



BETON DAYANIM ÖZELLİKLERİNİN YÜZEY TEPKİ YÖNTEMİ, GENETİK ALGORİTMA VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE TAHMİNİ

Ebru BAŞPINAR TUNCAY ^{1*}, Ekin KÖKEN ², Şemsettin KILINÇARSLAN ³

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

² Abdullah Gül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

³ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Beton Dayanımı, Agrega, Yüzey Tepki Yöntemi, Genetik Algoritma, Yapay Sinir Ağları.</i>	Bu çalışmada, beton dayanım özellikleri yüzey tepki yöntemi, genetik algoritma ve yapay sinir ağları yöntemleri ile tahmin edilmiştir. Altı farklı beton agregası kullanılarak küp (10x10x10 cm) ve prizmatik (15x15x60 cm) beton numuneleri hazırlanmış ve beton tek eksenli basınç dayanımı (UCS _c) ve eğilme dayanımının (FS _c) tahmin edilmesi için bazı modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerde beton yoğunluğu (ρ_c), beton agregalarının Los Angeles aşınma kaybı (LAA) ve betonlara ait P dalgası hızı (V_{pc}) gibi parametreler kullanılmıştır. Elde edilen modellerin performansları bazı istatistiksel göstergeler ışığında değerlendirilmiş olup genetik algoritma ve yapay sinir ağlarını temel alan yöntemlerin beton dayanım özelliklerini tahmininde başarılı bir şekilde kullanılabileceği belirlenmiştir.

ESTIMATION OF CONCRETE STRENGTH PROPERTIES THROUGH THE RESPONSE SURFACE METHODOLOGY, GENETIC ALGORITHM, AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Keywords	Abstract
<i>Concrete Strength, Aggregate, Response Surface Methodology, Genetic Algorithm, Artificial Neural Networks.</i>	In this study, concrete strength properties were estimated by surface response method, genetic algorithm, and artificial neural network methods. Cubic (10x10x10 cm) and prismatic (15x15x60 cm) concrete samples were prepared using six different concrete aggregates, and some models were developed to estimate the uniaxial compressive strength (UCS _c) and flexural strength (FS _c) of concrete. In the developed models, parameters such as concrete density (ρ_c), Los Angeles abrasion loss of concrete aggregates (LAA), and P wave velocity (V_{pc}) of concretes were used. The performances of the models obtained were evaluated in the light of some statistical indicators, and it was determined that methods based on genetic algorithms and artificial neural networks could be successfully used to estimate the concrete strength properties.

Alıntı / Cite

Tuncay Başpınar, E., Köken, E., Kılınçarslan, Ş., (2022). Beton Dayanımının Yüzey Tepki Yöntemi Genetik Algoritma ve Yapay Sinir Ağları ile Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 429-441.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

E. Başpınar Tuncay, 0000-0001-9416-9576

E. Köken, 0000-0003-0178-329X

Ş. Kılınçarslan, 0000-0001-8253-9357

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date 22.10.2022

Revizyon Tarihi / Revision Date 09.02.2022

Kabul Tarihi / Accepted Date 13.02.2022

Yayın Tarihi / Published Date 30.06.2022

1. Giriş (Introduction)

Düşük üretim maliyeti ve yüksek tasarım esnekliğine sahip olan beton, günümüzün en sık kullanılan yapı malzemelerinden bir tanesidir. Genel olarak beton; çimento, boyutlandırılmış agrega ve sudan oluşan kompozit bir malzeme olarak tanımlanmakta olup, çeşitli tasarım özelliklerine göre farklı zamanlarda katılaşabilen,

* İlgili yazar / Corresponding author: ebrubaspınar@sdu.edu.tr, +90-246-211-1331

sertleşebilen ve mukavemet kazanabilen bir yapıya sahiptir (Nilson vd., 2010; Panzera vd., 2011; Özçep vd., 2012; Asutkar vd., 2017; Sun vd., 2019; Feng vd., 2020). Betonun genel kalitesini, yansıtan en önemli özelliklerden bir tanesi tek eksenli basınç dayanımı olup, mühendislik yapılarının güvenliği ile doğrudan ilişkilidir (Deng vd., 2018). Mühendislik yapılarında istenilen beton kalitesi için gerekli deneysel çalışmalarda agrega, çimento, kullanılan ekipman, iş gücü ve kalitesi, maliyet ile zaman dikkat edilmesi gereken değişkenler olarak ortaya çıkmaktadır. İstenilen beton kalitesine çeşitli hata veya olumsuzluklardan kaynaklanan sebepler nedeniyle ulaşılamadığı takdirde, yukarıda ifade edilen tüm değişkenlerin tekrar ayrı ayrı ele alınması gerekmektedir (ACI, 1993; Öztaş vd., 2006; Tayfur vd., 2014; Namlı vd., 2016).

Son yıllarda beton üzerine artan çalışmalar ışığında, beton dayanımı tahmin etmek için çeşitli yöntemler ortaya konulmuştur. Genel olarak beton dayanımı, istatistiksel ve ileri modelleme teknikleri ile ele alınmaktadır (Snell vd., 1989; Oluokun vd., 1990; Popovics, 1998; Ni ve Wang, 2000; Özturan vd., 2008; Duan vd., 2013; Cihan vd., 2013; Siraj, 2015; Moutassem ve Chidiac 2016; Armaghani ve Asteris 2020).

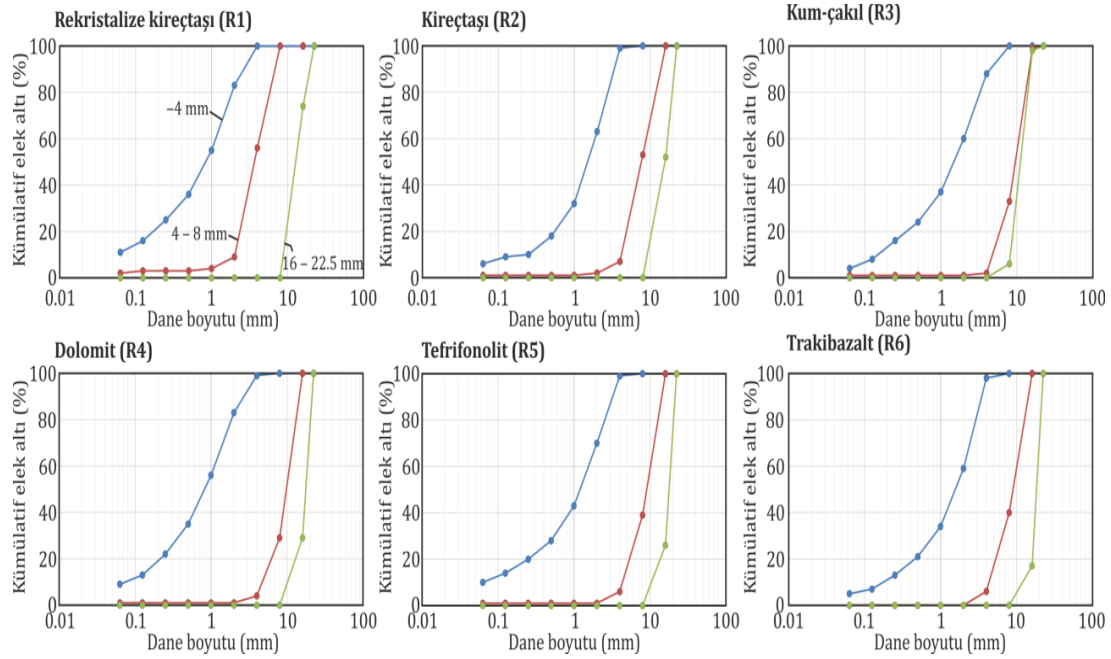
Günümüzde beton dayanımının tahminlenmesine ilişkin çalışmalarda, istatistiksel yöntemlerinden daha çok, ileri modelleme tekniklerini temel alan yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Örneğin, Kewalramani ve Gupta (2006), P dalga hızını temel alan laboratuvar çalışmalarında, farklı kürlenme teknikleri ile oluşturulan betonların dayanımının tahmin edilmesine ilişkin yapay sinir ağları (YSA) yöntemini kullanmıştır. Tayfur vd. (2014), bulanık mantık algoritmasını temel alan çalışmada, beton dayanımını silis içeriği, bağlayıcı içeriği ve beton yaşı parametrelerine bağlı olarak başarılı bir şekilde modellemiştir. Namlı vd. (2016), farklı boyutlardaki agregalar ve katkı malzemelerinden oluşan betonların dayanımını klasik YSA ve dalgacık dönüşümlü YSA yöntemlerini kullanarak modellemiştir. Tutarlılık ve tahmin gücü açısından araştırmacılar, YSA yöntemlerinin beton dayanımı tahmini konusunda etkin şekilde kullanıldığını ortaya koymuştur. Naderpour vd. (2018), betonlarda kullanılan agregaların ağırlıkça su emme (w_a), su/çimento oranı, ince agrega miktarı, geri dönüştürülmüş agrega miktarı gibi parametreleri kullanılarak, 28 günlük betonların dayanımını YSA yöntemi kullanarak modellemiştir. Önerilen modelin YSA mimarisi 6-4-1 şeklindedir ve araştırmacılar modelin korelasyon katsayısını $r = 0.8926$ olarak ortaya koymuştur. Deng vd. (2018), geri dönüştürülmüş agregalar kullanarak betonun basınç dayanımını tahmin etmek için derin öğrenme teorisine dayalı bir tahmin modeli önermiştir. Su/çimento oranı, geri dönüştürülmüş iri agrega oranı, geri dönüştürülmüş ince agrega oranı, uçucu kül oranını YSA modellerinde kullanılmıştır. Önerilen YSA modelinin mimarisi 3-4-2 şeklindedir. Getahun vd. (2018), farklı agrega türleri ve çimento içeriklerini temel alarak gerçekleştirdiği laboratuvar çalışmalarında, betonların dayanımını, 15-15-2 YSA mimarisi ile $r = 0.9811$ mertebesinde modellemiştir. Poorarbabi vd. (2020), yüzey tepki yöntemi (RMS), kullanarak beton dayanımını tahribatsız yöntemler ile modellemiştir. Geliştirilen modelde, P dalga hızı (V_p) ve Schmidt çekici geri tepme sayısı (SHV) değerleri bağımsız değişkenler olarak kullanılmıştır. Shishegaran vd. (2021), V_p ve SHV bağımsız değişkenlerinin kullanıldığı genetik algoritma (GA) ve adaptif yapay sinir ağı bulanık mantık çıkarım sistemi (ANFIS) ve çeşitli hibrit modeller ile beton dayanımını başarılı bir şekilde tahmin etmiştir. Yukarıda ifade edilen çalışmalardan elde edilen bulgular ışığında, ileri modelleme yöntemlerinin beton dayanımı tahmininde başarılı ve pratik bir şekilde kullanılabilirliği söylenebilir. YSA, GA, ve diğer çeşitli ileri modelleme yöntemleri, bağımsız değişkenlerin algoritmaya tanıtılması ve öğretilmesi temeline dayanmakta olup, elde edilen matematiksel eşitliklerin herhangi bir bilgisayar programına kodlanması oldukça pratik bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada, beton tek eksenli basınç dayanımının (UCS_c) ve eğilme dayanımının (FS_c) tahmin edilmesine yönelik bir dizi ileri modelleme yöntemleri (RSM, YSA, GA) tanıtılmış ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen veri setine uygulanmıştır. Betonlarda kullanılan agregaların Los Angeles aşınma kaybı (LAA), 28 günlük beton yoğunluğu (ρ_c) ve P dalgası hızı (V_{pc}) değerleri bağımsız değişken olarak modellerde tanımlanmıştır. Söz konusu bu üç ileri modelleme tekniğine ait model performans değerlendirmeleri çeşitli istatistiksel parametreler ışığında yapılmış ve sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

Beton numunelerinin hazırlanmasında en önemli etmen olan agregaların temini, saha çalışmaları ile gerçekleştirilmiştir. Altı farklı agrega türü Isparta yöresinden temin edilmiş olup, beton agregaları üç farklı dane boyutunda (-4, 4-8 ve 16-22.5 mm) hazırlanmıştır (Şekil 1).

Agrega deneyleri için kullanılan numunelerin boyutlarına göre elenmesinde ve hazırlanmasında TS EN 933-2 (1996)'e uygun elekler ile elek sallama makinesi kullanılmıştır. Dane boyutu analizleri için TS 3530 EN 933-1 (1999)'deki yöntem benimsenmiştir.



Şekil 1. Farklı boyut gruplarına göre hazırlanan beton agregalarının tipik dane boyutu dağılım eğrileri (Typical particle size distribution curves of concrete aggregates with different size fractions)

Farklı boyut gruplarındaki beton agregalarının karışım oranları Tablo 1’de verilmiştir. Beton agregalarının kalıp içerisindeki ortalama dane boyutları 5 – 10 mm arasında sabit tutulabilmesi için farklı karışım oranları kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun TS EN 197-1 (2011)’e göre, uygunluk analiz sonuçları Tablo 2’de listelenmiştir. TS EN 206-1 (2014)’de belirtilen beton karışımında kullanılabilen karma suyu özelliklerini taşıdığı kabul edilerek içme suyu şebekesinden alınan su kullanılmıştır. TS 802 (2009)’da ifade edilen beton karışım hesapları dikkate alınarak beton numuneleri hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan agregaların en büyük dane büyüklüğü (d_{max}) 22,4 mm, 8-10 cm çökme miktarına sahip, kimyasal katkısız ve hava sürüklenmemiş olan beton karışımının su/çimento oranı ise 0.46 olarak sabit alınmıştır. Beton numunelerine ait tek eksenli basınç deneyi için 10x10x10 cm, eğilme dayanımı için ise 15x15x60 cm boyutlarında örnekler hazırlanmıştır.

Tablo 1. Beton agregaları karışım oranları (Mixture ratio of concrete aggregates)

Agrega boyutu	Rekristalize Kireçtaşı (R1)	Kireçtaşı (R2)	Kum-çakıl (R3)	Dolomit (R4)	Tefrifonolit (R5)	Trakibazalt (R6)
İri agrega (16 - 22.5 mm)	29.76	42.71	50.91	28.87	14.89	24.70
Kırma kum (4 - 8 mm)	34.04	3.43	5.88	30.53	37.07	29.67
İnce agrega (-4 mm)	36.21	53.86	43.21	40.60	48.04	45.63

Tablo 2. Kullanılan çimentonun (CEM I 42.5R) fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri (Physical, mechanical and chemical properties of cement (CEM I 42.5R) used)

Değer	Blaine yüzey alanı (cm ² /g)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Priz başlangıcı (dak)	Genleşme (mm)	Dayanım (MPa)			SO ₃ (%)	LOI (%)	CL (%)
					B ₂	B ₇	B ₂₈			
Ortalama	3133	3.12	158	1	27.1	42.3	56.0	2.84	1.94	0.004
Standart Sapma	123.84	0.01	22.04	0	2.14	2.21	1.38	0.13	1.14	0.003
Minimum	2980	3.11	140	1	23.3	37.8	54.5	2.63	1.00	0.001
Maksimum	3370	3.14	200	1	30.0	44.6	58.1	3.00	3.83	0.010

TS EN 12390-2 (2010)’de belirtildiği gibi beton örnekleri, kalıptan çıkartıldıktan sonra, deney zamanına kadar 20 ±2 °C sıcaklığındaki su tankında kürlenme sürecine tâbi tutulmuştur. TS EN 12390-7 (2010) standardında göre, 28 günlük beton örnekleri, kür havuzundan çıkarıldıktan sonra numune yüzeyindeki serbest su silinerek yüzey kuru duruma getirilmiş ve doygun yüzey kuru ağırlıkları elektronik terazi (0.5 g hassasiyetli) ile tartılmıştır. Boyutları ise elektronik kumpas (1/100 mm hassasiyetli) kullanılarak ölçülmüş ve hacmi belirlenerek beton örneklerinin yoğunlukları TS EN 12390-7 (2010) standardına göre hesaplanmıştır.

TS EN 12390-3 (2010) standardında belirtildiği gibi, küp şeklindeki beton örnekleri, yük uygulama yönü beton döküm yönüne dik olacak şekilde beton dayanım cihazına yerleştirildikten sonra, 0.5 ± 0.05 (N/mm².s) yükleme hızında tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Beton örneklerinin taşıyabildiği en büyük yük belirlenmiş ve beton basınç dayanımları hesaplanmıştır. Benzer şekilde, TS EN 12390-5 (2010)'e göre deney için kür havuzundan çıkarılan prizmatik beton örneklerinin yüzeylerindeki sular silindikten sonra mesnet (alt) ve yükleme (üst) silindirleri yoluyla yük uygulanmıştır. Eğilme momentine maruz kalan numunelerin ulaştıkları en büyük yük kaydedilerek eğilme dayanımı tespit edilmiştir.



Şekil 2. Laboratuvar çalışmaları a) Beton agregalarında LAA testi b) Beton numunelerinin kalıplara doldurulması c) Kütleme işlemi d) Beton numunelerinde P dalgası ölçümü e) Tek eksenli basınç deneyi f) Eğilme deneyi (Laboratory studies: a) LAA test for concrete aggregates b) Filling concrete samples into the molds c) Curing process d) Pulse wave velocity measurements for concrete samples e) Uniaxial compressive strength test f) Flexure strength test)

TS EN 1097-6 (2013)'e göre hava dolaşımı bir etüvde, $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ 'de kurutulmuş, sabit kütlesi bilinen iri agregalar, piknometrede bulunan, $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki suya daldırılarak hapsolmuş hava, piknometre sallanarak uzaklaştırılmıştır. Piknometre, su banyosu içerisinde düşey hale getirilip, deney numunesi kısmı, $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$ 'de (24 ± 0.5) saat süreyle tutulmuştur. Doygun ve havada yüzeyi kurutulmuş hale getirilen agrega numuneleri tartılmıştır. TS EN 1097-6 (2013)'de belirtildiği gibi agregaların ağırlıkça su emme yüzdesi belirlenmiştir. TS EN 1097-6 (2013)'de belirtildiği gibi, agregalar, öncelikle yapışmış haldeki tanelerin uzaklaştırmak için yıkanmıştır. 31.5 mm göz açıklıklı elekte tutulan ve 0.063 mm. göz açıklıklı elekten geçen taneler atılmış ve agregalar etüvde $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ sıcaklıkta sabit kütleye ulaşılncaya kadar kurutulmuştur. Böylelikle kütle, deney agregalarının, etüvde kurutulmuş esasta tartmak suretiyle elde edilmiştir. Hacim ise, hacmi bilinen bir piknometrede kütle azalması yoluyla, kuru tanelerin sebep olduğu yer değiştiren su ile tayin edilmiştir. Deney agregalarının kütlelerini ve hacmini tayin etmek ve kütle hacme oranı olarak kuru tane yoğunluğunu hesaplanmıştır. TS EN 1097-2 (2010)'e göre, 14 mm deney eleğinden geçen ve 10 mm deney eleğinde kalan agregalar, dönen tamburda çelik bilyalar ile birlikte 31-33 devir/dakika sabit hızda 500 devir döndürülmüştür. Agregalar 1.6 mm'lik elek kullanılarak yıkanmış ve elenmiştir. 1.6 mm elekte kalan kısım, $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ 'daki etüvde sabit kütleye gelinceye kadar kurutulmuştur. Deney tamamlandıktan sonra standartta belirtildiği gibi 1.6 mm'lik elekten geçen deney kısmının yüzdesi hesaplanarak LAA testi ile iri agregaların parçalanma direnci belirlenmiştir. Ultrasonik test yöntemi ASTM C597 (1994) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Beton içerisindeki P dalga hızı, ultrasonik test cihazı tarafından gönderilen ultrasonik dalganın gönderildiği yüzey ile geri alındığı yüzey arasındaki mesafeyi ve iletildiği sürenin belirlenmesiyle hesaplanmıştır. Laboratuvar çalışmaları Şekil 2'de verilmiştir.

3. Laboratuvar Çalışmaları (Laboratory Studies)

3.1. Beton Agregalarının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri (Physical and Mechanical Properties of Concrete Aggregates)

Bu çalışmada kullanılan beton agregalarının fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3'te ortalama değerleri gösterecek şekilde listelenmiştir. Buna göre, incelenen kayaçların kuru yoğunlukları $2338 - 2735$ kg/m³, ağırlıkça su emme değerleri %0.141 - %3.943 ve Los Angeles aşınma kaybı değerleri ise %11.35 - %26.54 arasında değişmektedir.

Tablo 3. Beton agregalarının fiziksel ve mekanik özellikleri (Tuncay Başpınar, 2015, Kılınçarslan vd., 2018) (Physical and mechanical properties of the concrete aggregates (Tuncay Başpınar, 2015, Kılınçarslan vd., 2018))

Agrega türü	n	ρ_d (kg/m ³)	w_a (%)	LAA (%)
R1	3	2570	0.215	20.28
R2	3	2590	0.298	19.25
R3	3	2576	0.371	17.45
R4	3	2709	0.205	13.65
R5	3	2338	3.943	26.54
R6	3	2735	0.141	11.35

Açıklamalar: n: Örnek sayısı, ρ_d : Kuru yoğunluk, w_a : Ağırlıkça su emme, LAA: Los Angeles aşınma kaybı

3.2. Beton Deneyleri (Concrete Tests)

Hazırlanan beton numunelerine ait 28 gün sonundaki ρ_c , V_{pc} , UCS_c FS_c değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Buna göre, betonlara ait ρ_c , V_{pc} , UCS_c ve FS_c değerleri sırasıyla 2187 – 2465 kg/m³, 4.161 – 4.656 km/s, 40.81 – 55.74 MPa ve 7.52 – 12.69 MPa arasında değişmektedir.

Tablo 4. 28 gün sonundaki betonların fiziksel ve mekanik özellikleri (Tuncay Başpınar 2015, Kılınçarslan vd., 2018) (Physical and mechanical properties of the concrete samples, (Tuncay Başpınar 2015, Kılınçarslan vd., 2018))

Agrega türü	n	ρ_c (kg/m ³)	V_{pc} (km/s)	UCS_c (MPa)	FS_c (MPa)
R1	6	2284	4.291	44.80	7.81
		2237	4.278	43.96	7.64
		2187	4.215	43.00	7.50
		2230	4.225	44.71	7.73
		2284	4.201	44.22	7.52
		2329	4.264	44.89	7.96
R2	6	2268	4.280	45.73	8.61
		2345	4.273	47.44	8.80
		2282	4.223	46.80	9.03
		2282	4.355	47.74	8.65
		2267	4.265	46.44	8.48
		2328	4.372	47.96	8.91
R3	6	2460	4.563	55.33	11.80
		2395	4.593	54.79	12.04
		2461	4.497	55.74	12.56
		2465	4.619	55.18	11.51
		2462	4.435	55.25	11.64
		2444	4.656	55.47	12.69
R4	6	2178	4.161	41.68	8.43
		2177	4.196	40.81	8.02
		2192	4.221	41.34	8.84
		2163	4.194	42.10	9.26
		2222	4.178	42.05	9.23
		2193	4.237	41.50	8.27
R5	6	2326	4.418	49.48	10.84
		2356	4.413	50.55	11.01
		2387	4.410	52.83	10.57
		2408	4.455	53.47	11.85
		2401	4.516	53.58	12.12
		2434	4.401	53.55	12.38
R6	6	2222	4.292	48.92	11.05
		2252	4.337	49.33	10.71
		2425	4.324	49.31	10.40
		2314	4.342	49.14	10.22
		2382	4.326	49.44	10.95
		2385	4.423	49.24	10.88

Açıklamalar: n: Örnek sayısı, ρ_c : Beton yoğunluğu, V_{pc} : Beton P dalga hızı, UCS_c : Beton tek eksenli basınç dayanımı, FS_c : Beton eğilme dayanımı.

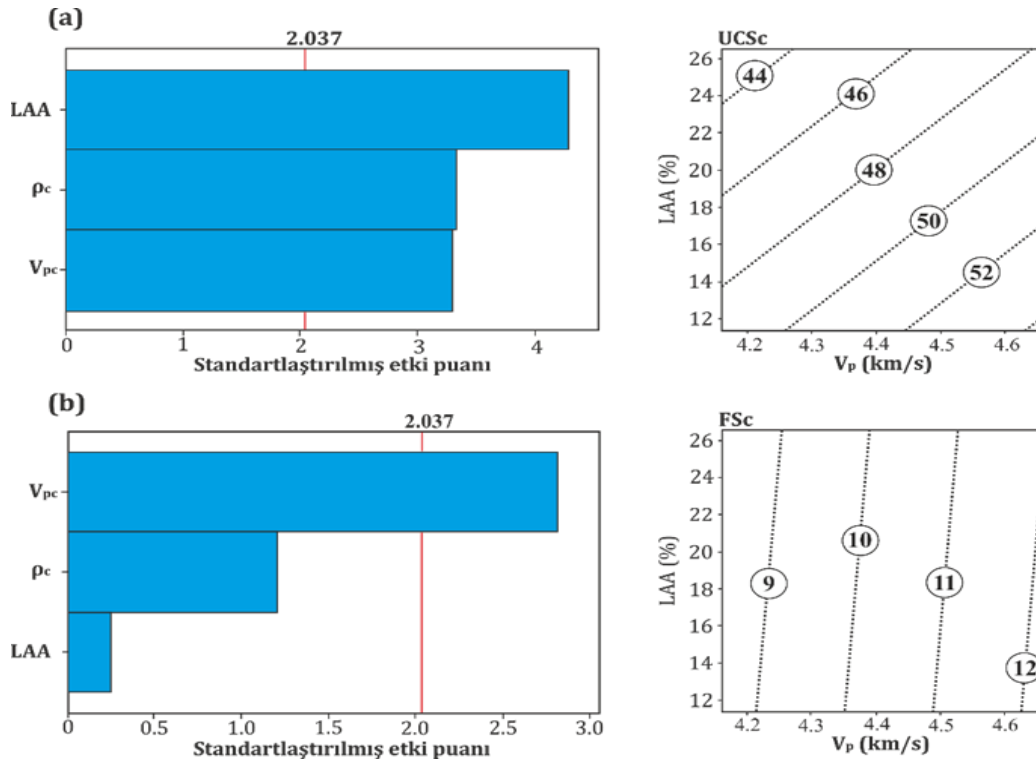
4. Beton Dayanımının Matematiksel Modellenmesi (Mathematical Modeling of Concrete Strength)

4.1. Yüzey Tepki Yöntemi (RSM) (Response Surface Methodology (RSM))

Yüzey tepki yöntemi, ürün veya modelleri geliştirme, iyileştirme veya optimize etmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Myers, 2016). Bu çalışmada UCS_c ve FS_c değerlerinin tahmini konusunda istatistiksel olarak anlamlı faktörler Pareto diyagramları ile ortaya konulmuştur (Şekil 3). Şekil 3a'ya göre UCS_c tahmini için agregaların LAA ve betonların ρ_c ve V_{pc} değerleri istatistiksel olarak anlamlı olup, FS_c için ise sadece V_{pc} değeri anlamlı bulunmuştur. (Şekil 3b). Şekil 3a ve Şekil 3b'deki parametrelere ait RSM modelleri ise Eşitlik 1 ve Eşitlik 2'de sırasıyla verilmiştir. Eşitlik 1 ve 2 R² değerleri açısından kendi aralarında karşılaştırıldığında ise, RSM modelinin UCS_c değerinin tahmin edilmesinde daha başarılı olduğu sonucuna varılabilir.

$$UCS_c = -25.8 + 0.015\rho_c - 0.4044LAA + 10.72V_{pc}, r^2 = 0.94 \quad (1)$$

$$FS_c = -31.5 + 0.00434\rho_c - 0.0188LAA + 7.28V_{pc}, r^2 = 0.71 \quad (2)$$



Şekil 3. Bu çalışmada geliştirilen yüzey tepki modelleri a) UCS_c b) FS_c (Response surface models established in this study a) UCS_c b) FS_c)

4.2. Genetik Algoritma (GA) Yöntemi (Genetic Algorithm (GA) Method)

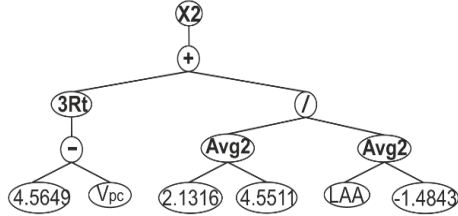
GA yöntemi, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında açık bir matematiksel formül üretebilen evrimsel tabanlı bir algoritma türüdür (Koza, 2001). Bu algoritma ilk olarak Ferreira (2001) tarafından geliştirilmiş olup, fen ve mühendislik alanlarında modelleme ve sınıflama alanlarında sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir (Zhong vd., 2017). Bu çalışmada UCS_c ve FS_c değerlerinin tahmini için farklı genetik algoritmalar oluşturulmuş ve elde edilen en iyi modellerin gen ağaçları ve matematiksel denklemleri sunulmuştur. GA analizlerinde kromozom sayısı (*number of chromosomes*), ana gövde sayısı (*head size*) ve gen sayısı (*number of genes*) sırayla 30, 7 ve 3 olarak kabul edilmiştir. Gen ağaçları arasındaki ilişki denklemi ise toplama fonksiyonu (*addition*) şeklinde algoritmada tanımlanmıştır. UCS_c ve FS_c değerlerinin tahmini için geliştirilen GA modellerine ait gen ağaçları Şekil 4'te verilmiş olup, gen ağaçlarına ait matematiksel denklemler ise Eşitlik 3 ve Eşitlik 4'te sunulmuştur. Eşitlik 3 ve Eşitlik 4'e ait gen ağacı alt denklemleri Tablo 5'te görülmektedir.

$$UCS_c = 0.9984 \left(\sum_{i=1}^3 S_i \right) + 0.1909, r^2 = 0.97 \quad (3)$$

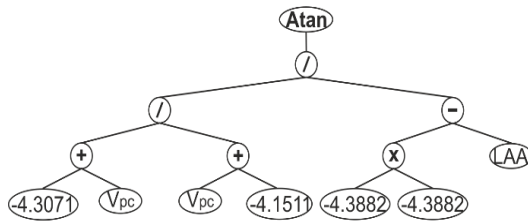
$$FS_c = 1.04 \left(\sum_{i=1}^3 S_i \right) - 0.3822, r^2 = 0.92 \quad (4)$$

a) UCS_c

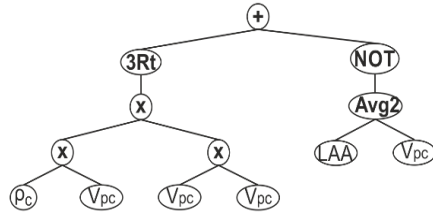
Sub-ET 1



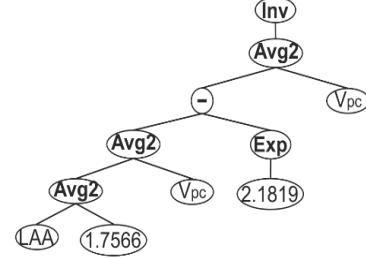
Sub-ET 2



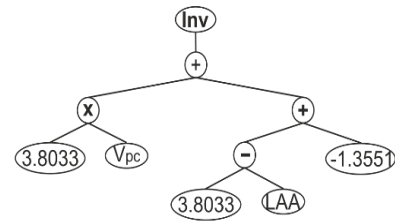
Sub-ET 3

b) FS_c

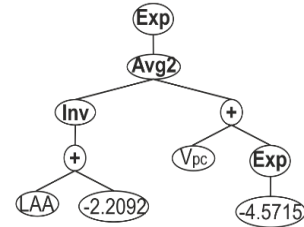
Sub-ET 1



Sub-ET 2



Sub-ET 3



Şekil 4. Bu çalışmada geliştirilen GA modellerine ait gen ağaçları a) UCS_c b) FS_c (Sub expression trees established in the genetic algorithms a) UCS_c b) FS_c)

Tablo 5. GA modellerinden elde edilen gen ağaçlarına ait alt denklem setleri (Mathematical equation sets obtained from the genetic algorithms)

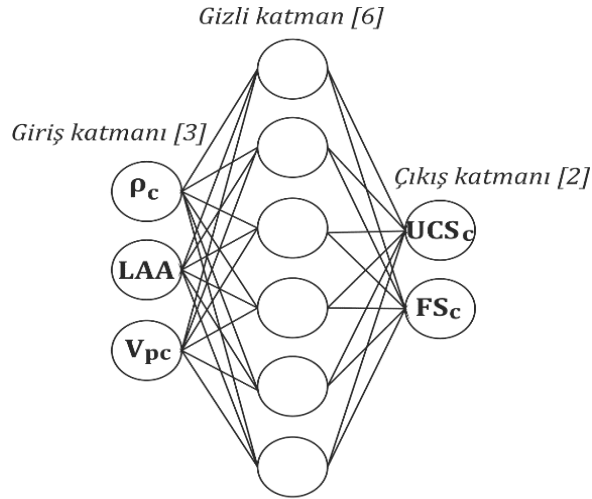
Eşitlik 3	Eşitlik 4
$Sub-ET1(S_1) = \left(\left(4.5649 - V_{pc} \right)^{1/3} + \left(\frac{6.6826}{LAA - 1.4843} \right) \right)^2$	$Sub-ET1(S_1) = \frac{2}{\left(\frac{LAA + 1.7566}{2} + V_{pc} - 8.8631 \right) + V_{pc}}$
$Sub-ET2(S_2) = \operatorname{Atan} \left(\frac{\left(\frac{V_{pc} - 4.3071}{V_{pc} - 4.1511} \right)}{(19.2562 - LAA)} \right)$	$Sub-ET2(S_2) = \frac{1}{3.8033V_{pc} + (2.4482 - LAA)}$
$Sub-ET3(S_3) = \left(\rho_c^{0.3333} \times V_{pc} \right) + \left(1 - \frac{LAA + V_{pc}}{2} \right)$	$Sub-ET3(S_3) = \exp \left(\frac{\left(\frac{1}{LAA - 2.2092} \right) + (V_{pc} + 0.0103)}{2} \right)$

Açıklamalar: ρ_c Beton görünür yoğunluğu (kg/m³), V_{pc} : Beton numunesi P dalga hızı (km/s), LAA: Beton agregasının Los Angeles aşınma kaybı (%), UCS_c ve FS_c MPA birimindedir.

4.3. Yapay Sinir Ağları (YSA) Yöntemi (Artificial Neural Networks (ANN) Method)

Karmaşık problemlerin çözülmesine yardımcı olan yapay sinir ağları, bilgiyi işlemek için insan beyninin biyolojik sinir sistemini taklit eder. Birbirine bağlı hesaplama elemanlarının bulunduğu yapay sinir ağı tekniğinde, ağ mimarisi tek giriş katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve bir tahmin (çıkış) katmanı olmak üzere üç bölümden oluşur. Giriş katmanında veriler sisteme entegre edilir ve nöronlar ile iletilir, ardından gizli katmanda işlenir ve sistemin yanıtını kaydetmek için çıkış katmanına gönderilir. Girdi boyutları ve bunlara karşılık gelen hedefler arasındaki ilişkiyi yakalamak için her katmandaki nöronlar, ağırlıklı bağlantılar aracılığıyla birbirleriyle etkileşime girer (Gallo, 2015; Zhang ve diğerleri, 2020; Raja ve Shukla, 2021).

Bu süreç doğrultusunda giriş katmanındaki verilerin işleme ve transfer süreci tamamlanarak çıktı katmanına ait olası sonuçlar elde edilir. Bu çalışmada farklı giriş ve gizli katmanlar kullanılarak en uygun YSA modelleri geliştirilmeye çalışılmış ve en uygun YSA mimarisi Şekil 5'te verilmiştir. Buna göre, ρ_c , LAA ve V_{pc} bağımsız değişkenler olarak sisteme girdi parametreleri olarak verilmiş olup, YSA mimarisi 3-6-2 şeklinde tanımlanmıştır. YSA analizlerinden elde edilen matematiksel denklemler Eşitlik 5 ve Eşitlik 6'da verilmiştir. UCS_c ve FS_c değerlerinin tahmini için YSA alt denklemleri Tablo 6'da verilmiştir.



Yapay sinir ağları mimarisi 3 - 6 - 2

Şekil 5. Bu çalışmada benimsenen YSA mimarisi (ANN architecture adopted in this study)

$$UCS_c = 7.45 \tanh \left(\sum_{i=1}^6 A_i + 0.43963 \right) + 48.26, r^2 = 0.98 \quad (5)$$

$$FS_c = 2.51 \tanh \left(\sum_{i=1}^6 A_i + 1.5054 \right) + 10.01, r^2 = 0.97 \quad (6)$$

YSA analizlerine göre, UCS_c ve FS_c değerlerinin tahmininde Eşitlik 5 ve Eşitlik 6 yeterli güvenilirlikte kullanılabilir olup, her iki modelin belirleme katsayısı (r^2) sırasıyla 0.98 ve 0.97 olarak belirlenmiştir. Bu bölüme kadar tanıtılan altı adet tahmin modelinin performans değerlendirmesi ise tartışma bölümünde sunulmuştur.

Tablo 6. Eşitlik 5 ve Eşitlik 6'daki alt denklem sistemleri (Sub-equations systems of Equation 5 and Equation 6)**Eşitlik 5**

$$\begin{aligned}
A_1 &= 2.9337 \tanh(-1.6536 {}^n \rho_c + 1.4813 {}^n LAA + 2.51 {}^n V_{pc} + 2.5903) \\
A_2 &= -2.1796 \tanh(-2.1379 {}^n \rho_c + 1.5681 {}^n LAA + 1.6641 {}^n V_{pc} + 2.3798) \\
A_3 &= 4.439 \tanh(3.3755 {}^n \rho_c - 0.67676 {}^n LAA - 2.2679 {}^n V_{pc} + 1.4714) \\
A_4 &= -4.2256 \tanh(5.5857 {}^n \rho_c - 0.52721 {}^n LAA - 4.7598 {}^n V_{pc} + 1.6304) \\
A_5 &= -3.4234 \tanh(-4.8225 {}^n \rho_c + 1.4746 {}^n LAA - 2.3256 {}^n V_{pc} + 7.025) \\
A_6 &= -2.1252 \tanh(-0.31896 {}^n \rho_c + 2.6015 {}^n LAA + 0.69765 {}^n V_{pc} - 4.1531)
\end{aligned}$$

Tablo 6 devamı**Eşitlik 6**

$$\begin{aligned}
A_1 &= -1.2251 \tanh(-3.2088 {}^n \rho_c + 2.709 {}^n LAA - 1.6424 {}^n V_{pc} + 4.1221) \\
A_2 &= 3.8511 \tanh(-0.24017 {}^n \rho_c + 4.7958 {}^n LAA - 0.25217 {}^n V_{pc} - 1.2469) \\
A_3 &= 1.0487 \tanh(-1.4781 {}^n \rho_c + 1.6071 {}^n LAA - 0.68061 {}^n V_{pc} + 2.2897) \\
A_4 &= -2.0103 \tanh(-0.66733 {}^n \rho_c + 5.6985 {}^n LAA - 1.0162 {}^n V_{pc} - 0.3501) \\
A_5 &= -2.6367 \tanh(-3.1288 {}^n \rho_c + 1.1132 {}^n LAA - 0.25373 {}^n V_{pc} - 2.4756) \\
A_6 &= -1.7019 \tanh(4.2981 {}^n \rho_c + 2.0655 {}^n LAA + 0.27309 {}^n V_{pc} + 3.0354)
\end{aligned}$$

Normalizasyon denklemleri

$${}^n \rho_c = 0.0066 \rho_c - 15.325$$

$${}^n LAA = 0.1317 LAA - 2.4944$$

$${}^n V_{pc} = 4.0404 V_{pc} - 17.812$$

Açıklamalar: ρ_c Beton görünür yoğunluğu (kg/m^3), V_{pc} : Beton numunesi P dalga hızı (km/s), LAA: Beton agregasının Los Angeles aşınma kaybı (%), UCS_c ve FS_c MPA birimindedir.

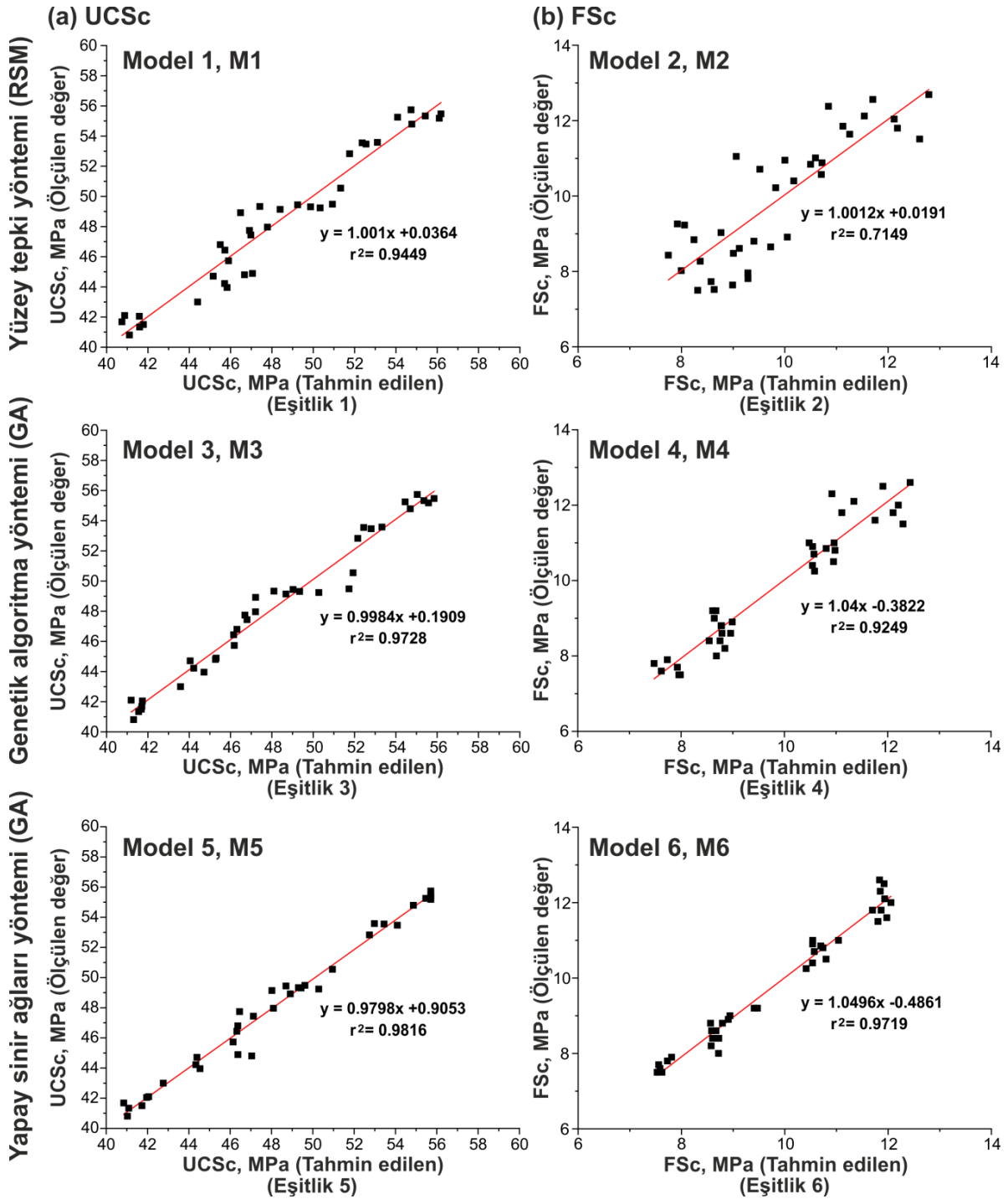
5. Tartışma (Discussion)

Geliştirilen modellerden tahmin edilen ve gerçek değerler arasındaki ilişkiler Şekil 6'da verilmiştir. Buna göre, UCSs değerinin tahmininde her üç modelde (M1, M3 ve M5) tutarlı sonuçlar sağlamaktadır (Şekil 6a). Diğer taraftan, FS_c tahminindeki M2 modeli, bu çalışmadaki en düşük R² değerini (0.71) vermektedir. FS_c'nin tahmininde bu sebepten M4 ve M6 modellerinin birlikte kullanılması önerilmektedir (Şekil 6b). Genel olarak bu çalışmada, GA ve YSA tabanlı modellerin RSM modellerinden daha tutarlı ve genel sonuçlar verdiği görülmektedir. Hammoudi vd. (2019), geri dönüştürülmüş beton agregalarının basınç dayanımını tahmin etmede RSM ve YSA'nın doğruluğunu karşılaştırmış YSA tabanlı modellerin beton dayanım tahmininde RSM'den daha iyi olduğunu belirtmiştir. Söz konusu bu çalışma da mevcut çalışmadan elde edilen bulgular ile uyum içerisindedir. Benzer bulgular Namli vd. (2016) tarafından da belirtilmiştir.

Daha ayrıntılı bir değerlendirme için mevcut modellerin (M1-M6) performansları bazı istatistiksel göstergeler ışığında tekrar ele alınmış ve modellerin birbirine göre üstünlük veya zayıflıkları tartışılmıştır. Bu çalışmada kullanılan istatistiksel göstergeler; ortalama toplam hata oranı (MAPE), ortalama karekök hatası (RMSE) ve varyans açıklama değeri (VAF) olup, bu göstergelere ait denklemler Eşitlik 7 - 9 ile ifade edilmektedir.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |o_i - e_i| \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - e_i)^2}{n}} \quad (8)$$



Şekil 6. Bu çalışmadan elde edilen modellere ait tahmin edilen ve ölçülen değerlerin karşılaştırılması (Comparison of the predicted and measured values obtained from the established models in this study)

$$VAF = \left(1 - \frac{\text{var}(o_i - e_i)}{\text{var}(o_i)} \right) \times 100 \quad (9)$$

Burada o_i ölçülen laboratuvar sonucunu, e_i ise tahmin edilen laboratuvar sonucunu göstermektedir.

Tablo 7'de geliştirilen modellerin bazı istatistiksel göstergeler ışığındaki değerlendirilmesi görülmektedir. En uygun modellerin seçiminde en yüksek r^2 ve VAF değeri ile en düşük MAPE ve RMSE değerleri aranmaktadır (Onifade vd. 2019; Lawal ve Idris 2020). Bu bilgiler ışığında, geliştirilen modeller birbirleri ile karşılaştırılmış ve en düşük hata oranını veren modelin YSA tabanlı modeller (M5, M6) modellerinin olduğu tespit edilmiştir (Tablo 7). Ancak GA modellerinin de (M3, M4) UCS ve FSc'nin tahmininde yeteri güvenilirlikte kullanılabileceği söylenebilir.

Tablo 7. Geliştirilen modellerin performans değerlendirmesi (Performance evaluation of the established models)

Bağımlı değişken	Model No	Eşitlik No	r^2	MAPE	RMSE	VAF
UCSc	M1 (RSM)	1	0.9449	0.9191	1.1036	94.48
	M3 (GA)	3	0.9728	0.6199	0.7833	97.27
	M5 (YSA)	5	0.9816	0.4392	0.6479	98.12
FSc	M2 (RSM)	2	0.7149	0.7358	0.8833	71.48
	M4 (GA)	4	0.9249	0.3580	0.4560	92.35
	M6 (YSA)	6	0.9719	0.2121	0.2865	96.97

6. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, Isparta yöresinden temin edilmiş altı farklı beton agregasının fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir (Tablo 3). Ayrıca, hazırlanmış beton numunelerinin ρ_c , V_{pc} , UCS_c ve FS_c değerleri laboratuvar çalışmaları ile ortaya konmuştur (Tablo 4). RSM, GA ve YAS tahmin modellerinde UCS_c, FS_c için agregaların LAA ve betonların ρ_c ve V_{pc} değerleri anlamlı sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamıştır. 36 veri seti ile geliştirilen RSM, GA ve YSA yöntemleri kullanılarak betonların UCS_c ve FS_c değerlerinin tahmini için altı farklı model geliştirilmiştir. Geliştirilen UCS_c ve FS_c'ye ait yüzey tepki (M1, M2), GA (M3), (M4) ve YSA (M5, M6) modelleri tanıtılmış ve modellere ait matematiksel ifadeler sunulmuştur. Geliştirilen modellerin performans değerlendirmeleri r^2 , MAPE, RMSE ve VAF değerleri ile ortaya konmuş ve M1, M3 ve M5 modellerinin UCS_c değerinin tahmini için kullanılabilir olduğu görülmüştür (Tablo 7). FS_c değerinin tahmini için ise M4 ve M6 modellerinin birlikte kullanılması uygun görülmektedir. İleriki çalışmalar için, veri setinin artırılması ve farklı RSM modellerinin uygulanması tavsiye edilmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 1806-D-09 No'lu proje kapsamında desteklenmiştir. Araştırmacılar Prof. Dr. Fuzuli YAĞMURLU'ya ve Öğretim Görevlisi Olcay ÇAKMAK'a katkılarından dolayı içtenlikle teşekkür eder.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- American Concrete Institute (ACI) Committee 211, 1993. Guide for Selecting Proportions for High Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash. ACI211.4R-93, Detroit, MI.
- 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.
- ASTM C597, 1994. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.02. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- Asutkar, P., Shinde, S.B., Patel, R., 2017. Study on the Behaviour of Rubber Aggregates Concrete Beams Using Analytical Approach. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(1), 151-159.
- Cihan, M.T., Güner, A., Yüzer, N., 2013. Response Surfaces for Compressive Strength of Concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 763-774.
- Deng, F., He, Y., Zhou, S., Yu, Y., Cheng, H., Wu, X., 2018. Compressive Strength Prediction of Recycled Concrete Based on Deep Learning. *Construction and Building Materials*, 175, 562-569.
- Duan, Z.H., Kou, S.C., Poon, C.S., 2013. Prediction of Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete Using Artificial Neural Networks. *Construction and Building Materials*, 40, 1200-1206.
- Feng, D.C., Liu, Z.T., Wang, X.D., Chen, Y., Chang, J.Q., Wei, D.F., Jiang, Z.M., 2020. Machine learning-Based Compressive Strength Prediction for Concrete: An Adaptive Boosting Approach. *Construction and Building Materials*, 230, 117000.
- Ferreira, C., 2001. Gene Expression Programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems. *Complex Systems*, 13(2), 87-129.
- Gallo, C., 2015. Artificial Neural Networks Tutorial. In *Encyclopedia of Information Science and Technology*, Third Edition (pp. 6369-6378). IGI Global.
- Getahun, M.A., Shitote, S.M., Gariy, Z.C.A., 2018. Artificial Neural Network Based Modelling Approach for Strength Prediction of Concrete Incorporating Agricultural and Construction Wastes. *Construction and Building Materials*, 190, 517-525.
- Hammoudi, A., Moussaceb, K., Belebchouche, C., Dahmoune, F., 2019. Comparison of Artificial Neural Network (ANN) and Response Surface Methodology (RSM) Prediction in Compressive Strength of Recycled Concrete Aggregates. *Construction and Building Materials*, 209, 425-436.
- Kewalramani, M.A., Gupta, R., 2006. Concrete Compressive Strength Prediction Using Ultrasonic Pulse Velocity Through Artificial Neural Networks. *Automation in Construction*, 15(3), 374-379.

- Kılıncarslan, Ş., İnce Yılmaz, E., Tuncay Başpınar, E., Yağmurlu, F., 2018. Clustering Analysis of Normal Strength Concretes Produced with Different Aggregate Types. *Open Chemistry*, 16(1), 918-922.
- Koza J., 1992. Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. MIT press, USA.
- Lawal, A.I., Idris, M.A., 2020. An Artificial Neural Network-Based Mathematical Model for the Prediction of Blast-Induced Ground Vibrations. *International Journal of Environmental Studies*, 77(2), 318-334.
- Myers R.H., 2016. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, 4th ed. (Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery, Christine M. Anderson-Cook. Eds.), Wiley, ISBN 978-1-118-91601-8.
- Moutassem, F., Chidiac, S.E., 2016. Assessment of Concrete Compressive Strength Prediction Models. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(1), 343-358.
- Naderpour, H., Rafiean, A.H., Fakharian, P., 2018. Compressive Strength Prediction of Environmentally Friendly Concrete Using Artificial Neural Networks. *Journal of Building Engineering*, 16, 213-219.
- Namli, E., Erdal, H.İ., Erdal, H., 2016. Dalgacık Dönüşümü ile Beton Basınç Dayanım Tahmininin İyileştirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 19(4), 471-480.
- Ni, H.G., Wang, J.Z., 2000. Prediction of Compressive Strength of Concrete by Neural Networks. *Cement and Concrete Research*, 30(8), 1245-1250.
- Nilson, A.H., Darwin, D., Dolan, C.W., 2010. Design of Concrete Structures. 14th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education.
- Oluokun F.A., Burdette E.G., Harold Deatherage J., 1990. Early-Age Concrete Strength Prediction by Maturity--Another Look. *Materials Journal*, 87(6), 565-572.
- Onifade, M., Lawal, A.I., Aladejare, A.E., Bada, S., Idris, M.A., 2019. Prediction of Gross Calorific Value of Solid Fuels from Their Proximate Analysis Using Soft Computing and Regression Analysis. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 1-15.
- Özçep, F., Karabulut, S., Özgüven, B., Sanlı, O., 2012. Tahribatsız Test Yöntemleri ve Ultrasonik Hız Ölçümleri. *Jeofizik Bülteni*, 22, 69-70.
- Öztaş, A., Pala, M., Özbay, E., Kanca, E., Çağlar, N., Bhatti, M.A., 2006. Predicting the Compressive Strength and Slump of High Strength Concrete Using Neural Network. *Construction and Building Materials*, 20(9), 769-775.
- Özturan, M., Kutlu, B., Özturan, T., 2008. Comparison of Concrete Strength Prediction Techniques with Artificial Neural Network Approach. *Building Research Journal*, 56(1), 23-36.
- Panzer, T.H., Christoforo, A.L., Cota, F.P., Borges, P.R., Bowen, C.R., 2011. Ultrasonic Pulse Velocity Evaluation of Cementitious Materials. *Advances in Composite Materials-Analysis of Natural and Man-Made Materials*, 411-436.
- Poorababi, A., Ghasemi, M., Moghaddam, M.A., 2020. Concrete Compressive Strength Prediction Using Non-Destructive Tests Through Response Surface Methodology. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(4), 939-949.
- Popovics, S., 1998. History of a Mathematical Model for Strength Development of Portland Cement Concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 5, pp. 593-600.
- Raja, M.N.A., Shukla, S.K., 2021. Predicting the Settlement of Geosynthetic-Reinforced Soil Foundations Using Evolutionary Artificial Intelligence Technique. *Geotextiles and Geomembranes*, Volume 49, Issue 5, 1280-1293.
- Shishegaran, A., Varraee, H., Rabczuk, T., Shishegaran, G., 2021. High Correlated Variables Creator Machine: Prediction of the Compressive Strength of Concrete. *Computers & Structures*, 247, 106479.
- Siraj, N., 2015. Prediction of Compressive Strength of Concrete Using Artificial Neural Network, Fuzzy System Model and Thermodynamic Methods. Addis Ababa University Institute of Technology, Master Thesis, 99p.
- Snell, L.M., Van Roekel, J., Wallace, N.D., 1989. Predicting Early Concrete Strength. *Concrete International*, 11(12), 43-47.
- Sun, Y., Li, G., Zhang, J., Qian, D., 2019. Prediction of the Strength of Rubberized Concrete by an Evolved Random Forest Model. *Advances in Civil Engineering*, Volume 2019, Article ID 5198583, 7 pages.
- Tayfur, G., Erdem, T.K., Kırca, Ö., 2014. Strength Prediction of High-Strength Concrete by Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(11), 04014079.
- TS EN 933-2, 1996. Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler Kısım 2: Tane Boyutu Dağılımı Tayini-Deney Elekleri, Elek Göz Açıklıklarının Anma Büyüklükleri. Türk Standardları Enstitüsü. Ankara.
- TS EN 197-1, 2011. Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standardları Enstitüsü. Ankara.
- TS 3530 EN 933-1, 1999. Agregaların Geometrik Özellikleri için Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini-Eleme Metodu. Türk Standardları Enstitüsü. Ankara.
- TS EN 206-1, 2014. Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk. Türk Standardları Enstitüsü. Ankara.
- TS EN 12390-2, 2010. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Kürlenmesi. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-7, 2010. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3, 2010. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-5, 2010. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-6, 2013. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler - Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-2, 2010. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler Bölüm 2: Parçalanma Direncinin Tayini için Metotlar. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS 802, 2009. Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları. Türk Standardları Enstitüsü. Ankara.
- Tuncay Başpınar, E., 2015. Isparta Yöresinde Yeralan Kaya Birimlerinden Elde Edilen Agregaların Beton Performansına Etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayınlanmamış Doktora Tezi, 228s, Isparta, Türkiye.

- Zhang, X., Nguyen, H., Bui, X.N., Le, H.A., Nguyen-Thoi, T., Moayedi, H., Mahesh, V., 2020. Evaluating and Predicting the Stability of Roadways in Tunnelling and Underground Space Using Artificial Neural Network-Based Particle Swarm Optimization. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 103, 103517.
- Zhong, J., Feng, L., Ong, Y.S., 2017. Gene expression Programming: A Survey. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 12(3), 54-72.