

## Geri Dönüşüm Agregalı Betonların Çökme Değerlerinin Tepki Yüzeyi Metodu ile Tahmini

Muhammed ULUCAN<sup>1\*</sup>, Kürşat Esat ALYAMAÇ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup> İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*mulucan@firat.edu.tr, <sup>2</sup>kealyamac@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 13/09/2022;

Kabul/Accepted: 11/12/2022)

**Öz:** Bu çalışmanın amacı farklı oranlarda geri dönüşümlü beton agregası kullanılarak üretilen betonların çökme değerlerini yüksek doğrulukla tahmin eden matematiksel bir model geliştirmektir. Bu amaçla farklı karışımlara sahip beton serileri üretilmiş ve bu serilere ait çökme değerleri kullanılarak tepki yüzeyi metodu üzerinde istatistik analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda geliştirilen modelin belirlilik katsayısı 0.87 olarak hesaplanmış ve bu durum modelin yüksek doğruluklu ve etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Geri dönüşümlü beton agregaları yüksek su emme kapasitesi, düşük yoğunluk ve geniş karakteristik özelliklere sahip olduğundan geliştirilen bu modelin benzer yoğunluk ve su emme değerlerine sahip olan geri dönüşüm agregalı betonların çökme değerlerini pratik ve yüksek doğrulukla tahmin edileceği düşünülmektedir. Böylece bu modelin kullanımının, beton karışım hesapları ve deneme karışımları sürecinde zaman ve işçilik açısından faydalar sağlayacağı düşünülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** İnşaat ve yıkıntı atıkları; Geri dönüşümlü beton agregaları, Tepki yüzeyi metodu, Taze beton özellikleri.

### Prediction of Slump Values of Recycled Aggregate Concretes by Response Surface Method

**Abstract:** The aim of this study is to develop a mathematical model that predicts the slump values of concrete produced by using recycled concrete aggregate in different proportions with high accuracy. For this purpose, concrete series with different mixtures were produced and statistical analyzes were made on the response surface method by using the slump values of these series. As a result of the analyses made, the coefficient of determination of the developed model was calculated as 0.87 and this showed that the model could be used with high accuracy and effectively. Using this model, it is thought that the slump values of the concretes to be produced using recycled concrete aggregates with similar density and water absorption values will be estimated practically and with high accuracy. Thus, using this model will provide benefits in terms of time and labor in the concrete mix calculations and trial mixes.

**Key words:** Construction and demolition waste; Recycled concrete aggregate; Response surface method; Fresh concrete properties.

#### 1. Giriş

İnşaat sektörü, dünya ekonomisinin en büyük sektörlerinden biridir. Binalar, kamu hizmetleri, yapılar ve yollar ile ilgili çok sayıda inşaat, yenileme ve yıkım faaliyetleri, sürekli olarak dünya çapında gerçekleşmektedir. Bu faaliyetler ciddi anlamda mali ve çevresel etkileri olan, bertaraf edilmesi ve yönetilmesi gereken büyük hacimlerde inşaat ve yıkıntı atıkları (İYA) ile sonuçlanmaktadır [1-2]. Ortaya çıkan önemli miktarda atığın yanı sıra, bu atıkların çevresel ve ekonomik kayıplarının azaltılması için bu atıkların yeniden kullanımı ve geri kazanımı sürdürülebilir İYA teknolojilerinin tanımlanması ve İYA yönetimi için uygun geri dönüşüm ağlarının oluşturulmasını teşvik eder. Bu nedenle, bu atıkların geri kazanılması, yeniden kullanılması ve geri dönüştürülmesi oldukça önemlidir [3-4]. İYA'ların bir kısmı yeniden kullanılabilir veya geri kazanılmış malzemeler olarak ekonomik değere sahip olabilir ve bu nedenle inşaat tedarik zincirine yeniden dahil edilebilir [5-6].

Yıkıcı depremler ve doğal afetler sonucunda hasar gören birçok bina yıkılmakta ve çok büyük miktarlarda İYA ortaya çıkmaktadır [7]. Bunun en büyük örneklerinden biri ülkemizde meydana gelen 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ depremidir. Bu deprem sonrası birçok bina yıkılmış ve milyonlarca ton İYA ortaya çıkmıştır [8]. Bu atıkların depolanması, arazinin işgali ve çevresel etkileri çok büyük sorunları beraberinde getirmektedir [9]. Bu nedenle, betonun dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemesi olması ve inşaat sektörünün dünyanın en büyük sektörlerinden biri olması bu atıkların beton içerisinde değerlendirilmesini büyük bir alternatif haline getirmektedir [10-11]. Beton hacminin yaklaşık %70-75'ini agregalar oluşturmaktadır. Bu nedenle beton kullanımı aynı

\* Sorumlu yazar: [mulucan@firat.edu.tr](mailto:mulucan@firat.edu.tr). <sup>1</sup> 0000-0001-7629-6846, <sup>2</sup> 0000-0002-3226-4073

zamanda büyük bir agrega ve doğal kaynak tüketimine de yol açmaktadır. Dolayısıyla beton içerisinde geri dönüşümlü beton agregalarının (GDBA) kullanımı hem doğal kaynak tüketiminin azaltılması hem de bu atık malzemelerin bertarafı ve yeniden kullanılması açısından önemli faydalar sağlamaktadır [12].

GDBA'lar yüzeyinde bulunan harçtan kaynaklı yüksek su emmeye sahiptir ve bu nedenle geri dönüşüm agregalı betonların (GDAB) etkin su/çimento oranı artmakta ve dayanım değerlerinde büyük oranda azalmalar meydana gelmektedir. Dolayısıyla GDAB karışım tasarımları yapılırken etkin su/çimento oranlarının artması karışım tasarımlarını daha da önemli hale getirmektedir. GDAB'ler ile yapılan çalışmaların çoğu mekanik ve çevresel özelliklerin incelenmesi üzerine yoğunlaşmaktadır [13-14]. Betonun basınç dayanımı en önemli mekanik özelliklerinden biridir ve betonun taze beton özellikleri betonun dayanımı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu nedenle beton basınç dayanımının ve taze beton özelliklerinin doğru tahmin edilebilmesi büyük önem taşımaktadır. Tepki yüzeyi metodu (TYM) etkin bir istatistik metottur ve son yıllarda beton teknolojisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada matematiksel modelin geliştirilmesi için TYM kullanılmıştır.

Bu çalışma deprem sonrası elde edilen GDBA'ların farklı oranlarda kullanımıyla üretilen beton serilerinin taze beton özelliklerini yüksek doğrulukla tahmin eden matematiksel bir model geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda üretilen beton serilerine ait slump değerleri ve karışım miktarları kullanılarak TYM üzerinde istatistik analizler yapılmış ve matematiksel bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel model yardımıyla betonun taze beton özelliklerinin pratik ve yüksek doğruluklu bir şekilde tahmin edildiği görülmüştür.

## 2. Malzeme ve metot

### 2.1. Malzemeler

Bu çalışmada, CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimento Elazığ Seza Çimento Fabrikası'ndan temin edilmiş olup çimentoaya ait kimyasal özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	Kızdırma kaybı
Çimento	62.48	19.15	4.35	5.50	2.55	0.11	0.45	2.05	2.09

Beton dökümlerinin tamamında su azaltıcı kimyasal katkı olarak CHRYSO Optima 280-SC3 kullanılmıştır. Kimyasal katkı miktarları çimento ile farklı oranlarda yer değiştirilerek belirlenmiştir. Agrega olarak hem doğal agrega (DA) hem de geri dönüşümlü beton agregaları kullanılmıştır. Bu agregalara ait fiziksel özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Agregaların fiziksel özellikleri

Özellikler	İnce		İri-1		İri-2	
	DA	GDBA	DA	GDBA	DA	GDBA
Los Angeles aşınma	-	-	-	-	15	23
Özgül ağırlık	2.66	2.48	2.69	2.69	2.71	2.73
Su emme (%)	1.5	9.8	1.3	4.2	1.2	3.6

### 2.2. Deneysel çalışmalar

Deneylerde farklı karışım oranlarına sahip 6 seri GDAB, DAB (doğal agregalı beton) ve GDİAB (geri dönüştürülmüş iri agregalı beton) karışımları hazırlanmıştır. Karışım oranları ve kullanılan malzeme miktarlarına ait veriler Tablo 3'de verilmiştir. Bu karışımlarda su/çimento (S/C) oranları 0.35-0.45 ve çimento dozajları 300-350-400 kg/m<sup>3</sup> olarak seçilmiş ve beton karışımları hazırlanmıştır. Beton karışımlarına ait veriler yapılan deneme dökümleri sonrasında belirlenmiştir. Çökme değerlerinin çok düşük olmamasına dikkat edilerek slump deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen slump değerleri ve karışım miktarları kullanılarak TYM üzerinde istatistik analizler yapılmış ve matematiksel model geliştirilmiştir. Deney tasarımı yapılırken çökme değerlerinin 10-20 cm arasında olması ve akıcı bir kıvama sahip olması hedeflenmiştir.

**Tablo 3.** Karışım miktarları (kg/m<sup>3</sup>)

Karışım İsimleri	Çimento	Su	Doğal Agregası			Geri dönüşümlü beton agregası			Kimyasal Katkı
			İnce	İri-1	İri-2	İnce	İri-1	İri-2	
DAB-1	300	105	630	637	855	0	0	0	6,0
DAB-2	300	135	606	613	823	0	0	0	3,3
DAB-3	350	123	603	610	819	0	0	0	5,3
DAB-4	350	158	575	582	781	0	0	0	2,5
DAB-5	400	140	576	583	783	0	0	0	6,8
DAB-6	400	180	544	551	740	0	0	0	2,4
GDAB-1	300	105	0	0	0	587	637	862	6,9
GDAB-2	300	135	0	0	0	565	613	829	3,3
GDAB-3	350	123	0	0	0	562	610	825	5,6
GDAB-4	350	158	0	0	0	536	582	787	1,4
GDAB-5	400	140	0	0	0	537	583	789	4,0
GDAB-6	400	180	0	0	0	508	551	745	1,2
GDİAB-1	300	105	630	0	0	0	637	862	6,0
GDİAB-2	300	135	606	0	0	0	613	829	3,8
GDİAB-3	350	123	603	0	0	0	610	825	5,6
GDİAB-4	350	158	575	0	0	0	582	787	2,8
GDİAB-5	400	140	576	0	0	0	583	789	4,4
GDİAB-6	400	180	544	0	0	0	551	745	2,0

### 2.3. Tepki yüzeyi metodu

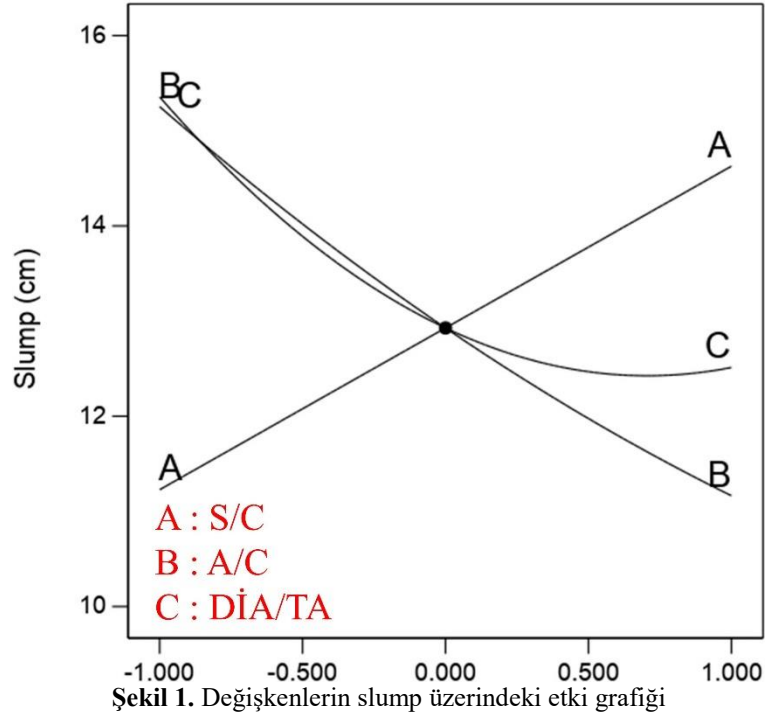
TYM, bir yanıt değişkenini birden çok etkileyen değişkenin olduğu problemleri geliştirmek, iyileştirmek ve optimize etmek için kullanılan matematiksel ve istatistiksel tekniklerin bir aracıdır [15-17]. Genel olarak TYM'deki merkezi kompozit tasarım, yanıt değişkenleri ile bağımsız değişkenler arasındaki fonksiyonel ilişkiyi bulmada kullanılan bir kesirli faktöriyel tasarım yöntemidir [18]. Bu tasarım yöntemi sonrası değişkenlerin yanıt değeri üzerindeki etkileri hesaplanan F değeri ile belirlenir. Değişkenler için elde edilen F değeri ne kadar büyük olursa, o değişkenin yanıt değişkeni üzerindeki etkisi o kadar fazla olur. P değeri, dikkate alınan model veya değişkenin önemli olup olmadığı hakkında bilgi verir [19-20]. P değeri 0.05'ten küçük ise model veya değişkenlerin önemli olduğu belirlenebilir [21-22].

### 3. Bulgular ve Tartışma

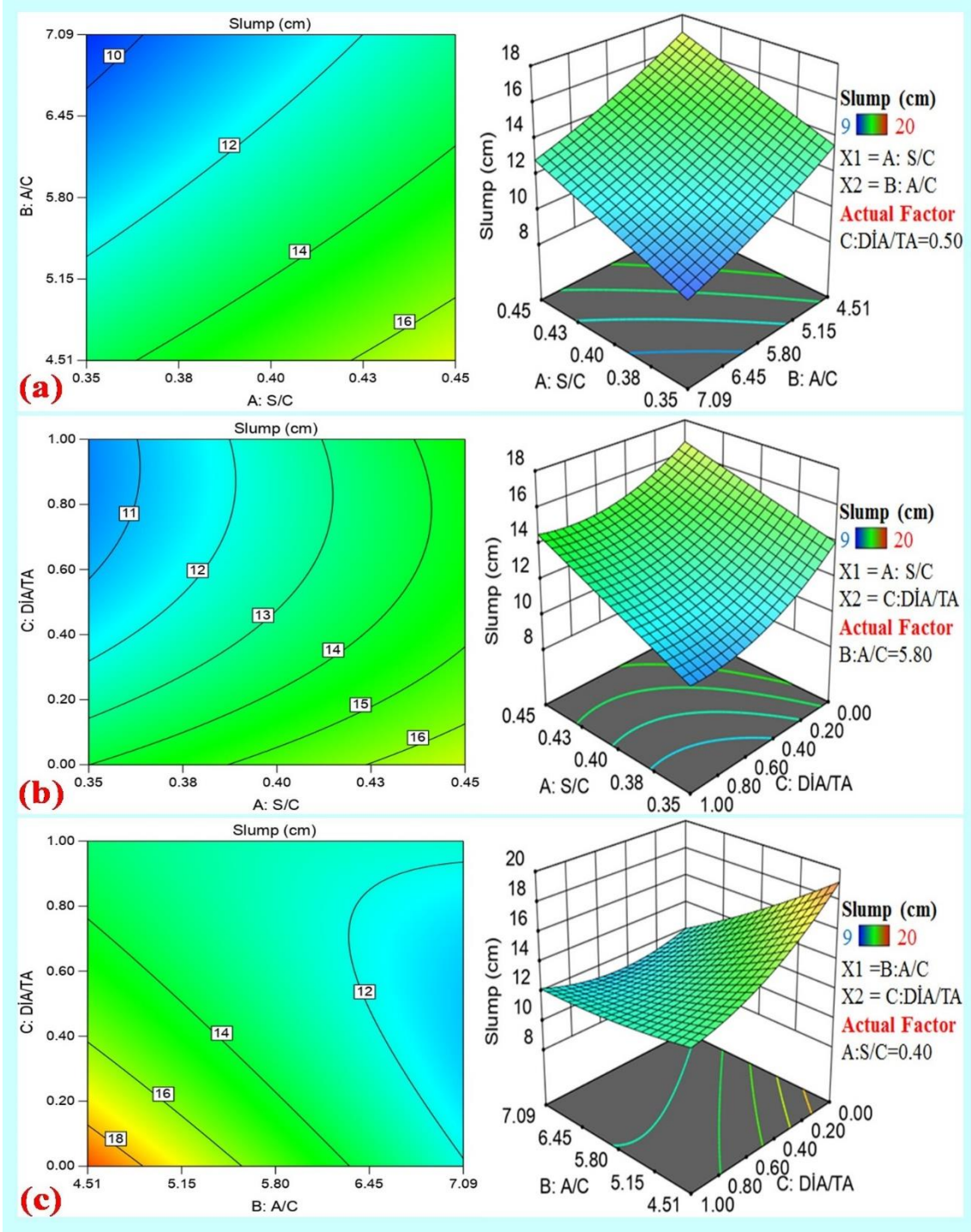
Bu çalışmada farklı oranlarda GDBA içeren betonlar üzerinde taze beton özelliklerini belirlemek için slump deneyleri uygulanmış ve elde edilen slump değerleri kullanılarak TYM üzerinde istatistik analizleri yapılmıştır. Yapılan bu istatistik analizler sonucunda matematiksel bir model geliştirilmiştir. İstatistik analizde kullanılan veriler Tablo 4'de verilmiştir. Matematiksel model geliştirilirken değişken olarak su/çimento ( $S/C$ ), agrega/çimento ( $A/C$ ) ve doğal ince agrega/toplam agrega ( $DİA/TA$ ) dikkate alınmış, bu değişkenlerin slump üzerindeki etkileri incelenmiştir. Modelde dikkate alınan değişkenler yapılan ANOVA analizi sonucunda her bir değişkene ait p değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Dikkate alınan tüm değişkenlerin p değerleri < 0.0001 olarak hesaplanmıştır. Geliştirilen modele ait denklem 1 yardımıyla çökme değerleri basit ve pratik bir şekilde belirlenebilmektedir.

$$\begin{aligned} \text{Çökme değeri} = & 28,9 * (S/C) - 4,6 * (A/C) - 25,8 * (DİA/TA) - 0,3 * (S/C * A/C) + 13,6 * (S/C * DİA/TA) \quad (1) \\ & + 2,3 * (A/C * DİA/TA) + 0,2 * (A/C)^2 + 4 * (DİA/TA)^2 + 25,4 \end{aligned}$$

Değişkenlerin slump üzerindeki etkileri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar pertürbasyon eğrisi ile Şekil 1'de verilmiştir. Pertürbasyon eğrisi incelendiğinde -1 ve +1 değerleri arasında değişkenlerin etkisi görülmektedir. Bu eğride -1 olan değerler değişkenlere ait en düşük değerleri, +1 olarak verilen değerler ise bu değişkenlerin en büyük değerlerini göstermektedir. TYM üzerinde istatistik analiz yapılırken değişkenler A: ( $S/C$ ), B: ( $A/C$ ) ve C: ( $DİA/TA$ ) olarak isimlendirilmiştir. Şekil 1 dikkatli bir şekilde incelendiğinde  $A/C$  ve  $DİA/TA$  oranı arttıkça slump değerlerinin azaldığı,  $S/C$  oranı arttıkça slump değerlerinde bir artışın olduğu açıkça görülmektedir.



Slump değerlerini yüksek doğrulukla tahmin edebilmek için geliştirilen matematiksel modele ait 2 ve 3 boyutlu etki grafikleri Şekil 2'de verilmiştir. Bu etki grafikleri değişkenlerin slump üzerinde nasıl bir etkiye neden olduğunu açıkça göstermektedir. Şekil 2.a  $S/C$  ve  $A/C$  değişkenlerinin slump üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu etki grafiklerinden  $S/C$  oranı soldan sağa doğru azalırken slump değerlerinde azalma meydana geldiği görülmüştür.  $A/C$  değişkeninin slump üzerindeki etkisi incelendiğinde ise farklı sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir.  $A/C$  oranı 4.51'den 7.09'a geldiğinde slump değerlerinde bir azalma olduğu görülmüştür. Şekil 2.b  $S/C$  ve  $DİA/TA$  değişkenlerinin slump üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu eğriden  $DİA/TA$  oranı arttıkça slump değerlerinin azaldığı görülmüştür. Şekil 2.c  $A/C$  ve  $DİA/TA$ 'nın slump üzerindeki etkisini incelemektedir. Bu eğri de  $A/C$  ve  $DİA/TA$  için benzer sonuçlar elde edilmiştir.  $A/C$  ve  $DİA/TA$  oranı arttıkça slump değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Şekil 2 genel olarak incelenecek olursa slump değerlerinin 9 cm ile 20 cm arasında değiştiği görülmektedir. Bu durumun temel nedeni geniş bir çökme değeri aralığında çalışarak modelin etkinliğini detaylı bir şekilde incelemektir.



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

#### 4. Sonuçlar

Betonun kalitesi taze ve sertleşmiş beton özellikleri ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle taze ve sertleşmiş beton özelliklerinin doğru tahmin edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmanın amacı farklı oranlarda geri dönüştürülmüş beton agregası içeren betonların taze beton özelliklerini yüksek doğrulukla ve pratik bir şekilde tahmin eden matematiksel bir model geliştirmektir. Çalışmaya ait sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Deprem sonrası ortaya çıkan atıkların beton içerisinde kullanılmasıyla bu atıkların azaltılması, yeniden kullanılması ve geri dönüşümü sağlanmıştır. Böylece bu agregaların kullanılmasıyla doğal agrega tüketimi azaltılmış ve atıkların depolanması önlenerek önemli çevresel faydalar sağladığı düşünülmektedir.
- Geliştirilen model yardımıyla benzer yoğunluk ve su emme değerlerine sahip olan geri dönüşümlü beton agregaları kullanılarak üretilen betonların çökme değerleri pratik ve yüksek doğruluklu bir şekilde tahmin edilebileceği düşünülmektedir. Modelin belirlilik katsayısının 0.87 olması da modelin etkinliğini göstermektedir.
- TYM kullanılarak elde edilen sayısal model yardımıyla yüksek doğruluklu tahminler yapılması, bu metodun beton teknolojisindeki çalışmalar için oldukça uygun olduğunu göstermektedir.
- Beton tasarımında en önemli kriterlerden biri taze beton özelliği olan çökme değeridir. Bu değerın beton karışım tasarımı sırasında yüksek doğrulukla tahmin edilmesi, projeye uygun beton imal edilmesi ve betonun işlenebilirliğini tahmin edebilme konusunda katkılar sunacağı düşünülmektedir.

## Teşekkür

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından “MF.21.52” nolu proje ile desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- [1] J. de-Prado-Gil, C. Palencia, N. Silva-Monteiro, R. Martínez-García, To predict the compressive strength of self compacting concrete with recycled aggregates utilizing ensemble machine learning models, *Case Stud. Constr. Mater.* 16 (2022) e01046. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01046>.
- [2] M. Shmls, M. Abed, T. Horvath, D. Bozsaky, Multicriteria Based Optimization of Second Generation Recycled Aggregate Concrete, *Case Stud. Constr. Mater.* (2022) e01447. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01447>.
- [3] M. Abed, J. Fořt, K. Rashid, Multicriterial life cycle assessment of eco-efficient self-compacting concrete modified by waste perlite powder and/or recycled concrete aggregate, *Constr. Build. Mater.* 348 (2022) 128696. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128696>.
- [4] L.A.L. Ruiz, X.R. Ramon, C.M.L. Mercedes, S.G. Domingo, Multicriteria analysis of the environmental and economic performance of circularity strategies for concrete waste recycling in Spain, *Waste Manag.* 144 (2022) 387–400. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.04.008>.
- [5] J.F. Dong, Q.Y. Wang, Z.W. Guan, H.K. Chai, High-temperature behaviour of basalt fibre reinforced concrete made with recycled aggregates from earthquake waste, *J. Build. Eng.* 48 (2022) 103895. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103895>.
- [6] N. Tsydenova, T. Becker, G. Walther, Optimised design of concrete recycling networks: The case of North Rhine-Westphalia, *Waste Manag.* 135 (2021) 309–317. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.09.013>.
- [7] 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.* (2022). <https://doi.org/10.1002/suco.202200512>.
- [8] 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>.
- [9] F. de Andrade Salgado, F. de Andrade Silva, Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review, *J. Build. Eng.* 52 (2022) 104452. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104452>.
- [10] S. Marinković, V. Radonjanin, M. Malešev, I. Ignjatović, Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete, *Waste Manag.* 30 (2010) 2255–2264. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>.
- [11] 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>.
- [12] T. Ding, J. Xiao, V.W.Y. Tam, A closed-loop life cycle assessment of recycled aggregate concrete utilization in China, *Waste Manag.* 56 (2016) 367–375. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.031>.
- [13] G. Andreu, E. Miren, Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 52 (2014) 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.054>.
- [14] N. Tošić, S. Marinković, T. Dašić, M. Stanić, Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use, *J. Clean. Prod.* 87 (2015) 766–776. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.070>.

- [15] S. Arumugam, G. Sriram, T. Rajmohan, Multi-response optimization of epoxidation process parameters of rapeseed oil using response surface methodology (RSM)-based desirability analysis, *Arab. J. Sci. Eng.* 39 (2014) 2277–2287.
- [16] W. Wang, Y. Cheng, G. Tan, Design optimization of SBS-modified asphalt mixture reinforced with eco-friendly basalt fiber based on response surface methodology, *Materials (Basel)*. 11 (2018) 1311.
- [17] 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.156>.
- [18] M.A.A. Aldahdooh, N.M. Bunnori, M.A.M. Johari, Evaluation of ultra-high-performance-fiber reinforced concrete binder content using the response surface method, *Mater. Des.* 52 (2013) 957–965.
- [19] T. Demir, M. Ulucan, K.E. Alyamac, Determination of the Early Age Strength of High-Strength Concrete Using RSM Method, *Fırat Univ. J. Eng. Sci.* 34 (2022) 105–114. <https://doi.org/10.35234/fumbd.972829>.
- [20] 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>.
- [21] A. Ustaoglu, B. Kursuncu, M. Alptekin, M.S. Gok, Performance optimization and parametric evaluation of the cascade vapor compression refrigeration cycle using Taguchi and ANOVA methods, *Appl. Therm. Eng.* 180 (2020) 115816.
- [22] T. Demir, M. Ulucan, K.E. Alyamac, Development of Combined Methods Using Non-Destructive Test Methods to Determine the In-Place Strength of High-Strength Concretes, *Processes* (2023) 673-689. <https://doi.org/10.3390/pr11030673>