve priz sonu sürelerinin tahmin edilebileceği;
 - Priz başlama süresindeki R², MAPE ve RMSE değerlerinin; Üçgen üyelik fonksiyonu için 0.99944, %2.25629 ve 2.35725, Yamuk üyelik fonksiyonu için 0.99944, %2.25659 ve 2.35726 ve Gauss üyelik fonksiyonu için ise 0.99944, %2.25651 ve 2.35725 olarak elde edildiği, dolayısı ile tahmin sonuçlarının “yüksek doğruluk” veya “çok iyi” derecesinde değerlendirileceği,
 - Priz sonu süresindeki R², MAPE ve RMSE değerleri; Üçgen üyelik fonksiyonu için sırasıyla Üçgen üyelik fonksiyonu için 0.99935, %2.20495 ve 3.33346, Yamuk üyelik fonksiyonu için 0.99935, %2.20526 ve 3.33345 ve Gauss üyelik fonksiyonu için ise 0.99935, %2.20496 ve 3.33346 olarak elde edildiği, dolayısı ile tahmin sonuçlarının “yüksek doğruluk” veya “çok iyi” derecesinde değerlendirileceği söylenebilir.
- Elde edilen bulgular genel olarak değerlendirildiğinde her üç modelin de birbirine çok yakın sonuçlar verdiği ve bu modellerin güçlü ve faydalı modeller olarak değerlendirilebileceği ve priz sürelerinin tahmininde başarıyla kullanılabileceği sonucuna varılabilir.

Etik Hususlar

Etik kurallara uyum

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

Çıkar çatışması

Yazarlar çalışmayla ilgili herhangi bir kişi ya da kurumla çıkar çatışmasının olmadığını beyan eder.

Teşekkür

Yazarlar, deney ve analizlerin yapılmasında katkı sağlayan Eskişehir ÇİMSA Çimento Fabrikası Yetkililerine ve çalışanlarına teşekkür ederler.

KAYNAKÇA

- [1] Elahi, T. E., Romero, P., Garg, N. 2026. Impact of calcination time on metakaolin morphology and enhancement of pozzolanic reactivity: Insights from in situ TEM. *Cement and Concrete Research*, 199, 108022. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.108022>
- [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] Yanguatin, H., Tobón, J., Ramírez, J. 2017. Pozzolanic reactivity of kaolin clays, a review. *Revista Ingeniería de Construcción*, 32(2), 13-24. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732017000200002>
- [4] Shafiq, N., Nuruddin, M. F., Khan, S. U., Ayub, T. 2015. Calcined kaolin as cement replacing material and its use in high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 81, 313-323. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.050>
- [5] Said-Mansour, M., Kadri, E. H., Kenai, S., Ghrici, M., Bennaceur, R. 2011. Influence of calcined kaolin on mortar properties. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2275-2282. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.017>
- [6] Moya, J. S., Cabal, B., López-Esteban, S., Bartolomé, J. F., Sanz, J. 2024. Significance of the formation of pentahedral aluminum in the reactivity of calcined kaolin/metakaolin and its applications. *Ceramics International*, 50(1), 1329-1340. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.10.304>
- [7] Wang, H., Li, C., Peng, Z., Zhang, S. 2011. Characterization and thermal behavior of kaolin. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 105(1), 157-160. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1385-0>
- [8] TS EN 196-3, 2010. Çimento deney metotları-Bölüm 3: Priz süresi ve hacim genişleme tayini. Türk Standartları, Ankara.
- [9] TS EN 197-1, 2012. Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları, Ankara.
- [10] 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>
- [11] Han, S., Zheng, D., Mehdizadeh, B., Nasr, E. A., Khandaker, M. U., Salman, M., Mehrabi, P. 2023. Sustainable design of self-consolidating green concrete with partial replacements for cement through neural-network and fuzzy technique. *Sustainability*, 15(6), 4752. <https://doi.org/10.3390/su15064752>
- [12] Gülbandır, E., Koçak, B., Özdemir, İ., Koçak, Y. 2023. Portland Çimentosu Priz Sürelerine Pirinç Kabuğu Külü Etkisinin ANFIS ile Tahmini. *Eskişehir Türk Dünyası Uygulama ve Araştırma Merkezi Bilişim Dergisi*, 4(2), 34-42. <https://doi.org/10.53608/estudambilisim.1298231>
- [13] 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>
- [14] Armaghani, D. J., Asteris, P. G., 2021. A comparative study of ANN and ANFIS models for the prediction of cement-based mortar materials compressive strength. *Neural Computing and Applications*, 33(9), 4501-4532. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05244-4>
- [15] Golafshani, E. M., Behnood, A., Arashpour, M., 2020. Predicting the compressive strength of normal and High-Performance Concretes using ANN and ANFIS hybridized with Grey Wolf Optimizer. *Construction and Building Materials*, 232, 117266. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117266>
- [16] Ozcan, G., Kocak, Y., Gulbandilar, E. 2018. Compressive strength estimation of concrete containing zeolite and diatomite: an expert system implementation. *Computers and Concrete*, 21(1), 21-30. <https://doi.org/10.12989/cac.2018.21.1.021>
- [17] 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>
- [18] Saadat, M., Bayat, M. 2022. Prediction of the unconfined compressive strength of stabilised soil by Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) and Non-Linear Regression (NLR). *Geomechanics and Geoengineering*, 17(1), 80-91. <https://doi.org/10.1080/17486025.2019.1699668>
- [19] Liu, Q., Peng, K., Zandi, Y., Agdas, A. S., Al-Tamimi, H. M., Assilzadeh, H., Ebid, A. A. K., Khadimallah, M. A., Ali, H. E. 2022. Mechanical characteristics and self-healing soil-cementitious hydrogel materials in mine backfill using hybridized

- ANFIS-SVM. Gels, 8(7), 455.
<https://doi.org/10.3390/gels8070455>
- [20] Apiecionek, L. 2025. Fuzzy neural networks—A review with case study. *Applied Sciences*, 15(13), 6980. <https://doi.org/10.3390/app15136980>
- [21] Gkountakou, 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>
- [22] Koçak, B., 2022. Yapay Zeka Tabanlı Uygulamalarla Diatomit ve Pomza İkameli Çimento Harçlarının Basınç Dayanımlarının Tahmini. Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Düzce.
- [23] Naveed, M., Hameed, A., Qureshi, M. U., Rasool, A. M., 2023. Optimization of constituent proportions for compressive strength of sustainable geopolymer concrete: A statistical approach. *Results in Engineering*, 20, 101575. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101575>
- [24] Aslay, F., Özen, Ü., 2013. Meteorolojik Parametreler Kullanılarak Yapay Sinir Ağları ile Toprak Sıcaklığının Tahmini. *Politeknik Dergisi*, 16(4), 139-145. <https://doi.org/10.2339/2013.16.4>, 139-145