

FİBERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ SİLİS DUMANI İÇEREN BETONLARIN YARMADA ÇEKME DAYANIMININ GEP İLE TAHMİNİ

Mustafa SARIDEMİR^{*1}, İlker Fatih KARA²

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Niğde Üniversitesi, Niğde, Türkiye
²İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, Türkiye

Geliş / Received: 23.05.2016

Düzeltilmelerin gelişi / Received in revised form: 17.06.2016

Kabul / Accepted: 20.06.2016

ÖZ

Bu çalışmada, çelik fiberle güçlendirilmiş silis dumanı içeren betonların farklı günlerdeki yarmada çekme dayanımı ($f_{yçd}$) değerlerini tahmin etmek için gen ifadeli programlama (GEP) tekniği kullanılmıştır. GEP tekniğinde model oluşturmak amacıyla, 126 farklı karışımda üretilen 186 numunenin deneysel sonuçları literatürdeki farklı çalışmalardan elde edilmiştir. Modelde girdi değişkenleri olarak numune yaşı, beton karışım miktarları ve çelik fiberin özellikleri; çıktı değişkeni olarak ise $f_{yçd}$ değerleri kullanılmıştır. Bu girdi değişkenleri ile çelik fiberle güçlendirilmiş silis dumanı içeren betonların farklı günlerdeki $f_{yçd}$ değerleri, deneysel sonuçlara yakın olarak modelde tahmin edilmiştir. Modeldeki eğitim, test ve doğrulama sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması, çelik fiberle güçlendirilmiş silis dumanı içeren betonların farklı günlerdeki $f_{yçd}$ değerlerinin tahmini için GEP tekniğinin güçlü potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. Bu durumu, modelden elde edilen eğitim, test ve doğrulama sonuçları ile deneysel sonuçları karşılaştırmak için kullanılan R-kare (R^2), mutlak yüzdelik hata ortalaması (MAPE) ve karesel ortalamının karekökü (RMSE) ile ifade edilen istatistiksel parametre değerleri açıkça göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Çelik fiber, silis dumanı, beton, yarmada çekme dayanımı

PREDICTION OF SPLITTING TENSILE STRENGTH OF FIBER REINFORCED CONCRETES CONTAINING SILICA FUME BY GEP

ABSTRACT

In the present study, the gene expression programming (GEP) technique is used for predicting the splitting tensile strength (f_{sts}) values of steel fiber reinforced concretes containing silica fume at different days. The experimental results of 186 specimens produced with 126 different mixtures were obtained from the different literatures for the purpose of constituting the model in the GEP technique. In the sets of the model, the age of specimen, the amounts of concrete mixtures and the properties of steel fibers were entered as the inputs variables, while the f_{sts} were used as the output variable in the model. According to these input variables, the f_{sts} values of steel fiber reinforced concretes containing silica fume at different days are in accordance with the experimental results in the model. The results of the training, testing and validation of models compared with the experimental results have shown that GEP technique has strong potential for predicting the f_{sts} values of concretes containing silica fume at different days. The statistical parameters expressed with the R-squared (R^2), the mean absolute percentage error (MAPE) and the root mean square error (RMSE) clearly show the applicability of GEP model.

Keywords: Steel fiber, silica fume, concrete, splitting tensile strength

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 535 247 49 93; e-mail/e-posta: msdemir@nigde.edu.tr

FİBERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ SİLİS DUMANI İÇEREN BETONLARIN YARMADA ÇEKME DAYANIMININ GEP İLE TAHMİNİ

1. GİRİŞ

Günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesi olan betonun bazı kullanım alanlarındaki çekme dayanımı, aşınma dayanımı, yorulma dayanımı, çeşitli nedenlerle oluşan çatlama sonrası yük taşıma kapasitesini ve enerji yutma kapasitesini arttırmak için çelik lifler belirli oranlarda beton karışımlarında kullanılmaktadır. Beton karışımlarında kullanılan çelik lifler betonun yapısını değiştirmekte ve betona plastik davranış özelliği kazandırmaktadır. Bu davranış özelliği üzerinde fiberin konsantrasyonu, en-boy oranı, geometrisi, yönelimi, dağılımı ve bağlayıcı matris ile bağlanması etkilidir [1]. Ayrıca, bağlayıcı matris içerisine çelik fiberin eklenmesi kuruma büzülmesinin azaltılmasında da etkili olmaktadır [2-5].

Son yıllarda betonun fiziksel, mekanik, dayanıklılık ve geçirimsizlik özelliklerini iyileştirmek ve beton maliyetini azaltmak için, bağlayıcılık özelliğine sahip birçok mineral katkı doğrudan çimento üretiminde veya belirli oranlarda çimento yer değişim malzemesi olarak beton üretiminde kullanılmaktadır [6, 7]. Mineral katkıların beton içerisindeki davranışı fiziksel ve kimyasal olarak gerçekleşmektedir. Mineral katkıların matristeki çimento tanecikleri arasına girerek boşlukları doldurması ve matris ile agrega ara yüzeyindeki boşluk boyutunu azaltması fiziksel davranışdır. Mineral katkıların zayıf kalsiyum-hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) kristalleri ile girdiği reaksiyon sonucunda oluşan kalsiyum silika hidrat jelleri ise kimyasal davranışdır [8, 9]. Özellikle uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi endüstriyel yan ürünlerin beton üretiminde değerlendirilmesi doğal kaynakların korunmasına, çevresel kirliliğin azaltılmasına ve beton özelliklerinin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır.[10-12]. Çimento pastası ile agrega ara yüzeyinin geliştirilmesine önemli katkı sağlamasından dolayı, bu endüstriyel yan ürünlerden biri olan silis dumanı betonun erken dayanım ve dayanıklılığını geliştirmek ve yüksek dayanımlı beton üretmek için kullanılmaktadır [13,14]. Ancak birçok çalışma silis dumanı ilave edilen betonun daha kırılgan bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, silis dumanı gibi mineral katkıların beton üretiminde kullanılması büzülmenin neden olduğu erken yaşlardaki çatlak eğilimine de neden olabilir [14,15]. Bu durumları engellemek için beton karışımlarına fiber eklenebilir.

Silis dumanı içeren beton karışımlarına çelik fiber ilavesinin etkisini değerlendirmek için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Nili ve Afroughsabet [16] betonun darbe direnci ve mekanik özellikleri üzerine çelik fiber ve silis dumanının etkisini araştırmışlardır. Karışımlarda % 0,0, 0,5 ve 1,0 hacim fraksiyonlarında çelik fiber ve % 0 ve 8 oranlarında silis dumanını çimento ile yer değiştirerek kullanmışlardır. Deneysel sonuçlarda çelik fiber ilavesinin betonun dayanım performansını, özellikle $f_{y\text{cd}}$ ve eğilme dayanımı değerlerini geliştirdiğini gözlemişlerdir. Bununla birlikte, çelik fiberle güçlendirilen silis dumanı içeren numunelerin darbe direnci ve sünekliliğinin önemli ölçüde arttığını belirtmişlerdir. Şahin ve Köksal [17] yüksek dayanımlı betonun kırılma enerjisi üzerine hem çelik fiber hem de matris dayanımının etkisini araştırmışlardır. Karışımlarda iki farklı çekme dayanımına sahip çelik fiberleri % 0,00, 0,33, 0,67 ve 1,00 hacim fraksiyonlarında kullanmışlardır. Çelik fiber ilavesinin betonun basınç dayanımı, $f_{y\text{cd}}$, eğilmede çekme dayanımı ve kırılma enerjisinin artmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Özellikle silis dumanı içeren numunelerde bu artışın daha da fazla olduğunu gözlemişlerdir. Al-Ameeri [18] kendiliğinden yerleşen betonun bazı mekanik özellikleri üzerine çelik fiberin etkisini araştırmıştır. Karışımlarda çelik fiberleri % 0,00, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25 ve 1,50 hacimce kullanmışlardır. Karışımlarda çelik fiber ilavesi arttıkça işlenebilirliğin azaldığını belirtmiştir. Çelik fiber ilavesi ile basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve $f_{y\text{cd}}$ değerlerinin arttığını ifade etmiştir. En yüksek basınç dayanımı değerlerini %0,75 çelik fiber içeriğinde gözlerken, çelik fiber içeriği arttıkça eğilme dayanımı ve $f_{y\text{cd}}$ değerlerinin arttığını da gözlemiştir. Eren ve Çelik [19] yüksek dayanımlı betonun işlenebilirlik, basınç dayanımı ve $f_{y\text{cd}}$ üzerine silis dumanı ve çelik fiberin etkisini araştırmışlardır. Karışımlarda %0,0, 0,5, 1,0, 1,5 ve 2,0 hacim oranlarında çelik fiber ve % 0, 5 ve 10,0 oranlarında silis dumanını çimento ile yer değiştirerek kullanmışlardır. Çelik fiber içeriği arttıkça işlenebilirliğin azaldığını, % 0,5 ve 1,0 oranlarında en yüksek basınç dayanımı değerlerini ve % 1 ve 2 oranlarında en yüksek $f_{y\text{cd}}$ değerlerini gözlemişlerdir. Karışımlarda kullanılan çelik fiberlerin boy/çap oranlarının da etkili olduğunu gözlemişlerdir. Ayrıca, çelik fiber içeren karışımlarda silis dumanı içeriğinin artmasıyla basınç dayanımı ve $f_{y\text{cd}}$ değerlerinin arttığını belirtmişlerdir. Ramadoss [20] yüksek dayanımlı betonun $f_{y\text{cd}}$ üzerine çelik fiber ve silis dumanının etkisini araştırmıştır. 0,40, 0,35, 0,30 ve 0,25 su-bağlayıcı oranlı karışımlarda % 0,0, 0,5, 1,0 ve 1,5 hacim fraksiyonlarında çelik fiber ve % 0, 5 ve 10 oranlarında silis dumanını çimento ile yer değiştirerek kullanmıştır. Su-bağlayıcı oranı azaldıkça ve çelik fiber ile silis dumanı içeriği arttıkça basınç dayanımı ve $f_{y\text{cd}}$ değerlerinin arttığını belirtmiştir. Köksal ve ark. [21] yüksek dayanımlı betonun mekanik özellikleri üzerine çelik fiber ve silis dumanının etkisini araştırmışlardır. Karışımlarda % 0,0, 0,5 ve 1,0 hacim fraksiyonlarında iki farklı boy/çap oranında çelik fiber ve %0, 5, 10 ve 15 oranlarında silis dumanının çimento ile yer değiştirerek kullanmışlardır. Silis dumanı ilavesinin basınç dayanımı, $f_{y\text{cd}}$, eğilme dayanımı ve elastisite modülü değerlerinin artmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Çelik fiber ilavesinin ise basınç dayanımı, $f_{y\text{cd}}$ ve eğilme dayanımı değerlerinin artmasına neden olduğunu gözlemişlerdir. Ayrıca çelik fiber ilavesinin yüksek dayanımlı betonun tokluğunun önemli derecede artmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Niu ve ark. [22] suda ve NaCl çözeltisindeki donma çözülme döngüsüne maruz kalan çelik fiberle güçlendirilmiş betonların

özelliklerini araştırmışlardır. Karışımlarda %0,0, 0,5, 1,0, 1,5 ve 2,0 hacim fraksiyonlarında çelik fiber kullanmışlardır. Normal küre maruz kalan numuneler üzerinde 28 günlük basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve $f_{yçd}$ değerlerini belirlemişlerdir. Farklı donma çözülme döngülerine maruz kalan numuneler üzerinde yüzey hasarı, ağırlık kaybı ve $f_{yçd}$ değerlerini ölçmüşlerdir. Dahası çelik fiberle güçlendirilmiş betonların taramalı elektron mikroskobu ile mikroyapısını ve gözenek yapısını incelemişlerdir. Lin ve ark. [23] silis dumanı içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine çelik fiberin etkisini araştırmışlardır. 0,35 ve 0,55 su-bağlayıcı oranlı karışımlarda % 0,0, 0,5, 1,0 ve 2,0 hacim fraksiyonlarında çelik fiber ve % 0, 5 ve 10 oranlarında silis dumanını çimento ile yer değiştirerek kullanmışlardır. 0.35 su-bağlayıcı oranında çelik fiber ile silis dumanı içeriği arttıkça basınç dayanımı, $f_{yçd}$, doğrudan çekme dayanımı ve tokluk indeksi değerlerinin arttığını belirtmişlerdir. Yukarıdaki literatür çalışmalarından da görüldüğü gibi beton karışımlarında uygun oranlarda silis dumanı ve yeterli miktarda çelik fiber kullanılması beton dayanımlarının iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmanın amacı, çelik fiberle güçlendirilmiş silis dumanı içeren betonların $f_{yçd}$ değerlerini GEP tekniğinde tahmin etmek için model oluşturmaktır. Bu modeli oluşturmak amacıyla, GEP tekniğindeki eğitim, test ve doğrulama kümesinde kullanılan 126 farklı karışımdaki 186 adet çelik fiberle güçlendirilmiş silis dumanı içeren betonların 7, 28, 90 ve 91 günlük $f_{yçd}$ deney sonuçları bilimsel literatürler [16-23]'den elde edilmiştir. Modelin eğitim, test ve doğrulama kümelerinde numune yaşı (NY), çimento (C), silis dumanı (SD), su (S), en büyük agrega dane çapı (D_{max}), kum (K), agrega (A), süper akışkanlaştırıcı (SA) ve çelik fiber hacim fraksiyonu (V_f), çelik fiber uzunluğu (L_f) ve çelik fiber çapı (d_f) değerleri girdi olarak; $f_{yçd}$ değerleri ise çıktı olarak kullanılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Gen İfadeli Programlama

Gen ifadeli programlama (gene expression programming, GEP), genetik algoritmalar (genetic algorithms, GAs) ve genetik programlama (genetic programming, GP) yöntemlerinden yararlanılarak Ferreira [24] tarafından geliştirilmiştir. GEP sabit uzunluktaki lineer kromozomların kodlanmasıyla farklı şekil ve boyutlarda geliştirilmiş bilgisayar programlama sistemidir. GEP tekniğinde, kromozomlar ve açıklama ağaçları (AAs) olmak üzere iki önemli bileşen vardır. Kromozomlar bir matematiksel kodu temsil eden bir veya daha çok genden oluşur. Bir genin matematiksel kodu genlerin dili ve AAs'nin dili ile açıklanır [24-27]. AAs şeklinde oluşturulan kromozomlar, GEP tekniğindeki operatör ve işlemciler sayesinde farklı şekil ve boyutlarda ifade edilebilmektedirler. Bu kromozomları, her bir gen daha küçük alt programlarla kodlanmış, birden fazla gen oluşturabilir. Ayrıca lineer kromozomların yapısal ve işlevsel organizasyonu kopyalama mutasyon, yer değiştirme ve yeniden birleştirme gibi genetik operatör oluşturur. Bu genetik operatörler ve işlemciler sabit sayı ve uzunluktaki non-liner değişkenleri farklı boyut ve şekilde lineer dizinlere dönüştürerek uygun fonksiyon türetir [24,28].

GEP tekniğinde en basit problemten en karmaşık probleme kadar tüm problemler AAs ile ifade edilir. Bu AAs operatörler, fonksiyonlar, sabitler ve değişkenlerden oluşur. Örneğin bir kromozom listesinde {+, -, ×, sqrt, 2, a, b} gibi GEP değişkenleri olabilir. Bu kromozomda, "sqrt" karekökü, "2" sabit bir sayıyı, "+, -, ×" cebirsel ifadeleri, "a, b" değişkenlere verilen isimleri ifade eder. Değişkenler arasındaki ilişkiler GEP tekniğini geliştiren Ferreira [24] tarafından AA yapısı ile ifade edilmiştir [24, 28-30]. Çok karmaşık problemlerin çözümü için kullanılan AAs uzun kromozom yapılarını gerektirir. Çok uzun kromozomların kullanılması, karmaşık problemlerin çözümlenebilmesi için daha çok uygun olur. Çünkü her bir gen daha küçük ve daha basit bir yapı taşı için kodlanarak hiyerarşik yapıların karmaşık modüler yapı olmasına izin verir. Bundan dolayı problemin çözümü için alt açıklama ağaçları (Alt-AAs) kullanılır. Alt-AAs bağlantı fonksiyonları ile birleştirilir. Bu bağlantı fonksiyonları toplama, çıkarma, çarpma ve bölme (+, -, × ve /) işlemleridir [25-29]. Örneğin, gen uzunluğu 15 olan, 3 tane genden oluşan kromozomunun uzunluğu 45 olmaktadır. Bu şekilde elde edilen kromozomun baş ve kuyruk kısmını oluşturan açık okuma çerçevesi ile Alt-AAs Şekil 1'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi Alt-AAs üç tane açık okuma çerçevesine sahiptir ve her bir alt açıklama ağacı için düzenlenmiş olan açık okuma çerçevesi vardır. Açık okuma çerçevesinde gösterilen "a" ve "b" değişkenleri, "Q" (Sqrt) ise karekökü ifade etmektedir. Eldeki problemin karmaşıklığına bağlı olarak alt açıklama ağaçları, kendi uygunluğuna göre bireysel olarak seçilmiş olabilir ya da daha karmaşık şekilde olabilir. Böylece birçok alt birimli AA tümüyle seçilmiş olur. Bu Alt-AAs'nın matematiksel ifadelerinden problemin çözümü için denklem elde edilir [28,29]. Şekil 1'deki Alt-AAs'den elde edilen matematiksel denklemler sırasıyla Denklem 1-3'te verilmiştir. Bu denklemlerde toplama bağlantı fonksiyonu ile birleştirilirse Denklem 4 elde edilir. GEP

FİBERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ SİLİS DUMANI İÇEREN BETONLARIN YARMADA ÇEKME DAYANIMININ GEP İLE TAHMİNİ

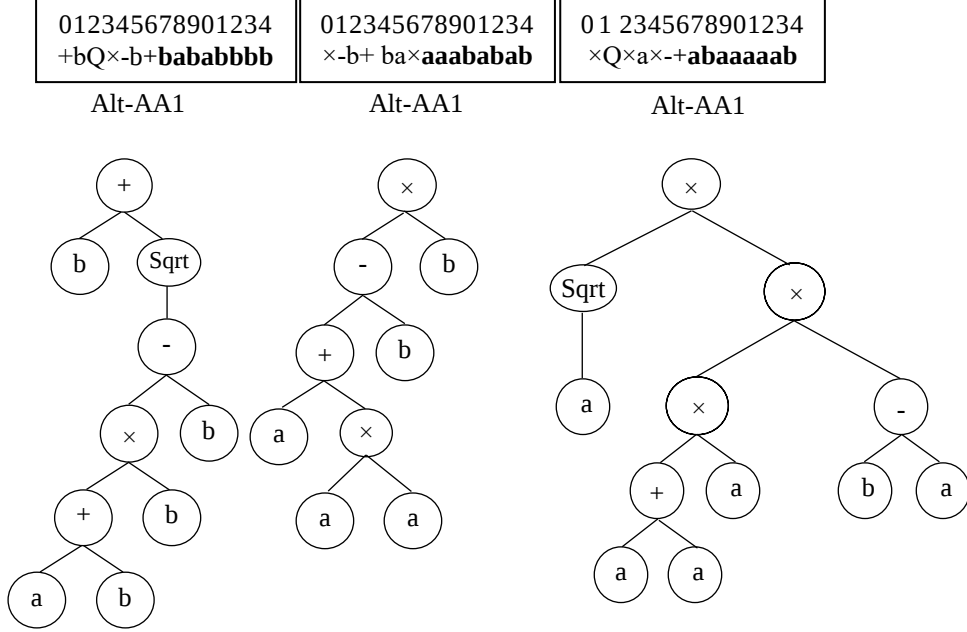
teknğinde AAs'den elde edilen matematiksel denklemler kullanılarak bir problemin çözümü gerçekleştirilmiş olur.

$$\text{Alt-AA1} = (b + \sqrt{((a+b) \times b) - b}) \quad (1)$$

$$\text{Alt-AA2} = (((a + (a \times a)) - b) \times b) \quad (2)$$

$$\text{Alt-AA3} = (\sqrt{a} \times (((a+a) \times a) \times (b-a))) \quad (3)$$

$$\text{AA} = (b + \sqrt{((a+b) \times b) - b}) + (((a + (a \times a)) - b) \times b) + (\sqrt{a} \times (((a+a) \times a) \times (b-a))) \quad (4)$$



Şekil 1. Çok uzun bir kromozomdan elde edilen alt kromozomlar

2.2. Gen ifadeli programlama modeli

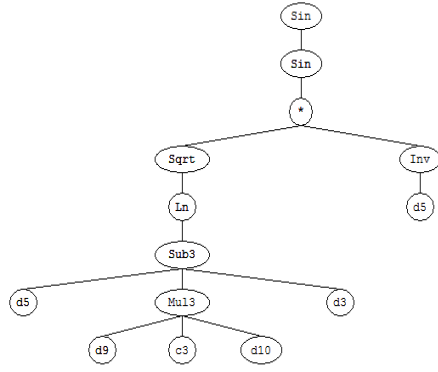
Çelik fiberle güçlendirilmiş silis dumanı içeren betonların f_{cyd} değerlerinin denklem ile hesaplanabilmesi için GEP tekniği kullanılarak bir model geliştirilmiştir. GEP modelinin eğitim, test ve doğrulama kümelerinde NY, C, SD, S, D_{max} , K, A, SA, V_f , L_f ve d_f değerleri girdi olarak kullanılırken, f_{cyd} değerleri çıktı olarak kullanılmıştır. Modelde, bilimsel literatür [16-20]'den elde edilen 137 deney sonucundan, 91 tanesi eğitim için, 46 tanesi de test için, geriye kalan eğitim ve test kümesinde kullanılmayan bilimsel literatür [21-23]'den elde edilen 49 tane deney sonucu da doğrulama için kullanılmıştır. Modelde kullanılan girdi ve çıktı verileri ile ilgili daha fazla bilgi bilimsel literatürler [16-23]'den elde edilebilir. Çok karmaşık problemin çözümü için uzun kromozom yapılarının kullanılmasıyla geliştirilen GEP modelinde kullanılan parametre değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Çelik fiberle güçlendirilmiş silis dumanı içeren betonların f_{cyd} değerlerinin denklem ile hesaplanabilmesi için 8 genli (8 Sub-ET) GEP modelinin açıklama ağaçları Şekil 2'de verilmiştir. Modelin açıklama ağaçlarının bağlantısı çarpma işlemi ile sağlanmıştır. f_{cyd} değerlerini etkileyen girdi değişkenlerinin çok fazla olması nedeniyle çok sayıda açıklama ağacı ve çok uzun kromozom yapıları kullanılmıştır. Açıklama ağaçları sembollerinde görülen d0=NY, d1=C, d2=SD, d3=S, d4= D_{max} , d5=K, d6=A, d7=SA, d8= V_f , d9= L_f ve d10= d_f girdi değişkenlerini ifade etmektedir. Açıklama ağaçlarına göre GEP modelinden elde edilen açık formül Denklem 5'te verilmiştir. GEP modelindeki alt açıklama ağaçlarında kullanılan "ci" (i=1, 2, 3, 4) ile gösterilen sabitler ise Tablo 2'de verilmiştir.

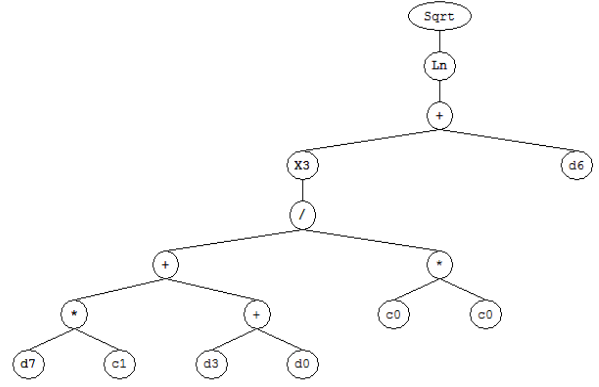
Gerekli kat sayılar ve girdi değişkenleri Denklem 5'te yerine konularak gerekli sadeleştirmeler yapıldıktan sonra elde edilen Denklem 6 yardımıyla, çelik fiberle güçlendirilmiş silis dumanı içeren betonların 28, 90 ve 91 günlük f_{cyd} değerleri, yukarıdaki girdi değişkenlerine göre hesaplanabilmektedir. Şekil 2'de ve Denklem 5'te görülen Sqrt=karekökü, Exp=üstel sayıyı, Ln=doğal logaritmayı, Inv=tersi, X2= kareyi, X3=üçüncü dereceden kuvveti, 3Rt=üçüncü dereceden kökü, Sub3=üç değişkenin çıkarılmasını ve Mul3=üç değişkenin çarpımını ifade eder.

M. SARIDEMİR, İ.F. KARA

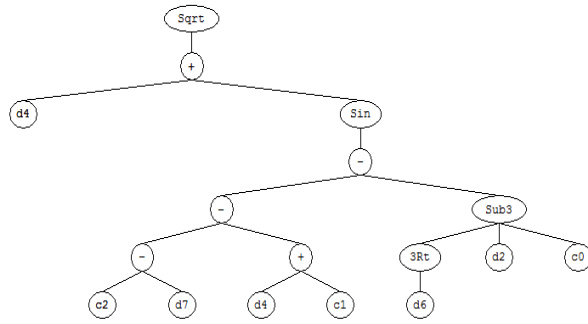
Sub-ET 1



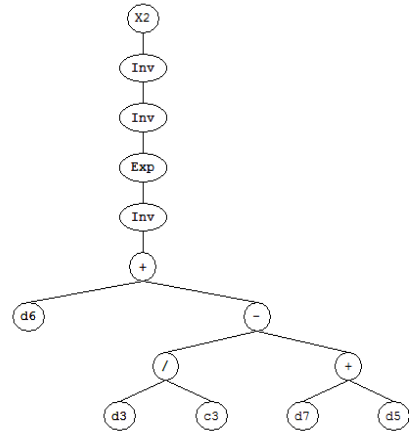
Sub-ET 5



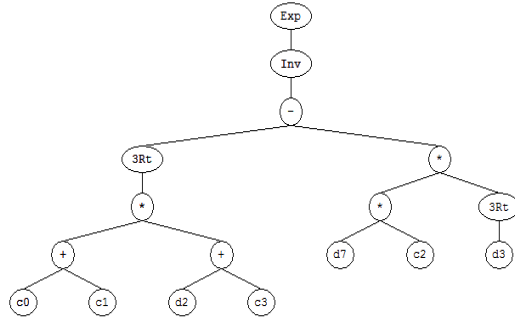
Sub-ET 2



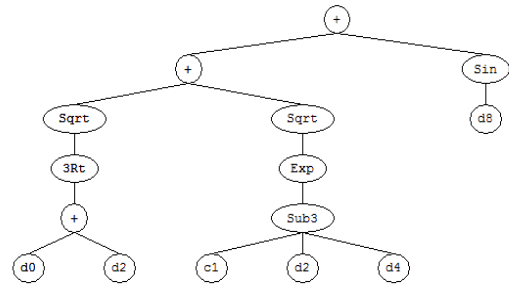
Sub-ET 6



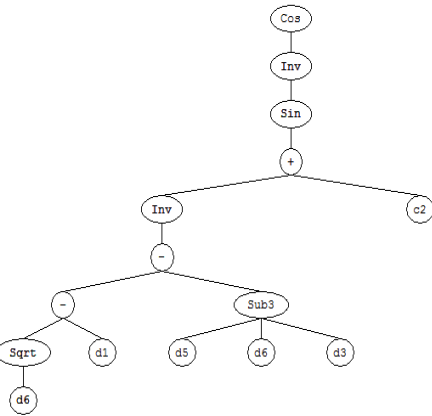
Sub-ET 3



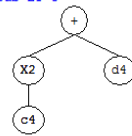
Sub-ET 7



Sub-ET 4



Sub-ET 8



Şekil 2. Çok genli GEP modelinin alt açıklama ağaçları

FİBERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ SİLİS DUMANI İÇEREN BETONLARIN YARMADA ÇEKME DAYANIMININ GEP İLE TAHMİNİ

Tablo 1. Modelde kullanılan GEP parametreleri

Parametreler	GEP
Fonksiyon seti	+, -, *, /, Sqrt, Exp, Ln, Inv, X2, X3, 3Rt, Sub3, Mul3, Sin, Cos
Kromozom sayısı	50
Baş büyüklüğü	10
Gen sayısı	8
Bağlantı fonksiyonu	Çarpma
Mutasyon	0,00206
Fonksiyon ekleme	0,00206
Geri çevirme	0,00546
Bir noktada birleştirme	0,00277
İki noktada birleştirme	0,00277
Gen yeniden birleştirme	0,00277
Gen yer değiştirme	0,00277

Tablo 2. Modelde kullanılan GEP sabitleri

Sabitler	Sub-ET1	Sub-ET2	Sub-ET3	Sub-ET4	Sub-ET5	Sub-ET6	Sub-ET7	Sub-ET8
c0		-7,40	-7,93		-1,42			
c1		-6,76	-6,22		-7,04		8,68	
c2		6,51	-3,00	7,55				
c3	-14,65		1,50			5,26		
c4								-9,51

$$f_{\text{çyd}} = [\text{Sin}(\text{Sin}((\text{Sqrt}(\text{Ln}((\text{d5}-(\text{d9} \times \text{c3} \times \text{d10})-\text{d3}))) \times (1/\text{d5}))))] \times [\text{Sqrt}((\text{d4}+\text{Sin}(((\text{c2}-\text{d7})-(\text{d4}+\text{c1}))-(3\text{Rt}(\text{d6})-\text{d2}-\text{c0})))))] \times [\text{Exp}((1/((3\text{Rt}((\text{c0}+\text{c1}) \times (\text{d2}+\text{c3})))-(\text{d7} \times \text{c2}) \times 3\text{Rt}(\text{d3})))))] \times [\text{Cos}(1/(\text{Sin}((1/((\text{Sqrt}(\text{d6})-\text{d1})-(\text{d5}-\text{d6}-\text{d3}))) + \text{c2})))))] \times [\text{Sqrt}(\text{Ln}((((\text{d7} \times \text{c1})+(\text{d3}+\text{d0}))/(\text{c0}^2)^3)+\text{d6}))))] \times [((1/((1/(\text{Exp}((1/((\text{d6}+((\text{d3}/\text{c3})-(\text{d7}+\text{d5}))))))))))^2)] \times [((\text{Sqrt}(3\text{Rt}((\text{d0}+\text{d2}))))+\text{Sqrt}(\text{Exp}((\text{c1}-\text{d2}-\text{d4}))))+\text{Sin}(\text{d8})))] \times [((\text{c4})^2+\text{d4})]$$

$$f_{\text{çyd}} = \left[\text{Sin} \left(\text{Sin} \left(\left(\sqrt{\text{Ln} \left((K + (14.65 \times L_f \times d_f) - S \right)) \times (1/K)} \right) \right) \right) \right] \times \left[\sqrt{\left((D_{\text{max}} + \text{Sin} \left(((6.51 - SA) - (D_{\text{max}} - 6.76)) - (\sqrt[3]{A - SD + 7.4}) \right) \right) \right)} \right] \times \left[e^{\left(\left(1/((\sqrt[3]{-14.15 \times (SD - 1.5)} + ((3 \times SA) \times \sqrt[3]{5}))) \right) \right) \right] \times \left[\text{Cos} \left(\left(1/ \left(\text{Sin} \left(\left(1/ \left(((\sqrt{A} - C) - (K - A - S)) \right) + 7.55 \right) \right) \right) \right) \right) \right] \times \left[\sqrt{\text{Ln} \left(\left((((-7.04 \times SA) + (S + NY)) / (2.02))^3 + A \right) \right) \right] \times \left[\left(\left(1/ \left(\left(1/ \left(e^{\left((1/((A + ((0.19 \times S) - (SA + K)))) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right] \times \left[\left(\left(\sqrt[3]{NY + SD} + \sqrt{e^{(8.68 - SD - D_{\text{max}})}} \right) + \text{Sin}(V_f) \right) \right] \times \left[(90.44 + D_{\text{max}}) \right]$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

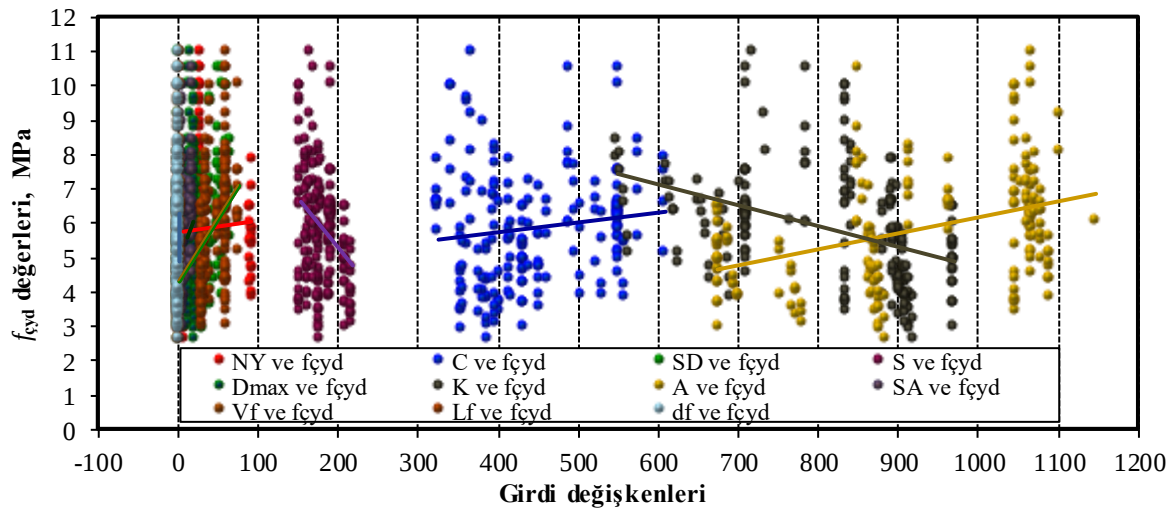
Çelik fiberle güçlendirilmiş silis dumanı içeren betonların f_{cyd} değerlerinin tahmininde kullanılan GEP modelinin performansını değerlendirmek için üç istatistiksel parametre kullanılmıştır. Bu parametreler modeldeki eğitim test ve doğrulama kümelerinden elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlardan elde edilen sonuçları karşılaştırmak için kullanılmıştır. Bu parametreler Denklem 7, 8 ve 9’da görüldüğü gibi sırasıyla R-kare (R^2), mutlak yüzdelik hata ortalaması (MAPE) ve karesel ortalamanın karekökü (RMSE) ile ifade edilmektedir. Bu denklemlerde “t” hedef değeri, “o” çıktı değerini, “n” numune sayısını göstermektedir.

$$R^2 = \frac{\left(n \sum_{i=1}^n t_i o_i - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n o_i \right)^2}{\left(n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2 \right) \left(n \sum_{i=1}^n o_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n o_i \right)^2 \right)} \quad (7)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \left[\frac{\sum_{i=1}^n |t_i - o_i|}{\sum_{i=1}^n t_i} \times 100 \right] \quad (8)$$

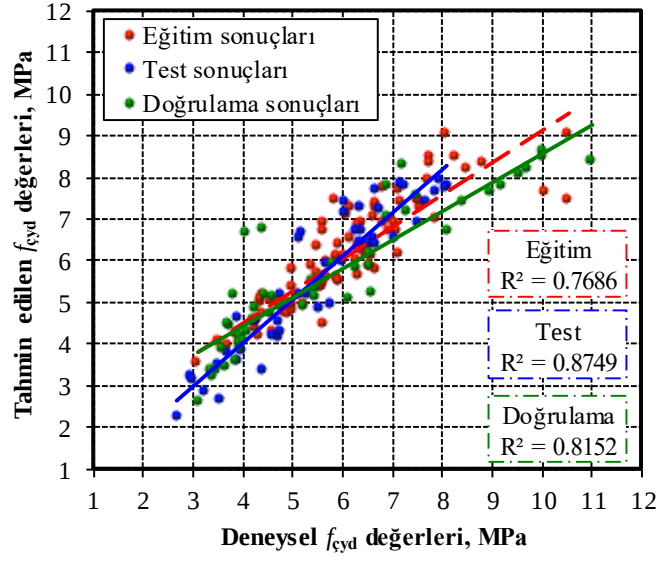
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - o_i)^2} \quad (9)$$

Bu çalışmada, çelik fiberle güçlendirilmiş silis dumanı içeren betonların f_{cyd} değerlerinin tahmininde kullanılan GEP modelinin eğitim, test ve doğrulama kümelerinde, farklı literatürden [16-23] elde edilen numunelerin yaşı, beton karışım miktarları ve çelik fiberin özellikleri girdi değişkenleri olarak ve f_{cyd} deney sonuçları da çıktı değişkeni olarak kullanılmıştır. Bu deneysel verilerdeki numune yaşı, beton karışım miktarları ve f_{cyd} değerlerinin karşılaştırılması Şekil 3’te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi NY, C, SD ve A karışım miktarlarının artması f_{cyd} değerlerini arttırırken, S ve K karışım miktarlarının artması f_{cyd} değerlerini net bir şekilde azaltmıştır. Diğer girdi değişkenlerinin değerleri birbirine yakın olduğu için f_{cyd} değerlerine etkisi net olarak şekilde görülmemektedir. Bu durumları şekil üzerindeki eğilim çizgileri net bir şekilde göstermektedir. Çelik fiberle güçlendirilmiş silis dumanı içeren betonların farklı günlere ait (28, 90 ve 91 günlük) f_{cyd} değerleri ile GEP modelinin eğitim, test ve doğrulama kümelerinden tahmin edilen f_{cyd} değerleri Şekil 4’te görüldüğü gibi karşılaştırılmıştır. Eğitim, test ve doğrulama kümeleri için doğrusal en küçük kareler çizgisi ve R^2 değerleri şekil üzerinde verilmiştir. Şekil 4’te görüldüğü gibi GEP modelindeki eğitim, test ve doğrulama kümelerinden elde edilen f_{cyd} değerleri, deneysel değerlere çok yakındır. Bu durum, çelik fiberle güçlendirilmiş silis dumanı içeren betonların f_{cyd} değerlerini tahmin etmede GEP tekniğinin başarılı bir şekilde uygulandığını göstermektedir.



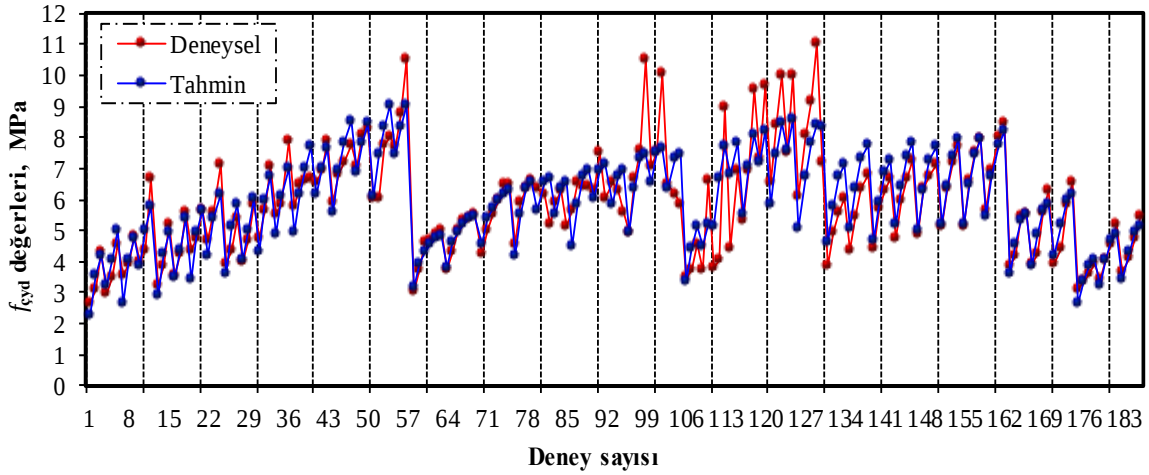
Şekil 3. Numune yaşı, karışım miktarları ve fiber özellikleri ile f_{cyd} sonuçlarının karşılaştırması

FİBERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ SİLİS DUMANI İÇEREN BETONLARIN YARMADA ÇEKME DAYANIMININ GEP İLE TAHMİNİ



Şekil 4. Model eğitim, test ve doğrulama sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırması

Çelik fiberle güçlendirilmiş silis dumanı içeren betonların farklı günlere ait (28, 90 ve 91 günlük) f_{cyd} değerleri ile GEP modelinden tahmin edilen tüm f_{cyd} değerleri Şekil 5'te görüldüğü gibi karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmadan da görüldüğü gibi deneysel f_{cyd} değerleri ile GEP modelinden tahmin edilen f_{cyd} değerleri genellikle üst üste çıkmıştır. Ancak, birkaç tane deneysel f_{cyd} değerleri ile GEP modelinden tahmin edilen f_{cyd} değerleri birbiri ile çakışmamaktadır. Bunun nedeni olarak deneysel çalışmanın yapıldığı ortam koşulları, deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin özelliklerinin farklı olması, numunelere uygulanan kür koşullarının farklı olması, deneysel çalışma hatalar gibi nedenler gösterilebilir.



Şekil 5. Modelde tahmin edilen tüm sonuçlar ile deneysel sonuçların karşılaştırması

Çelik fiberle güçlendirilmiş silis dumanı içeren betonların farklı günlere ait f_{cyd} değerlerini tahmin etmek için kullanılan GEP modelinin performansı R^2 , MAPE ve RMSE istatistiksel parametre değerleri ile irdelenmiştir. GEP modelinde kullanılan eğitim, test ve doğrulama küme sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasından elde edilen R^2 , MAPE ve RMSE istatistiksel parametre sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Tablodaki istatistiksel sonuçlara göre GEP modeli, çelik fiberle güçlendirilmiş silis dumanı içeren betonların farklı günlere ait f_{cyd} değerlerinin tahmin edilebileceğini göstermektedir. En yüksek R^2 değeri 0.875 ile test kümesinden en iyi MAPE değeri 7.654 ile eğitim kümesinden, en iyi RMSE değeri 0.603 ile test kümesinden elde edilmiştir. Bununla birlikte, çelik fiberle güçlendirilmiş silis dumanı içeren betonların farklı günlere ait f_{cyd} değerlerinin belirlenmesiyle ilgili yapılacak olan deneysel çalışmaların sonuçları, bu modelden elde edilen denklem kullanılarak deneysel sonuçlara yakın olarak tahmin edilebilecektir.

Tablo 3. GEP modelinde kullanılan parametre sonuçları

İstatistiksel Parametreler	R ²	MAPE	RMSE
Eğitim kümesi	0,769	7,654	0,682
Test kümesi	0,875	8,902	0,603
Doğrulama kümesi	0,815	11,602	0,961

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, çelik fiberle güçlendirilmiş silis dumanı içeren betonların farklı günlere ait f_{cyd} değerlerini tahmin etmek için GEP tekniğinde geliştirilen model kullanılmıştır. GEP tekniğinde geliştirilen model deneysel çalışmalardan elde edilen numune yaşı, beton karışım miktarları ve çelik fiberin özelliklerinin girdi değişkenleri ve f_{cyd} deney sonuçlarının çıktı değişkeni olarak kullanılmasıyla eğitilmiştir. Eğitilen modelde de sadece girdi verileri kullanılarak modelin testi yapılmıştır. Eğitim ve test kümesinde kullanılmayan başka literatürlerden elde edilen deneysel çalışma sonuçlarına ait verilerle de modelden elde edilen denklemin doğrulaması yapılmıştır. Modelin eğitim, test ve doğrulama kümelerinin sonuçları, çelik fiberle güçlendirilmiş silis dumanı içeren betonların farklı günlere ait f_{cyd} değerlerinin tahmin edilebildiğini göstermiştir. Deneysel f_{cyd} değerleri ile GEP modelinin eğitim, test ve doğrulama kümelerinden elde edilen f_{cyd} değerleri birbirine çok yakındır. Bu durumu, modelden tahmin edilen sonuçlar ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçları karşılaştırmak için kullanılan R², MAPE ve RMSE istatistiksel parametre değerleri açıkça ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, çelik fiberle güçlendirilmiş silis dumanı içeren betonların farklı günlere ait f_{cyd} değerleri, GEP modelinden elde edilen denklem kullanılarak çok küçük hata oranlarıyla kısa sürede belirlenmiş ve GEP tekniğine aşina olmayanlar bile bu denklemi kullanarak çelik fiberle güçlendirilmiş silis dumanı içeren betonların farklı günlere ait f_{cyd} değerlerini belirleyebilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] GÜNEYİŞİ, E., GESOĞLU, M., AKOI, A.O.M., MERMERDAŞ, K., “Combined Effect of Steel Fiber and Metakaolin Incorporation on Mechanical Properties of Concrete”, Composites: Part B, 56, 83-91, 2014.
- [2] CHERN, J.C., YOUNG C.H., “Compressive Creep and Shrinkage of Steel Fiber Reinforced Concrete”, International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 11, 205-14, 1989.
- [3] SIVAKUMAR, A., SANTHANAM, M., “A Quantitative Study on the Plastic Shrinkage Cracking in High Strength Hybrid Fiber Reinforced Concrete”, Cement and Concrete Composites, 29, 575-81, 2007.
- [4] MANGAT, P.S., MOTAMEDİ-AZARI, M., “Shrinkage of Steel Fiber Reinforced Cement Composites”, Materials and Structures, 21, 163-71, 1988.
- [5] KAIKEA, A., ACHOURA, D., DUPLAN, F., RIZZUTI, L., “Effect of Mineral Admixtures and Steel Fiber Volume Contents on the Behavior of High Performance Fiber Reinforced Concrete”, Materials and Design, 63, 493-499, 2014.
- [6] MEHTA, P.K., “Advancements in Concrete Technology”, Concrete Institute, 96, 69-76, 1999.
- [7] ELAHI, A., BASHEER, P.A.M., NANUKUTTA, S.V., KHAN, Q.U.Z., “Mechanical and Durability Properties of High Performance Concretes Containing Supplementary Cementitious Materials”, Construction and Building Materials, 24, 292-299, 2010.
- [8] SHI, Z., ZHONGHE, SHUI, Z., LI, Q., GENG, H., “Combined Effect of Metakaolin and Sea Water On Performance and Microstructures of Concrete”, Construction and Building Materials, 74, 57-64, 2015.
- [9] DUAN, P., SHUI, Z., CHEN, W., SHEN, C., “Effects of Metakaolin, Silica Fume and Slag on Pore Structure, Interfacial Transition Zone and Compressive Strength of Concrete”, Construction and Building Materials, 44, 1-6, 2013.
- [10] MALHOTRA, V.M., MEHTA, P.K., Pozzolan and Cementitious Materials, Gordon and Breach Publishers, Amsterdam, Netherlands, 1996.
- [11] AITCIN, P.C., High Performance Concrete, Taylor and Francis, Lewiston, NY, USA, 1998.
- [12] MEHTA, P.K., MONTEIRO P.J.M., Concrete-Microstructure Properties and Materials (3rd ed.), Mc Graw-Hill, New York, USA, 2006.

FİBERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ SİLİS DUMANI İÇEREN BETONLARIN YARMADA ÇEKME DAYANIMININ GEP İLE TAHMİNİ

- [13] LEE, S.T., LEE, S.H., “Mechanical Properties and Durability of Cement Concrete Incorporating Silica Fume”, Journal of the Korean Ceramic Society, 47, 412-8, 2010.
- [14] ZHANG, P., LI, Q.F., “Effect of Polypropylene Fiber on Durability of Concrete Composite Containing Fly Ash and Silica Fume”, Composites: Part B, 45, 1587-1594, 2013
- [15] LEE, K.M., LEE, H.K., LEE, S.H., KIM, G.Y., “Autogenous Shrinkage of Concrete Containing Granulated Blast-Furnace Slag”, Cement and Concrete Research, 36, 1279-85, 2006.
- [16] NILI, M., AFROUGHSABET, V., “Combined Effect of Silica Fume and Steel Fibers on the Impact Resistance and Mechanical Properties of Concrete”, International Journal of Impact Engineering, 37, 879-886, 2010.
- [17] ŞAHİN, Y., KÖKSAL, F., “The Influences of Matrix and Steel Fiber Tensile Strengths on the Fracture Energy of High-Strength Concrete”, Construction and Building Materials, 25, 1801-1806, 2011.
- [18] AL-AMEERI, A., “The Effect of Steel Fiber on Some Mechanical Properties of Self Compacting Concrete”, American Journal of Civil Engineering, 1, 102-110, 2013.
- [19] EREN, Ö., ÇELİK, T., “Effect of Silica Fume and Steel Fibers on Some Properties of High-Strength Concrete”, Construction and Building Materials, 11, 373-382, 1997.
- [20] RAMADOSS, P., “Combined Effect of Silica Fume and Steel Fiber on the Splitting Tensile Strength of High-Strength Concrete”, International Journal of Civil Engineering, 12, 96-103, 2014.
- [21] KÖKSAL, F., ALTUN, F., YİĞİT, İ., ŞAHİN, Y., “Combined Effect of Silica Fume and Steel Fiber on the Mechanical Properties of High Strength Concretes”, Construction and Building Materials, 22, 1874-1880, 2008.
- [22] NIU, D., JIANG, L., BAI, M., MIAO, Y., “Study of the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete to Water and Salt Freezing Condition”, Materials and Design, 44, 267-273, 2013.
- [23] LIN, W.T., HUANG, R., LEE, C.L., HSU, H.M., “Effect of Steel Fiber on the Mechanical Properties of Cement-Based Composites Containing Silica Fume”, Journal of Marine Science and Technology, 16, 214-221, 2008.
- [24] FERREIRA, C., “Gene Expression Programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems”, Complex Systems, 13, 87-129, 2001.
- [25] SARIDEMİR M., “Genetic Programming Approach for Prediction of Compressive Strength of Concretes Containing Rice Husk Ash”, Construction and Building Materials, 24, 1911-1919, 2010.
- [26] KARA, İ.F., “Prediction of Shear Strength of FRP-Reinforced Concrete Beams Without Stirrups Based on Genetic Programming”, Advances in Engineering Software, 42, 295-304, 2011.
- [27] NAZARI, A., RIAHI, S., “Prediction Split Tensile Strength and Water Permeability of High Strength Concrete Containing TiO₂ Nanoparticles by Artificial Neural Network and Genetic Programming”, Composites: Part B, 42, 473-488, 2011.
- [28] FERREIRA, C., “Function Finding and the Creation of Numerical Constants in Gene Expression Programming”, 7th Online World Conference on Soft Computing in Industrial Applications, 1-9, Bristol, UK, 2002.
- [29] FERREIRA, C., “Genetic Representation and Genetic Neutrality in Gene Expression Programming”, Advances in Complex Systems, 5, 389-408, 2002.
- [30] SEVERCAN, M.H., “Prediction of Splitting Tensile Strength from the Compressive Strength of Concrete Using GEP”, Neural Computing and Applications, 21, 1937-1945, 2012.