

Deprem Yıkıntı Atıkları ve Uçucu Kül Kullanılarak Üretilen Atık Betonların Taze Beton Özelliklerini Tahmin Eden Sayısal Model Geliştirilmesi

Muhammed ULUCAN^{1*}

¹ İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ mulucan@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 10/10/2023;

Kabul/Accepted: 14/02/2024)

Öz: Bu çalışma deprem yıkıntı atıkları ve uçucu kül kullanılarak üretilen atık betonların taze beton özelliklerini yüksek doğrulukla tahmin edebilmek için sayısal bir model geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda farklı çimento dozajı, farklı su/çimento oranı, farklı uçucu kül ikame oranı içeren 24 farklı atık beton serisi üretilmiştir. Üretilen beton serileri üzerinde taze beton özelliklerini belirlemek için slump testleri uygulanmıştır. Elde edilen slump değerleri ve karışım miktarları dikkate alınarak tepki yüzeyi metodu üzerinde istatistik analizler yapılmış, sayısal bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen modele ait belirlilik katsayısı 0.97 olup, tahmin sonuçları oldukça iyi düzeydedir. Aynı zamanda ek çimento esaslı malzeme olarak uçucu kül ile çimentonun yer değiştirilerek kullanılması, iri agrega olarak deprem yıkıntı atıklarının kullanılmasının sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi açısından büyük avantajlar sağladığı düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Atık yönetimi, Sürdürülebilir kalkınma, İnşaat ve yıkıntı atıkları, Geri dönüşümlü beton agregaları, Tepki yüzeyi metodu.

Development of Numerical Model to Predict Fresh Concrete Properties of Waste Concrete Produced Using Earthquake Demolition Wastes and Fly Ash

Abstract: This study aims to develop a numerical model to predict the fresh concrete properties of waste concrete produced using earthquake demolition wastes and fly ash with high accuracy. For this purpose, a series of 24 waste concretes with different cement dosages, water-to-cement ratios, and fly ash replacement ratios were produced. Slump tests were performed on the produced concrete series to determine the fresh concrete properties. Considering the obtained slump values and mix quantities, statistical analyses were performed on the response surface method, and a numerical model was developed. The coefficient of determination of the developed model is 0.97, and the prediction results are quite good. At the same time, it is thought that the use of fly ash as a supplementary cementitious material by replacing cement with fly ash and the use of earthquake demolition wastes as coarse aggregate provides great advantages in terms of sustainable development and circular economy.

Key words: Waste management, Sustainable development, Construction and demolition waste, Recycled concrete aggregate, Response surface method.

1. Giriş

Depremler, doğal afetler, savaşlar, dünya nüfusundaki hızlı artış vb. nedenlerle atık üretimi giderek artmakta ve önemli bir çevre sorunu haline gelmektedir [1,2]. Özellikle yıkıcı depremlerden sonra birçok bina hasar görmekte ve yıkılmaktadır. Bu binaların bir kısmı deprem sırasında yıkılırken, bir kısmı da depremden sonra kontrollü bir şekilde yıkılmaktadır. Son yıllarda Türkiye’de meydana gelen 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ depremi, 6 Şubat 2023 Pazarcık ve Elbistan merkezli Kahramanmaraş depremleri bunlara büyük örnekler olarak gösterilmektedir. Meydana gelen bu yıkıcı depremlerin noktası olarak ortaya çıkan milyonlarca ton inşaat yıkıntı atıkları (İYA) çözüm bekleyen önemli konular arasında yer almaktadır [3,4].

Ortaya çıkan İYA’ları değerlendirmek ve çevre kirliliğini azaltmak için çeşitli çözüm önerileri sunulmuştur. Ancak çok yüksek miktarlarda olan bu atık malzemeleri değerlendirmek için aktif ve geniş bir kullanım alanına sahip olan bir sektör gerekmektedir. Bu nedenle, İYA’ları değerlendirmek için inşaat sektörü büyük bir alternatif olarak görülmektedir [5–7]. Betonun dünya genelinde en yaygın olarak kullanılan yapı malzemesi olması bu atık malzemelerin beton içerisinde değerlendirilmesine büyük olanak sağlamaktadır [8–10]. Ancak yapılan literatür araştırmaları İYA’lardan elde edilen geri dönüşümlü beton agregalarının (GDBA) daha düşük özgül ağırlık ve daha yüksek su emme değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla GDBA kullanımı arttıkça basınç

* Sorumlu yazar: mulucan@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-7629-6846

dayanımı değerlerinde önemli azalmalar meydana gelmektedir. Ulucan ve Alyamaç 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ depremi sonrası yıkılan bir binadan elde edilen GDBA'ları kullanarak detaylı çalışmalar yapmıştır [11]. Shrestha Gorkha Depreminden sonra Nepal'in dağlık bölgelerinde depreme dayanıklı evlerin yeniden inşası için kullanılan beş alçak bina sistemindeki enerji tüketimini ve CO₂ emisyonunu değerlendirmeyi amaçlamıştır [12]. Marinkovic ve arkadaşları yapısal kullanım için birkaç farklı yeşil beton karışımının karşılaştırmalı bir çevresel değerlendirmesini sunmuştur [13]. Wijayasundara ve arkadaşları, yapısal betonda doğal agrega yerine GDBA kullanımının değerlendirilmesi için teknik, finansal, çevresel ve sosyal perspektifleri dikkate alan entegre bir metodoloji sunmuştur [14]. Tüm bu çalışmaların ortak sonucu olarak ince GDBA'ların yüksek su emme değerlerine sahip olduğu ve dayanım değerlerinde önemli azalmalar sağladığı tespit edilmiştir. Ancak iri agrega olarak GDBA kullanımının sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi açısından önemli avantajlar sağlayabileceğini belirtmişlerdir [15–17].

Betonun temel bileşenlerinden biri olan çimento, dünya genelindeki karbon salınımının yaklaşık %7'sinden sorumludur ve önemli çevresel etkilere sahiptir. Bu nedenle, zaman içerisinde araştırmacılar çimentonun çevresel etkilerini azaltmak ve önemli çevresel kazanımlar elde etmek için çeşitli çalışmalarda bulunmuşlardır [10,15,16]. Bu çalışmalar kapsamında ek çimento esaslı malzemeler (silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.) ile çimentoyu yer değiştirerek kullanmışlardır. Böylece hem çimento kullanımının azaltılması, hem atık malzemelerin değerlendirilmesi hem de önemli çevresel kazanımların elde edilmesi amaçlanmaktadır.

Bu çalışma, deprem yıkıntı atıkları ve uçucu kül kullanılarak üretilen atık betonların taze beton özelliklerini yüksek doğrulukla tahmin eden sayısal bir model geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda deprem yıkıntı atıkları ve uçucu kül kullanılarak 24 farklı atık beton serisi üretilmiştir. Ardından tepki yüzeyi metodu üzerinde istatistik analizleri yapılarak sayısal model geliştirilmiştir. Yıkıcı depremler sonrası yeni inşa edilen on binlerce binanın olması ve taze beton özelliklerinin betonun kıvamı, dolayısıyla sertleşmiş beton özellikleri üzerinde büyük önem taşıması, yıkılan on binlerce binadan ortaya çıkan deprem yıkıntı atıklarının değerlendirilmesi gibi nedenlerden dolayı bu çalışmanın sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi açısından büyük önem taşıdığı düşünülmektedir.

2. Malzeme ve Metot

2.1. Malzemeler

Bu çalışmada son zamanlarda piyasada yaygın olarak kullanılmaya başlanan CEM II/A-M (P-LL) Potland kompoze çimentosu kullanılmıştır. Ek çimento esaslı malzeme olarak kullanılan uçucu kül, Zonguldak çatalağzı termik santralinden temin edilmiştir. Deneysel çalışmada ince agrega olarak Palu kumu kullanılırken, iri agrega olarak yıkılan bir binadan elde edilen GDBA'lar kullanılmıştır. Karışım tasarımları yapılırken agrega granülometrisi %60 iri agrega, %40 ince agrega kullanılarak A32-B32 eğrileri arasında kalacak şekilde belirlenmiştir. Karışımlarda kimyasal katkı olarak ise su azaltıcı kimyasal katkı CHRYSO Optima 280-SC3 kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan çimento ve uçucu küle ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 1'de verilmiştir. Elde edilen fiziksel ve kimyasal özellikler temin edilen fabrikalardan alınarak kullanılmıştır.

Tablo 1. Çimento ve uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Kimyasal Özellikler	Çimento	Uçucu Kül
CaO	60.5	4.3
SiO ₂	19.5	54.7
Fe ₂ O ₃	3.4	7.1
Al ₂ O ₃	5.1	23.9
SO ₃	3.0	0.2
Na ₂ O	0.6	1.0
K ₂ O	0.7	3.5
MgO	2.0	3.2
Cl	0.01	0.05
Çözünmeyen kalıntı	1.0	1.0
Kızdırma kaybı	4.0	1.1
Fiziksel Özellikler		
Yüzey alanı (cm ² /g)	4200	2645
Özgül ağırlık	3.09	2.04
Priz başlangıcı (dakika)	140	145
Priz sonu (dakika)	230	195

2.2. Karışım tasarımları ve uygulanan testler

Deneysel çalışma, iki farklı su/çimento (S/C), üç farklı çimento dozajı ve dört farklı uçucu kül oranı dikkate alınarak tasarlanmıştır. S/Ç oranı 0.45-0.55 olarak tasarlanmasına rağmen uçucu kül ile hacimce yer değiştirilerek kullanıldığından su/bağlayıcı (S/B) oranı değişiklik göstermektedir. Çimento dozajı 300-350-400 kg/m³, uçucu kül oranı olarak ise % (0-10-20-30) dikkate alınmıştır. Uçucu kül ile çimento hacimce yer değiştirilerek kullanılmıştır. Su azaltıcı kimyasal katkı miktarı da çimento ağırlığının farklı yüzdelere kullanılarak belirlenmiştir. Kimyasal katkı miktarı belirlenirken betonun işlenebilirliği dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Toplamda 24 farklı atık beton serisi üretilmiş olup, taze beton özelliklerini belirlemek için slump testleri uygulanmıştır. Elde edilen slump değerleri ve karışım miktarları kullanılarak tepki yüzeyi metodu (TYM) üzerinde istatistik analizler yapılarak sayısal model geliştirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan malzemeler ve miktarları Tablo 2’de verilmiştir. Karışım isimlerinde REF (Referans beton serisini), UK (Uçucu külü), yan tarafında yazan 10-20-30 (Uçucu kül kullanım oranını) ifade etmektedir.

Tablo 2. Atık beton serilerine ait karışım miktarları (kg/m³)

Karışım İsimleri	Çimento	Su	Uçucu Kül	Su/Bağlayıcı	Doğal Agregası		Kimyasal Katkı
					İnce	GDBA İri	
REF-1	300	135.0	0.0	0.45	782.2	1171.9	3.1
REF-2	350	157.5	0.0	0.45	742.3	1112.1	1.1
REF-3	400	180.0	0.0	0.45	702.3	1052.3	0.4
REF-4	300	165.0	0.0	0.55	751.2	1125.5	1.3
REF-5	350	192.5	0.0	0.55	706.1	1058.0	0.4
REF-6	400	220.0	0.0	0.55	661.1	990.4	0.0
UK10-1	270	135.0	19.8	0.47	782.2	1171.9	3.0
UK10-2	315	157.5	23.1	0.47	742.3	1112.1	1.0
UK10-3	360	180.0	26.4	0.47	702.3	1052.3	0.4
UK10-4	270	165.0	19.8	0.57	751.2	1125.5	1.4
UK10-5	315	192.5	23.1	0.57	706.1	1058.0	0.4
UK10-6	360	220.0	26.4	0.57	661.1	990.4	0.0
UK20-1	240	135.0	39.6	0.48	782.2	1171.9	3.1
UK20-2	280	157.5	46.2	0.48	742.3	1112.1	1.0
UK20-3	320	180.0	52.8	0.48	702.3	1052.3	0.4
UK20-4	240	165.0	39.6	0.59	751.2	1125.5	1.4
UK20-5	280	192.5	46.2	0.59	706.1	1058.0	1.0
UK20-6	320	220.0	52.8	0.59	661.1	990.4	0.0
UK30-1	210	135.0	59.4	0.50	782.2	1171.9	2.8
UK30-2	245	157.5	69.3	0.50	742.3	1112.1	0.9
UK30-3	280	180.0	79.2	0.50	702.3	1052.3	0.4
UK30-4	210	165.0	59.4	0.61	751.2	1125.5	1.1
UK30-5	245	192.5	69.3	0.61	706.1	1058.0	0.8
UK30-6	280	220.0	79.2	0.61	661.1	990.4	0.0

2.3. Tepki yüzeyi metodu

TYM, parametreler ve yanıt değerleri arasındaki ilişkiyi incelemek için beton teknolojisinde son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır [20,21]. TYM, az sayıda veri seti ile uygun sayısal modeller geliştirmek ve deneysel verileri yüksek doğrulukla tahmin etmek için kullanılmaktadır [22,23]. TYM kullanılarak istatistik analiz yapılırken parametrelerin seçimi oldukça büyük önem taşımakta ve yanıt değerleri üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmektedir. Bu deneysel çalışmaya ait verilerin istatistik analizleri yapılırken taze beton özelliklerini belirlemek için su/bağlayıcı (S/B), agregası/çimento (A/C), uçucu kül/çimento (UK/C) ve kimyasal katkı/çimento (KK/C) parametreleri dikkate alınmıştır. Bu parametreler, yapılan ANOVA analizi sonrası geliştirilen model üzerinde her bir parametrenin p-değeri dikkate alınarak belirlenmiştir. Tüm parametrelere ait p-değerleri < 0.05 olduğundan model üzerinde anlamlı ve olumlu etki yarattığı tespit edilmiştir. TYM ile analiz yapılırken değişkenlere ait en düşük değerler -1, en yüksek değerler +1 ve değerlerin aritmetik ortalaması ise 0 olarak belirtilmektedir. İstatistik analiz aşamasında dikkate alınan parametreler ve değişim aralıkları Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. TYM’de dikkate alınan parametreler ve değişim aralıkları

Parametreler	-1	0	1
S/B	0.45	0.53	0.61
A/C	4.27	5.50	6.74
UK/C	0.000	0.099	0.198
KK/C	0.000	0.006	0.013

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmanın bu bölümü üretilen atık betonların taze beton özelliklerini yüksek doğrulukla tahmin eden sayısal modelin etkinliğini, sayısal modelde dikkate alınan parametrelerin slump üzerindeki etkisini detaylı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır.

3.1. Sayısal modelin geliştirilmesi

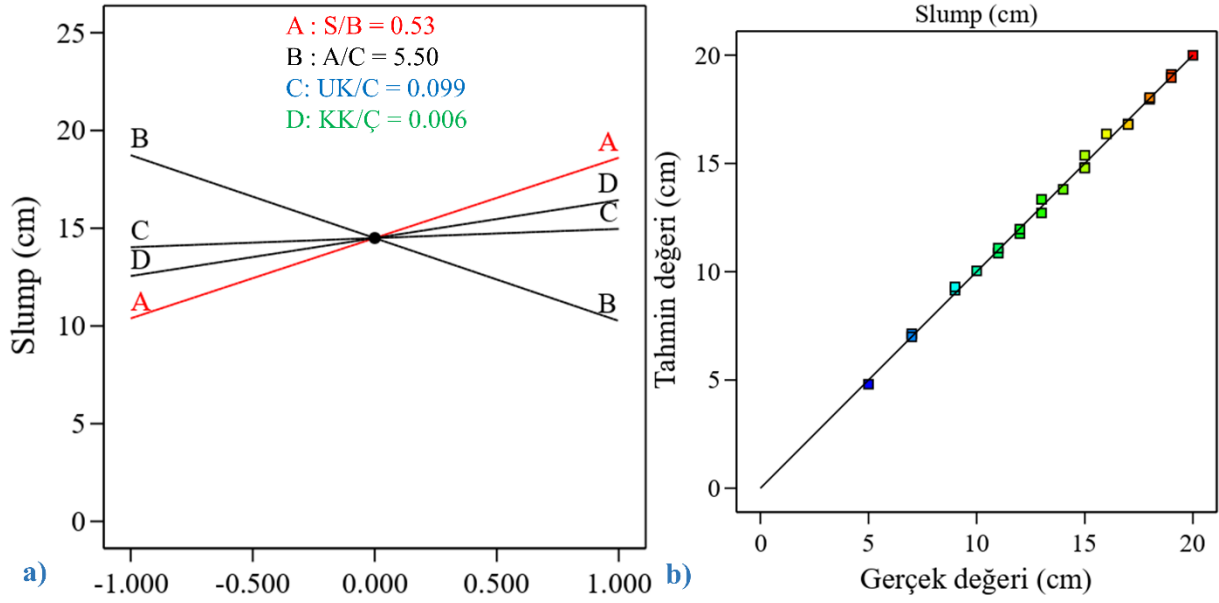
Sayısal model geliştirilirken değişken olarak *S/B*, *A/C*, *UK/C* ve *KK/C* parametreleri dikkate alınarak sayısal model tasarlanmıştır. Yanıt değişkeni olarak ise slump değerleri dikkate alınmıştır. Parametreler ve yanıt değerleri kullanılarak TYM üzerinde istatistik analiz yapılmış ve sayısal model geliştirilmiştir. Geliştirilen modele ait denklem (1)’de, TYM’de dikkate alınan parametreler ve yanıt değerleri ise Tablo 4’de verilmiştir.

$$\text{Slump (cm)} = - 43.2 * (S/B) - 16.2 * (A/C) + 44.8 * (UK/C) + 3047.4 * (KK/C) + 24.4 * (S/B * A/C) - 52.2 * (S/B * UK/C) - 3215.3 * (S/B * KK/C) - 3.1 * (A/C * UK/C) - 139.0 * (A/C * KK/C) - 1233.9 * (UK/C * KK/C) + 52.5 \quad (1)$$

Tablo 4. İstatistik analizde dikkate alınan parametreler ve yanıt değerleri.

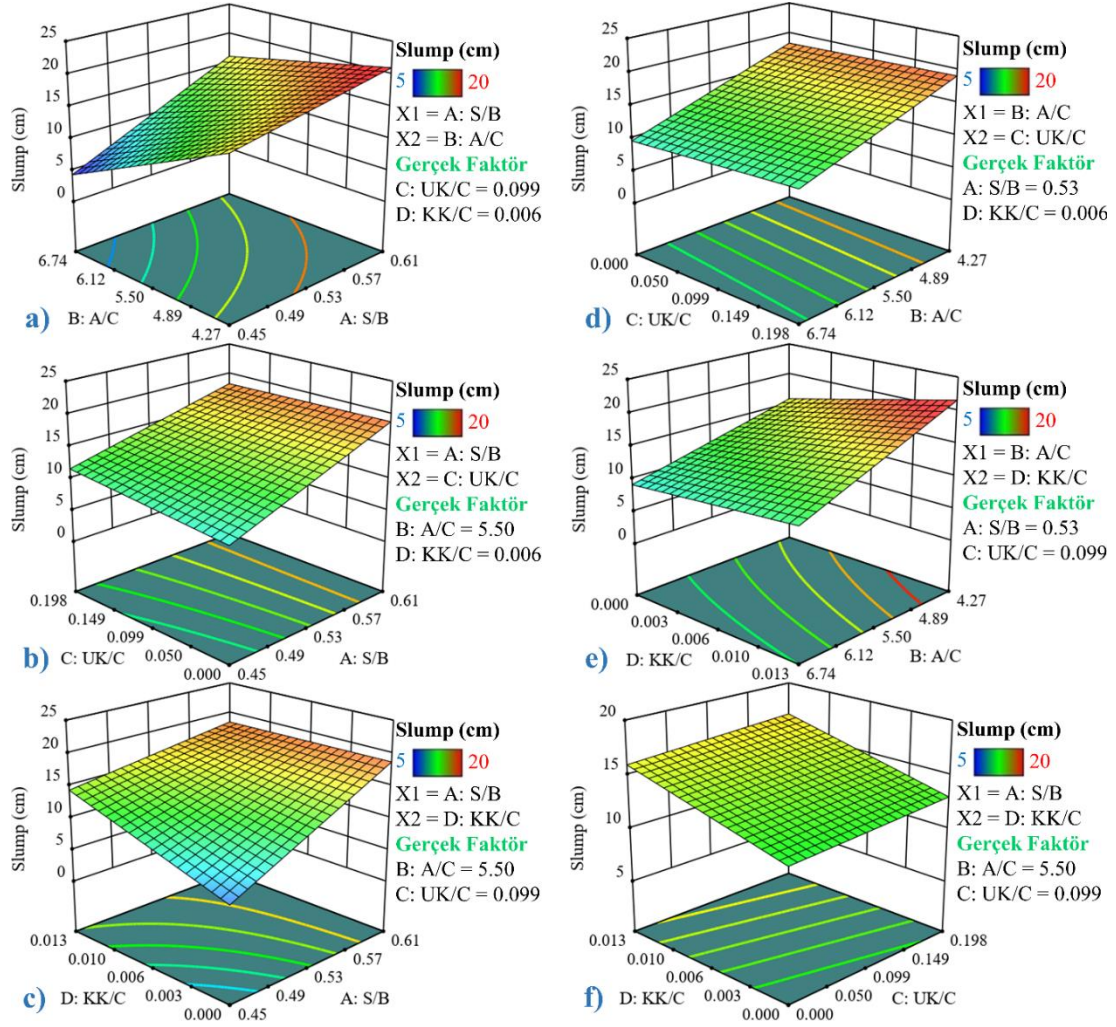
Karışım İsimleri	S/B	A/C	UK/C	KK/C	Slump (cm)
REF-1	0.45	6.74	0.000	0.010	5
REF-2	0.45	5.48	0.000	0.003	7
REF-3	0.45	4.54	0.000	0.001	10
REF-4	0.55	6.47	0.000	0.004	12
REF-5	0.55	5.21	0.000	0.001	15
REF-6	0.55	4.27	0.000	0.000	17
UK10-1	0.47	6.74	0.066	0.011	5
UK10-2	0.47	5.48	0.066	0.003	8
UK10-3	0.47	4.54	0.066	0.001	11
UK10-4	0.57	6.47	0.066	0.005	13
UK10-5	0.57	5.21	0.066	0.001	16
UK10-6	0.57	4.27	0.066	0.000	18
UK20-1	0.48	6.74	0.132	0.013	6
UK20-2	0.48	5.48	0.132	0.004	9
UK20-3	0.48	4.54	0.132	0.001	13
UK20-4	0.59	6.47	0.132	0.006	15
UK20-5	0.59	5.21	0.132	0.004	18
UK20-6	0.59	4.27	0.132	0.000	19
UK30-1	0.50	6.74	0.198	0.013	7
UK30-2	0.50	5.48	0.198	0.004	11
UK30-3	0.50	4.54	0.198	0.001	15
UK30-4	0.61	6.47	0.198	0.005	16
UK30-5	0.61	5.21	0.198	0.003	19
UK30-6	0.61	4.27	0.198	0.000	20

Sayısal modelde dikkate alınan parametrelerin yanıt değerleri üzerindeki etkilerini daha açık bir şekilde göstermek için pertürbasyon eğrileri kullanılmaktadır. Şekil 1.a, sayısal modele ait pertürbasyon eğrisini göstermektedir. Burada, dikkate alınan parametreler $A = S/B$, $B = A/C$, $C = UK/C$ ve $D = KK/C$ olarak isimlendirilmiştir. Pertürbasyon eğrisinden *S/B*, *UK/C*, *KK/C* değerleri arttıkça slump değerlerinde bir artış, *A/C* değerleri arttıkça slump değerlerinde bir azalma görülmektedir. Şekil 1.b ise geliştirilen sayısal modele ait tahmin sonuçları ile gerçek sonuçların karşılaştırılmasını göstermektedir. Geliştirilen modele ait belirlilik katsayısı (R^2) = 0.97 olarak hesaplanmış olup, modelin etkinliği görülmüştür.



Şekil 1. Sayısal modele ait pertürbasyon eğrisi ve ilişki grafiği.

Her bir parametrenin yanıt değeri üzerindeki etkisini detaylı bir şekilde incelemek için elde edilen 3 boyutlu etki grafikleri Şekil 2’de detaylı bir şekilde sunulmuştur. Şekil 2’nin detaylı bir şekilde incelenmesi slump değerlerinin 5-20 cm aralığında değiştiğini göstermektedir. Her parametrenin yanıt değeri üzerindeki etkisi ayrı ayrı 3 boyutlu olarak belirtilerek harflendirilmiştir. Burada gerçek faktör olarak verilen değerler 3 boyutlu etki grafiğinde gösterilmeyen ancak modelde yer alan parametreleri göstermektedir. Örneğin Şekil 2.a’da UK/C ve KK/C model içerisinde yer almakta ama üç boyutlu etki grafiğinde S/B ve A/C ’in yanıt değeri üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Şekil 2.a’dan S/B değerleri arttıkça slump değerlerinde önemli bir artışın olduğu açıkça görülürken A/C değerleri arttıkça slump değerlerinde önemli azalmalar meydana gelmiştir. Şekil 2.b, S/B ve UK/C ’in slump üzerindeki etkisini göstermektedir. Parametrelere ait değerler arttıkça slump değerlerinde de artış görülmektedir. Kimyasal katkı kullanımının slump üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla Şekil 2.e yorumlanacak olursa KK/C değerleri arttıkça slump değerleri önemli ölçüde artmaktadır. 3 boyutlu etki grafiklerinin genel bir değerlendirmesi S/B , UK/C ve KK/C değerleri arttıkça slump değerlerinin arttığını, A/C değerleri arttıkça slump değerlerinin azaldığını ortaya koymaktadır.



Şekil 2. Geliştirilen sayısal modele ait 3 boyutlu etki grafikleri.

4. Sonuçlar

Betonun kalitesi taze ve sertleşmiş beton özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle, taze ve sertleşmiş beton özelliklerinin belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Taze beton özellikleri betonun basınç dayanımı üzerinde dolaylı yoldan büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada atık malzemeler kullanılarak üretilen atık betonların taze beton özelliklerini yüksek doğrulukla tahmin eden sayısal model geliştirilmiş olup elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- Geliştirilen sayısal modele ait belirlilik katsayısı 0.97 olarak hesaplanmıştır. Böylece geliştirilen modele ait tahmin sonuçlarının oldukça yüksek doğruluklu olduğu görülmektedir. Sayısal model yardımıyla üretilen atık betonların taze beton özellikleri kolay ve pratik bir şekilde belirlenebilmektedir.
- Bu çalışma ile atık malzemelerin yeniden kullanımı, azaltılması ve geri dönüşümünün sağlanmasına olanak sağlanmıştır. Son yıllarda meydana gelen yıkıcı depremler, ortaya çıkan atık miktarları dikkate alındığında bu atık malzemelerin kullanılmasının sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi açısından büyük önem taşıdığı görülmüştür.
- Ek çimento esaslı malzeme olarak uçucu kül kullanımının artmasıyla birlikte slump değerlerinde bir artış görülmekte ve aynı zamanda çimento kullanımının azaltılmasıyla önemli çevresel kazanımların olduğu düşünülmektedir.

Kaynaklar

- [1] T. Ding, J. Xiao, Estimation of building-related construction and demolition waste in Shanghai, *Waste Manag.* 34 (2014) 2327–2334. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.07.029>.
- [2] M. Mália, J. de Brito, M.D. Pinheiro, M. Bravo, Construction and demolition waste indicators, *Waste Manag. Res.* 31 (2013) 241–255. <https://doi.org/10.1177/0734242X12471707>.
- [3] M. Ulucan, K.E. Alyamaç, Geri Dönüşüm Agregalı Betonların Erken Yaş Dayanımlarını Tahmin Eden Matematiksel Modellerin Geliştirilmesi, *J. Inst. Sci. Technol.* 13 (2023) 399–405. <https://doi.org/10.21597/jist.1174470>.
- [4] M. Ulucan, K.E. Alyamaç, Farklı Oranlarda Geri Dönüşümlü Beton Agregaları Kullanılarak Üretilen Betonların Çevresel Etki Değerlendirmelerinin Yapılması, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilim. Derg.* 23 (2023) 438–447. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1133802>.
- [5] W. Xing, V.W.Y. Tam, K.N. Le, J.L. Hao, J. Wang, Life cycle assessment of sustainable concrete with recycled aggregate and supplementary cementitious materials, *Resour. Conserv. Recycl.* 193 (2023) 106947. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106947>.
- [6] M. Shmls, M.A. Abed, T. Horvath, D. Bozsaky, Sustainability framework of recycled aggregate concrete produced with supplementary cementitious materials, *Ain Shams Eng. J.* 14 (2023) 102036. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.102036>.
- [7] M. Ulucan, G. Yildirim, B. Alatas, K.E. Alyamac, A new intelligent sunflower optimization based explainable artificial intelligence approach for early-age concrete compressive strength classification and mixture design of RAC, *Struct. Concr.* (2023). <https://doi.org/10.1002/suco.202300138>.
- [8] K.A. Knight, P.R. Cunningham, S.A. Miller, Optimizing supplementary cementitious material replacement to minimize the environmental impacts of concrete, *Cem. Concr. Compos.* 139 (2023) 105049. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105049>.
- [9] M. Ulucan, Y. Tas, K.E. Alyamac, Multi-objective optimization and assessment of recycled concrete aggregates for sustainable development: Example of the Kömürhan bridge, *Struct. Concr.* (2023). <https://doi.org/10.1002/suco.202201018>.
- [10] B. Bennett, P. Visintin, T. Xie, Global warming potential of recycled aggregate concrete with supplementary cementitious materials, *J. Build. Eng.* 52 (2022) 104394. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104394>.
- [11] M. Ulucan, K.E. Alyamac, A holistic assessment of the use of emerging recycled concrete aggregates after a destructive earthquake: Mechanical, economic and environmental, *Waste Manag.* 146 (2022) 53–65. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.04.045>.
- [12] J.K. Shrestha, Assessment of energy demand and greenhouse gas emissions in low rise building systems: Case study of five building systems built after the Gorkha Earthquake in Nepal, *J. Build. Eng.* 34 (2021) 101831. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101831>.
- [13] S. Marinković, J. Dragaš, I. Ignjatović, N. Tošić, Environmental assessment of green concretes for structural use, *J. Clean. Prod.* 154 (2017) 633–649. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.015>.
- [14] M. Wijayasundara, P. Mendis, R.H. Crawford, Methodology for the integrated assessment on the use of recycled concrete aggregate replacing natural aggregate in structural concrete, *J. Clean. Prod.* 166 (2017) 321–334. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.001>.
- [15] M. Ulucan, K.E. Alyamac, An integrative approach of the use of recycled concrete aggregate in high-rise buildings: example of the Elysium, *Struct. Concr.* 24 (2023) 3329–3350. <https://doi.org/10.1002/suco.202200512>.
- [16] X. Sun, Y. Liu, Y. Li, S. Chai, H. Zhang, Y. Liu, G. Zhao, J. Li, T. Xu, Y. Wei, Environmental sustainability analysis of dairy bedding regeneration system based on energy evaluation and life cycle assessment methods, *Environ. Sci. Pollut. Res.* (2022) 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23525-4>.
- [17] G. Kumar, R.C. Gupta, S. Shrivastava, Sustainable Zero-Slump Concrete Containing Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste of a 63-Year-Old Demolished Building, *J. Mater. Civ. Eng.* 34 (2022) 4022115.
- [18] M. Ulucan, K.E. Alyamac, A comprehensive assessment of mechanical and environmental properties of green concretes produced using recycled concrete aggregates and supplementary cementitious material, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 30 (2023) 97765–97785. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29197-y>.
- [19] F. Farmani, P. Khadiv-Parsi, A.A. Ramezani-pour, B. Bonakdarpour, F. Yazdian, Dual eco-friendly application of silica fume and scoria in cement-based materials through the enhancement of microbially-induced carbonate precipitation, *Case Stud. Constr. Mater.* (2022) e01481.
- [20] T. Demir, M. Ulucan, K.E. Alyamaç, Development of Combined Methods Using Non-Destructive Test Methods to Determine the In-Place Strength of High-Strength Concretes, *Processes.* 11 (2023) 673. <https://doi.org/10.3390/pr11030673>.
- [21] B. Demirel, E. Gultekin, K.E. Alyamac, Performance of structural lightweight concrete containing metakaolin after elevated temperature, *KSCE J. Civ. Eng.* 23 (2019) 2997–3004. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-1192-x>.
- [22] K.E. Alyamac, E. Ghafari, R. Ince, Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method, *J. Clean. Prod.* 144 (2017) 192–202.
- [23] A. Habibi, A.M. Ramezani-pour, M. Mahdikhani, RSM-based optimized mix design of recycled aggregate concrete containing supplementary cementitious materials based on waste generation and global warming potential, *Resour. Conserv. Recycl.* 167 (2021) 105420. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105420>.