



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 20.11.2023
Kabul Tarihi : 29.04.2024

Received Date : 20.11.2023
Accepted Date : 29.04.2024

GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ AGREGA İÇEREN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN OPTİMİZASYONU

OPTIMIZATION OF ENGINEERING PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE CONTAINING RECYCLED AGGREGATE

Şevin EKME* (ORCID:0000-0002-2577-696X)

*Harran Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Şevin EKME, ekmensevin@harran.edu.tr

ÖZET

Kendiliğinden yerleşen beton yüksek işlenebilirliğe sahip olmasının yanı sıra mühendislik özellikleri açısından yeterli performansı göstermesi nedeni ile oldukça ilgi gören özel bir beton çeşididir. Bu çalışmada geri dönüştürülmüş agrega içeren kendiliğinden yerleşen beton uygulamalarının yer aldığı literatür çalışmaları dikkate alınarak Tepki Yüzey Metodu ile optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Yürütülen optimizasyon çalışmasında geri dönüştürülmüş ince ve iri agrega yüzdeleri ile su/çimento oranı girdi parametreleri olarak seçilmiştir. Bu kapsamda kendiliğinden yerleşen betonun taze özelliğini yansıtan yayılma çapı değerleri ile sertleşmiş performansını gösteren basınç dayanımı parametreleri irdelenmiştir. Kullanılan bu yöntem sayesinde dikkate alınan girdi değişkenlerinin çıktı parametreleri üzerindeki etkisini yansıtan modeller oluşturulmuştur. Agreganın miktarları ve basınç dayanımı maksimize edilmiş olup diğer parametreler serbest bırakılmıştır. Yayılma çapı için ise hedef değer tanımlaması yapılmıştır. Ayrıca gerçekleştirilen varyans analizi sonucunda oluşturulan modellerin anlamlılığı ortaya konulmuştur. Oluşturulan modelin arzu edilebilirlik değeri 0.734 olarak elde edilmiştir. Böylece istenilen düzeye anlamlı bir derecede yaklaşılarak geri dönüştürülmüş agrega içeren kendiliğinden yerleşen beton için optimum tasarım parametrelerine ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kendiliğinde yerleşen beton, geri dönüştürülmüş agrega, tepki yüzey metodu, optimizasyon

ABSTRACT

Self-compacting concrete is a special type of concrete that attracts a lot of attention due to its high workability and adequate performance in terms of engineering properties. In this study, an optimisation study was carried out with the Response Surface Method considering the literature studies on self-compacting concrete applications containing recycled aggregates. In the optimisation study, recycled fine and coarse aggregate percentages and water/cement ratio were selected as input parameters. In this context, spread diameter values reflecting the fresh property of self-compacting concrete and compressive strength parameters showing the hardened performance were examined. Thanks to this method, models reflecting the effect of the input variables on the output parameters were created. Aggregate amounts and compressive strength were maximised and other parameters were left free. A target value was defined for the spreading diameter. In addition, the significance of the models created as a result of the analysis of variance was revealed. The desirability value of the model was obtained as 0.734. Thus, the optimum design parameters for self-compacting concrete containing recycled aggregate were reached by significantly approaching the desired level.

Keywords: Self compacting concrete, recycled aggregate, response surface method, optimization

GİRİŞ

Dünya çapında nüfus artmaya devam ettikçe yeni altyapıya olan talep de artmaktadır. Bu durum neticesinde beton dünyada en yaygın kullanılan inşaat malzemesi olmaktadır. Beton yapılara olan talebin yüksek olması ile birlikte de inşaat sektörünün doğal kaynak tüketimi de son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. Aynı zamanda artan inşaat ve yıkım atıkları da çevre açısından olumsuz bir etki yaratmaktadır.

İnşaat sektöründe daha sürdürülebilir bir sistemin oluşması açısından beton teknolojisine farklı açılardan yaklaşılması gerekmektedir. Doğal kaynakların kullanımının azaltılacağı alanlar farklılık göstermek ile birlikte yeni beton üretiminde geri dönüştürülmüş agregaların kullanılması giderek daha yaygın hale gelmektedir. Bu sayede azaltılan agrega kaynak tüketimi ve maliyet durumlarının yanı sıra atık depolama, taşıma gibi sorunların çözümüne de katkı sağlanmış olmaktadır. Bu kapsamda hem ekonomik hem de çevresel sorunlara çözüm getirmesi açısından geri dönüştürülmüş malzemelerin yenilikçi kullanımının önemini gösteren ve inşaat sektöründe sürdürülebilir kaynakların geliştirilmesine odaklanılan çalışmalar yürütülmektedir (Soares vd., 2014; Behere vd., 2014; Evangelista ve De Brito, 2014; Silva vd., 2015; Silva vd., 2018; Guo vd., 2018)

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), dışarıdan bir kuvvet veya titreşim olmadan karışımın yüksek akışkan yapısı sayesinde normal betonun kullanılmasının mümkün olmadığı dar, sıkışık uygulama alanlarına segregasyon olmadan rahatlıkla yerleşebilen bir beton türüdür (Corinaldesi ve Moriconi, 2011). Bu yüksek işlenebilirlik yapısına ulaşılması katkı maddelerinin kullanımı ile sağlanmaktadır. KYB üretimi sırasında işlenebilirlik gerekliliklerine yeterince uyması açısından akış kapasitesi, geçiş kapasitesi, viskozite ve ayrışmaya karşı direnç gibi özelliklerinin analiz edilmesi gerekmektedir (Concrete, 2005). Kendiliğinden Yerleşen Betonda geri dönüştürülmüş agrega kullanımı henüz yakın zamanda incelenmiştir, ancak bu agrega kullanımının sağladığı bazı avantajlar dikkate alındığında bu alanda yapılacak daha fazla çalışmalara ihtiyaç duyulacağı aşikardır. Araştırmacılar, geri dönüştürülmüş agrega içeren KYB'nin taze özelliklerinin yanı sıra dayanım ve dayanıklılık performanslarının da istenilen ölçülerde elde edilmesi için bazı kapsamlı çalışmalar gerçekleştirmişlerdir (Garcia-Troncoso vd., 2021; Mu vd., 2021; Sasanipour ve Aslani, 2020).

Literatürde, inşaat mühendisliğinin farklı alanlarında olmak üzere karışım oranlarının belirlenmesinde kullanılan değişken parametrelerin betonun mühendislik özellikleri üzerindeki etkisinin incelendiği optimizasyon çalışmaları mevcuttur (Ekmen vd., 2020; Şimşek vd., 2013; Khargotra vd., 2022; Broyles vd., 2022). Bu optimizasyon çalışmalarında deney tasarımı, model geliştirme ve optimum değerlere ulaşmak için kullanılan en yaygın yaklaşımlardan biri Tepki Yüzey Metodudur (TYM) (Yan vd., 2011; Bayramov vd., 2004; Ekmen ve Avci, 2023; Nambiar ve Ramamurthy, 2006; Adamu vd., 2022; Avci ve Ekmen, 2023). Haque vd., (2021), değişken olarak kabuk külü ve cam elyaf kullanarak betonun özelliklerini tahmin etmek ve optimize etmek için TYM'yi kullanmışlardır. Siamardi (2022), TYM sayesinde deneysel tasarım ve model geliştirerek hafif kendiliğinden yerleşen betonun mühendislik özelliklerinin tahminini gerçekleştirmiştir. Awolusi vd., (2019), çelik lif ve kireçtaşı tozunu girdi parametreleri olarak kullanarak betonun yayılma çapı, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve su emmesini tahmin etmek için TYM ile modeller oluşturmuşlardır. Geliştirdikleri modeller yüksek derecede doğruluğa ve daha az hata ile tahmine sahiptir. Hameed vd., (2021), yüksek dayanımlı betonun dayanımını TYM desteği ile modellemişlerdir.

Bu çalışmada KYB üretiminde geri dönüştürülmüş agrega kullanımının gerçekleştirildiği çalışmalardan edinilen veriler ışığında TYM kullanılarak optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Karışım tasarımında yer verilen oranlar dikkate alınarak üretilen KYB'ye ait yayılma çapı ve basınç dayanım değerleri değerlendirilmiştir. Hem iri agrega hem de ince agrega ikame yüzdelilerinin KYB performansını belirleyen taze ve sertleşmiş özellikler üzerindeki etkisi ortaya konularak gelecek çalışmalara yön vermesi hedeflenmiştir. Böylece kendiliğinden yerleşen beton için optimum tasarım parametrelerine ulaşılmıştır.

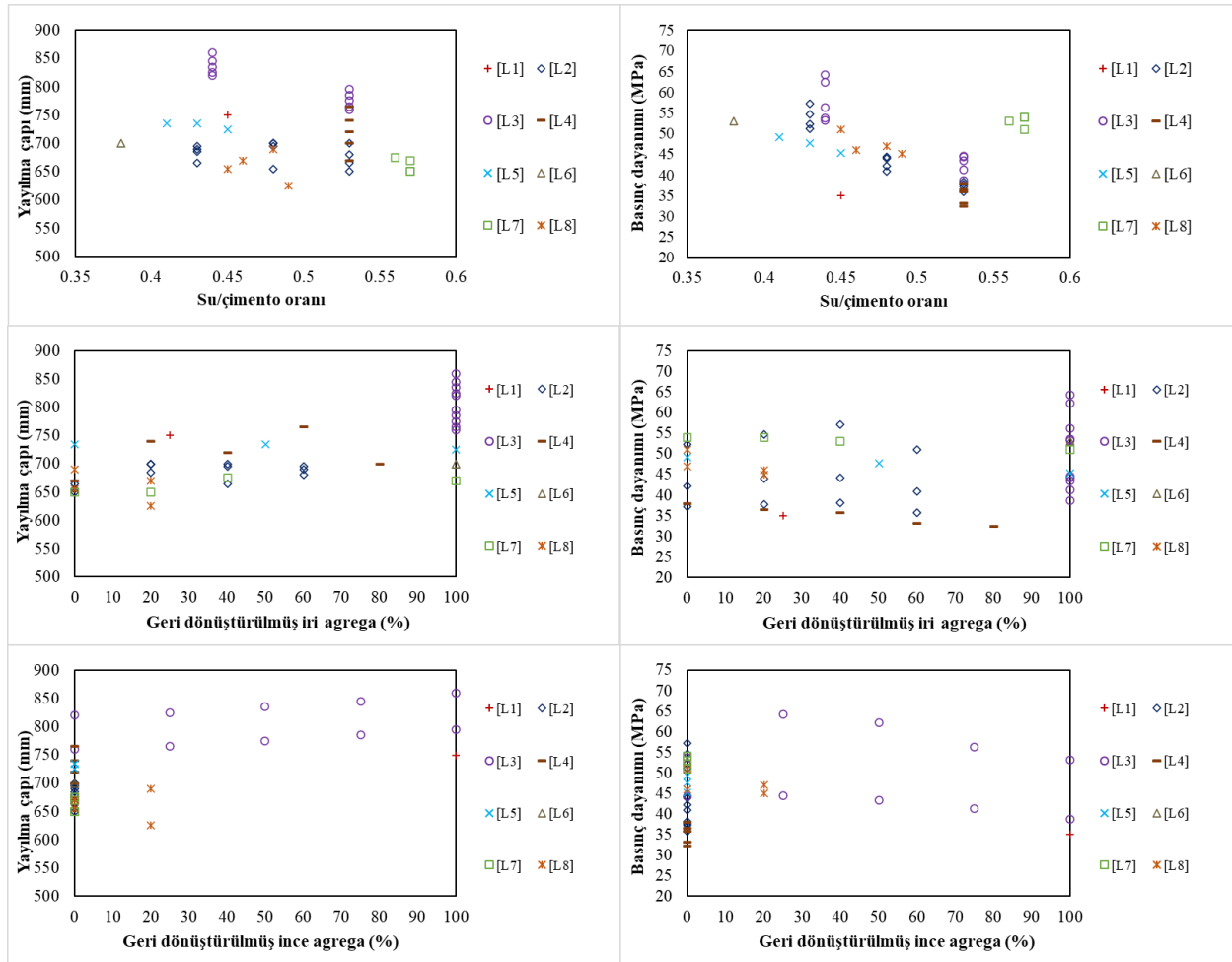
MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

Yürütülen bu çalışma kapsamında geri dönüştürülmüş agrega ikamesi içeren KYB üretimleri dikkate alınmıştır. Bu alanda yürütülen literatür çalışmaları (Corinaldesi ve Moriconi, 2004; Kou ve Poon, 2009; Grdic vd., 2010; Tayan, 2014; Pereira-de-Oliveira vd., 2014; Modani ve Mohitkar, 2014; Güneyisi vd., 2014; Campos vd., 2018) araştırılarak

ulaşılan veriler irdelenmiştir. KYB karışım tasarımı gerçekleştirilirken taze özellikler ile birlikte mekanik performansın da istenilen seviyelerde olması gerekmektedir. Üretilen KYB'nin yeterli işlenebilirlik seviyelerine ulaşması ve aynı zamanda basınç dayanım değerinin de yapısal kullanılabilirliğe uygun olması gerekmektedir. Su/çimento (s/ç) oranının artırılması daha akışkan bir yapı elde edilebilmesine olanak sağlarken aynı zamanda basınç dayanım değerlerinde de azalmaya sebep olabilmektedir. Bu iki önemli özellik dikkate alındığında s/ç oranının da en uygun şekilde ayarlanması gerekmektedir. Tüm bu durumlar göz önüne alınarak bu çalışmada geri dönüştürülmüş iri agrega (GDA_{iri}) ve geri dönüştürülmüş ince agrega (GDA_{ince}) ikame yüzdelerinin yanı sıra s/ç oranının da KYB'nin yayılma çapı (mm) ve basınç dayanım (MPa) değerleri üzerindeki etkisinin irdelendiği bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.

Bu kapsamda dikkate alınan literatür çalışmalarından istenilen parametre ve oranlarını içeren 40 veri değerlendirilmiş olup sonuçlar irdelenmiştir. Kullanılan veriler için s/ç oranı 0,38-0,57 arasında, GDA_{iri} ve GDA_{ince} yüzdeleri ise 0-100 arasında değişmektedir. Çıktı parametreleri olan yayılma çapı (mm) ve basınç dayanım (MPa) değerleri ise sırasıyla 625-860 mm ile 32,3-64,3 MPa arasında değişmektedir. Kullanılan veriler ve ait olduğu çalışmaları gösteren grafik Şekil 1'de verilmiştir. Literatür çalışmalarını temsil eden göstergeler çalışmaların metin içerisinde verildiği sıra ile belirtilmiştir. Örneğin L₁, Corinaldesi ve Moriconi, (2004) tarafından yürütülen çalışmayı temsil etmektedir.

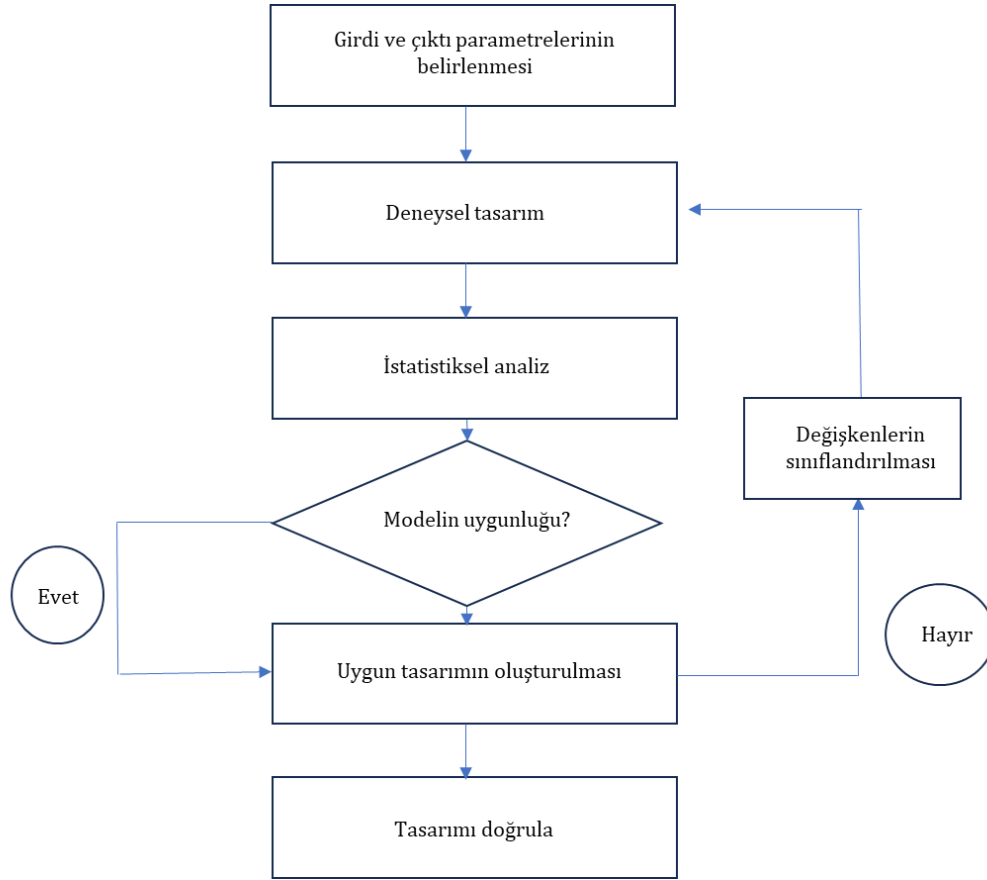


Şekil 1. KYB Üretimi Gerçekleştirilmiş Literatür Çalışmalarına ait Veriler

Yöntem

Tepki Yüzey Metodu ilk kez Box ve Wilson (Myers vd., 2016) tarafından 951 yılında tanıtılmıştır ve halen deney tasarım çalışmalarında kullanılmaktadır. Tepki Yüzey Metodu, ilgilenilen bağımsız değişkenlerin birkaç bağımlı değişkenden etkilendiği ve amacın yanıtı optimize etmek olduğu problemlerin modellenmesi ve analizi için

kullanılabilen, matematiksel-istatistiksel tekniklerden oluşan güçlü bir metodolojidir (Montgomery, 2013). Şekil 2’de Tepki Yüzey Metodunun çalışma mekanizmasını gösteren akış şemasına yer verilmiştir.



Şekil 2. Tepki Yüzey Metodunun Çalışma Mekanizmasını Gösteren Akış Şeması

TYM’de, birden fazla değişken söz konusu olduğunda iyi bir deneysel program kullanarak ikinci dereceden etkilerin etkileşimleri ortaya konulabilmektedir. Ayrıca, girdi parametrelerinin yanıt üzerindeki etkilerini değerlendirmek, model denklemleri oluşturmak ve en iyi performans değerlerine ulaşılmasını sağlayan optimum miktarlar belirlenebilmektedir (Adamu vd., 2022). TYM, oluşturulacak olan karışım tasarımında sağladığı avantajların yanı sıra yanıt özelliklerinin birbirleriyle olan ilişkileri hakkında da bilgi edinilmesini mümkün kılmaktadır. Bina ve inşaat uygulamalarında TYM tabanlı yaklaşımın kullanılması sayesinde daha az deney gerçekleştirilerek zaman ve maliyette azalma sağlanmış olmaktadır (Adamu vd., 2022).

BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen istatistiksel değerlendirme ve modelleme işlemleri Design Expert versiyon 10 (Design Expert, 2010) paket programı ile gerçekleştirilmiştir. Tepki Yüzey Metoduna bağlı olan Merkezi Birleşik Tasarım modeli kullanılmıştır. Su/çimento oranı, geri dönüştürülmüş iri agrega yüzdesi ve geri dönüştürülmüş ince agrega yüzdesi girdi parametreleri olarak kullanılırken yayılma çapı (mm) ve basınç dayanımı (MPa) çıktı parametreleri olarak belirlenmiştir. TYM ile oluşturulan model sayesinde tepki parametrelerinin optimum değerleri elde edilmiştir. Modelleme gerçekleştirilirken 750 mm hedef yayılma çapı ile maksimum basınç dayanımı sonucuna ulaşmaya çalışılmıştır. Bu hedefler doğrultusunda s/ç oranı veri aralığında serbest seçilirken GDA_{iri} ve GDA_{ince} yüzdeleri maksimum olacak şekilde tasarım gerçekleştirilmiştir. Böylece deneysel verilere en yakın sonuçların ulaşılacağı en iyi model oluşturulmuştur.

Oluşturulan her bir modelin deneysel verilere uyup uymadığı istatistiksel olarak kontrol edilmiştir. Varyans analizi ile ulaşılan istatistiksel parametrelere Tablo 1’de yer verilmiştir. TYM’den elde edilen varyans analizinde (ANOVA) gerçekleşen bir dizi adım sonrasında ulaşılan P-değerleri kullanılarak istatistiksel anlamlılık belirlenmiş ve geliştirilen modellerin yeterliliği kontrol edilmiştir. Hem yayılma çapı (mm) hem de basınç dayanımı (MPa) için istatistiksel değerlendirme sonucunda $p < 0,05$ olduğundan oluşturulan modellerin %95 güven aralığında anlamlı

olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, belirlenen değişkenler ile oluşturulan modeller arasında anlamlı bir ilişki olduğu söylenebilmektedir.

Tablo 1. Yayılma Çapı (mm) ve Basınç Dayanımı (MPa) için ANOVA Sonuçları

Tepki	Kaynak	İstatistiksel parametreler			Kareler ortalaması	F değeri	p-değeri	Anlamlılık
		Model	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi				
Yayılma çapı (mm)	Model		1,02E+05	3	33885,08	27,9	< 0.0001	<u>Anlamlı</u>
	A-S/Ç		5136,59	1	5136,59	4,23	0,047	
	B-GDA _{iri} (%)	Lineer	33013,85	1	33013,85	27,18	< 0.0001	
	C-GDA _{ince} (%)		20975,43	1	20975,43	17,27	0,0002	
	Artık		43722,27	36	1214,51			
Basınç dayanımı (MPa)	Model		1,59E+03	9	176,85	5,52	0,0002	<u>Anlamlı</u>
	A-S/Ç		645,56	1	645,56	20,16	< 0.0001	
	B-GDA _{iri} (%)		107,76	1	107,76	3,36	0,0765	
	C-GDA _{ince} (%)		136,7	1	136,7	4,27	0,0476	
	AB	Kuadratik	2,02	1	2,02	0,063	0,8034	
	AC		130,88	1	130,88	4,09	0,0522	
	BC		146,96	1	146,96	4,59	0,0404	
	A ²		367,8	1	367,8	11,48	0,002	
	B ²		7,71	1	7,71	0,24	0,6273	
	C ²		257,2	1	257,2	8,03	0,0081	
Artık		960,72	30	32,02				

Deneysel tasarım, veri üretimi ve analizi tamamlandıktan sonra, çıktıları tahmin etmek için kullanılacak model denklemleri oluşturulmuştur. Yayılma çapı ve basınç dayanımı için bu model denklemleri sırasıyla Eşitlik (1) ve Eşitlik (2)'de verilmiştir. Tepki modellerini temsil eden bu denklemlerin katsayı değerlerine ise Tablo 2'de yer verilmiştir.

$$\text{Yayılma çapı (mm)} = (x_1 - x_2A + x_3B + x_4C) \quad (1)$$

$$\text{Basınç dayanımı (MPa)} = (y_1 - y_2A + y_3B - y_4C + y_5AB - y_6AC + y_7BC + y_8A^2 + y_9B^2 - y_{10}C^2) \quad (2)$$

Tablo 2. Yayılma Çapı ve Basınç Dayanımı için Regresyon Modellerinde (Denklem 1-2) Kullanılan Katsayılar

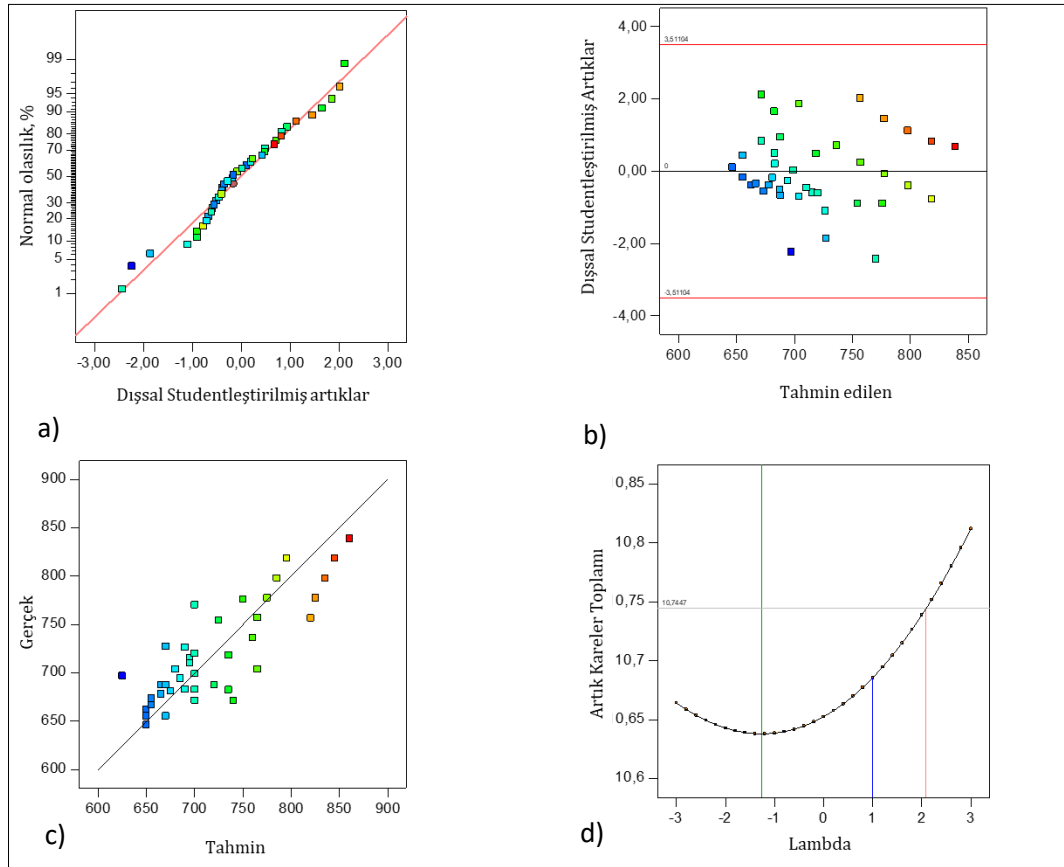
Tepki	Katsayılar													
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	y ₆	y ₇	y ₈	y ₉	y ₁₀
Yayılma çapı (mm)	749,4	21,45	40,5	41,04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Basınç dayanımı (MPa)	-	-	-	-	46,91	16,52	4,2	4,38	0,6	7,42	5,31	13,56	1,23	9,85

Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında kullanılan bağımlı ve bağımsız değişkenler, hedef aralıkları ve sonuç olarak ulaşılan optimum değerler Tablo 2'de verilmiştir. En uygun model oluşturulurken öncelikli olarak geri dönüştürülmüş agrega yüzdelilerinin ve basınç dayanımı değerlerinin maksimum olması koşuluyla diğer faktör ve değişkenlerin hedefleri belirlenmiştir. S/Ç oranı, GDA_{iri} (%) ve GDA_{ince} (%) faktörleri için optimum değerler sırasıyla 0,42, %81,03 ve %67,46 olarak elde edilirken tepki parametreleri olan yayılma çapı (mm) ve basınç dayanımı (MPa) için bu değerler sırasıyla 801,61 mm ve 64,3 MPa olarak elde edilmiştir.

Tablo 3. Optimizasyon Analizinde Kullanılan Değişkenlere Ait Hedefler ve Optimum Değerler

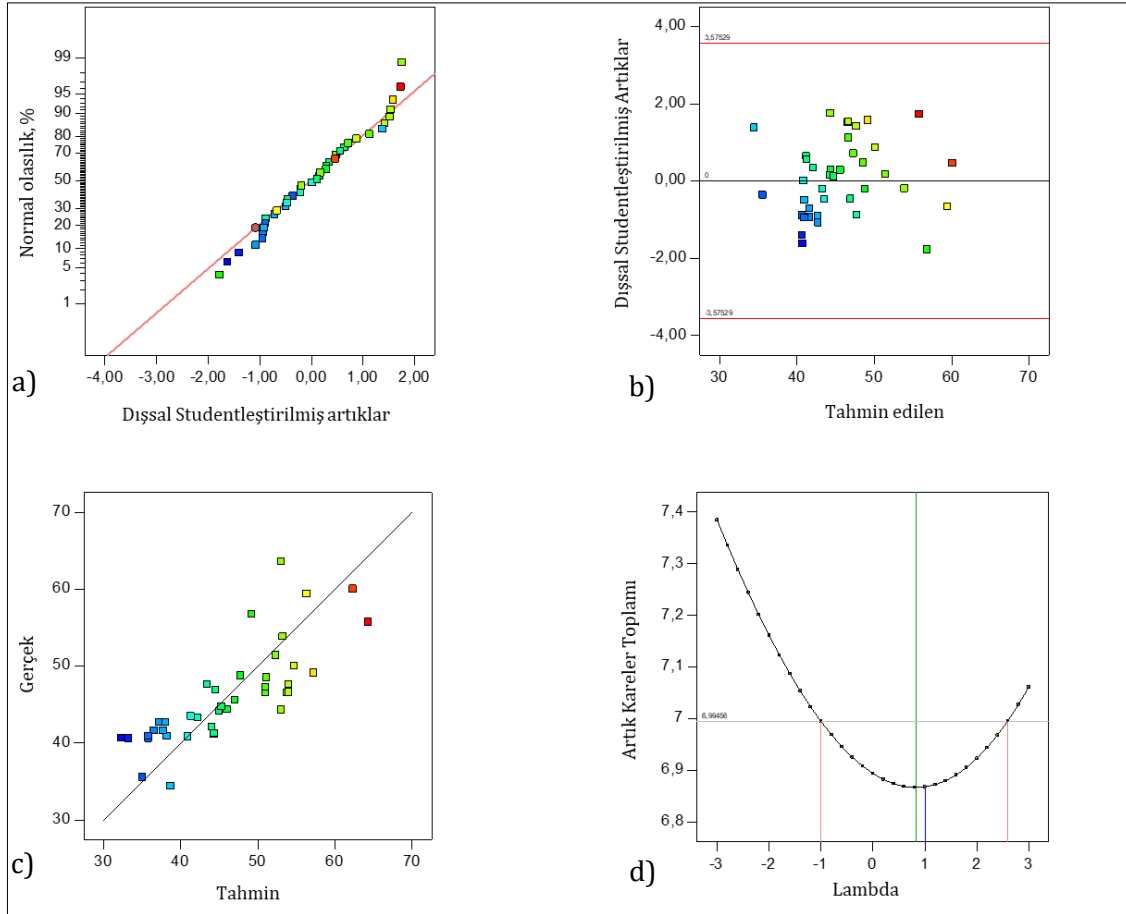
Faktörler ve Tepkiler	Hedef	Alt limit	Üst limit	Optimum değerler
S/Ç	aralıkta	0,38	0,57	0,42
GDA _{iri} (%)	maksimum	0	100	81,03
GDA _{ince} (%)	maksimum	0	100	67,46
Yayımla çapı (mm)	hedef	625	860	801,61
Basınç dayanımı (MPa)	maksimum	32,3	64,3	64,3

Yayımla çapı (mm) tepki modeli için artıkların normal grafiği Şekil 3 (a)'da verilmiş olup, bu şekilde artıkların düz bir hattın oldukça yakınında olduğu görülmektedir. Bu durum, belirlenen hedeflere ulaşılması doğrultusunda oluşturulan tepki modeline ait artıkların uygun bir dağılımda olduğunu göstermektedir. Şekil 3 (b)'de, oluşturulan model için elde edilen artıklar ve tahmin edilen yayılma çapı değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik verilmiştir. Grafikte modele ait veriler sınır çizgileri arasında rastgele dağılmıştır. Şekil 3 (c)'de gerçek değerler ile tahmin edilen yayılma çapı (mm) tepki değerleri arasındaki ilişki verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi eğimli çizgi verileri yaklaşık eşit olarak bölmüştür. Şekil 3 (d)'de ise elde edilen yayılma çapı (mm) modeli için Box-Cox transformasyon analizine ait grafiğe yer verilmiştir. Bu grafikte lambda için en uygun olan 1 değeri alınmıştır.



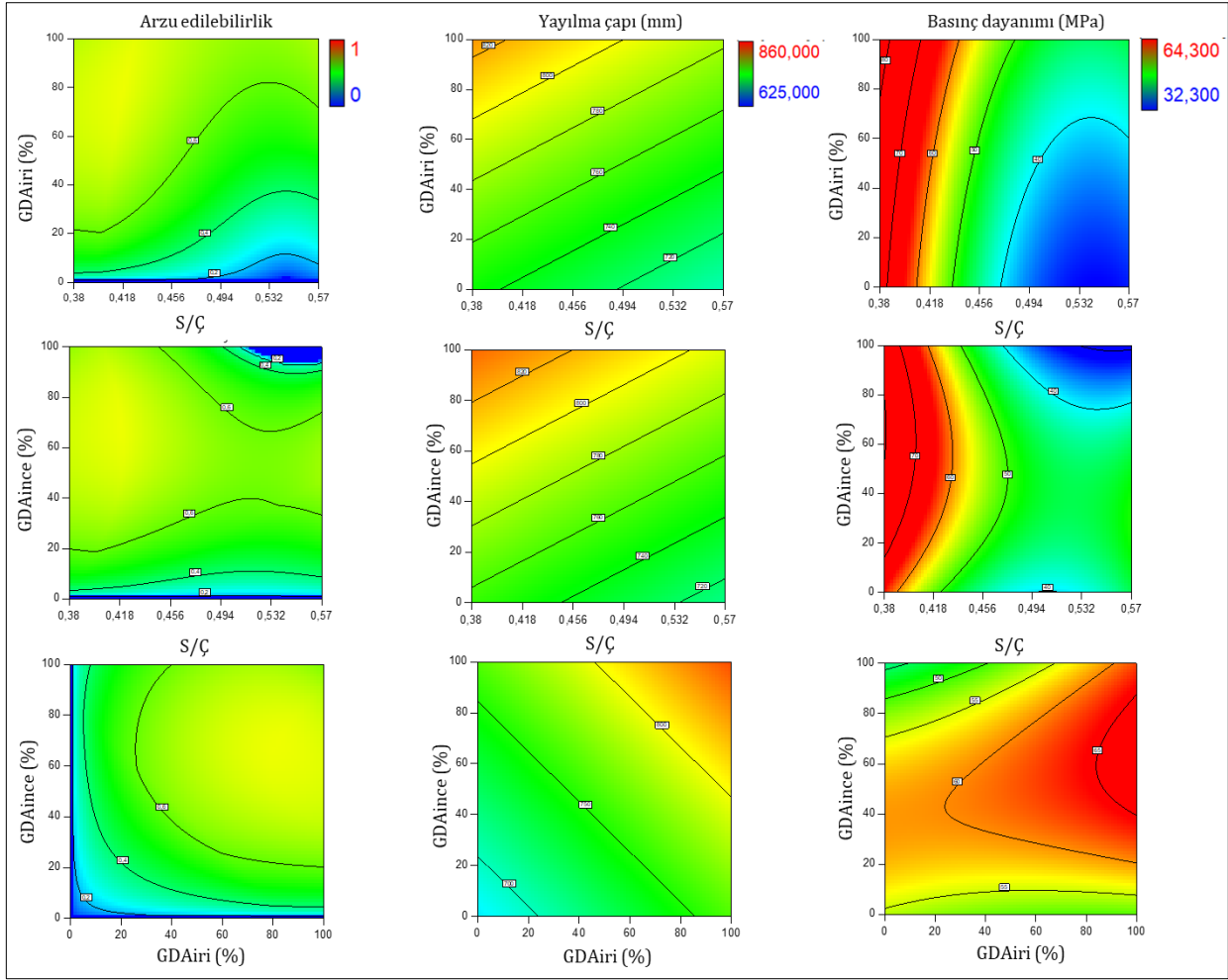
Şekil 3. Yayımla Çapı Modelinin Regresyon Analizi için Grafikler (Denklem 1): a) Artıkların Normal Grafiği; b. Artıklara Karşı Tahmin Edilen Tepkinin Grafiği; c. Tahmin Edilene Karşı Gerçek Tepkinin Grafiği; d. Üssel Transformasyon için Box-Cox Dönüşüm Grafiği

Basınç dayanımı (MPa) tepki modeli için artıkların normal grafiği Şekil 3 (a)'da verilmiş olup, bu şekilde artıkların çoğunun düz hattın üzerinde uygun bir dağılımda olduğu görülmektedir. Oluşturulan model için elde edilen artıklar ve tahmin edilen basınç dayanımı (MPa) değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik ise Şekil 3 (b)'de verilmiştir. Grafikte modele ait veriler sınır çizgileri arasında rastgele dağılmıştır. Şekil 3 (c)'de gerçek değerler ile ve tahmin edilen basınç dayanımı (MPa) tepki değeri arasındaki ilişki verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi eğimli çizgi verileri yaklaşık eşit olarak bölmüştür. Elde edilen basınç dayanımı (MPa) modeli için Box-Cox transformasyon analizine ait grafik Şekil 3 (d)'de verilmiştir. Bu tepki modeli için de lambda değeri 1 olarak alınmıştır.



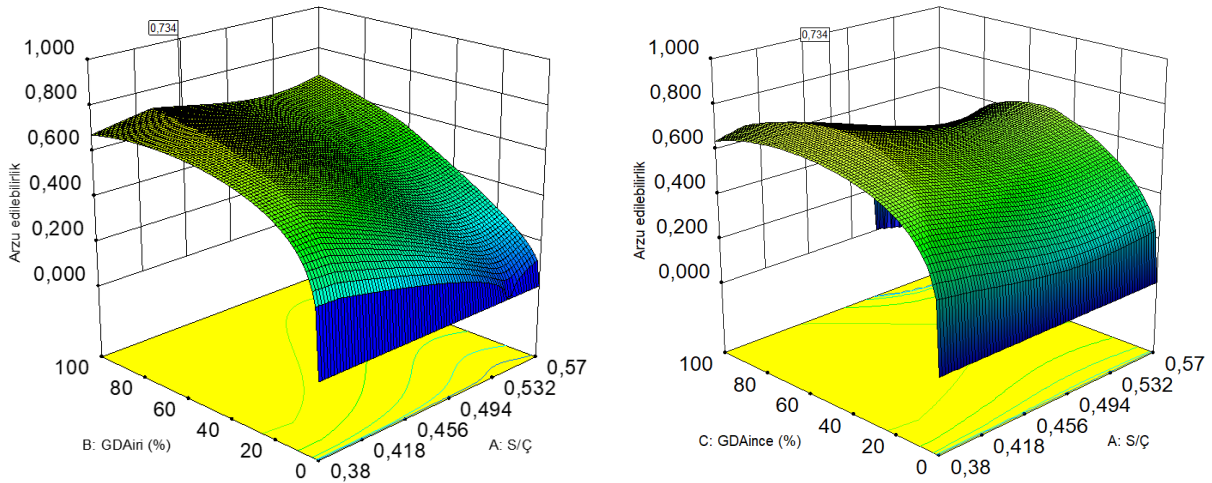
Şekil 4. Basınç Dayanımı Modelinin Regresyon Analizi için Grafikler (Denklem 2): a. Artıkların Normal Grafiği; b. Artıklara Karşı Tahmin Edilen Tepkinin Grafiği; c. Tahmin Edilene Karşı Gerçek Tepkinin Grafiği; d. Üssel Transformasyon için Box-Cox Dönüşüm Grafiği

TYM'deki çok amaçlı optimizasyonun sonucu, arzu edilebilirlik kullanılarak doğrulanır ve açıklanır. Arzu edilebilirlik 0 ila 1 arasında değişen ve her yanıt için arzu edilen aralıkları yansıtan bir amaç fonksiyonu $d(x)$ kullanan çoklu bir yanıt metodudur. Yayılma çapı (mm) ve basınç dayanımı (MPa) modelleri için arzu edilebilirlik ve iki boyutlu tepki yüzeyi grafikleri Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'te S/Ç oranının, GDA_{iri} (%) ve GDA_{ince} (%) değerlerinin yayılma çapı (mm) ve basınç dayanımı (MPa) tepkileri üzerindeki etkisi görülmektedir. S/ç oranındaki azalmaya bağlı olarak basınç dayanım değerlerinde artış görülmektedir. Yayılma çapı (mm) değerlerindeki değişimde hem GDA_{iri} (%) hem de GDA_{ince} (%) değerlerindeki artışlar etkili iken, basınç dayanımındaki değişimde en etkili parametre GDA_{iri} (%) miktarı olmuştur. Tasarım sırasında belirlenen hedefler doğrultusunda oluşturulan modeller için arzu edilebilirlik değeri yüksek GDA_{iri} (%) miktarı ve düşük s/ç oranı ile elde edilmiştir. Gerçekleştirilen bu optimizasyon çalışmasında arzu edilebilirlik değeri 0,734 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5. Oluşturulan Tepki Yüzey Modellerinin Arzu Edilebilirliği ve İki Boyutlu Gösterimi

Şekil 6'da oluşturulan modele ait üç boyutlu arzu edilebilirlik grafiği verilmiştir. Arzu edilebilirlik değerinin 1'e yakın elde edilmesi optimum tasarıma istenilen derecede yaklaşıldığını göstermektedir.



Şekil 6. Oluşturulan Modele ait Üç Boyutlu Arzu Edilebilirlik Grafikleri

SONUÇLAR

Çalışma kapsamında geri dönüştürülmüş iri ve ince agrega ikamesi yapılan kendiliğinden yerleşen beton uygulamaları irdelenmiş olup optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Design Expert programı kullanılarak gerçekleştirilen istatistiksel ve matematiksel işlemlerin sonucunda ele alınan bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki belirlenmiştir. Bu kapsamda S/Ç oranı, GDA_{iri} (%) miktarı ve GDA_{ince} (%) miktarı kaynak değerlerine karşılık yayılma çapı (mm) ve basınç dayanımı (MPa) tepki değerleri incelenmiştir. Çalışma ile ulaşılan sonuçlara aşağıda yer verilmiştir:

- İstatistiksel değerlendirme neticesinde yayılma çapı (mm) değeri için oluşturulan modelin anlamlı olması sonucunda uygun fonksiyon oluşturulabilmiştir.
- Varyans analizine göre basınç dayanımı (MPa) tepki parametresini yansıtan model anlamlı bulunmuştur.
- Gerçekleştirilen optimizasyon çalışması sonucunda girdi parametreleri olan S/Ç oranı, GDA_{iri} (%) miktarı ve GDA_{ince} (%) miktarı için optimum değerler sırasıyla 0,42, %81,03 ve %67,46 olarak belirlenmiştir.
- Çıktı parametreleri olan yayılma çapı (mm) ve basınç dayanımı (MPa) için optimum değerler sırasıyla 801,61 mm ve 64,3 MPa olarak elde edilmiştir.
- Tepki yüzey modelleri incelendiğinde S/Ç oranındaki azalmaya bağlı olarak basınç dayanım değerlerinde artış görülmüştür.
- Hem GDA_{iri} (%) hem de GDA_{ince} (%) ikame oranlarındaki artışlar yayılma çapı (mm) değerlerindeki değişimde etkili olmuştur.
- Oluşturulan modele göre basınç dayanımındaki değişimde en etkili parametre GDA_{iri} (%) ikame oranı olmuştur.
- İncelenen verileri yansıtan her tepki için arzu edilen aralıkları yansıtan arzu edilebilirlik değeri 0,734 olarak elde edilmiştir.

Böylece istenilen arzu edilebilirlik düzeyine anlamlı bir noktada yaklaşarak geri dönüştürülmüş agrega içeren kendiliğinden yerleşen betonlar için sonraki çalışmalara rehber olabilecek optimum tasarım parametreleri elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Adamu, M., Haruna, S. I., Ibrahim, Y. E., & Alanazi, H. (2022). Evaluation of the Mechanical Performance of Concrete Containing Calcium Carbide Residue and Nano Silica Using Response Surface Methodology. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(44), 67076-67102. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20546-x>.
- Adamu, M., Marouf, M. L., Ibrahim, Y. E., Ahmed, O. S., Alanazi, H., & Marouf, A. L. (2022). Modeling and Optimization of The Mechanical Properties of Date Fiber Reinforced Concrete Containing Silica Fume Using Response Surface Methodology. *Case Studies in Construction Materials*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01633>.
- Avci, Y., & Ekmen, A. B. (2023). Artificial Intelligence Assisted Optimization of Rammed Aggregate Pier Supported Raft Foundation Systems Based on Parametric Three-Dimensional Finite Element Analysis. *In Structures*, Vol. 56, p. 105031. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105031>.
- Awolusi, T. F., Oke, O. L., Akinkulore, O. O., & Sojobi, A. O. (2019). Application of Response Surface Methodology: Predicting and Optimizing The Properties of Concrete Containing Steel Fibre Extracted From Waste Tires With Limestone Powder As Filler. *Case studies in Construction materials*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00212>.
- Bayramov, F., Taşdemir, C., & Taşdemir, M.A. (2004). Optimisation of Steel Fibre Reinforced Concretes by Means of Statistical Response Surface Method, *Cement and Concrete Composites* 26, 665–675. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00161-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00161-6).

- Broyles, J. M., Shepherd, M. R., & Brown, N. C. (2022). Design Optimization of Structural–Acoustic Spanning Concrete Elements in Buildings. *Journal of Architectural Engineering*, 28(1), 04021044. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.000052](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.000052).
- Campos, R. S., Barbosa, M. P., Pimentel, L. L., & Maciel, G. de F. (2018). Influência dos agregados reciclados nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto autoadensável. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 23(1). doi:10.1590/s1517-707620170001.0300. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0300>.
- Concrete, S. C. (2005). The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. *BIBM*, et al, 22, 563.
- Corinaldesi, V., & Moriconi, G. (2004). Self-Compacting Concrete: A Great Opportunity for Recycling Materials, in: *Proceedings of the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*, 10 p.
- Corinaldesi, V., & Moriconi, G., (2011). The Role of Industrial By-Products in Selfcompacting Concrete. *Construct. Build. Mater.* 25 (8), 3181e3186. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.001>.
- Design Expert, 2010. Design Expert, Stat-Ease, Minneapolis, USA.
- Ekmen, A. B., Algin, H. M., & Özen, M. (2020). Strength and Stiffness Optimisation of Fly Ash-Admixed DCM Columns Constructed in Clayey Silty Sand. *Transportation Geotechnics*, 24, 100364. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100364>.
- Ekmen, A. B., Avci, Y. (2023). Artificial Intelligence-Assisted Optimization of Tunnel Support Systems Based on the Multiple Three-Dimensional Finite Element Analyses Considering the Excavation Stages. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47(3), 1725-1747. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01109-7>.
- Evangelista, L., & De Brito, J., (2014). Concrete with Fine Recycled Aggregates: A Review. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 18 (2), 129e172. <https://doi.org/10.1080/19648189.2013.851038>.
- Garcia-Troncoso, N., Li, L., Cheng, Q., Mo, K. H., & Ling, T. C. (2021). Comparative Study on the Properties and High Temperature Resistance of Self-Compacting Concrete With Various Types of Recycled Aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00678. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00678>.
- Grdic, Z.J., Toplicic-Curcic, G.A., Despotovic, I.M., & Ristic, N.S. (2010). Properties of Self compacting Concrete Prepared with Coarse Recycled Concrete Aggregate, *Constr. Build. Mater.* 24 (7), 1129–1133. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.029>.
- Guo, H., Shi, C., Guan, X., Zhu, J., Ding, Y., Ling, T.C., Zhang, H., & Wang, Y., (2018). Durability of Recycled Aggregate Concrete E A Review. *Cement Concr. Compos.* 89, 251e259. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.008>.
- Güneyisi, E. Gesoğlu, M., Algin, Z., & Yazıcı, H. (2014). Effect of Surface Treatment Methods on the Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled Aggregates, *Constr. Build. Mater.* 64 172–183. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.090>.
- Hameed, M. M., AlOmar, M. K., Baniya, W. J., & AlSaadi, M. A. (2021). Prediction of High-Strength Concrete: High-Order Response Surface Methodology Modeling Approach. *Engineering with Computers*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s42107-021-00362-3>.
- Haque, M., Ray, S., Mita, A. F., Bhattacharjee, S., & Shams, M. J. B. (2021). Prediction and Optimization of the Fresh and Hardened Properties of Concrete Containing Rice Husk Ash and Glass Fiber Using Response Surface Methodology. *Case Studies in Construction Materials*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00505>.

- Khargotra, R., Kumar, R., András, K., Fekete, G., & Singh, T. (2022). Thermo-Hydraulic Characterization and Design Optimization of Delta-Shaped Obstacles in Solar Water Heating System Using CRITIC-COPRAS approach. *Energy*, 261, 125236. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125236>.
- Kou, S.C., & Poon, C.S. (2009). Properties of Self-Compacting Concrete Prepared with Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregates, *Cem. Concr. Compos.* 31, 622–627. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.06.005>.
- Mo, K. H., Ling, T. C., & Cheng, Q. (2021). Examining the Influence of Recycled Concrete Aggregate on the Hardened Properties of Self-Compacting Concrete. *Waste and Biomass Valorization*, 12, 1133-1141. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01045-x>.
- Montgomery, D. C. (2017). Design and analysis of experiments. John Wiley & sons.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. John Wiley & Sons.
- Nambiar, E.K.K., & Ramamurthy, K. (2006). Models Relating Mixture Composition to The Density and Strength of Foam Concrete Using Response Surface Methodology, *Cement and Concrete Composites* 28, 752–760. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.06.001>.
- P.O. Modani, V.M. Mohitkar, (2014). Self-Compacting Concrete with Recycled Aggregate: a Solution for Sustainable Development, *Int. J. Civil. Struct. Eng.* 4 (3) 430–440. <http://dx.doi.org/10.6088/ijcser.201304010041>.
- Pereira-de-Oliveira, L.A., Nepomuceno, M.C.S., Castro-Gomes, J.P., & Vila, M.F.C. (2014). Permeability Properties of Self-Compacting Concrete with Coarse Recycled Aggregates, *Constr. Build. Mater.* 51, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.061>.
- Sasanipour, H., & Aslani, F. (2020). Durability Properties Evaluation of Self-Compacting Concrete Prepared with Waste Fine and Coarse Recycled Concrete Aggregates. *Construction and Building Materials*, 236, 117540. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117540>.
- Siamardi, K. (2022). Optimization of Fresh and Hardened Properties of Structural Light Weight Self-Compacting Concrete Mix Design Using Response Surface Methodology. *Construction and Building Materials*, 317, 125928. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125928>.
- Silva, R.V., De Brito, J., & Dhir, R.K., (2015). The Influence of The Use of Recycled Aggregates on the Compressive Strength of Concrete: a review. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 19 (7), 825e849. <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.974831>.
- Silva, R.V., de Brito, J., & Dhir, R.K., 2018. Fresh-State Performance of Recycled Aggregate Concrete: A Review. *Construct. Build. Mater.* 178, 19e31. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.149>.
- Şimşek, B., İç, Y. T., & Şimşek, E. H. (2013). A TOPSIS-Based Taguchi Optimization to Determine Optimal Mixture Proportions of The High Strength Self-Compacting Concrete. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 125, 18-32. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2013.03.012>.
- Yan, S., Lin, H.-C., & Liu, Y.C. (2011). Optimal schedule adjustments for supplying ready mixed concrete following incidents, *Automation in Construction* 20, 1041–1050. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.04.005>.