

(Araştırma Makalesi)

Silis Dumanı İkameli Çimentoların Priz Sürelerinin ANFIS ile Tahmini**Yasemin Erdem¹, Yılmaz KOÇAK^{*2}**¹Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 81600, Düzce,ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-8640-1758>²Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 81600, Düzce,ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-5281-5450>**Anahtar Kelimeler:**Priz süresi,
Portland çimento,
Silis dumanı,
ANFIS

Özet: Bu çalışma, silis dumanı ikameli çimento hamurlarının priz sürelerinin ANFIS ile tahmin edilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde, Portland çimentosuna %0, %2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarında silis dumanı ikame edilerek elde edilmiş çimento hamurlarının priz başlama ve priz sonu süreleri tespit edilmiştir. İkinci bölümde, deneysel sonuçlarla Üçgen ve Gauss üyelik fonksiyonlarıyla iki model oluşturularak priz başlama ve priz sonu süreleri tahmin edilmiştir. Üçüncü bölümdeyse tahmin sonuçlarının güvenilirliği belirtebilmek için R^2 , MAPE ve RMSE istatistiksel yöntemlerinden yararlanılmıştır. Sonuç olarak R^2 , MAPE ve RMSE değerleri priz başlama ve priz sonu sürelerine göre sırasıyla; Üçgen üyelik fonksiyonu için 0.9882-0.9778, 0.015156-0.018960 ve 3.8027-5.8689, Gauss üyelik fonksiyonu için ise 0.9882-0.9778, 0.015226-0.018956 ve 3.8006-5.8689 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre hem priz başlama ve hem de priz sonu sürelerinin Üçgen ve Gauss üyelik fonksiyonlarıyla oluşturulan modellerle “çok iyi” veya “yüksek doğruluk derecesinde” tahmin edilebileceği ifade edilebilir.

(Research Article)

Prediction of the Effect of Silica Fume on Portland Cement Setting Times by ANFIS**Keywords:**Setting time,
Portland cement,
Silica fume,
ANFIS

Abstract: This study was carried out to predict the setting times of silica fume substituted cement pastes using ANFIS. In the first part of the study, the initial and final setting time of cement pastes obtained by substituting silica fume into Portland cement at 0%, 2.5%, 5%, 7.5% and 10% were determined. In the second part, two models with Triangular and Gaussian membership functions were created with the experimental results and the initial and final setting time were predicted. In the third part, R^2 , MAPE and RMSE statistical methods were utilized to indicate the reliability of the prediction results. As a presentation, R^2 , MAPE and RMSE values were determined as 0.9882-0.9778, 0.015156-0.018960 and 3.8027-5.8689 for Triangular membership function and 0.9882-0.9778, 0.015226-0.018956 and 3.8006-5.8689 for Gaussian membership function, respectively. According to these results, it can be stated that both initial setting time and final setting time can be predicted "very well" or "with a high degree of accuracy" with the models constructed with Triangle and Gaussian membership functions.

1. GİRİŞ

Portland çimentosu (PÇ) küresel endüstriyel enerjinin yaklaşık %5'ini kullanmakta ve bu üretim sürecinde kalker, kil, marn gibi çok miktarda hammadde tüketilmektedir [1]. Ayrıca PÇ, yüksek düzeyde karbondioksit (CO₂) emisyonuna sahiptir (1 ton çimento

0.8-1 ton CO₂ üretir). Dolayısı ile atmosfere büyük miktarda CO₂ salınımı iklim değişikliğine yol açtığı için PÇ'nin çevre dostu bir malzeme olmadığı düşünülmektedir [2]. PÇ üretimindeki klinker miktarını azaltmak ve çimentonun harçlarının ve betonun dayanım ve dayanıklılık gibi özelliklerini iyileştirmek için gerek doğal (pomza, zeolit, diatomit, tras gibi) [3-6] gerek yapay (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin, prinç

kabuğu külü gibi) [7-10] mineral katkıları yoğun olarak kullanılmaktadır.

Yapay mineral katkıları içerisinde yer alan silis dumanı (SD) çimento ve beton özelliklerindeki gelişmelere olumlu katkılarından dolayı üzerinde yoğun araştırmaların yapıldığı bir malzemedir. SD, silisyum metali veya ferrosilisyum alaşımlarının elektrik arkı fırınlarındaki imalatından ortaya çıkan bir yan üründür ve mikro silika, uçucu silika veya silis tozu olarak da bilinmektedir. SD, yüzey alanı 13000 ile 30000 m²/kg arasında olan çok ince camsı parçacıklardan oluşan gri renkli bir malzemedir [11]. SD amarf yapıya sahip olup, ortalama büyüklüğü 0.1 µm ile 0.3 µm arasında değişen çok ince küresel şekilli tanelerden oluşmaktadır [12]. SD'nin bu çok ince küresel tane şekli ve yüksek silika içeriği, SD ile üretilen betonların geçirgenliğini azaltmakta ve bu özelliği sayesinde betonun korozyona karşı direncini artırmaktadır. Ayrıca betonun basınç dayanımı ve aşınma direnci gibi özelliklerini de artırmaktadır [11, 13].

SD'nin çimento özelliklerine etkisinin araştırıldığı standart çimento deneylerinden biri de priz süresi deneyleridir. Çimento ile suyun birleşimi esnasındaki kimyasal reaksiyon sonucunda meydana gelen çimento hamurundaki sertleşme, farklı aşamalarda gerçekleşmektedir. Dolayısı ile priz başlangıcı ve priz sonu sürelerinin standartlar içerisinde yer alması önemlidir. Priz başlangıcının çok kısa bir sürede gerçekleşmesi; taze betonun karılması, yerine götürülmesi, yerleştirilmesi, sıkıştırılması, yüzeyinin düzeltilmesi gibi işlemlerde sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Bu sorunlar da betonun dayanım ve dayanıklılık gibi özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Priz sonu süresi istenen süreden daha uzun olduğunda ise, betonun dayanımı daha uzun sürelerde gerçekleşmektedir. Dolayısı ile gerek betonun korunması gerekse kalıpların alınması için gereken süreler daha uzun olmaktadır. Bu yüzden de standartlar, çimento tiplerine göre minimum priz başlama süresini sınırlamaktadır [14]. Bu sürelerin istenen şekilde gerçekleşmesi için gerek kimyasal katkıları gerekse silis dumanı gibi mineral katkıları çimento veya betona belirli oranlarda katılmaktadır.

Ancak standart çimento deneylerinden olan basınç dayanımı ve priz sürelerinin belirlenmesi zaman alıcı, zahmetli ve enerji tüketimi gerektiren çalışmalardır. Bu nedenle araştırmacılar, mineral katkıların beton veya çimento özelliklerine farklı etkilerini tahmin edebilmek için farklı yapay zeka tabanlı modeller geliştirmeye çalışmaktadır. Bu uygulamalardan biri de uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) olarak dikkat çekmektedir.

Bu çalışmalardan birinde Gevenç ve Koçak (2022), pomza ve/veya diatomit ile ikame ettikleri toplam 7 tip çimento harcının basınç dayanımlarını ANFIS ile tahmin etmişlerdir. Bu modellerin performansı R², MAPE ve RMSE ile karşılaştırılmış ve bu istatistiksel verilerin sırasıyla 0.96, 6.66 ve 2.55 olduğunu belirlenmiştir. Elde ettikleri bu değerlere göre geliştirdikleri modelin güçlü ve

faydalı bir model olduğunu ve ANFIS ile oldukça iyi basınç dayanımı tahminlerinin yapılabileceğini belirtmişlerdir [15]. Bir diğer çalışmada Ozcan vd. (2018), zeolit ve/veya diatomit içerikli yedi farklı karışımından oluşan betonların basınç dayanımlarını ANN ve ANFIS ile tahmin etmeye çalışmışlardır. Sonuçları, R², MAPE ve RMSE ile karşılaştırmışlar ve test aşamasında bu değerleri YSA modeli için sırasıyla 0.9976, 0.0042 ve 0.3521, ANFIS modeli için ise 0.9879, 0.0106 ve 0.7827 olarak elde etmişlerdir. Bu sonuçları dikkate alarak her iki uzman sistem modelinin de anlamlı sonuçlar verdiğini ve çimento harçları ve betonların hazırlanması sırasında hem zaman hem de maliyet açısından fayda sağlayabileceğini belirtmişlerdir [16]. Farklı bir çalışmada Koçak vd. (2023), yüksek fırın cürufu ile ikame ettikleri çimento harçlarının eğilme dayanımlarını bulanık mantık ve ANFIS ile tahmin etmişlerdir. Bu iki modelin performanslarını kıyaslamak için korelasyon katsayısından yararlanmışlar ve bulanık mantık için R² değerini 0.76, ANFIS için ise 0.90 olarak elde etmişlerdir. Bu verilere göre her iki modelin çimento teknolojisindeki eğilme dayanımlarının tahmininde başarıyla kullanılabileceğini, ancak ANFIS'in daha iyi olduğunu ve bu modelin kullanılmasının daha yararlı olacağını ifade etmişlerdir [17]. Gülbandır vd. (2023) gerçekleştirdikleri çalışmada ise, Portland çimentosu içerisine %0, %2.5, %5, %7.5, %10, %12.5 ve %15 oranlarında pirinç kabuğu külü ikame etmiş ve Gauss ile Üçgen üyelik fonksiyonları kullanılarak oluşturdukları iki ANFIS modeli ile bu çimentoların priz başlama ve priz sonu sürelerini tespit etmeye çalışmışlardır. Sonuçlarının güvenilirliğinin anlaşılabilmesi amacıyla da, R², MAPE ve RMSE değerlerini belirlemişlerdir. Priz başlama ve priz sonu sürelerine göre R², MAPE ve RMSE değerlerini sırasıyla Gauss üyelik fonksiyonlarıyla 0.9912-0.9909, 0.0167-0.0144 ve 5.6537-5.8693; Üçgen üyelik fonksiyonlarıyla ise 0.9957-0.9939, 0.0119-0.0127 ve 3.9661-4.8125 olarak tespit etmişlerdir. İstatistiksel endekslerin sonuçlarına göre, priz başlama ve priz sonu süreleri açısından bu iki üyelik fonksiyonuyla gerçek değerlere çok yakın sonuçlar elde edildiğini ve priz sürelerini tahmin etmek için güçlü modeller olduklarını belirtmişlerdir [18]. Bu çalışmaların dışında çimento ve beton özelliklerini tahmin etmek üzere ANFIS ile oluşturulan bir çok modelin olduğu ve bu modellerle başarılı sonuçlar elde edildiği literatür incelemesinde görülmektedir [19-24].

Bu çalışmada, silis dumanı ikameli çimento hamurlarının priz süreleri ANFIS ile tahmin edilmeye çalışılmaktadır. Çalışmanın ilk aşamasında, %0, %2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarında Portland çimentosu içerisine SD ikame edilmiş toplam 5 tip çimento hamurunun priz başlama ve priz sonu süreleri belirlenmiştir. İkinci aşamada ise, Üçgen ve Gauss üyelik fonksiyonları ile iki model oluşturulmuş ve bu çimentolarla hazırlanmış hamurların priz başlama ve priz sonu süreleri tahmin edilmiştir. Son aşamada ise tahmin edilen bu sonuçların güvenilirliğini belirleyebilmek için R², MAPE ve RMSE istatistiksel yöntemleri kullanılmış ve elde edilen sonuçlar ilgili bölümlerde tartışılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

Bağlayıcı malzeme olarak “LİMAK ANKA” çimento fabrikasında (Ankara) TS EN 197-1 standardı esas alınarak üretimi gerçekleştirilen CEM I 42.5 R tip (Portland çimento) çimento kullanılmıştır [14]. Mineral katkı olarak kullanılan SD, Dost Kimya isimli bir şirketten tedarik edilmiştir. Çimento hamurlarının hazırlanmasında kullanılan su, Ankara iline ait şehir şebeke suyudur. PÇ ve SD'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1'den izlenmektedir.

Tablo 1. PÇ ve SD'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Malzeme	PÇ	SD
Kimyasal özellikler, %		
SiO ₂	19.51	91.60
Al ₂ O ₃	4.95	0.73
Fe ₂ O ₃	2.85	1.23
CaO	62.67	0.59
MgO	2.24	1.08
SO ₃	2.86	0.11
Na ₂ O	0.15	0.50
K ₂ O	0.72	1.31
Cl	0.0328	0.10
Kızdırma kaybı	3.75	2.85
Fiziksel özellikler		
Özgül ağırlık, g/cm ³	3.13	2.13
Özgül yüzey (Blaine), cm ² /g	3233	14465

2.2. Yöntem

Çalışmada, %0, %2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarında SD ikamesi ile elde edilen beş tip çimento için belirlenen isimler Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Çimento isimleri

No	Çimento	İsmi
1	%0 SD ikameli çimento (PÇ)	R
2	%2.5 SD ikameli çimento	SD1
3	%5 SD ikameli çimento	SD2
4	%7.5 SD ikameli çimento	SD3
5	%10 SD ikameli çimento	SD4

Çimento hamurlarının priz süreleri, TS EN 196-3 esasları dikkate alınarak ve 3'er deney gerçekleştirilerek tespit edilmiştir [25]. Priz başlama ve priz sonu süreleri, Ankara ilinde bulunan LİMAK ANKA Çimento fabrikasında Vicat halkası ve iğnesi kullanılarak, sıcaklığı 20 °C ve bağıl nemi %65 olan bir laboratuvar ortamında belirlenmiştir.

3. UYARLAMALI AĞ TABANLI BULANIK ÇIKARIM SİSTEMİ

ANFIS, diğer klasik yaklaşımların başarısız olduğu karmaşık doğrusal olmayan problemlerle uğraşırken, insan muhakemesini simüle eden Takagi-Sugeno bulanık sistemine dayanan bir sinir ağıdır. ANFIS, bulanık çıkarım sistemleri ve sinir ağlarından oluşan iki ayrı tekniği birleştirerek daha verimli üyelik fonksiyonları üretmek için tahmin modelinin verilerinin girilmesiyle

kural sistemleri oluşturma yöntemi olarak kullanılan bulanık bir modeldir. ANFIS'in üyelik fonksiyonu parametreleri Yapay sinir ağlarına dayalı yöntemlerin kullanımıyla ayarlanır. ANFIS'te akıl yürütme adımları bulanık çıkarım sistemi ile gerçekleştirilmekte ve bir mühendislik sisteminin girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki bilgiler IF-THEN bulanık kuralları olarak tanımlanmakta ve Denklem (1) ve (2)'deki gibi gösterilmektedir [26-28].

Kural 1:

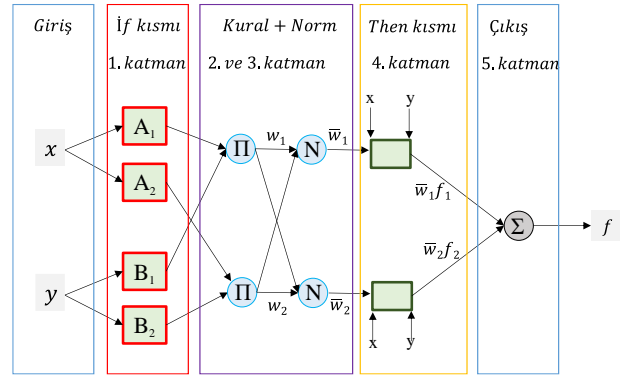
$$IF x \text{ is } A_1, \text{ and } y \text{ is } B_1 \text{ THEN } f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1 \quad (1)$$

Kural 2:

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

Kural 1 ve 2'de A_i ve B_i, sırasıyla x ve y girişleri için üyelik fonksiyonlarını temsil etmektedir. f₁ ve f₂ çıkış fonksiyonunu belirtmektedir. p_i, q_i ve r_i sonuç parametrelerini ifade etmekte ve her kural için bir çıktı değeri sağlanmaktadır [26].

İki giriş değişkeni olan x ve y için bir ANFIS algoritmasının temel mimarisi Şekil 1'de gösterilmektedir [26, 28].



Şekil 1. ANFIS algoritmasının temel mimarisi

Şekil 1'de örneklenen ANFIS mimarisi, 5 temel katmandan oluşmaktadır [26, 28].

1. Katman: Bulanıklaştırma katmanı olarak ifade edilen bu katmandaki nöronlar, öncül parametreleri içeren uyarlanabilir düğümler olarak kabul edilmektedir.

2. Katman: Uygulama katmanı olarak adlandırılan bu katmandaki nöronlar II olarak etiketlenir ve bir daire ile gösterilir. Çıkış düğümü, gelen sinyallere göre oluşturulur. Çıkış düğümü w_i, bir kuralın ateşleme gücünü gösterir.

3. Katman: Normalleştirme katmanı olarak adlandırılan bu katmandaki her nöron, bir daire ile tanımlanacak ve N olarak etiketlenecek sabit bir nörondur. Çıktı, i'inci kuralın ateşleme gücünün, tüm kuralların ateşleme gücünün toplamına oranına göre elde edilir.

4. Katman: Arındırma katmanı olarak ifade bu katmanda bulunan nöronlar, aslında sonuç parametrelerini içeren adaptif nöronlardır.

5. Katman: Birleştirme katmanı olarak isimlendirilen bu katman, tüm girdileri toplayan tek bir nöron içermektedir.

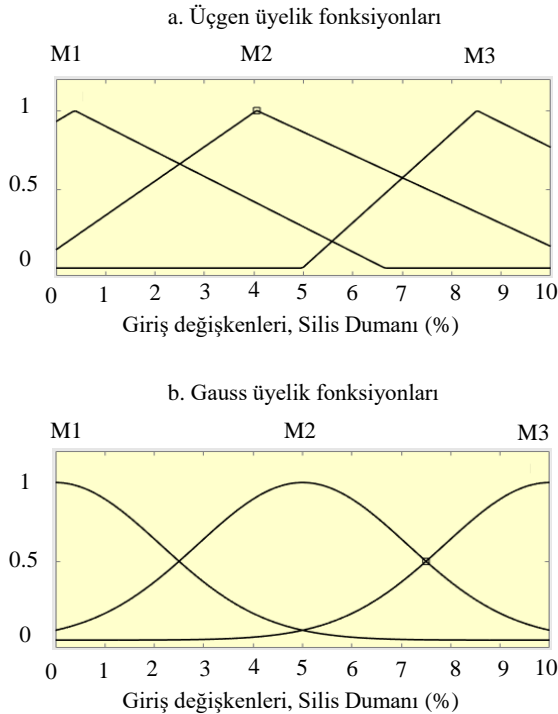
ANFIS ile ilgili daha fazla bilgi için farklı kaynaklardan yararlanılabilir [29-32].

4. ANFIS TASARIM VE MODEL PARAMETRELERİ

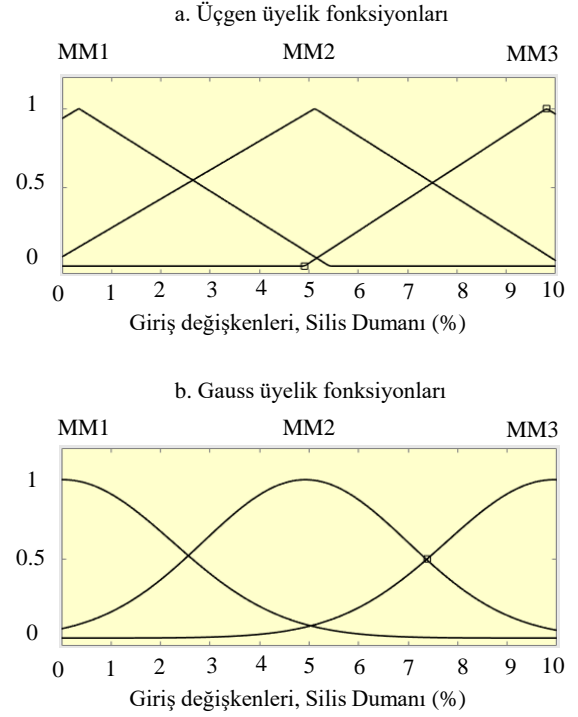
SD ikameli çimento hamurlarının priz başlama ve priz sonu sürelerinin tahmininde MATLAB programında yer alan ANFIS editöründeki “Üçgen” ve “Gauss” üyelik fonksiyonlarından yararlanılmıştır. Priz başlama ve priz sonu süreleri için kullanılan Üçgen ve Gauss üyelik fonksiyonlarının parametreleri Tablo 3’te, giriş değişkenlerinin üyelik fonksiyonları ise sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Üçgen ve Gauss üyelik fonksiyonlarının priz başlama ve priz sonu sürelerinin parametreleri

Parametre	Üçgen	Gauss
Düğüm sayısı	16	16
Eğitim veri çifti sayısı	15	15
Veri çifti kontrol sayısı	0	0
Toplam bulanık kural sayısı	3	3
Doğrusal parametre sayısı	3	3
Doğrusal olmayan parametre sayısı	6	6
Toplam parametre sayısı	9	9



Şekil 2. Üçgen ve Gauss için priz başlama sürelerinin giriş değişkenlerinin üyelik fonksiyonları



Şekil 3. Üçgen ve Gauss için priz sonu sürelerinin giriş değişkenlerinin üyelik fonksiyonları

4. BULGULAR

Çalışmada kullanılan %0, 2.5, 5, 7.5 ve 10 oranlarında SD ikamesi ile elde edilen beş farklı çimento hamurunun deneylerden ve modellerden belirlenen priz başlama ve priz sonu süreleri sırasıyla Tablo 4 ve Tablo 5’te gösterilmiştir.

Tablo 4. Priz başlama süreleri (dakika)

Numune no	Çimento hamurları				
	R	SD1	SD2	SD3	SD4
1	155	175	195	240	255
2	155	180	200	235	245
3	150	185	200	235	240
Ortalama	153	180	198	237	247
Endeks, %	100	117	129	154	161
Üçgen	153	180	199	237	247
Max. Hata, dakika	3	5	4	-3	7
Hata, %	2.0	2.8	2.0	1.3	2.8
Gauss	153	179	198	236	246
Max. Hata, dakika	3	-6	3	-4	-9
Hata, %	2.0	-3.4	1.5	-1.7	-3.7

Tablo 5. Priz sonu süreleri (dakika)

Numune no	Çimento hamurları				
	R	SD1	SD2	SD3	SD4
1	210	240	280	300	330
2	220	250	290	310	320
3	220	260	290	315	320
Ortalama	217	250	287	308	323
Endeks, %	100	107	119	133	163
Üçgen	217	250	287	308	323
Max. Hata, dakika	7	10	7	8	-7
Hata, %	3.2	4.0	2.4	2.6	-2.2
Gauss	217	250	287	308	323
Max. Hata, dakika	7	10	7	8	-7
Hata, %	3.2	4.0	2.4	2.6	-2.2

DeneySEL sonuçlar, SD ikameli çimento hamurlarının tümünde priz başlama ve priz sonu sürelerinin arttığını göstermektedir (Tablo 4 ve Tablo 5). Tablo 4 ve 5’de yer alan veriler, en küçük priz başlama ve priz sonu sürelerinin sırası ile 153 ve 217 dakikayla referans çimento hamurunda; en büyük sürelerin ise %10 SD ikameli SD4 isimli çimento hamurunda olduğunu göstermektedir. Priz başlama süreleri referans çimento hamuruyla kıyaslandığında, SD1, SD2, SD3 ve SD4 isimli çimento hamurlarında sırasıyla %17, %29, %54 ve %61 oranlarında artmaktadır (Tablo 4). Priz sonu süreleri ise, SD1, SD2, SD3 ve SD4 isimli çimento hamurlarında sırasıyla %7, %19, %33 ve %63 oranlarında artmaktadır (Tablo 5). Priz başlama süreleri bir bütün olarak değerlendirildiğinde, TS EN 197-1 [14] standardı esasları çerçevesinde sınırlanan 42.5 MPa çimento dayanım sınıfı için minimum süre olan 60 dakikanın ve 32.5 MPa dayanım sınıfı için minimum süre olan 75 dakikanın üzerinde olduğu ve tüm çimentolar için standartları sağladığı söylenebilir.

Çalışmada tercih edilen Üçgen ve Gauss üyelik fonksiyonlarıyla elde edilen priz sürelerinin, deneylerden elde edilen priz sürelerine çok yakın olduğu ifade edilebilir. Modellerdeki maksimum hata oranları değerlendirilirken, her çimento hamuru için belirlenen üç sonuç arasında tahmin değerine en uzak süre esas alınmıştır. Buna göre Üçgen üyelik fonksiyonuyla belirlenen priz başlama sürelerindeki en büyük farkın %2.8 hata ile SD1 ve SD4 isimli (Tablo 4), priz sonu sürelerindeki en büyük farkın ise %4.0 hata ile SD4 isimli (Tablo 5) çimento hamurunda olduğu görülmektedir. Gauss üyelik fonksiyonuyla belirlenen priz başlama sürelerindeki en büyük farkın %3.7 hata ile SD1 isimli (Tablo 4), priz sonu sürelerindeki en büyük farkın ise %4.0 hata ile yine SD1 isimli (Tablo 5) çimento hamurunda olduğu izlenmektedir. Dolayısıyla ile hem Üçgen hem de Gauss üyelik fonksiyonlarıyla tahmin edilen priz başlama ve priz sonu sürelerinin çok küçük hata oranlarıyla belirlenebildiği söylenebilir.

Ayrıca Üçgen üyelik fonksiyonuyla oluştural model ile tahmin edilen priz başlama ve priz sonu süreleri için en kötü tahminin bile sırasıyla %97.2 ve %96.0 doğrulukla olduğu; Gauss üyelik fonksiyonuyla oluştural model ile tahmin edilen priz başlama ve priz sonu süreleri için en kötü tahminin bile sırasıyla %96.3 ve %96.0 doğrulukla olduğu belirlenmiştir. Tahmin süreleri ile ortalama priz başlama ve priz sonu süreleri kıyaslandığında ise neredeyse gerçek sonuçlara benzer bir tahmin yapıldığı ifade edilebilir.

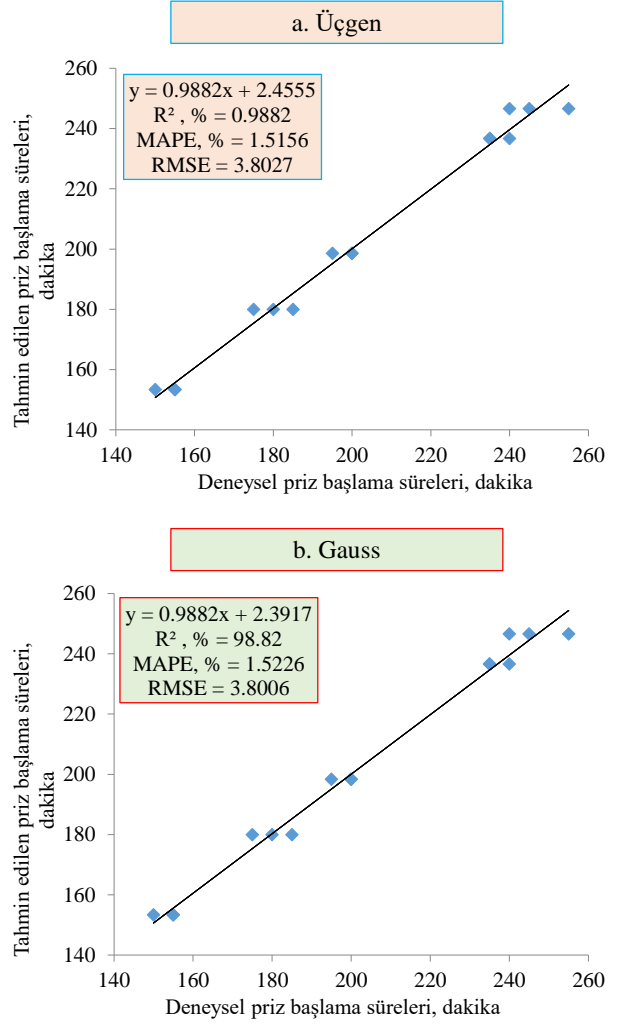
Deneyler ile modellerden elde edilen priz sürelerinin tahminindeki güvenilirliğin belirlenmesi için regresyon analizi (R^2), ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) ve hata kareleri ortalamasının karekökü (RMSE) istatistiksel yöntemlerinden yararlanılmıştır. Bunlar sırasıyla Denklem (3), (4) ve (5)’de gösterilmiştir [16, 26, 30].

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

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

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

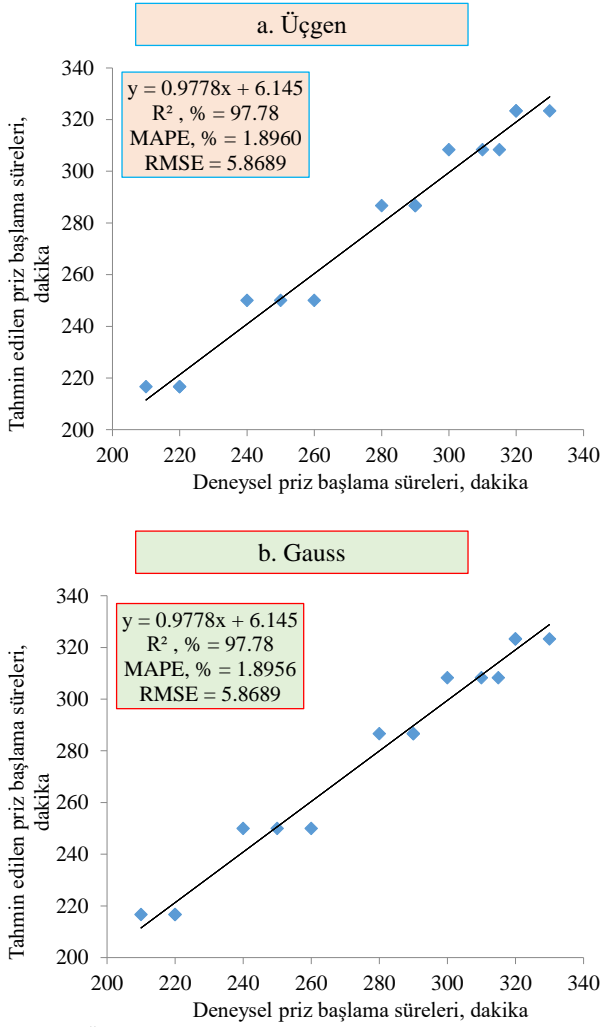
Üçgen ve Gauss üyelik fonksiyonları ile tahmin edilen priz başlama ve priz sonu sürelerinin güvenilirliğinin belirlenmesi için Denklem (3), (4) ve (5)’ten hesaplanan R^2 , MAPE ve RMSE değerleri sırasıyla Şekil 4 (a, b) ve Şekil 5 (a, b)’de verilmiştir.



Şekil 4. Üçgen ve Gauss üyelik fonksiyonları ile tahmin edilen priz başlama sürelerinin karşılaştırılması

Priz başlama sürelerine ait R^2 , MAPE ve RMSE değerleri sırasıyla Üçgen üyelik fonksiyonu için 0.9882, 0.0151 ve 3.8027 olarak belirlenirken (Şekil 4.a), Gauss üyelik fonksiyonu için 0.9882, 0.0152 ve 3.8006 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.b). Bu verilere göre modellerdeki R^2 'nin en küçük değeri olan 0.9882 ile 1'e çok yakın değerde olduğu, dolayısıyla ile tahmin edilen priz başlama süresinin doğruyu kuvvetli bir şekilde yansıttığı ifade edilebilir. MAPE için hesaplanan değerlerin %10'un altında olması ise priz başlama sürelerinin tahmin sonuçlarının "çok iyi" ya da "yüksek doğruluk derecesine sahip" olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla ile hem R^2 hem de MAPE verilerine göre priz başlama sürelerinin, her iki üyelik fonksiyonu için de en az %98 doğrulukla tahmin edilebileceği görülmektedir. RMSE değerine göre her iki modelin sıfır değerine yakınlığı, tahmin sonuçlarının iyi

olduğunu göstermektedir. Dolayısı ile istatistiksel endekslere göre tahmin edilen priz başlama sürelerinin gerçek değerlere çok yakın olduğu göstermektedir.



Şekil 5. Üçgen ve Gauss üyelik fonksiyonları ile tahmin edilen priz sonu sürelerinin karşılaştırılması

Priz sonu sürelerinin R^2 , MAPE ve RMSE sonuçları, her iki üyelik fonksiyonları için 0.9778, 0.0189 ve 5.8689 olarak hesaplanmıştır (Şekil 5). Priz sonu süreleri, priz başlama sürelerine göre istatistiksel olarak nispeten daha kötü tahmin sonuçları olduğunu düşündürse bile, bu değerlerin de çok iyi olduğu ve %97 doğrulukla tahmin sağlayabildiği belirtilebilir.

Bu modellerin etkinliğini değerlendirmek için sonuçlar, priz sürelerinin tahmini için yapılan çalışmalardan elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Yapılan bir çalışmada uçucu kül ve silis dumanının, Portland çimentosunun priz süresine etkisi, bulanık mantıkla tahmin edilmiş ve deney sonuçları ile bulanık mantık sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre priz başlama ve priz sonu süreleri için korelasyon katsayılarının (R^2) sırasıyla 0.96 ve 0.92 olduğu bildirilmiştir [33]. Bir diğer çalışmada yüksek fırın cürufu ve atık lastik tozunun Portland çimentosunun priz süresine etkileri bulanık mantık ile tahmin edilmiş ve R^2 değerleri Priz başlama süresi için 0.93, priz sonu süresi için ise 0.95 olarak belirlenmiştir [34]. Başka bir çalışmada ise Portland kompoze çimentosunun priz süresine metakaolin etkisini bulanık

mantıkla tahmin edilmeye çalışılmıştır. Oluşturulan modellerde elde edilen R^2 değeri priz başlama süresi için 0.985, priz sonu süresi için 0.969 olarak belirlenmiştir [35]. Bulanık mantıkla yapılan başka bir çalışmada, krom magnezit tuğla tozunun Portland çimentosunun priz başlama ve bitiş sürelerine etkisi araştırılmış ve R^2 değerleri priz başlama süresi için 0.92, priz sonu süresi için 0.89 olarak bulunmuştur [36]. Diğer bir çalışmada ise Portland çimentosu priz sürelerine pirinç kabuğu küllü etkisi ANFIS ile tahmin edilmiştir. Elde edilen priz başlama ve priz sonu sürelerinin R^2 , MAPE ve RMSE değerleri sırasıyla; gauss üyelik fonksiyonları için 0.9912-0.9909, 0.0167-0.0144 ve 5.6537-5.8693, üçgen üyelik fonksiyonları için ise 0.9957-0.9939, 0.0119-0.0127 ve 3.9661-4.8125 olarak bulunmuştur [18]. Dolayısı ile hem istatistiksel endekslere göre, hem de priz sürelerinin tahmini ile ilgili benzer çalışmalara göre tahmin edilen priz sürelerinin gerçek değerlere çok yakın olduğu ve her iki modelin de priz sürelerinin tahmininde başarıyla kullanılabileceği ifade edilebilir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, öncelikle CEM I 42.5 R tip Portland çimentosuna %0, %2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarında SD ikamesiyle elde edilmiş beş çimentonun priz başlama ve priz sonu süreleri 3'er deney yapılarak belirlenmiş, daha sonra ANFIS'e ait Üçgen ve Gauss üyelik fonksiyonlarıyla bu süreler tahmin edilmiştir. Elde edilen bulgulara dayanarak;

- Tüm çimento hamurlarında TS EN 197-1 standardı esasları çerçevesinde sınırlanan 42.5 MPa çimento dayanım sınıfı için minimum süre olan 60 dakikanın ve 32.5 MPa dayanım sınıfı için minimum süre olan 75 dakikanın üzerinde olduğu ve priz süresi açısından bir sorun olmadığı,
- Üçgen üyelik fonksiyonuna göre belirlenen en kötü tahminin priz başlama süresi için %97.2, priz sonu süresi için ise %96.0 doğrulukla elde edildiği,
- Gauss üyelik fonksiyonuna göre belirlenen en kötü tahminin priz başlama süresi için %96.3, priz sonu süresi için ise %96.0 doğrulukla elde edildiği,
- Priz başlama süresindeki R^2 , MAPE ve RMS değerlerinin; Üçgen üyelik fonksiyonu için sırasıyla 0.9882, 0.015156 ve 3.8027 olarak; Gauss üyelik fonksiyonu için ise sırasıyla 0.9882, 0.015226 ve 3.8006 olarak belirlendiği, bu nedenle de "yüksek doğruluk" veya "çok iyi" derecesinde tahmin sonuçları olarak değerlendirilebileceği,
- Priz sonu süresindeki R^2 , MAPE ve RMS değerleri; Üçgen üyelik fonksiyonu için sırasıyla 0.9778, 0.018960 ve 5.8689 olarak; Gauss üyelik fonksiyonu için ise sırasıyla 0.9778, 0.018956 ve 5.8689 olarak tespit edildiği, bu nedenle de "yüksek doğruluk" veya "çok iyi" derecesinde tahmin sonuçları olarak değerlendirilebileceği söylenebilir.

Bu sonuçlar bir bütün olarak değerlendirildiğinde her iki modelin de güçlü ve faydalı modeller olarak değerlendirilebileceği ve priz sürelerinin tahmininde başarıyla kullanılabileceği ifade edilebilir.

Etik Hususlar

Etik kurallara uyum

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

Finansman

Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Komisyon Başkanlığı, çimento deneyleri ve analizleri için 2024.06.05.1461 proje kod numarası ile destek sağlamıştır.

Çıkar çatışması

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

Teşekkür

Yazarlar, çimento deneyleri ve analizlerinin yapılmasında katkıda bulunan Ankara "LİMAK ANKA" Çimento Fabrikası çalışanlarına ve yöneticilerine ile Finansal destekleri için Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Komisyon Başkanlığına (Proje kod numarası: 2024.06.05.1461) teşekkürlerini sunarlar.

KAYNAKÇA

- [1] 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>
- [2] 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>
- [3] Dong, E., Yu, R., Fan, D., Chen, Z., & Ma, X. (2022). Absorption-desorption process of internal curing water in ultra-high performance concrete (UHPC) incorporating pumice: From relaxation theory to dynamic migration model. *Cement and Concrete Composites*, 133, 104659. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104659>
- [4] Lehner, P., & Hrabová, K. (2023). Evaluation of degradation and mechanical parameters and sustainability indicators of zeolite concretes. *Construction and Building Materials*, 371, 130791. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130791>
- [5] Kurtay, M., Gerengi, H., Kocak, Y., Chidiebere, M. A., & Yildiz, M. (2020). The potency of zeolite and diatomite on the corrosive destruction of reinforcing steel in 1 M HNO₃ environment. *Construction and Building Materials*, 236, 117572. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117572>
- [6] Kocak, Y. (2017). The effects of super plasticizer and trass on the cement hydration. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(3), 184-192. <https://dx.doi.org/10.5505/pajes.2016.80008>
- [7] Venkatasamy, V., Santhanam, M., Rao, B. P. C., Balakrishnan, S., & Kumar, A. (2024). Mechanical and durability properties of structural grade heavy weight concrete with fly ash and slag. *Cement and Concrete Composites*, 145, 105362. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105362>
- [8] Mardmomen, S., & Chen, H. L. R. (2023). Modeling the thermal and mechanical properties of early age concrete containing ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 401, 132902. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132902>
- [9] Kocak, Y. (2020). Effects of metakaolin on the hydration development of Portland-composite cement. *Journal of building engineering*, 31, 101419. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101419>
- [10] Das, S. K., Behera, N., Patro, S. K., Mustakim, S. M., Suda, Y., & Leklou, N. (2024). Effectiveness of rice husk ash-derived alkali activator in fresh, mechanical, and microstructure properties of geopolymer mortar at ambient temperature curing. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 13(2), 213-221. <https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2262465>
- [11] Khan, M. I., & Siddique, R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties. *Resources, Conservation and Recycling*, 57, 30-35.
- [12] Jain, B., & Sancheti, G. (2023). Influence of silica fume and iron dust on mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 409, 133910. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133910>
- [13] Song, H. W., Pack, S. W., Nam, S. H., Jang, J. C., & Saraswathy, V. (2010). Estimation of the permeability of silica fume cement concrete. *Construction and Building Materials*, 24(3), 315-321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.033>
- [14] TS EN 197-1. Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları, Ankara, 2012.
- [15] 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>
- [16] 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.
- [17] Koçak, B., Şahin, Y. İ., & Koçak, Y. (2023). Portland Çimentosunun Eğilme Dayanımına Yüksek Fırın Cürufu Etkisinin Bulanık Mantık ve ANFIS ile Tahmini. *Eskişehir Türk Dünyası Uygulama ve Araştırma Merkezi Bilişim Dergisi*, 4(1), 17-24. <https://doi.org/10.53608/estudambilisim.1227733>
- [18] Gülbandılar, 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>
- [19] 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>
- [20] 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>
- [21] Li, J., Yan, G., Abbud, L. H., Alkhalifah, T., Alturise, F., Khadimallah, M. A., & Marzouki, R. (2023). Predicting the shear strength of concrete beam through ANFIS-GA-PSO hybrid modeling. *Advances in Engineering Software*, 181, 103475. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2023.103475>

- [22] 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>
- [23] Keshavarz, Z., & Torkian, H. (2018). Application of ANN and ANFIS models in determining compressive strength of concrete. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, 2(1), 62-70. <https://doi.org/10.22115/SCCE.2018.51114>
- [24] 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>
- [25] TS EN 196-3. Çimento deney metotları- Bölüm 3: Priz süresi ve hacim genleşme tayini. Türk Standartları, Ankara, 2010.
- [26] 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>
- [27] 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>
- [28] 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>
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Jang, J. S. (1996, September). Input selection for ANFIS learning. In *Proceedings of IEEE 5th International Fuzzy Systems (Vol. 2, pp. 1493-1499)*. IEEE.
- [32] 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. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00702-y>
- [33] Gulbandilar, E., & Kocak, Y. (2013). Prediction of the effects of fly ash and silica fume on the setting time of Portland cement with fuzzy logic. *Neural Computing and Applications*, 22, 1485-1491. <https://doi.org/10.1007/s00521-012-1049-4>
- [34] Kocak, Y., Gulbandilar, E., & Alpaslan, L. (2015). Prediction the effects of blast furnace slag and waste tire rubber powder on the setting time of Portland cement with fuzzy logic. *Materials and Methods Technology*, 9, 298-307.
- [35] Güvenç, U., Koçak, B., & Koçak, Y. (2021). Portland Kompoze Çimentosunun Priz Süresine Metakaolin Etkisinin Bulanık Mantıkla Tahmini. *Eskişehir Türk Dünyası Uygulama ve Araştırma Merkezi Bilişim Dergisi*, 2(2), 29-34.
- [36] Özgan, E., & Yıldız, K. (2009). Krom Magnezit Tuğla Tozunun Portland Çimentosunun Priz Başlama Ve Bitiş Sürelerine Etkisinin Bulanık Mantıkla Tahmini. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(2), 257-264.