

Atıf İçin: Ulucan, M., ve Alyamaç, K. E. (2023). Geri Dönüşüm Agregalı Betonların Erken Yaş Dayanımlarını Tahmin Eden Matematiksel Modellerin Geliştirilmesi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(1), 399-405.

To Cite: Ulucan, M., & Alyamac, K. E. (2023). Development of Mathematical Models Predicting Early-Age Strength of Recycled Aggregate Concretes. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(1), 399-405.

Ger i Dönüşüm Agregalı Betonların Erken Yaş Dayanımlarını Tahmin Eden Matematiksel Modellerin Geliştirilmesi

Muhammed ULUCAN^{1*}, Kürşat Esat ALYAMAÇ¹

Öne Çıkanlar:

- Sürdürülebilir Kalkınma
- Döngüsel Ekonomi
- Erken yaş beton dayanımı

Anahtar Kelimeler:

- İnşaat ve yıkıntı atıkları
- Geri dönüşümlü beton agregaları,
- Tepki yüzeyi metodu
- Matematiksel modeller
- Erken yaş beton basınç dayanımı.

ÖZET:

Bu çalışmanın amacı farklı oranlarda geri dönüşümlü beton agregası kullanılarak üretilen betonların erken yaş beton basınç dayanımlarını yüksek doğrulukla tahmin eden matematiksel model geliştirmektir. Bu amaçla toplamda 18 farklı beton serisi üretilmiş ve bu serilerin 1 ve 3 günlük beton basınç dayanımı değerlerinden faydalanılarak tepki yüzeyi metodu üzerinde istatistik analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda $f_{c,1}$ gün ve $f_{c,3}$ gün için matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin belirlilik katsayılarının 0.99 olması bu modelin yüksek doğruluklu ve etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Bu model yardımıyla erken yaş beton basınç dayanımı pratik ve yüksek doğruluklu bir şekilde belirlenebilmektedir. Böylece bu modelin kullanımının zaman ve maliyet açısından önemli faydalar sağlayacağı düşünülmektedir.

Development of Mathematical Models Predicting Early-Age Strength of Recycled Aggregate Concretes

Highlights:

- Sustainable Development
- Circular Economy
- Early-age concrete strength

Keywords:

- Construction and demolition waste,
- Recycled concrete aggregate
- Response surface method
- Mathematical models
- Early-age concrete compressive strength

ABSTRACT:

This study aims to develop a mathematical model that with high accuracy predicts the early-age concrete compressive strength of concretes produced using recycled concrete aggregate in different ratios. For this purpose, 18 different concrete series were produced, and statistical analyses were made on the response surface method using these series' 1- and 3-day concrete compressive strength values. As a result of the analysis, the mathematical model was developed for $f_{c,1}$ day, and $f_{c,3}$ days. The coefficient of determination belonging to the developed model is 0.99, which shows that this model can be used with high accuracy and efficiency. Using this model, the compressive strength of early-age concrete can be determined practically and with high accuracy. Thus, it is thought that using this model will provide significant benefits in terms of time and cost

¹ Muhammed ULUCAN (Orcid ID: 0000-0001-7629-6846), Kürşat Esat ALYAMAÇ (Orcid ID: 0000-0002-3226-4073), Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Muhammed ULUCAN, e-mail: mulucan@firat.edu.tr

GİRİŞ

İnşaat ve yıkıntı atıkları (İYA) genellikle binaların, yolların, köprülerin ve diğer yapıların inşaatı, yenilenmesi ve yıkımı sonrası ortaya çıkmaktadır (Serres ve ark., 2016; Wang ve ark., 2017). Ortaya çıkan bu İYA'lar çok büyük miktarlarda olmakta ve büyük bir çevre kirliliğine sebep olmaktadır (Ulucan ve Alyamac, 2022a). Araştırmacılar bu atıkları değerlendirmek için farklı çalışmalar yapmışlardır. Ancak çok büyük miktarlarda olan bu atıkların bertaraf edilmesi için aktif ve sürekli olan bir sektör gerekmektedir. Bu nedenle inşaat sektörü bu atıkların azaltılması, yeniden kullanımı ve geri dönüştürülmesi için büyük bir alternatif olarak görülmektedir. Bu amaç doğrultusunda araştırmacılar İYA'lardan elde edilen geri dönüşümlü beton agregalarını (GDBA) beton içerisinde agrega olarak kullanmışlardır (Ulucan ve Alyamac, 2022b).

Beton temel olarak çimento, agrega ve sudan oluşan, dünya genelinde en yaygın olarak kullanılan yapı malzemesidir (Marinković ve ark., 2010). Beton hacminin yaklaşık %65-70'ini agregalar oluşturmaktadır. Bu nedenle GDBA'ların beton içerisinde agrega olarak kullanımı atıkların değerlendirilmesi, azaltılması, yeniden kullanımı ve geri dönüşümü açısından oldukça değerlidir (Braga ve ark., 2017; Guo ve ark., 2018). Ancak GDBA'lar yüzeylerinde bulunan çimento harcından dolayı doğal agregalara (DA) göre daha yüksek su emme kapasitesine ve daha düşük yoğunluğa sahiptir (Pereira ve ark., 2012; Omary ve ark., 2016). Dolayısıyla GDBA içeren betonların mekanik özellikleri DA içeren betonlara göre daha düşük olmaktadır.

Son yıllarda GDBA içeren betonların mekanik özelliklerinin tespit edilmesi üzerine yapılan farklı çalışmalar bulunmaktadır (Guo et al., 2018; Wijayasundara et al., 2018). Yapılan bu çalışmalar GDBA oranı arttıkça dayanım değerlerinde ciddi anlamda bir azalmanın meydana geldiğini göstermektedir. Bu nedenle çalışmaların çoğu belirli oranlarda GDBA ile DA'yı yer değiştirerek kullanmışlardır. Üretilen betonların mekanik özellikleri belirlenirken en önemli parametrelerden biri betonun basınç dayanımının belirlenmesidir. Dolayısıyla beton basınç dayanımı belirlenirken yüksek doğrulukta sonuçların elde edilmesi büyük önem taşımaktadır. Tepki yüzeyi metodu (TYM) son yıllarda beton teknolojisinde yaygın olarak kullanılmakta ve oldukça etkin sonuçlar vermektedir.

Bu çalışma farklı oranlarda GDBA içeren betonların erken yaş beton basınç dayanımını yüksek doğrulukla tahmin eden matematiksel modeller geliştirmeyi amaçlamaktadır. Deprem sonrası inşa edilen birçok sayıda binanın bulunması ve kalıp alma sürelerinin bu tür inşaatlarda oldukça önemli olmasından dolayı bu çalışmada 1 ve 3 günlük erken yaş beton basınç dayanımı değerleri kullanılmıştır. Elde edilen bu değerler ve karışım miktarları dikkate alınarak TYM üzerinde istatistik analizler yapılmış ve matematiksel modeller geliştirilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, TS EN 197-1 standardına göre üretilen ve 28 günlük basınç dayanımı 48.3 MPa olan CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimento Elazığ Seza Çimento Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çalışmada agrega olarak hem doğal hem de GDBA kullanılmıştır. GDBA'lar 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ depremi sonrası kontrollü bir şekilde yıkılan bir binadan elde edilen beton kütlelerin konkasörde kırılmasıyla elde edilmiştir. Konkasörde kırılarak farklı boyutlarda elde edilen GDBA'lar ince (0-4), iri-1 (4-16), iri-2 (16-31.5) mm olacak şekilde 3 farklı boyuta ayrıştırılmıştır. GDBA'ların su emme yüzdeleri sırasıyla %9.8, 4.2, 3.6 olarak hesaplanmıştır. Özgül ağırlık değerleri ise sırasıyla 2.48, 2.69 ve 2.73 olarak hesaplanmıştır. Beton karışımlarında kullanılan agregalar gradasyon limitlerine uygun olarak tasarlanmış ve ince (%30), iri-1 (%30), iri-2 (%40) oranında kullanılacak

şekilde ayarlanmıştır. Tüm beton dökümlerinde su azaltıcı katkı olarak CHRYSO Optima 280-SC3 kullanılmıştır.

Çizelge 1. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Kimyasal Özellikler	Çimento (%)
CaO	63.19
SiO ₂	19.07
Fe ₂ O ₃	3.72
Al ₂ O ₃	4.82
SiO ₃	2.94
Na ₂ O	0.39
K ₂ O	0.62
MgO	1.83
Cl	0.01
Çözünmeyen kalıntı	0.56
Kızdırma kaybı	3.43
Fiziksel Özellikler	
Yüzey alanı (cm ² g ⁻¹)	3838
Özgül ağırlık	3.13
Priz başlangıcı (dakika)	135
Priz sonu (dakika)	215

Döküm planı ve deneysel çalışmalar

Deneylerde farklı karışım oranlarına sahip 6 seri GDAB (geri dönüştürülmüş agregalı beton), DAB (doğal agregalı beton) ve GDİAB (geri dönüştürülmüş iri agregalı beton) karışımları hazırlanmıştır. Deneylerde kullanılan agregalar yıkandıktan sonra nem içerikleri belirlenmiş ve toplamda 18 farklı beton serisi üretilmiştir. Karışımlara ait veriler Çizelge 2’de verilmiştir. Bu karışımlarda su/çimento (S C-1) oranları 0.35-0.45 ve çimento dozajları 300-350-400 kg m⁻³ olarak seçilmiştir. Deneylerde kullanılan kimyasal katkı miktarları çimentonun farklı yüzdelerinde kullanılarak dikkate alınmıştır. Bu karışım oranları kullanılarak beton dökümleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen numunelere 1 ve 3. günlerde beton basınç dayanımı testleri uygulanmıştır. Elde edilen basınç dayanımı değerleri ve karışım miktarları kullanılarak TYM üzerinde istatistik analizler yapılmış ve matematiksel modeller geliştirilmiştir.

Çizelge 2. Karışım miktarları (kg m⁻³)

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	105.0	629.7	636.8	855.4	0.0	0.0	0.0	6.0
DAB-2	300	135.0	605.8	612.6	822.9	0.0	0.0	0.0	3.3
DAB-3	350	122.5	603.0	609.8	819.2	0.0	0.0	0.0	5.3
DAB-4	350	157.5	575.1	581.6	781.2	0.0	0.0	0.0	2.5
DAB-5	400	140.0	576.3	582.8	782.9	0.0	0.0	0.0	6.8
DAB-6	400	180.0	544.4	550.5	739.5	0.0	0.0	0.0	2.4
GDAB-1	300	105.0	0.0	0.0	0.0	587.1	636.8	861.8	6.9
GDAB-2	300	135.0	0.0	0.0	0.0	564.8	612.6	829.0	3.3
GDAB-3	350	122.5	0.0	0.0	0.0	562.2	609.8	825.2	5.6
GDAB-4	350	157.5	0.0	0.0	0.0	536.2	581.6	787.0	1.4
GDAB-5	400	140.0	0.0	0.0	0.0	537.3	582.8	788.6	4.0
GDAB-6	400	180.0	0.0	0.0	0.0	507.6	550.5	745.0	1.2
GDİAB-1	300	105.00	629.7	0.0	0.0	0.0	636.8	861.8	6.0
GDİAB-2	300	135.00	605.8	0.0	0.0	0.0	612.6	829.0	3.8
GDİAB-3	350	122.50	603.0	0.0	0.0	0.0	609.8	825.2	5.6
GDİAB-4	350	157.50	575.1	0.0	0.0	0.0	581.6	787.0	2.8
GDİAB-5	400	140.00	576.3	0.0	0.0	0.0	582.8	788.6	4.4
GDİAB-6	400	180.00	544.4	0.0	0.0	0.0	550.5	745.0	2.0

Tepki yüzeyi metodu

TYM parametrelerin yanıt değerleri üzerindeki etkilerini belirlemede, az sayıda veri seti ile yüksek doğruluklu ve etkin modeller geliştirmede yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Alyamac ve ark., 2017; Demirel ve ark., 2019). TYM kullanılarak modeller geliştirilirken parametrelerin seçimi oldukça büyük önem taşımaktadır (Demir ve ark., 2022). Bu nedenle yanıt değişkeni üzerinde etkin olan parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Model geliştirilirken öncelikle parametrelerin seçimi yapılır. Ardından bu parametrelere ait değerlerin en düşük ve en yüksek değer aralıkları belirlenir. Bu çalışmada parametre olarak su/çimento (S C-1), agrega/çimento (A C-1), doğal ince agrega/toplam agrega (DİA TA-1) dikkate alınmıştır. Bu parametrelere ait en düşük ve en yüksek aralık değerleri Çizelge 3'te verilmiştir. TYM üzerinde istatistik analizler yapılırken en düşük değer -1, en yüksek değer +1 ve bu iki değerlerin ortalaması 0 olarak ifade edilir. Parametreler belirlenirken yanıt değişkeni üzerindeki etkileri iyice araştırılarak bu parametrelere karar verilmiştir.

Çizelge 3. Parametreler ve değişim aralıkları

Parametreler	-1	0	1
S C-1	0.35	0.40	0.45
A C-1	4.51	5.80	7.09
DİA TA-1	0.00	0.50	1.00

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada farklı oranlarda GDBA içeren 18 farklı beton serisi üretilmiş ve bu beton serilerinin 1 ve 3 günlük beton basınç dayanım değerleri kullanılarak TYM üzerinde istatistik analizler yapılmıştır. Yapılan bu istatistik analizler sonucunda matematiksel modeller geliştirilmiş ve bu matematiksel modellerin etkinliği incelenmiştir.

Matematiksel modellerin geliştirilmesi

Değişkenlerin beton numuneler üzerindeki etkilerini incelemek için matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bu modeller geliştirilirken $f_{c,1}$ gün ve $f_{c,3}$ gün için S C-1, A C-1 ve DİA TA-1 dikkate alınmıştır. Daha sonra değişkenlerin ve geliştirilen modelin basınç dayanımı üzerindeki önemini belirlemek için ANOVA analizi yapılmıştır. Her bir değişkenin ve geliştirilen modelin önemi, analizden elde edilen P-değerine bağlıdır. Modellerde kullanılan değişkenler, P-değerinin <0.05 olmasına dikkat edilerek belirlenmiştir. Son olarak $f_{c,1}$ gün ve $f_{c,3}$ gün değerlerini tahmin etmek için geliştirilen modellere ait denklemler aşağıda verilmiştir.

$$f_{c,1 \text{ gün}} = -67.8 * (S C-1) - 6.3 * (A C-1) + 60.7 * (DİA TA-1) + 4 * (S C-1 * A C-1) - 49.1 * (S C-1 * DİA TA-1) - 1.4 * (A C-1 * DİA TA-1) + 0.3 * (A C-1)^2 - 19.9 * (DİA TA-1)^2 + 61.5 \quad (1)$$

$$f_{c,3 \text{ gün}} = -64.1 * (S C-1) - 5.3 * (A C-1) + 59.4 * (DİA TA-1) + 3.3 * (S C-1 * A C-1) - 37.4 * (S C-1 * DİA TA-1) - 2.1 * (A C-1 * DİA TA-1) + 0.2 * (A C-1)^2 - 16.4 * (DİA TA-1)^2 + 61.9 \quad (2)$$

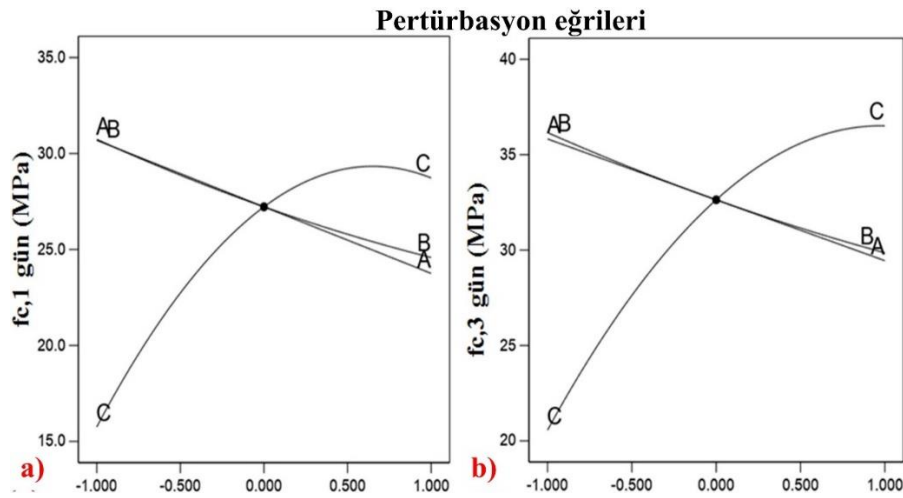
Modeller geliştirilirken istatistik analizlerde kullanılan parametrelere ve yanıt değişkenlerine ait değerler Çizelge 4'te verilmiştir.

Geliştirilen matematiksel modellerin yanıt değişkenleri üzerindeki etkilerini açıklamak için pertürbasyon eğrileri kullanılmaktadır. $f_{c,1}$ gün ve $f_{c,3}$ gün değerlerine ait pertürbasyon eğrileri (Şekil 1)'de verilmiştir. TYM üzerinde istatistik analizler yapılırken parametreler A, B ve C olarak isimlendirilmiştir. Burada A; S C-1, B; A C-1 ve C; DİA TA-1'yı ifade etmektedir. (Şekil 1)'den görüldüğü gibi S C-1 ve A C-1 oranları arttıkça dayanım değerlerinde azalma meydana gelmektedir. DİA TA-1 için ise daha farklı bir sonuç görülmekte ve DİA TA-1 oranı arttıkça dayanım değerlerinde

artış gözlenmiştir. Ayrıca geliştirilen matematiksel modellerin belirlilik katsayılarının (R^2) değerlerinin 0.99 olması da oldukça etkili olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4. TYM’de kullanılan analiz verileri.

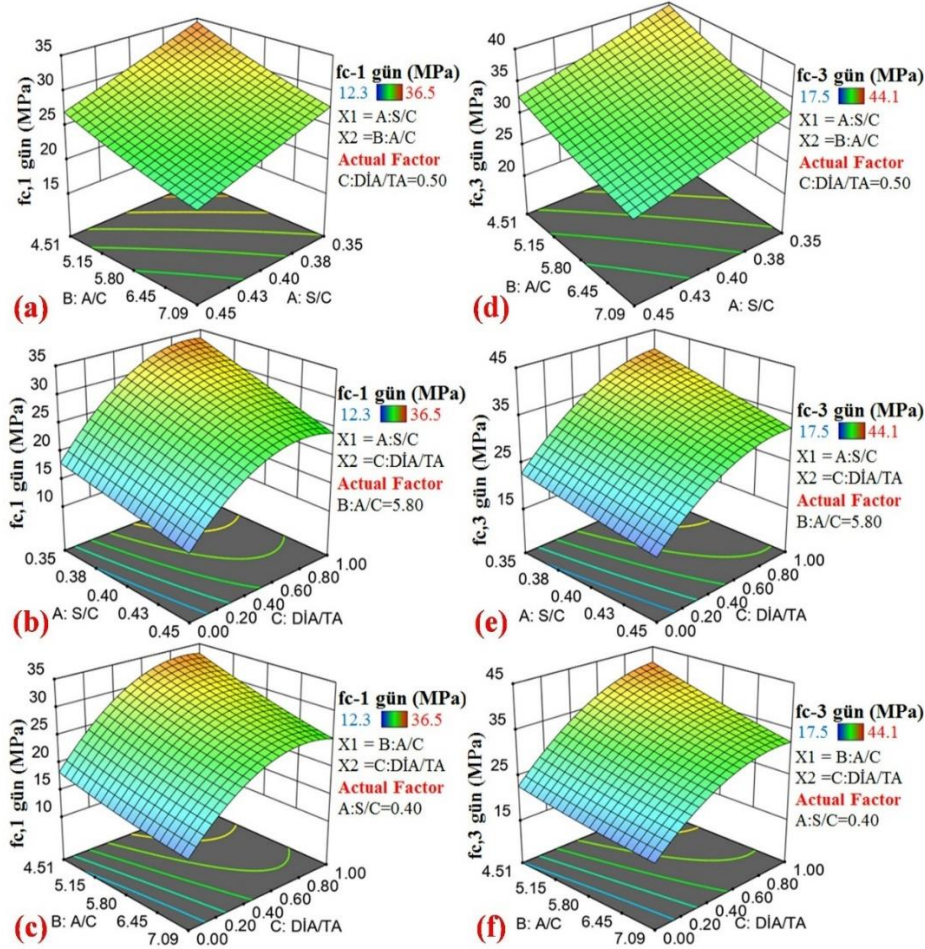
Karışım İsimleri	S C-1	A C-1	DİA TA-1	$f_{c,1}$ gün (MPa)	$f_{c,3}$ gün (MPa)
DAB-1	0.35	7.07	1.00	30.4	36.9
DAB-2	0.45	6.80	1.00	20.8	28.8
DAB-3	0.35	5.81	1.00	33.3	40.4
DAB-4	0.45	5.54	1.00	24.9	33.5
DAB-5	0.35	4.86	1.00	36.3	43.9
DAB-6	0.45	4.59	1.00	28.3	37.0
GDAB-1	0.35	6.95	0.00	16.5	21.4
GDAB-2	0.45	6.69	0.00	12.6	17.6
GDAB-3	0.35	5.71	0.00	18.1	23.0
GDAB-4	0.45	5.44	0.00	14.0	18.7
GDAB-5	0.35	4.77	0.00	20.3	24.4
GDAB-6	0.45	4.51	0.00	15.5	20.3
GDİAB-1	0.35	7.09	0.30	23.3	28.6
GDİAB-2	0.45	6.82	0.30	19.4	24.4
GDİAB-3	0.35	5.82	0.30	26.6	31.5
GDİAB-4	0.45	5.55	0.30	21.4	26.2
GDİAB-5	0.35	4.87	0.30	29.6	34.4
GDİAB-6	0.45	4.60	0.30	23.4	28.1



Şekil 1. Geliştirilen modellere ait pertürbasyon eğrileri

$f_{c,1}$ gün ve $f_{c,3}$ gün değerlerini yüksek doğrulukla tahmin etmek için geliştirilen matematiksel modellere ait 3 boyutlu etki grafikleri ise (Şekil 2)’de verilmiştir. (Şekil 2)’de sol kısımda verilen 3 boyutlu çıktılar $f_{c,1}$ gün değerlerini, sağ kısımda verilen 3 boyutlu çıktılar ise $f_{c,3}$ gün değerlerini göstermektedir. (Şekil 2). dikkatli bir şekilde incelendiğinde $f_{c,1}$ gün ve $f_{c,3}$ gün için oldukça benzer sonuçların olduğu açıkça görülmektedir. (Şekil 2).a’da S C-1 oranı arttıkça dayanım değerlerinde bir azalmanın meydana geldiği görülmektedir. Yine aynı etki grafiğinden A C-1 oranı arttıkça da dayanım değerlerinin azaldığı görülmektedir. (Şekil 2).b DİA TA-1 oranı arttıkça dayanım değerlerinin arttığını göstermektedir. (Şekil 2).c incelendiğinde benzer sonuçlar elde edilmiş olup DİA TA-1 oranı arttıkça dayanım değerlerinin arttığı açıkça görülmektedir. $f_{c,3}$ gün değerleri için geliştirilen matematiksel model dikkate alınacak olursa (Şekil 2).d S C-1 ve A C-1 parametrelerinin $f_{c,3}$ gün değerleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Yine buradan A C-1 ve S C-1 oranları arttıkça dayanım değerlerinde bir azalma meydana geldiği görülmektedir. (Şekil 2).e DİA TA-1 parametresinin $f_{c,3}$ gün

değerleri üzerindeki etkisini açıkça göstermekte ve DİA TA-1 oranı arttıkça dayanım değerleri artmaktadır. (Şekil 2).f DİA TA-1 parametresinin $f_{c,3}$ gün değerleri üzerinde olumlu etki yarattığını ve doğal agrega kullanım miktarı arttıkça dayanım değerlerinin arttığını göstermektedir. (Şekil 2) genel olarak incelendiğinde ise $f_{c,1}$ gün değerlerinin 12.3-36.5 MPa aralığında, $f_{c,3}$ gün değerlerinin ise 17.5-44.1 MPa aralığında değiştiği görülmektedir.



Şekil 2. Geliştirilen matematiksel modellere ait 3 boyutlu etki grafikleri

SONUÇ

Betonun kalitesi mekanik özellikleri ile ilişkilidir ve betonun en önemli mekanik özelliklerinden biri basınç dayanımıdır. Bu amaçla betonun basınç dayanımının yüksek doğrulukla tahmin edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle matematiksel modeller geliştirilmiş ve betonun basınç dayanımı yüksek doğrulukla tahmin edilmeye çalışılmıştır. Çalışmaya ait sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1. Deprem sonrası inşa edilen birçok binanın bulunduğu bölgelerde erken yaş beton basınç dayanımı kalıp sökme süreleri açısından büyük önem taşımaktadır. Geliştirilen matematiksel modeller yardımıyla erken yaş beton basınç dayanımları yüksek doğrulukla tahmin edilmektedir. Bu sayede kalıp sökme sürelerinin doğru belirlenmesi sağlanacaktır. Böylece imalatların uygun şekilde ve zaman tasarrufu ile ilerlemesi mümkün olacaktır.

2. Geliştirilen matematiksel modellerin belirlilik katsayılarınının 0.99 olması bu modellerin oldukça yüksek doğruluklu olduğunu ve etkin sonuçlar verdiğini göstermektedir. Yine de bu yüksek doğruluğun bu çalışmadaki malzemeler ve karışımlar için geçerli olduğu unutulmamalıdır. Ancak bu çalışmada geliştirilen modeller, kullanılan malzemeler ve karışım oranları değişse de yüksek doğruluklu sonuçların elde edileceği düşünülmektedir. Buradan TYM kullanılarak geliştirilen

modellerin oldukça etkili olduğu ve beton teknolojisinde kullanımının oldukça uygun olduğunda bir kez daha görülmüştür.

3. Deprem yıkıntı atıklarının beton içerisinde kullanılmasıyla sosyal, çevresel ve ekonomik faydalar sağlanacaktır. Bu çalışmanın sunduğu hesap kolaylıkları yardımıyla deprem yıkıntı atıklarının beton üretiminde kullanımının yaygınlaşmasına katkı sunulacağı düşünülmektedir.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Alyamac, K.E., Ghafari, E., Ince, R., 2017. Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method. *J. Clean. Prod.* 144, 192–202.
- Braga, A.M., Silvestre, J.D., de Brito, J., 2017. Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. *J. Clean. Prod.* 162, 529–543.
- Demir, T., Ulucan, M., Alyamac, K.E., 2022. Determination of the Early Age Strength of High-Strength Concrete Using RSM Method. *Fırat Univ. J. Eng. Sci.* 34, 105–114.
- Demirel, B., Gultekin, E., Alyamac, K.E., 2019. Performance of structural lightweight concrete containing metakaolin after elevated temperature. *KSCE J. Civ. Eng.* 23, 2997–3004.
- Guo, Z., Tu, A., Chen, C., Lehman, D.E., 2018. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates. *J. Clean. Prod.* 199, 136–149.
- Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., Ignjatović, I., 2010. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Manag.* 30, 2255–2264.
- Omary, S., Ghorbel, E., Wardeh, G., 2016. Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. *Constr. Build. Mater.* 108, 163–174.
- Pereira, P., Evangelista, L., De Brito, J., 2012. The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.* 28, 722–729.
- Serres, N., Braymand, S., Feugeas, F., 2016. Environmental evaluation of concrete made from recycled concrete aggregate implementing life cycle assessment. *J. Build. Eng.* 5, 24–33.
- Ulucan, M., Alyamac, K.E., 2022a. A holistic assessment of the use of emerging recycled concrete aggregates after a destructive earthquake: Mechanical, economic and environmental. *Waste Manag.* 146, 53–65.
- Ulucan, M., Alyamac, K.E., 2022b. An integrative approach of the use of recycled concrete aggregate in high-rise buildings: Example of the Elysium. *Struct. Concr.*
- Wang, L., Wang, J., Qian, X., Chen, P., Xu, Y., Guo, J., 2017. An environmentally friendly method to improve the quality of recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.* 144, 432–441.
- Wijayasundara, M., Mendis, P., Crawford, R.H., 2018. Integrated assessment of the use of recycled concrete aggregate replacing natural aggregate in structural concrete. *J. Clean. Prod.* 174, 591–604.