



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ


INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

ATIK OLİVİN TOZU İKAMESİ İLE ÜRETİLEN SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇİMENTONUN EĞİLME DAYANIMININ OPTİMİZASYONU: YANIT YÜZEYİ METODOLOJİSİNİN BİR UYGULAMASI

OPTIMIZATION OF THE FLEXURAL STRENGTH OF
SUSTAINABLE CEMENT PRODUCED BY WASTE OLIVINE
DUST SUBSTITUTION: AN APPLICATION OF THE RESPONSE
SURFACE METHODOLOGY

Yazarlar (Authors): Şükrü Özkan *

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Özkan Ş., “Atık Olivin Tozu İkamesi ile Üretilen Sürdürülebilir Çimentonun Eğilme Dayanımının Optimizasyonu: Yanıt Yüzeyi Metodolojisinin Bir Uygulaması” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(3): 388-402, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1332701

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

ATIK OLİVİN TOZU İKAMESİ İLE ÜRETİLEN SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇİMENTONUN EĞİLME DAYANIMININ OPTİMİZASYONU: YANIT YÜZEYİ METODOLOJİSİNİN BİR UYGULAMASI

Şükrü Özkan^a 

^aIsparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: sukruozkan@isparta.edu.tr

(Geliş/Received: 25.07.23; Düzeltme/Revised: 06.10.23; Kabul/Accepted: 17.10.23)

ÖZ

Çimentoda atık olivin tozu (AOT) ikamesi, kabul edilebilir mekanik özelliklere sahip çimento üretiminin yanı sıra maden atıklarının geri dönüşümü ve çevre sorunlarının azaltılması için de uygun bir alternatiftir. Bu araştırma, AOT ile üretilen çimento karışımlarının hem atık geri dönüşümü hem de yüksek eğilme dayanımı açısından optimum karışım oranını belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla, çimento ve AOT içeriği ile hidrasyon süresi olmak üzere üç bağımsız değişkenin, çimentoların eğilme dayanımı tepki değişkeni üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bağımsız ve yanıt değişkenleri ilişkisinin modellenmesi ve optimizasyon senaryosunun çok amaçlı optimizasyonu için yanıt yüzeyi metodolojisi (YYM) ve arzu edirlilik fonksiyonu yönteminin bir kombinasyonu uygulanmıştır. Sonuçlar, atık geri dönüşümü ve çimento üretimi açısından en iyi optimizasyon senaryosunun, AOT ve eğilme dayanımını en üst düzeye çıkarmak ve çimento miktarını en aza indirmek olduğunu göstermiştir. Bu senaryo için çimento içeriği ve hidrasyon süresinin optimum değerleri sırasıyla 410 kg/m³ ve 90 gün ve bu durumda çimento eğilme dayanımı ise yaklaşık 11.23 MPa olarak tespit edilmiştir. Sürdürülebilirliğe doğru bir adım olarak bu çalışmanın sonuçları, araştırmacılara hem atık geri dönüşümü hem de çimento üretimi açısından en verimli koşulu bulma konusunda yeni bilgiler sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Atık, Çimento, Sürdürülebilirlik, Olivin, Yanıt Yüzey Yöntemi.

OPTIMIZATION OF THE FLEXURAL STRENGTH OF SUSTAINABLE CEMENT PRODUCED BY WASTE OLIVINE DUST SUBSTITUTION: AN APPLICATION OF THE RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

ABSTRACT

The substitution of waste olivine dust (WOD) in cement is a suitable alternative for the production of cement with acceptable mechanical properties, as well as for the recycling of mining waste and the reduction of environmental problems. This study aims to determine the optimum mixture ratio in terms of both waste recycling and high flexural strength of cement mixtures produced with WOD. For this purpose, the effect of three independent variables, namely cement content, WOD content and hydration time, on the flexural strength response of cements was studied experimentally. A combination of response surface methodology (RSM) and desirability function method was applied for modeling the relationship between independent and response variables and multi-purpose optimization of the optimization scenario. The results showed that the best optimization scenario in terms of waste recycling and cement production is to maximize the WOD and flexural strength and minimize the amount of cement. For this scenario, the optimal values of cement content and hydration time were determined to be 410 kg/m³ and 90 days, respectively, and in this case, the cement flexural strength was determined as approximately 11.23 MPa. As a step towards sustainability, the results of this study provide new information to researchers about finding the most efficient condition in terms of waste recycling and cement production.

Keywords: Waste, Cement, Sustainability, Olivine, Response surface methodology.

1. GİRİŞ

Çimento yapılaşmanın en temel malzemesidir. Ancak bu temel malzemenin üretimi aşamasında açığa çıkan CO₂ gazı hava kirliliğine neden olmaktadır. Özellikle çimento üretimi sürecinde atmosfere yayılan CO₂ gazı salınımının %8 civarında olduğu tahmin edilmektedir [1]. Atmosfere yayılan CO₂ gazının bir kısmı harç ve betonun reaksiyon döngüsü sırasında oluşan karbonatlaşma adı verilen çok yavaş bir süreçte sönmülenir [2]. Diğer kısmı ise atmosfere yayılarak çevre kirliliğine neden olmaktadır. Çimento üretiminin çevresel etkisini azaltmak için alternatif arayışlar (alternatif hammadde, alternatif enerji vb.) ise halen devam etmektedir. Bu kapsamda termik santral atığı uçucu küllerin, demir çelik fabrikası atığı yüksek fırın cürufurularının ve ferro krom tesisi atığı olan silis dumanının çimento üretiminde kullanıldığı bilinmektedir. Bu atık malzemelerin yanında, özellikle yüksek sıcaklığa maruz bırakılmadan, doğadaki hali ile sadece elenip kullanılabilir ve puzolanik özellik gösterecek hammaddelere ihtiyaç vardır. Bu hammaddelerden; kalsit [3–9], andezit [10–11], zeolit [12–13, 14–22], bentonit [23–31], pomza [32–39], diatomit [25, 40–46], metakaolin [25–26, 47–53] gibi hammaddelerin çimento ikame malzemesi olarak kullanıldığı birçok çalışma bulunmaktadır.

Dünya üzerinde bol miktarda bulunan minerallerden biri olan olivin [54–55], çimento ikame malzemesi olarak kullanıldığı çalışmalar ise yok denecek kadar azdır. Olivin bünyesinde bulundurduğu demir (Fe) elementi oksidasyonu sayesinde, minerallerin yüzeyinde hematit tabakası oluşturarak karbonatlaşmayı yavaşlatır [56]. Gao ve ark. [57], alternatif silikat kaynağı olarak yeşil olivin nano-silikat kullanarak ticari su camının bu alternatif silikat kaynağı ile değiştirilmesinin, CO₂ emisyonunu %20,4 ile %29,0 arasında azalttığını tespit etmişlerdir. Lazaro ve ark. [58], olivin'in sülfürik asit içinde çözünmesiyle oluşan amorf gözenekli nano-silikayı sentezleyerek, proses koşullarının nano-silikanın özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Quercia ve ark. [59], olivin nano-silikanın petrol kuyusu çimentolu kompozitlerin mekanik özelliklerini hızlandırdığını ve arttırdığını gözlemlemişlerdir. Achang ve Radonjic [60], çimento içerisine olivin mikro partiküllerinin eklenmesi ile, atmosfere nihai CO₂ veya CH₄ emisyonunun azaltılmasına katkıda bulunacağını ve kuyu deliği çimentosu

sızmasının ve korozyonun direncini de artırılabilirliğini belirtmişlerdir. Shah ve Scott [54], çimento üretimi sırasında açığa çıkan karbondioksitin, olivin gibi magnezyum silikat minerallerinden geri kazanılan magnezyum hidroksit ile tutulması ve geri kazanılan silisin bağlayıcı malzeme olarak kullanılması ile karbondioksit emisyonunun azaltılmasına yardımcı olacağını tespit etmişlerdir.

Bu bağlamda, çalışmamızda; olivin madeni işleme endüstrisi atığı olan olivin atık (OA) tozunun, çimento ikame malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu kapsamda; Isparta/Türkiye bölgesinden temin edilen OA tozu, Türk standartlarına göre puzolanik çimento üretmek için CEM IV/B çimentosunun yerine ağırlıkça %5, 10, 15, 20, 25 ve 30 ikame edilmiştir. Üretilen katkılı çimentoların fiziko-mekanik özellikleri; standart kıvam, başlangıç ve bitiş priz süreleri, genleşme, 7 ve 28 günlük puzolanik aktivite endeksleri ve 7, 28 ve 90 günlük kür sonrası basınç dayanımları açısından incelenmiştir.

Yanıt yüzeyi metodolojisi (YYM) tekniği, etkili parametrelerin arzu edilen yanıt değişkenleri üzerindeki etkileşimlerini ve etkilerini araştırmak için yararlı bir yöntemdir [61–65]. Bu istatistiksel ve hesaplamalı yöntem, bağımsız ve yanıt değişkenleri arasındaki ilişkiyi en az deneysel verilerle açıklamak için bir regresyona dayalı matematiksel bir denklem kurmaktadır [66]. Ayrıca istenirlik fonksiyonu yöntemi, tek bir amaç fonksiyonu üretmek amacıyla tüm optimizasyon hedeflerini bir araya getirdiği için çok amaçlı optimizasyon problemlerini çözmekte kullanışlı bir yöntemdir. YYM ve istenirlik fonksiyonu yönteminin bir kombinasyonu, minimum deneysel veri toplama ihtiyacı ile istenen hedeflere ulaşmakta bağımsız değişkenlerin optimal değerlerini bulma imkânı sağlamaktadır [67–68].

Çimento üretiminde çevresel zararlı etkisini azaltmak için klinkerin yerine farklı atık malzemeler kullanılarak çimentonun mekanik özellikleri üzerine çeşitli çalışmalar yapılmış ve optimizasyon için farklı modern teknikler kullanılmıştır [69–71]. Katkılı çimento karışımlarında klinkerin AOT ile değiştirilmesiyle ilgili araştırma çalışmaları sınırlı sayıda olmasına rağmen [59], AOT içeren çimento karışımlarının istatistiksel modellemesi ve optimizasyonu yapılmamıştır. Mevcut araştırma verilerine dayanarak YYM,

seçilen faktörlere ve yanıtı göre bir tasarım matrisi oluşturularak çimento klinker yerine eklenecek optimum AOT miktarını bulmak için etkili bir araç olabilir.

AOT içeren çimento karışımlarının çok amaçlı optimizasyonunun önemi göz önüne alındığında, bu çalışma, maksimum eğilme dayanımı elde etmek için CEM IV/B çimentosunun bir kısmı yerine mümkün olan maksimum AOT içeren çimento karışımlarının optimum oranını belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla, bağımsız değişkenler olarak çimento ve AOT içeriği ile hidrasyon süresi parametreleri ve tepki değişkenleri olarak çimento eğilme dayanımı parametresi dikkate alınmıştır. Bu çalışmada, Isparta ilindeki olivin maden işleme tesisinin atık sahasından AOT hazırlanmış ve bağımsız değişkenlerin tepki değişkeni üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. YYM tekniği kullanılarak, çimento eğilme dayanımını tahmin etmek için regresyon denklemi sunulmuştur. Son olarak, istenirlik fonksiyonu yöntemi kullanılmasıyla optimizasyon senaryosuna dayalı olarak ortaya çıkan AOT maksimize ve çimento minimize edilerek eğilme dayanımlarının artırılmasını içeren optimizasyon kriterleri için çok amaçlı optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Çalışmanın ana malzemeleri; CEM IV/B 32.5 N puzolanik çimentosu, AOT, CEN standart kum ve sudur. Deneysel çalışmalarda TS EN 197-1 [72] standardına göre GÖLTAŞ çimento fabrikasında (Isparta-Türkiye) üretilen CEM IV/B 32.5 N çimento kullanılmıştır. Çimento ikame malzemesi olarak kullanılan AOT'ler Isparta bölgesinden temin edilmiştir. Harç numunelerinin üretiminde kullanılan standart kum TS EN 196-1'e [73] uygun olup, karışım suyu olarak kullanılan su ise şebeke suyudur. Çimento üretiminde kullanılan hammaddelere ait fiziksel ve kimyasal veriler belirlenmiş ve sırasıyla Çizelge 1 ve Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Hammaddelerin kimyasal özellikleri

| Bileşenler | Çimento | Olivin |
|------------------------------------|---------|--------|
| SiO ₂ (S) | 20.36 | 39.95 |
| Al ₂ O ₃ (A) | 4.6 | 0.50 |
| Fe ₂ O ₃ (F) | 2.56 | 7.00 |
| CaO | 62.57 | 0.05 |
| MgO | 1.53 | 48.00 |
| SO ₃ | 3.32 | - |
| Na ₂ O | 0.26 | - |
| K ₂ O | 0.66 | - |
| Cl ⁻ | 0.018 | - |
| Cr ₂ O ₃ | - | 0.3 |
| NiO | - | 0.3 |
| MnO | - | 0.10 |
| Kızdırma kaybı | 2.38 | 0.50 |
| Serbest CaO | 1.78 | - |
| S+A+F | - | 49.50 |

Çizelge 2. Hammaddelerin fiziksel özellikleri

| Malzemeler | Tane boyutu (elek üstü), % | Özgül ağırlık, g/cm ³ | Özgül yüzey (Blaine), cm ² /g |
|------------|----------------------------|----------------------------------|------------------------------------------|
| | >45 µm | >90 µm | |
| Çimento | 0.0 | 3.2 | 2.95 |
| Olivin | 0.0 | 0.1 | 3.30 |

2.2. Metot

OA ikameli çimento harç numunelerinin hazırlanmasında kullanılan AOT'ler herhangi bir öğütme işlemine tabi tutulmadan elenerek kullanılmıştır. Öncelikle karışımlara ait fiziksel özellikleri belirlemek amacıyla; TS EN 196-6 [74] standardına göre elek analizi, özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı (Blaine inceliği) deneyleri yapılmış ve kimyasal özellikler ise XRF cihazı kullanılarak belirlenmiştir. AOT'ler CEM IV/B 32.5 N tipi çimento yerine %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında ikame edilerek OA ikameli çimento harç karışımları hazırlanmıştır. AOT ikameli çimento harç numunelerinin kodları ve karışım bilgileri Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Harç numunelerinin kodları ve karışım bilgileri

| Karışım kodu | Su (g) | Çimento (g) | Olivin (g) | Standart kum (g) |
|--------------|--------|-------------|------------|------------------|
| AOT | | 450 | 0 | |
| AOT5 | | 427.5 | 22.5 | |
| AOT10 | | 405 | 45 | |
| AOT15 | 225 | 382.5 | 67.5 | 1350 |
| AOT20 | | 360 | 90 | |
| AOT25 | | 337.5 | 112.5 | |
| AOT30 | | 315 | 135 | |

Eğilme dayanımı deneyleri için, AOT ikameli çimento harç numuneleri TS EN 196-1 standardına göre 40x40x160 mm boyutlu kalıplara doldurulmuş ve 24 saat sonra kalıptan çıkartılarak kür havuzunda deney gününe kadar bekletilmiştir. Deney günü gelen sertleşmiş harç numunelerinin TS EN 196-1 standardına göre 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır [73].

2.3. YYM kullanarak deneysel tasarımın yapılması

YYM, denemeler tasarlamak ve çeşitli faktörler arasında bağlantılar kurmak için istenen sonuçları tahmin etmek üzere faktörleri optimize etmekte kullanılır [75]. Merkezi kompozit tasarımının (MKT) takip ettiği yirmi deneme çalışmasından oluşan bir kombinasyon oluşturuldu. MKT tekniği, girdi değişkenleri ve yanıtlar arasındaki fonksiyonel etkileşimi belirlemenin kısmi faktöriyel bir yoludur [76]. Deneysel tasarım kurulumu, hesaplamalı ve istatistiksel analiz için Minitab (21 versiyonu) yazılımı kullanılmıştır.

ANOVA sonuçları, çimento ve AOT içerikleri ve kür süreleri (7, 28 ve 90 gün) girdi faktörleri ile eğilme dayanımı yanıtı arasındaki ilişkileri araştırmak için kullanılmıştır. Bu parametrelerin dikkate alınmasının nedeni, çimento numunelerinin yapısal ve fonksiyonel özellikleri üzerindeki doğrudan ve dolaylı etkilerinin olmasıdır. Faktörler, sırasıyla "A", "B" ve "C" olarak adlandırılan çimento ve AOT'nin ağırlıkça miktarları (kg/m^3) ile kür süreleri olarak seçilmiştir. Her faktörün daha yüksek (+1) ve daha düşük (-1) seviyeleri Çizelge 4'te sunulmuştur.

Çizelge 4. MKT tabanlı YYM modelinde kullanılan girdi faktörleri ve seviyeleri

| Faktörler | Birimler | MKT tabanlı YYM'de deneysel seviyeler | |
|--------------------|----------|---------------------------------------|--------------------|
| | | Düşük seviye (-1) | Yüksek seviye (+1) |
| A: Çimento içeriği | kg | 315 | 450 |
| B: AOT içeriği | kg | 0 | 135 |
| C: Kür süresi | gün | 7 | 90 |

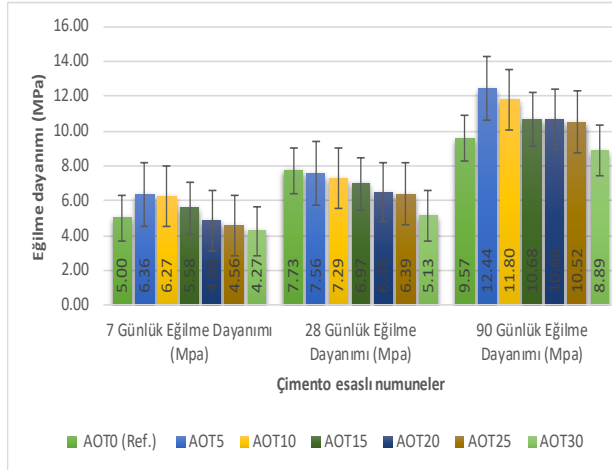
Çizelge 5. Karışımlar ve tepkinin (çıktının) deneysel sonuçları.

| Sıra | Karışım Kodu | Girdiler | | Hidrasyon süresi (gün) | Çıktı (Eğilme Dayanımı (Mpa)) |
|------|--------------|--------------|----------|------------------------|-------------------------------|
| | | Çimento (kg) | AOT (kg) | | |
| 1 | AOT0 | 450.00 | 0.00 | 28 | 7.73 |
| 2 | (Ref.) | 450.00 | 0.00 | 90 | 9.57 |
| 3 | AOT5 | 427.50 | 22.50 | 7 | 6.36 |
| 4 | | 427.50 | 22.50 | 28 | 7.56 |
| 5 | | 427.50 | 22.50 | 90 | 12.44 |
| 6 | AOT10 | 405.00 | 45.00 | 7 | 6.27 |
| 7 | | 405.00 | 45.00 | 28 | 7.29 |
| 8 | | 405.00 | 45.00 | 90 | 11.8 |
| 9 | AOT15 | 382.50 | 67.50 | 7 | 5.58 |
| 10 | | 382.50 | 67.50 | 28 | 6.97 |
| 11 | | 382.50 | 67.50 | 90 | 10.68 |
| 12 | AOT20 | 360.00 | 90.00 | 7 | 4.88 |
| 13 | | 360.00 | 90.00 | 28 | 6.49 |
| 14 | | 360.00 | 90.00 | 90 | 10.66 |
| 15 | AOT25 | 337.50 | 112.50 | 7 | 4.56 |
| 16 | | 337.50 | 112.50 | 28 | 6.39 |
| 17 | | 337.50 | 112.50 | 90 | 10.52 |
| 18 | AOT30 | 315.00 | 135.00 | 7 | 4.27 |
| 19 | | 315.00 | 135.00 | 28 | 5.13 |
| 20 | | 315.00 | 135.00 | 90 | 8.89 |

3. Sonuçlar ve tartışma

3.1. Eğilme dayanımı

AOT ikameli çimentoların ve referans çimentonun TS EN 196-1 standardına [73] göre yapılan 7, 28 ve 90. günlük kür süresi sonundaki ortalama eğilme dayanımı değerleri Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Üretilen çimentoların eğilme dayanımı deney sonuçları

Eğilme dayanımı verileri incelendiğinde, 7. hidratasyon gününde en düşük ve en yüksek dayanım değerlerinin sırasıyla %30 AOT ikameli AOT30 örneklerinden ve %5 AOT ikameli AOT5 örneklerinden elde edildiği görülmektedir. 7 günlük örneklerden elde edilen dayanım değerleri referans örnek dayanım değeri ile kıyaslandığında AOT5 örneğinin dayanım değerinin (6.36 MPa) referans örneğin dayanım değerinden (5.00 MPa) yaklaşık %27 daha yüksek, en düşük değerinde elde edildiği AOT30 örneğinin değerinin (4.27 MPa) ise referans örnekten yaklaşık %15 daha düşük olduğu bulunmuştur. 28 günlük hidratasyon süresinin sonunda en yüksek dayanım değerlerinin elde edildiği %5 AOT ikameli çimentolarına ait değerler, referans örneğe göre daha düşük olmakla birlikte bu oran yaklaşık %2 olarak gerçekleşmiştir. 28 günlük örneklerde ise en düşük değerlerin elde edildiği %30 AOT ikameli örneklerle referans numune değerleri arasındaki düşüş miktarı yaklaşık %34 olarak gerçekleşmiştir. 90 günlük örneklerde de 7 günlük hidratasyon günlerindeki örneklerden elde edilen eğilme dayanımı verilerindeki değişimlere benzer eğilimler gerçekleşmiştir. 90. günün sonunda en düşük ve en yüksek

değerler AOT30 ve AOT5 örneklerinden sırasıyla 8.89 MPa ve 12.44 MPa olarak elde edilmiştir. AOT5 ikameli örneklerin 90 günlük hidratasyon süreleri sonunda elde edilen dayanım değerleri referans örneğe göre yaklaşık %30 artış gösterirken AOT30 örnekleri referans örneğe göre %7 azalış göstermişlerdir. Diğer kür sürelerinden farklı olarak AOT10, AOT15, AOT20 ve AOT25 örneklerinin dayanım değerleri referans örneğin dayanım değerini aşarak sırasıyla yaklaşık %23, %12, %11 ve %10'luk artış eğilimi sergilemiştir. Her üç hidratasyon süresinden elde edilen değerler referans örnekle karşılaştırıldığında 7. günde %15'e, 28 günde %5'e ve 90 günde ise %15'e kadar AOT ikamesinin daha önceki çalışmalarda da [60] belirtilen dayanımlar üzerindeki faydalı etkisinden söz edilebilir. Ayrıca AOT'ler çimentoda mikro dolgu görevi yaparak dayanım gelişimine katkı yapmaktadır [77]. Örneklerin erken yaş dayanım gelişim hızlarının 90. gündekine göre düşük olması, erken yaştaki örneklerde görülen hidratasyon gelişim hızlarının daha az olmasına ve buna bağlı olarak dayanım gelişimini etkileyen daha az C-S-H üretilmesine atfedilebilir.

3.2. Modelleme ve doğrulama

Herhangi bir dönüşümden önce, eğilme dayanımı yanıtı p değeri (sonuç alma olasılığı), uyum eksikliği ve R kare bulguları gibi ilgili istatistiklerini karşılaştırarak tüm polinom modellerini yanıtla eşleştirmek için bir regresyon analizine tabi tutulmuştur [78]. Varyans analizine (ANOVA) dayalı olarak Çizelge 6, elde edilen P değerlerinin <0.05 olması, modelin anlamlı terimlerini göstermektedir. Bununla birlikte, modeldeki P-Değeri > 0.05 olduğundan model için bazı anlamsız terimler (AOT; AOT*AOT; çimento*AOT; AOT*hidratasyon süresi) önerilen model yeterliliğini artırmak için kaldırılmıştır. Sunulan modellere ait F değerlerinin anlamlı olduğu bulunmuştur (P değeri ile F değeri ters orantılı olması gerekir).

Çizelge 6. Eğilme dayanımı için varyans analizi

| Kaynak | DF | Adj SS | Adj MS | F-Değeri | P-Değeri | Standart sapma | Ortalama | Varyans katsayısı |
|---------------------------------------------------|----|---------|---------|----------|----------|----------------|----------|-------------------|
| Model | 5 | 112.918 | 22.5835 | 59.82 | 0.000 | | | |
| Doğrusal | 2 | 99.123 | 49.5617 | 131.27 | 0.000 | | | |
| Eğilme dayanımı | | | | | | 2.494 | 7.702 | 32.38 |
| Çimento | 1 | 7.693 | 7.6929 | 20.38 | 0.000 | 44.57 | 379.13 | 11.76 |
| Hidratasyon Süresi (Gün) | 1 | 84.427 | 84.4266 | 223.62 | 0.000 | 36.14 | 43.40 | 83.26 |
| Kare | 2 | 2.405 | 1.2027 | 3.19 | 0.072 | | | |
| Çimento*Çimento | 1 | 2.398 | 2.3977 | 6.35 | 0.024 | | | |
| Hidratasyon Süresi (Gün)*Hidratasyon Süresi (Gün) | 1 | 0.008 | 0.0076 | 0.02 | 0.889 | | | |
| 2-Yönlü etkileşim | | | | | | | | |
| Çimento*Hidratasyon Süresi (Gün) | 1 | 0.238 | 0.2383 | 0.63 | 0.440 | | | |
| Hata | 14 | 5.286 | 0.3776 | | | | | |
| Toplam | 19 | 118.203 | | | | | | |
| R ² | | %95.53 | | | | | | |
| Ayarlanmış R ² | | %93.93 | | | | | | |

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

Yanıt için kodlanmış faktörler açısından geliştirilen nihai matematiksel model Denklemler 1'de gösterilmiştir. Bu denklemden ve Çizelge 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

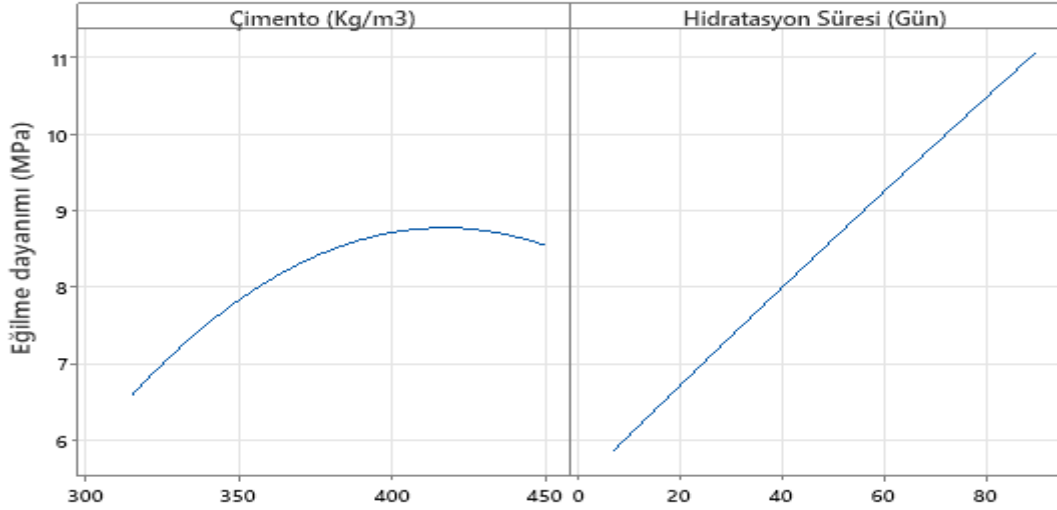
ile verilmiştir. YYM değerlendirmesi, ampirik bulguların ikinci dereceden modellere çok uygun olduğunu göstermiştir. Bulgular, eğilme dayanımı modeli için çimento ve hidratasyon süresi model terimlerinin çok yüksek bir güven düzeyiyle (P<0.05) önemli olduğunu göstermektedir.

$$\begin{aligned} \text{Eğilme dayanımı} = & -32,2 + 0,1783 \text{ Çimento} + 0,0942 \text{ Hidratasyon Süresi (Gün)} - \\ & 0,000209 \text{ Çimento} * \text{Çimento} - 0,000034 \text{ Hidratasyon Süresi (Gün)} * \text{Hidratasyon Süresi (Gün)} - \\ & 0,000073 \text{ Çimento} * \text{Hidratasyon Süresi (Gün)} \end{aligned} \quad (1)$$

Yanıt modellerinin uygunluk ve kalitesini değerlendirmek için regresyon katsayısı (R²) değeri kullanılmıştır. Çizelge 6'te gösterildiği gibi, tüm yanıt modelleri için R² değeri %95'in üzerindedir. Bu, tüm modellerin deneysel ve tahmin edilen veriler arasında yüksek derecede bir korelasyona ve verilerin regresyon çizgileri ile yakın bir uygunluğuna sahip olduğunu gösterir. Ek olarak, tüm yanıt modelleri için, aralarındaki fark tüm modeller için 0.2'den az olduğundan, tahmin edilen ve ayarlanmış R² değeri arasında iyi bir uyum vardır. Çizelge 5'teki verilerden, eğilme dayanımı yanıtının düşük standart sapmaya ve varyasyon katsayısına sahip olduğu görülebilir, bu da deneysel veriler ile geliştirilen model arasında daha yüksek korelasyonu temsil etmektedir.

3.3. Yanıtlar ve bileşenlerdeki varyans

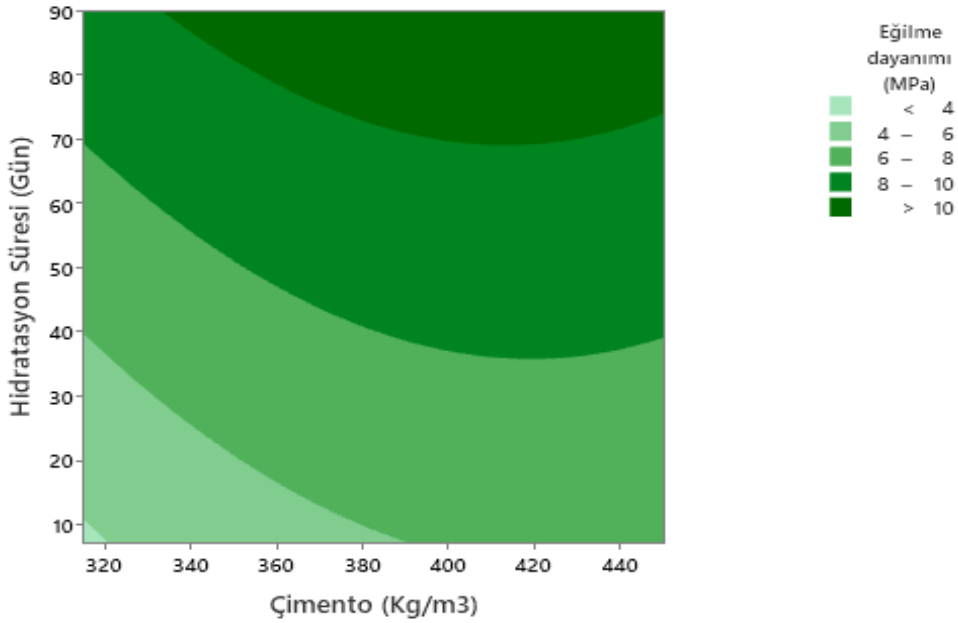
Şekil 2, her bir bileşenin eğilme dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir. Grafikler, modelin çimento ve hidratasyon süreleri değişkenlerindeki değişikliklere ne kadar duyarlı olduğunu göstermektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, çimento miktarının eğilme dayanımı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Diğer bir deyişle, çimento miktarı 400-450 kg/m³ arasında artırıldıkça eğilme dayanımı değerleri artarken, bu miktarların altında çimento kullanılması eğilme dayanımlarını azaltmaktadır. Grafikteki diğer bir değişken faktör olan hidratasyon süresi eğilme dayanımı ile lineer bir ilişki içerindedir. Hidratasyon süresi ilerledikçe eğilme dayanımı değerleri de orantısız olarak artış göstermektedir.



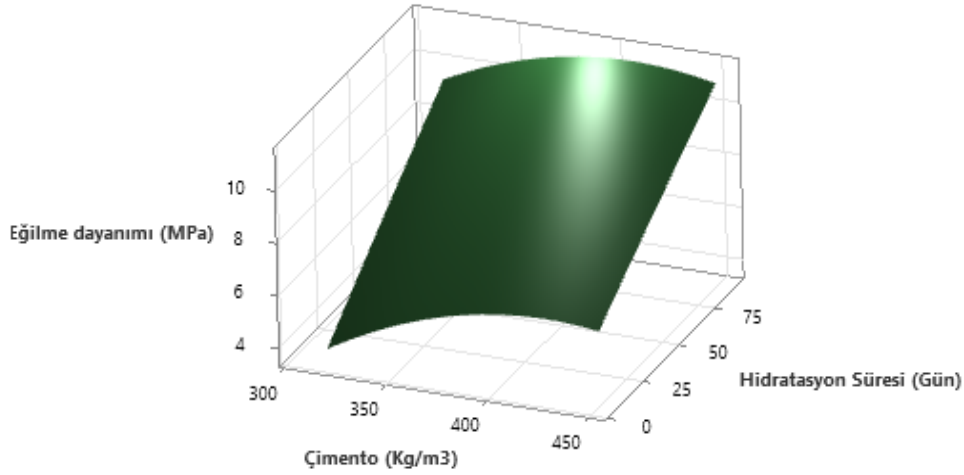
Şekil 2. Bileşen varyasyonlarının eğilme dayanımı üzerindeki etkisi

Ayrıca, yanıtlardaki bileşen etkileşimlerinin değerlendirilmesine yardımcı olmak ve yukarıda belirtilen hususları desteklemek için 2 ve 3 boyutlu kontur çizimleri de Şekil 3' ve Şekil 4'da sunulmuştur. Şekil 3, üretilen çimento kombinasyonları için çimento içeriklerinin ve hidrasyon sürelerinin eğilme dayanımı değerleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Çimento miktarlarındaki yaklaşık 350 kg/m^3 'ten fazla artış, eğilme dayanımlarında önemli artış değerleri ile sonuçlanmıştır. Genel olarak değişkenler dikkate alındığında, daha yüksek çimento

oranlarında ve daha uzun kür sürelerinde daha iyi eğilme dayanımı değerlerinin elde edildiği Şekil 3'deki kontur diyagramından görülmektedir. Bulgulara göre, Koçak ve arkadaşları ile uyumlu olarak çimento içeriği arttıkça çimentoların eğilme dayanımı belirgin şekilde artmıştır [79]. Bunun nedeni, matris yapısındaki yüksek silika içeriğinin kireç ile reaksiyonunun dayanım artışına katkı yapan ilave C-S-H jelinin oluşumunu desteklemesidir [10, 80].



Şekil 3. Farklı faktörler arasındaki kombinasyonun bir fonksiyonu olarak eğilme dayanımının 2 boyutlu tepki yüzeyi.

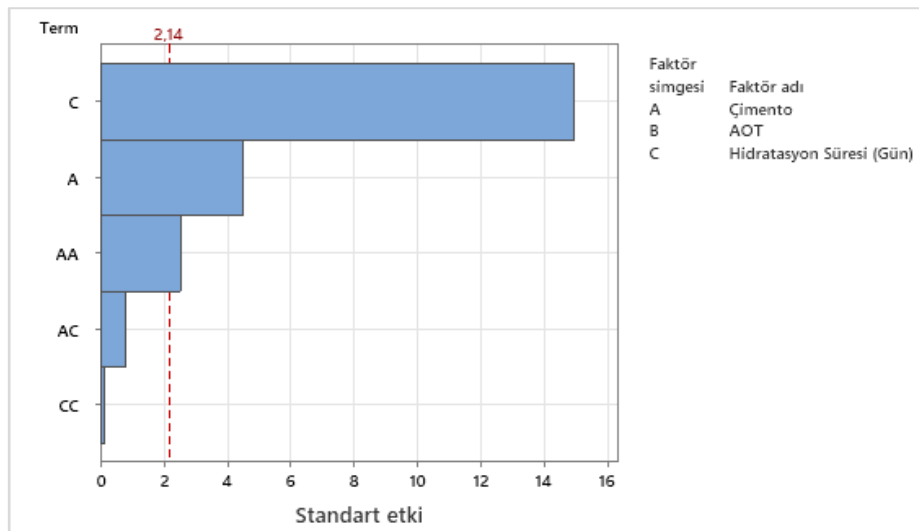


Şekil 4. Çimento içeriği ve hidrasyon süresinin eğilme dayanımı üzerindeki etkisinin 3 boyutlu gösterimi

Şekil 4, AOT'nin çimento ile belirli oranlarda ikame edilmesiyle üretilen betonlar için eğilme dayanımına karşı çimento (kg/m^3) ve hidrasyon süresinin (gün) yüzey grafiğini göstermektedir, grafikten daha yüksek eğilme dayanımı değerlerinin, çimento miktarının yüksek olduğu ve hidrasyon süresinin 90 gün olarak uygulanması ile elde edilebileceği anlaşılmaktadır. Ayrıca, AOT'nin çimento ile ikame edilmesiyle üretilen karışımlarda tercih edilen çimento miktarının Şekil 4'da gösterildiği gibi $400\text{-}450 \text{ kg/m}^3$ olduğu görülebilmektedir.

Herhangi bir sistemdeki girdilerin (değişkenlerin) çıktıları (yanıtları) etkileyip etkilemediğini tahmin etmek kesinlikle gereklidir. Çeşitli parametrelerin bu çalışmada

incelenen özellikler üzerindeki bireysel ve etkileşimli etkileri, yapılan regresyon analizine dayalı olarak belirlenmiştir. Bunun için kontur, pareto ve yüzey grafikleri oluşturulmuştur. Tepki yüzeyi tasarımı analiz edilerek üretilen pareto grafiği Şekil 5'da verilmiştir. Bu grafikten her bir değişkenin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi görülebilmektedir. Pareto grafiğinden, program yazılımı tarafından üretilen 2.14 değerinin sağında kalan değerlerin, eğilme dayanımı yanıtı üzerinde bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Grafikteki bar grafiği ne kadar büyükse etki oranı da o oranda yüksek olmaktadır.



Şekil 5. Eğilme dayanımı üzerine giriş parametrelerinin standartlaştırılmış etkisinin Pareto grafiği.

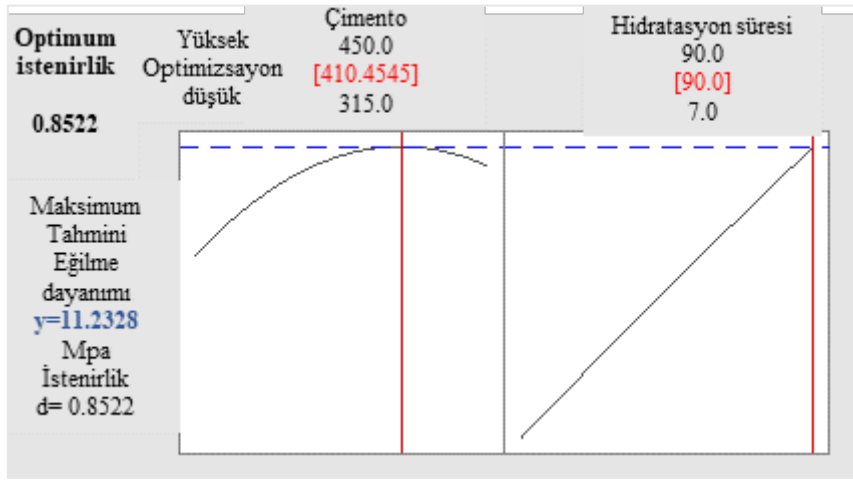
Pareto grafiğinden, hidrasyon süresinin etkisinin çıktı tepkisi (eğilme dayanımı) üzerinde en önemli etkiye sahip olduğu, ardından çimento bileşeninin lineer ve kare etkisinin olduğu ve değişkenler arasındaki etkileşim ile hidrasyon süresinin kare etkisinin eğilme dayanımı sonuçları üzerindeki etki derecesinin düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca, sonuçların tutarlılığı bakımından Pareto grafiğindeki sonuçların Anova sonuçlarını desteklediği söylenebilir.

3.4. Optimizasyon

Optimizasyon aşamasında, en iyi çözümü bulmak için YYM'yi temel alan değişkenler analiz edildikten sonra çok amaçlı bir eş zamanlı optimizasyon tekniği benimsenmiştir. Bir merkezi kompozit tasarımı yöntemi olarak çimentolar için optimum ayarları keşfetmek üzere Çizelge 7'eki gibi bir yanıt yüzeyi deney planı kullanılmaktadır. Örneğin, yanıtın hedefi, en az miktarda çimento en fazla miktarda AOT kullanarak maksimum eğilme dayanımı elde etmektir.

Çizelge 7. Optimizasyon deney planı parametreleri

| Yanıt | Amaç | En düşük | Hedef | En yüksek | Ağırlık | Önem |
|-----------------------|----------|----------|-------|-----------|---------|------|
| Eğilme dayanımı (MPa) | Maksimum | 4.27 | 12.44 | | 1 | 1 |



Şekil 6. Eğilme dayanımı yanıtı için en uygun değişken içerikleri

Önerilen karışım yaklaşık 410 kg/m^3 çimento içermekte ve 90 günlük hidrasyon süresinin daha yüksek eğilme dayanımı elde etmek için uygun olacağı optimizasyon sonuçlarından anlaşılmaktadır (Çizelge 8). Optimizasyon sonucunda program tarafından öngörülen eğilme dayanımı değeri ise 11.23MPa olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 8. Optimizasyon sonucu elde edilen çözüm sonuçları

| Çözüm | Çimento (kg) | Hidrasyon Süresi (gün) | Eğilme dayanımı (MPa) | Kompozit istenirliği |
|-------|--------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| 1 | 410.455 | 90 | 11.2328 | 0.852243 |

Matematiksel fonksiyonlar arasında istenirlik fonksiyonu, her bir yanıt için bir arzu edilirlilik fonksiyonu oluşturulmasına dayanan çok kriterli yöntemin önemli yönlerinden biridir.

Özet olarak, eğilme dayanımını içeren yanıt, boyutsuz bir değer olan bireysel arzu edilirlilik (di) ölçeğine dönüştürülür. Bireysel istenirlik değerleri, tamamen istenmeyen bir yanıt için 0'dan tamamen istenen bir yanıt için 1'e kadar değişir. Bu dönüşüm, yanıtın elde edilen sonuçların birleştirilmesine yardımcı olur. Çimentoların eğilme dayanımının yanıtı optimize edilir ve ideal fonksiyon elde edilir. Optimize edilmiş işlenebilirlik ve eğilme dayanımı için grafiksel eğimi ve doğruyu gösteren Şekil 6'daki gibi, çimentoların eğilme dayanımı için arzu edilirlilik varyasyonu, değişkenler ve yanıt için 0.8522'dur (%85.22). Elde edilen bu değer, son derece uygulanabilir sonuçlar anlamına gelmektedir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, beton üretiminde CEM IV/B çimentosu AOT kullanılarak ağırlıkça %0-%30 oranlardaki ikamelerinin etkisi araştırılmış ve üç bağımsız değişkenin (çimento, AOT ve hidrasyon süresi) çimento eğilme dayanımı yanıt değişkeni üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Söz konusu parametrelerin eş zamanlı etkisini araştırmak için sırasıyla YYM ve istenirlik fonksiyonu yöntemi ve çok amaçlı optimizasyon uygulanmıştır. Bu çalışmanın ana amacı, maksimum eğilme dayanımı olan bir çimento üretmek için AOT'lerin kullanımını en üst düzeye çıkarmak olduğundan, parametreleri ve tepkileri optimize etmek için farklı senaryolar araştırılmıştır. Bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak, aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Çimento ve AOT için optimal değer sırasıyla 410 kg/m³ ve 90 gündür. Bu durumda çimento eğilme dayanımı 11.23 MPa olarak bulunmuştur. Bu çalışmanın sonuçları, CEM IV/B çimentosunun bir kısmının AOT ile ikame edilmesiyle kabul edilebilir eğilme dayanımına sahip bir çimento üretilebileceğini göstermiştir.
- YYM kullanılarak geliştirilen ikinci dereceden modellerin, AOT içeren çimentoların eğilme dayanımlarını tahmin etmede etkili olduğu kanıtlanmıştır.
- Üretilen model için elde edilen R² değerinin %95'ten büyüktür. Bu nedenle, YYM'nin istatistiksel analiz sonuçları, geliştirilen modelin oldukça uygun olduğunu ve bu modelin çimento eğilme dayanımının tahmininde kullanılabileceğini ortaya koymuştur.
- Bu çalışmada AOT'lerin geri dönüştürülmesi için önerilen yöntem, maden atık sahaları ve çimento üretiminden kaynaklanan çevre sorunlarının azaltılmasının yanı sıra uygun mekanik özelliklere sahip çimento üretiminde de oldukça etkili ve kullanışlıdır.

TEŞEKKÜR

Yazar, laboratuvar desteği için Göltaş Çimento A.Ş.'ye ve AOT temininden dolayı Dakduklu Madencilik-Isparta'ya teşekkür eder.

KAYNAKLAR

1. Praneeth, S., Guo, R., Wang, T., Dubey, B.K., and Sarmah, A.K., "Accelerated carbonation of biochar reinforced cement-fly ash composites: Enhancing and sequestering CO₂ in building materials.", *Construction and Building Materials*, Vol. 244, Page 118363, 2020.
2. Suescum-Morales, D., Fernández-Rodríguez, J.M., and Jiménez, J.R., "Use of carbonated water to improve the mechanical properties and reduce the carbon footprint of cement-based materials with recycled aggregates.", *Journal of CO₂ Utilization*, Vol. 57, Page 101886, 2022.
3. Goergens, J., Belli, R., Schulbert, C., and Goetz-Neunhoeffler, F., "Influence of different CA₂/CA-ratios on hydration degree, AH₃ content and flexural strength investigated for a binder formulation of calcium aluminate cement with calcite.", *Cement and Concrete Research*, Vol. 165, Page 107090, 2023.
4. Gulmez, N., "Roles of aluminium shavings and calcite on engineering properties of cement-based composites.", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 277, Page 124104, 2020.
5. Li, L., Cao, M., and Yin, H., "Comparative roles between aragonite and calcite calcium carbonate whiskers in the hydration and strength of cement paste.", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 104, Page 103350, 2019.
6. Li, C., Krishnya, S., Ogino, M., Owaki, E., and Elakneswaran, Y., "Investigating the hydration characteristics of a new composite cementitious binder containing of slag and calcite.", *Construction and Building Materials*, Vol. 361, Page 129629, 2022.
7. McDonald, L.J., Carballo-Meilan, M.A., Chacartegui, R., and Afzal, W., "The physicochemical properties of Portland cement blended with calcium carbonate with different morphologies as a supplementary cementitious

- material.”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 338, Page 130309, 2022.
8. Goergens, J., Manninger, T., and Goetz-Neunhoeffer, F., “In-situ XRD study of the temperature-dependent early hydration of calcium aluminate cement in a mix with calcite.”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 136, Page 106160, 2020.
 9. Oyebisi, S., Olutoge, F., Raheem, A., Dike, D., and Bankole, F., “Sustainability assessment of cement concrete modified with bagasse ash and calcite powder.”, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 86, Pages 1–6, 2023.
 10. Özkan, Ş. and Ceylan, H., “The effects on mechanical properties of sustainable use of waste andesite dust as a partial substitution of cement in cementitious composites.”, *Journal of Building Engineering*, Vol. 58, Page 104959, 2022.
 11. Hamidi, M., Kacimi, L., Cyr, M., and Clastres, P., “Evaluation and improvement of pozzolanic activity of andesite for its use in eco-efficient cement.”, *Construction and Building Materials*, Vol. 47, Pages 1268–1277, 2013.
 12. Adhikary, S.K., Rudžionis, Ž., and Tučkutė, S., “Characterization of novel lightweight self-compacting cement composites with incorporated expanded glass, aerogel, zeolite and fly ash.”, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 16, Page e00879, 2022.
 13. Ma, B., Fernandez-Martinez, A., Mancini, A., and Lothenbach, B., “Spectroscopic investigations on structural incorporation pathways of FeIII into zeolite frameworks in cement-relevant environments.”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 140, Page 106304, 2021.
 14. Ledesma, R.B., Lopes, N.F., Bacca, K.G., et al., “Zeolite and fly ash in the composition of oil well cement: Evaluation of degradation by CO₂ under geological storage condition.”, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 185, Page 106656, 2020.
 15. Rudžionis, Ž., Adhikary, S.K., Manhanga, F.C., et al., “Natural zeolite powder in cementitious composites and its application as heavy metal absorbents.”, *Journal of Building Engineering*, Vol. 43, Page 103085, 2021.
 16. Weibel, R., Olivarius, M., Jakobsen, F.C., et al., “Thermogenetic degradation of early zeolite cement: An important process for generating anomalously high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs?”, *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 103, Pages 620–645, 2019.
 17. MolaAbasi, H., Saberian, M., and Li, J., “Prediction of compressive and tensile strengths of zeolite-cemented sand using porosity and composition.”, *Construction and Building Materials*, Vol. 202, Pages 784–795, 2019.
 18. Chen, J.J., Ng, P.L., Kwan, A.K.H., and Li, L.G., “Lowering cement content in mortar by adding superfine zeolite as cement replacement and optimizing mixture proportions.”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 210, Pages 66–76, 2019.
 19. Ahdal, A.Q., Amrani, M.A., Ghaleb, A.A.A., et al., “Mechanical performance and feasibility analysis of green concrete prepared with local natural zeolite and waste PET plastic fibers as cement replacements.”, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 17, Page e01256, 2022.
 20. Xuan, Z. and Jun, Z., “Influence of zeolite addition on mechanical performance and shrinkage of high strength Engineered Cementitious Composites.”, *Journal of Building Engineering*, Vol. 36, Page 102124, 2021.
 21. Sami, N.M., Moamen, O.A.A., El-Dessouky, M.I., and El-Kamash, A.M., “Assessment the leaching characteristics and long-term leaching behavior of some radionuclides from synthesized zeolite cement matrix.”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 143, Page 106357, 2021.
 22. Zheng, X., Liu, K., Gao, S., Wang, F., and Wu, Z., “Effect of pozzolanic reaction of zeolite on its internal curing performance in cement-based materials.”, *Journal of Building Engineering*, Vol. 63, Page 105503, 2023.

23. Kaufhold, S., Dohrmann, R., and Ufer, K., "Determining the extent of bentonite alteration at the bentonite/cement interface.", *Applied Clay Science*, Vol. 186, Page 105446, 2020.
24. Zhang, Y., Wang, S., Zhang, B., et al., "A preliminary investigation of the properties of potassium magnesium phosphate cement-based grouts mixed with fly ash, water glass and bentonite.", *Construction and Building Materials*, Vol. 237, Page 117501, 2020.
25. Zhao, Z., Chen, M., Zhong, X., et al., "Effects of bentonite, diatomite and metakaolin on the rheological behavior of 3D printed magnesium potassium phosphate cement composites.", *Additive Manufacturing*, Vol. 46, Page 102184, 2021.
26. Wei, J. and Gencturk, B., "Hydration of ternary Portland cement blends containing metakaolin and sodium bentonite.", *Cement and Concrete Research*, Vol. 123, Page 105772, 2019.
27. Yang, H., Long, D., Zhenyu, L., et al., "Effects of bentonite on pore structure and permeability of cement mortar.", *Construction and Building Materials*, Vol. 224, Pages 276–283, 2019.
28. Man, X., Aminul Haque, M., and Chen, B., "Engineering properties and microstructure analysis of magnesium phosphate cement mortar containing bentonite clay.", *Construction and Building Materials*, Vol. 227, Page 116656, 2019.
29. Chen, M., Liu, B., Li, L., et al., "Rheological parameters, thixotropy and creep of 3D-printed calcium sulfoaluminate cement composites modified by bentonite.", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 186, Page 107821, 2020.
30. Khandelwal, S. and Rhee, K.Y., "Evaluation of pozzolanic activity, heterogeneous nucleation, and microstructure of cement composites with modified bentonite clays.", *Construction and Building Materials*, Vol. 323, Page 126617, 2022.
31. Niu, M., Li, G., Cao, L., Wang, X., and Wang, W., "Preparation of sulphate aluminate cement amended bentonite and its use in heavy metal adsorption.", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 256, Page 120700, 2020.
32. Rahman, F., Adil, W., Raheel, M., Saberian, M., Li, J., and Maqsood, T., "Experimental investigation of high replacement of cement by pumice in cement mortar: A mechanical, durability and microstructural study.", *Journal of Building Engineering*, Vol. 49, Page 104037, 2022.
33. Karaaslan, C., Yener, E., Bağatur, T., Polat, R., Gül, R., and Hakkı Alma, M., "Synergic effect of fly ash and calcium aluminate cement on the properties of pumice-based geopolymer mortar.", *Construction and Building Materials*, Vol. 345, Page 128397, 2022.
34. Karaaslan, C., Yener, E., Bağatur, T., and Polat, R., "Improving the durability of pumice-fly ash based geopolymer concrete with calcium aluminate cement.", *Journal of Building Engineering*, Vol. 59, Page 105110, 2022.
35. Kabay, N., Miyan, N., and Özkan, H., "Utilization of pumice powder and glass microspheres in cement mortar using paste replacement methodology.", *Construction and Building Materials*, Vol. 282, Page 122691, 2021.
36. Adil, W., Ur Rahman, F., M.S Abdullah, G., Tayeh, B.A., and Zeyad, A.M., "Effective utilization of textile industry waste-derived and heat-treated pumice powder in cement mortar.", *Construction and Building Materials*, Vol. 351, Page 128966, 2022.
37. Szabó, R., Kristály, F., Nagy, S., Singla, R., Mucsi, G., and Kumar, S., "Reaction, structure and properties of eco-friendly geopolymer cement derived from mechanically activated pumice.", *Ceramics International*, Vol. 49, Issue 4, Pages 6756–6763, 2023.
38. Dener, M., Karatas, M., and Mohabbi, M., "Sulfate resistance of alkali-activated slag/Portland cement mortar produced with lightweight pumice aggregate.", *Construction and Building Materials*, Vol. 304, Page 124671, 2021.

39. Pınarcı, İ. and Kocak, Y., “Hydration mechanisms and mechanical properties of pumice substituted cementitious binder.”, *Construction and Building Materials*, Vol. 335, Page 127528, 2022.
40. Sarıdemir, M., Çelikten, S., and Yıldırım, A., “Mechanical and microstructural properties of calcined diatomite powder modified high strength mortars at ambient and high temperatures.”, *Advanced Powder Technology*, Vol. 31, Issue 7, Pages 3004–3017, 2020.
41. Mota dos Santos, A.A. and Cordeiro, G.C., “Investigation of particle characteristics and enhancing the pozzolanic activity of diatomite by grinding.”, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 270, Page 124799, 2021.
42. Luan, X., Li, J., Liu, L., and Yang, Z., “Preparation and characteristics of porous magnesium phosphate cement modified by diatomite.”, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 235, Page 121742, 2019.
43. Li, J., Zhang, W., Li, C., and Monteiro, P.J.M., “Eco-friendly mortar with high-volume diatomite and fly ash: Performance and life-cycle assessment with regional variability.”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 261, Page 121224, 2020.
44. Hassan, H.S., Abdel-Gawwad, H.A., Vásquez-García, S.R., et al., “Cleaner production of one-part white geopolymers using pre-treated wood biomass ash and diatomite.”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 209, Pages 1420–1428, 2019.
45. Chen, M., Li, L., Wang, J., et al., “Rheological parameters and building time of 3D printing sulphoaluminate cement paste modified by retarder and diatomite.”, *Construction and Building Materials*, Vol. 234, Page 117391, 2020.
46. Sun, M., Zou, C., and Xin, D., “Pore structure evolution mechanism of cement mortar containing diatomite subjected to freeze-thaw cycles by multifractal analysis.”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 114, Page 103731, 2020.
47. Ma, R., Wang, M., Li, X., and Liu, T., “Experimental investigation on dynamic mechanical properties of sandy clay treated with alkali-activated metakaolin cement and discrete polypropylene fibers.”, *Underground Space*, Vol. 7, Issue 6, Pages 1036–1055, 2022.
48. Perez-Cortes, P., Cabrera-Luna, K., and Escalante-Garcia, J.I., “Alkali-activated limestone/metakaolin cements exposed to high temperatures: Structural changes.”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 122, Page 104147, 2021.
49. Burciaga-Díaz, O. and Escalante-García, J.I., “Structural transition to well-ordered phases of NaOH-activated slag-metakaolin cements aged by 6 years.”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 156, Page 106791, 2022.
50. Shah, V., Parashar, A., and Scott, A., “Understanding the importance of carbonates on the performance of Portland metakaolin cement.”, *Construction and Building Materials*, Vol. 319, Page 126155, 2022.
51. Li, Q. and Fan, Y., “Rheological evaluation of nano-metakaolin cement pastes based on the water film thickness.”, *Construction and Building Materials*, Vol. 324, Page 126517, 2022.
52. Ramadan, M., Kohail, M., Abadel, A.A., Alharbi, Y.R., Tuladhar, R., and Mohsen, A., “De-aluminated metakaolin-cement composite modified with commercial titania as a new green building material for gamma-ray shielding applications.”, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 17, Page e01344, 2022.
53. Rakhimova, N.R. and Rakhimov, R.Z., “Reaction products, structure and properties of alkali-activated metakaolin cements incorporated with supplementary materials – a review.”, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 8, Issue 1, Pages 1522–1531, 2019.
54. Shah, V. and Scott, A., “Pozzolanic characteristics of silica recovered from olivine.”, *Construction and Building Materials*, Vol. 332, Page 127378, 2022.

55. Westgate, P., Ball, R.J., and Paine, K., "Olivine as a reactive aggregate in lime mortars.", *Construction and Building Materials*, Vol. 195, Pages 115–126, 2019.
56. Wang, X., Guo, M.Z., and Ling, T.C., "Review on CO₂ curing of non-hydraulic calcium silicates cements: Mechanism, carbonation and performance.", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 133, Page 104641, 2022.
57. Gao, X., Yu, Q.L., Lazaro, A., and Brouwers, H.J.H., "Investigation on a green olivine nano-silica source based activator in alkali activated slag-fly ash blends: Reaction kinetics, gel structure and carbon footprint.", *Cement and Concrete Research*, Vol. 100, Pages 129–139, 2017.
58. Lazaro, A., Brouwers, H.J.H., Quercia, G., and Geus, J.W., "The properties of amorphous nano-silica synthesized by the dissolution of olivine.", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 211–212, Pages 112–121, 2012.
59. Quercia, G., Brouwers, H.J.H., Garnier, A., and Luke, K., "Influence of olivine nano-silica on hydration and performance of oil-well cement slurries.", *Materials & Design*, Vol. 96, Pages 162–170, 2016.
60. Achang, M. and Radonjic, M., "Adding olivine micro particles to Portland cement based wellbore cement slurry as a sacrificial material: A quest for the solution in mitigating corrosion of wellbore cement.", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 121, Page 104078, 2021.
61. Azizpour, F. and Qaderi, F., "Optimization, modeling and uncertainty investigation of phenolic wastewater treatment by photocatalytic process in cascade reactor.", *Environment, Development and Sustainability*, Vol. 22, Issue 7, Pages 6315–6342, 2020.
62. Khalegh, R. and Qaderi, F., "Optimization of the effect of nanoparticle morphologies on the cost of dye wastewater treatment via ultrasonic/photocatalytic hybrid process.", *Applied Nanoscience (Switzerland)*, Vol. 9, Issue 8, Pages 1869–1889, 2019.
63. Tamadoni, A. and Qaderi, F., "Environmental-economical assessment of the use of ultrasonication for pre-treatment of the soils contaminated by phenanthrene.", *Journal of Environmental Management*, Vol. 259, Page 109991, 2020.
64. Qaderi, F., Sayahzadeh, A.H., and Azizi, M., "Efficiency optimization of petroleum wastewater treatment by using of serial moving bed biofilm reactors.", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 192, Pages 665–677, 2018.
65. Rouzafzay, F., Shidpour, R., Al-Abri, M.Z.M., Qaderi, F., Ahmadi, A., and Myint, M.T.Z., "Graphene@ZnO nanocompound for short-time water treatment under sun-simulated irradiation: Effect of shear exfoliation of graphene using kitchen blender on photocatalytic degradation.", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 829, Page 154614, 2020.
66. Amiri, H., Azadi, S., Karimaei, M., Sadeghi, H., and Farshad Dabbaghi, "Multi-objective optimization of coal waste recycling in concrete using response surface methodology.", *Journal of Building Engineering*, Vol. 45, Page 103472, 2022.
67. Sheikholeslami, Z., Kebria, D.Y., and Qaderi, F., "Application of γ -Fe₂O₃ nanoparticles for pollution removal from water with visible light.", *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 299, Page 112118, 2020.
68. Qaderi, F., Sayahzadeh, A.H., Azizpour, F., and Vosughi, P., "Efficiency modeling of serial stabilization ponds in treatment of phenolic wastewater by response surface methodology.", *International Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 16, Issue 8, Pages 4193–4202, 2019.
69. Paruthi, S., Khan, A.H., Kumar, A., et al., "Sustainable cement replacement using waste eggshells: A review on mechanical properties of eggshell concrete and strength prediction using artificial neural network.", *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 18, Page e02160, 2023.
70. Abdellatif, M., Elemam, W.E., Alanazi, H., and Tahwia, A.M., "Production and optimization of sustainable cement brick

incorporating clay brick wastes using response surface method.”, *Ceramics International*, Vol. 49, Issue 6, Pages 9395–9411, 2023.

71. Hafez, H., Teirelbar, A., Kurda, R., Tošić, N., and de la Fuente, A., “Pre-bcc: A novel integrated machine learning framework for predicting mechanical and durability properties of blended cement concrete.”, *Construction and Building Materials*, Vol. 352, Page 129019, 2022.

72. TS EN 197-1, Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Ankara, 2012.

73. TS EN 196-1, Çimento deney metodları- Bölüm 1: Dayanım tayini, Ankara, 2016.

74. TS EN 196-6: Çimento deney yöntemleri - Bölüm 6: İncelik tayini, 2020.

75. Montgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments*. Wiley & Sons, Mishawaka, IN, U.S.A, 2017.

76. Jimma, B.E. and Rangaraju, P.R., “Chemical admixtures dose optimization in pervious concrete paste selection – A statistical approach.”, *Construction and Building Materials*, Vol. 101, Pages 1047–1058, 2015.

77. Achang, M. and Radonjic, M., “Adding olivine micro particles to Portland cement based wellbore cement slurry as a sacrificial material: A quest for the solution in mitigating corrosion of wellbore cement.”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 121, Page 104078, 2021.

78. Elemam, W.E., Abdelraheem, A.H., Mahdy, M.G., and Tahwia, A.M., “Optimizing fresh properties and compressive strength of self-consolidating concrete.”, *Construction and Building Materials*, Vol. 249, Page 118781, 2020.

79. Koçak, B., İslam Şahin, Y., and Koçak, Y., “Portland Çimentosunun Eğilme Dayanımına Yüksek Fırın Cürufu Etkisinin Bulanık Mantık ve ANFIS ile Tahmini”, *Eskişehir Türk Dünyası Uygulama ve Araştırma Merkezi Bilişim Dergisi*, Cilt 4, Sayı 1, Sayfa 17-24, 2023.

80. Ng, K.M., Tam, C.M., and Tam, V.W.Y., “Studying the production process and mechanical properties of reactive powder concrete: a Hong Kong study.”, <http://dx.doi.org/10.1680/mac9.00063>, Vol. 62, Issue 9, Pages 647–654, 2015.