

## UÇUCU KÜL ESASLI HAFİF GEOPOLİMER HARÇLARIN BASINÇ VE RÖTRE SONUÇLARININ İSTATİSTİKSEL ANALİZİ VE MODELLENMESİ

Şevin EKME<sup>1\*</sup>, Kasım MERMERDAŞ<sup>2</sup>, Zeynep ALGIN<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Harran Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa/Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 05.01.2022 Kabul Tarihi/Accepted Date: 07.06.2022 DOI: 10.54365/adyumbd.1053825

### ÖZET

Çimento, yapı malzemesi üretiminde bağlayıcı malzeme olarak oldukça yüksek oranlarda kullanılmaktadır. Doğal kaynak tüketimi ve atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarı göz önüne alındığında, çimento kullanım oranının düşürülmesi amacıyla alternatif bağlayıcı malzeme arayışı ile geopolimer kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Atık malzemeler ile uygun kimyasal malzemelerin bir araya getirilmesi sonucu oluşan geopolimer, sunduğu birçok avantaj nedeniyle malzeme alanı için oldukça umut vericidir. Bu çalışmada, hafif geopolimer harçların mekanik özelliğini yansıtan basınç dayanım testi ile şekil değiştirme durumunu yansıtan rötre testi sonucunda elde edilen verilerin istatistiksel analiz ve modelleme işlemleri genetik ekspresyon programlama (GEP) ve çoklu doğrusal regresyon (ÇDR) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hafif geopolimer harçların basınç dayanımı ve rötre değerlerine ulaşılması amacıyla sodyum hidroksit molaritesi, alkali/uçucu kül oranı, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı ve yaş girdi parametreleri dikkate alınarak oluşturulan GEP modelleri ile laboratuvar verilerine oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Basınç dayanımı ve rötre parametreleri için hedef değerler ile tahmin değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren korelasyon katsayıları sırasıyla 0.94 ve 0.97 olarak elde edilmiş olup, diğer istatistiksel değerlendirmeler sayesinde de oluşturulan modelin uygunluğu desteklenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hafif Geopolimer; Basınç Dayanımı; Rötre; İstatistiksel Analiz; Modelleme

## STATISTICAL ANALYSIS AND MODELING OF COMPRESSION AND SHRINKAGE RESULTS OF FLY ASH BASED LIGHTWEIGHT GEOPOLYMER MORTARS

### ABSTRACT

Cement is used at very high rates as a binding material in the production of building materials. Considering the consumption of natural resources and the amount of CO<sub>2</sub> released into the atmosphere, geopolymer composite production was realized with the search for alternative binding materials in order to reduce the cement usage rate. The geopolymer, which is formed as a result of combining waste materials and suitable chemical materials, is very promising for the material field due to its many advantages. In this study, statistical analysis and modeling of the obtained data as a result of the compressive strength test reflecting the mechanical properties of lightweight geopolymer mortars and the shrinkage test reflecting the strain state were performed using genetic expression programming (GEP) and multiple linear regression (MLR). In order to reach the compressive strength and shrinkage values of lightweight geopolymer mortars, results very close to the laboratory data were obtained with the created GEP models by taking into account the input parameters of sodium hydroxide molarity, alkali/fly ash ratio, sodium silicate/sodium hydroxide ratio and age. Correlation coefficients showing the relationship between target values and predicted values for compressive strength and shrinkage parameters were obtained as 0.94 and 0.97, respectively, and the suitability of the created model was supported by other statistical evaluations.

**Keywords:** Lightweight Geopolymer; Compressive Strength; Shrinkage; Statistical Analysis; Modeling

\*1e-posta: [ekmensevin@harran.edu.tr](mailto:ekmensevin@harran.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2577-696X> (Sorumlu Yazar)

<sup>2</sup>e-posta: [kasim.mermerdas@harran.edu.tr](mailto:kasim.mermerdas@harran.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1274-6016>

<sup>3</sup>e-posta: [zyilmaz@harran.edu.tr](mailto:zyilmaz@harran.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7004-8403>

## 1. Giriş

Çimento üretimi sırasında sera gazı emisyonu yıllık bazda yaklaşık 1.6 milyar tondur [1]. Bu tehlikeli sera gazları biyoçeşitliliği ve çevreyi büyük ölçüde etkileyebilmektedir [2]. Bu nedenlerle, çimento kullanımına gereksinim duyulmadan üretilebilen geopolimer yapı malzemeleri ile ilgili çalışmalar son yıllarda oldukça önem kazanmıştır.

Yapı malzemelerinin istenilen özelliklerinin belirlenmesi için genellikle fiziksel testler yapılmaktadır. Belirlenen tasarım oranları kullanılarak karışımlar kalıplara yerleştirildikten sonra numuneler belirli kütleme süreleri sonrasında testlere tabi tutulmaktadır. Bu teknik, laboratuvar ve sahada yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak test etmek fazla zaman alması ve ekonomik olmamasının yanısıra daha az verimli olabilmektedir. Geleneksel deneysel tekniklerin aksine betonun mühendislik özelliklerini değerlendirmek için ampirik regresyon yaklaşımları tercih edilebilmektedir. Yapay zekanın son gelişimi ile, istenilen parametreleri tahmin etmek için makine öğrenimi (ML) yöntemlerini kullanmak uygundur. ML yaklaşımı; kümeleme, sınıflandırma ve regresyon gibi çeşitli amaçlar için kullanılabilir [3].

Genetik ekspresyon programlama (GEP) ve çoklu doğrusal regresyon (ÇDR) modeli bilim ve mühendislik problemlerini çözmek için kolaylık sağlamaktadır. ÇDR modeli regresyon modelini genişleterek, sayısal bağımlı değişken ile iki veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkinin kurulmasına olanak sağlar. Bu model meydana gelmenin yapılandırılmış olasılığının, tahmin edilen bağımsız değişken verilerinin doğrusal bir fonksiyonu olduğunu gösterir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler regresyon analizi ile fonksiyonel olarak ifade edilmektedir [4-5]. Koza [6] tarafından önerilen genetik algoritmanın bir uzantısı olan GEP son zamanlarda birçok inşaat mühendisliği uygulamasında kullanılmaktadır. GEP, doğrusal veya doğrusal olmayan denklemler aracılığıyla, çıktı parametresi ile bağımsız girdi parametresi arasındaki ilişkiyi çözmek için biyolojik evrimden ilham alan evrimsel algoritma tabanlı bir metodolojidir. Tüm evrimsel algoritmalarda olduğu gibi mutasyon ve çaprazlama kullanılan ana operatörlerdir. Literatürde geopolimer beton özelliklerinin modellenmesi amacıyla çeşitli kabul gören yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalara yer verilmiştir [7-14]. Khan ve ark. [15] uçucu kül esaslı geopolimer betonun basınç dayanımı değerlerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi için farklı yapay zeka yöntemlerini kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlar genel olarak GEP tahmin modelinin gelecekte kullanım için basit ve kolay bir matematiksel denklem sağlaması nedeniyle ideal olduğunu ve oluşturulan modelin geopolimer betonun dayanım tahmini için kullanılan değişkenlerin etkisini doğru bir şekilde kapsadığını göstermiştir. Böylece önerilen GEP denkleminin ön tasarımda kullanılabilmesi belirtilmiştir. Nazari [16] alüminosilikat kaynağı olarak sıradan Portland çimentosu kullanılarak üretilen geopolimerlerin basınç dayanımı sonuçlarını GEP ile modellemiştir. Tasarım için her biri dört seviyede NaOH konsantrasyonu,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ağırlık oranı, alkali aktivatör/çimento ağırlık oranı, kütleme sıcaklığı, kütleme süresi ve su kür rejimi olmak üzere altı ana faktör göz önünde bulundurulmuştur. Sonuçlar GEP modelinin dikkate alınan aralıktaki geopolimerlerin basınç dayanımını tahmin etmek için güçlü bir araç olduğunu göstermektedir. Shahmansouri ve ark. [17] yüksek fırın cürufu (YFC) esaslı geopolimer betonun basınç dayanımını tahmin etmek amacıyla GEP kullanarak matematiksel modeller geliştirmişlerdir. Deneysel sonuçlar kullanılarak YFC tabanlı geopolimer beton için kapsamlı ve güvenilir bir basınç dayanımı veritabanı elde edilmiştir. Bu veritabanı 117 farklı karışımdan üretilen 351 numunenin basınç dayanımı sonuçlarını içermektedir. En etkili beş parametre olan numunelerin yaşı, NaOH çözeltisi konsantrasyonu, doğal zeolit miktarı, silis dumanı miktarı ve geopolimer betonun YFC içeriği modelleme için girdi parametreleri olarak kabul edilmiştir. Sonuçlar, önerilen modellerin doğru olduğunu ve yüksek tahmin kabiliyetine sahip olduğunu göstermiştir. Fakhrian ve ark. [18] yüksek sıcaklıklara maruz kalan geri dönüştürülmüş beton agregası içeren geopolimer harcın (GH) basınç dayanımını ve kütle kaybını tahmin etmek için GEP kullanarak 20 model geliştirmişlerdir. Sırasıyla, 0.95 ile 0.99 korelasyon katsayılarına sahip eğitim ve doğrulama aşamaları sayesinde modellerin öngördüğü sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında tutarlılık olduğu görülmüştür. GEP'in yüksek

sıcaklıklar altında geri dönüştürülmüş beton agregası içeren GH'ların hem basınç dayanımını hem de kütle kaybını tahmin etme kabiliyeti belirlenmiştir. Chu ve ark. [19] uçucu kül içeren geopolimer betonların basınç dayanımlarını GEP ve ÇDR yöntemleri ile tahmin etmişlerdir. GEP modeli ile ulaşılan sonuçların daha düşük istatistiksel hataya ve daha yüksek korelasyon katsayısına sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Su ve ark. [20] yüksek fırın cürufu ve metakaolin içeren geopolimer hamur karışımlarının basınç dayanımını istatistiksel olarak incelemişlerdir. Oluşturulan ÇDR modelleri sayesinde basınç dayanım tahminleri gerçekleştirilmiştir. Diğer algoritmalar ile kıyaslandığında ÇDR modellerinin çok daha şeffaf ve kolay kullanıma sahip olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışma GEP ve ÇDR tekniklerine dayalı olarak geliştirilerek hafif geopolimer harçların dayanım sonuçlarının yanısıra rötre özelliklerini tahmin eden modeller sunmaktadır. Ayrıca belirlenen istatistiksel parametreler ile kullanılan modelleme yöntemlerinin performans değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu modellerin hafif geopolimerlerin kullanımını içeren saha uygulamalarına uyması beklenmektedir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Materyal

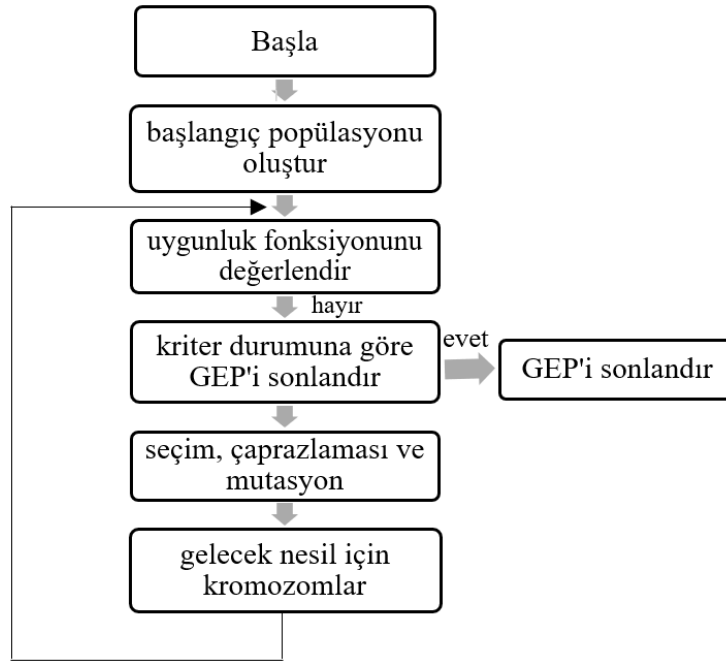
Bu çalışmada kullanılan malzemeler, F sınıfı uçucu kül, sodyum hidroksit (SH) çözeltisi, sodyum silikat (SS) çözeltisi, pomza agregası, nehir kumu ve süper akışkanlaştırıcıdır. Hafif geopolimer harç karışımları için SS/SH oranları 2.5, 2 ve 1.5 olarak SH konsantrasyonları ise 10 M, 12 M ve 14 M olarak belirlenmiştir. Ayrıca, alkali çözelti ve uçucu kül miktarlarındaki değişimin hafif geopolimer harçların incelenen özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için 0.45 ve 0.55 olmak üzere iki farklı alkali/uçucu kül (A/UK) oranı kullanılmıştır. Üretilen hafif geopolimer harç numuneleri için belirlenen karışım tasarımına Ekmen [21] tarafından yürütülen çalışmada detaylı bir şekilde yer verilmiştir.

### 2.2. Metot

İstatistiksel analiz, veri kümeleri veya sonuçları arasındaki olasılıkları bulmak için kullanılan nicel bir yöntemdir ve bir konunun araştırılmasında bulunan eğilimlerin veya kalıpların detaylandırılmasına yardımcı olmaktadır.

Çoklu doğrusal regresyon (ÇDR), kullanılan en yaygın modelleme yöntemlerinden biridir. Bu yöntem ile birden fazla bağımsız değişken varlığında istenilen çıktı parametresi tahmin edilebilmektedir. ÇDR; verilerin korelasyonunu ve yönlülüğünü analiz etme, modeli tahmin etme, modelin geçerliliğini ve kullanılabilirliğini değerlendirme olmak üzere üç aşamadan oluşur. İstatistiksel anlamlılığı temsil eden p değerinin 0.05'ten küçük olması halinde kullanılan değişkenlerin modelin oluşturulmasında yer alması uygun bulunmaktadır.

Geleneksel yöntemler ile çözümü uzun zaman alan karışık problemlerin daha kısa sürede sonuçlandırılması amacıyla farklı yöntemlere başvurulmuştur. Genetik algoritma (GA) yöntemi kısa sürede kabul edilebilir sonuçlar sunan ve gelişim mekanizmasını referans alan bir yöntemdir. Genetik algoritmalar; mutasyon, çaprazlama ve seçim gibi biyolojik olayları ilham alan operatörlere güvenerek problemleri optimize etmek ve yüksek kaliteli çözümler üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Genetik algoritmanın nasıl çalıştığı şu şekilde özetlenebilmektedir: Algoritma rastgele bir ilk popülasyon oluşturarak başlar, daha sonra bir dizi yeni popülasyon oluşturur ve her adımda algoritma bir sonraki popülasyonu oluşturmak için mevcut nesildeki bireyleri kullanır. GEP ile istenilen alanda ulaşılan veriler ve tahmin modelleri kullanılarak farklı çözümler elde edilebilmektedir. GEP model oluşumu için akış şeması Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. GEP model oluşumu için akış şeması

Modelin etkinliğinin ve verimliliğinin ölçümü için R olarak temsil edilen korelasyon katsayısı yaygın olarak kullanılmaktadır. R'nin, çıktıların temel aritmetiğine (bölme ve çarpma) duyarsızlığı nedeniyle, modelin doğruluğu için tek başına kullanımı yerine bu çalışmada aynı zamanda diğer istatistiksel ölçüler de dikkate alınmıştır. MSE; ortalama kare hata, RMSE; kök ortalama kare hata ve MAPE; ortalama mutlak yüzde hata anlamına gelmektedir. Belirtilen hata fonksiyonları için ifadeler Denklem (1-3) olarak sunulmuştur.

$$MSE : \frac{\sum_{i=1}^n (d_i - m_i)^2}{n} \quad (1)$$

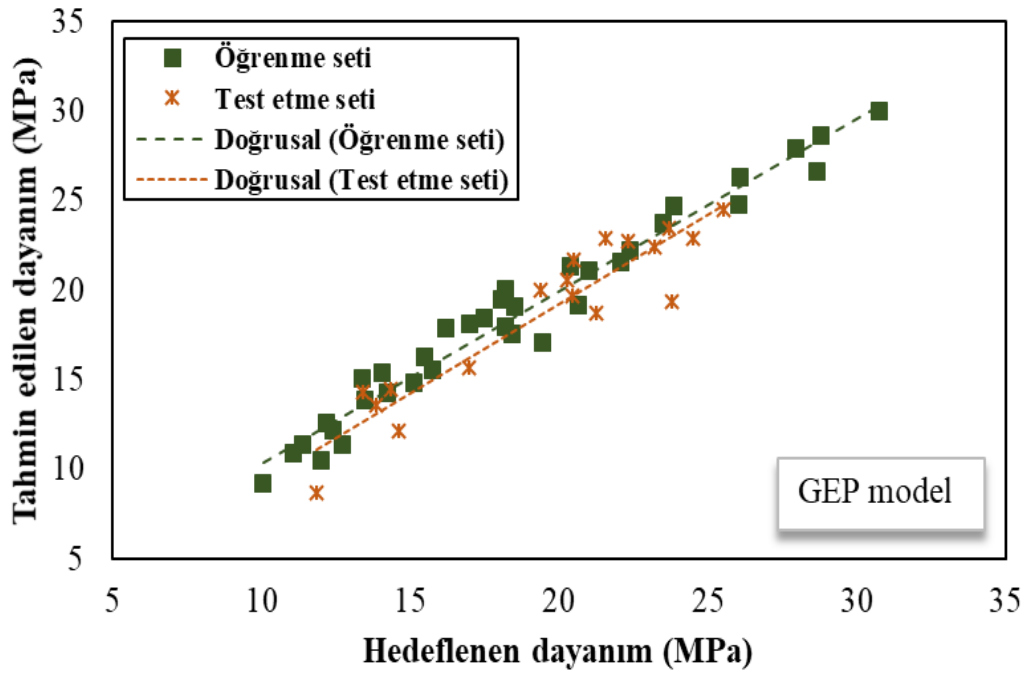
$$RMSE : \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - m_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$MAPE : \frac{100\% * \sum_{i=1}^n \left| \frac{d_i - m_i}{d_i} \right|}{n} \quad (3)$$

### 3. Araştırma Bulguları ve Tartışma

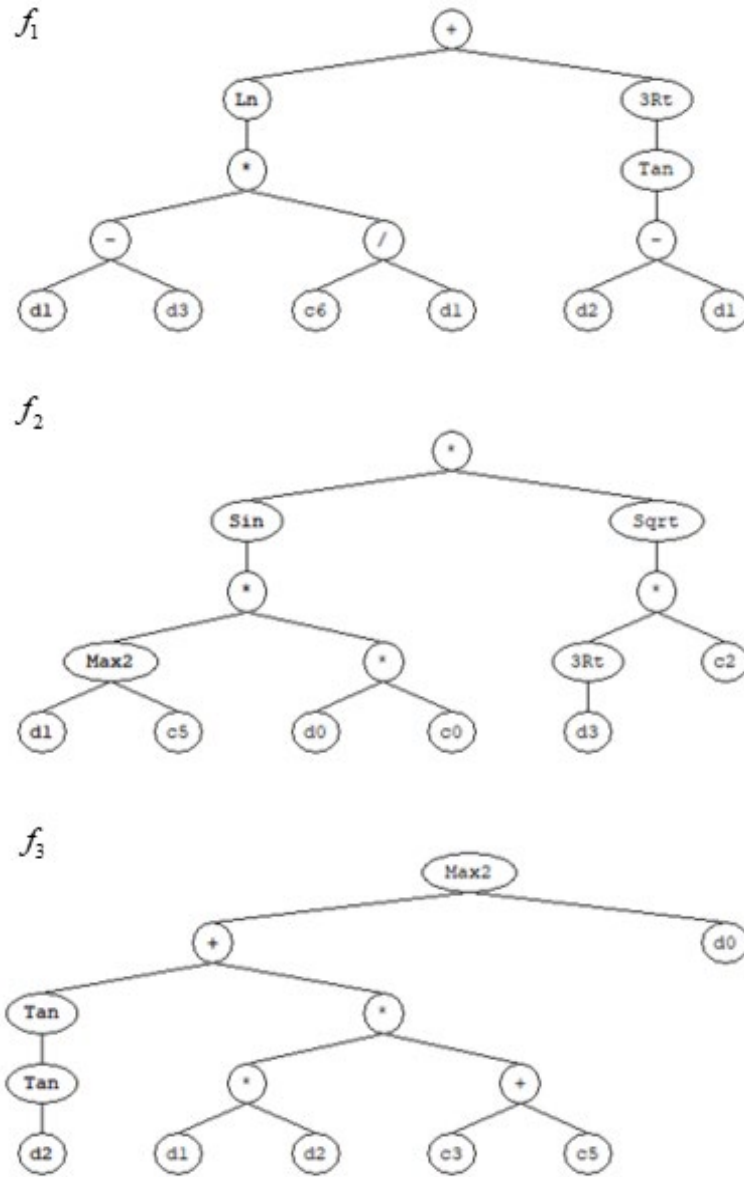
#### 3.1. Basınç dayanım sonuçlarının değerlendirilmesi

Üretilen hafif geopolimer harçlar için fiziksel test ile elde edilen basınç dayanım değerleri 11.41 MPa ile 30.74 MPa arasında değişmektedir. Dayanım sonuçlarına Ekmen [21] çalışmasında detaylı bir şekilde yer vermiştir. Bu kısımda, laboratuvar testi sonucunda ulaşılan dayanım sonuçları ile GEP kullanılarak elde edilen dayanım değerleri karşılaştırılarak irdelenmiştir. GEP modeli oluşturulurken ilk olarak tüm laboratuvar sonuçları programa girilmiştir. Program tarafından bu sonuçlar öğrenme ve test seti olarak 2'ye ayrıldıktan sonra en yüksek R ve RMSE değerlerini veren fonksiyon seçilerek model oluşumu tamamlanmıştır. Şekil 2'de GEP kullanılarak tahmin edilen dayanım değerleri ile hedeflenen dayanımlar arasındaki ilişki verilmiştir. Öğrenme veri seti ile ilk olarak algoritma oluşturulması sağlandıktan sonra test veri seti ile modellemenin uygunluğu test edilmiştir. Şekil 2'de hem öğrenme seti için kullanılan veriler hem de test seti için kullanılan değerler sunulmuştur. Öğrenme aşaması için 36 veri kullanılırken test aşamasında 18 veri kullanılmıştır. Her iki set için de tahmin edilen değerlerin deneysel çalışmadan elde edilen verilerle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Nazari [16] tarafından yapılan çalışmada da GEP modelinin geopolimerlerin basınç dayanım değerlerini tahmin etmede oldukça iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir.



Şekil 2. GEP modeli ile tahmin edilen dayanım değerleri ile hedeflenen değerler arasındaki ilişki

Çeşitli sodyum hidroksit molariteleri, alkali/uçucu kül oranları, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranları ve farklı yaşları içeren girdiler dikkate alınarak oluşturulan GEP modeli ile basınç dayanımları tahmin edilmiştir. Oluşturulan modeli temsil eden ağaç gösterimi Şekil 3'te, nihai sonuç ise Denklem (8)'de (Denklem (4-7)'de verilen denklemlerin toplamı) verilmiştir. Oluşturulan ağaç gösterimi sayesinde ulaşılan denklemi oluşturan parametreler arasındaki bağlantılar adım adım sunulabilmektedir.



Şekil 3. Oluşturulan GEP modelinin ağaç gösterimi

Modeli temsil eden eşitliklerde  $d_0$ ; molariteyi,  $d_1$ ; A/UK oranını,  $d_2$ ; SS/SH oranını,  $d_3$ ; yaş parametresini temsil etmektedir. Denklem (8) için elde edilen korelasyon katsayısı 0.937 olarak bulunmuştur. Elde edilen bu değer 1'e oldukça yakın olması kullanılan model ile ulaşılan verilerin mevcut değerlerin etrafında kümelendiğini göstermektedir.

$$f_1 = \ln \left[ \frac{-4.106 \times (d_1 - d_3)}{d_1} \right] + \sqrt[3]{A} \quad (4)$$

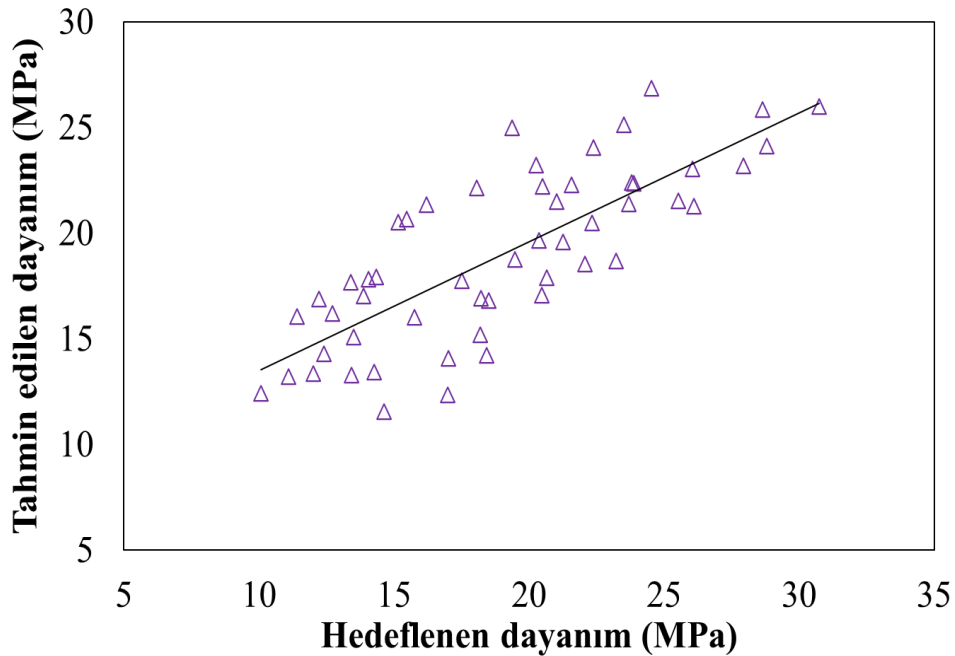
$$f_1' = \ln \left[ \frac{-4.106 \times (d_1 - d_3)}{d_1} \right] - \sqrt[3]{-A} \quad (5)$$

$$f_2 = \sin \left[ 3.613 \times d_0 \times \max(d_1; 0.453) \right] \times \sqrt{7.341 \times \sqrt[3]{A}} \quad (6)$$

$$f_3 = \max \left[ \tan(\tan d_2) + 11.908 \times d_1 \times d_2; d_0 \right] \quad (7)$$

$$f_{c(GEP)} = \left\{ \begin{array}{ll} f_1 + f_2 + f_3 & A \geq 0 \\ f_1' + f_2 + f_3 & A < 0 \end{array} \right\} \quad (8)$$

ÇDR sayesinde laboratuvar çalışması ile elde edilen basınç dayanım değerlerinin kullanılması sonucunda GEP ile oluşturulan modelden farklı bir model oluşturulmuştur. Laboratuvar çalışması sonucunda elde edilen değerler minitap programının veri tabanına girildikten sonra çoklu doğrusal denklem oluşturulması hedeflenerek en yüksek R değerini veren fonksiyona ulaşılmıştır. Bu kapsamda hedeflenen dayanım değerleri ile tahmin edilen değerler arasındaki lineer ilişki Şekil 4'te gösterilmiştir.

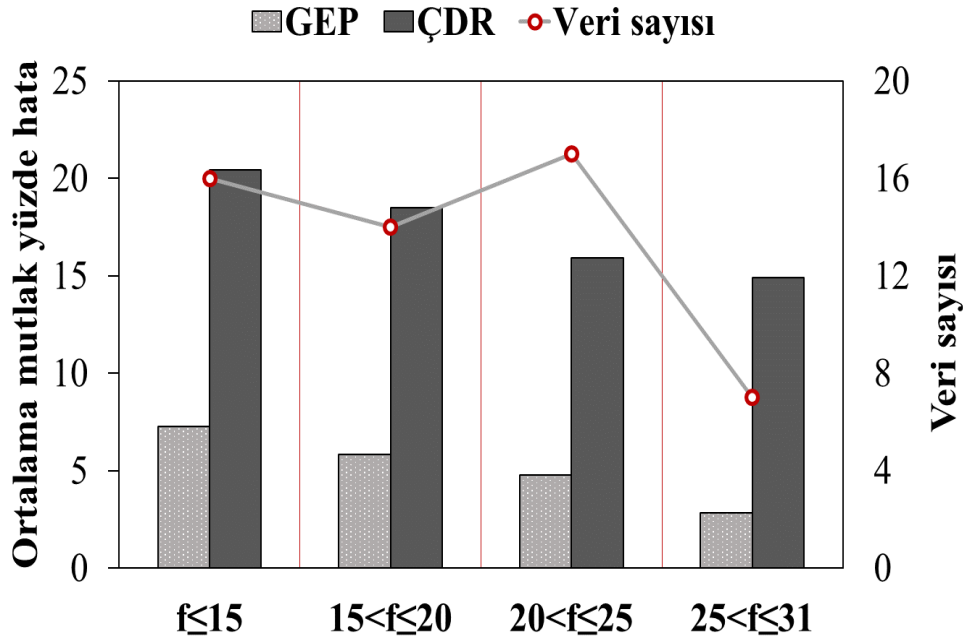


Şekil 4. ÇDR modeli ile tahmin edilen dayanım değerleri ile hedeflenen değerler arasındaki ilişki

ÇDR ile oluşturulan tahmin modelini temsil eden eşitlik, Denklem (9)'da sunulmuştur. Girdi parametreleri olan  $d_0$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  ve  $d_3$  sırasıyla SH molaritesini, A/UK oranını, SS/SH oranını ve yaş değişimini göstermektedir. Oluşturulan tahmin modelini temsil eden denklem için elde edilen korelasyon katsayısı 0.787 olarak bulunmuştur.

$$f_{c(\text{ÇDR})} = 34.98 + 0.434 \times d_0 - 10.13 \times d_1 - 8.94 \times d_2 + 0.135 \times d_3 \quad (9)$$

Şekil 5'te de görüldüğü gibi hem GEP hem de ÇDR modeli kullanılarak ulaşılan bu dayanım değerleri kategorilere ayrılarak, her bir kategoride bulunan veri sayısını dikkate alacak şekilde ortalama mutlak yüzde hata değerleri sunulmuştur. Değerler; 15 MPa'dan küçük, 15 MPa ile 20 MPa, 20 MPa ile 25 MPa ve 25 MPa ile 31 MPa arasında olacak şekilde 4 farklı kategoriye ayrılmıştır. Bu kategoride bulunan veri sayıları sırasıyla 16, 14, 17 ve 7 olmuştur. ÇDR analizi yardımı ile ulaşılan hata yüzdelerinin GEP kullanılarak ulaşılan hata yüzdelerinden daha yüksek olması ÇDR ile elde edilen verilerin hedeflenen verilere yakınlığının ve uygunluğunun daha düşük olduğunu göstermiştir. En yüksek hata 15 MPa'dan küçük dayanım değerleri için elde edilirken en düşük hata oranları 25 MPa ile 31 MPa arasında bulunan dayanım değerleri için elde edilmiştir. Ortalama mutlak yüzde hatalarının kabul edilebilir bir düzeyde olması, oluşturulan model sayesinde ulaşılan verilerin hedeflenen değerlere yakınlığının ve dolayısıyla oluşturulan modelin uygunluğunun göstergesidir.

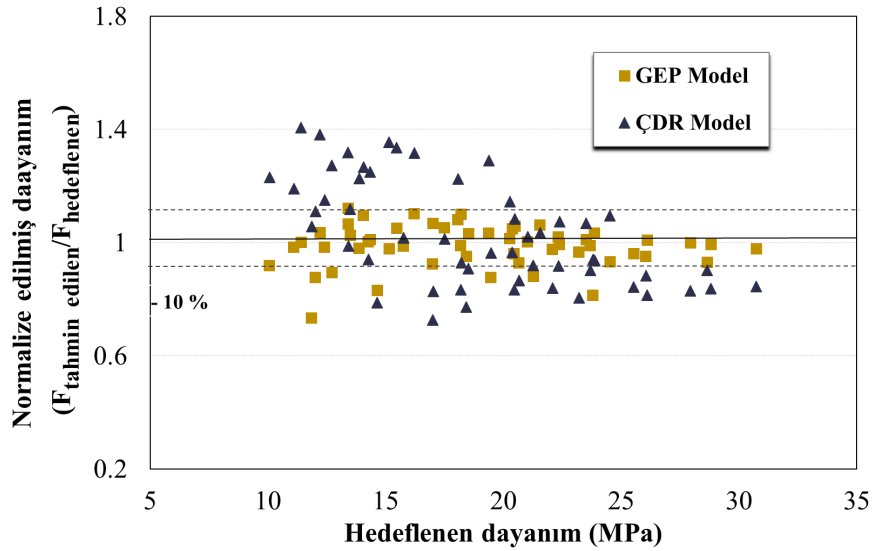


Şekil 5. GEP ve ÇDR modelleri kullanılarak elde edilen dayanım değerleri için ortalama yüzde hata sonuçları

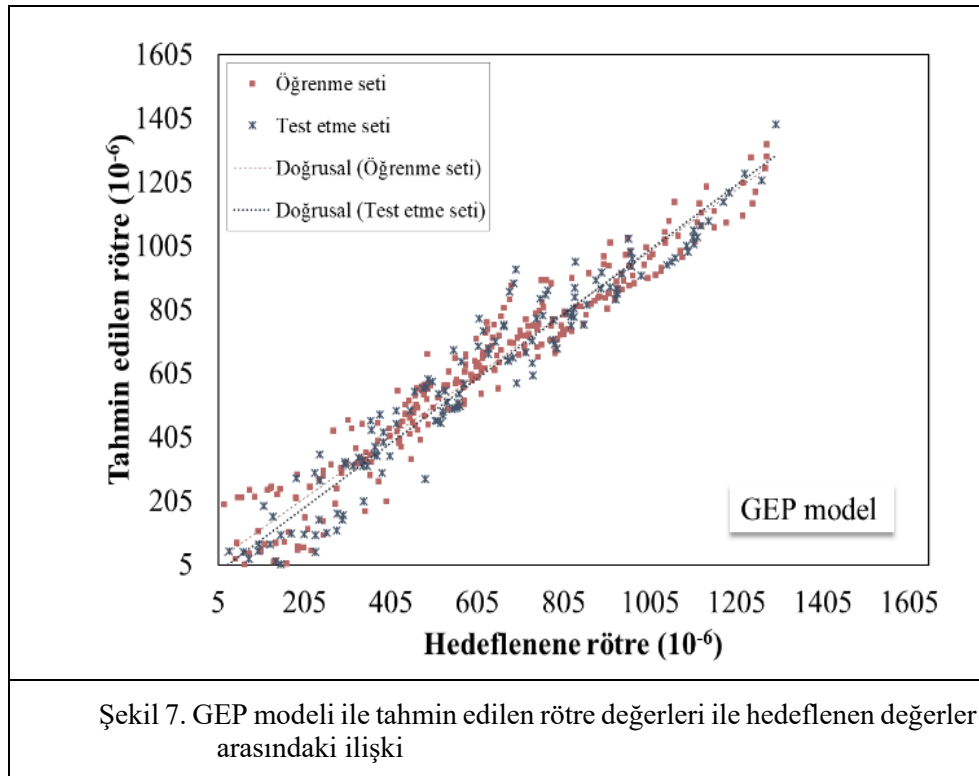
Şekil 6'da hem GEP hem de ÇDR modeli için hedeflenen dayanımlara karşılık gelen normalize edilmiş dayanım değerleri sunulmuştur. Normalize edilmiş dayanım değerleri tahmin edilen dayanım değerlerinin hedeflenen dayanım değerlerine bölünmesi ile elde edilmiştir. Bu oranın 1'e yakınlığı oluşturulan modellerin doğruluğunun göstergesi olarak düşünülebilmektedir. Şekil 6'da görüldüğü gibi



ÇDR ile oluşturulan model yardımı ile elde edilen dayanım sonuçları GEP ile elde edilen verilerden daha uyumsuz sonuçlar sunmuştur. Bu durum, 0.937 korelasyon katsayısına sahip GEP modelinin 0.787 korelasyon katsayısına sahip ÇDR'den daha iyi tahminler yaptığını doğrulamaktadır.



Şekil 6. GEP ve ÇDR modelleri için normalize edilmiş dayanım değerleri



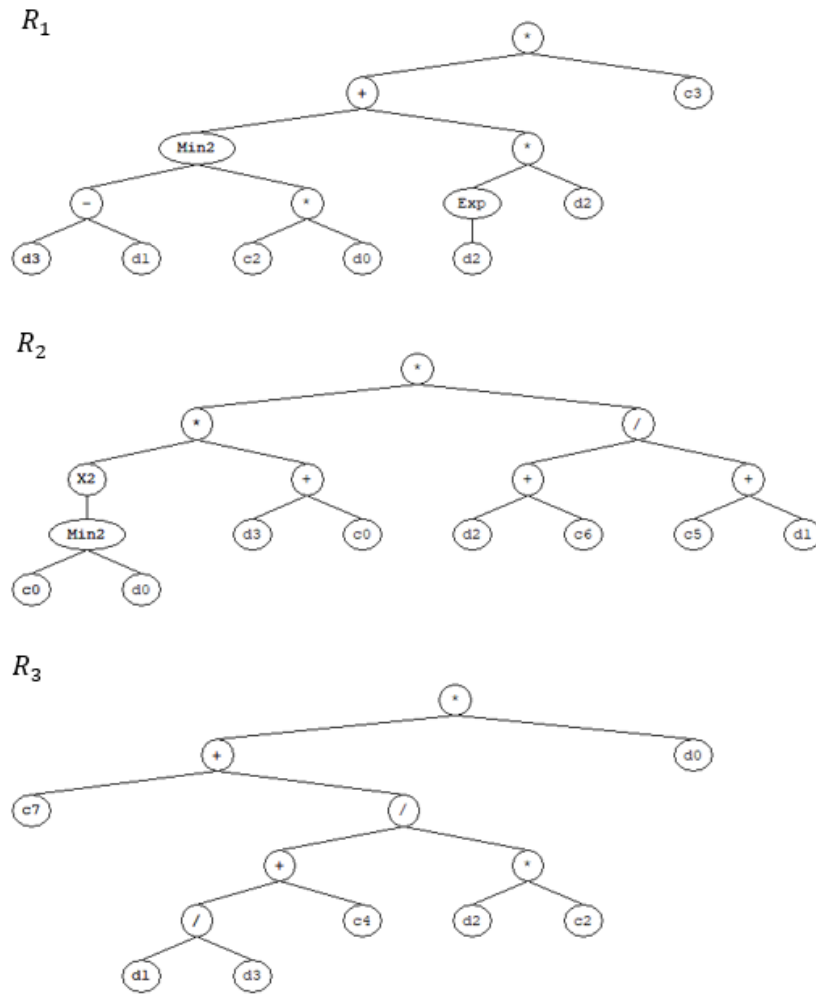
Şekil 7. GEP modeli ile tahmin edilen rötre değerleri ile hedeflenen değerler arasındaki ilişki

### 3.2. Rötre sonuçlarının değerlendirilmesi

Üretilen hafif geopolimer harcın şekil değiştirme özelliğini yansıtması sebebiyle rötre değerlerinin irdelenmesi oldukça önemlidir. Ekmen [21] çalışmasında ulaşılan rötre sonuçlarına detaylı

bir şekilde yer vermiştir. Bu kısımda rötre sonuçları istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve modellenmiştir. Şekil 7’de, GEP kullanılarak oluşturulan model sayesinde elde edilen tahmin değerleri ile mevcut rötre değerleri sunulmuştur. SH molaritesi, SS/SH oranı, A/UK oranı ve yaş parametreleri dikkate alınarak hazırlanan hafif geopolimer harç numuneleri için laboratuvar ortamında gerçekleştirilen ölçümler sonucunda elde edilen rötre değerleri 20 ile 1296.43 mikro uzama arasında değişmiştir. Uygun model oluşturulurken ilk olarak 288 adet rötre verisi kullanılarak öğrenme seti oluşturulmuş daha sonra 144 adet veri ile test etme aşaması gerçekleştirilmiştir. Şekil 7 tahmin edilen ve hedeflenen değerler arasındaki ilişkiyi oluşturulan modelin uygunluğunu göstermektedir.

Şekil 8’de, GEP ile oluşturulan modele ait denklemlerin arasındaki bağlantıların oluşma sırasını veren ağaç gösterimi verilmiştir. Nihai eşitlik ise, Denklem (10-12)’de verilen denklemlerin toplamından oluşan Denklem (13)’te verilmiştir.



Şekil 8. Oluşturulan GEP modelinin ağaç gösterimi

Elde edilen eşitliklerde belirtilen  $d_0$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  ve  $d_3$  sırasıyla yaş, SH molaritesi, SS/SH oranı ve A/UK oranı parametrelerini temsil etmektedir. Modeli temsil eden Denklem (13) için korelasyon katsayısı 0.97 olarak bulunmuştur.

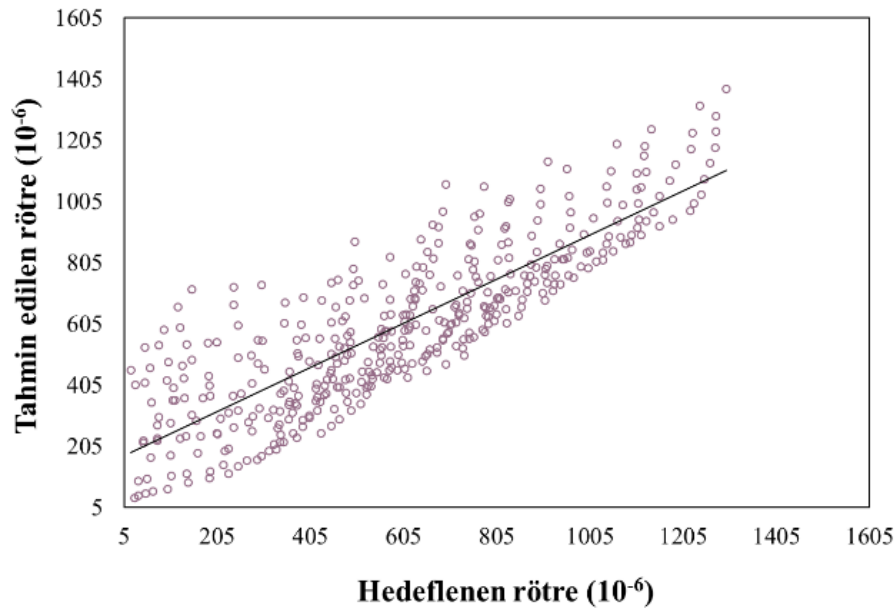
$$R_1 = ([\min[(d_3 - d_1); (-0.349 \times d_0)] + (d_2 \times e^{d_2})] \times 10.687) \quad (10)$$

$$R_2 = ([\min[8.804; d_0]^2 \times (8.804 + d_3)] \times [\frac{(4.53 + d_2)}{-1.257 + d_1}]) \quad (11)$$

$$R_3 = ([10.612 + \frac{(\frac{d_1}{d_3} - 12.332)}{-1.495 \times d_2}] \times d_0) \quad (12)$$

$$R_{(GEP)} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (13)$$

Elde edilen veriler için aynı zamanda ÇDR kullanılarak da tahmin modeli oluşturulmuş ve hedeflenen rötre değerleri ile tahmin edilen rötre değerleri arasındaki ilişki Şekil 9'da sunulmuştur.



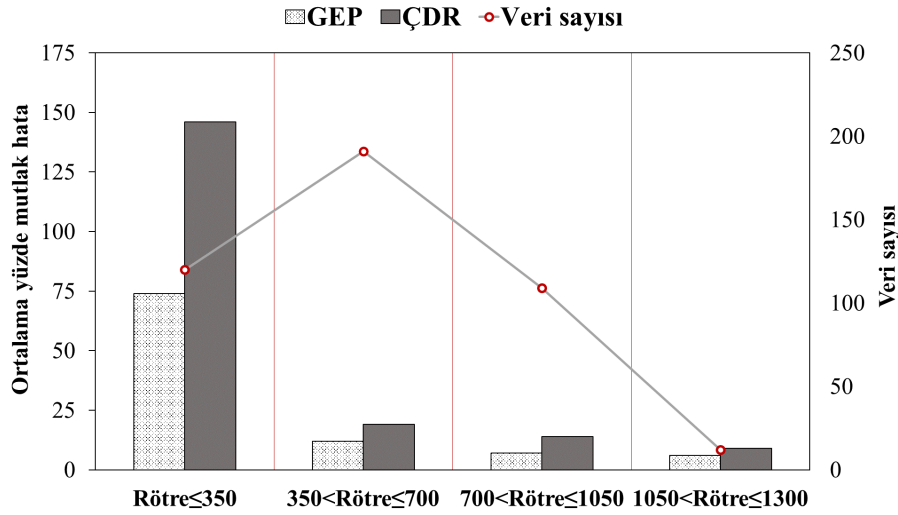
Şekil 9. ÇDR modeli ile tahmin edilen rötre değerleri ile hedeflenen değerler arasındaki ilişki

ÇDR ile oluşturulan tahmin modelini temsil eden eşitlik, Denklem (14)'te sunulmuştur. Girdi parametreleri olan  $d_0$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  ve  $d_3$  sırasıyla yaş, SH molarite değeri, SS/SH oranı ve A/UK oranı

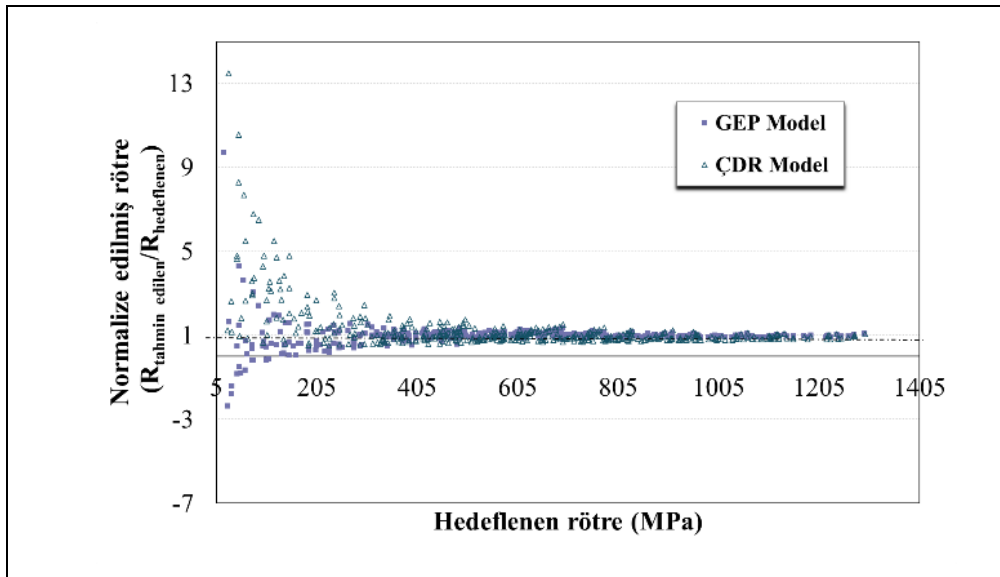
değişimini göstermektedir. Oluşturulan tahmin modelini temsil eden denklem için elde edilen korelasyon katsayısı 0.849 olarak bulunmuştur.

$$R_{(\text{ÇDR})} = 152 + 7.378 \times d_0 - 65.92 \times d_1 + 361.3 \times d_2 + 530 \times d_3 \quad (14)$$

Şekil 10'da, kategorilere ayrılan rötre değerleri için kullanılan veri sayıları ve elde edilen ortalama yüzde mutlak hata oranları gösterilmiştir. Mikro uzaması 350 'den küçük, 350 ile 700 arasında, 700 ile 1050 arasında ve 1050 ile 1300 arasında olacak şekilde oluşturulan 4 farklı kategoride bulunan veri sayıları sırasıyla 100, 165, 129 ve 38 olmuştur. Şekil 10'da görüldüğü üzere ÇDR modeli ile elde edilen veriler için ortalama yüzde mutlak hata değerleri GEP modeli ile elde edilen sonuçlardan daha yüksek olmuştur. Bu durum GEP modelinin daha uygun olduğunun göstergesidir. Aynı zamanda artan rötre değerleri ile ulaşılan ortalama yüzde hatalarının da düştüğü görülmektedir.



Şekil 10. GEP ve ÇDR modelleri kullanılarak elde edilen dayanım değerleri için ortalama yüzde hata sonuçları



Şekil 21. GEP ve ÇDR modelleri için normalize edilmiş dayanım değerleri

Şekil 11’de hem GEP hem de ÇDR modeli için hedeflenen rötre değerlerine karşılık gelen normalize edilmiş rötre değerleri sunulmuştur. Tahmin edilen rötre değerlerinin hedeflenen rötre değerlerine bölünmesi ile elde edilen normalize rötrelerin 1’e yakınlığı oluşturulan modelin uygunluğunu göstermektedir. Şekil 11’de ÇDR modeli ile oluşturulan ve mikro uzaması 350 ‘den küçük rötre değerleri için normalize edilmiş rötre sonuçlarında görülen bariz sapma aynı zamanda Şekil 10’da da görülmektedir.

Çizelge 1’de dayanım ve rötre sonuçları için, GEP ve ÇDR ile elde edilen tahmin modelleri sonucunda ortaya çıkan veriler kullanılarak, hesaplanan MSE (ortalama kare hata), RMSE (kök ortalama kare hata), MAPE (ortalama mutlak yüzde hata) ve R (korelasyon katsayısı) parametreleri verilmiştir. MSE, RMSE ve MAPE sonuçları ile kullanılan model sayesinde ulaşılan verilerin mevcut hedeflenen değerlere uyumu belirlenebilmektedir. Elde edilen bu değerlerin artması tahmin değerlerindeki hata oranlarının artması olarak ortaya çıkmaktadır.

Diğer tüm parametrelerin de dikkate alınmasıyla birlikte, R korelasyon katsayılarındaki artış da verilerin uygunluğunun bir diğer göstergesi olabilmektedir. Bu durumda ortaya çıkan sonuçlar değerlendirildiğinde, GEP modeli kullanılarak oluşturulan tüm veri tahminlerinin ÇDR modeli ile oluşturulan veri tahminlerine göre hedeflenen değerlere daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Çizelge 1. İstatistiksel değerlendirme

	Model	MSE	RMSE	MAPE	R
<b>Dayanım</b>	GEPtest	2.983	1.727	7.186	0.937
	ÇDR	10.122	3.181	15.735	0.787
<b>Rötre</b>	GEPtest	6735.610	82.071	22.937	0.9697
	ÇDR	27242.942	165.054	54.342	0.8487

#### 4. Sonuçlar

Çalışma kapsamında, girdi parametreleri olarak SH molaritesi, A/UK oranı, SS/SH oranı ve yaş değişimi kullanılarak hem ÇDR hem de GEP modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modelleri temsil eden denklemler, korelasyon katsayıları, ortalama yüzde mutlak hata oranları, normalize edilmiş değerler belirlenerek hafif geopolimer harçların basınç dayanımları ve rötre sonuçları istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen değerlendirme sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- GEP modeli kullanılarak elde edilen denklem için korelasyon katsayısı 0.937 olarak bulunmuştur.
- ÇDR ile oluşturulan tahmin modelini temsil eden denklem için elde edilen korelasyon katsayısı 0.787 olarak bulunmuştur.

- ÇDR modeli ile elde edilen veriler için ortalama yüzde mutlak hata değerleri GEP modeli ile elde edilen sonuçlardan daha yüksek olmuştur.
- Artan rötre değerleri ile ulaşılan ortalama yüzde hatalarının da düştüğü görülmüştür.
- ÇDR ile oluşturulan modelde, mikro uzaması 350 ‘den küçük rötre değerleri için normalize edilmiş rötre sonuçlarında bariz bir sapma görülmüştür.
- GEP modeli kullanılarak oluşturulan tüm veri tahminlerinin ÇDR modeli ile oluşturulan veri tahminlerine göre hedeflenen değerlere daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

### Teşekkür

Bu çalışma; Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi birimi tarafından HÜBAP/18252 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

### Kaynaklar

- [1] D. Hardjito, S.E. Wallah, D. M. Sumajouw and B.V. Rangan, Factors influencing the compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete. *Civil engineering dimension*, 6(2), 88-93, 2004.
- [2] M. L. Oliveira, M. Izquierdo, X. Querol, R. N. Lieberman, B. K. Saikia, L. F. Silva, Nanoparticles from construction wastes: a problem to health and the environment. *Journal of Cleaner Production*, 219, 236-243, 2019.
- [3] R. Siddique, P. Aggarwal and Y. Aggarwal, Prediction of compressive strength of self-compacting concrete containing bottom ash using artificial neural networks. *Advances in engineering software*, 42(10), 780-786, 2011.
- [4] K.C. Onyelowe, F. E. Jalal, M. E. Onyia, I. C. Onuoha. and G. U. Alaneme, Application of gene expression programming to evaluate strength characteristics of hydrated-lime-activated rice husk ash-treated expansive soil. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 2021.
- [5] F. Farooq, W. Ahmed, A. Akbar, F. Aslam and R. Alyousef, Predictive modeling for sustainable high-performance concrete from industrial wastes: A comparison and optimization of models using ensemble learners. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126032, 2021.
- [6] J. R. Koza, *Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection*. vol. 1. MIT Press, 1992.
- [7] M. A. Khan, S. A. Memon, F. Farooq, M. F. Javed, F. Aslam, and R. Alyousef, Compressive strength of fly-ash-based geopolymer concrete by gene expression programming and random forest. *Advances in Civil Engineering*, 2021.
- [8] B. S. R. Yeddula and S. Karthiyaini, Experimental investigations and GEP modelling of compressive strength of ferrosialate based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 236, 117602, 2020.
- [9] A. Nazari and F. P. Torgal, Modeling the compressive strength of geopolymeric binders by gene expression programming-GEP. *Expert Systems with Applications*, 40(14), 5427-5438, 2013.
- [10] A. Shahmansouri, H. A. Bengar and S. Ghanbari, Compressive strength prediction of eco-efficient GGBS-based geopolymer concrete using GEP method. *Journal of Building Engineering*, 31, 101326, 2020.

- [11] A. Nazari, Application of gene expression programming to predict the compressive damage of lightweight aluminosilicate geopolymer. *Neural Computing and Applications*, 31(2), 767-776, 2019.
- [12] H. Y. Leong, D. E. L. Ong, J. G. Sanjayan and A. A. Nazari, genetic programming predictive model for parametric study of factors affecting strength of geopolymers. *RSC advances*, 5(104), 85630-85639, 2015.
- [13] B. A. Fillenwarth, and S. M. Sastry, Development of a predictive optimization model for the compressive strength of sodium activated fly ash based geopolymer pastes. *Fuel*, 147, 141-146, 2015.
- [14] H. H. Chu, M. A. Khan, M. Javed, A. Zafar, M. I. Khan, H. Alabduljabbar and S. Qayyum, Sustainable use of fly-ash: Use of gene-expression programming (GEP) and multi-expression programming (MEP) for forecasting the compressive strength geopolymer concrete. *Ain Shams Engineering Journal*, 2021.
- [15] M. A. Khan, A. Zafar, F. Farooq, M. F. Javed, R. Alyousef, H. Alabduljabbar and M. I. Khan, Geopolymer concrete compressive strength via artificial neural network, adaptive neuro fuzzy interface system, and gene expression programming with k-fold cross validation. *Front. ater.* 8: 621163, 2021.
- [16] A. Nazari, Compressive strength of geopolymers produced by ordinary Portland cement: Application of genetic programming for design. *Materials & Design*, 43, 356-366, 2013.
- [17] S. Fakhrian, H. Behbahanih and S. Mashhadi, Predicting post-fire behavior of green geopolymer mortar containing recycled concrete aggregate via GEP approach. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, 4(2): 22-45, 2020.
- [18] A.A. Shahmansouri, H. A. Bengar, and S. Ghanbari, Experimental investigation and predictive modeling of compressive strength of pozzolanic geopolymer concrete using gene expression programming. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 5(1), 92-117, 2020.
- [19] H.H. Chu, M.A. Khan, M. Javed, A. Zafar, M.I. Khan, H. Alabduljabbar and S. Qayyum. Sustainable use of fly-ash: Use of gene-expression programming (GEP) and multi-expression programming (MEP) for forecasting the compressive strength geopolymer concrete. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(4), 3603-3617, 2021.
- [20] M. Su, Q. Zhong, and H. Peng. Regularized multivariate polynomial regression analysis of the compressive strength of slag-metakaolin geopolymer pastes based on experimental data. *Construction and Building Materials*, 303, 124529, 2021.
- [21] Ekmen, Ş. Uçucu kül esaslı hafif geopolimer harçların taze ve sertleşmiş özelliklerinin incelenmesi, modellenmesi ve optimizasyonu. Doktora tezi, Harran Üniversitesi, 129, 2021.