



# GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ATIK TUĞLA TOZU İÇEREN ÇİMENTO HARÇLARININ BASINÇ DAYANIMININ TEPKİ YÜZEYİ METODOLOJİSİ KULLANILARAK TASARIM OPTİMİZASYONU VE İSTATİSTİKSEL MODELLEMESİ

Yusuf Tahir ALTUNCI<sup>\*1</sup>, Şükrü ÖZKAN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Isparta

## Makale Bilgisi

Geliş tarihi: 16.09.2023

Kabul Tarihi: 05.10.2023

Yayın tarihi: 29.12.2023

## ÖZET

Tuğla tozu pozolanik özellik gösteren atık bir malzemedir. Bu atık malzemenin çevre kirliliğine neden olmadan geri kazanımı önem arz etmektedir. Bu çalışmada atık tuğla tozunun çimento içerisinde kullanılabilirliğinin 28 günlük basınç dayanımı performansı açısından değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla atık tuğla tozu (ATT), TS EN 197-1 standardına uygun olarak ağırlıkça %0, %2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarında Portland çimento (CEM I 52.5 N) yerine ikame edilmiş ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlara dayalı olarak ATT ikameli çimento harcının 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarını istatistiksel model yardımıyla tahmin etmek amacıyla yanıt yüzey metodolojisi (YYM) analizi yapılmıştır. Sonuçlar, pozolanik katkının (ATT) artmasının, 7 ve 28 günde (kısa ve orta vadede) mekanik dayanımda azalmaya neden olduğunu göstermiştir. %95'lik bir güven seviyesinde, birden fazla faktörün hedef yanıt üzerindeki etkisi, varyans analiz (ANOVA) sonuçlarının istatistiksel analizi kullanılarak incelenmiştir. 0,99 olarak elde edilen belirleme katsayısı ( $R^2$ ) değeri, önerilen modelin güvenilirliğini ve performansını göstermektedir. Optimizasyon sonucunda basınç dayanımı için optimal yanıt değeri, 60.57 MPa ve istenirlik değeri 1 olarak bulunmuştur. Bu çalışmada, YYM kullanılarak yapılan optimizasyonun çimentoların karma tasarımı için etkili bir yaklaşım olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler;

Atık, basınç dayanımı, optimizasyon, tuğla tozu, yanıt yüzey metodolojisi (YYM)

## DESIGN OPTIMIZATION AND STATISTICAL MODELING OF COMPRESSIVE STRTENGTH OF CEMENT MORTARS CONTAINING RECYCLED WASTE BRICK DUST USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

## Article Info

Received: 16.09.2023

Accepted: 05.10.2023

Published: 29.12.2023

## ABSTRACT

Brick dust is a waste material with pozzolanic nature. It is important to recycle this waste material without causing environmental pollution. In this study, it was aimed to evaluate the usability of waste brick dust (WBD) in cement in terms of 7 and 28-day compressive strength performance. For this purpose, WBD was added as a replacement for Portland cement (CEM I 52.5 N) in amounts of 0%, 2.5%, 5%, 7.5% and 10% by weight in accordance with TS EN 197-1 and compressive strength test was conducted. Based on the experimental results, surface response methodology (RSM) analysis was performed in order to estimate the 7 and 28-day compressive strengths of WBD-substituted cement mortar with the help of statistical model. The results showed that increasing the pozzolanic additive (WBD) caused a decrease in mechanical strength at 7 and 28 days (short and medium term). At a 95 % level of confidence, the effect of multiple factors on the target response was studied using statistical analysis of analysis of variance (ANOVA) results. The coefficient of determination ( $R^2$ ) value obtained as 0.99 show the reliability and performance of the proposed model. As a

result of optimization, the optimal response value for compressive strength was found to be 60.57 MPa and the desirability value was found to be 1. In this study, it was concluded that the optimization performed using RSM is an effective approach for the mixed design of cements.

Keywords;

Waste, compressive strength, optimization, brick dust, response surface methodology (RSM)

## 1. Giriş

Tuğlanın üretim aşamaları sırasıyla; hammaddelerin hazırlanması, şekil verme, kurutma, pişirme ve depolama süreci şeklindedir. Tuğlanın üretimi aşamasında ve üretimden sonra kusurlu olan tuğlaların kırılıp, öğütülmesi sonucunda tuğla tozu elde edilir. Elde edilen toz atık bir malzemedir. Bu atık malzemenin puzolanik özellik göstermesi, araştırmacıları tuğla tozunu çimento ve beton ikame malzemesi olarak (Li vd., 2020; Binici vd., 2012; Arif vd., 2021; Tremiño vd., 2021; Shao vd., 2019; Zhao vd., 2020; Ouyang vd., 2021; Ma vd., 2020) kullanmaya yönlendirmiştir. Bununla birlikte horasan harcı üretiminde tuğla tozunun bağlayıcılık özelliğinden yararlanıldığı bilinmektedir (Çüçen ve Altuncu 2023).

Tuğla tozunda mevcut olan  $Al_2O_3$  ve  $SiO_2$  içeriği C-S-H oluşumunu teşvik ederek, betonun uzun vadeli mukavemetini artırır (Ma vd., 2020). Ayrıca tuğla tozunun yapısı, gözenekleri doldurarak mukavemet artışı oluşturabilir (Ouyang vd., 2021). YYM tekniği, etkili parametrelerin arzu edilen yanıt değişkenleri üzerindeki etkileşimlerini ve etkilerini araştırmak için yararlı bir yöntemdir (Azizpour ve Qaderi 2020). Bu istatistiksel ve hesaplamalı yöntem, bağımsız değişkenler ile yanıt değişkenleri arasındaki ilişkiyi en düşük deneysel verilerle tanımlamak için bir regresyon matematiksel denklemi oluşturur. Ayrıca arzu edilebilirlik fonksiyonu yöntemi, tüm optimizasyon hedeflerini tek bir amaç fonksiyonu üretmek üzere birleştirdiğinden çok amaçlı optimizasyon problemlerini çözmek için kullanışlı bir yöntemdir (Amiri vd., 2022).

Literatürde farklı çimento harçlarının ve farklı beton uygulamalarının YYM tabanlı modellendiği çalışmalar mevcuttur (Ho vd., 2022; Koksall vd., 2021; Habibi vd., 2021; Nematzadeh vd., 2020; Hou vd., 2020; Arjomandi vd., 2023; Hammoudi vd., 2019; Bheel vd., 2023; Sabour vd., 2019; Habibi vd., 2021; Waqar vd., 2023; Shi vd., 2022).

Bu bağlamda çalışmamızda; ATT belirli oranlarda çimentoya ikame edilmek suretiyle çimento harçları

hazırlanarak basınç dayanımları belirlenmiş ve bağımsız değişkenlerin tepki değişkeni üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. YYM tekniğini kullanarak beton basınç dayanımını tahmin etmek için regresyon denklemi elde edilmiştir. Son olarak, arzu edilebilirlik fonksiyonu yöntemi kullanılarak farklı optimizasyon kriterleri için çok amaçlı optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

## 2. Materyal – Metot

### 2.1. Materyal

Çalışmada karışım malzemesi olarak;  $3.13 \text{ g/cm}^3$  özgül ağırlığındaki CEM I 52.5 N tipi çimento, 0-2 mm elek aralığında elenen  $2.77 \text{ g/cm}^3$  özgül ağırlığındaki tuğla tozu (TT), CEN standart kum ve karışım suyu kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri Tablo 1’de sunulmuştur.

**Tablo 1.** Malzemelerin kimyasal özellikleri

Kimyasal bileşen	CEM I 52.5 N (%)	Tuğla tozu (%)
$SiO_2$	19.02	53.02
$Al_2O_3$	4.99	14.48
$Fe_2O_3$	3.18	10.47
CaO	63.01	9.06
MgO	1.44	6.69
$SO_3$	2.45	0.32
$Na_2O$	0.16	2.68
$K_2O$	0.71	1.25

### 2.2. Metot

Üretilen çimento harçlarının kodları ve karışıma giren malzeme miktarları Tablo 2’de verilmiştir

**Tablo 2.** Malzeme miktarları ve notasyon

Notasyon	Su (g)	Çimento (g)	Tuğla tozu (g)	Standart kum (g)
<b>M0</b>		450.00	-	
<b>TT2.5</b>		438.75	11.25	
<b>TT5</b>	225.00	427.50	22.50	1350.00
<b>TT7.5</b>		416.25	33.75	
<b>TT10</b>		405.00	45.00	

M0 notasyonu referans örneği, TT2.5 notasyonu %2.5 ATT ikameli örneği, TT5 notasyonu %5 ATT ikameli örneği, TT7.5 notasyonu %7.5 ATT ikameli örneği ve TT10 notasyonu ise %10 ATT ikameli çimento harcı örneğini ifade etmektedir. Deney numunelerinin basınç dayanımlarını belirlemek için TS EN 196-1 (TS EN 196-1 2016) standardına uygun olarak 40×40×160mm boyutlarında dikdörtgen prizmalar üretilmiştir. Üretilen numuneler üretimden 24 saat sonra kür havuzuna konularak, 28. günün sonunda basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur.

### 2.2.1. YYM modelinin tasarım ve parametreleri

YYM, girdi parametreleri-yanıt ilişkilerini belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Oluşturulan model ayrıca bireysel parametre etkilerini ve yanıt değişkenleri üzerindeki parametre etkileşimlerini incelemek için de kullanılabilir (Abdellatif vd., 2023; Arsenovic vd., 2015; Mohammed, vd., 2019). Bir YYM modelinin geliştirilmesi için üç adım gerekmektedir: i) ilgilenilen yanıtla ilişkin deneysel verilerin toplanması; ii) bir YYM modeli oluşturmak ve doğruluğunu doğrulamak ve iii) istenen yanıt değişkenlerini karşılamak için parametrelerin optimize edilmesi (Adamu vd., 2022).

Bu deney için tanımlanan değişkenler ve bunların kontrol seviyeleri Tablo 3'te gösterilmektedir. Değişkenler Cem I 52.5 Portland çimentosu, ATT ve hidrasyon süresi olarak belirlenmiştir. Bu değişkenlerin seçiminde, çimentonun mekanik ve dayanıklılık performansını bozmadan ATT'nin güvenli bir şekilde bertaraf edilmesine ek olarak çevresel etkiyi ve maliyeti azaltma düşünceleri etkili olmuştur. Nispeten düşük deney sayısı ve son derece önemli olan model tahminindeki daha yüksek doğruluğu nedeniyle yaygın olarak kullanıldığı için yanıt yüzeyi tasarımı olarak merkezi kompozit tasarım (MKT) seçilmiştir (Nusrat Aman vd., 2023; Singh Pali vd., 2023; Witek-Krowiak vd., 2014). YYM analizi ve optimizasyonu, Minitab 21 versiyonu istatistiksel program ile gerçekleştirilmiştir. MKT, iki dereceli faktöriyel tasarım 2n'den oluşmakta, birinci dereceden ve ikinci derece modellerin uydurulmasına uygundur.

**Tablo 3.** YYM parametreleri

Faktörler	Birimler	MKT tabanlı YYM'de deneysel seviyeler	
		Düşük seviye (-1)	Yüksek seviye(+1)
A: Çimento içeriği	g	405	450
B: ATT içeriği	g	0	45
C: Kür süresi	gün	7	28

## 3. Araştırma Bulguları

### 3.1. Yanıt sonuçları

Model geliştirmek için kullanılan 20 tuğla karışımının oranları ve test sonuçları Tablo 4'te gösterilmiştir. ATT ile PÇ 52.5'in değişik oranlarda ikamesi ile üretilen karışımların 28 günlük basınç dayanımları, genellikle 46.17 ila 50.74 MPa arasında değişmiştir. Yanıtların maksimum ve minimum değerleri arasındaki yayılmanın geniş olmasında değişken sayısının fazla olması etkili olmuştur. Kontrol karışımının (M0) 28 günlük basınç dayanımının ortalama 54.37 MPa'ya ulaştığı Tablo 4'ten açıkça görülebilmektedir. Sonuçlar, %5'e kadar ATT içererek hazırlanan tüm karışımların 28 günlük kürelemede 50.00 MPa'dan daha yüksek bir basınç dayanımına sahip olduğunu göstermektedir. Ancak ikame oranının yüksek olduğu %10 ATT içeren karışımların ortalama basınç dayanımı kontrol karışımına göre %19.32 oranında düşmüştür. Sonuç olarak, kabul edilebilir basınç dayanımına (52.5 MPa) yaklaşık ve yüksek ATT değişimiyle en iyi sonuçları elde etmek için, karışımların %2.5 oranında ATT içermesi gerekmektedir. Bu durumda karışımlarda sadece 0.975 g çimento kullanılmış olup bu da şüphesiz üretilen katkılı çimentoların toplam maliyetini düşürecektir.

**Tablo 4.** Yanıt değişkenine ait deneysel sonuçlar

Girdiler		Çıktı			
Test sıra No	Karışım Kodu	Çimento	AOT	Hidratasyon süresi	Basınç Dayanımı (MPa)
		G	Gün		
1	M0 (Ref.)	450.00	0	7	39.70
2		450.00	0	7	39.00
3		450.00	0	28	54.91
4		450.00	0	28	53.83
5	TT2.5	438.75	11.25	7	38.16
6		438.75	11.25	7	38.16
7		438.75	11.25	28	50.74
8	TT5	438.75	11.25	28	51.02
9		427.50	22.50	7	36.50
10		427.50	22.50	7	36.13
11		427.50	22.50	28	51.80
12	TT7.5	427.50	22.50	28	51.00
13		416.25	33.75	7	36.50
14		416.25	33.75	7	36.18
15		416.25	33.75	28	46.17
16	TT10	416.25	33.75	28	47.45
17		405.00	45.00	7	36.52
18		405.00	45.00	7	36.45
19		405.00	45.00	28	44.15
20		405.00	45.00	28	43.58

### 3.2. Yanıt yüzeyi modellerinin ve ANOVA'nın geliştirilmesi

ATT ikameli çimentoların basınç dayanımını değerlendirmek ANOVA yapılmıştır. ANOVA'nın amacı, basınç dayanımını etkileyen en önemli faktörleri belirlemek ve girdi değişkenleri arasındaki etkileşimleri analiz etmektir. ANOVA'dan elde edilen sonuçlar, ana etkilerin derecelendirilmesine ve basınç dayanımını etkileyen en önemli değişkenlerin belirlenmesine yardımcı olmuştur. Bu bilgi, basınç dayanımının optimize edilmesinde ve üretilen çimentoların performansının iyileştirilmesinde çok önemli olmuştur. Çoklu regresyon analizi, YYM modeli kullanılarak deneysel veri seti üzerinde gerçekleştirilmiştir. MKT yöntemine dayalı olarak tahmin edilen modelin ANOVA sonuçları Tablo 5'te sunulmuştur.

**Tablo 5.** ANOVA analiz sonuçları

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	4	1067.50	266.876	428.26	0.000
Doğrusal	2	1059.61	529.807	850.19	0.000
CEM I 52.5 (g)	1	127.59	127.592	204.75	0.000
Hidratasyon süresi (gün)	1	932.02	932.022	1495.62	0.000
Faktör kareleri	1	2.04	2.037	3.27	0.091
CEM I 52.5 (g)*CEM I 52.5 (g)	1	2.04	2.037	3.27	0.091
2-Yönlü etkileşim	1	5.85	5.852	9.39	0.008
CEM I 52.5 (g)*Hidratasyon süresi (gün)	1	5.85	5.852	9.39	0.008
Hata	15	9.35	0.623		
Uyum eksikliği	5	7.63	1.527	8.91	0.002
Saf hata	10	1.71	0.171		
Toplam	19	1076.85			

<sup>1</sup>DF: serbestlik dereceleri; <sup>2</sup>SS: karelerin toplamı; <sup>3</sup>MS: ortalama kareler; <sup>4</sup>F-Değeri: ortalama kareler işleme/ortalama kareler hatası; <sup>5</sup>P-Değeri: varsayım altında olasılık.

0.05 anlamlılık düzeyinde yapılan analiz çalışması, karelerin toplamını (SS), F değerini ve *p* değeri ile ilgili verileri sunmaktadır. Her faktörün önemi, ölçü olarak 0,05 ve 0,01'lik *p* değerleri kullanılarak değerlendirilir. Bu, tahmin edilen ve gerçek değerler arasında kabul edilebilir bir eşleşme olup olmadığını gösterir (Haque vd., 2021; Khodaii vd., 2012). Çalışmanın ANOVA sonuçları 0.05 anlamlılık düzeyinde hesaplanan karelerin toplamını, serbestlik derecelerini, ortalama, F değeri ve *p* değeri gibi bilgileri içermektedir. *p* değeri 0.05'i aşarsa modelin anlamsız olduğu kabul edilir. Tablodan elde edilen sonuçlar, yüksek F değeri (428.26) ve düşük *p* değeri (<0,05) ile kanıtlandığı üzere, basınç dayanımı modelinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Çimento (A) ve hidratasyon süresi (C) değişkenlerinin yanı sıra bunların etkileşimi (A\*C), sırasıyla 0,000, 0,000 ve 0,008 *p* değerleriyle basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur. Bununla birlikte, modeldeki *p*-değeri > 0.05 olduğundan model için bazı anlamsız terimler (ATT; ATT\*ATT; Hidratasyon süresi\*Hidratasyon süresi; Çimento\*ATT; ATT\*Hidratasyon süresi) önerilen model yeterliliğini artırmak için kaldırılmıştır. Modelin etkinliği ve geçerliliği, uyum eksikliğine ve F değerlerine bağlı olarak daha fazla test edilebilmektedir. Uyum eksikliği, uyarlanmış modelin yakınındaki veri değişimini göstermektedir (Nassar vd., 2016). *p* değerleri > 0.005 ise ve kabul edilebilir sonuçlardan daha büyük olduğu ortaya çıkarsa, uyum eksikliği önemsizdir şeklinde yorum yapılabilir.

Yanıt için kodlanmış faktörler açısından geliştirilen nihai matematiksel model Denklem 1'de

gösterilmiştir. Bu denklemden ve Tablo 5'ten YYM tarafından geliştirilen modelin ikinci dereceden olduğu belirtilebilir. Her faktör için tam kuadratik model (ikinci dereceden polinom) geliştirilmiş ve parametrelerin katsayıları regresyon denklemi ile verilmiştir. YYM değerlendirmesi, ampirik bulguların ikinci dereceden modellere çok uygun olduğunu göstermiştir.

$$\text{Basınç dayanımı (Mpa)} = -280 + 1,390 A - 0,734 C - 0,001507 A + 0,00324 A * C \quad (1)$$

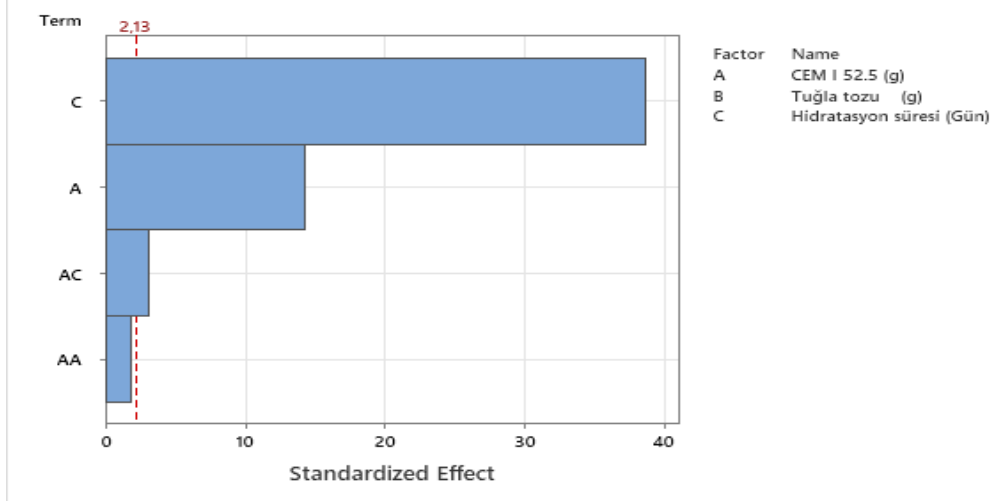
Burada; A: CEM I 52.5 çimentosunu, C ise hidratasyon süresini ifade etmektedir.

Tablo 6'da  $R^2$ , ayarlanmış  $R^2$  ve tahmin edilen  $R^2$  değerleri sunulmuştur. Basınç dayanımı analizi için 0,9913'lük  $R^2$  değeri, bağımsız değişkenler ile yanıt arasındaki ilişkinin güçlü bir açıklamasını gösterdiğinden olumlu bir sonuca işaret etmektedir.

Üstelik tahmin edilen 0,9830'luk  $R^2$  değeri, 0,9890'luk ayarlanmış  $R^2$  ile makul bir uyum göstermektedir.

**Tablo 6.** Model özet istatistikleri

Yanıt	Standart sapma	$R^2$ (%)	Ayarlanmış $R^2$ (%)	Tahmin edilen $R^2$ (%)	Ayarlanmış $R^2$ ve tahmin edilen $R^2$ arasındaki fark (%)	$p$ -değeri
28 günlük basınç dayanımı (MPa)	0.789409	99.13	98.90	98.30	0.60	0.000



**Şekil 1.** Basınç dayanımı için Pareto şeması

### 3.3. Standart basınç dayanımı etkileri için Pareto şeması

Şekil 1'deki Pareto şeması, iki değişkeni (Çimento ve hidratasyon süresi) analiz ederek basınç dayanımının standartlaştırılmış etkisini göstermektedir. Grafik, çimentoların basınç dayanımını etkileyen en etkili faktörlere ilişkin bilgiler sağlamakla birlikte buradan elde edilen veriler daha fazla araştırma ve iyileştirme için bir rehber olarak kullanılabilir. Özellikle grafikteki çubukların referans çizgisiyle 2.13 noktasında kesişmesi, modelin kayda değer ve istatistiksel açıdan anlamlı sonuçlarını göstermektedir. Çimento numunelerin basınç dayanımını etkileyen değişkenlerin değerlendirilmesi faktöriyel bir model

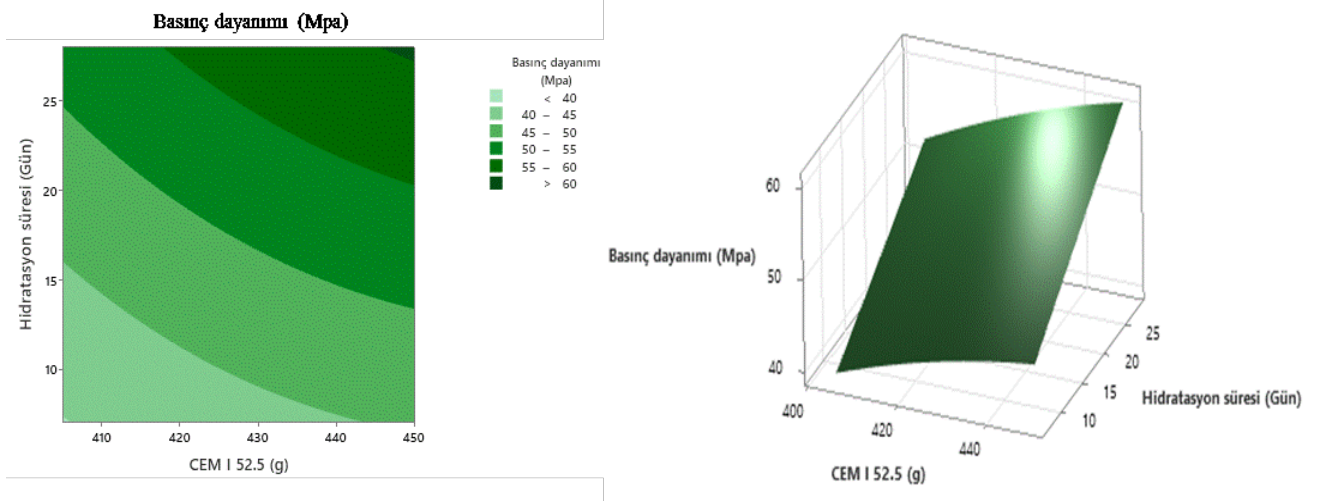
kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Varyans analizinin sonuçları, çimento (A) ve hidratasyon süresi (C) olmak üzere iki ana değişkenin ve bunların etkileşiminin basınç dayanımı üzerinde doğrudan etkiye sahip olduğunu göstermektedir ( $p$ -değeri  $<0,05$ ) (Şekil 1). Bununla birlikte, çimento değişkenin karesel etkileşiminin etki derecesi küçük olmuştur.

### 3.4. Çimento harçların basınç dayanımı için tepki yüzeyi ve kontur grafikleri

Basınç dayanımı için hidratasyon süresi ve çimento değişkenlerinin 2B ve 3B yüzey grafikleri Şekil 2'de sunulmuştur. Bu tepki grafikleri çimento ve hidratasyon faktörlerinin basınç dayanımı değerleri

(tepki değişkeni) üzerindeki etkisini ve etkileşimini açıklamaktadır. Çimentoların yüksek basınç dayanımı değerleri koyu yeşil renkle gösterilmiştir. Bununla birlikte, renk değişiminin koyudan açık renge doğru değişmesi sırasıyla basınç dayanımlarının minimum ve orta değerlerini göstermektedir. Optimum tepki, kontur çizgisi grafiğinde 50-60 MPa'lık basınç dayanımı değerleriyle sınırlanan koyu yeşil bölgede görülebilir. Tasarlanan karışımlar için çimento miktarı ve hidrasyon süresi arttıkça basınç dayanımı değerleri önemli ölçüde artmıştır. Çimentodaki mukavemet gelişimi esas olarak çimentonun hidrasyon hızına bağlıyken, çimento-puzolanik maddeli sistemlerinde çimento

hidratasyonu ile puzolanik maddelerin puzolanik aktivitesinin kombinasyonuna bağlıdır (Kocak, vd., 2013). Literatüre göre katkılı çimentolarda mukavemet gelişimini etkileyen başlıca faktörler; dolgu etkisi, seyreltme etkisi ve eklenen malzemelerin CH ile puzolanik reaksiyonudur (Badogiannis vd., 2005; Kocak vd., 2013; Perraki vd., 2010). Puzolanik katkının (atık tuğla) artması, 7 ve 28 günde (kısa ve orta vadede) mekanik dayanımda azalmaya neden olmuştur. Böylece kısa ve orta vadedeki dayanımlardaki zayıflık, ilerleyen hidrasyon sürelerinde atık tuğlanın puzolanik aktivitesi ile telafi edilebilir (Naceri ve Hamina 2009).



Şekil 2. Çimento dozajı ve hidrasyon süresinin basınç dayanımına etkisi.

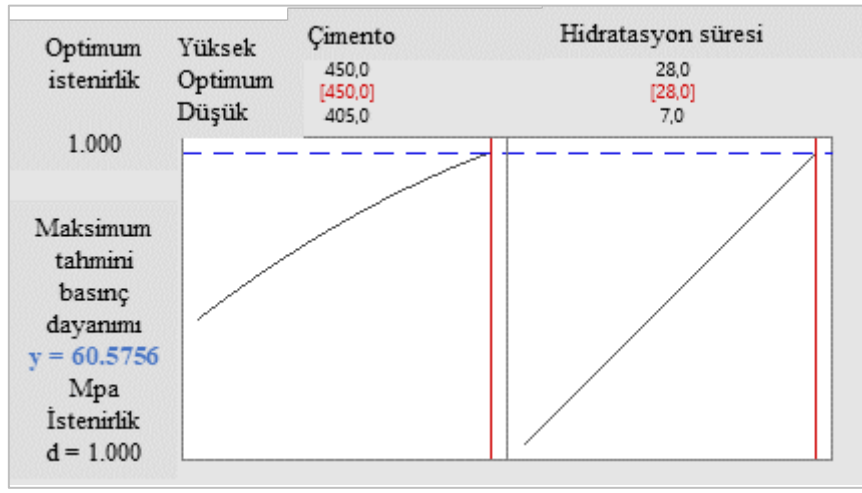
### 3.5. Optimizasyon

YYM kullanarak yanıt modellerinin geliştirilmesindeki sorunlardan biri, istenen sonuca ulaşmak için her bir değişkene hangi değerlerin atanacağını bulmaktır. Sonuç olarak modelin bağımsız değişkeninin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyonda amaç fonksiyonu, değişkenler için bu değişkenlerin göreceli önemi de dahil olmak üzere hedeflerin belirlenmesidir. Faktöriyel seviyeleri optimize etmekle ilgili yanıtta özel bir hedef verilmiştir. 0 ile 1 arasında optimal bir değer elde etmek için aynı prosedür kullanılmıştır. İstenilirlik değeri 1'e yaklaştıkça yanıt amaç fonksiyonu daha iyi sonuçlar üretir ve optimize edilen sonuçlar bağımlı değişkenin belirlenmesinde daha önemli hale gelir. Tablo 7'de çok amaçlı kriter optimizasyonunun hedefi, ağırlığı ve önemi gösterilmektedir.

Tablo 7. Çok amaçlı kriter optimizasyonu için hedef, ağırlık ve önem faktörü

Yanıt	Amaç	En düşük	Hedef	En yüksek	Ağırlık	Önem
Basınç dayanımı (MPa)	Maksimum	40.05	60.16		1	1

Basınç dayanımı için gerçekleştirilen optimizasyonun amacı, çimentonun yüksek maliyeti ve çevreye olan zararlı etkileri nedeniyle çimento miktarı minimumda ve hidrasyon süresi maksimumda tutularak yanıtı en üst düzeye çıkarmaktır. Şekil 3 ve Tablo 8, yüksek, düşük ve optimal seviyelere sahip çok amaçlı optimizasyon sonuçlarını göstermektedir.



**Şekil 3.** Yanıtların hedef değerlerine ulaşmak için optimum değişken içeriği.

Çok amaçlı optimizasyon sonucuna göre, yazılım tarafında belirlenen arzu edilen hedef plan 60.16 MPa'lık basınç dayanımı elde etmek için optimum karışım oranınının 450 g çimento ve 28 günlük kür süresinin kombinasyonu ile elde edildiğini göstermiştir. Gerekli hedefler için istenirlik değeri  $d=1$  (%100)'dir. Elde edilen bu istenirlik değeri sonuçların son derece uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Beklenen %95'lik bir CI aralığına sahip optimum seviye hesaplanmış ve Tablo 8'de tablo haline getirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, deneyin doğrulandığı ve optimizasyon sonucu elde edilen değerlerin tahmin edilen aralık dahilinde olduğu tespit edilmiştir.

**Tablo 8.** Optimizasyon sonucu elde edilen çözüm sonuçları

Çözüm	Çimento (g)	Hidratasyon Süresi (gün)	Basınç dayanımı (MPa)	Kompozit istenirliği
1	410.455	90	11.2328	0.852243
Yanıt	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Basınç dayanımı (MPa)	60.576	0.481	(59.550; 61.601)	(58.605; 62.546)

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada ATT çimentolu sistemlerde ikame malzeme olarak kullanılmış ve çimentoya belirli oranlarda ikame edilerek eklenmiştir. YYM, hesaplamalı ve istatistiksel modellere dayalı olarak çimentonun optimal karışım oranını elde ederek istenen niteliklerini tahmin etmek için kullanılmıştır. ANOVA istatistikleri, bireysel faktörlerin yanıt üzerindeki etkisini incelemek için kullanılır. Bu çalışmadan aşağıdaki ana sonuçlar elde edilmiştir:

- $p$  değeri metriğine dayanan önerilen tahmin modelinin, ATT ikameli çimentoların incelenen basınç dayanımı mekanik özelliğini tahmin etmede istatistiksel olarak anlamlı ve yararlı olduğu bulunmuştur. Yanıt için istatistiksel sonuçlar, aralık dâhilinde ve tatmin edici olarak bulunmuştur.
- 7 ve 28 günlük basınç dayanımı model faktörünün R-kare değeri 0.9913 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuç, bağımsız değişkenler ile yanıt arasındaki ilişkinin güçlü bir açıklamasını gösterdiğinden önemlidir.
- Kürlemenin 7. ve 28. günlerinde basınç mukavemeti, 450 g'a kadar çimento içeriğinde optimum yanıtları göstermiştir.
- Hedef tepki bir matematiksel sistem geliştirilerek optimize edilmiş ve en iyi karışım olan 450 g çimento içeriği ile üretilen çimentoların 28 günlük hidratasyon süresine maruz bırakılması ile optimum basınç dayanımı değerleri elde edileceğini tespit edilmiştir. Ayrıca bu sonuç, YYM modeli temel alınarak deneysel olarak %5 hatayla doğrulanmıştır.
- Basınç dayanımı için optimal yanıt değeri, 60.57 MPa ve istenirlik değeri 1 yani %100'dür. Elde edilen bu istenirlik değeri sonuçların son derece uygulanabilir olduğunu göstermektedir.
- Bu çalışmada geliştirilen çimentolarda, atık yönetimi ve kaynak tükenmesi konularının

ele alınmasına yardımcı olabilecek ve uzun vadeli sürdürülebilirliğin sağlanmasına da katkıda bulunabilecek çimentolarda kısmi ATT kullanımının başarılı sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca, bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, ATT kullanımının geliştirilmiş dayanıklılık, daha iyi hizmet ömrü ve maliyet etkinliği açısından da ümit verici uygulamalara sahip olabileceği açıkça ortaya çıkmıştır.

## Kaynaklar

- Abdellatief, M., Walid, E.E., Hani, A., Ahmed M.T., 2023. Production and Optimization of Sustainable Cement Brick Incorporating Clay Brick Wastes Using Response Surface Method. *Ceramics International*, 49, (6), 9395–9411.
- Adamu, M., Haruna, S.I., Ibrahim, Y.E., Alanazi, H., 2022. Investigating the Properties of Roller-Compacted Rubberized Concrete Modified with Nanosilica Using Response Surface Methodology. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7, (1), 1–13.
- Amiri, H., Azadi, S., Karimaei, M., Sadeghi, H., Dabbaghi, F., 2022. Multi-Objective Optimization of Coal Waste Recycling in Concrete Using Response Surface Methodology. *Journal of Building Engineering*, 45, 103472.
- Arif, R., Khitab, A., Kırgız, M.S., Khan, B.R.N., Tayyab, S., Khan, R.A., Anwar, W., Arshad, M.T., 2021. Experimental Analysis on Partial Replacement of Cement with Brick Powder in Concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00749.
- Arjomandi, A., Mousavi, R., Tayebi, M., Nematzadeh, M., Gholampour, A., Aminian, A., Gencel, O., 2023. The Effect of Sulfuric Acid Attack on Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete Containing Waste Nylon Aggregates: Experiments and RSM-Based Optimization. *Journal of Building Engineering*, 64, 105500.
- Arsenovic, M., Radojević, Z., Jakšić, Ž., Pezo, L., 2015. Mathematical Approach to Application of Industrial Wastes in Clay Brick Production — Part II: Optimization. *Ceramics International*, 41, (3), 4899–4905.
- Azizpour, F., Qaderi, F., 2020. Optimization, Modeling and Uncertainty Investigation of Phenolic Wastewater Treatment by Photocatalytic Process in Cascade Reactor. *Environment, Development and Sustainability*, 22, (7), 6315–6342.
- Badogiannis, E., Kakali, G., Dimopoulou, G., Chaniotakis, E. Tsivilis, S., 2005. Metakaolin as a Main Cement Constituent. Exploitation of Poor Greek Kaolins. *Cement and Concrete Composites*, 27, (2), 197–203.
- Bheel, N., Ali, M.O.A., Shafiq, N., Almujiabah, H.R., Awoyera, P., Benjeddou, O., Shittu, A., Olalusi, O.B., 2023. Utilization of Millet Husk Ash as a Supplementary Cementitious Material in Eco-Friendly Concrete: RSM Modelling and Optimization. *Structures*, 49, 826–841.
- Binici, H., Kapur, S., Arocena, J., Kaplan, H., 2012. The Sulphate Resistance of Cements Containing Red Brick Dust and Ground Basaltic Pumice with Sub-Microscopic Evidence of Intra-Pore Gypsum and Ettringite as Strengtheners. *Cement and Concrete Composites*, 34, (2), 279–287.
- Çuçen, A., Altuncı, Y.T., 2023. Horasan Harcında Şeker Pancarı Posasının Lif Katkı Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14, (1), 85–95.
- Habibi, A., Ramezani-pour, A.M., Mahdikhani, M., 2021. RSM-Based Optimized Mix Design of Recycled Aggregate Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials Based on Waste Generation and Global Warming Potential. *Resources, Conservation and Recycling*, 167, 105420.
- Habibi, A., Ramezani-pour, A.M., Mahdikhani, M., Bamshad, O., 2021. RSM-Based Evaluation of Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete Containing GGBFS and Silica Fume. *Construction and Building Materials*, 270, 121431.
- Hammoudi, A., Moussaceb, K., Belebchouche, C., Dahmoune, F., 2019. Comparison of Artificial



- Neural Network (ANN) and Response Surface Methodology (RSM) Prediction in Compressive Strength of Recycled Concrete Aggregates. *Construction and Building Materials*, 209, 425–436.
- 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, e00505.
- Ho, C.M., Doh, S.I., Li, X., Chin, S.C., Ashraf, T., 2022. RSM-Based Modelling of Cement Mortar with Various Water to Cement Ratio and Steel Slag Content. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 128:103256.
- Hou, D., Chen, D., Wang, X., Wu, D., Ma, H., Hu, X., Zhang, Y., Wang, P., Yu, R., 2020. RSM-Based Modelling and Optimization of Magnesium Phosphate Cement-Based Rapid-Repair Materials. *Construction and Building Materials*, 263, 120190.
- Khodaii, A., Haghshenas, H.F., Tehrani, H.K., 2012. Effect of Grading and Lime Content on HMA Stripping Using Statistical Methodology. *Construction and Building Materials*, 34, 131–135.
- Kocak, Y., Tasci, E., Kaya, U., 2013. The Effect of Using Natural Zeolite on the Properties and Hydration Characteristics of Blended Cements. *Construction and Building Materials*, 47, 720–727.
- Koksal, F., Nazlı, T., Benli, A., Gencil, O., Kaplan, G., 2021. The Effects of Cement Type and Expanded Vermiculite Powder on the Thermo-Mechanical Characteristics and Durability of Lightweight Mortars at High Temperature and RSM Modelling. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00709.
- Li, L.G., Lin, Z.H., Chen, G.M., Kwan, A.K.H., 2020. Reutilizing Clay Brick Dust as Paste Substitution to Produce Environment-Friendly Durable Mortar. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122787.
- Ma, Z., Tang, Q., Wu, H., Xu, J., Liang, C., 2020. Mechanical Properties and Water Absorption of Cement Composites with Various Fineness and Contents of Waste Brick Powder from C&D Waste. *Cement and Concrete Composites*, 114, 103758.
- Mohammed, M.K., Al-Hadithi, A.I., Mohammed, M.H., 2019. Production and Optimization of Eco-Efficient Self Compacting Concrete SCC with Limestone and PET. *Construction and Building Materials*, 197, 734–746.
- Naceri, A., Hamina, M.C., 2009. Use of Waste Brick as a Partial Replacement of Cement in Mortar. *Waste Management*, 29, (8), 2378–2384.
- Nassar, A.I., Thom, N., Parry, T., 2016. Optimizing the Mix Design of Cold Bitumen Emulsion Mixtures Using Response Surface Methodology. *Construction and Building Materials*, 104, 216–229.
- Nematzadeh, M., Shahmansouri, A.A., Fakoor, M., 2020. Post-Fire Compressive Strength of Recycled PET Aggregate Concrete Reinforced with Steel Fibers: Optimization and Prediction via RSM and GEP. *Construction and Building Materials*, 252, 119057.
- Aman, A.M.N., Selvarajoo, A., Lau, T.L., Chen, W.H., 2023. Optimization via Response Surface Methodology of Palm Kernel Shell Biochar for Supplementary Cementitious Replacement. *Chemosphere*, 313, 137477.
- Ouyang, X., Wang, L., Fu, J., Xu, S., Ma, Y., 2021. Surface Properties of Clay Brick Powder and Its Influence on Hydration and Strength Development of Cement Paste. *Construction and Building Materials*, 300, 123958.
- Perraki, T., Kontori, E., Tsivilis, S., Kakali, G., 2010. The Effect of Zeolite on the Properties and Hydration of Blended Cements. *Cement and Concrete Composites*, 32, (2), 128–133.
- Sabour, M., Dezvareh, G., Bazzazzadeh, R., 2019. Corrosion Prediction Using the Weight Loss Model in the Sewer Pipes Made from Sulfur and Cement Concretes and Response Surface Methodology (RSM). *Construction and Building Materials*, 199, 40–49.
- Shao, J., Gao, J., Zhao, Y., Chen, X., 2019. Study on

the Pozzolanic Reaction of Clay Brick Powder in Blended Cement Pastes. *Construction and Building Materials*, 213, 209–215.

Shi, J., Zhao, L., Han, C., Han, H., 2022. The Effects of Silanized Rubber and Nano-SiO<sub>2</sub> on Microstructure and Frost Resistance Characteristics of Concrete Using Response Surface Methodology (RSM). *Construction and Building Materials*, 344, 128226.

Pali, H.S., Sharma, A., Kumar, M., Annakodi, V.A., Nguyen, V.N., Singh, N.K., Singh, Y., Balasubramanian, D., Deepanraj, B., Truong, T.H., Nguyen, P.Q.P., 2023. Enhancement of Combustion Characteristics of Waste Cooking Oil Biodiesel Using TiO<sub>2</sub> Nanofluid Blends through RSM. *Fuel*, 331, 125681.

Tremiño, R.M., Real-Herraiz, T., Letelier, V., Ortega, J.M., 2021. Four-Years Influence of Waste Brick Powder Addition in the Pore Structure and Several Durability-Related Parameters of Cement-Based Mortars. *Construction and Building Materials*, 306, 124839.

TS EN 196-1, 2016. Çimento Deneysel Metodları-Bölüm 1: Dayanım Tayini. Ankara.

Waqar, A., Bheel, N., Almujiyah, H.R., Benjeddou, O., Alwetaishi, M., Ahmad, M., Sabri, M.M.S., 2023. Effect of Coir Fibre Ash (CFA) on the Strengths, Modulus of Elasticity and Embodied Carbon of Concrete Using Response Surface Methodology (RSM) and Optimization. *Results in Engineering*, 17, 100883.

Witek-Krowiak, A., Chojnacka, K., Podstawczyk, D., Dawiec, A., Bubala, K., 2014. Application of Response Surface Methodology and Artificial Neural Network Methods in Modelling and Optimization of Biosorption Process. *Bioresource Technology*, 160, 150–160.

Zhao, Y., Gao, J., Liu, C., Chen, X., Xu, Z., 2020. The Particle-Size Effect of Waste Clay Brick Powder on Its Pozzolanic Activity and Properties of Blended Cement. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118521.