Uçucu Kül ve Silis Duman İçeren Betonların Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülünün Bulanık Mantık ile Tahmini

İlker Bekir Topçu[1], Mustafa Sarıdemir[2]

[1]Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26480 Eskişehir
ilkerbt@ogu.edu.tr
[2]Niğde Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51100 Niğde
msdemir@nigde.edu.tr

ÖZET

Yapay zeka tekniklerinden biri olan bulanık mantık, son yıllarda inşaat mühendisliği uygulamalarının birçok alanında kullanılmaya başlamıştır. Bu çalışmada da, uçucu kül ve silis dumanı içeren betonların 3, 7, 14, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı ve elastisite modülünü tahmin etmek için bulanık mantıktaki Sugeno tipi sonuç çıkarma sisteminde modeller oluşturulmuştur. Bu modelleri oluşturmak amacıyla, 17 farklı karışım oranlarında üretilen 82 numunenin deneysel sonuçları literatürden elde edilmiştir. Modellerde basınç dayanımı ve elastisite modülü değerlerinin tahmini için 6 farklı girdi değişken kullanılmıştır. Ayrıca elastisite modülü değerlerinin farklı bir şekilde tahmini için sadece basınç dayanımı değerleri girdi değişkeni olarak kullanılmıştır. Bu girdi değişkenlerine göre, modellerde uçucu kül ve silis dumanı içeren betonların basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri tahmin edilmiştir. Modellerdeki eğitim ve test sonuçları, bulanık mantık yönteminin, uçucu kül ve silis dumanı içeren betonların 3, 7, 14, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı ve elastisite modülü değerlerinin deney sonuçlarına yakın olarak tahmin edilebileceğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler*: Uçucu kül;Silis dumanı;Basınç dayanımı;Elastisite modülü;Bulanık mantık.*

Prediction of Compressive Strength and Modulus of Elasticity of Concretes Containing Fly Ash and Silica Fume with Fuzzy Logic

ABSTRACT

Fuzzy logic, which is one of the artificial intelligence techniques, is begun to be used in many areas of civil engineering applications. In this study, the models in Sugeno type neuro-fuzzy inference system in fuzzy logic for predicting 3, 7, 14, 28 and 56-day compressive strength and modulus of elasticity values of concretes containing fly ash and silica fume have been developed. For purpose of constructing these models, experimental results for 82 specimens produced with 17 different mixture proportions were obtained from the literature. In models, 6 different input variables were used in order to predict the compressive strength and the modulus of elasticity values. Furthermore, only the compressive strength values were used as input variables to predict differently the modulus of elasticity values. According to these input variables, the compressive strength and the modulus of elasticity values of concretes incorporating fly ash and silica fume were predicted. The training and testing results in the models have shown that fuzzy logic methods can predict 3, 7, 14, 28 and 56-day compressive strength and modulus of elasticity values closer to the experimental results.

Key Words: *Fly ash; Silica fume; Compressive strength; Modulus of elasticity; Fuzzy logic*

1. GİRİŞ

Beton teknolojisindeki en son gelişmeler silis dumanı (SD), uçucu kül (UK), öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi mineral katkıların kullanımının yüksek performanslı beton üretmek için gerekli olduğunu göstermiştir [1]. Ayrıca UK, SD veya öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu gibi katı atıkların yok edilmesiyle ilgili çevresel düzenlemelerdeki yeni eğilimler, bu katı atıkları betonda portland çimento yerine yapı malzemesi olarak kullanılmasına ilgiyi son yıllarda arttırmaya başlamıştır [2]. Bu malzemeler, yüksek performanslı beton üretimi için kullanıldığı zaman betonun hem dayanımını hem de dayanıklılığını geliştirebilmektedir [3]. Ayrıca böyle mineral katkıların betonun sülfat direncini geliştirdiği de gözlenmiştir [4].

Son yıllarda, UK betonda çimento yerine yaygın olarak kullanılmaktadır ve yüzde yer değişimi toplam çimento esaslı malzemelerin yaklaşık % 20 ile 50 oranı arasında değişmektedir [5,6]. Ayrıca, erken dayanım önemli bir faktör değilse, UK % 60 oranında çimento yerine kullanılabilmektedir. Özellikle erken yaşlarda beton dayanımı üzerinde uçucu küllerin genellikle olumsuz etkilere sahip olduğu bilinmektedir [7]. Buna rağmen UK, kütle betonlarda erken yaşlarda çatlama ve hidratasyon ısını azaltmak için kullanılmaktadır. Aynı zamanda, UK beton yapıların basınç dayanımı ve dayanıklılığını uzun dönemde arttırmaktadır [2]. Düşük su-çimento oranında hazırlandığında UK içeren betonlar daha iyi dayanım ve dayanıklılık performansına sahip olabilmektedir.

Silis dumanının süper akışkanlaştırıcı ile birlikte kullanılmasıyla yüksek dayanımlı betonlar elde etmek yeni alışılmış bir yoldur [8]. Mazloom ve diğerleri [9] SD oranı arttıkça, betonun işlenebilirliğinin azaldığını, ancak 28 günlük basınç dayanımı gibi kısa süreli mekanik özeliklerinin iyileştiğini belirtmişlerdir. Nassif ve diğerleri [10] yüksek performanslı betonun basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerine kür yöntemlerinin ve puzzolanik malzemelerin etkisini araştırmışlardır. Farklı oranlarda UK, SD ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile üretilen beton numuneler ile kontrol beton numunelerini farklı kür ortamlarında ve farklı günlerde gerçekleştirdikleri basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri ile karşılaştırmışlardır. Silis dumanının betonun su ihtiyacını arttırdığı bilinmektedir. Bundan dolayı silis dumanının süper akışkanlaştırıcı veya su azaltıcı katkı ile kullanılması önerilmekte ve böylece yüksek dayanımlı betonlar üretilebilmektedir. Birçok çalışma, UK ve SD bulunan betonları, geleneksel betonlarla karşılaştırdıklarında erken yaşlarda basınç dayanımını düşürdüğünü ve uzun süreli yaşlarda ise basınç dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir.

Son yıllarda, bulanık mantık (BM) sistemine dayanan modelleme yöntemleri popüler olmuş ve beton teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada da, betonun basınç dayanımı (f_c) ve elastisite modülü (E_d) üzerine UK ve SD'nin etkisini değerlendirmek için BM sistemlerindeki Sugeno tipi sonuç çıkarma sisteminden yararlanarak modeller oluşturulmuştur. Bu modellerin eğitim ve testlerinde kullanılan 17 farklı karışımdaki 82 adet UK ve SD içeren betonların 3, 7, 14, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı ve elastisite modülü deney sonuçları bilimsel literatürden elde edilmiştir [10]. Modellerdeki eğitim ve testlerde f_c ve E_d değerlerinin tahmini için numunenin yaşı (NY), çimento (C), uçucu kül (UK), silis dumanı (SD), süper akışkanlaştırıcı (SA) ve hava sürükleyici katkı (HSK) girdi değişkeni olarak kullanılmıştır. Bu girdi değişkenlerine göre f_c ve E_d değerlerinin tahmini için oluşturulan modeller sırasıyla M1 ve M2 olarak isimlendirilmiştir. Ayrıca farklı bir modelde E_d değerinin tahmini için sadece f_c girdi değişkeni olarak kullanılmıştır ve bu modelde M3 olarak isimlendirilmiştir. Modellerde su, kum ve agrega miktarları sabit olduğundan modellerde değişken olarak kullanılmamıştır. Deneysel sonuçların 55 tanesi ile modeller eğitilmiş ve geri kalanlarının sadece deney girdi değişkenleri kullanılarak testler yapılmış ve gerçek değerlere yakın değerler elde edilebileceği gözlenmiştir.

2. BULANIK MANTIK

Bulanık mantık (BM) belirsizliğin bir ifadesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu belirsizliklerin bir takım deneysel çalışma sonuçları ve bazı kabullerle kesinlik kazandırıldığı da bilinmektedir. Ama gerçekte kesin gibi görünen bazı kabullerin bir yaklaşıklık içerdiği ve belirli sınırlar içerisinde olduğu da bilinen bir gerçektir. Bu yaklaşımları çözme yöntemlerinden biri de bulanık sonuç çıkarma sistemleridir [11,12,13]. Bulanık sonuç çıkarma sistemleri, BM ve sözel bulanık kurallar yardımıyla doğrusal olmayan davranışları taklit etmek için kullanılan güçlü araçlardır [14]. Bulanık "Eğer-İse" kurallarını kullanan bulanık sonuç çıkarma sistemi, insana ait bilgi ve mantıklı düşünme işlemlerini tam nicel analiz kullanmadan nitel bakış açısı olarak modelleyebilir [12,13,15].

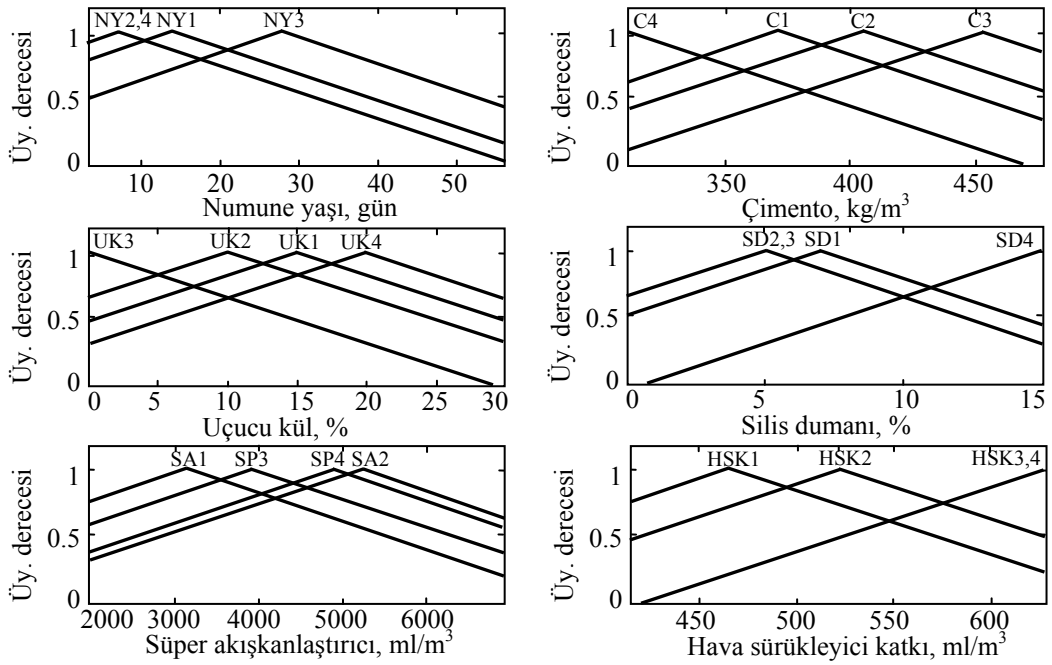
Bulanık sonuç çıkarma sistemlerinin çeşitli yöntemleri vardır: Örneğin Mamdani [16] ve Sugeno [17,18]. Bulanık modelleme veya bulanık tanımlamayı, sistematik olarak ilk Takagi, Sugeno ve Kang [17,18] araştırmış, kontrol, tahmin ve bulanık sonuç çıkarma sisteminde bir çok uygulama ortaya koymuşlardır [15-18]. Sugeno tipi sonuç çıkarma sistemlerinde, bulanık kuralların sonuçları hızlı fonksiyon üretilmesiyle çıktı olarak tanımlanabilmektedir [19-21].

2.1. Bulanık sonuç çıkarma sistem modelleri

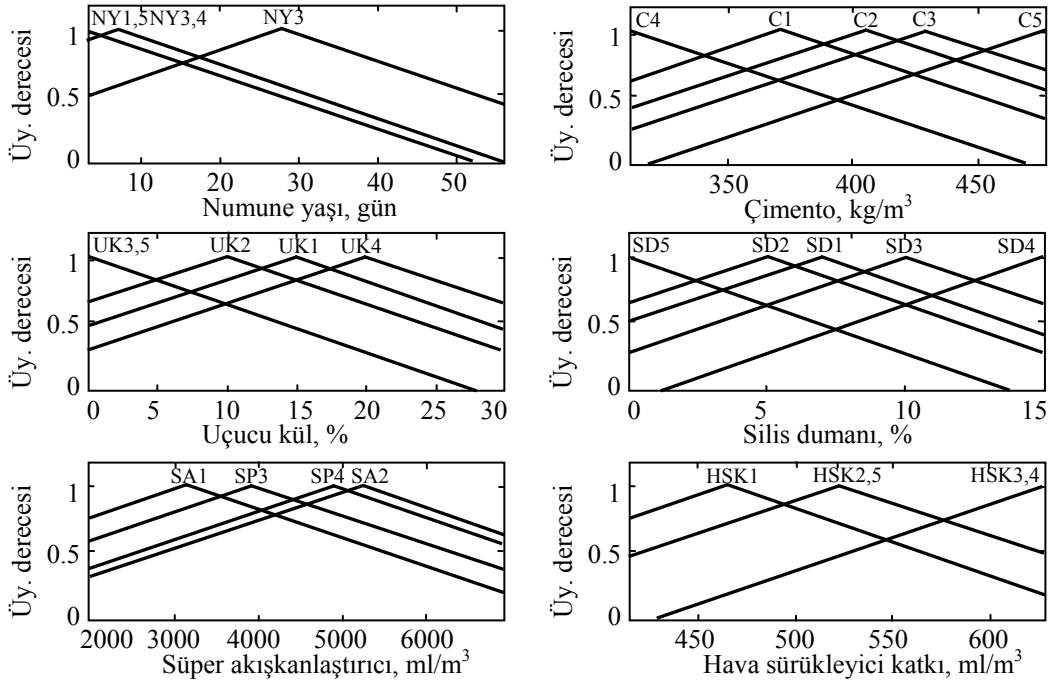
UK ve SD içeren betonların 82 tane deney sonucu BM sistemindeki Sugeno tipi sonuç çıkarma sistemi kullanılarak geliştirilen M1, M2 ve M3 modellerindeki işlemlerde kullanılmıştır. Burada M1 modeli f_c değerlerini ve M2 ve M3 modeli de E_d değerlerini tahmin etmek için geliştirilmiştir. M1, M2 ve M3 modellerindeki işlemlerde kullanmak amacıyla, literatürden elde edilen f_c ve E_d değerleri eğitim ve test parçalarına bölünmüştür. Deneysel sonuçlardan 55 tanesi eğitim ve 27 tanesi de test için kullanılmıştır. BM kural tabanında, bulanık veriler "prod" operatörüyle bağlantılandırılmış ve durulaştırma işleminde "wtaver" ayrışım tekniği kullanılmıştır. Ayrıca, hata azalmasındaki istikrarın gözlenmesiyle M1 ve M2 modellerinde 100 ve M3 modelinde 20 öğrenme döngüsü sürdürülmüş ve eğitim süreci sonlandırılmıştır. UK ve SD içeren betonların f_c ve E_d değerlerini tahmin etmek için girdi verilerinin eğitim veri seti üyelik fonksiyonları üçgensel tip seçilmiş ve parametre terimi alt-uzay eğitim veri seti kümelemesi kullanılarak belirlenmiştir. Böylece, M1 ve M2 modelleri ile aynı girdi değişkenlerinden f_c ve E_d değerlerini tahmin etmek için sırasıyla 4 ve 5 kural elde edilmiştir. M3 modeli ile sadece f_c değerlerinden E_d değerlerini tahmin etmek için 7 kural elde edilmiştir. f_c ve E_d değerlerinin tahmini için M1, M2 ve M3 modellerinin eğitiminde kullanılan girdi değişkenlerinin üyelik fonksiyonları Şekil 1, 2 ve 3'te sırasıyla görülmektedir.

$K_{i/j}$: Eğer (NY $NYmf_i$) ve (C Cmf_i) ve (UK $UKmf_i$) ve (SD $SDmf_i$) ve (SA $SAmf_i$) ve (HSK $HSKmf_i$) İse (f_c f_cmf_i)/(E_d is E_dmf_j) i=1,2…4, j=1,2…5

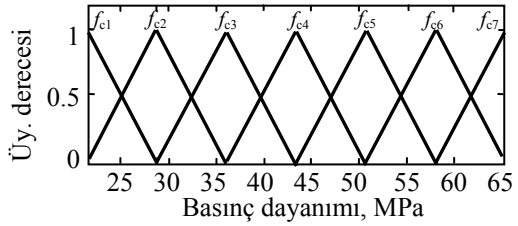
K_i: Eğer(f_c f_cmf_i) İse (E_d E_dmf_i) i=1,2…7.



Şekil 1. f_c için girdi değişkenlerinin üyelik fonksiyonları.



Şekil 2. E_d için girdi değişkenlerinin üyelik fonksiyonları.



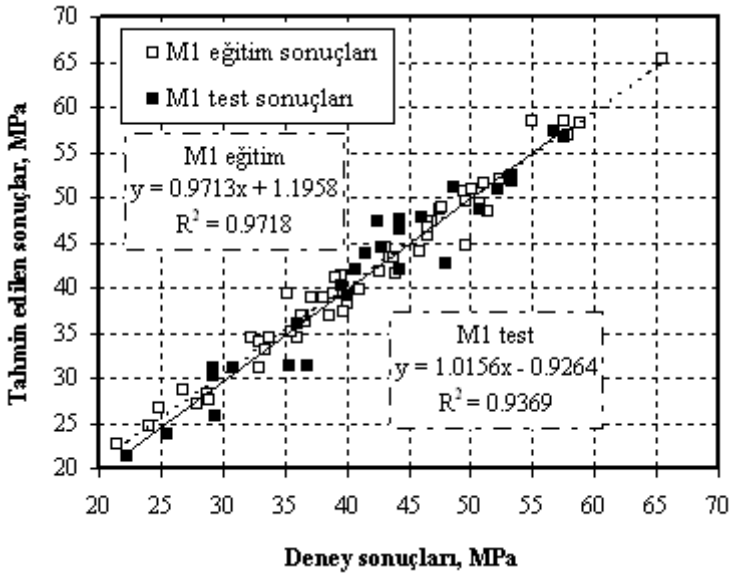
Şekil 3. E_d değerlerinin tahmini için f_c üyelik fonksiyonu.

3. MODEL SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

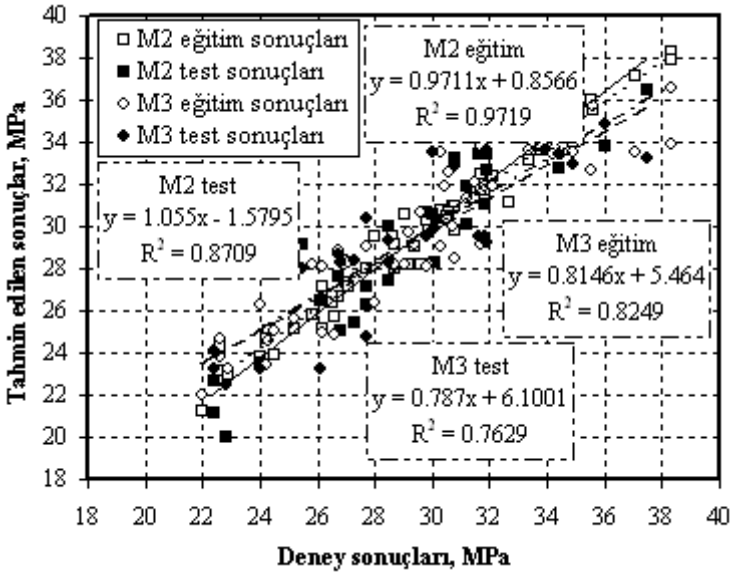
Hem deneysel çalışmalarından hem de BM yönteminde geliştirilen M1, M2 ve M3 modellerdeki eğitim ve testlerden elde edilen 3, 7, 14, 28 ve 56 günlük f_c ve E_d değerleri Şekil 4 ve 5'te sırasıyla verilmiştir. Eğitim ve test verileri için doğrusal en küçük kareler çizgisi, denklemi ve R^2 değerleri bu şekiller de gösterilmiştir. Ayrıca, deneysel çalışmalar ile M1, M2 ve M3 modellerinden elde edilen test sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. M1, M2 ve M3 modellerindeki eğitim ve testlerden elde edilen değerler Şekil 4 ve 5'te görüldüğü gibi deney sonuçlarına çok yakındır. Bu durum, deney sonuçları ile M1, M2 ve M3 model sonuçlarının uyum içinde olduğunu göstermektedir. E_d deney sonuçları ile M2 ve M3 model sonuçları karşılaştırılırsa M3 model sonuçlarına göre, M2 model sonuçları deneysel sonuçlara daha yakındır. Bunun nedeni olarak da M2 modelinde tüm deneysel girdi değişkenlerinin dikkate alınması ve M3 modelinde sadece f_c değişkeninin dikkate alınması gösterilebilir.

Tablo 2. Deney sonuçları ile modellerin test sonuçlarının karşılaştırması.

Girdi değişkenleri						Deneysel sonuçlar		M1	M2	M3
NY	Ç	UK	SD	SA	HSK	f_c	E_d	f_c	E_d	E_d
3	382	20	0	2614	523	29.30	26.10	31.17	26.49	23.26
3	429	0	10	4901	627	39.60	28.50	40.20	29.96	28.27
3	358	20	5	4574	523	29.30	24.00	30.21	23.57	23.26
7	477	0	0	3267	523	40.00	27.30	39.16	25.41	28.40
7	334	30	0	1960	523	30.80	27.70	31.12	26.32	24.78
7	405	0	15	5227	627	40.70	26.70	41.98	27.59	28.69
7	334	20	10	4574	523	29.40	22.40	25.85	22.70	23.27
14	429	10	0	3267	523	41.60	31.90	43.86	33.43	29.20
14	453	0	5	3920	627	44.20	31.80	47.45	31.03	29.50
14	405	10	5	5227	523	50.80	30.00	48.76	30.59	33.49
14	310	20	15	4901	627	36.80	26.80	31.32	25.09	28.26
28	382	20	0	2614	523	44.20	31.60	46.37	33.42	29.50
28	429	0	10	4901	627	53.40	31.90	52.37	32.62	33.63
28	358	20	5	4574	523	46.00	27.70	47.71	27.16	30.39
56	477	0	0	3267	523	52.20	36.00	50.80	33.84	34.83
56	334	30	0	1960	523	48.70	37.50	51.08	36.48	33.22
56	405	0	15	5227	627	56.70	34.90	57.36	38.29	32.98
56	334	20	10	4574	523	42.50	30.10	47.26	28.31	29.86
3	338	15	5	2206	414	22.30	22.80	21.39	20.03	22.49
3	402	10	5	3280	492	36.10	25.50	36.03	29.12	28.00
7	338	15	5	2206	414	25.50	22.40	23.68	21.13	24.08
7	427	10	5	4920	492	42.80	31.20	44.36	31.93	30.12
14	360	10	5	2206	414	35.30	28.50	31.42	27.43	29.29
14	347	18	9	3106	466	44.20	29.80	41.89	30.62	29.50
14	402	15	5	6932	520	57.50	34.40	56.63	32.78	33.39
28	371	15	7	3106	466	48.00	30.80	42.58	33.25	32.86
28	402	10	5	3280	492	53.40	33.90	51.79	34.57	33.63



Şekil 4. f_c deney sonuçları ile M1 model sonuçlarının karşılaştırması.



Şekil 5. E_d deney sonuçları ile M2 ve M3 model sonuçlarının karşılaştırması.

Bu çalışmada, M1, M2 ve M3 modellerinin eğitim ve testi sırasındaki hataları ortaya çıkarmak için karesel ortalamanın kökü (*RMS*) Denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır. Buna ek olarak hatalar, mutlak kesir varyansı (R^2) ve ortalama mutlak yüzdelik hata (*MAPE*) sırasıyla Denklem (2) ve (3) kullanılarak hesaplanmıştır. Burada *t* hedeflenen değeri, *o* model çıktı değerini ve *n* numune sayısını göstermektedir.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(t_i - o_i)^2} \tag{1}$$

$$R^2 = \frac{(n\sum t_i o_i - \sum t_i \sum o_i)^2}{(n\sum t_i^{\,2} - (\sum t_i)^2)(n\sum o_i^{\,2} - (\sum o_i)^2)} \tag{2}$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}|t_i - o_i|}{\sum_{i=1}^{n} t_i} x100\right] \tag{3}$$

UK ve SD içeren betonların f_c için oluşturulan M1 modelindeki eğitimde *RMS*, R^2 ve *MAPE* istatistiksel parametre değerleri sırasıyla 1.5866, 0.9718 ve % 3.1398 olarak elde edilirken, testte sırasıyla 5.1332, 0.9369 ve % 5.1332 olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde, E_d için oluşturulan M2 ve M3 modellerindeki eğitimde *RMS*, R^2 ve *MAPE* istatistiksel parametre değerleri M2 modeli için sırasıyla 0.6694, 0.9719 ve % 1.7047 olarak ve M3 modeli için 1.6721, 0.8249 ve % 4.4085 olarak elde edilmiştir. E_d için testte ise *RMS*, R^2 ve *MAPE*

istatistiksel parametre değerleri M2 modeli için sırasıyla 1.6489, 0.8709 ve % 4.830 olarak ve M3 modeli için 1.9669, 0.7629 ve % 5.6488 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, *RMS*, R^2 ve *MAPE* olarak M1, M2 ve M3 modellerindeki eğitim ve testlerden elde edilen f_c ve E_d değerlerinin istatistiksel parametre değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'te verilen tüm istatistiksel parametre değerleri, önerilen M1, M2 ve M3 modellerinin uygun olduğunu ve f_c ve E_d değerlerinin deneysel değerlere çok yakın olarak tahmin edilebileceğini göstermektedir. E_d değerlerinin tahmini için sadece f_c girdi değişkeniyle oluşturulan M3 modeline göre, 6 farklı girdi değişkeniyle oluşturulan M2 modeli daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu durumu da istatistiksel parametre değerleri açıkça göstermektedir.

Tablo 3. Önerilen modellerinin istatistiksel değerleri

İstatistiksel parametreler	M1		M2		M3	
	Eğitim kümesi	Test kümesi	Eğitim kümesi	Test kümesi	Eğitim kümesi	Test kümesi
RMS	1.5866	2.4993	0.6694	1.6721	1.6489	1.9669
R^2	0.9718	0.9369	0.9719	0.8709	0.8249	0.7629
MAPE, %	3.1398	5.1332	1.7047	4.4085	4.830	5.6488

4. SONUÇLAR

Uçucu kül ve silis dumanı içeren betonların 3, 7, 14, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı ve elastisite modülü değerlerini tahmin edebilmek için bulanık mantık yönteminden yararlanarak modeller oluşturulmuştur. Basınç dayanımının tahmin edilmesi için M1, elastisite modülünün tahmin edilmesi için M2 ve M3 olarak isimlendirilen modellerde, Sugeno tipi sonuç çıkarma sistemi kullanılmıştır. Önce modeller girdi ve çıktı verileriyle eğitilmiştir. Daha sonra, eğitilen modellerde sadece deney girdi verileri kullanılarak uçucu kül ve silis dumanı içeren betonların 3, 7, 14, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri tahmin edilmiştir. M1, M2 ve M3 modellerindeki eğitim ve testlerden bulunan değerler deney sonuçlarına çok yakındır. Bu durumu, deneysel sonuçlar ile M1, M2 ve M3 model sonuçlarını karşılaştırmak için hesaplanan *RMS,* R^2 ve *MAPE* istatistiksel değerleri açıkça göstermektedir.

Sonuç olarak, uçucu kül ve silis dumanı içeren betonların basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri, bulanık mantık yönteminde modeller geliştirilerek çok küçük hata oranlarıyla kısa sürede tahmin edilebilmektedir. Elde edilen sonuçlar betonun basınç dayanımı ve elastisite modülü değerlerini tahmin etmede bulanık mantık yönteminin kullanışlı yöntem olduğunu göstermiştir.

5. KAYNAKLAR

1. Parande, A.K., Babu, B.R., Karthik, M.A., Deepak Kumaar, K.K., Palaniswamy, N. "Study on strength and corrosion performance for steel embedded in metakaolin blended concrete/mortar". Construction and Building Materials, 22(3):127-134, 2008.
2. Han, S.-H., Kim, J.-K., Park, Y.-D. "Prediction of compressive strength of fly ash concrete by new apparent activation energy function". Cement and Concrete Research, 33:965-971, 2003.
3. Poon, C.S., Kou, S.C., Lam, L. "Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete". Construction and Building Materials, 20(10):858-865, 2006.
4. Aydın, S., Yazıcı, H., Yiğiter, H., Baradan B. "Sulfuric acid resistance of high-volume fly ash concrete". Building and Environment, 42(2):717-721, 2007.
5. Lam, L., Wong, Y.L., Poon, C.S. "Effect of FA and SF on compressive and fracture behaviors of concrete". Cement and Concrete Research, 28:271-83, 1998.
6. Siddique, R. "Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete". Cement and Concrete Research, 34: 487-493, 2004.
7. Babu, K.G., Rao, G.S.N. "Early strength of FA concrete". Cement and Concrete Research, 24:277-284, 1994.
8. Duval, R., Kadri E.H. "Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes". Cement and Concrete Res., 28:533-547, 1998.
9. Mazloom, M., Ramezanianpour, A.A., Brooks, J.J. "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete". Cement and Concrete Comp., 26:347-354, 2004.
10. Nassif, H.H., Najm H., Seesawing, N. "Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC". Cement and Concrete Composites, 27(6):661-670, 2005.
11. Topçu, İ.B., Sarıdemir, M. "Prediction of rubberized concrete properties using artificial neural network and fuzzy logic". Construction and Building Mater., 22(4):532-540, 2008.
12. Şen, Z. "Fuzzy algorithm for estimation of solar irradiation from sunshine duration". Solar Energy, 63:39-49, 1998.
13. Demir, F. "A new way of prediction elastic modulus of normal and high strength concrete-fuzzy logic". Cement and Concrete Research, 35:1531-538, 2005.
14. İnan, G., Göktepe, A.B., Ramyar, K., Sezer A. "Prediction of sulfate expansion of PC mortar using adaptive neuro-fuzzy methodology". Building and Env., 42:1264-269, 2007.
15. Akbulut, S., Hasiloğlu, A.S., Pamukcu, S., "Data generation for shear modulus and damping ratio in reinforced sands using adaptive neuro-fuzzy inference system". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24:805-14, 2004.
16. Mamdani, E.H., Assilian, S. "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller". International Journal of Man-Machine Studies, 7:1-13, 1975.
17. Takagi, T., Sugeno, M. "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control". IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 15:116-132, 1985.
18. Sugeno, M., Kang, G.T. "Structure identification of fuzzy model". Fuzzy Sets Syst Man Cybern, 23:665-685, 1993.
19. Jang, J.S.R., Sun, C.T. "Neuro-fuzzy modeling and control". In: Proceeding of the IEEE, 83:378-405, 1995.
20. Topçu, İ.B., Sarıdemir, M. "Prediction of compressive strength of concrete containing fly ash using artificial neural network and fuzzy logic". Computational Materials Science, 41(3):305-311, 2008.
21. Topçu, İ.B., Sarıdemir, M. "Prediction of mechanical properties of recycled aggregate concretes containing silica fume using artificial neural networks and fuzzy logic". Computational Materials Science, 41(1):74-82, 2008.