

(Araştırma Makalesi)

## Portland Çimentosunun Eğilme Dayanımına Yüksek Fırın Cürufu Etkisinin Bulanık Mantık ve ANFIS ile Tahmini

Burak KOÇAK\*<sup>1</sup>, Yusuf İslam Şahin<sup>2</sup>, Yılmaz KOÇAK<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 81600, Düzce, ORCID No: 0000-0002-8640-1758

<sup>2</sup>Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 81600, Düzce, ORCID No: 0000-0003-2378-2546

<sup>3</sup>Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 81600, Düzce, ORCID No: 0000-0002-5281-5450

### Anahtar Kelimeler:

Bulanık mantık,  
ANFIS,  
Çimento,  
Eğilme dayanımı,  
Yüksek fırın cürufu.

**Özet:** Bu çalışmada, yüksek fırın cürufu (YFC) ikameli çimento harç numunelerinin eğilme dayanımlarının tahmini için bulanık mantık ve uyarlamalı ağı tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) modelleri geliştirilmiştir. Bu amaçla, Portland çimentosuna %0, 5, 10, 15 ve 20 oranlarıyla yüksek fırın cürufu ikame edilerek toplam 5 çimento üretilmiştir. Bu çimentolar ile üretilen harçların eğilme dayanımları standart çimento testleriyle 2, 7, 28 ve 90. hidrasyon günlerinde belirlenmiştir. Bunun yanı sıra YFC ikameli harçların eğilme dayanım sonuçlarını tahmin etmek için hem bulanık mantık hem de ANFIS için üçgen üyelik fonksiyonu kullanılarak tahmin modelleri oluşturulmuştur. Daha sonra, bu tahmin sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen verilere göre, çimento harç numunelerinin eğilme dayanımlarının bulanık mantık ve ANFIS için korelasyon katsayıları sırasıyla 0.76 ve 0.90 tespit edilmiştir. Tespit edilen veriler, deney sonuçlarıyla özellikle ANFIS modelindeki sonuçlar arasında iyi uyum sağlandığı ve çimento teknolojisindeki eğilme dayanımlarının tahmininde başarıyla uygulanabilirliğini göstermiştir.

(Research Article)

## Prediction the Effects of Blast Furnace Slag on the Flexural Strengths of Portland Cement with Fuzzy Logic and ANFIS

### Keywords:

Fuzzy,  
ANFIS,  
Cement,  
Flexural Strengths,  
Blast furnace slag.

**Abstract:** In this study, fuzzy logic and adaptive network-based fuzzy inference system (ANFIS) models were developed for the estimation of flexural strengths of blast furnace slag (BFS) substituted cement mortars. For this purpose, a total of 5 cements were produced by substituting 0, 5, 10, 15 and 20 wt% BFS into Portland cement. The flexural strengths of the mortars produced with these cements were determined by standard cement tests on the 2nd, 7th, 28th and 90th hydration days. In addition, to predict the flexural strength of BFS-substituted cement mortars, estimation models were created using triangular membership function for both fuzzy logic and ANFIS. Then, these prediction results have been compared with the experimental results. According to the data obtained, the correlation coefficients of flexural strength of cement mortars for fuzzy logic and ANFIS were determined as 0.76 and 0.90, respectively. The obtained results showed that there are a good agreement between the test results and the results especially in the ANFIS model, and it can be successfully applied in the prediction of flexural strengths in cement technology.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çimento ve beton teknolojisindeki uygulamalarda betonların dayanım ve dayanıklılık gibi özelliklerinin iyileştirilmesinin yanı sıra ekonomik ve ekolojik katkıları nedeniyle silis dumanı, pirinç kabuğu külü, metakaolin, uçucu kül, tras, zeolit, diatomit, pomza gibi yapay ya da doğal puzolanik malzemelerin çok yoğun olarak tercih edildiği görülmektedir [1-6].

Bu malzemelerden biri olan yüksek fırın cürufu (YFC), hem çimento hem de beton teknolojisinde yoğun olarak kullanım alanı bulmaktadır [7,8]. YFC, Metalurji tesislerindeki fırınlarda kok, kireç ve demir filizi gangü gibi maddelerin 1450-1600 °C sıcaklıktaki demir üretimi sonrasında ergimiş halde elde edilmekte olup, ana ürünün tipi ve üretim yöntemine bağlı olarak farklı özellikler gösterebilmektedir [9-11]. YFC'nin kimyasal kompozisyonunun ana yapısı CaO, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ten oluşmaktadır [12]. Yapılan çalışmalar incelendiğinde YFC'nin inşaat sektöründe genellikle katkı malzemesi olarak çimento ve beton içerisinde kullanıldığı ve betonun birçok özelliğini iyileştirdiği görülmektedir. Bu iyileştirmeler arasında, betonun ileri yaş dayanımlarında artış sağlaması, işlenebilirliği artırması, priz sürelerini uzatması, terlemeyi, hidrasyon ısısını, klorür geçirimsizliğini, su geçirimsizliğini azaltılması, yüksek alkali silika direnci sağlaması, donatının korozyon direncini artırması ve betonun durabilitesinde artış sağlaması sıralanabilmektedir [13-24]. Ayrıca YFC, özellikle son yıllarda açığa çıkan CO<sub>2</sub> miktarının azaltılması ve enerji korunumu bakımından da bütün dünyanın üzerinde titizlikle durduğu ekolojik denge açısından dikkat çeken bir malzeme olarak yerini almaktadır [25].

Bütün bu olumlu özellikleri nedeniyle son yıllardaki çalışmalarda çimento ve beton teknolojisinde gerek yapay gerekse doğal puzolanik malzemelerle elde edilen çimento harç ve betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin tahmin edilebilmesi veya farklı problemlerin çözülebilmeleri için yapay zeka, makine öğrenmesi ve regresyon gibi teknikler ile modellenmiş ve deney sonuçlarına çok yakın sonuçların tespit edildiği belirtilmiştir [26-31].

Yapay zeka tekniklerinden olan bulanık mantık bu çalışmalardan biridir. Bu teknikle bilgisayarlara karar verme yetenekleri kazandırılmakta ve giriş bilgileri 0-1 arasında bulanıklaştırılmaktadır. Bilgisayarın karar verme kriterleri kural tablosu oluşturulmasıyla belirlenmektedir. Bu yöntemin çıkış biriminde bulanık çıktı değerleri yeniden durulanarak sayısallaştırılmaktadır [32]. Bulanık mantık yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar inşaat mühendisliğindeki problemlerin çözümünde tatmin edici boyutlara ulaşmıştır. Güvenç ve ark. (2021), yaptıkları çalışmada Portland çimentosunu farklı oranlarda metakaolin ile ikame ederek oluşturulan çimentoların priz sürelerine etkisini araştırmışlar ve bu değerleri bulanık mantık kullanarak tahmin etmeye çalışmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, korelasyon

katsayısı priz başlama süresi için 0.9851, priz sonu süresi için 0.9693 olduğu tespit edilmiş ve çimentonun priz süresinin metakaolin ile ilişkili olarak tahmin edilmesinde bulanık mantığın kullanılabileceği öne sürülmüştür [33]. Tanyildizi (2009), yaptığı çalışmada hafif betonun bağ dayanımı için bir bulanık mantık tahmin modeli araştırmıştır. Sonuç olarak deneysel sonuçlar ile tahmin edilen sonuçların birbirine çok yakın olduğunu ve hafif betonun yapışma dayanımını tahmin etmek için bulanık mantığın kullanılabileceğini ifade etmiştir [34]. Demir (2005), normal ve yüksek dayanımlı betonun elastik modülünü belirlemek için bulanık modelleme geliştirmiştir. Sonuçlar, test ve bulanık mantıkla elde edilen sonuçlar arasında iyi uyum sağlandığını göstermiştir [35]. Güler ve ark. (2012) tek eksenli yüklem altında yüksek dayanımlı betonun modellenmesi için sunulan bir yaklaşımı incelemişlerdir. Test verilerinin matematiksel ifadelerle kolayca tanımlanamayacağını, ancak bulanık yaklaşımın verileri daha doğru tanımlamayı mümkün kıldığını belirtmişlerdir. Ayrıca bulanık mantık ile elde edilen değerlerin deneysel sonuçlara çok yakın olduğunu belirtmişlerdir [36].

Modelleme çalışmalarından bir diğeri ise uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) gibi yapay zeka uygulamasıdır. Kocak ve Gulbandilar (2016), diatomit ve/veya zeolit ikamesi ile çimentolar üretmiş, üretilmiş olan bu çimentolar ile de 7 farklı beton türü tasarlamışlardır. Bu betonlardan ürettikleri 63 numuneyi MgSO<sub>4</sub> etkisine maruz bırakmışlar ve 28., 56. ve 90. hidrasyon günlerindeki basınç dayanım değerlerini ANFIS yardımıyla tahmin etmişlerdir. Elde edilen verilere göre; deneysel sonuçların tahmin edilen sonuçlara benzer olduğuna, dolayısı ile ANFIS'in güçlü ve faydalı modeller oluşturabilmek için kullanılabileceğini belirtmişlerdir [37]. Bir başka araştırmada Mansouri ve Kisi (2015), ANFIS ve YSA ile oluşturdukları modellerle güçlendirilmiş duvar elemanlarının bağlanma dayanımlarını tahmin etmişlerdir. Elde edilen verilerle çoklu doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon modelleriyle mevcut bağ gücünü kıyaslamışlardır. Bunların sonucunda sonradan donatılan kağır elemanların bağlanma dayanımlarının tahmin edilmesinde ANFIS ve YSA'nin diğer modellerle karşılaştırıldığında daha başarılı olduğunu vurgulamışlardır [38]. Başka bir çalışmada Güvenç ve Koçak (2022), pomza ve diatomit ikameli çimento harç numunelerinin basınç dayanım tahminlerinde ANFIS kullanarak tahmin modeli geliştirmişlerdir. Bu amaçla yedi farklı harç numunesinden 2, 7, 28, 90. hidrasyon günlerinde elde edilen eğitim için 168, test için de 28 adet veri kullanarak model oluşturmuşlardır. Elde edilen sonuçları kıyaslamak için R<sup>2</sup>, MAPE ve RMSE gibi istatistiksel yöntemlerden yararlanmışlardır. Elde etmiş oldukları sonuçlara göre; deneysel sonuçlarla ANFIS sonuçları arasında iyi bir uyum olduğunu, dolayısı ile inşaat mühendisliği uygulamalarında da başarılı bir şekilde kullanılabileceğini ifade etmişlerdir [39].

Bu çalışmada, CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosuna farklı oranlarda YFC ikamesi ile oluşturulan çimento ile üretilen harçların 2, 7, 28 ve 90. hidrasyon günlerinde

eğilme dayanımları incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlardan faydalanılarak bulanık mantık ve ANFIS yöntemiyle farklı modeller oluşturulmuştur. Bu modellerden en iyi sonuç veren hem bulanık mantık hem de ANFIS için üçgen üyelik fonksiyonu kullanılarak oluşturulan birer model yardımıyla YFC ikameli çimento harçlarının eğilme dayanımları tahmin edilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

### 2.1. Materyal (Materials)

Bu çalışmada eğilme dayanımlarının belirlenmesi için bağlayıcı olarak kullanılan çimento, Bolu çimento fabrikası tarafından üretilen CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosudur (PÇ). Çimento ikame malzemesi olarak Bolu çimento fabrikasından temin edilen yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Ayrıca, referans ve katkı çimento harç numunelerinin üretiminde TS EN 196-1 [40] gereklerine uygun olan standart kum ve Bolu ilinin merkez ilçesindeki içilebilir niteliğe haiz şebeke suyu kullanılmıştır. Çimento harç numunelerinin üretiminde kullanılan hammaddelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri tespit edilerek Tablo 1 ve 2’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Hammaddelerin kimyasal özellikleri.

| Kimyasal kompozisyon           | YFC, % | PÇ, % |
|--------------------------------|--------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 41.08  | 19.8  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10.08  | 5.38  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.97   | 3.35  |
| CaO                            | 34.64  | 63.39 |
| MgO                            | 6.16   | 1.35  |
| SO <sub>3</sub>                | 0.83   | 2.79  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.52   | 0.18  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.97   | 0.64  |
| Cl                             | 0.83   | 2.79  |
| Kızdırma kaybı                 | 1.16   | 2.67  |

**Tablo 2.** Hammaddelerin fiziksel özellikleri.

| Malzeme  | YFC  | PÇ   |
|--|------|------|
| Özgül ağırlık                                  | 2.85 | 3.17 |
| Özgül yüzey alanı (Blaine), cm <sup>2</sup> /g | 5295 | 3882 |
| Boyut aralığı (elek üstü), %                   | 0    | 0    |
|  | 0.1  | 0.3  |
|  | 3.6  | 0.1  |

### 2.1. Metot (Methods)

Eğilme dayanımlarının belirlenmesinde PÇ içerisine %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında YFC ikame edilerek 5 tip çimento elde edilmiştir. Bu çimentolarla çimento harçları üretilmiş ve kodları Tablo 3’de verilmiştir.

**Tablo 3.** Çimentolar ve üretilen harçların kodları.

| Çimento | Çimento tipi            | Harç kodu |
|---------|-------------------------|-----------|
| 1       | PÇ                      | R         |
| 2       | %5 YFC ikameli çimento  | 5YFC      |
| 3       | %10 YFC ikameli çimento | 10YFC     |
| 4       | %15 YFC ikameli çimento | 15YFC     |
| 5       | %20 YFC ikameli çimento | 20YFC     |

YFC ikameli harç numunelerinin eğilme dayanımları TS EN 196-1 standardındaki esaslar çerçevesinde

belirlenmiştir [40]. Harçlar 1350 g kum, 450 g çimento ve 225 g su ile hazırlanmış ve 4x4x16 cm boyutlarında üç gözlü prizmatik kalıplara yerleştirilmiştir. Daha sonra kalıpların üstü bir cam ile kapatılarak sıcaklığı 20±1 °C ve bağıl nemi %90 olan çimento kür kabineye yerleştirilmiştir. Burada 1 gün bekletilen harç numuneleri kür kabinden alınmış ve 20±1 °C sıcaklıktaki kür havuzuna yerleştirilmiştir. Eğilme dayanımı deneylerinden önce numuneler en geç 15 dakika önce sudan çıkartılmıştır. Deney zamanına kadar nemli bir beze sarılarak korunan numunelere, 50±10 N/s kuvvet uygulanarak tek noktadan (merkezi) yükleme metodu ile kalıplanmış yan yüzeylerine yükleme yapılarak ortadan kırılıncaya dek kuvvet artırımı yapılmıştır. Eğilme dayanımı N/mm<sup>2</sup> olarak Eşitlik 1’den hesaplanmıştır.

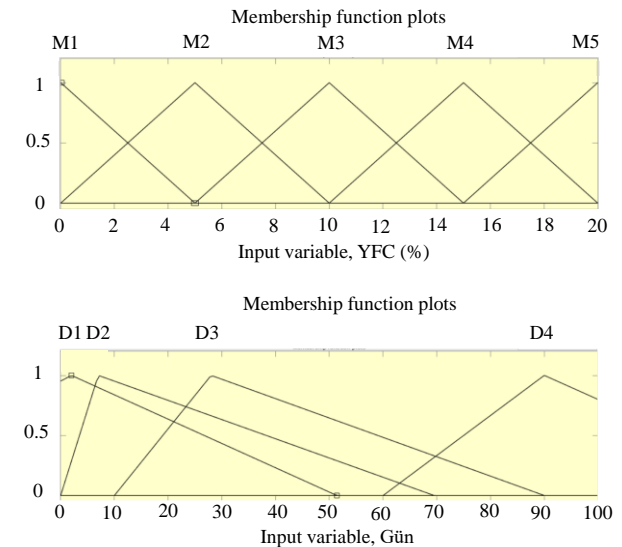
$$R_f = \frac{1.5.F_f.l}{b^3} \quad (1)$$

Eşitlik 1’de eğilme dayanımı R<sub>f</sub> (Newton/mm<sup>2</sup>), prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu b (mm), prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet F<sub>f</sub> (Newton) ve mesnet silindirleri arasındaki uzaklık l (mm) ile ifade edilmektedir.

## 3. MODELLERİN TASARIM VE PARAMETRELERİ (DESIGN AND PARAMETERS OF MODELS)

### 3.1. Bulanık Mantık Tasarım ve Model Parametreleri (Fuzzy Logic Design and Model Parameters)

YFC ikamesi ile üretilen çimento harç numunelerinin eğilme dayanımlarını tahmin etmek amacıyla kullanılan bulanık sistem, MatLab Toolbox ile tasarlanmıştır. Bulanık mantık sisteminde ilk girdi YFC’nin ağırlık yüzdesi, ikinci girdi ise hidratasyon günüdür. Tahmin modelinde üçgen üyelik fonksiyonları tercih edilmiştir. Bu süreçte net girdi değişkenleri sırasıyla YFC yüzde oranları için 5’e hidratasyon günleri için 4’e bölünmüştür (Şekil 1). Bulanık küme şekillerinin ve değerlerinin belirlenmesinde deneylerden elde edilen sonuçlara dikkat edilmiştir.



**Şekil 1.** Giriş değişkenleri için üyelik fonksiyonları.

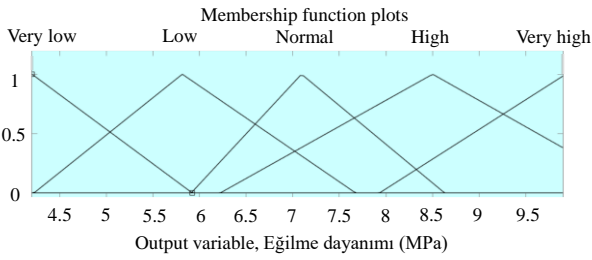
Üçgen üyelik fonksiyonları için Eşitlik 2 kullanılmıştır.

$$\mu(x) = \begin{cases} x < a \text{ için } 0 \\ a < x < b \text{ için } \frac{x-a}{b-a} \\ b < x < c \text{ için } \frac{c-x}{c-b} \\ c > 0 \text{ için } 0 \end{cases} \quad (2)$$

Eşitlik 2'deki ilişkide a, b ve c, üçgen üyelik fonksiyonlarının kesin değerlerini göstermektedir. Örneğin YFC oranı %20 ve üzerinde ise M5 kümesinin üyelik derecesi 1, diğer kümelerin üyelik derecesi 0 olur. YFC oranı %15 ise M4 kümesinin üyelik derecesi 1 diğer kümelerin üyelik dereceleri 0 olarak hesaplanabilir.

Eşitlik 2, eğilme dayanım günlerinin üyelik derecelerinin hesaplanmasında ve bulanıklaştırılmasında da kullanılmıştır. Örneğin, eğilme dayanımları 7. hidratasyon gününde ise D1 kümesinin üyelik derecesi 0.895, D2 kümesinin 1, diğer kümelerinin üyelik derecesi sıfır olarak hesaplanabilir.

Eğilme dayanımı olarak belirlenen çıkış değişkenindeki üyelik fonksiyonları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Çıkış değişkeni (eğilme dayanımı) için üyelik fonksiyonları.

Bulanık karar sistemlerinin temel yapısı kural tabanlıdır ve bilgisayar karar verirken bu kuralları esas alır. Bu kural tabanı oluşturulurken konunun uzmanlarına danışılmaktadır. Bu kapsamda ilk olarak mesleki deneyimler ve deneysel sonuçlar dikkate alınarak çimento harç numunelerinin eğilme dayanımı için Tablo 4'teki kural tabanı oluşturulmuştur [41].

Tablo 4. Çimento harç numunelerinin eğilme dayanımları için kural tabanı (MPa).

|    | D1      | D2      | D3       | D4       |
|----|---------|---------|----------|----------|
| M1 | VeryLow | Normal  | VeryHigh | VeryHigh |
| M2 | VeryLow | Normal  | VeryHigh | VeryHigh |
| M3 | Low     | Normal  | High     | VeryHigh |
| M4 | VeryLow | Normal  | High     | High     |
| M5 | Low     | VeryLow | High     | High     |

Burada, çimento harç numunelerinin eğilme dayanımının girdi değişkenleri için toplam 20 "eğer-o zaman" ilişkisi elde edilmiştir. Bunlardan bazıları aşağıda örneklenmiştir.

If input=D1 and input=M1 then output=VeryLow

If input=D1 and input=M2 then output= VeryLow

If input=D1 and input=M3 then output=Low

.....

.....

If input=D4 and input= M4 then output=High

If input=D4 and input=M5 then output=High

"Eğer-o zaman" ilişkilerinin girdileri dikkate alındığında "ve" bağlacı ile bağlantılı oldukları görülmektedir. Mantıksal bir ilişkide, çıkış kümelerine üyelik dereceleri atanırken, "ve" kombinasyonu minimum giriş üyelik derecelerini atar. Bu mantıksal ilişkinin bir sonucu olarak, bulanık çıkarımda maksimum-minimum çıkarım yöntemi kullanılmaktadır. Durulaştırma işlemi için, bulanıklaştırma işleminin son aşaması olan ağırlıklı ortalama yöntemi seçilmiştir. Bu yöntem Eşitlik 3 ile hesaplanmıştır.

$$x^* = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(x) \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i(x)} \quad (3)$$

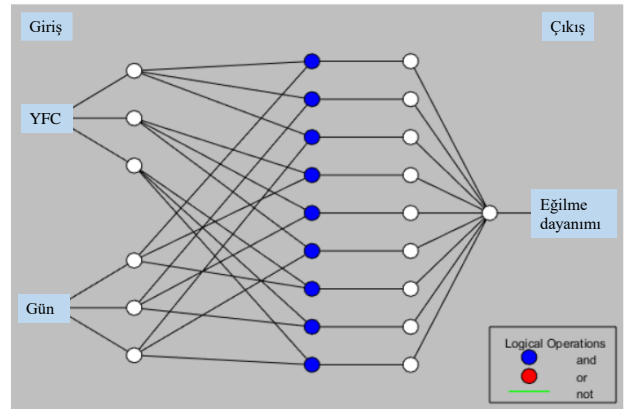
Eşitlik 3'te; ham çıkış değerleri  $x^*$ , her bir kuralın çıkışı olan üyelik kümesinin üyelik derecesi  $\mu_i$  ve her bir kuralın ortalama ağırlığı ise  $x_i$  ile ifade edilmektedir [41,42].

### 3.2. ANFIS Tasarım ve Model Parametreleri (ANFIS Design and Model Parameters)

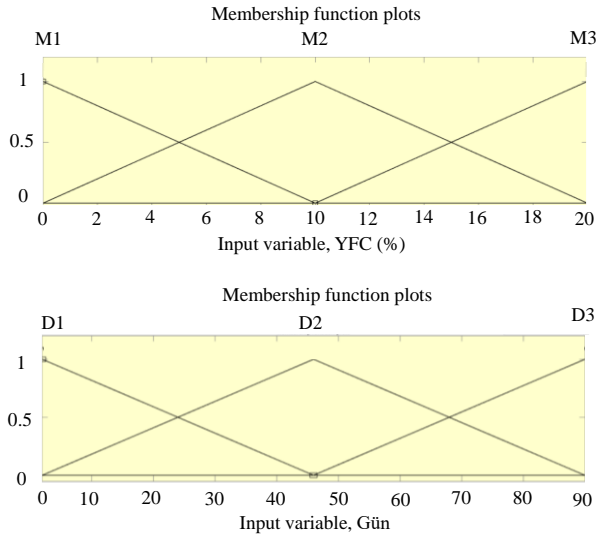
ANFIS ile YFC ikemeli çimento harç numunelerinin eğilme dayanım sonuçlarının tahmini için MATLAB programının bulanık mantık araç kutusundaki ANFIS editöründen yararlanılmış ve buradaki "üçgen" üyelik fonksiyonu tercih edilmiştir. Modele ait toplam parametre değerleri Tablo 5'te, genel yapısı Şekil 3'te, giriş değişkenlerinin üyelik fonksiyonları ise Şekil 4'te verilmiştir.

Tablo 5. ANFIS modeli parametre değerleri.

| Parametre bilgisi                 | ANFIS |
|-----------------------------------|-------|
| Düğüm sayısı                      | 35    |
| Giriş sayısı                      | 2     |
| Çıkış sayısı                      | 1     |
| Toplam parametre sayısı           | 27    |
| Doğrusal parametre sayısı         | 9     |
| Doğrusal olmayan parametre sayısı | 18    |
| Toplam bulanık kural sayısı       | 9     |
| Eğitim veri çifti sayısı          | 60    |
| Epoch sayısı                      | 300   |



Şekil 5. ANFIS'in mimari yapısı.



Şekil 6. ANFIS modeli giriş değişkenlerinin üyelik fonksiyonları.

#### 4. BULGULAR (RESULTS)

Referans ve YFC ikameli harç numunelerinin 2, 7, 28 ve 90. hidrasyon günlerindeki eğilme dayanım, bulanık mantık ve ANFIS sonuçları Tablo 6, 7, 8 ve 9'da verilmiştir.

Tablo 6. Harçların 2 günlük eğilme dayanımları (MPa).

| Numune                | Çimento harçları |             |             |             |             |
|-----------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                       | R                | YFC5        | YFC10       | YFC15       | YFC20       |
| 1                     | 5.50             | 5.10        | 5.20        | 5.00        | 4.60        |
| 2                     | 5.40             | 5.40        | 5.30        | 5.10        | 4.40        |
| 3                     | 5.20             | 5.20        | 5.40        | 4.90        | 4.50        |
| <b>Ortalama</b>       | <b>5.37</b>      | <b>5.23</b> | <b>5.30</b> | <b>5.00</b> | <b>4.50</b> |
| Endeks, %             | 1.00             | 0.98        | 0.99        | 0.93        | 0.84        |
| <b>Bulanık mantık</b> | <b>5.82</b>      | <b>5.82</b> | <b>6.19</b> | <b>5.82</b> | <b>4.75</b> |
| Hata, MPa             | -0.45            | -0.59       | -0.89       | -0.82       | -0.25       |
| Hata, %               | -8.4             | -11.3       | -16.8       | -16.4       | -5.6        |
| <b>ANFIS</b>          | <b>6.16</b>      | <b>6.05</b> | <b>5.93</b> | <b>5.52</b> | <b>5.12</b> |
| Hata, MPa             | -0.79            | -0.82       | -0.63       | -0.52       | -0.62       |
| Hata, %               | -14.7            | -15.7       | -11.9       | -10.4       | -13.8       |

Tablo 7. Harçların 7 günlük eğilme dayanımları (MPa).

| Numune                | Çimento harçları |             |             |             |             |
|-----------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                       | R                | YFC5        | YFC10       | YFC15       | YFC20       |
| 1                     | 7.90             | 7.60        | 7.20        | 6.90        | 6.40        |
| 2                     | 7.60             | 7.80        | 7.40        | 6.90        | 6.60        |
| 3                     | 8.00             | 7.60        | 7.50        | 7.00        | 6.60        |
| <b>Ortalama</b>       | <b>7.83</b>      | <b>7.67</b> | <b>7.37</b> | <b>6.93</b> | <b>6.53</b> |
| Endeks, %             | 1.00             | 0.98        | 0.94        | 0.89        | 0.83        |
| <b>Bulanık mantık</b> | <b>6.25</b>      | <b>6.25</b> | <b>6.43</b> | <b>6.25</b> | <b>5.6</b>  |
| Hata, MPa             | 1.58             | 1.42        | 0.94        | 0.68        | 0.93        |
| Hata, %               | 20.2             | 18.5        | 12.8        | 9.8         | 14.2        |
| <b>ANFIS</b>          | <b>6.83</b>      | <b>6.71</b> | <b>6.60</b> | <b>6.20</b> | <b>5.81</b> |
| Hata, MPa             | 1.00             | 0.96        | 0.77        | 0.73        | 0.72        |
| Hata, %               | 12.8             | 12.5        | 10.5        | 10.5        | 11.0        |

Tablo 8. Harçların 28 günlük eğilme dayanımları (MPa).

| Numune                | Çimento harçları |             |             |             |             |
|-----------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                       | R                | YFC5        | YFC10       | YFC15       | YFC20       |
| 1                     | 9.50             | 8.90        | 9.30        | 8.70        | 8.50        |
| 2                     | 9.40             | 9.20        | 9.20        | 9.10        | 8.70        |
| 3                     | 9.70             | 9.30        | 9.50        | 8.90        | 8.60        |
| <b>Ortalama</b>       | <b>9.53</b>      | <b>9.13</b> | <b>9.33</b> | <b>8.90</b> | <b>8.60</b> |
| Endeks, %             | 1.00             | 0.96        | 0.98        | 0.93        | 0.90        |
| <b>Bulanık mantık</b> | <b>7.39</b>      | <b>7.39</b> | <b>7.47</b> | <b>7.45</b> | <b>7.2</b>  |
| Hata, MPa             | 2.14             | 1.74        | 1.86        | 1.45        | 1.40        |
| Hata, %               | 22.5             | 19.1        | 19.9        | 16.3        | 16.3        |
| <b>ANFIS</b>          | <b>9.63</b>      | <b>9.51</b> | <b>9.38</b> | <b>9.06</b> | <b>8.73</b> |
| Hata, MPa             | -0.10            | -0.38       | -0.05       | -0.16       | -0.13       |
| Hata, %               | -1.0             | -4.2        | -0.5        | -1.8        | -1.5        |

Tablo 9. Harçların 90 günlük eğilme dayanımları (MPa).

| Numune                | Çimento harçları |             |             |             |             |
|-----------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                       | R                | YFC5        | YFC10       | YFC15       | YFC20       |
| 1                     | 9.50             | 9.40        | 9.70        | 9.30        | 9.20        |
| 2                     | 9.60             | 9.60        | 9.60        | 9.50        | 9.40        |
| 3                     | 9.60             | 9.50        | 9.60        | 9.50        | 9.40        |
| <b>Ortalama</b>       | <b>9.57</b>      | <b>9.50</b> | <b>9.63</b> | <b>9.43</b> | <b>9.33</b> |
| Endeks, %             | 1.00             | 0.99        | 1.01        | 0.99        | 0.98        |
| <b>Bulanık mantık</b> | <b>9.26</b>      | <b>9.26</b> | <b>9.26</b> | <b>8.37</b> | <b>8.37</b> |
| Hata, MPa             | 0.31             | 0.24        | 0.37        | 1.06        | 0.96        |
| Hata, %               | 3.2              | 2.5         | 3.8         | 11.2        | 10.3        |
| <b>ANFIS</b>          | <b>9.54</b>      | <b>9.56</b> | <b>9.59</b> | <b>9.46</b> | <b>9.32</b> |
| Hata, MPa             | 0.03             | -0.06       | 0.04        | -0.03       | 0.01        |
| Hata, %               | 0.3              | -0.6        | 0.4         | -0.3        | 0.1         |

Test sonuçları incelendiğinde harç numunelerinin eğilme dayanımlarının kür koşullarına, sertleşme süresine, ikame oranına, partikül boyutuna ve spesifik yüzey alanlarına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre referans harç numuneleri ile karşılaştırıldığında, PÇ yerine %5YFC ikamesi ile elde edilen harç numunelerinin eğilme dayanımları 2. hidrasyon gününde %2, 7. hidrasyon gününde %2, 28. hidrasyon gününde %4 ve 90. hidrasyon gününde %1 oranında azalmıştır. PÇ yerine %10YFC ikamesi ile elde edilen harç numunelerinin eğilme dayanımları referans harç numuneleri ile karşılaştırıldığında 2. hidrasyon gününde %1, 7. hidrasyon gününde %6, 28. hidrasyon gününde %2 azalırken 90. hidrasyon gününde %1 oranında artmıştır. PÇ yerine %15YFC ikamesi ile elde edilen harç numunelerinin eğilme dayanımları referans harç numuneleri ile kıyaslandığında 2. hidrasyon gününde %7, 7. hidrasyon gününde %11, 28. hidrasyon gününde %7 ve 90. hidrasyon gününde %1 oranında azalmıştır. PÇ yerine %20YFC ikamesi ile elde edilen harç numunelerinin eğilme dayanımları referans harç numuneleriyle karşılaştırıldığında ise 2. hidrasyon gününde %16, 7. hidrasyon gününde %17, 28. hidrasyon gününde %10 ve 90. hidrasyon gününde %2 oranında azalmıştır (Tablo 6-9). Çalışmada elde edilen bulgulara göre, YFC'nin puzolanik reaksiyonundan dolayı 90. hidrasyon gününde 2., 7. ve 28. hidrasyon gününe göre nispi eğilme dayanımı belirgin bir artış göstermektedir. Ayrıca 90. hidrasyon gününde %20 YFC ikameli harç numunelerinin eğilme dayanımlarında bile %2 oranında bir azalmaya sebep olması, eğilme

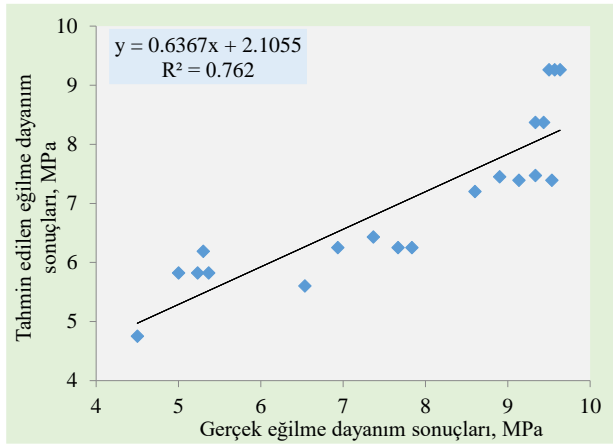
dayanımı açısından referans çimento harç numunelerinin sonuçlarına çok yakın olduğunu ve herhangi bir olumsuz etkiye neden olmadığını göstermektedir.

Ayrıca gerçek değerlerle modellerden elde edilen eğilme dayanımları kıyaslandığında, tahmin sonuçlarının hidrasyon süresine göre farklılık gösterdiği görülmektedir.

Bulanık mantık için 2. hidrasyon günündeki eğilme dayanımlarına göre en büyük değişimin -0.89 MPa fark ve %16.8 hata oranıyla YFC10 kodlu (Tablo 6), 7. hidrasyon gününde en büyük değişimin 1.58 MPa fark ve %20.2 hata oranıyla R kodlu (Tablo 7), 28. hidrasyon gününde en büyük değişimin 2.14 MPa fark ve %22.5 hata oranıyla R kodlu (Tablo 8), 90. hidrasyon gününde ise en büyük değişimin 1.06 MPa fark ve %11.2 hata oranıyla YFC15 kodlu (Tablo 9) harç numunelerinde olduğu görülmektedir.

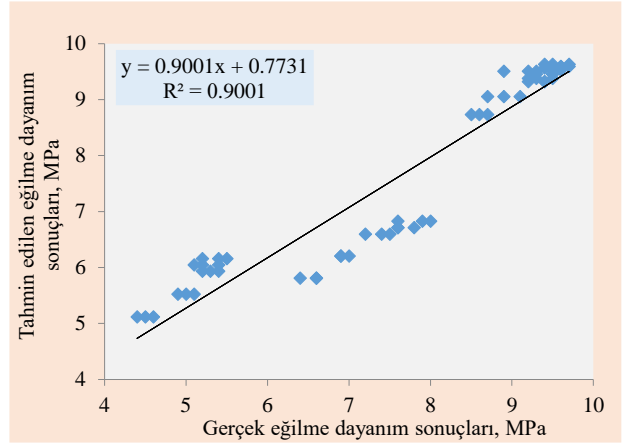
ANFIS için ise 2. hidrasyon günündeki eğilme dayanımlarına göre en büyük değişimin -0.82 MPa fark ve %15.7 hata oranıyla YFC5 kodlu (Tablo 6), 7. hidrasyon gününde en büyük değişimin 1.0 MPa fark ve %12.8 hata oranıyla R kodlu (Tablo 7), 28. hidrasyon gününde en büyük değişimin -0.38 MPa fark ve %4.2 hata oranıyla YFC5 kodlu (Tablo 8), 90. hidrasyon gününde ise en büyük değişimin -0.06 MPa fark ve %0.6 hata oranıyla YFC5 kodlu (Tablo 9) harç numunelerinde olduğu görülmektedir.

Referans ve YFC ikameli harç numunelerinin deneysel sonuçlar ile bulanık mantık ve ANFIS tahmin modellerinden elde edilen sonuçlar Şekil 7’de korelasyon katsayıları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 7. Bulanık mantık modelinde eğilme dayanım sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 7’deki bulanık mantık için korelasyon katsayısı  $R^2=0.76$  olarak elde edilmiştir. Ancak elde edilen tahmin sonuçları ile gerçek sonuçlar kıyaslandığında en kötü hatanın bile 28. günde R kodlu numunede %22.5 olarak bulunması bulanık mantık modelimizin %77.5 doğrulukla tahmin yapabildiğini göstermektedir.



Şekil 8. ANFIS modelinde eğilme dayanım sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 8’deki ANFIS için korelasyon katsayısı ise  $R^2=0.90$  olarak tespit edilmiştir. ANFIS ile elde edilen tahmin sonuçları ile gerçek sonuçlar kıyaslandığında ise en kötü hatanın bile 2. günde YFC5 kodlu numunede %15.7 olarak bulunması modelimizin %84.3 doğrulukla tahmin yapabildiğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde her iki model içerisinde ANFIS ile elde edilen tahmin sonuçlarının daha iyi olduğu, dolayısı ile bu çalışmada ANFIS modelinin uygulanmasının daha faydalı olduğu ifade edilebilir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosuna farklı oranlarda yüksek fırın cürufu ikamesi ile elde edilen çimentolarla üretilen harçların eğilme dayanımları araştırılmıştır. Ayrıca, eğilme dayanımlarının tahmin edilmesi için bulanık mantıkla tahmin modelleri oluşturulmuş ve deneysel sonuçlar ile tahmin edilen değerler karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Buna göre;

- Referans çimento harç numunelerinin (R) eğilme dayanımları 2. hidrasyon gününde 5.37 MPa, 7. hidrasyon gününde 7.83 MPa, 28. hidrasyon gününde 9.53 MPa ve 90. hidrasyon gününde 9.57 MPa olarak elde edilmiştir.
- PÇ’ye %5 oranında YFC ikame edildiğinde (YFC5), harcın eğilme dayanımları 2. hidrasyon gününde 5.23 MPa, 7. hidrasyon gününde 7.67 MPa, 28. hidrasyon gününde 9.13 MPa ve 90. hidrasyon gününde 9.50 MPa olarak elde edilmiştir.
- PÇ’ye %10 oranında YFC ikame edildiğinde (YFC10), harcın eğilme dayanımları 2. hidrasyon gününde 5.30 MPa, 7. hidrasyon gününde 7.37 MPa, 28. hidrasyon gününde 9.33 MPa ve 90. hidrasyon gününde 9.63 MPa olarak elde edilmiştir.
- PÇ’ye %15 oranında YFC ikame edildiğinde (YFC15), harcın eğilme dayanımları 2. hidrasyon gününde 5.00 MPa, 7. hidrasyon gününde 6.93 MPa, 28. hidrasyon gününde .90 MPa ve 90. hidrasyon gününde 9.43 MPa olarak elde edilmiştir.
- PÇ’ye %20 oranında YFC ikame edildiğinde (YFC20), harcın eğilme dayanımları 2. hidrasyon

gününde 4.50 MPa, 7. hidratasyon gününde 6.53 MPa, 28. hidratasyon gününde 8.60 MPa ve 90. hidratasyon gününde 9.33 MPa olarak elde edilmiştir.

- Bulanık mantık için üçgen üyelik fonksiyonu ile elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında  $R^2=0.76$  olarak tespit edilmiştir.
- ANFIS için üçgen üyelik fonksiyonu ile elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında  $R^2=0.90$  olarak tespit edilmiştir.
- Gerçek sonuçlarla modellerden elde edilen sonuçlar kıyaslandığında en kötü sonucun bile bulanık mantık için %77.5, ANFIS için ise %84.3 doğrulukla tahmin edildiği belirlenmiştir.

Çalışmada elde edilen bulgulara göre, 90. hidratasyon gününde eğilme dayanımları, esas olarak yüksek fırın cürufunun pozolanik reaksiyonundan dolayı nispeten bir artış göstermektedir. Bu ileriki yaşlarda çimento harc numunelerinin eğilme dayanımının, yüksek fırın cürufu kullanımıyla olumlu yönde etkilendiğini göstermektedir. Ayrıca deneysel sonuçlarla ve bulanık mantık ve ANFIS yöntemleriyle elde edilen sonuçlar arasında uyumun iyi olduğu ve çimento teknolojisindeki eğilme dayanımlarının tahmininde bu modellerin başarıyla uygulanabileceği ifade edilebilir.

#### **Etik Hususlar (Ethical Considerations)**

#### **Etik kurallara uyum (Compliance with ethical guidelines)**

Yazarlar olarak çalışmanın özgün bir çalışma olduğunu; etik görev ve sorumluluklara riayet ettiğimizi beyan ederiz.

#### **Finansman (Funding)**

Yazarlar olarak çalışma için kamu, ticari veya kar amacı gütmeyen sektörlerdeki fon kuruluşlarından özel bir hibe alınmadığını beyan ederiz.

#### **Çıkar çatışması (Conflict of interest)**

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

#### **Teşekkür (Acknowledgment)**

Yazarlar, Bolu Çimento Fabrikası Yetkililerine ve Laboratuvar Çalışanlarına standart çimento deneylerdeki katkılarından dolayı teşekkür ederler.

#### **KAYNAKÇA (REFERENCES)**

- [1] Adil, G., Kevern, J. T., & Mann, D. (2020). Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 247, 118453.
- [2] Sandhu, R. K., & Siddique, R. (2021). Properties of sustainable self-compacting concrete made with rice husk ash. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-25.
- [3] Kocak, Y. (2020). Effects of metakaolin on the hydration development of Portland-composite cement. *Journal of Building Engineering*, 31, 101419.
- [4] Joshaghani, A. (2017). The effect of trass and fly ash in minimizing alkali-carbonate reaction in concrete. *Construction and Building Materials*, 150, 583-590.
- [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 HNO<sub>3</sub> environment. *Construction and Building Materials*, 236, 117572.
- [6] Pınarcı, İ., & Kocak, Y. (2022). Hydration mechanisms and mechanical properties of pumice substituted cementitious binder. *Construction and Building Materials*, 335, 127528.
- [7] Lee, Y. J., Kim, H. G., & Kim, K. H. (2021). Effect of Ground Granulated Blast Furnace Slag Replacement Ratio on Structural Performance of Precast Concrete Beams. *Materials*, 14(23), 7159.
- [8] Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, M., & Emam, M. A. (2019). Factors affecting the mechanical properties of alkali activated ground granulated blast furnace slag concrete. *Construction and Building Materials*, 197, 339-355.
- [9] Erdoğan, Ş., & Kurbetci, Ş. (2003). Betonun Performansına Sağladıkları Etkinlik Açısından Kimyasal ve Mineral Katkı Maddeleri. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426(4), 115-120.
- [10] Uysal, F. F., & Bahar, S. (2018). Cüruf Çeşitleri Ve Kullanım Alanları. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(1), 37-52.
- [11] Tokyay, M., Erdoğan, K. (1997). Cüruf ve cüruf lu çimentolar. *TÇMB/AR-GE/Y97.2*, Ankara.
- [12] Yalçın, H., Gürü, M. (2006). *Çimento ve Beton*. Palme Yayıncılık, Ankara.
- [13] Abdelli, K., Tahlaiti, M., Belarbi, R., & Oudjit, M. N. (2017). Influence of the pozzolanic reactivity of the Blast Furnace Slag (BFS) and metakaolin on mortars. *Energy Procedia*, 139, 224-229.
- [14] López, M. M., Pineda, Y., & Gutiérrez, O. (2015). Evaluation of durability and mechanical properties of the cement mortar added with slag blast furnace. *Procedia Materials Science*, 9, 367-376.
- [15] Zhu, J., Zhong, Q., Chen, G., & Li, D. (2012). Effect of particlesize of blast furnace slag on properties of portland cement. *Procedia Engineering*, 27, 231-236.
- [16] Emiroğlu, M., Koçak, Y., & Subaşı, S. (2011). Yüksek Fırın Cürufunun Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. In 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11) 1, 113-117.
- [17] Samad, S., & Shah, A. (2017). Role of binary cement including Supplementary Cementitious Material (SCM), in production of environmentally sustainable concrete: A critical review. *International journal of Sustainable built environment*, 6(2), 663-674.
- [18] Richardson, D. N. (2006). Strength and durability characteristics of a 70% ground granulated blast furnace slag (GGBFS) concrete mix. *Technical*

- Report, Report Number: RI99-035/RI99-035B, Missouri Department of Transportation (MoDOT).
- [19] Sanjuán, M. A., Estévez, E., Argiz, C., & del Barrio, D. (2018). Effect of curing time on granulated blast-furnace slag cement mortars carbonation. *Cement and Concrete Composites*, 90, 257-265.
- [20] Ekinci, C. E. (1993). Elazığ Ferrokrom Fabrikası Cürufunun Çimentoda Puzolanik Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara İMO, 243-253.
- [21] de Oliveira Dieguez, A. C., Oliveira, S. L. N., Araújo, G. S., & de Sousa Galdino, A. G. (2019). Comparison of Kambara reactor slag with blast furnace slag for Portland cement industry applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(3), 2786-2795.
- [22] Sadawy, M. M., & Nooman, M. T. (2020). Influence of nano-blast furnace slag on microstructure, mechanical and corrosion characteristics of concrete. *Materials Chemistry and Physics*, 251, 123092.
- [23] Hosan, A., & Shaikh, F. U. A. (2021). Compressive strength development and durability properties of high volume slag and slag-fly ash blended concretes containing nano-CaCO<sub>3</sub>. *Journal of Materials Research and Technology*, 10, 1310-1322.
- [24] Amin, M. S., El-Gamal, S. M. A., Abo-El-Enein, S. A., El-Hosiny, F. I., & Ramadan, M. (2015). Physico-chemical characteristics of blended cement pastes containing electric arc furnace slag with and without silica fume. *HBRC journal*, 11(3), 321-327.
- [25] Wang, X. Y., & Lee, H. S. (2019). Effect of global warming on the proportional design of low CO<sub>2</sub> slag-blended concrete. *Construction and Building Materials*, 225, 1140-1151.
- [26] Ozcan, G., Kocak, Y., & Gulbandilar, E. (2017). Estimation of compressive strength of BFS and WTRP blended cement mortars with machine learning models. *Computers and Concrete*, 19(3), 275-282.
- [27] Xu, J., Zhao, X., Yu, Y., Xie, T., Yang, G., & Xue, J. (2019). Parametric sensitivity analysis and modelling of mechanical properties of normal-and high-strength recycled aggregate concrete using grey theory, multiple nonlinear regression and artificial neural networks. *Construction and Building Materials*, 211, 479-491.
- [28] Adesanya, E., Aladejare, A., Adediran, A., Lawal, A., & Illikainen, M. (2021). Predicting shrinkage of alkali-activated blast furnace-fly ash mortars using artificial neural network (ANN). *Cement and Concrete Composites*, 124, 104265.
- [29] 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.
- [30] Maqsoom, A., Aslam, B., Gul, M. E., Ullah, F., Kouzani, A. Z., Mahmud, M. P., & Nawaz, A. (2021). Using multivariate regression and ANN models to predict properties of concrete cured under hot weather. *Sustainability*, 13(18), 10164.
- [31] 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.
- [32] Guler, I., Tunca, A., & Gulbandilar, E. (2008). Detection of traumatic brain injuries using fuzzy logic algorithm. *Expert Systems with Applications* 34(2): 1312-1317.
- [33] 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.
- [34] Tanyıldızı, H. (2009). Fuzzy logic model for the prediction of bond strength of high-strength lightweight concrete. *Advances in Engineering Software* 40, 161-169.
- [35] Demir, F. (2005). A new way of prediction elastic modulus of normal and high strength concrete—fuzzy logic. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1531-1538.
- [36] Güler, K., Demir, F., & Pakdamar, F. (2012). Stress-strain modelling of high strength concrete by fuzzy logic approach. *Construction and Building Materials*, 37, 680-684.
- [37] Kocak, Y., & Gulbandilar, E. (2016). MgSO<sub>4</sub> Etkisindeki Betonların Basınç Dayanımının ANFIS ile Tahmini. 8. Uluslararası Kırmataş Sempozyumu, Kütahya, Türkiye, 251-262.
- [38] Mansouri, I., & Kisi, O. (2015). Prediction of debonding strength for masonry elements retrofitted with FRP composites using neuro fuzzy and neural network approaches. *Composites Part B: Engineering*, 70, 247-255.
- [39] 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.
- [40] TS EN 196-1. Çimento deney metodları- Bölüm 1: Dayanım tayini. Türk Standartları, Ankara, 2016.
- [41] Hsu, Y. L., Lee, C. H., & Kreng, V. B. (2010). The application of Fuzzy Delphi Method and Fuzzy AHP in lubricant regenerative technology selection. *Expert Systems with Applications*, 37(1), 419-425.
- [42] Ajayi, A. O., Aderounmu, G. A., Soriyan, H. A., & David, A. (2010). An intelligent quality of service brokering model for e-commerce. *Expert Systems with Applications*, 37(1), 816-823.