

(Araştırma Makalesi)**Portland Çimentosu Priz Sürelerine Pirinç Kabuğu Külü Etkisinin ANFIS ile Tahmini****Eyyüp Gülbandır¹, Burak KOÇAK*², İzzet Özdemir³, Yılmaz KOÇAK⁴**¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 81600, Eskişehir, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0001-5559-5281>²Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 81600, Düzce, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-8640-1758>³Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 81600, Düzce, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0001-5387-4199>⁴Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 81600, Düzce, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-5281-5450>**Anahtar Kelimeler:**
ANFIS,
Portland çimento,
Pirinç kabuğu külü,
Priz süresi**Özet:** Bu çalışmada, pirinç kabuğu ikameli çimento hamurlarının priz süreleri uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) ile tahmin edilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, Portland çimentosu içerisine %0, %2.5, %5, %7.5, %10, %12.5 ve %15 oranlarında pirinç kabuğu külü ikame edilmiş olan çimento hamurlarının priz başlangıç ve priz sonu süreleri belirlenmiştir. İkinci aşamada, deneylerden elde edilen sonuçlarla gauss ve üçgen üyelik fonksiyonları kullanılarak iki model oluşturulmuş ve bu modeller yardımıyla priz başlangıç ve priz sonu süreleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Son aşamada ise modellerden elde edilen sonuçlarının güvenilirliği anlayabilmek için R², MAPE ve RMSE olmak üzere üç farklı istatistiksel yöntem kullanılmıştır. Elde edilen priz başlangıç sürelerine göre R², MAPE ve RMSE değerleri sırasıyla; gauss üyelik fonksiyonları için 0.9912, 0.0167 ve 5.6537, üçgen üyelik fonksiyonları için ise 0.9957, 0.0119 ve 3.9661 olarak bulunmuştur. Priz sonu sürelerine göre ise R², MAPE ve RMSE değerleri sırasıyla; gauss üyelik fonksiyonları için 0.9909, 0.0144 ve 5.8693, üçgen üyelik fonksiyonları için 0.9939, 0.0127 ve 4.8125 olarak tespit edilmiştir. İstatistiksel endeksler bir bütün olarak değerlendirildiğinde, priz başlangıç ve priz sonu süreleri açısından hem gauss hem de üçgen üyelik fonksiyonlarıyla oluşturulan modellerle gerçek değerlere çok yakın sonuçlar elde edildiği belirlenmiştir. Dolayısı ile her iki modelin de priz sürelerini tahmin etmek için güçlü modeller olduğu ifade edilebilir.**(Research Article)****Estimation of the Effect of Rice Husk Ash on Portland Cement Setting Times with ANFIS****Keywords:**
ANFIS,
Portland cement,
Rice husk ash,
Setting time**Abstract:** In this study, setting times of rice husk-replaced cement pastes were estimated with an adaptive network-based fuzzy inference system (ANFIS). In the first stage of the study, initial and final setting time of cement pastes in which 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5% and 15% rice husk ash substituted into Portland cement were determined. In the second stage, two models were created using the gaussian and triangular membership functions with the results obtained from the experiments, and with the help of these models, the initial and final setting times were tried to be estimated. In the last stage, three different statistical methods, namely R², MAPE and RMSE, were used to understand the reliability of the results obtained from the models. According to the initial setting time obtained, R², MAPE and RMSE were found as 0.9912, 0.0167, and 5.6537 for gaussian membership functions, 0.9957, 0.0119, and 3.9661 for triangle membership functions, respectively. According to the final setting time, R², MAPE and RMSE were detected as 0.9909, 0.0144, and 5.8693 for gaussian membership functions, 0.9939, 0.0127, and 4.8125 for triangle membership functions, respectively. When the statistical indices were evaluated as a whole, it was determined that results very close to real values were obtained

with the models created with both gaussian and triangular membership functions in terms of initial and final setting times. Therefore, it can be stated that both models are powerful models for estimating setting times.

1. GİRİŞ

Portland çimentosu üretiminde; büyük miktarda enerji ve hammadde tüketilmekte, bunun yanı sıra küresel ısınmaya neden olan çok miktarda CO₂ salınımına neden olmaktadır [1]. Bu nedenle çimento endüstrilerinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını en aza indirmek için silis dumanı [2], uçucu kül [3], yüksek fırın cürufu [4] gibi yapay, yada tras [5], zeolit [6], diatomit [7], pomza [8] gibi doğal puzolanik malzemeler kullanılmaktadır.

Yapay puzolanik malzemeler sınıfında yer alan pirinç kabuğu külü, pirinç kabuğunun yakılması sırasında elde edilen ve çoğunlukla elektrik üretiminde yakıt olarak kullanılan tarımsal sanayi yan ürünlerinden biri olup, 1 ton pirinç kabuğundan yaklaşık 45 kg pirinç kabuğu külü üretilebilmektedir [9, 10]. Pirinç kabuğu külü, genellikle çevreyi ve insan sağlığını tehdit eden, toprağı ve su kaynaklarını kirleten, ayrıca hava kirliliğine neden olacak kadar ince parçacıklardan oluşan bir atık olarak dikkat çekmektedir [11]. Bu çevresel sorunlarını azaltabilmek için araştırmacılar tarafından gerek beton gerekse çimento teknolojisinde katkı maddesi olarak kullanılmakta ve üzerinde yoğun olarak çalışmalar yapılmaktadır [11-13]. Pirinç kabuğu külünün, minerolojik olarak amorf ve kısmen kristal yapısı, yüksek yüzey alanı, inceliğı, yüksek silika içeriğı (~%90-95) ve dolayısı ile yüksek puzolanik reaktiviteye sahip olması nedeniyle sürdürülebilir çimento bazı malzemeleri üretmek için kullanımının gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır [10, 14]. Pirinç kabuğu külünün çimento ve betonda kullanımıyla; betonda sülfat saldırısına, alkali-silika reaksiyonuna ve kimyasal etkilere karşı betonun direncinin artırılmasına katkıda bulunarak, betonun uzun süredeki dayanım ve dayanıklılığında iyileşme gibi avantajlar sağlanabilir. Bunların yanı sıra çimentolu hamurunun priz süresini uzatarak betonun işlenebilirliğini artırabilir [10, 11, 15-18].

Çimentonun hidratasyonu dolayısıyla çimento hamurunda meydana gelen sertleşme, çimentonun priz başlangıcı olarak tanımlanmaktadır. Bu sürenin çok hızlı meydana gelmesi işlenebilirlik açısından problemlere neden olmaktadır. Yani taze betonun karıştırılması, taşınması, yerleştirilmesi, sıkıştırılması, yüzeyinin düzeltilmesi gibi aşamalarda betonun daha sonraki dayanım ve dayanıklılık özelliklerini etkileyebilecek sorunlarla karşılaşılabilenmektedir. Priz süresinin çok uzun olması halindeyse, beton dayanımı arzu edilen sürede tamamlanmayacak, bu nedenle de betonun korunma ve kalıp alma süreleri daha uzun olacaktır. Standartlar, bu nedenle çimento tiplerini de dikkate alarak priz başlangıç süresini sınırlamaktadır [19]. Bu nedenle çimento veya beton içerisine farklı özellik ve miktarda pirinç kabuğu külü gibi yapay mineral ve/veya kimyasal katkılar katılarak, beton dökülecek ortama göre priz süreleri istenen sürelerde ayarlanmaya çalışılmaktadır. Ancak priz süresi, eğilme ve basınç dayanımı gibi standart

çimento deneyleri oldukça zaman alıcı ve zahmetli çalışmalardır. Bu nedenle araştırmacılar; pirinç kabuğu külü katkılı beton veya çimento harçlarının basınç dayanımı özelliklerini uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS), yapay sinir ağları (YSA) ve makine öğrenme modelleri gibi teknikleriyle tahmin etmeye çalışmışlardır.

Nazari vd. (2013) yapmış oldukları çalışmada, uçucu kül ve pirinç kabuğu külü katkısı ile farklı kür koşullarında ve 7. ve 28. hidratasyon günlerinde elde ettikleri geopolimer betonların basınç dayanımını, iki farklı ANFIS modeli ile tahmin etmişlerdir. Bu çalışmada modelleri oluşturmak için, 120 örneğin deneysel sonuçları eğitim ve test aşamalarında kullanılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre; ANFIS-II modelinde eğitim seti için R²'nin en iyi değerinin %96.32 olduğunu, ANFIS-I modelinde test seti için minimum R² değerleri %94.34 olduğunu belirtmişlerdir. Dolayısı ile tüm R² değerlerinin önerilen ANFIS-I ve ANFIS-II modelleri için uygun olduğunu ve deneysel değerlere çok yakın basınç dayanımı değerlerinin tahmin edilebildiğini ifade etmişlerdir [20].

Diğer bir çalışmada Li vd. (2023) pirinç kabuğu külü katkılı betonunun basınç dayanımını tahmin etmek için daire eşlemeli sürüngen arama algoritması (reptile search algorithm with circle mapping) kullanarak optimize edilmiş yeni bir hibrit yapay sinir ağı modeli oluşturmuşlardır. Önerilen modeli eğitmek için toplam 192 örneğe ait olan basınç dayanımı sonucundan faydalanmışlardır. Geliştirilen tüm modellerin tahmin performanslarını değerlendirmek için dört istatistiksel endeksten yararlanmışlardır. Performans değerlendirmesi, önerilen hibrit yapay sinir ağı modelinin R² için 0.9709, VAF için 0.9709, RMSE için 3.4489 ve MAE için ise 2.6451 değerlerini elde etmişler ve bu sonuçların tatmin edici tahmin doğruluğunu gösterdiğini ve pirinç kabuğu külü katkılı betonunun basınç dayanımını tahmin etmek iyi bir model olduğunu belirtmişlerdir [21].

Bir diğer çalışmada Al-Hashem vd. (2022) uçucu kül ve pirinç kabuğu külü katkılı betonların basınç dayanımını tahmin etmek için gen ifadeli programlama (GEP) ve yapay sinir ağları (YSA) ile tahmin modelleri oluşturmuşlardır. Bu iki modelin performansı, R² değerlerinin karşılaştırması kullanılarak kıyaslanmıştır. Buna göre elde ettikleri sonuçlardan en iyi performansa sahip GEP algoritması ile elde edilen modelin, eğitim ve test aşamalarında sırasıyla 0.80 ve 0.70 gibi R² değerlerine sahip olduğunu belirlemişlerdir. YSA modelinde ise eğitim ve test aşamalarında sırasıyla 0.94 ve 0.88 olan daha yüksek R² değerine sahip olduğunu ve GEP ile oluşturulan modele göre daha iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir [22].

Amin vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, pirinç kabuğu külü katkılı betonların basınç dayanımını tahmin

etmek için YSA, ANFIS, tepki yüzeyi metodolojisi (responce surface methodology-RSM) ve lineer regresyon (LR) ile dört farklı model oluşturulmuştur. Bu modellerin performansı R^2 değerleri dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Buna göre R^2 değerleri; YSA, ANFIS, RSM ve LR için sırasıyla 0.98, 0.89, 0.70 ve 0.63 olarak elde edilmiştir. Bu nedenle yazarlar sonuçlara ve istatistiksel parametrelere dayanarak, YSA ve ANFIS tarafından tahmin edilen basınç dayanımı sonuçlarının, RSM ve LR ile oluşturulan modellere kıyasla daha doğru sonuçlar verdiği belirtilmiştir [23].

Li vd. (2023) yaptıkları çalışmada, pirinç kabuğu külü katkılı betonların basınç dayanımını tahmin etmek için farklı makine öğrenme modelleri geliştirmişler ve bu modelleri istifleme tahmin modeli (Stacking model) ile karşılaştırmışlardır. Burada XGBoost ve Random forest (RF) modellerinin birinci katman temel öğrenciler olarak kullanıldığını, lineer regresyonu (LR) modelinin ikinci katman meta-öğrenci olarak kullanıldığını; kurulan bu istifleme modelinin performans değerlendirme indekslerinin RMSE için 2.344, MAE için 1.764 ve R^2 için 0.987 olarak bulunduğunu belirtmişlerdir. Bu sonuçlara göre istifleme modelinin, temel öğrencilerin tahmin sonuçlarını uygun şekilde birleştirebildiğini ve modelin tahmin özelliğini geliştirebildiğini, dolayısı ile pirinç kabuğu külü katkılı betonların basınç dayanımını tahmin etmek için uygun bir tahmin modeli olduğunu belirtmişlerdir [24].

Literatürden de görülebileceği gibi oluşturulan tahmin modellerinin, daha çok pirinç kabuğu külü katkılı betonların basınç dayanımlarının tahmini üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Ancak pirinç kabuğu külü ikameli çimentoların priz süresi ile ilgili tahmin modellerine araştırmalarımız neticesinde çok fazla rastlanamamıştır. Bu nedenle çalışmada, Portland CEM I 42.5 R tip çimentoya, %0, %2.5, %5, %7.5, %10, %12.5 ve %15 oranlarında pirinç kabuğu külü ikame edilerek hazırlanmış olan çimento hamurlarının priz sürelerine, pirinç kabuğu külünün etkisi ANFIS ile incelenmiştir. Deneylemlerden elde edilen verilerden yararlanılarak ANFIS ile gauss ve üçgen üyelik fonksiyonları kullanılarak iki model oluşturulmuş ve bu modeller yardımıyla priz başlangıç ve priz sonu süreleri tahmin edilmeye çalışılarak literatüre katkı sağlamak amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Çalışmada, Baştaş Ankara Çimento fabrikasında TS EN 197-1 standardına göre üretilen CEM I 42.5 R tipi Portland çimento (PÇ) kullanılmıştır [19]. Pirinç kabuğu, Akçakoca Pirinç Değirmeninden temin edilmiş ve Bartın Işıklar Tuğla Fabrikası'nın fırınında 3 saat 800 °C'de kül haline getirilmiştir. Elde edilen kül, enerji maliyeti artışının olmaması için herhangi bir öğütme işlemine tabi tutulmamıştır. Kullanılan pirinç kabuğu külü ile PÇ'nin kimyasal ve fiziksel özelliklerini gösteren analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Pirinç kabuğu külü ile PÇ'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Malzemeler	Pirinç kabuğu külü	PÇ
Kimyasal özellikleri, %		
SiO ₂	89.16	21.16
Al ₂ O ₃	2.96	6.01
Fe ₂ O ₃	1.15	3.15
CaO	0.75	62.16
MgO	0.63	2.3
SO ₃	0.55	2.75
Na ₂ O	0.44	0.36
K ₂ O	3.12	1.10
Cl ⁻	-	0.0071
Kızdırma kaybı	7.16	2.80
Fiziksel özellikler		
Özgül ağırlık, g/cm ³	3.07	2.01
Özgül yüzey (Blaine), cm ² /g	3427	6710

2.2. Metot

Bu çalışmada PÇ referans çimento olarak kullanılmıştır. Daha sonra bu çimentoya %0, %2.5, %5, %7.5, %10, %12.5 ve %15 oranlarında pirinç kabuğu külü ikame edilerek toplam yedi tip çimento elde edilmiş ve çimentolara verilen kodlar Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Çimento tipi ve kodları.

Çimento	Çimento tipi	Kodu
1	Rerens çimento (PÇ)	R
2	%2.5 oranında pirinç kabuğu külü ikameli çimento	K1
3	%5 oranında pirinç kabuğu külü ikameli çimento	K2
4	%7.5 oranında pirinç kabuğu külü ikameli çimento	K3
5	%10 oranında pirinç kabuğu külü ikameli çimento	K4
6	%12.5 oranında pirinç kabuğu külü ikameli çimento	K5
7	%15 oranında pirinç kabuğu külü ikameli çimento	K6

Üretilen bu çimentoların priz başlangıç ve priz sonu süreleri, TS EN 196-3'e göre 3'er deney yapılarak belirlenmiştir [25]. Çimentoların priz süreleri Vicat halkası, sondası ve iğnesi kullanılarak Baştaş Ankara Çimento fabrikasında, 20 °C sıcaklık ve bağıl nemin %65 olduğu laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir.

3. UYARLAMALI AĞ TABANLI BULANIK ÇIKARIM SİSTEMİ

Uyarlamalı ağı tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) karma bir sistemdir ve sinir ağları ve bulanık çıkarım sistemlerinden oluşmaktadır. Bu model, giriş-çıkış veri kümelerinden bulanık kurallar üretebilmekte olduğu için Takagi, Sugeno ve Kang tarafından önlümlenmektedir. Bulanık kural formatı aşağıda verildiği şekliyle gösterilebilmektedir.

if x is A, y is B then z = f(x,y)

Burada A ve B bulanık önerme kümelerini, $z=f(x,y)$, çıkarımdaki ham fonksiyonu, x ve y ise giriş değişkenlerini belirten polinom fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Bulanık kural formatında “f” sabit ise 0. Dereceden; 1. derece bir polinom ise 1. dereceden Sugeno bulanık çıkarım sistemi olarak tanımlanmaktadır. Birinci dereceden Sugeno bulanık çıkarım sisteminde, if-then kuralları Kural 1 ve 2 olarak Denklem (1) ve (2)’de örneklenmiştir.

Kural 1:

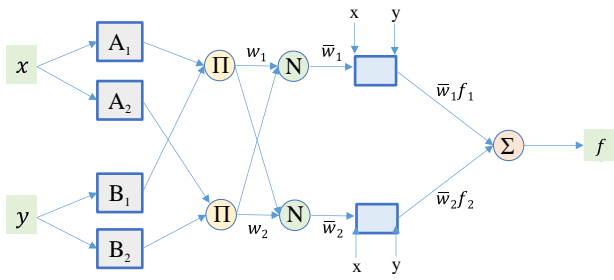
$$\text{if } x \text{ is } A_1, y \text{ is } B_1, \text{ then } f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1 \quad (1)$$

Kural 2:

$$\text{if } x \text{ is } A_2, y \text{ is } B_2, \text{ then } f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2 \quad (2)$$

Kurallardaki A ve B, x ve y olarak belirtilen üyelik fonksiyonları için tanımlanmış giriş bölümdeki bulanık kümelerdir. Denklemlerdeki p, q ve r ise çıkış parametreleridir ve her kural için bir çıktı değeri sağlanmaktadır [26-29].

ANFIS mimarisine iki girişli ve iki kurallı bir yapı Şekil 1’de verilmektedir [28].



1.katman 2.katman 3.katman 4.katman 5.katman

Şekil 1. ANFIS mimarisi (İki giriş ve iki kurallı).

Şekil 1’de görülen ANFIS mimarisi temel olarak 5 katmandan meydana gelmektedir.

1. Katman: Burada her düğüm (i), düğüm fonksiyonu ile uyumlu olup, çıkışı aşağıda örneklenmektedir.

$$o_{i,1} = \mu A_{(i)}(x), \quad \text{için } i = 1, 2, \text{ veya}$$

$$o_{i,1} = \mu B_{(i-2)}(y), \quad \text{için } i = 3, 4$$

Belirtilen A_i ya da B_{i-2} kısa veya uzun gibi dilsel ifadeleri, x ya da y ise i-inci düğüm için girişleri belirtmektedir. $o_{i,1}$, A ya da B bulanık kümeleri için üyelik dereceleri belirtmektedir (Denklem 3).

$$o_{i,1} = \mu A_i(x) = \frac{1}{1 + [(x - c_i)/a_i]^{2b_i}} \quad (3)$$

Buradaki parametre değerleri, genelleştirilmiş çan eğrisi üyelik fonksiyonunda A_i dilsel etiketin üyelik derecesini belirtirken; a_i , b_i , c_i küme parametrelerini ifade etmektedir. Üyelik derecesi fonksiyonları, üyelik fonksiyon tipine bağlı olarak değişiklikler göstermektedir (Denklem 3). Bu katman çıkışı, öncül kısmın üyelik

derecesi değerini ifade etmekte olup, öncül parametreler olarak tanımlanmaktadır.

2. Katman: Burada her düğüm, bir kuralın bulanık çıkarımı ile cebirsel çarpma operatörü yardımı ile hesaplanmaktadır (Denklem 4).

$$o_{i,2} = w_i = \mu A_i(x) \cdot \mu B_i(y) \quad \text{için } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

3. Katman: Burada her düğüm; bulanık çıkarımların, tüm düğümlerin bulanık çıkarımların toplamına bölünmesiyle belirlenmektedir (Denklem 5).

$$o_{i,3} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2 + \dots + w_n} \quad \text{için } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

Bu katmandaki çıkışlar, normalize edilmiş olarak ifade edilmektedir. Burada \bar{w}_i , i-inci düğümün çıkışını göstermektedir.

4. Katman: Bu katmandaki her düğüm, düğüm fonksiyonu ile normalize çıkışın çarpılmasıyla belirlenmektedir (Denklem 6).

$$o_{i,4} = \bar{w}_i \cdot f_i = \bar{w}_i \cdot (p_i \cdot x + q_i \cdot y + r_i) \quad \text{için } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

Buradaki parametreler ardıl parametre olarak tanımlanmaktadır ve p_i , q_i , r_i parametre kümelerini göstermektedir.

5. Katman: Bu katmandaki Σ etiketi, gelen işaretlerin toplamını, yani son çıkışı belirtmektedir (Denklem 7).

$$o_{i,5} = \sum_i \bar{w}_i \cdot f_i = \frac{\sum_i w_i \cdot f_i}{\sum_i w_i} \quad \text{için } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

Bir ANFIS mimarisinin gerçek çıktı değeri bu son katmanda belirlenmektedir. Burada f sabit ise, 0. derece Sugeno bulanık modeli elde edilmekte olup hem Tsukamoto bulanık modelinde hem de Mamdani bulanık modelinde özel bir durum olarak ifade edilebilir [26-30].

4. ANFIS TASARIM VE MODEL PARAMETRELERİ

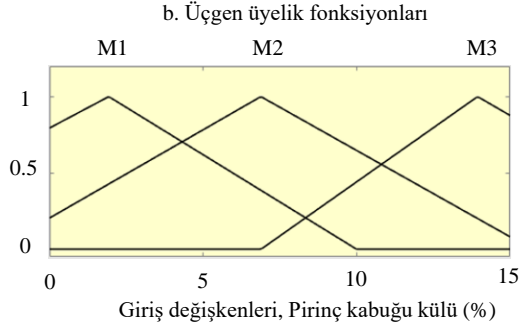
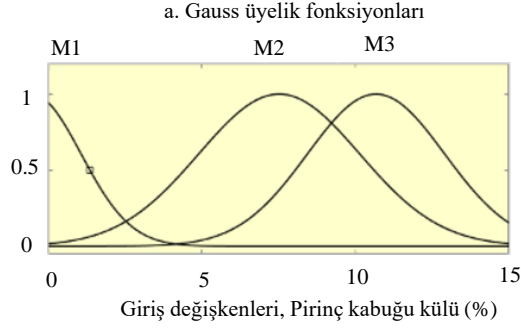
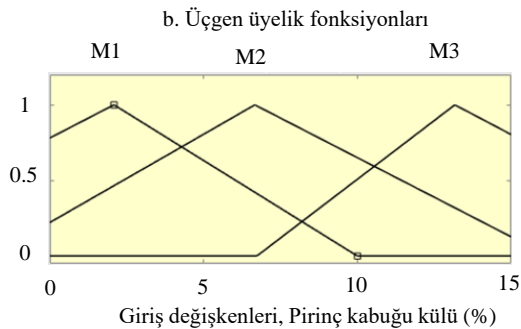
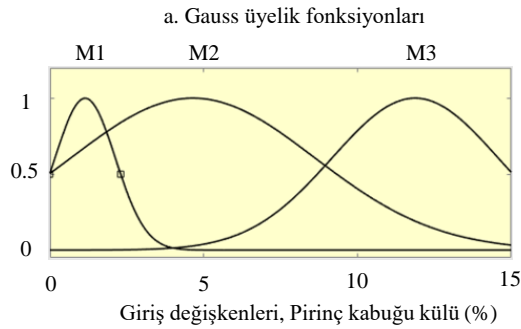
Pirinç kabuğu külü ikameli çimento hamurlarının priz sürelerini tahmin etmek için MATLAB programında ANFIS editöründe yer alan “gauss” ve “üçgen” üyelik fonksiyonu tercih edilmiştir. Gauss ve üçgen üyelik fonksiyonlarına ait parametre değerleri sırasıyla Tablo 3 ve 4’te; giriş değişkeninin üyelik fonksiyonları ise Şekil 2 ve 3’te verilmiştir.

Tablo 3. ANFIS modelleri priz başlangıç parametre değerleri.

Parametre bilgisi	Gauss	Üçgen
Düğüm sayısı	16	16
Doğrusal parametre sayısı	3	3
Doğrusal olmayan parametre sayısı	6	9
Toplam parametre sayısı	9	12
Eğitim veri çifti sayısı	21	21
Veri çifti kontrol sayısı	0	0
Toplam bulanık kural sayısı	3	3
Epoch sayısı	2	2

Tablo 4. ANFIS modelleri priz sonu parametre değerleri.

Parametre bilgisi	Gauss	Üçgen
Düğüm sayısı	16	16
Doğrusal parametre sayısı	3	3
Doğrusal olmayan parametre sayısı	6	9
Toplam parametre sayısı	9	12
Eğitim veri çifti sayısı	21	21
Veri çifti kontrol sayısı	0	0
Toplam bulanık kural sayısı	3	3
Epoch sayısı	2	2

**Şekil 2.** ANFIS modelleri priz başlangıç giriş değişkenlerinin üyelik fonksiyonları.**Şekil 3.** ANFIS modelleri priz sonu giriş değişkenlerinin üyelik fonksiyonları.

4. BULGULAR

Toplam yedi tip çimento üzerinde gerçekleştirilen deneylerden ve ANFIS modellerinden elde edilen sonuçlara göre priz başlangıç süreleri Tablo 5'te, priz sonu süreleri ise Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 5. Çimento hamurlarının priz başlangıç süreleri (dakika).

Numune	Çimento hamurları						
	R	K1	K2	K3	K4	K5	K6
1	190	205	230	255	315	330	355
2	195	200	230	250	315	335	355
3	190	210	225	260	310	325	360
Ortalama	192	205	228	255	313	330	357
Endeks, %	100	107	119	133	163	172	186
Gauss	192	205	227	258	307	339	352
Hata, dakika	0	0	1	-3	6	-9	5
Hata, %	0.0	0.0	0.4	-1.2	1.9	-2.7	1.4
Üçgen	191	206	228	256	310	335	355
Hata, dakika	1	-1	0	-1	3	-5	2
Hata, %	0.5	-0.5	0.0	-0.4	1.0	-1.5	0.6

Tablo 6. Çimento hamurlarının priz sonu süreleri (dakika).

Numune	Çimento hamurları						
	R	K1	K2	K3	K4	K5	K6
1	240	255	280	305	370	380	415
2	250	255	280	310	370	390	415
3	250	260	275	305	370	390	400
Ortalama	247	257	278	307	370	387	410
Endeks, %	100	104	113	124	150	157	166
Gauss	247	257	278	309	365	395	405
Hata, dakika	0	0	0	-2	5	-8	5
Hata, %	0.0	0.0	0.0	-0.7	1.4	-2.1	1.2
Üçgen	245	258	279	308	366	392	408
Hata, dakika	2	-1	-1	-1	4	-5	2
Hata, %	0.8	-0.4	-0.4	-0.3	1.1	-1.3	0.5

DeneySEL sonuçlar incelendiğinde, pirinç kabuğu külü ikameli tüm çimento hamurlarına ait priz başlangıç ve priz sonu sürelerinin arttığı belirlenmiştir (Tablo 5 ve Tablo 6). Elde edilen sonuçlara göre ortalama priz başlangıç ve priz sonu sürelerinin sırası ile 192 ve 247 dakikayla en küçük referans çimento hamurunda; en fazla sürenin ise %15 pirinç kabuğu külü ikame oranına sahip K6 kodlu çimento hamurunda olduğu görülmektedir. Priz başlangıç süreleri referans çimento hamuruyla kıyaslandığında, K1, K2, K3, K4, K5 ve K6 kodlu çimento hamurlarında sırasıyla %7, %19, %33, %63, %72 ve %86 oranlarında arttığı görülmektedir (Tablo 5). Priz sonu süreleri referans çimento hamuruyla kıyaslanmasında ise, K1, K2, K3, K4, K5 ve K6 kodlu çimento hamurlarında sırasıyla %4, %13, %24, %50, %57 ve %66 oranlarında arttığı görülmektedir (Tablo 6). Priz başlangıç süreleri incelendiğinde referans ve pirinç kabuğu külü ikameli çimento hamurlarının priz başlangıç sürelerinin TS EN 197-1 standardında belirtilen 42.5 MPa dayanım sınıfında en az süre olarak belirtilen 60 dakikanın ve 32.5 MPa dayanım sınıfında en az süre olarak belirtilen 75 dakikanın üzerinde sağlandığı görülmektedir [19].

Bunun yanı sıra modellerden elde edilen verilerle, deneylerden elde edilen gerçek priz başlangıç ve priz sonu süreleri kıyaslandığında, gauss ve üçgen üyelik fonksiyonlarının tahmin sonuçlarının farklılık gösterdiği izlenmektedir.

Gauss üyelik fonksiyonlarıyla belirlenen priz başlangıç sürelerindeki en büyük farklılığın -9 dakika fark ve %2.7 hata oranıyla K5 kodlu (Tablo 5), priz sonu sürelerindeki en büyük farklılığın da -8 dakika fark ve %2.1 hata oranıyla yine K5 kodlu (Tablo 6) çimento hamurunda olduğu görülmektedir. Priz başlangıç sürelerindeki en küçük farklılığın ise %0 hata oranıyla R ve K1 kodlu; Priz sonu sürelerindeki en küçük farklılığın ise %0 hata oranıyla R, K1 ve K2 kodlu çimento hamurlarında olduğu belirlenmiştir.

Üçgen üyelik fonksiyonlarıyla belirlenen priz başlangıç sürelerindeki en büyük farklılığın -5 dakika fark ve %1.5 hata oranıyla K5 kodlu (Tablo 5), priz sonu sürelerindeki en büyük farklılığın da -5 dakika fark ve %1.3 hata oranıyla yine K5 kodlu (Tablo 6) çimento hamurunda olduğu belirlenmiştir. Priz başlangıç sürelerindeki en küçük farklılığın ise %0 hata oranıyla K2 kodlu; Priz sonu sürelerindeki en küçük farklılığın ise %1 hata oranıyla K1, K2 ve K3 kodlu çimento hamurlarında olduğu görülmektedir.

Hem gauss hem de üçgen üyelik fonksiyonlarıyla belirlenen tüm çimento hamurlarının priz süreleri bir bütün olarak değerlendirildiğinde, çok küçük hata oranlarıyla priz başlangıç ve priz sonu sürelerinin tahmin edilebildiği söylenebilir. Verilere göre gauss üyelik fonksiyonlarıyla elde edilen sonuçlar için priz başlangıç ve priz sonu süreleri dikkate alındığında en kötü tahmin değerinin bile sırasıyla %97.3 ve %97.9 olduğu; üçgen üyelik fonksiyonlarıyla elde edilen sonuçlar için priz başlangıç ve priz sonu süreleri dikkate alındığında ise en kötü tahminin bile sırasıyla %98.5 ve %98.7 doğrulukla olduğu belirlenmiştir. Bu verilere göre üçgen üyelik fonksiyonlarıyla tahmin edilen sonuçların, gauss üyelik fonksiyonlarıyla tahmin edilen sonuçlara göre nispeten daha iyi olduğu ifade edilebilir.

Deneyler ile gauss ve üçgen üyelik fonksiyonlarıyla elde edilen priz sürelerinin kıyaslanmasında R^2 (regresyon analiz), MAPE (ortalama mutlak yüzde hata) ve RMSE (hata kareleri ortalamasının karekökü) istatistiksel yöntemleri kullanılmış ve sırasıyla Denklem (8), (9) ve (10),’da verilmiştir [27, 31].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - r_i)^2}{\sum_{i=1}^N (r_i - y_m)^2} \quad (8)$$

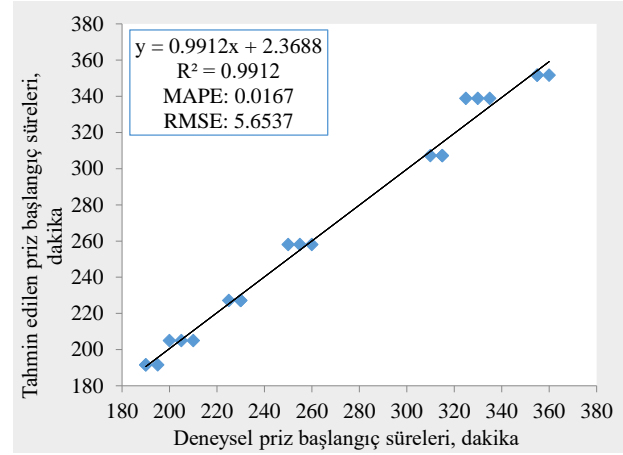
$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^N \left| \frac{r_i - y_i}{r_i} \right| \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - r_i)^2} \quad (10)$$

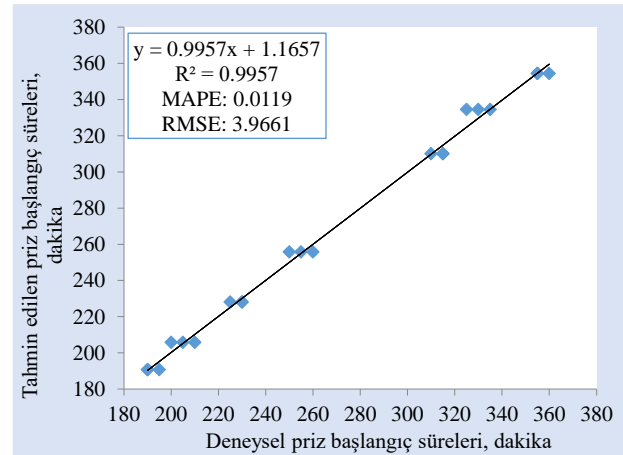
Modellerden elde edilen sonuçların güvenilirliğini belirleyebilmek için bu denklemlerden elde edilen R^2 , MAPE ve RMS gibi istatistiksel veriler; priz başlangıç

süreleri için Şekil 4’te, priz sonu süreleri için ise Şekil 5’te verilmiştir.

a. Gauss tahmin modeli



b. Üçgen tahmin modeli

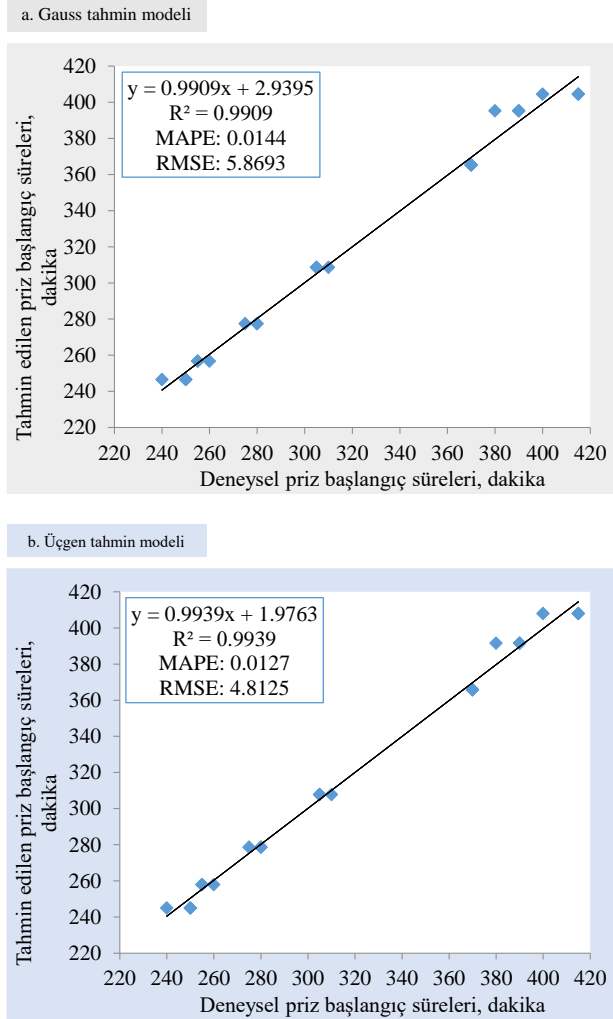


Şekil 4. ANFIS modelleri priz başlangıç sürelerinin karşılaştırılması.

Şekil 4’teki priz başlangıç sürelerine ait R^2 , MAPE ve RMSE sonuçları sırasıyla gauss üyelik fonksiyonları için 0.9912, 0.0167 ve 5.6537 olarak hesaplanırken (Şekil 4.a), üçgen üyelik fonksiyonları için 0.9957, 0.0119 ve 3.9661 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.b).

Her iki modelin istatistiksel analizlerden R^2 ’nin en küçük değeri olan 0.9912 ile 1’e çok yakın olan gauss üyelik fonksiyonunda bile tahmin edilen priz başlangıç süresi değerlerinin doğruyu kuvvetli bir biçimde yansıttığı görülmektedir. MAPE değerinde ise, her iki modelden elde edilen değerlerin %10’un altında olması priz başlangıç sürelerinin tahmin sonuçlarının “çok iyi” ya da “yüksek doğruluk derecesine sahip” olarak sınıflandırıldığını göstermektedir. Ayrıca çimento hamurlarının priz başlangıç sürelerinin; gauss üyelik fonksiyonuyla %98.3, üçgen üyelik fonksiyonuyla %98.8 oranında doğrulukla tahmin edilebildiği söylenebilir. RMSE değeri dikkate alındığında ise yine her iki modelin sifıra yakın olması tahmin sonuçlarının gerçek değerlere yakın olduğu göstermektedir. Bu durumda istatistiksel endeksler bir bütün olarak değerlendirildiğinde, hem gauss hem de üçgen üyelik fonksiyonlarıyla tahmin edilen

tüm çimento hamurlarının priz sürelerinin gerçek değerlere çok yakın olduğu söylenebilir.



Şekil 5. ANFIS modelleri priz sonu sürelerinin karşılaştırılması.

Şekil 5'teki priz sonu sürelerine ait R^2 , MAPE ve RMSE sonuçları sırasıyla gauss üyelik fonksiyonları için 0.9909, 0.0144 ve 5.8693 olarak belirlenirken (Şekil 5.a), üçgen üyelik fonksiyonları için 0.9939, 0.0127 ve 4.8125 olarak bulunmuştur (Şekil 5.b).

Çimento hamurlarının priz sonu süreleri için her iki modelin istatistiksel analizlerden R^2 'nin en küçük değeri olan 0.9909 ile 1'e çok yakın olan gauss üyelik fonksiyonunda tahmin edilen değerlerin yine doğruyu kuvvetli bir biçimde yansıttığı söylenebilir. MAPE için her iki modelden elde edilen değerlerin yine %10'un altında kalması nedeniyle priz sonu sürelerine ait tahmin sonuçlarının "çok iyi" ya da "yüksek doğruluk derecesine sahip" olduğu söylenebilir. Bunun yanı sıra çimento hamurlarının priz sonu sürelerinin; gauss üyelik fonksiyonu için %98.6, üçgen üyelik fonksiyonuyla %98.7 oranında doğrulukla tahmin edilebildiği ifade edilebilir. RMSE değerlerinin her iki modelde yine sıfıra yakın olması, priz sonu süreleri tahmin sonuçlarının gerçek değerlere yakın olduğunu göstermektedir. Bu durumda istatistiksel endeksler bir bütün olarak değerlendirildiğinde, priz sonu süreleri açısından hem

gauss hem de üçgen üyelik fonksiyonları için gerçek değerlere çok yakın olduğu ifade edilebilir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Portland çimento içerisine %0, %2.5, %5, %7.5, %10, %12.5 ve %15 oranlarında pirinç kabuğu külü ikamesi ile üretilmiş toplam yedi farklı çimentonun priz başlangıç ve priz sonu sürelerine etkisi, ANFIS ile gauss ve üçgen üyelik fonksiyonları kullanılarak iki model yardımıyla tahmin edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre;

- R kodlu çimentoya ait en düşük priz başlangıç süresinin 192 dakika, priz sonu süresinin ise 247 dakika olduğu,
- K1 kodlu çimentoya ait en düşük priz başlangıç süresi 205 dakika, priz sonu süresinin ise 257 dakika olduğu; buna karşılık ortalama priz başlangıç süresinin referans çimento ortalamasına göre %7, priz sonu süresinin ise %4 oranında artış gösterdiği,
- K2 kodlu çimentoya ait en düşük priz başlangıç süresi 228 dakika, priz sonu süresinin ise 278 dakika olduğu; buna karşılık ortalama priz başlangıç süresinin referans çimento ortalamasına göre %19, priz sonu süresinin ise %13 oranında artış gösterdiği,
- K3 kodlu çimentoya ait en düşük priz başlangıç süresi 255 dakika, priz sonu süresinin ise 307 dakika olduğu; buna karşılık ortalama priz başlangıç süresinin referans çimento ortalamasına göre %33, priz sonu süresinin ise %24 oranında artış gösterdiği,
- K4 kodlu çimentoya ait en düşük priz başlangıç süresi 313 dakika, priz sonu süresinin ise 370 dakika olduğu; buna karşılık ortalama priz başlangıç süresinin referans çimento ortalamasına göre %63, priz sonu süresinin ise %50 oranında artış gösterdiği,
- K5 kodlu çimentoya ait en düşük priz başlangıç süresi 330 dakika, priz sonu süresinin ise 387 dakika olduğu; buna karşılık ortalama priz başlangıç süresinin referans çimento ortalamasına göre %72, priz sonu süresinin ise %57 oranında artış gösterdiği,
- K6 kodlu çimentoya ait en düşük priz başlangıç süresi 357 dakika, priz sonu süresinin ise 410 dakika olduğu; buna karşılık ortalama priz başlangıç süresinin referans çimento ortalamasına göre %86, priz sonu süresinin ise %6 oranında artış gösterdiği,
- Tüm Çimento hamurlarının TS EN 197-1 standardında belirtilen 42.5 MPa dayanım sınıfında en az süre olarak belirtilen 60 dakikanın ve 32.5 MPa dayanım sınıfında en az süre olarak belirtilen 75 dakikanın üzerinde sağlandığı,
- Gauss üyelik fonksiyonu ile gerçekleştirilen tahmin modelinde priz başlangıç süresinde en kötü tahminin %97.3, priz sonu süresinde en kötü tahminin %97.9 doğrulukla sağlandığı,
- Üçgen üyelik fonksiyonu ile gerçekleştirilen tahmin modelinde priz başlangıç süresinde en kötü tahminin %98.5, priz sonu süresinde en kötü tahminin %98.7 doğrulukla sağlandığı,
- Priz başlangıç süresindeki R^2 , MAPE ve RMS değerleri; gauss üyelik fonksiyonu ile gerçekleştirilen tahmin modelinin karşılaştırılmasında sırasıyla 0.9912, 0.0167 ve 5.6537 olarak; üçgen üyelik fonksiyonu ile

gerçekleştirilen tahmin modelinin karşılaştırılmasında ise sırasıyla 0.9957, 0.0119 ve 3.9661 olarak tespit edildiği, dolayısıyla gerçekleştirilen tahmin modellerinde “çok iyi” veya “yüksek doğruluk” derecesinde tahmin sonuçlarına ulaşıldığı,

- Priz sonu süresindeki R^2 , MAPE ve RMS değerleri; gauss üyelik fonksiyonu ile gerçekleştirilen tahmin modelinin karşılaştırılmasında sırasıyla 0.9909, 0.0144 ve 5.8693 olarak; üçgen üyelik fonksiyonu ile gerçekleştirilen tahmin modelinin karşılaştırılmasında ise sırasıyla 0.9939, 0.0127 ve 4.8125 olarak tespit edildiği, bu bağlamda gerçekleştirilen tahmin modellerinde “çok iyi” veya “yüksek doğruluk” derecesinde tahmin sonuçlarına ulaşıldığı belirlenmiştir.

Elde edilen bu sonuçlara göre geliştirilen her iki modelin de faydalı ve güçlü modeller olduğu; ancak üçgen üyelik fonksiyonu tahmin modelinden nispeten daha iyi sonuçlar elde edildiği ifade edilebilir. Dolayısıyla her iki modelin de priz sürelerinin tahmini için kullanılabilirliği ve bu modellerle başarılı sonuçlar elde edilebileceği kanaatine varılmıştır.

Etik Hususlar (Ethical Considerations)

Etik kurallara uyum (Compliance with ethical guidelines)

Yazarlar çalışmanın özgün bir çalışma olduğunu, etik görev ve sorumluluklara riayet ettiklerini beyan ederler.

Finansman (Funding)

Yapılan çalışmadaki çimento deneyleri ve analizleri için Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Komisyon Başkanlığı, 2019.07.05.939 proje kod numarası ile destek sağlamıştır.

Çıkar çatışması (Conflict of interest)

Yazarlar olarak çalışma ile ilgili herhangi bir kişi veya kurumla çıkar çatışmasının bulunmadığını beyan ederiz.

Teşekkür (Acknowledgment)

Yazarlar, çimento deneylerinin ve analizlerinin yapılmasında destek sağlayan Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Komisyon Başkanlığına (Proje kod numarası: 2019.07.05.939) ve Ankara Baştaş Çimento Fabrikası çalışanlarına ve yöneticilerine teşekkür ederler.

KAYNAKÇA

- [1] Singh, N. B., & Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 237, 117455.
- [2] Vijayan, D. S., Devarajan, P., & Sivasuriyan, A. (2023). A review on eminent application and performance of nano based silica and silica fume in the cement concrete. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 103105.
- [3] Kim, K. W., Park, K. T., Ates, F., Kim, H. G., & Woo, B. H. (2023). Effect of pretreated biomass fly ash on the

- mechanical properties and durability of cement mortar. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01754.
- [4] Yuan, L., Qiu, J., Guo, Z., Zhang, S., Wan, X., & Sun, X. (2023). Microscale and macroscale strength behaviors of blast furnace slag-cement based materials: Modeling and analysis. *Construction and Building Materials*, 376, 131016.
- [5] Koçak, Y. (2017). The effects of super plasticizer and trass on the cement hydration. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(3), 184-192, 2017.
- [6] Vissa, S. V. K., Massion, C., Lu, Y., Bunger, A., & Radonjic, M. (2022). Zeolite-Enhanced Portland Cement: Solution for Durable Wellbore-Sealing Materials. *Materials*, 16(1), 30.
- [7] Yi, W., Xiling, Z., Jinglin, Y., Wenxuan, W., & Tian, T. (2023). A comprehensive performance evaluation of the cement-based expanded perlite plastering mortar. *Science of The Total Environment*, 858, 159705.
- [8] Pınarcı, İ., & Kocak, Y. (2022). Hydration mechanisms and mechanical properties of pumice substituted cementitious binder. *Construction and Building Materials*, 335, 127528.
- [9] Gonçaves, M. R. F., & Bergmann, C. P. (2007). Thermal insulators made with rice husk ashes: Production and correlation between properties and microstructure. *Construction and Building Materials*, 21(12), 2059-2065.
- [10] Farooq, F., Jin, X., Javed, M. F., Akbar, A., Shah, M. I., Aslam, F., & Alyousef, R. (2021). Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review. *Construction and Building Materials*, 306, 124762.
- [11] Anto, G., Athira, K., Nair, N. A., Sai, T. Y., Yadav, A. L., & Sairam, V. (2022). Mechanical properties and durability of ternary blended cement paste containing rice husk ash and nano silica. *Construction and Building Materials*, 342, 127732.
- [12] Kuffner, B. H. B., Tambara Júnior, L. U. D., Marangon, E., & Lübeck, A. (2023). Development of self-compacting concretes using rice husk or fly ashes and different cement types. *REM-International Engineering Journal*, 76, 9-19.
- [13] Xia, Y., Liu, M., Zhao, Y., Guo, J., Chi, X., Du, J., ... & Shi, D. (2023). Hydration mechanism and environmental impacts of blended cements containing co-combustion ash of sewage sludge and rice husk: Compared with blended cements containing sewage sludge ash. *Science of The Total Environment*, 864, 161116.
- [14] Nie, Y., Lu, J., Liu, Z., Meng, D., He, Z., & Shi, J. (2022). Mechanical, water resistance and environmental benefits of magnesium oxychloride cement incorporating rice husk ash. *Science of The Total Environment*, 849, 157871.
- [15] Li, C., Jiang, D., Li, X., Lv, Y., & Wu, K. (2023). Autogenous shrinkage and hydration property of cement pastes containing rice husk ash. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01943.
- [16] Givi, A. N., Rashid, S. A., Aziz, F. N. A., & Salleh, M. A. M. (2010). Contribution of rice husk ash to the properties of mortar and concrete: a review. *Journal of American science*, 6(3), 157-165.
- [17] Hwang C. L., Chandra S., (1996). *Waste Materials Used in Concrete Manufacturing*. Noyes Publications, New Jersey, U.S.A.
- [18] Hwang C. L., Wu D. S., (1989). *Properties of Cement Paste Containing Rice Husk Ash*. American Concrete Institute, 114: 733-762.
- [19] TS EN 197-1. Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları, Ankara, 2012.
- [20] Nazari, A., Khalaj, G., & Riahi, S. (2013). ANFIS-based prediction of the compressive strength of geopolymers with seeded fly ash and rice husk-bark ash. *Neural Computing and Applications*, 22, 689-701.

- [21] Li, C., Mei, X., Dias, D., Cui, Z., & Zhou, J. (2023). Compressive Strength Prediction of Rice Husk Ash Concrete Using a Hybrid Artificial Neural Network Model. *Materials*, 16(8), 3135.
- [22] Al-Hashem, M. N., Amin, M. N., Raheel, M., Khan, K., Alkadhim, H. A., Imran, M., ... & Iqbal, M. (2022). Predicting the Compressive Strength of Concrete Containing Fly Ash and Rice Husk Ash Using ANN and GEP Models. *Materials*, 15(21), 7713.
- [23] Amin, M. N., Iqtidar, A., Khan, K., Javed, M. F., Shalabi, F. I., & Qadir, M. G. (2021). Comparison of machine learning approaches with traditional methods for predicting the compressive strength of rice husk ash concrete. *Crystals*, 11(7), 779.
- [24] Li, Q., & Song, Z. (2023). Prediction of compressive strength of rice husk ash concrete based on stacking ensemble learning model. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135279.
- [25] TS EN 196-3. Çimento deney metotları- Bölüm 3: Priz süresi ve hacim genleşme tayini. Türk Standartları, Ankara, 2010.
- [26] 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.
- [27] Temel R. (2017). Uçak Kara Kutusundan Alınan Veriler Kullanılarak Hücüm Açısı Ve Mach Sayısının YSA Ve ANFIS İle Tahmini. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- [28] Aali, K. A., Parsinejad, M., & Rahmani, B. (2009). Estimation of Saturation Percentage of Soil Using Multiple Regression, YSA, and ANFIS Techniques. *Computing and Information Science*, 2(3), 127-136.
- [29] Jang, J. S. (1996, September). Input selection for ANFIS learning. In *Proceedings of IEEE 5th International Fuzzy Systems (Vol. 2, pp. 1493-1499)*. IEEE.
- [30] Bhavani Chowdary, T., & Ranga Rao, V. (2021). Design and Analysis of Lightweight Alkali-Activated Slag and Fly Ash Geopolymer Mortars using ANFIS-SSO. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-14.
- [31] Sakthivel, P. B., Ravichandran, A., & Alagumurthi, N. (2016). Modeling and prediction of flexural strength of hybrid mesh and fiber reinforced cement-based composites using artificial neural network (ANN). *GEOMATE Journal*, 10(19), 1623-1635.